

POLITECNICO DI TORINO

Corso di laurea in Architettura per il progetto sostenibile

Tesi di Laurea Magistrale

**Costruzioni contemporanee in bambù:  
Le connessioni dei culmi tramite corda**



**Relatore:**

Prof. Andrea Bocco

**Candidato:**

Jessica Jackebed Leão França

Settembre 2018

Vorrei ringraziare il prof. Andrea Bocco, relatore di questa tesi di laurea, per aver accettato la mia proposta e per avermi guidata con molta disponibilità, pazienza e precisione in tutte le fasi del lavoro. Lo ringrazio per tutto quello che mi ha insegnato con chiarezza e per il modo con cui mi ha fatto ragionare sul tema per mantenere sempre presente l'obiettivo.

Ringrazio Margherita Bertoli e Matteo Mannini, insegnanti di CanyaViva Italia, e Jonathan Cory Wright, architetto di CanyaViva, per la disponibilità nel chiarire ogni dubbio e per il materiale quasi tutto inedito e in buona parte sconosciuto che mi è stato fornito.

Due forti ringraziamenti oltreoceano vanno all'architetto Markus Roselieb per il suo tempo dedicatomi nelle skypecall per la spiegazione del suo progetto, e all'ingegnere Esteban Morales Montoya per la sua disponibilità e fiducia nel fornirmi il materiale inedito.

Ringrazio Luca, la persona più speciale per me, per tutto il supporto, morale e pratico, che mi ha dato durante questo lungo e arduo percorso, grazie al quale ho trovato forza per crederci.

A mia mamma e a Rino. Grazie, grazie e grazie, dal profondo del cuore per ogni cosa.

Infine, mi do una pacca sulle spalle per la mia perseveranza e determinazione dovute alla fede che mi è stata concessa per aver fiducia in qualsiasi circostanza.

Obrigada, sem voces nada disso teria se realizado!

Jessica Jackebed Leão França

Torino, 17/09/2018.

# INDICE

<b>Ringraziamenti</b>	<b>1</b>
<b>Introduzione</b>	<b>2</b>
<b>1 - Bambù. La pianta e le caratteristiche del materiale</b>	<b>4</b>
1.1 Classificazione botanica	5
1.2 Classificazione	8
1.3 Rizoma: bambù monopodiale e simpodiale	8
1.4 Distribuzione geografica e condizioni climatiche	10
1.5 Il culmo	11
1.6 Ciclo di vita	16
1.7 Contenuto di umidità	18
1.8 Dilatazione e contrazione	19
1.9 Resistenza al fuoco	19
1.10 Proprietà fisiche	20
1.11 Proprietà meccaniche	21
1.12 Standard internazionali	26
1.13 Conclusioni	27
<b>2 - Il bambù come materiale da costruzione</b>	<b>28</b>
2.1 Un materiale versatile	29
2.2 Utilizzo in ambito architettonico	30
2.3 Sistemi costruttivi: telaio, capriate e archi	33
2.3.1 Capriate	34
2.3.2 Archi	40
2.4 I Mudhif nelle paludi mesopotamiche	47
2.5 Caso studio: New Assembly hall of Panyaden International school	49
<b>3 - I giunti in corda</b>	<b>83</b>
3.1 La struttura di una corda	84
3.2 Il nodo e le sue proprietà	84
3.3 Tipologie di connessioni tra aste di bambù	85
3.4 Le tecniche di connessione diretta	88
3.5 Casi studio	93
3.5.1 Bamboo Ark	93
3.5.2 Ujung Alang Community Center	101
3.6 Conclusioni	105

<b>4 - Il metodo Canyaviva</b>	<b>106</b>
4.1 CanyaViva	107
4.2 Le opere di CanyaViva	108
4.3 Costruzione di una struttura temporanea in bambù destinata ad attività culturale: il processo costruttivo	112
4.3.1 Raccolta, stagionatura e trasporto	112
4.3.2 Pulizia	113
4.3.3 Classificazione	114
4.3.4 Costruzione dei fasci	117
4.3.5 Connessione dei fasci e incurvatura dell'arco	127
4.3.6 Accorgimenti per le fondazioni e per la durabilità delle canne	133
4.3.7 Messa in opera dell'arco	136
4.3.8 La copertura	138
4.4 Elaborati grafici del progetto di cui al 4.3	143
4.5 Sintesi sui nodi, sulle legature, e sulle corde	148
4.6 Conclusioni	149
4.7 Studio del comportamento meccanico degli archi di canna Arundo donax secondo il metodo CanyaViva	153
4.7.1 Prova di flesso-compressione su tre archi	153
4.7.2 Risultati della prova a flesso-compressione	156
4.7.3 Prove di carico a flessione sulle provette	160
4.7.4 Risultati della prova a flessione	162
4.7.5 Conclusioni	163
<b>5 - Ricerca qualitativa sulle connessioni in bambù e corda</b>	<b>165</b>
5.1 Materiali	166
5.2 Nodo triplo parlato	170
5.3 Nodo diagonale	172
5.4 Legatura per treppiede	177
5.5 Connessione di due elementi perpendicolari giacenti sullo stesso piano	179
5.6 Connessione di tre elementi non perpendicolari giacenti sullo stesso piano	183
<b>6 - Conclusioni finali</b>	<b>189</b>
6.1 Considerazioni generali: domande, sfide, obiettivi e aspettative	190
6.2 Quadro sintetico dei risultati	191
6.3 Fattibilità della tecnologia in bambù legato	194
6.4 Confronti tra i progetti	196
6.5 Limiti dello studio e sbocchi futuri	197

0

# INTRODUZIONE

Da piccola costruivo aquiloni in bambù splittato. A Belo Horizonte, sopra i tetti piani in cemento armato, lo si faceva volare molto in alto, fino a farlo diventare un puntino. Era leggero e molto flessibile, le varie parti erano collegate tramite legature.

Durante il percorso universitario sono stati affrontati molti materiali e tecniche costruttive, ma è rimasta la curiosità nel saperne di più sul “oro verde dell’uomo povero” (Atal Bihari Vajpayee, 1996), e sulle sue applicazioni nel campo edile.

Il bambù è un materiale naturale che merita particolari attenzioni nel campo dell’architettura sostenibile. Questo grazie alle sue magnifiche caratteristiche meccaniche che saranno descritte brevemente all’inizio di questo lavoro.

Le motivazioni che mi hanno spinto ad approfondire il tema hanno una duplice natura. L’interesse nei confronti del materiale, che è stato influenzato da ricordi ed esperienze a diretto contatto con la materia. L’ambizione di raggiungere un’architettura sempre più sostenibile e che sia contemporaneamente fattibile. Questi due punti hanno portato a indagare su un campo, ancora di nicchia, della tecnologia delle costruzioni in bambù: la tecnologia del sistema costruttivo in bambù con connessioni in corda; questo ha rappresentato la base su cui ho fondato la mia ricerca.

L’obiettivo di questa tesi è quello di fornire un’analisi dettagliata sulle costruzioni contemporanee in bambù con connessioni realizzate tramite corda, e mostrare la fattibilità del sistema costruttivo.

Il primo approccio al tema si è orientato su ricerca e lettura di testi di riferimento sullo specifico argomento. Questi hanno costituito una base importante nonché fondamentale per il successivo sviluppo del lavoro. I vari testi sono stati confrontati al fine di ottenere una completa e specifica informazione sul tema. I confronti con altre fonti attendibili presenti sul web sono stati molto utili ma di minor importanza rispetto ai testi. Si è cercato di non dilungare il testo su aspetti già trattati in altre tesi, come ad esempio le caratteristiche della pianta e del materiale, L’idea era di affrontare sin da subito la questione delle connessioni in corda.

È stato dapprima svolto un lavoro di ricerca teorica sulla regola d’arte della tecnologia di cui si parla. Successivamente, la partecipazione attiva nell’attività di costruzione con bambù e corda è stata fondamentale per mettere in pratica alcuni dei concetti studiati.

Si sono riportati nel dettaglio alcuni casi studio di rilevanza, concettualmente simili ma con alcuni aspetti diversi, che dimostrano la realizzabilità attuale del sistema. E per comprenderli a fondo è stato importante il dialogo diretto con gli autori dell’opera.

Infine si è voluto mettere alla prova e realizzare concretamente alcune connessioni tra quelle viste durante lo svolgimento della tesi, per capirne il funzionamento in generale tramite una ricerca qualitativa.

La tesi si articola in sei capitoli secondo il seguente filo logico: nel primo capitolo sono fornite informazioni generali sulla pianta e sulle sue caratteristiche meccaniche; infine un cenno agli standard internazionali del settore. Nel secondo capitolo si affronta l’utilizzo del bambù in ambito architettonico riportando tecniche e sistemi costruttivi in bambù come telaio, capriate e, in particolare, archi. Nell’ultima parte si riporta il caso studio del Bamboo Sports Hall della Panyaden School, costruzione del 2017 che ha vinto 4 premi fino a oggi. Il terzo capitolo amalgama il concetto delle connessioni tra elementi in bambù e delle connessioni in legature; a tal fine si redige una descrizione teorica sulle tipologie di connessioni e si approfondisce il

discorso delle legature e delle corde; infine si classificano 31 connessioni, tratte da testi di riferimento, scelte tra quelle che più rappresentano il tema della tesi. Nel quarto capitolo si racconta l'esperienza sul campo avuta sulla costruzione di una struttura in bambù e corda destinata a un festival culturale, e se ne descrive nel dettaglio l'intero metodo, riportando alla fine del capitolo le prove meccaniche eseguite dallo studio di progettazione. Nel penultimo capitolo si svolge una ricerca qualitativa su 7 connessioni per capirne il funzionamento. Nel sesto capitolo, infine, si tirano le conclusioni commentando i risultati dei casi studio e della ricerca qualitativa, la fattibilità del sistema costruttivo, il confronto tra i vari casi, i limiti del caso studio e le possibilità di sbocchi futuri.

Grazie a questo lavoro di ricerca è stato possibile approfondire la conoscenza dell'impiego del bambù nelle costruzioni contemporanee i cui giunti sono realizzati tramite legature di vario tipo, e arrivare a conclusioni positive tramite osservazioni che saranno espone nel capitolo finale della tesi.

1

# BAMBÙ

La pianta e le caratteristiche del materiale

## 1.1 CLASSIFICAZIONE BOTANICA

Il bambù è una pianta di consistenza legnosa che appartiene alla Divisione delle Fanerogame, e in particolare alla Sottodivisione delle Angiosperme (piante con semi racchiusi). Queste ultime si dividono in due classi: Dicotiledoni e Monocotiledoni; nella seconda classe si colloca il bambù assieme ad altre piante (palme, orchidee, frumento, gigli, tulipano, ecc.); I Monocotiledoni sono caratterizzati da un tipo di crescita detta primaria, sviluppandosi solo longitudinalmente e non diametricamente come avviene per le Dicotiledoni (si parla in questo caso di crescita secondaria), tipicità dovuta alla struttura molecolare delle piante.

Di seguito si elencano le sottodivisioni delle Fanerogame<sup>1</sup>:

- Gimnosperme (piante con semi scoperti, es.: pini, abeti, cipressi, conifere). Sono caratterizzate da due tipi di crescita: primaria (longitudinale) e secondaria (diametrica), parte dei tessuti primari sono sostituiti da altri tessuti secondari (cambi) durante un graduale accrescimento diametrico del fusto<sup>2</sup>.
- Angiosperme (piante con semi racchiusi):
  - a) Monocotiledoni: il seme contiene una sola fogliolina embrionale, detta cotiledone. Crescono solamente in altezza per via della crescita primaria. Esempi: bambù, palme, orchidee, frumento, gigli, tulipano, ecc.
  - b) Dicotiledoni: il seme contiene due cotiledoni (le primissime foglioline che nutrono il seme durante i primi stadi dello sviluppo). Queste piante crescono in due direzioni a motivo della della crescita primaria e secondaria. Esempi: butulacee, fagacee (quercia, faggio, castagno, pioppo, ciliegio, melo), ecc.

Le Monocotiledoni hanno fasci vascolari, floema e xilema (tessuti conduttori), disposti casualmente (si veda Figura 1), mentre nelle Dicotiledoni i fasci vascolari sono disposti come cilindri anulari. Queste piante producono fiori e semi.

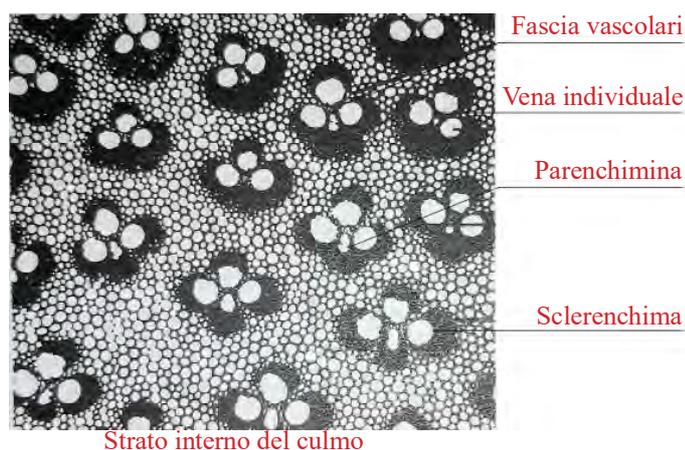


Figura 1. Struttura anatomica del bambù, in S. GASS, *IL 31 Bambus/Bamboo*, Stuttgart, Institut für leichte Flächentragwerke, Stuttgart, 1985, p. 46.

<sup>1</sup> [http://www.itaspastori.gov.it/wordpress/wp-document/Studenti/Documentazione%20scaricabile/GuidoGandelli\\_BOTANICA\\_MARZO\\_2016.pdf](http://www.itaspastori.gov.it/wordpress/wp-document/Studenti/Documentazione%20scaricabile/GuidoGandelli_BOTANICA_MARZO_2016.pdf), consultato il 21/07/2018.

<sup>2</sup> [http://www.treccani.it/enciclopedia/monocotiledoni\\_%28Enciclopedia-dei-ragazzi%29/](http://www.treccani.it/enciclopedia/monocotiledoni_%28Enciclopedia-dei-ragazzi%29/)

Nelle piante Monocotiledoni si trova la Famiglia delle Graminacee, comunemente chiamate erbe, alla quale appartiene il bambù. Questa è una delle famiglie di piante più grandi e importanti: ci sono circa 4.000 specie distribuite nel pianeta. Alle graminacee appartengono anche il riso, il mais e la canna da zucchero.

Con il termine bambù si intendono tutte le graminacee ad albero (che producono legname) o a cespuglio, generalmente di grandi dimensioni (alcune raggiungono i 40 metri), aventi rizoma strisciante, ramificato, fusti perenni e numerosi rami alterni. Il fusto della pianta è cavo e perciò viene detto culmo. Il culmo nello strato esterno è liscio, nodoso, ed è molto duro a causa dell'alto contenuto di silice e per l'abbondanza delle fibre che lo costituiscono. La lignificazione della parete cellulare, il tessuto e le proprietà tecnologiche sono molto simili alle caratteristiche del legno. Il bambù lignifica, e diversamente dagli alberi dicotiledoni è caratterizzato da una struttura composta di un unico anello (si veda Figura 3).<sup>3</sup>

Le seguenti caratteristiche distinguono il bambù dalle comuni erbe: la longevità del culmo, la ramificazione e la lignificazione.

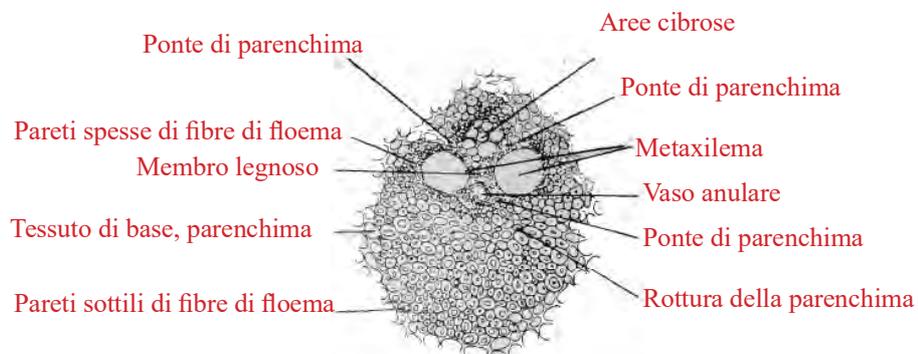


Figura 2. Fasci vascolari del bambù, in S. GASS, op. cit., p. 47.

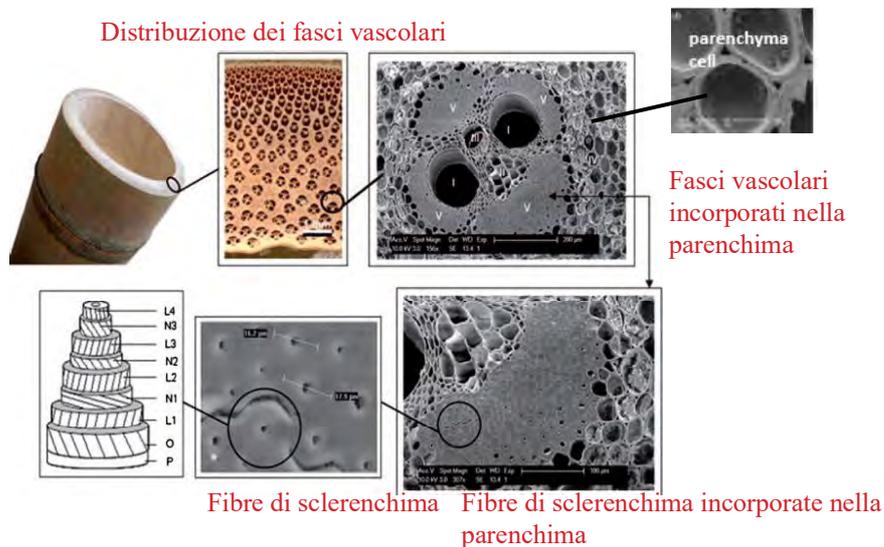


Figura 3. Sezione trasversale del bambù: i fasci vascolari, <http://www.greenstarbikes.com/exceptional-properties/>, consultato il 21/07/2018.

<sup>3</sup> <http://www.treccani.it/enciclopedia/bambu>, consultato il 23/07/2018.

## Le fibre

La sezione trasversale di un segmento di canna di bambù (si veda Figura 1) contiene le fibre dei fasci vascolari di aspetto simile a macchie scure, la lignina di colore giallastro (sostanza organica che lega le fibre vegetali). La distribuzione dei fasci vascolari viene mostrata nella Figura 3. I fili di fibra dei fasci vascolari costituiscono gruppi più densi nello strato periferico dove la resistenza è per questo motivo maggiore.

Nello strato interno della canna le fibre si distribuiscono parallele al suo asse. Tali fibre hanno una resistenza a trazione pari a  $392 \text{ N/mm}^2$ ; il valore è superiore a quello del legno ( $49 \text{ N/mm}^2$ ) e a quello all'acciaio ( $363 \text{ N/mm}^2$ ). La caratteristica di fendersi in direzione longitudinale (splitting) è dovuta all'orientamento parallelo delle fibre. Tuttavia in corrispondenza dei nodi le fibre si incrociano in ogni direzione, ed è qui che il culmo acquisisce maggior resistenza<sup>4</sup>. L'incrocio delle fibre in corrispondenza dei nodi e l'alto contenuto di silice presente nello strato esterno, permettono al culmo di resistere a sollecitazioni meccaniche, e agli agenti chimici e vegetali.

## Le cellule

Il culmo trasporta acqua e nutrienti dalla radice fino alla punta più estrema delle foglie, e restituisce i composti organici con procedimento inverso.

Le pareti cellulari delle piante sono composte da un sistema molto complesso che comprende diversi tipi di molecole. Fra queste, di fondamentale importanza, c'è la cellulosa.

Dalla combinazione con altre molecole, come la lignina, le pareti cellulari sono irrigidite. La cellulosa e le parti della emicellulosa servono come sostanze per la struttura, mentre la lignina è utile come legante e riempimento.

Pertanto, la proporzione di cellulosa determina la resistenza a trazione e a flessione del culmo, mentre la lignina determina la resistenza a compressione del tessuto.<sup>5</sup>

## I fasci fibrovascolari

Una catena di cellule compone la fibra e i fili delle fibre di un tessuto vascolare sono raggruppate insieme in fasci fibrovascolari. La forma, l'orientamento, la densità e la distribuzione dei fasci fibrovascolari caratterizza la struttura anatomica del tessuto di bambù e hanno un'influenza forte e diretta sulle proprietà del materiale e sulle applicazioni della canna.

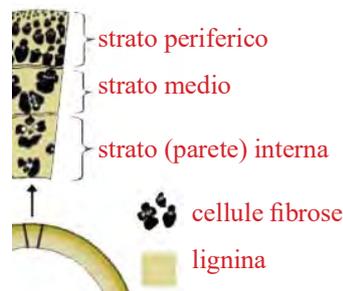


Figura 4. Anatomia del bambù, <https://www.slideshare.net/ganapathymohan/bamboo-70267889>, consultato il 23/07/2018.

<sup>4</sup> S. GASS, op. cit., p. 67.

<sup>5</sup> S. GASS, op. cit., p. 71.

## 1.2 CLASSIFICAZIONE

Regno: piante

Gruppo: angiosperme monocotiledoni

Famiglia: poacee (graminacee)

Sottofamiglia: *bambusoideae*

Tribù:

1-*Bambuseae* (boschi tropicali): 9 sottotribù e 91 generi

2-*Arundinarieae* (boschi temperati): 1 sottotribù e 30 generi

3-*Olyreae* (bambù erbaceo): 3 sottotribù e 21 generi

Totale: 3 tribù, 13 sottotribù, 142 generi e 1400 specie<sup>6</sup>.

La tribù più numerosa è la *bambuseae* che risiede nelle regioni tropicali ed alla quale appartengono alcuni bambù giganti. Le sue principali sottotribù sono:

- *Bambusinae*
- *Arundinaeiinae*
- *Guaduinae*
- *Melocaminae*

## 1.3 RIZOMA: BAMBÙ MONOPODIALE E SIMPODIALE

I rizomi costituiscono la struttura sotterranea del bambù, e sono molto simili per l'aspetto al culmo data la presenza di internodi e nodi dai quali si sviluppano germogli e radici. L'apice del rizoma è appuntito e molto resistente perciò riesce a penetrare e diffondersi nel suolo. La loro funzione è quella di supporto, espansione e trasferimento dell'energia vitale.

I rizomi formano un sistema di rete in grado di stabilizzare i pendii e proteggerli dall'erosione causata dalle acque e dai forti venti. Inoltre ritarda il drenaggio e l'assorbimento dell'acqua piovana. È molto utile come filtro per i rifiuti e le acque superficiali inquinate che sono prodotte dalle aziende agricole<sup>7</sup>.

Il bambù si suddivide in due gruppi a seconda del tipo di rizoma e della conseguente conformazione verticale della canna. Essi sono<sup>8</sup>:

1- Bambù leptomorfo monopodiale o strisciante: i rizomi crescono orizzontalmente e spesso con una velocità e vigore sorprendenti, in cerca di umidità e luce solare. Ogni internodo contiene una gemma dormiente da cui si potrà sviluppare un nuovo rizoma nella direzione orizzontale, oppure un nuovo culmo verticale. Questi rizomi possono estendersi più di 5 metri entro un anno, e in uno stesso rizoma possono nascere diversi culmi. Per questo motivo i bambù monopodiali tendono ad essere molto invasivi. Le specie monopodiali si sviluppano meglio nelle regioni sub tropicali con clima temperato<sup>9</sup>.

<sup>6</sup> M. CARDENAS LAVERDE, *Il bambù come materiale da costruzione: caratteristiche fisiche e meccaniche, tecnologie costruttive*, Napoli, Sistemi editoriali, 2008, p. 7.

<sup>7</sup> [http://www.bambueco.com/struttura\\_bambu\\_10.html](http://www.bambueco.com/struttura_bambu_10.html), consultato il 23/07/2018.

<sup>8</sup> <http://www.bamboobotanicals.ca/html/about-bamboo/bamboo-growth-habits.html>, consultato il 23/07/2018.

<sup>9</sup> S. GASS, op. cit., p. 51.



Figura 5. A sinistra. Rizoma monopodiale, in <https://www.slideshare.net/DavideVitali2/presentazione-progetto-coltivare-bamboo-2017>, consultato il 23/07/2018.

Figura 6. A destra. Bambù monopodiale

2- Bambù pachimorfo simpodiale o cespuglioso: i rizomi sono corti, tozzi e danno origine a un gruppo compatto avente culmi molto vicini fra loro, che si sviluppano in modo concentrico, uniforme e non invasivo. La crescita, in questo caso, è lenta e ogni rizoma produce solo un singolo culmo. Le specie simpodiali sono tipiche dei tropici.

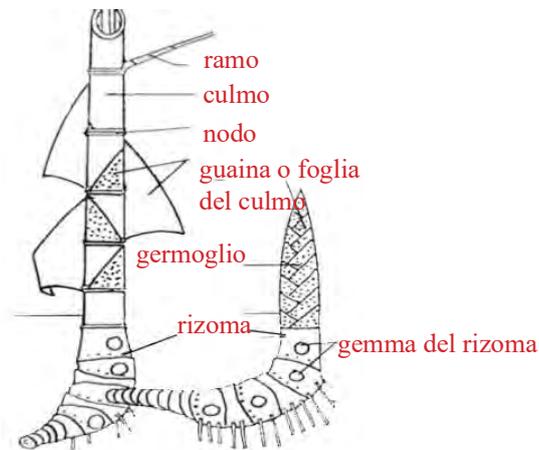


Figura 7. A sinistra. Rizoma simpodiale, <https://www.slideshare.net/DavideVitali2/presentazione-progetto-coltivare-bamboo-2017>, consultato il 23/07/2018.

Figura 8. A destra. Gruppo di bambù simpodiale, in <https://www.guaduabamboo.com/species/gigantochloa-atter>, consultato il 23/07/2018.



Figura 9. Germoglio di bambù in crescita affianco ai culmi.

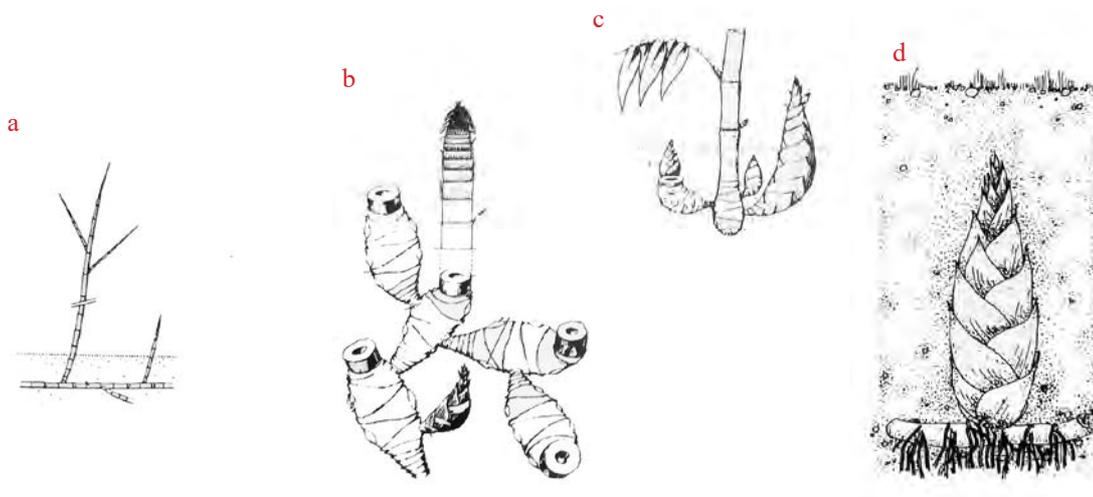


Figura 10. Tipologie di rizoma: a) rizoma monopodiale; b) rizoma simpodiale; c) rizoma simpodiale; d) germoglio e gemma di bambù di un rizoma monopodiale, in S. GASS, op. cit., p. 52.

#### 1.4 DISTRIBUZIONE GEOGRAFICA E CONDIZIONI CLIMATICHE

In generale i bambù sono originali dei tropici ed è possibile che India, Birmania e l'arcipelago asiatico siano i luoghi di origine della pianta: il 65% delle specie conosciute derivano da questi posti. In tutta l'America del Nord è presente solo una specie nativa, mentre in Europa non esistono specie autoctone.

Nel 1855 un bosco di bambù, della dimensione di 6 ettari, fu artificialmente piantato nella regione francese della Generargues<sup>10</sup>.

La maggior parte delle specie di bambù crescono sotto temperature comprese tra gli 8,8°C e i 36 °C. Il bambù Moso tollera persino temperature sotto i -10°C (si veda Figura 12) . La Chusquea Aristata, originaria dell'Ecuador, cresce ad altissime quote. Negli Himalaya i bambù si possono trovare su altitudini superiori ai 3.600 metri.

Il bambù è stata l'unica specie di pianta a essere sopravvissuta alla bomba nucleare e ai successivi eventi di radiazione avvenuti in Hiroshima nel 1945. Si è testimoniato l'apparire dei suoi germogli a bordo di un cratere<sup>11</sup>.

<sup>10</sup> <http://www.giardini-mondo.it/generargues/124/la-bamboueraie/>, consultato il 24/07/2018.

<sup>11</sup> S. GASS, op. cit., p. 51.



Figura 11. A sinistra. Aree di diffusione del bambù nel mondo, <https://www.eeob.iastate.edu/research/bamboo/maps.html>, consultato il 24/07/2018.

Figura 12. A destra. Bambù sotto la neve, <http://uchiha.co/post/76665242205/bamboo-groove-in-snow>, consultato il 24/07/2018.

## 1.5 IL CULMO

La pianta del bambù possiede un sistema di rami con assi segmentati, nonché una regolare successione di nodi e segmenti presenti nei rizomi, nel culmo e nei rami. Generalmente i culmi sono cavi ma esistono alcune specie che si presentano in forma solida. Ciascun segmento di culmo inizia e finisce con un giunto solido chiamato nodo, caratterizzato da una forma circolare esporgente. I segmenti tra i nodi vengono chiamati internodi. Dai nodi crescono i rami e le foglie. Similmente ai culmi i rami sono segmentati con nodi e internodi.

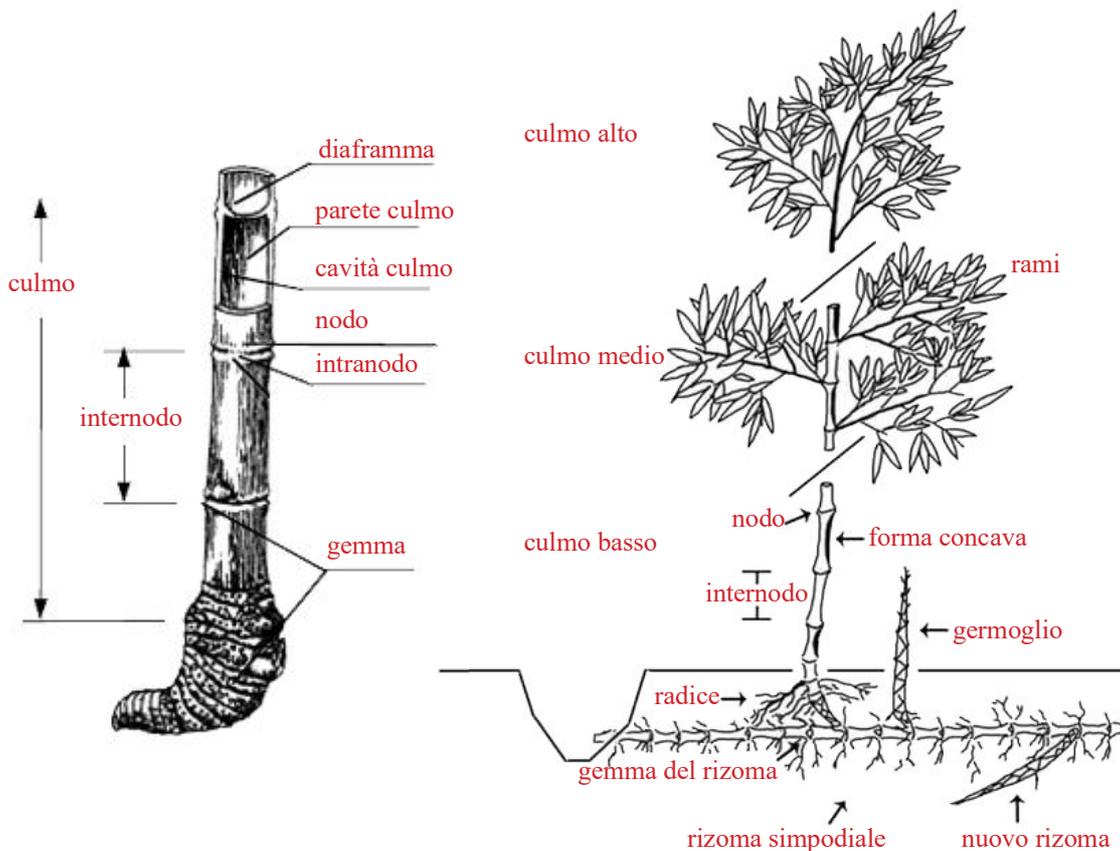


Figura 13. A sinistra. Dettagli del culmo, <https://www.guadubamboo.com/identification/bamboo-stem-anatomy>, consultato il 24/07/2018.

Figura 14. A destra. Le parti della pianta di bambù, <https://lebeaubamboo.com/containing-bamboo.php>.

## La crescita longitudinale

Il bambù cresce nel sottosuolo per diversi anni, fino a un massimo di 5 anni, prima di emergere dal suolo. Una volta emerso il germoglio di bambù è corto, spesso e di forma conica ma si trasforma in canna in soli 30 giorni, e completa la sua crescita nei 10 giorni successivi. A seconda della specie, le canne possono raggiungere un'altezza dai 15 m ai 20 m con diametro di 2,5 cm. In condizioni favorevoli eccezionali, le canne si allungano fino a 40 metri, con diametro dai 5 ai 12 cm e spessore della parete di 10 mm. A eccezione degli stami dei fiori, i quali crescono 1,5 mm/min, non esiste altra pianta con il tempo di crescita straordinario che appartiene al bambù. Si citano i seguenti record di crescita (centimetri in 24 ore)<sup>12</sup>:

- 91 cm: *Bambusa arundinacea*, Kew Gardens, England, 1855.
- 88 cm: *Phyllostachys edulis*, Bot. Garden, Koishikawa, Tokyo, 1898.
- 121 cm: *Phyllostachys edulis*, Nagaoka, Kyoto, 1956.

La crescita media giornaliera è di 25 cm. Alcune specie superano i 90 cm al giorno, ma sono considerate eccezioni. Ogni germoglio che spunta dal suolo contiene tutti i nodi della canna e il diametro è quello definitivo. Per questo motivo non è possibile definire l'età della pianta dal diametro. In generale l'età viene giudicata dal suono della canna e dal suo colore. La crescita in altezza è raggiunta attraverso allungamenti successivi dei singoli segmenti<sup>13</sup>.

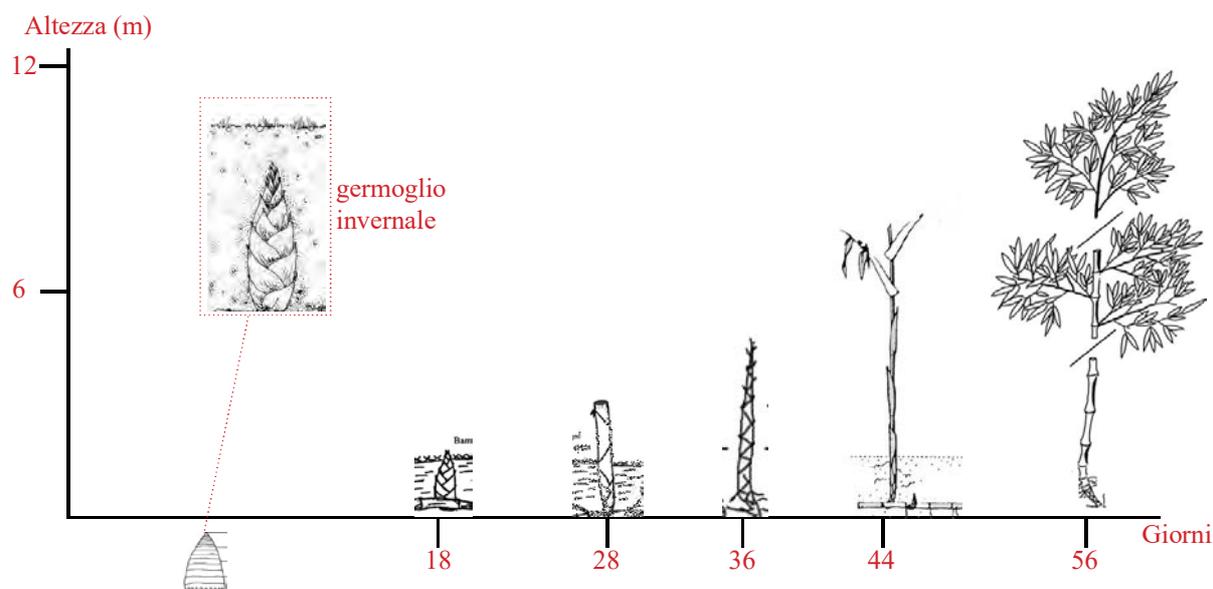


Figura 15. Crescita rapida del bambù Moso: dal germoglio nel sottosuolo allo sviluppo del bambù giovane, in <http://everythingbamboo.website/15-reasons-why-bamboo-isnt-just-life-saving-for-pandas/>, consultato il 24/07/2018.

## Segmenti e nodi

Il numero e la lunghezza dei segmenti di una canna possono variare: le specie piccole presentano solitamente 15-20 segmenti; le specie grandi possono avere fino a 55 segmenti. La lunghezza dei segmenti cresce progressivamente dalla base del culmo fino alla metà dell'altezza, successivamente l'internodo tende a diminuire fino alla punta. La lunghezza media dell'in-

<sup>12</sup> S. GASS, op. cit., p. 53.

<sup>13</sup> Idem.

ternodo è di circa 35 cm. La *Teinostachyn dulloa* può presentare internodi con lunghezza che varia dai 40 ai 100 cm, mentre la *Ochlandra Travancorica* presenta lunghezze dai 60 ai 150 centimetri. La *Anthrostylidium Schromburgii* può sviluppare segmenti fino a 5 metri di lunghezza: è da queste sezioni che i nativi ricavano le loro cerbottane.

Nella maggior parte dei casi, l'interno delle canne è cavo. Sono rarissime le specie con un culmo solido. La cavità tende ad avere maggiore diametro a metà altezza e diminuire verso le estremità. Ogni nodo divide il culmo con diaframmi dai quali hanno origine i rami. L'alto conetuto di silice rende questa sezione di canna molto resistente.<sup>14</sup>



Figura 16. Spessore della parete dei culmi di bambù di diversa specie.

## Forma e colore

I culmi si presentano a sezione trasversale circolare e con asse leggermente conico rastremato gradualmente verso la punta. Le canne più basse sono più forti ma allo stesso tempo si rastremano molto. Per questo motivo, le canne lunghe sono preferibili per usi strutturali poiché sono più rettilinee, mentre le canne basse e le punte delle canne vengono utilizzate per scopi economici nel campo dell'artigianato.

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

Tabella 1. Relazione del diametro (D), dell'altezza (h) e dello spessore della parete (d). in S. GASS, op. cit., p. 57.

Dopo circa 3 anni di età inizia il processo della lignificazione del culmo e si sviluppa il silicio. Solamente dopo questa maturazione i culmi possono diventare utili come legname strutturale. Le fibre di bambù contengono un alto contenuto di silicato acido (circa 4%). Lo strato di silicato, presente sulla superficie esterna, dona al bambù resistenza all'esposizione chimica, vegetale e meccanica<sup>15</sup>.

I bambù si distinguono uni dagli altri negli aspetti dimensionali, nelle forme del culmo (nodi, segmenti, rami), e nei colori.

Il colore delle canne giovani è il verde. Invecchiando le canne diventano giallastre, alcune volte marroni o nere, con colore uniforme o a macchia. La superficie può essere lucida o opaca. Alcune specie sono distinte da strisce longitudinali di diversi colori e spessori.

<sup>14</sup> S. GASS, op. cit., p. 55.

<sup>15</sup> S. GASS, op. cit., p. 57.



Himalaya calamus



Striped buddha bamboo



Onion bamboo



Phyllostachys aureosulcata



Dendrocalamus giganteus



Red bamboo



Chusquea coronalis



Black bamboo



Arundo donax



Forma anomala dei nodi



Gigantochloa atter



Qiongzhuea tumidinoda

Figura 17. Composizione di immagini sulle varie tipologie di bambù, in <http://www.bambusetto.it/il-bambu/>.

## Infiorescenza e frutti

La fioritura è un momento unico e molto raro. Il bambù fiorisce una volta nella vita, e generalmente muore dopo aver prodotto i frutti. Esistono due teorie sulla morte del bambù: la prima è basata sul fatto che la produzione di semi richieda una grande quantità di energia, tanto da portarla a morire; la seconda, invece, si basa sul fatto che la pianta madre muore per fare spazio alle nuove piantine di bambù che nasceranno dai semi.<sup>16</sup>

Durante il periodo della fioritura la canna perde definitivamente le sue foglie. Le specie piccole fioriscono dopo circa 3-4 anni (queste possono fiorire annualmente senza morire), mentre le specie grandi fioriscono dopo un intervallo di tempo che va dai 20 ai 80 anni e, in casi eccezionali, dopo 120 anni:

- *Dendrocalamus strictus*: 40 anni.
- *Bambusa arundinacea*: 30-45 anni.
- *Melocoma bambusoidis*: 10-15 anni.
- *Phyllostachys nigra*: 60 anni.
- *Phyllostachys reticulata*: 60-100 anni.

Sono possibili 3 cicli di fioritura:

- 1- Fioritura annuale o quasi annuale.
- 2- Fioritura periodica o simultanea (detta anche “di massa”).
- 3- Fioritura sporadica.

La fioritura sporadica avviene su singole canne all'interno di alcuni gruppi. Invece nella fioritura di massa tutti i gruppi fioriscono simultaneamente, si espande sopra grandi aree attraversando interi paesi. Nel 1973 il Madake bambù, per la prima volta dopo il 1864, è fiorito sull'intero territorio del Giappone. Nel 1880 i rizomi della specie *Chusquea abietifolia* sono stati portati in Inghilterra dalle Indie Occidentali. La specie fiorì nelle serre inglesi nel 1884, e nello stesso momento i loro simili sono fioriti nelle Indie Occidentali.

Il processo della fioritura di massa non è ancora stato spiegato. Alcune attività solari coincidono con i periodi di fioritura. Questa correlazione può aver innescato un fattore importante nel sistema fisiologico del bambù.

Solitamente il bambù fiorisce negli ultimi mesi di un anno, mentre i semi maturano nei primi mesi dell'anno successivo. Questi producono un frutto molto piccolo, commestibile, di aspetto simile a una pera. La capacità dei semi di germogliare è molto bassa: solo l'1% dei semi piantati germoglia<sup>17</sup>.

<sup>16</sup> S. GASS, op. cit., p. 64.

<sup>17</sup> S. GASS, op. cit., p. 65.

## 1.6 CICLO DI VITA

Come si è detto, il fenomeno della fioritura del bambù è ancora oggi un fattore naturale in cerca di risposte. Il National Geographic nel 20 maggio 2015, pubblicò un articolo molto interessante, scritto da Carl Zimmer, sul ciclo di vita del bambù:

*“Verso la fine degli Anni Sessanta, Phyllostachys Bambusoides, una specie di bambù originaria della Cina ma introdotta in Giappone, negli Stati Uniti e in altri paesi, fiorì improvvisamente. E quando dico che fiorì, intendo che fiorì ovunque, nello stesso momento. Le foreste di questa pianta sbocciarono tutte insieme, in perfetta sincronia anche quando erano separate da migliaia di chilometri. [...] I fiori rilasciarono il loro polline nel vento, le piante fecondate che produssero caddero a terra. Le magnifiche piante di bambù, che possono crescere fino a oltre venti metri di altezza, morirono tutte all’istante, mentre con il tempo i loro semi sono germogliati e hanno fatto nascere nuove piante. La nuova generazione è ormai vicina ai 50 anni di età, e non ha ancora messo nemmeno un fiore. Né lo farà prima del 2090. [...] La fioritura avvenuta alla fine degli anni Sessanta era insomma solo la nuova esplosione di un ciclo lungo 120 anni.*

*L’esistenza di un ciclo di fioritura così inusuale è già abbastanza affascinante di suo. Ma negli anni si è scoperto che esiste un certo numero di altre specie di bambù che sbocciano su cicli della durata di decenni. Una specie chiamata Bambusa Bambos fiorisce ogni 32 anni, per esempio. Phyllostachys nigra f. Henonis ce ne mette 60.*

*Tre biologi di Harvard, incuriositi da questi cicli, hanno recentemente cercato una spiegazione per la loro evoluzione. Sulla rivista Ecology Letters, hanno offerto nei giorni scorsi un’ipotesi allettante: i bambù avrebbero “scelto” cicli così lunghi per la propria fioritura dopo aver fatto alcuni semplici calcoli aritmetici.*

*Come ogni altro scienziato, anche Carl Veller, Martin Nowak, e Charles Davis, i biologi autori dello studio, sono saliti sulle spalle dei giganti. O meglio di un gigante in particolare: il biologo evoluzionista Daniel Janzen, che negli anni ha fatto sbocciare con una facilità inquietante un numero enorme di idee creative e influenti.*

*A metà degli anni 1970 Janzen propose una spiegazione della fioritura in sincronia delle piante di bambù. Ratti, uccelli, maiali e altri animali divorano numeri enormi di semi di bambù. Ogni seme trangugiato rappresenta la perdita di potenziale progenie per la pianta. Se in giro ci sono abbastanza predatori di semi, e se sono anche abbastanza affamati, l’intera produzione di semi di una pianta di bambù rischia di venire spazzata via.*

*Rispetto a questo scenario, un modo in cui le piante di bambù possono cavarsela, sostiene Janzen, è proprio quello di fiorire contemporaneamente. Mettendo una quantità sovrabbondante di cibo a disposizione, infatti, anche se i predatori dovessero rimpinzarsi fino a scoppiare alcuni semi rimarrebbero comunque intatti. E quei semi sopravvissuti possono così avere abbastanza tempo per crescere fino a diventare piante che possono difendersi grazie alla durezza delle loro fibre dure e al contenuto di sostanze chimiche amare.*

*Una volta che i bambù hanno serrato i ranghi e si sono coordinati per fiorire in sincronia, diventa difficile che una pianta spezzi le fila. Se alcune piante di bambù dovessero fiorire con qualche anno di anticipo, infatti, gli animali potrebbero banchettare senza problemi con i loro semi, e i loro geni “fuori sincrono” non riuscirebbero ad arrivare alle generazioni future.*

*Alcuni scienziati avevano già trovato delle prove a supporto delle ipotesi di Janzen, verificando per esempio che inondare i nemici con un gran numero di semi abbassa davvero il danno complessivo che i mangiatori di semi causano a ogni singola piantagione. Veller e i suoi colleghi hanno provato a rispondere a qualche domanda ancora irrisolta: come hanno fatto le*

*piante di bambù a entrare in questi cicli di fioritura, tanto per cominciare? E come hanno fatto le varie specie a sviluppare così tanti ritmi di fioritura, così lunghi e così diversi tra loro?*

*Gli scienziati hanno ideato un modello matematico basandosi su quello che sappiamo della biologia dei bambù. Hanno cominciato prendendo in esame una ipotetica foresta in cui quasi tutte le piante fioriscono ogni anno, come fanno alcune specie di bambù.*

*Nella popolazione in esame sono stati inseriti però anche dei mutanti, con mutazioni proprio nei geni che ne regolano il tempo di fioritura: alcune piante avevano bisogno di due anni per fiore, invece di uno. E alcuni dei mutanti biennali fiorivano negli anni pari, altri negli anni dispari. Metterci due anni per la fioritura, invece di uno solo, può avere alcuni vantaggi per le piante di bambù, perché c'è più tempo per raccogliere energia dalla luce del Sole, energia che le piante potrebbero utilizzare per creare più semi, o dare ai propri semi difese più robuste contro i predatori.*

*E così, mentre la foresta in esame diventa sempre più popolata da piante dalla fioritura biennale, diminuiscono le piante che rilasciano i loro semi ogni anno. Alla fine Veller e colleghi hanno trovato che con l'andare del tempo si giunge a un anno in cui le piante di bambù annuali non riescono a produrre abbastanza semi per sopravvivere all'assalto degli animali. In un colpo solo, sono spazzate via. Se si tratta di un anno dispari, allora anche le piante biennali dispari possono venire spazzate via. Se si tratta di un anno pari, le piante a fioritura pari rischiano la scomparsa. In entrambi i casi, l'intera foresta viene bruscamente sincronizzata nella fioritura ogni due anni.*

*È anche possibile che una foresta non abbia piante mutanti con fioritura a due anni, ma altri mutanti che impiegano tre anni o più per fiorire. Veller e i suoi colleghi hanno scoperto che nel loro modello matematico, piante di bambù con cicli di fioritura più lunghi potrebbero a loro volta prendere il sopravvento. Stabilire quale ciclo esattamente finisca per prendere il sopravvento è difficile da dire sin dall'inizio. Perché in parte è una questione di fortuna: il numero di semi di bambù prodotti con successo in un dato anno da una determinata specie può variare a causa del clima e di altre condizioni imprevedibili. Ma qualunque dei cicli di fioritura emerga come quello dominante, l'intera foresta si evolve poi per rimanere sincronizzata con quel ciclo. Tutti i valori anomali della fioritura fuori sincrono vengono spazzati via, proprio come aveva immaginato Janzen.*

*C'è un'eccezione, però: una pianta di bambù mutante può evolvere in un nuovo ciclo che è un multiplo di quello originale. Immaginate che un bambù di due anni si trasformi in uno di quattro anni. Ogni anno che fiorisce, è protetto dalle piante da fioritura biennale. E ha un vantaggio su di loro: può trascorrere il tempo in eccesso producendo più semi.*

*Anche se i fiori quadriennali hanno bisogno del doppio del tempo per produrre i loro semi, gli scienziati hanno scoperto che in alcune condizioni possono comunque diventare sempre più comuni nel giro di un paio di secoli, così che alla fine l'intera foresta finisce per stabilizzarsi sul ciclo di fioritura ogni quattro anni.*

*Il bambù, poi, non può evolvere in senso inverso, sottolineano i ricercatori. Se una foresta di quattro anni dovesse produrre un mutante di due anni, fiorirebbe per metà del tempo negli anni in cui non ha alcuna protezione dai predatori. L'unica direzione che la mutazione può avere è verso cicli più lunghi. Se una foresta di quattro anni produce un mutante di otto, può avere lo stesso vantaggio che le piante di quattro anni avevano originariamente: del tempo ben protetto.*

*Sviluppato il modello teorico, Veller e colleghi si sono resi conto che avrebbero potuto facilmente testarlo. Se i calcoli sono giusti, questo il loro ragionamento, nel corso di milioni di anni le varie specie oggi esistenti dovrebbero aver effettivamente moltiplicato i loro cicli di fioritura. Ed è probabile allora che lo abbiano fatto a piccoli passi, perché il passaggio da un ciclo di due anni a un ciclo di duecento anni richiederebbe alcuni cambiamenti drastici nella*

biologia di una pianta di bambù. Pertanto, gli anni totali del ciclo di un bambù dei giorni nostri dovrebbe essere il prodotto di piccoli numeri moltiplicati insieme.

E andando a controllare i dati, nella pratica la matematica del bambù sembra offrire davvero qualche promettente riscontro. *Bambusoides Phyllostachys* ha un ciclo di 120 anni, per esempio, che è uguale a  $5 \times 3 \times 2 \times 2 \times 2$ . *Phyllostachys nigra* f. *Henonis* impiega sessanta di anni a fiorire, e 60 è  $5 \times 3 \times 2 \times 2$ . Il ciclo di 32 anni di *Bambos Bambusa* equivale invece a  $2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 2$ .

I ricercatori hanno trovato poi ulteriori conferme andando a guardare in che modo si sono evolute le specie di bambù. Nell'immagine riportata qui sopra è rappresentato un albero evolutivo di *Bambusoides Phyllostachys* e dei suoi parenti stretti. È possibile che il loro antenato comune avesse un ciclo di cinque anni, e che quindi i rispettivi cicli si siano moltiplicati per piccoli fattori lungo ogni ramo dell'albero.

Certo, tutto questo potrebbe rivelarsi soltanto una sorta di insignificante numerologia del bambù. Può essere solo una coincidenza che queste specie nascondano moltiplicazioni così eleganti? Veller ed i suoi colleghi hanno effettuato un test statistico sulle specie di bambù con cicli di fioritura ben documentati, e hanno scoperto che i cicli sono strettamente raggruppati attorno a numeri che possono essere fattorizzati in numeri piccoli. È un modello, una ricorrenza, che non ci si aspetterebbe dal caso. Anzi, a volerla dire tutta, secondo i ricercatori questo test offre un'evidenza molto forte a supporto della teoria della moltiplicazione.

Ci saranno ora diverse occasioni per mettere alla prova questo modello matematico. Molte specie di bambù hanno cicli di fioritura lunghi che nessuno ha mai misurato con molta precisione. Gli scienziati potrebbero da oggi controllare se i cicli che verranno scoperti si inseriscono nel modello di Veller. Se per esempio dovessero trovare una nuova specie di *Phyllostachys* con un ciclo di 23 anni, cadrebbe l'ipotesi di un antenato comune con cicli quinquennali. Una cosa è certa, però. Se questo modello richiede che gli scienziati stiano lì ad aspettare che i bambù sboccino, ci vorranno diverse generazioni di scienziati per venirne a capo".<sup>18</sup>

## 1.7 CONTENUTO DI UMIDITÀ

La percentuale di umidità incide sulle proprietà fisiche e meccaniche della canna, determina il trattamento da adottare per la conservazione del materiale, ed inoltre, influenza le sue future applicazioni.

Il contenuto di umidità nei culmi dipende da:

- La specie: la percentuale di cellule di parenchima (diversa tra le varie specie di bambù) costituenti la canna, è proporzionale alla capacità di assorbimento dell'acqua.
- L'età: nelle canne giovani la distribuzione di umidità nel culmo è uniforme, mentre nelle canne mature è circa due volte maggiore alla base rispetto alla punta.
- La sezione del culmo: negli internodi la quantità d'acqua è superiore del 25% rispetto ai nodi.
- Il periodo stagionale: nelle zone subtropicali, la stagione influisce in maniera determinante sul contenuto di umidità, che raddoppia durante la stagione delle piogge. Nelle regioni tropicali, la quantità di umidità oscilla solo del 20% durante l'anno, in quanto non vi sono sensibili variazioni stagionali di umidità. Le canne dei tropici hanno un assorbimento inferiore (30-60%) rispetto alle canne originarie dei subtropici, le quali possono assorbire fino al 170% del loro peso secco.<sup>19</sup>

<sup>18</sup> Carl Zimmer, "La matematica del bambù", [http://www.nationalgeographic.it/scienza/2015/05/20/news/la\\_matematica\\_del\\_bamnu\\_-2615478/](http://www.nationalgeographic.it/scienza/2015/05/20/news/la_matematica_del_bamnu_-2615478/), consultato il 24/07/2018.

<sup>19</sup> S. GASS, op. cit., p. 72.

Una maggiore umidità della canna rende più semplici le sue lavorazioni (taglio, segagione e perforazione), allo stesso tempo rende la pianta più sensibile agli insetti e al deterioramento. Al fine di mantenere la giusta umidità nel bambù è di fondamentale importanza prestare attenzione al trasporto, allo stoccaggio, ai trattamenti e alla protezione dagli agenti atmosferici.<sup>20</sup>

## 1.8 DILATAZIONE E CONTRAZIONE

Il bambù ha la caratteristica di assorbire e rilasciare l'umidità in base all'ambiente in cui si trova (comportamento igroscopico). Nel caso di un ambiente umido la canna assorbe umidità, subendo variazioni dimensionali proporzionali all'umidità assorbita; nel caso di un ambiente secco la canna rilascia umidità, riassumendo le dimensioni originali in condizioni di aria asciutta.<sup>3</sup> Il comportamento igroscopico non influenza negativamente le strutture. Inoltre, se i materiali usati per le connessioni degli elementi sono costituiti da materia organica, il comportamento, al varirare delle condizioni metereologiche, è simile a quello delle canne, e dunque non oppongono resistenza.<sup>21</sup>

## 1.9 RESISTENZA AL FUOCO

La parete esterna del bambù, grazie al notevole contenuto di silicio, attiva un'azione ritardante contro le fiamme, in particolare nella zona nodale. Inoltre, possiede una maggiore densità rispetto al legno dolce che la rende meno infiammabile. Questi valori sono stati riportati nella tesi di K. Dunkelberg in seguito ad un esperimento condotto sull'infiammabilità dell'abete rosso e della *Bambusa textilis*. Di seguito vediamo quanto tempo impiegano entrambi i materiali ad infiammarsi.

Materiale	Abete rosso	Bambusa textilis (E)	Bambusa textilis (I)
Punto di applicazione del calore			
Secondi prima dell'infiammazione (s)	19,7	29,4	14,5

Tabella 2. Confronto tra la capacità di resistenza al fuoco dell'Abete rosso e quella della *Bambusa textilis*, applicato sull'estremità del tronco e del culmo. I=interno della canna, E=esterno della canna, in GASS, op. cit., p. 77.

Tramite questi valori si dimostra la maggiore capacità del bambù di resistere al fuoco rispetto all'Abete rosso. Si nota però, nella parte interna della canna, una resistenza più bassa, dovuta al minore contenuto di silicio<sup>22</sup>.

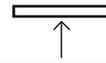
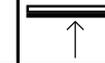
Materiale	Abete rosso	Bambusa textilis (E)	Bambusa textilis (I)
Punto di applicazione del calore			
Secondi prima dell'infiammazione (s)	19,1	61,2	32,5

Tabella 3. Confronto tra la capacità di resistenza al fuoco dell'Abete rosso e quella della *Bambusa textilis*, applicata in mezzzeria. I=interno della canna, E=esterno della canna, in GASS, op. cit., p. 77.

In questo caso notiamo che la resistenza al fuoco dello strato esterno del bambù è tre volte

<sup>20</sup> S. GASS, op. cit., p. 72.

<sup>21</sup> S. GASS, op. cit., p. 74.

<sup>22</sup> S. GASS, op. cit., p. 77.

maggiore rispetto a quella dell'Abete, e due volte superiore se paragonato al caso precedente. Notiamo infine che entrambi gli strati di bambù (esterno e interno) impiegano più tempo a infiammarsi rispetto al legno.

## 1.10 PROPRIETÀ FISICHE

### Massa volumica

La massa volumica (o densità: massa/volume) varia a seconda della specie, della porzione di culmo considerata, dall'età, e presenta valori compresi tra 500 e 900 kg/m<sup>3</sup> (il legno presenta una massa volumica che va dai 300 ai 1040 kg/m<sup>3</sup>). La quantità di fibre presenti è determinante nella densità del materiale la quale è strettamente legata alle prestazioni meccaniche: la resistenza ultima a flessione del bambù (considerando N/mm<sup>2</sup>) è 0,14 volte la sua massa volumica (in kg/m<sup>3</sup>). Il peso specifico del bambù cresce dal basso verso l'alto con l'aumentare della percentuale delle fibre, la parte del culmo più resistente a compressione e flessione è quella alta, che presenta valori di modulo elastico maggiori.<sup>23</sup>

### Conduttività termica

Si osservino nella tabella 4 i coefficienti di trasmissione termica del bambù ottenuti da una ricerca riportata nella tesi di Dunkelberg (1980). Al fine di ottenere coefficienti assoluti del materiale, si è calcolato la media dei valori misurati su un ampio campione di canne di bambù di età diverse<sup>24</sup>. Dall'analisi sono risultati i seguenti valori:

Tipo di legname	Peso specifico secco kg/m <sup>3</sup>	Coeff. trasmissione calore W/(mK)		
<i>Picea abies</i>	400-430	rad 0,121	tang 0,105	longit 0,222
<i>Bambusa textilis</i>	370-850	0,102	0,105	0,166

Tabella 4. Confronto tra le proprietà fisiche dell'abete rosso e del bambù, in S. GASS, op. cit., p. 85.

Si nota che<sup>25</sup>:

- Se la trasmissione del calore è radiale (perpendicolare all'orientamento delle fibre), la conduttività termica del bambù è inferiore del 15% rispetto a quella dell'abete.
- Se la trasmissione del calore è tangenziale (perpendicolare all'orientamento delle fibre), la conduttività è la stessa.
- Se la trasmissione del calore è longitudinale (parallela all'orientamento delle fibre), la conduttività termica del bambù è minore del 25% rispetto a quella dell'abete.

La densità superiore del bambù rispetto a quella del legno influisce sui coefficienti di trasmissione termica rendendoli più bassi, e quindi migliori rispetto al legno. Questa differenza di coefficienti varia in base al posizionamento della canna nella struttura, secondo il quale la trasmissione del calore avviene in direzione tangenziale, radiale o longitudinale.

<sup>23</sup> W. LIESE, *Bamboo preservation and soft rot*, FaO report to the Government of India, Tome n. 1106, 1959.

<sup>24</sup> S. GASS, op. cit., p. 85.

<sup>25</sup> ID., Ibid.

## 1.11 PROPRIETÀ MECCANICHE

Si riportano in questo paragrafo le principali caratteristiche meccaniche del materiale al fine di avere una nozione in generale del suo comportamento. Si citano dati e conclusioni che derivano da varie sperimentazioni esposte nei testi: *Mechanical Properties of Bamboo* di J. A. Janssen e *Bamboo's Building Material* di McClure F.A. I seguenti dati forniscono una visione generale sulle caratteristiche meccaniche, anche se esse sono molto vincolate alla specie considerata.

Il bambù è un materiale composito naturale, la sua struttura anatomica è costituita da fibre e vasi. È caratterizzato da una grande resistenza a trazione e torsione, e presenta un modulo elastico pari  $2000 \text{ N/mm}^2$ . Le fibre che si sviluppano longitudinalmente lungo gli internodi, in corrispondenza dei nodi assumono anche uno sviluppo trasversale incrociandosi e conferendo maggiore resistenza a taglio in quella zona. La parete della canna è costituita da 5 tessuti vascolari di diverso tipo e sono rivestite da una pellicola impermeabile sia sulla superficie interna che su quella esterna<sup>26</sup>. La percentuale di fibre sclerenchimatiche sono presenti in maggiore quantità nella parete esterna del culmo, sono composte da cellulosa e lignina, e sono responsabili della lignificazione. Il bambù è costituito per il 50-70% da emicellulosa, per il 30% di pentosani e per il 20-25% da lignina. Esso è ricco di silice (0,5-9%), la maggior parte di essa si trova nell'epidermide esterna (parete interna 1,5%; parete esterna 3%; nodi e diaframmi 4,5%). Infine contiene piccole quantità di resina, di schiume e di tannino<sup>27</sup>.

Si tratta di un materiale anisotropo: le fibre sono orientate in una direzione preferenziale (longitudinale). Perciò il materiale reagisce in maniera diversa alle sollecitazioni in base alla direzione lungo la quale esso viene sollecitato.

In generale, l'umidità specifica è la caratteristica fisica che più influisce sulle proprietà meccaniche.

Nella Tabella 5 si nota un ottimo rapporto tra resistenza e peso specifico che rende il bambù un materiale naturale eccezionale. Il valore di  $R/\gamma$  è quello che più si avvicina all'acciaio.

Materiale	Modulo E [N/mm <sup>2</sup> ]	Resistenza Fck [N/mm <sup>2</sup> ]	Peso specifico $\gamma$ [daN/m <sup>3</sup> ]	$R/\gamma$	$E/\gamma$
Calcestruzzo C25/30	31500	25	2400	0,003	10,42
Acciaio	210000	160	7850	0,020	26,75
Legno	11000	7,5	600	0,013	18,33
Bambù	20000	10	600	0,017	33,33

Tabella 5. Confronto delle proprietà dei diversi materiali, in <https://www.zerottonove.it/bambu-architettura-ingegneria-e-natura/>.

<http://design.rootiers.it/2010/sites/default/files/materiali%20per%20il%20C.A..pdf>

<sup>26</sup> TIZIANA FIRRONE, Il Bambù, in <http://www.aracneeditrice.it/pdf/9788854823259.pdf>, Aracne, Roma, 2009, p. 8, consultato il 12/12/2017.

<sup>27</sup> GIULIA PISTOLESI, Acciaio dolce, [https://issuu.com/giuliapistolesi1/docs/bamboo\\_stampa](https://issuu.com/giuliapistolesi1/docs/bamboo_stampa), 08/10/2012, p. 21, consultato il 25/04/2017.

La resistenza è dovuta allo spessore della parete che dipende dalla concentrazione di fibre, le quali variano in negativo dalla base alla punta. Per questo motivo vengono calcolate tre resistenze caratteristiche: una sulla base, una a metà altezza e una sulla punta. In ambito progettuale vengono presi in considerazione valori unici mediati.<sup>28</sup>

Il bambù presenta caratteristiche meccaniche notevoli quando viene sollecitato a trazione. Il suo comportamento si avvicina molto a quello dell'acciaio. Questa caratteristica rende il bambù adatto per strutture interessate da sforzi flessionali, nell'impiego per ponti sospesi, come armatura nel calcestruzzo e per costruzioni nelle quali le connessioni tra le canne sono realizzate con legature. I valori della resistenza a trazione di un provino è pari a<sup>29</sup>:

- Al nodo: 107,5 N/mm<sup>2</sup>
- All'internodo: 106,5 N/mm<sup>2</sup>

Da una sperimentazione condotta su vari campioni di bambù, provenienti da diverse aree geografiche, risulta che maggiore è la massa volumica più alta è la resistenza a trazione<sup>30</sup>:

- Yixing:  $\rho$  612 Kg/m<sup>3</sup>;  $\sigma$  196,1 N/mm<sup>2</sup>
- Damaoshan:  $\rho$  584 Kg/m<sup>3</sup>;  $\sigma$  174 N/mm<sup>2</sup>

Il modulo elastico a trazione decresce dall'esterno all'interno della parete del culmo.

Il bambù presenta un diverso comportamento quando sollecitato a sforzo di compressione: se il carico viene applicato parallelamente allo sviluppo delle fibre la resistenza è nettamente superiore, e per giunta la presenza o meno del nodo non è significativa; nel caso in cui il carico viene esercitato perpendicolarmente alle fibre è fondamentale la presenza del nodo. Infatti si ha un incremento della tensione del 45% per le sezioni che comprendono nodi. Si noti la variazione della tensione di rottura a compressione in funzione del diametro dei culmi, dello spessore e della geometria adottata<sup>31</sup>:

Diametro	47,8 mm	60,5 mm	70,0 mm
Spessore = 4 mm	-	65,8 N/mm <sup>2</sup>	-
Spessore = 5 mm	60,5 N/mm <sup>2</sup>	65,3 N/mm <sup>2</sup>	53,6 N/mm <sup>2</sup>

Tabella 6. Valori della resistenza a compressione in funzione dello spessore del culmo e del diametro, in M. CÀRDENAS LAVERDE, op. cit., p. 48.

I valori a compressione della specie di legname più conosciute risultano essere compresi tra i 25 e i 95 N/mm<sup>2</sup>.

<sup>28</sup> Gianfranco Marra, "Bambù: architettura, ingegneria e natura", <https://zon.it/bambu-architettura-ingegneria-e-natura/>, 2015, consultato il 20/11/2017.

<sup>29</sup> J.J.A. JANSSEN, *Mechanical Properties of Bamboo* (Forestry Sciences), Kluwer Academic Publishers, Boston, 1991, p.110.

<sup>30</sup> J.J.A. JANSSEN, op. cit., pp.1-32.

<sup>31</sup> J.J.A. JANSSEN, op. cit., p. 62.

Sono disponibili dati della *Phyllostachys reticulata*, riportati nella tabella 6, che mostrano la relazione tra la tensione di compressione ( $\sigma_c$ ) e i diversi strati della parete del culmo, in funzione della massa volumica ( $\rho$ ) e del contenuto di umidità MC.

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

Tabella 7. Valori della resistenza a compressione del *Phyllostachys reticulata*, in M. CÀRDENAS LAVERDE, op. cit., p. 49.

In relazione all'età del culmo, la miglior resistenza meccanica a compressione la si può ottenere entro un periodo di età della canna compreso tra 3 e 7 anni. A seguire dimostra un andamento descrescente<sup>32</sup>.

I valori di resistenza ultima a compressione in relazione alle differenti porzioni del culmo dimostrano che esso presenta maggiore resistenza nella parte superiore<sup>33</sup>.

Un culmo di bambù soggetto a flessione presenta una notevole resistenza e tende ad essere maggiormente resistente al diminuire del diametro della canna. L'età che risponde meglio alla sollecitazione di flessione è compresa tra i 5 e gli 8 anni<sup>34</sup>.

La resistenza a flessione varia a seconda della porzione di culmo presa in esame e la presenza e posizione dei nodi<sup>35</sup>.

Si noti nella Tabella 8 che in corrispondenza del nodo centrale sono presenti valori più alti delle tensioni e del modulo elastico.

	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]			E [N/mm <sup>2</sup> ]		
	Inferiore	Medio	Superiore	Inferiore	Medio	Superiore
Nodo centrale	73,0	70,3	71,7	9850	11230	13370
Internodo	73,0	61,3	60,6	11580	12470	14330

Tabella 8. Valori delle tensioni ultima a flessione e del modulo elastico in funzione della porzione di culmo analizzato e della posizione dei nodi, in M. CÀRDENAS LAVERDE, op. cit., p. 58.

I valori della resistenza a taglio nel bambù sono molto bassi. La rottura dei culmi durante le prove di flessione non è causata da una mancanza di resistenza a trazione nelle fibre, ma dalla non coesività delle stesse, nella quale il taglio gioca un ruolo fondamentale. In corrispondenza dei nodi il bambù lavora leggermente meglio a taglio poiché in questo punto le fibre sono interrotte da alcuni vasi che le attraversano per raggiungere il diaframma all'interno del nodo.

La resistenza a taglio aumenta con il decrescere dello spessore delle pareti dalla posizione inferiore a quella superiore lungo il culmo.

<sup>32</sup> J.J.A. JANSSEN, op. cit., p. 84.

<sup>33</sup> J.J.A. JANSSEN, op. cit., p. 75.

<sup>34</sup> J.J.A. JANSSEN, op. cit., pp. 1-32.

<sup>35</sup> J.J.A. JANSSEN, op. cit., p. 46.

Per quanto riguarda il modulo di elasticità, si indicano nella Tabella 9 i moduli elastici a compressione e trazione, riferiti a culmi di diverso diametro.

Modulo elastico di compressione in N/mm <sup>2</sup>			
mm	Ø 100	Ø 80	Ø 70
min	15190	18900	16500

Modulo elastico di trazione in N/mm <sup>2</sup>		
mm	Ø 90	Ø 80
min	17000	17900
max	22000	24100

Tabella 9. Valori del modulo elastico di compressione e di trazione, riferiti a culmi di diverso diametro, in M. CÀRDENAS LAVERDE, op. cit., p. 61.

Il modulo elastico di trazione del legno, in direzione parallela alle fibre, varia tra 2500 N/mm<sup>2</sup> e 17000 N/mm<sup>2</sup>, e per l'abete è di circa 15000 N/mm<sup>2</sup>.

## La frattura del culmo

Sotto ponendo un culmo a flessione, la rottura avviene in modo improvviso: quando le singole fibre longitudinali cedono, le lesioni si diffondono nella direzione delle fibre senza che avvenga la rottura dell'intero culmo. I nodi e i diaframmi contrastano il diffondersi delle lesioni e aumentano notevolmente la resistenza a compressione e a taglio, e soprattutto nei confronti dello "splitting".

Nella Tabella 10 si confrontano le principali caratteristiche meccaniche relative al bambù a quelle relative all'Abete<sup>36</sup>.

Tipo	Modulo [N/mm <sup>2</sup> ]	Compressione [N/mm <sup>2</sup> ]	Flessione [N/mm <sup>2</sup> ]	Taglio [N/mm <sup>2</sup> ]
Abete	15000	38	73	3,0
Bambù	17800	56	74	4,3

Tabella 10. Confronto tra le principali caratteristiche meccaniche del bambù e dell'abete, in M. CÀRDENAS LAVERDE, op. cit., p. 63.

Si è costruito un'ulteriore tabella (si veda Tabella 11) contenente dati di confronto tra le caratteristiche meccaniche di diversi materiali rispetto a quelle del bambù. Tali dati sono stati ottenuti da tre fonti e i valori relativi al bambù sono espressi in intervalli di valori siccome dipendono dal tipo di bambù analizzato e dalla sua provenienza.

<sup>36</sup> M. CÀRDENAS LAVERDE, op. cit., p. 63.

Proprietà meccaniche N/mm <sup>2</sup>	Modulo elastico	Resistenza a compressione	Resistenza a trazione	Resistenza a flessione	Resistenza a taglio
Abete (Italia)	11000	4,3	9	68	7
Bambù	20000	64-110	148-384	76-276	20
Acciaio	210000	250-350	250-350	140	92
Calcestruzzo C25/30	31500	12,6-126	1,19		

Tabella 11. Confronto delle principali caratteristiche meccaniche tra i materiali più conosciuti, in: DARREL DEBOER, Bamboo Building and Culture.

<https://permacoletivo.files.wordpress.com/2008/06/bamboo-building.pdf>, 2000;

[https://issuu.com/collettivocerretini/docs/bamboo\\_-\\_collettivo\\_cerretini](https://issuu.com/collettivocerretini/docs/bamboo_-_collettivo_cerretini), 10/05/2010.

## Tensioni ammissibili per culmi di bambù (ISO/DIS 22156)

In assenza di una normativa italiana sulle strutture in bambù, è possibile far riferimento a standard internazionali. Si riportano di seguito i valori delle tensioni ammissibili per culmi di bambù secondo la ISO/DIS 22156, a partire dalle tensioni ultime del materiale. I valori presenti sono valori tipici di riferimento riportati in letteratura<sup>37</sup>:

- Resistenza a compressione  $\sigma_{cu}$  [N/mm<sup>2</sup>] **56,00**

Valori ammissibili:  $\sigma_c = 12,4$  [N/mm<sup>2</sup>] per carichi permanenti

$\sigma_c = 15,6$  [N/mm<sup>2</sup>] per carichi permanenti e temporanei

$\sigma_c = 18,7$  [N/mm<sup>2</sup>] per carichi permanenti, temporanei e per il carico del vento

- Resistenza a flessione  $\sigma_n$  [N/mm<sup>2</sup>] **74,00**

Valori ammissibili:  $\sigma_n = 16,4$  [N/mm<sup>2</sup>] per carichi permanenti

$\sigma_n = 20,6$  [N/mm<sup>2</sup>] per carichi permanenti e temporanei

$\sigma_n = 24,7$  [N/mm<sup>2</sup>] per carichi permanenti, temporanei e per il carico del vento

- Resistenza a taglio (perpendicolare alle fibre)  $\pi$  [N/mm<sup>2</sup>] **4,30**

Valori ammissibili:  $\pi = 1,0$  [N/mm<sup>2</sup>] per carichi permanenti

$\pi = 1,2$  [N/mm<sup>2</sup>] per carichi permanenti e temporanei

$\pi = 1,4$  [N/mm<sup>2</sup>] per carichi permanenti, temporanei e per il carico del vento

## Resistenza al sisma

La resistenza meccanica, la leggerezza e la flessibilità sono caratteristiche che rendono il bambù un materiale eccezionale anche per quanto riguarda la capacità di resistenza ai sismi.

La leggerezza implica una bassa inerzia della struttura durante il sisma, essendo essa direttamente proporzionale allo spostamento subito dalle strutture. La flessibilità del materiale fa sì che non si spezzi a seguito delle sollecitazioni sismiche. Anche i bambù giganti presentano notevoli caratteristiche di flessibilità e capacità di sopportare gli elementi che costituiscono l'edificio.

<sup>37</sup> M. CÀRDENAS LAVERDE, op. cit., p. 62.

È fondamentale un'adeguata progettazione sismica che pone l'attenzione su<sup>38</sup>:

- Le giunzioni tra i nodi che devono tener conto delle spinte orizzontali.
- Gli elementi strutturali in bambù che devono essere dimensionati in numero e spessore adeguati.
- Le fondazioni che non devono essere fragili.
- I tetti che non devono essere troppo pesanti.

La normativa di riferimento sul bambù è la ISO/DIS 22156: “Se i rapporti basati sulle valutazioni fatte dopo cataclismi come terremoti o uragani, contengono descrizioni in merito alle strutture che sono sopravvissute a un disastro descritto in modo quantitativo, tali strutture saranno da considerare adeguate per zone soggette a simili disastri”.

Si è condotto un test in Costa Rica prima dell'emanazione di questa normativa. Si è trattato di un test statico su muri “tipo” di alcune abitazioni: con martinetto idraulico gli è stata applicata una forza orizzontale in modo da simulare l'effetto di tali tipologie di terremoto. I risultati sono stati più che soddisfacenti, presentando una deformazione massima del muro di 120 mm senza danni evidenti all'intonaco e al bambù. Nell'aprile del 1991, quando tutte le case in bambù così utilizzato e vicine all'epicentro di un terremoto di magnitudo 7,5 sono sopravvissute all'evento, mentre le attigue abitazioni in calcestruzzo ed in mattoni sono crollate o hanno subito forti danni.<sup>39</sup>

## 1.12 STANDARD INTERNAZIONALI

Le seguenti normative definiscono i requisiti di resistenza e durabilità della struttura, individuando i test da effettuare, determinando regole che mettono in correlazione le caratteristiche meccaniche con fattori fisici come il contenuto di umidità, la posizione lungo il culmo, la presenza di nodi e internodi ecc:

- Novembre 2001: ISO/DIS 22156 *Bamboo structural design* e la ISO/DIS 22157 *Determination of physical and mechanical properties of bamboo*.
- Dicembre 2001: ISO/TC 165/WG 9 *Laboratory manual on testing methods for determination of physical and mechanical properties of bamboo*.

Le normative citate però non forniscono ancora una definizione esaustiva del comportamento del bambù, in quanto le sperimentazioni rigorose a tal proposito sono in atto da pochi anni, a differenza di quanto accade per altri materiali come calcestruzzo, acciaio o legno<sup>40</sup>.

<sup>38</sup> M. CÀRDENAS LAVERDE, op. cit., p. 67.

<sup>39</sup> M. CÀRDENAS LAVERDE, op. cit., pp. 67,68.

<sup>40</sup> M. CÀRDENAS LAVERDE, op. cit., p. 69.

## 1.15 CONCLUSIONI

Il bambù è un materiale eterogeneo che, a seconda della caratteristica che lo personalizza, presenta valori variabili in riferimento alle caratteristiche, determinanti per le prestazioni meccaniche. L'eterogeneità riguarda la variabilità dovuta a contenuto di umidità, massa volumica, età dei culmi, porzioni di culmo considerate, presenza o meno di internodi, spessori delle pareti. I valori delle proprietà fisiche e meccaniche riportati in questo capitolo sono stati studiati approfonditamente in precise aree geografiche, tenendo conto delle correlazioni tra le proprietà sopra citate. Nonostante ciò, non è possibile generalizzare i risultati, nemmeno a stesse specie se dislocate in regioni diverse.

Dalla comparazione con il legno da costruzione emerge che le caratteristiche a rottura del bambù siano più elevate, specie in riferimento agli sforzi di trazione. Tuttavia presenta il difetto della facile "splittabilità". I diaframmi dei nodi offrono un positivo contributo contro la fessurazione longitudinale in quanto, fungendo da "fasciatura naturale", conferiscono un contenimento di tipo trasversale. Generalmente si può ricorrere alla fasciatura artificiale del culmo ove necessario.

Il bambù come materiale da costruzione necessita di una codificazione delle caratteristiche specifiche delle diverse specie di bambù presenti nelle diverse regioni. Per una quantificazione scientifica del comportamento a rottura del bambù andrebbero ripetute verifiche sperimentali analoghe a quelle descritte nel presente capitolo, anche per le specie presenti in aree non tradizionali.

Questo è il primo passo da compiere nell'auspicio di introdurre il bambù come materiale da costruzione nella cultura europea.

2

IL BAMBÙ COME MATERIALE DA COSTRUZIONE

## 2.1 UN MATERIALE VERSATILE

“*La pianta di bambù è l’oro verde dell’uomo povero*”. Queste sono le parole con le quali Atal Bihari Vajpayee, primo ministro indiano nel 1996 e poi dal 1998 al 2004, definisce il bambù riferendosi al valore sociale ed economico che rappresenta nella vita quotidiana di numerosi abitanti dell’Asia. Ma la risorsa è altrettanto importante nell’America Latina, come sostiene Mateo Kries<sup>41</sup>. Atal Bihari Vajpayee: “*una persona può sedersi in una casa di bambù sotto un tetto di bambù, su una sedia e un tavolo fatti dello stesso bambù, con un cappello di bambù sulla sua testa e sandali di bambù ai piedi. [...] Potrebbe attraversare un ponte sospeso costruito esclusivamente col bambù, bere acqua da una tubatura in bambù, ed asciugarsi il viso con un fazzoletto, ottenuto con le fibre di bambù*”.

Oscar Hidalgo López descrive nel libro “Manual de construcción con bambù” diverse applicazioni del materiale a seconda dell’età:

- A 30 giorni. I germogli della pianta sono utilizzati come alimento, e dalle foglie si ottiene una bevanda alcolica.
- Da 6 mesi a 1 anno. Le canne vengono impiegate per realizzare ceste con intrecci decorativi.
- Dai 2 ai 3 anni. Le canne possono essere utilizzate nella produzione di laminati, pannelli e funi.
- Dai 3 in su. I culmi sono adatti per essere impiegati nella costruzione.

In Europa, nonostante non siano mai esistite specie di bambù autoctone, è stato possibile coltivarle. In Italia il bambù è stato introdotto da un botanico toscano, il prof. Orazio Fenzi, nel 1884<sup>42</sup>. Oggi, nella regione di Fenzi, è possibile trovare il Bambuseto della Versilia, probabilmente sorto 50 anni fa; il bosco si estende su di una superficie pari a circa un ettaro e in esso si trova la specie *Phyllostachys viridiglaucescens*<sup>43</sup>. A Pavia, nel Parco della Sora, sono presenti due boschi di bambù della specie volgarmente detta “bambù reticolato”, originario del Giappone dove viene chiamata *madake* (ma= comune; dake= bambù)<sup>44</sup>.

È presente nel mercato italiano l’azienda OnlyMoso che ha introdotto nel commercio piantine di Bambù Gigante della specie *Phyllostachys edulis*, la quale è capace di crescere nel clima temperato e sopportare temperature inferiori ai -20°C<sup>45</sup>.

Infine, nel territorio italiano si è attivato un team di professionisti provenienti dal Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali (Università di Bologna), Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura (Università Politecnica delle Marche) e dall’Associazione Italiana Bambù (AIB), che stanno conducendo alcune prove meccaniche a compressione, coordinate dalla ricercatrice Lu Molari presso il laboratorio DICAM dell’Università di Bologna, per indagare e conoscere le proprietà meccaniche di bambù di origine italiana come materiale strutturale al fine di valorizzarlo nel campo ingegneristico<sup>46</sup>. Le specie

<sup>41</sup> DETHIER *et al.*, *Grow your own house. Simón Vélez und die bambusarchitektur/Simón Vélez and bamboo architecture*, Weil am Rhein, Vitra Design Museum, 2000, p. 9.

<sup>42</sup> Anna Zacchetti, “I Bambù, tra vento e pioggia”, <https://www.officinadellambiente.com/it/articolo.php?idl1=2&idl2=3&id=3361>, n. 192, 2016, consultato il 30/03/2018.

<sup>43</sup> Chiara Nicora, “Il bosco di bambù italiano”, <https://www.architetturaecosostenibile.it/materiali/bambu/bosco-bambu-italiano-285/>, 2015, consultato il 30/03/2018.

<sup>44</sup> <http://www.comune.pv.it/site/home/dai-settori-e-servizi/settore-mobilita-sport-e-tutela-del-territorio/ambiente/il-bosco-di-bambu.html>

<sup>45</sup> <https://onlymoso.it/azienda/>

<sup>46</sup> <http://bambustrutturale.it/>

di bambù sulle quali si stanno conducendo prove meccaniche di trazione e compressione appartengono alla *Phyllostachys*. In particolare, le specie selezionate sono cinque e sono: *edulis*, *bambusoides*, *vivax*, *viridiglaucescens*, *iridescens*.

## 2.2 L'UTILIZZO IN AMBITO ARCHITETTONICO

Si volge ora l'attenzione al tema dell'utilizzo del bambù in ambito architettonico, e a tal proposito si fa riferimento a due testi fondamentali di cui il primo è il "Manual de construcción con bambù" di Oscar Hidalgo López (1930–2014), nel quale si incontrano moltissime illustrazioni sulle tecniche di costruzione con il bambù; il secondo volume di riferimento è il "IL 31 Bambus/Bamboo" già citato precedentemente.

Oscar Hidalgo López: "Cina, India, e Colombia sono i Paesi che hanno sviluppato le migliori tecniche di costruzione con il bambù. Nei primi tre si trovano anche cupole e ponti sospesi. In Colombia, questo materiale è applicato anche per l'alleggerimento di lastre di calcstruzzo di grandi edifici"<sup>47</sup>.

Nelle Figure 18 e 19 si riportano tecniche manuali colombiane adottate per realizzare prodotti derivati dal bambù.

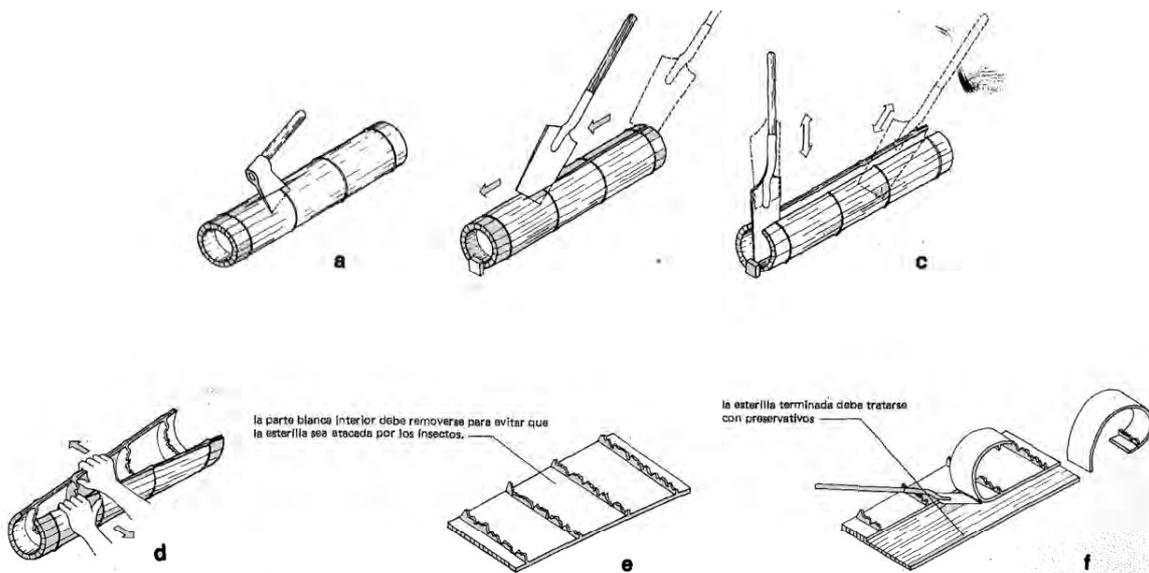


Figura 18. Tavole di bambù realizzate con metodi colombiani, in OSCAR HIDALGO LÓPEZ, *Manual de construcción con bambù*, Bogotá, Estudio Técnico Colombiano LTDA, 1981, p. 7.

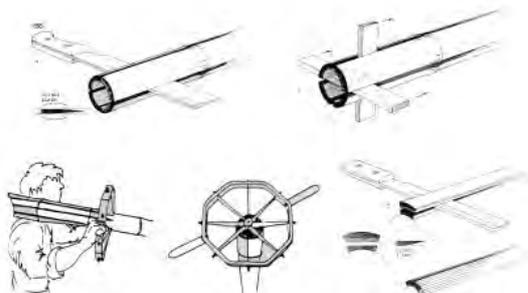
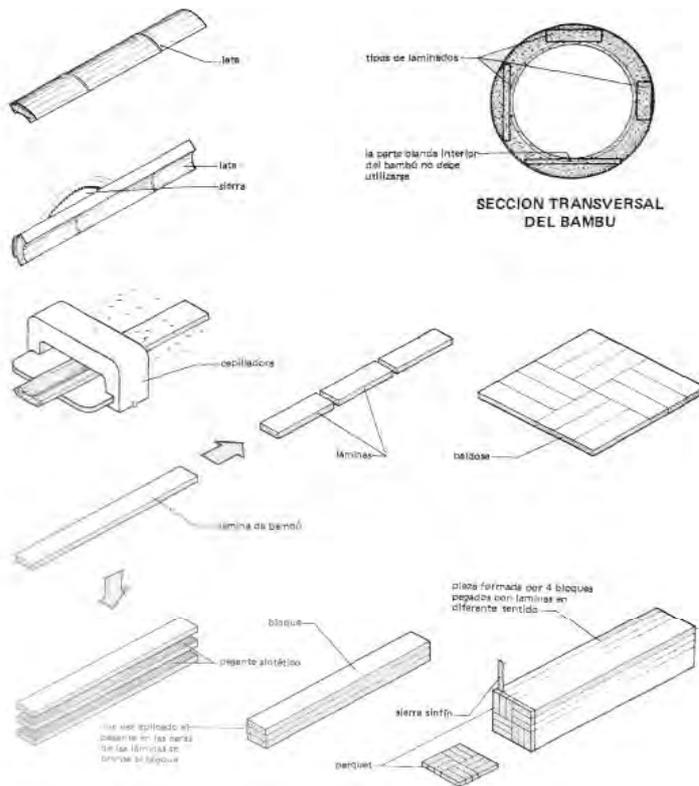


Figura 19. Tecniche di taglio longitudinale ("splitting") della canna di bambù mediante lama e "splittatore" al

<sup>47</sup> OSCAR HIDALGO LÓPEZ, *Manual de construcción con bambù*, Bogotá, Estudio Técnico Colombiano LTDA, 1981.



FREI OTTO (a cura di), *Il 31 Bambus Bam-*, p. 106.

Figura 20. Realizzazione di prodotti per pavimenti in bambù secondo i metodi colombiani, in OSCAR HIDALGO LÓPEZ, op. cit., p. 10.

Il bambù ha tutte le caratteristiche necessario per essere trasformato e lavorato per la produzione di “prodotti ingegnerizzati” come ad esempio il bambù lamellare che rappresenta un ottimo materiale da costruzione. *Viene prodotto partendo dalla riduzione del culmo in tante lamelle sottili di forma rettangolare, che vengono poi incollate fra loro e disposte in modo tale da realizzare elementi di forma e di dimensioni volute*<sup>48</sup>. Questo materiale è stato impiegato per la realizzazione della passerella pedonale d’accesso al Triennale Design Museum costruita da Albertani corporates S.p.A. e progettata dall’architetto Michele De Lucchi.

*Mettendo a confronto l’uso del culmo e del bambù lamellare, si può generalmente affermare che il primo, per via della sua bassa durabilità e difficile standardizzazione, potrebbe essere impiegato come elemento strutturale per opere singolari e di breve durata, mentre, il bambù lamellare potrebbe essere considerato un vero e proprio materiale da costruzione al pari del legno lamellare per la realizzazione di opere di varia natura.*

*Esistono altri impieghi del bambù nell’ambito dell’ingegneria civile. Il culmo, può essere impiegato, infatti, come rinforzo per le travi in calcestruzzo, soluzione largamente studiata in Brasile per soddisfare la richiesta di nuove costruzioni utilizzando materiali locali ed economici. Un ultimo impiego è, invece, quello di sfruttare le fibre interne del bambù per la realizzazione di materiali compositi (bamboo fiber composites). Quest’ultimo utilizzo nasce dall’esigenza di creare prodotti più sostenibili, più economici pur tuttavia garantendo sempre un’alta affidabilità e buone prestazioni meccaniche. Alcuni esempi di polimeri usati per realizzare i compositi in bambù sono: poliestere, resine epossidiche, resine fenoliche, polipropilene e polivinilcloruro.*<sup>49</sup>

<sup>48</sup> [https://it.wikipedia.org/wiki/Ingegneria\\_del\\_bambù#Gli\\_utilizzi\\_nell'ambito\\_dell'ingegneria\\_civile](https://it.wikipedia.org/wiki/Ingegneria_del_bambù#Gli_utilizzi_nell'ambito_dell'ingegneria_civile)

<sup>49</sup> [https://it.wikipedia.org/wiki/Ingegneria\\_del\\_bambù#Gli\\_utilizzi\\_nell'ambito\\_dell'ingegneria\\_civile](https://it.wikipedia.org/wiki/Ingegneria_del_bambù#Gli_utilizzi_nell'ambito_dell'ingegneria_civile)

Sebastian Kaminski, assieme ad altri quattro ricercatori, in un articolo pubblicato su *The Structural Engineer*, propone i valori della resistenza caratteristica del culmo di bambù e un metodo per il calcolo dei valori di progetto. Si riportano nella tabella 1 alcuni di questi valori.

fk,c [MPa]	fk,t [MPa]	fk,b [MPa]	fk,v [MPa]
20	40	30	2

Tabella 1. *Le resistenze caratteristiche del bambù*, Kaminski S., Lawrence A., Trujillo D., Feltham I., Lopez L.F., Structural use of bamboo. Part 3: Design values, in *Structural Engineer*, 2016; 94, n° 12.

Le prestazioni del bambù dipendono dalle caratteristiche meccaniche della specie utilizzata e dal comportamento dei giunti, responsabili di trasferire gli sforzi da un componente all'altro. Le tecniche di costruzione che si riportano in questo paragrafo vengono applicate con semplici utensili, mentre le unioni tra i vari elementi possono essere realizzate sia per incastro, che mediante legatura o con sistemi meno ottimali dal punto di vista della sostenibilità (unioni in metallo e i riempimenti dei nodi con calcestruzzo).

La progettazione di strutture in bambù in Occidente è limitata dall'assenza di una specifica normativa di settore sulla quale poter basare le scelte progettuali. Sarebbe necessaria la validazione di modelli di calcolo a livello sperimentale, in grado di indicare la risposta complessiva alle diverse sollecitazioni dei giunti. Per questo motivo il bambù è ad oggi scarsamente utilizzato in ambito strutturale.

Nelle regioni di origine della pianta la mancanza di dati sulle proprietà fisico-meccaniche non ha impedito che il bambù venisse utilizzato in ambito strutturale; in Ecuador sono state incontrate alcune tracce di costruzioni in bambù aventi circa 9500 anni<sup>50</sup>; in Colombia i primi ponti strallati vennero realizzati in bambù<sup>51</sup>.

<sup>50</sup> SÁNCHEZ V. CARLOS ENRIQUE, *Estructura de bambú caso estudio: Escenario Sustentable*, Tesi di laurea magistrale in Architettura, rel. G. R. Ricardo, C. V. Mario de Jesús, Universidad Nacional Autónoma de México, 2013.

<sup>51</sup> Collettivo Cerretini, "Bamboo", [https://issuu.com/collettivocerretini/docs/bamboo\\_-\\_collettivo\\_cerretini/36](https://issuu.com/collettivocerretini/docs/bamboo_-_collettivo_cerretini/36), 13/05/2010, consultato il 20/09/2017.

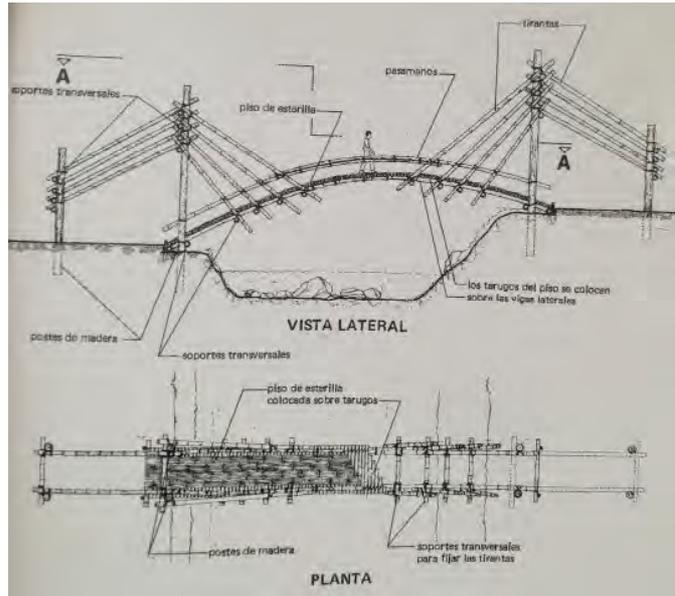


Figura 21. A sinistra. Ponte strallato a Tierradentro, Cauca (Colombia), in J. DETHIER et al., *Grow your own house. Simón Vélez und die bambusarchitektur/Simón Vélez and bamboo architecture*, Weil am Rhein, Vitra Design Museum, 2000, p. 142.

Figura 22. A destra. Ponte strallato tipico della Colombia, Java e Indonesia, in O. H. LÓPEZ, op. cit., p. 71

L'impiego attualissimo del bambù nella costruzione di ponteggi, per edifici di piccole e grandi dimensioni, dimostra ancora una volta che le caratteristiche, quali resistenza e leggerezza, lo rendono ideale per sistemi costruttivi simili a quelli riportati nelle figure 23,24,25 e 26.



Figura 23. A sinistra. Muratori su ponteggi di bambù, Mumbai (India), in <http://www.alamy.com/stock-photo/bamboo-scaffolding.html>, consultato il 02/04/2018.

Figura 24. A destra. Ponteggio di bambù, Hong Kong (Cina), in *ibid.*

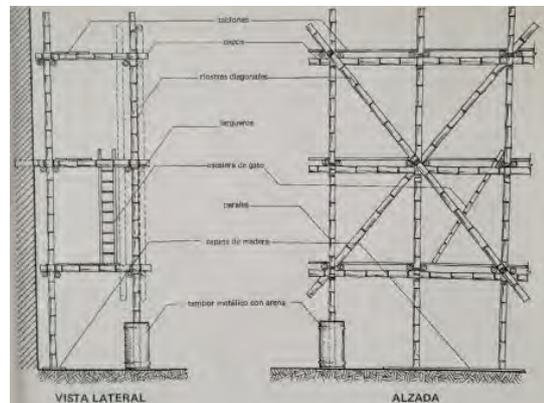


Figura 25. Giunti in legatura nei ponteggi di bambù, Shanghai (Cina), in *ibid.*

Figura 26. Prospetto e Pianta di un ponteggio in bambù, in O. H. LÓPEZ, op. cit., p. 25.

Si consiglia la visione di alcuni video, nei quali si dimostra l'impiego delle legature nei ponteggi, disponibili nei seguenti link:

- <https://www.youtube.com/watch?v=QqUS4JGbb3I>
- <https://www.youtube.com/watch?v=HNVHAlwJbFI>
- [https://www.youtube.com/watch?v=vwDIS\\_3RqxY](https://www.youtube.com/watch?v=vwDIS_3RqxY)
- <https://www.youtube.com/watch?v=HT3pk3Sw78E>

Nelle connessioni tra i culmi impiegati nei ponteggi le forze verticali agiscono direttamente sul giunto in legatura. Quando si impiegano canne di modesto diametro, si aumenta l'attrito facendo passare la corda tra due canne. Si impiegano corde morbide per permettere all'operatore di modificare la tensione. Il metodo dei ponteggi non necessita di fori nelle canne né di bulloni.

*“The organic ropes (mostly bamboo and rattan, but coconut, rafia and sago too) are preferable to other solutions (nylon, plastic, iron) because of their total compatibility with bamboo and aesthetic reasons. Their resistances are very high: a natural fibres rope with the diameter of the dimensions of a man’s arm can reach 130 tons. Usually these natural materials are softened in water and only after tied they get dry and create a very strong joint (it is necessary to hold up the structure until their complete drying).”*

*“[...] it’s preferable to use natural fibres ropes than wood dowels, because wood has got a different kind of dilatation from bamboo, so there can be problems in joints and in all the structure if there is no sufficient space for dilatation between wood element and bamboo culm”<sup>52</sup>*

Nelle figure 27 e 28 si notano gli elementi che compongono un ponteggio in India: elemento verticale (post) che trasferisce le forze al terreno, distanziati circa 2-3 metri uno dall'altro; tra questi ultimi vengono disposti elementi verticali secondari (standards); elementi orizzontali (ledgers) che connettono gli elementi verticali distanziati circa 60-70 cm uno dall'altro; elementi perpendicolari all'edificio (transoms) che consentono il movimento degli operatori; elementi diagonali impiegati ove necessario nel piano post-ledger e ledger-transom.



Figura 27, 28. A sinistra, a destra. Elementi che compongono il ponteggio, file:///C:/Users/jessi/Google%20Drive/TESI/081\_Bamboo%20Scaffolds%20in%20India.pdf, consultato il 31/08/2018.

*“The joints are made by workers (many times kids) that simply learn the technique and repeat it in similar ways for different cases (different number of beams to tie, different angles).*

<sup>52</sup> [http://www.namateco.com/attachments/081\\_Bamboo%20Scaffolds%20in%20India.pdf](http://www.namateco.com/attachments/081_Bamboo%20Scaffolds%20in%20India.pdf), consultato il 31/08/2018.

*They are made by hand joints with no previous calculation nor tests in their life time. The calculation is substituted by the experience, and the tests with the observation while time passing”.*<sup>53</sup>

Vi sono similitudini tra la considerazione data al bambù oggi e quella che fu data al legno circa un secolo fa. Quest’ultimo, a seguito di studi fatti su larga scala, che ne hanno consentito la stesura di normative per l’utilizzo strutturale, viene utilizzato nello specifico ambito. Perciò si auspica uno sviluppo del bambù in tal senso.

Il bambù come materiale strutturale presenta aspetti positivi e negativi:

- Forma tubolare adatta alla trasmissione di sforzi assiali (ideale come elemento asta in strutture reticolari).
- Resistenza a trazione e a compressione (vedi cap. I)
- Lavorazione con utensili facili da usare
- Scarsa resistenza al taglio in direzione delle fibre longitudinali.
- Bassa lavorabilità e difficile realizzazione di giunti sicuri e funzionali, utilizzabili su larga scala.
- Variazione del comportamento statico dovuta alla specie, alla provenienza, al contenuto di umidità, all’età e alla sezione di culmo utilizzata<sup>54</sup>.

### 2.3 SISTEMI COSTRUTTIVI: TELAIO, CAPRIATE E ARCHI

Per la sua forma tubolare e per le sue proprietà meccaniche (si veda capitolo 1), il culmo è adatto a essere utilizzato come elemento strutturale avente funzione di colonna e trave per le strutture a telaio e per le strutture reticolari piane e spaziali, dove i culmi sono sottoposti prevalentemente ad azioni assiali di compressione e trazione, ma è anche adatto per essere incurvato grazie alla sua elevata flessibilità che lo rende un materiale unico.<sup>55</sup>

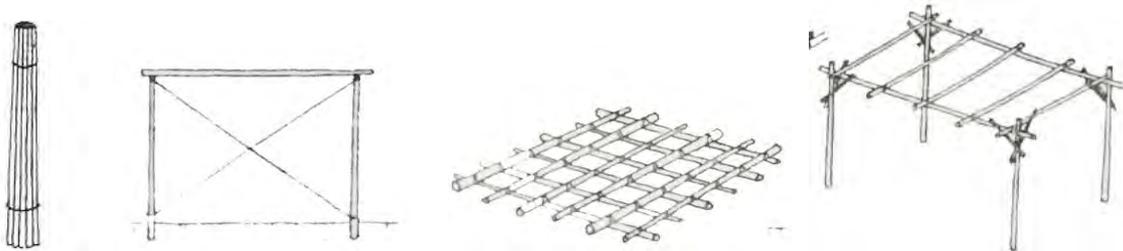


Figura 29. Strutture travi-pilastro e controventi diagonali, in S. GASS, op. cit.

Si rimanda a testi specifici sull’argomento per uno studio completo del comportamento strutturale del culmo impiegato come trave e pilastro, mentre si analizza in questo paragrafo la tecnologia delle coperture in canne di bambù e la tecnologia degli archi.



Figura 30. Struttura ad arco, in S. GASS, op. cit.

<sup>53</sup> K. F. Chung, and S. L. Chan, Bamboo scaffolds in building construction. Design of bamboo scaffolds. Erection of Bamboo Scaffolds, INBAR Technical Report No. 23. Joint Publication of the International Network for Bamboo and Rattan and The Hong Kong Polytechnic University, 2002.

<sup>54</sup> [https://it.wikipedia.org/wiki/Ingegneria\\_del\\_bambù#Gli\\_utilizzi\\_nell'ambito\\_dell'ingegneria\\_civile](https://it.wikipedia.org/wiki/Ingegneria_del_bambù#Gli_utilizzi_nell'ambito_dell'ingegneria_civile)  
K. F. Chung, Bamboo Scaffolds in Building Construction, Erection of Bamboo Scaffolds, The Hong Kong Polytechnic University and International Network for Bamboo and Rattan.

<sup>55</sup> Collettivo Cerretini, Bamboo, in [https://issuu.com/collettivocerretini/docs/bamboo\\_-\\_collettivo\\_cerretini/36](https://issuu.com/collettivocerretini/docs/bamboo_-_collettivo_cerretini/36), 13/05/2010, consultato il 20/09/2017.

### 2.3.1 CAPRIATE

Negli edifici tradizionali del Sud-est asiatico e della Colombia è molto comune adottare tetti a falde inclinate (mono-falda o multi-falda). La tecnologia è simile a quella utilizzata per i tetti in legno: grossa orditura con funzione portante costituita da elementi di vario tipo (capriate, arcarecci e falsi puntoni); piccola orditura costituita da elementi di supporto che sostengono il manto di copertura.

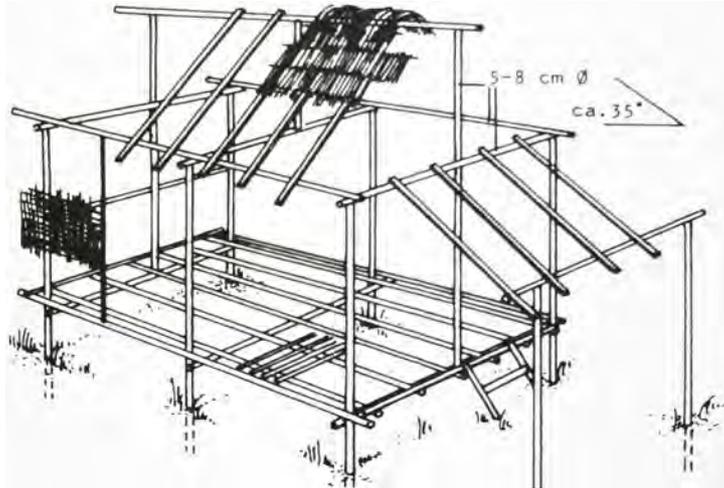


Figura 31. Disegno di uno schema costruttivo di una casa semplice, in S. GASS, H. DRÜSEDAU, J. HENNICKE, FREI OTTO (a cura di), *Il 31 Bambus Bamboo*, Stuttgart, Instituts für leichte Flächentragwerke, Stuttgart, 1985, p. 144.

La Figura 32 illustra un sistema di capriate con elementi in bambù simile a quella costruita in legno.

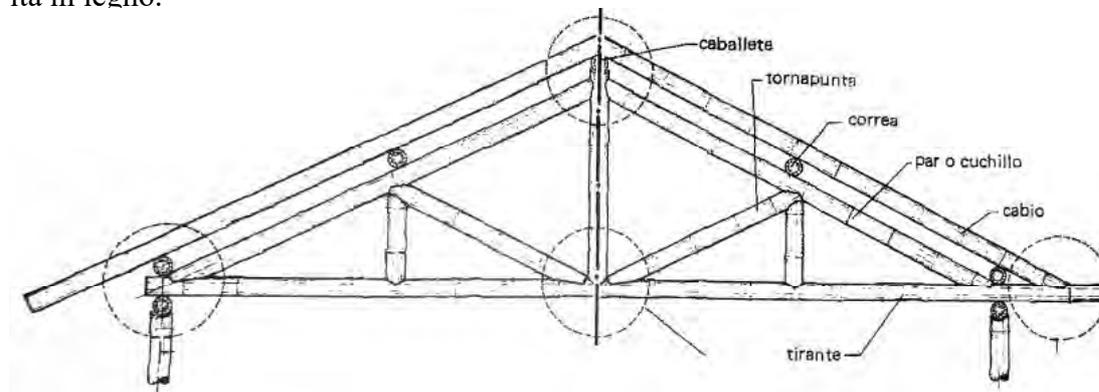


Figura 32. Tetti - Dettaglio costruttivo di capriate con puntoni, in OSCAR HIDALGO LÓPEZ, op. cit., p. 35.

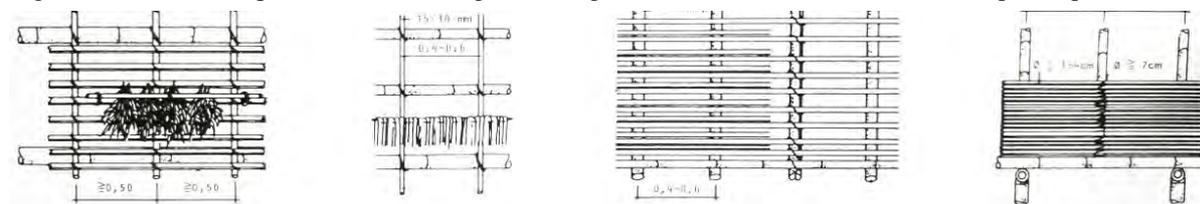


Figura 33a, 33b. Listelli orizzontali e verticali, in S. GASS, H. DRÜSEDAU, J. HENNICKE, FREI OTTO (a cura di), *Il 31 Bambus Bamboo*, Stuttgart, Instituts für leichte Flächentragwerke, Stuttgart, 1985, p. 212.

Figura 33c, 33. Listelli disposti uno accanto all'altro e listelli a incastro, in ID., *ibid.*

Il manto di copertura può essere costituito da coppi (Figura 34) o da canne di bambù che si estendono per tutta la lunghezza della falda (Figura 35).

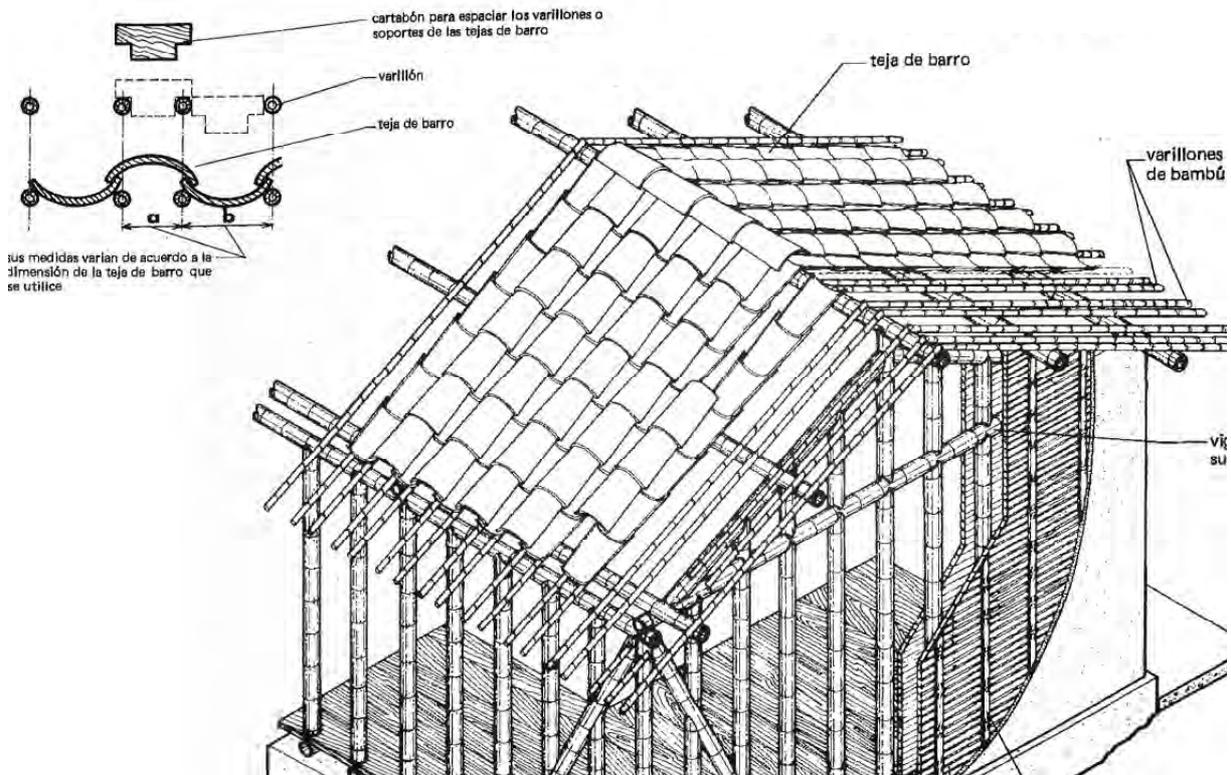


Figura 34. *Costruzione di tetti a due falde e disposizione dei travetti di bambù*, in OSCAR HIDALGO LÓPEZ, op. cit., p. 37.

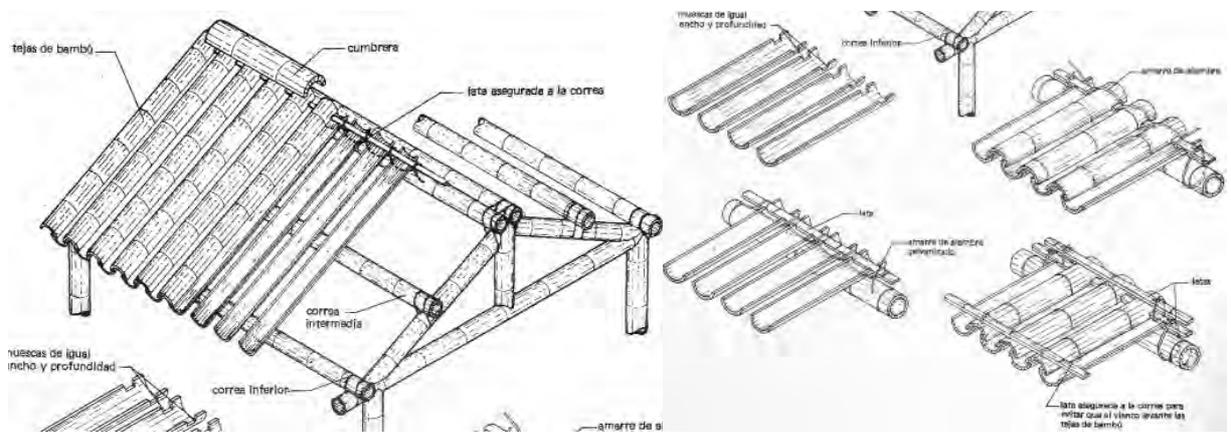


Figura 35. *Tetto a due falde con struttura portante e manto di copertura in bambù*, in OSCAR HIDALGO LÓPEZ, op. cit., p. 49.

Figura 36. *Dettagli sulla disposizione delle sezioni di canne di bambù*, in OSCAR HIDALGO LÓPEZ, op. cit., p. 49.

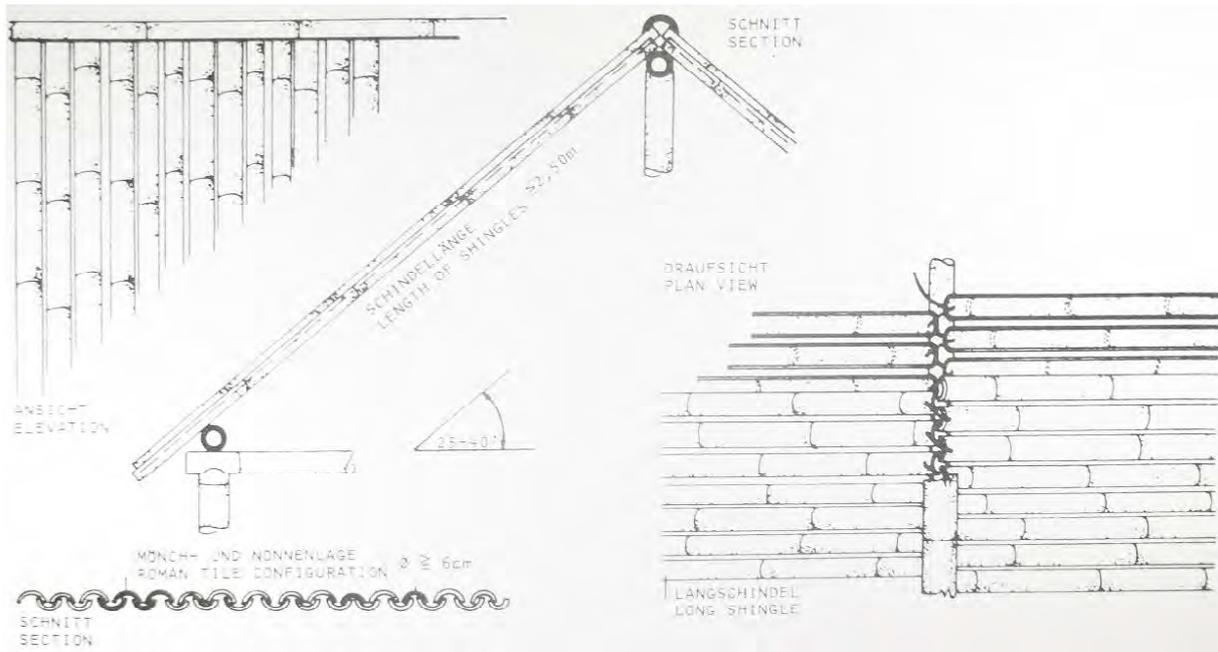


Figura 37. Tetto alla “romana” con una sola orditura di canna di bambù che si estende longitudinalmente, in S. GASS, op. cit., p. 465.

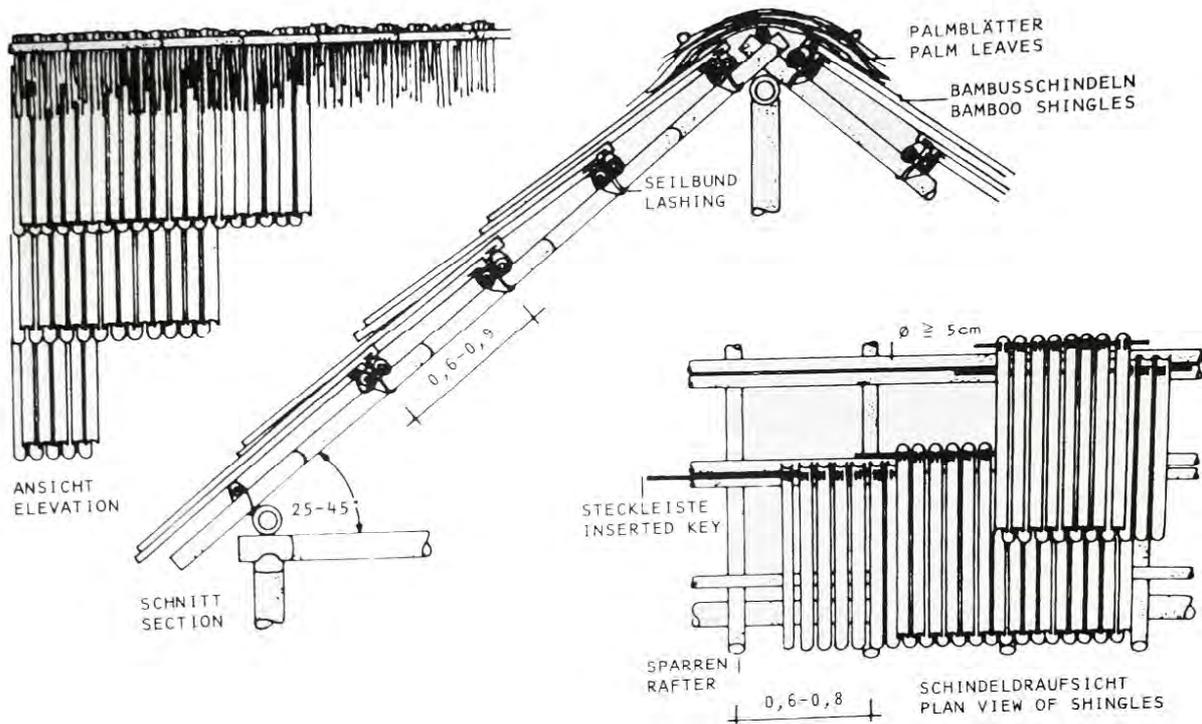


Figura 38. Tetto alla “romana” con doppia orditura di canne di bambù disposte in senso longitudinale, in S. GASS, op. cit., p. 214.

Si possono ricavare scandole di bambù, solitamente usate negli edifici religiosi di Bali<sup>18</sup>. Nella parte posteriore delle scandole viene sfilettata una “linguetta” che ha il compito di incastrarsi tra le canne.

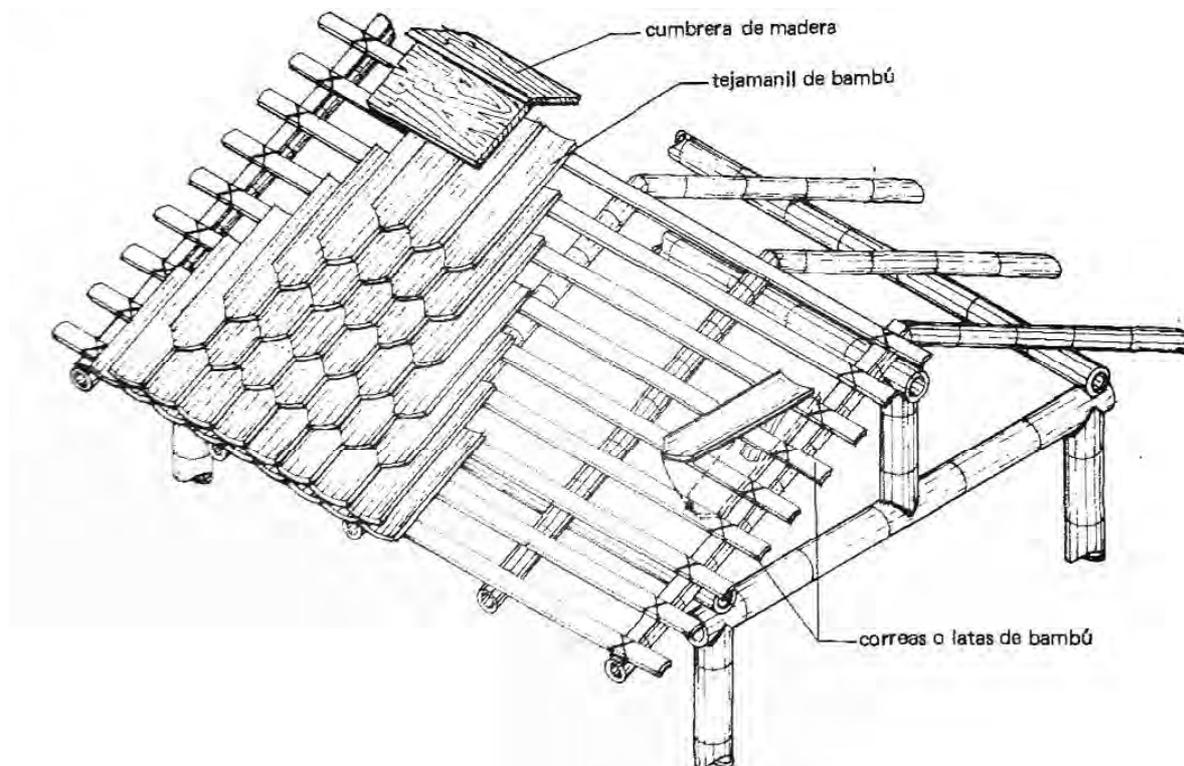


Figura 39. Schema di posa delle scandole, in OSCAR HIDALGO LÓPEZ, op. cit., p. 50.

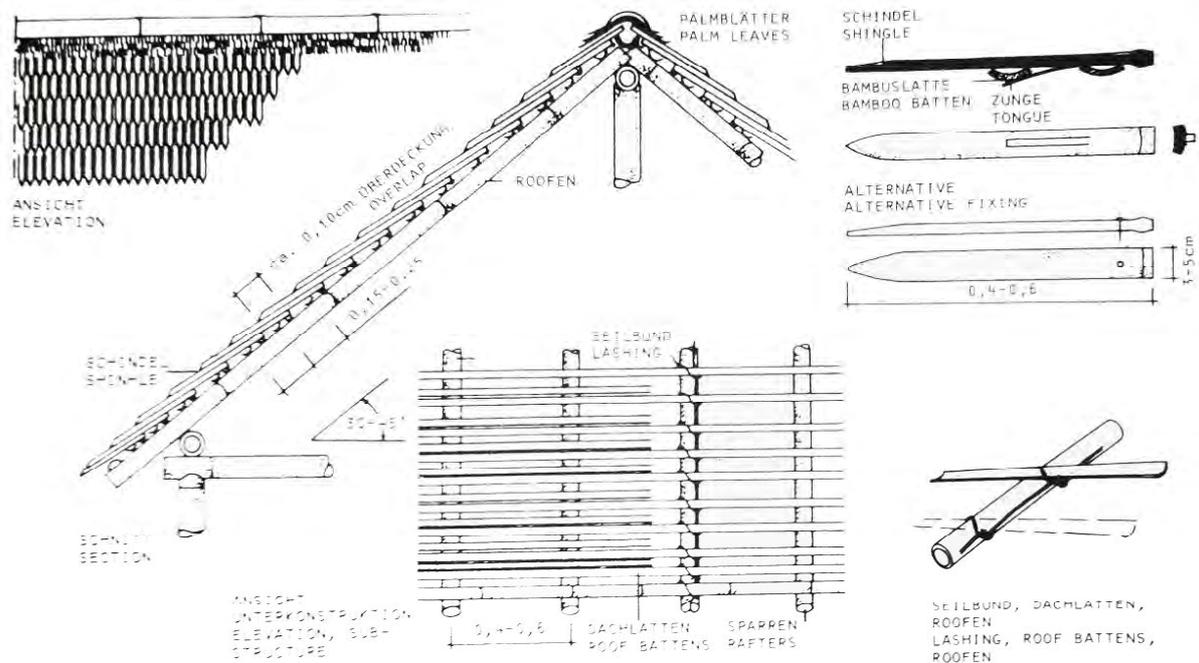


Figura 40. Dettagli costruttivi delle scandole, in S. GASS, op. cit., p. 216.

<sup>18</sup> S. GASS, H. DRÜSEDAU, J. HENNICKE, FREI OTTO (a cura di), *Il 31 Bambus Bamboo*, Stuttgart, Institut für leichte Flächentragwerke, Stuttgart, 1985, p. 216.

Il manto di copertura può essere anche costituito da materiali organici come l'erba, foglie di palma, trucioli di bambù, fibra di canna da zucchero (Ijuk). Le foglie di bambù possono essere impiegate, ma non sono molto vantaggiose per l'enorme quantità richiesta e per la necessità di avere una forte pendenza.

La copertura in materiale organico può essere protetta contro il vento attraverso listelli di canna incrociati. È necessario proteggere il colmo dalla pioggia tramite un ulteriore rivestimento<sup>56</sup>.

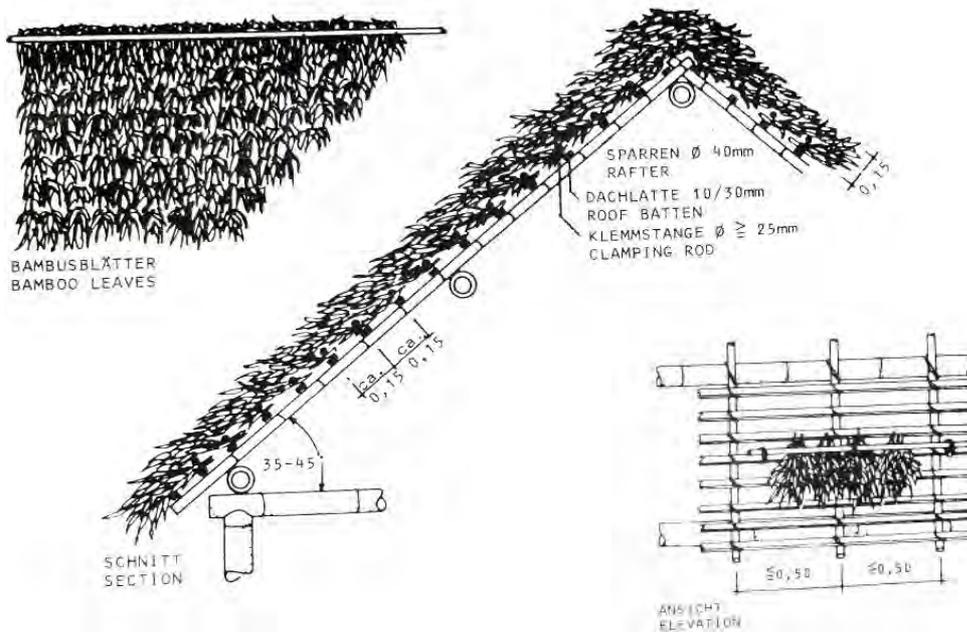


Figura 41. Manto di copertura con foglie di bambù, in S. GASS, op. cit., p. 217.

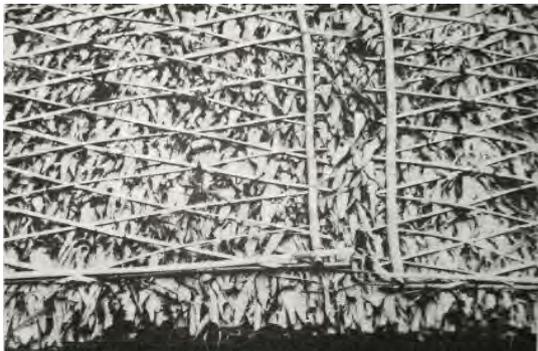


Figura 42. Asticelle di bambù che proteggono le foglie dal vento, in ID., ibid.

<sup>56</sup> S. GASS, H. DRÜSEDAU, J. HENNICKE, FREI OTTO (a cura di), *Il 31 Bambus Bamboo*, Stuttgart, Institut für leichte Flächentragwerke, Stuttgart, 1985.

## Tetto con orditura tridimensionale

Si osservi nella Figura 44 le travi reticolari costituite da elementi in bambù.

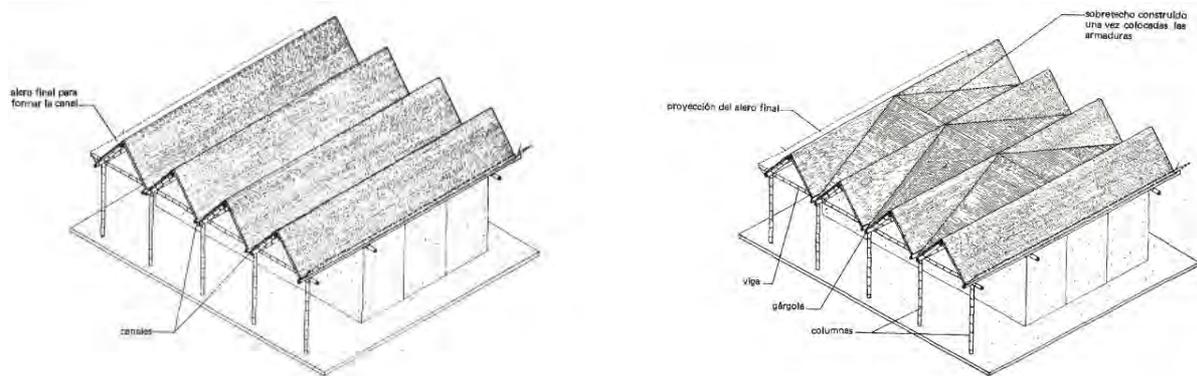


Figura 43. Copertura con estructura tridimensional (travi reticolari), in OSCAR HIDALGO LÓPEZ, op. cit., p. 41.

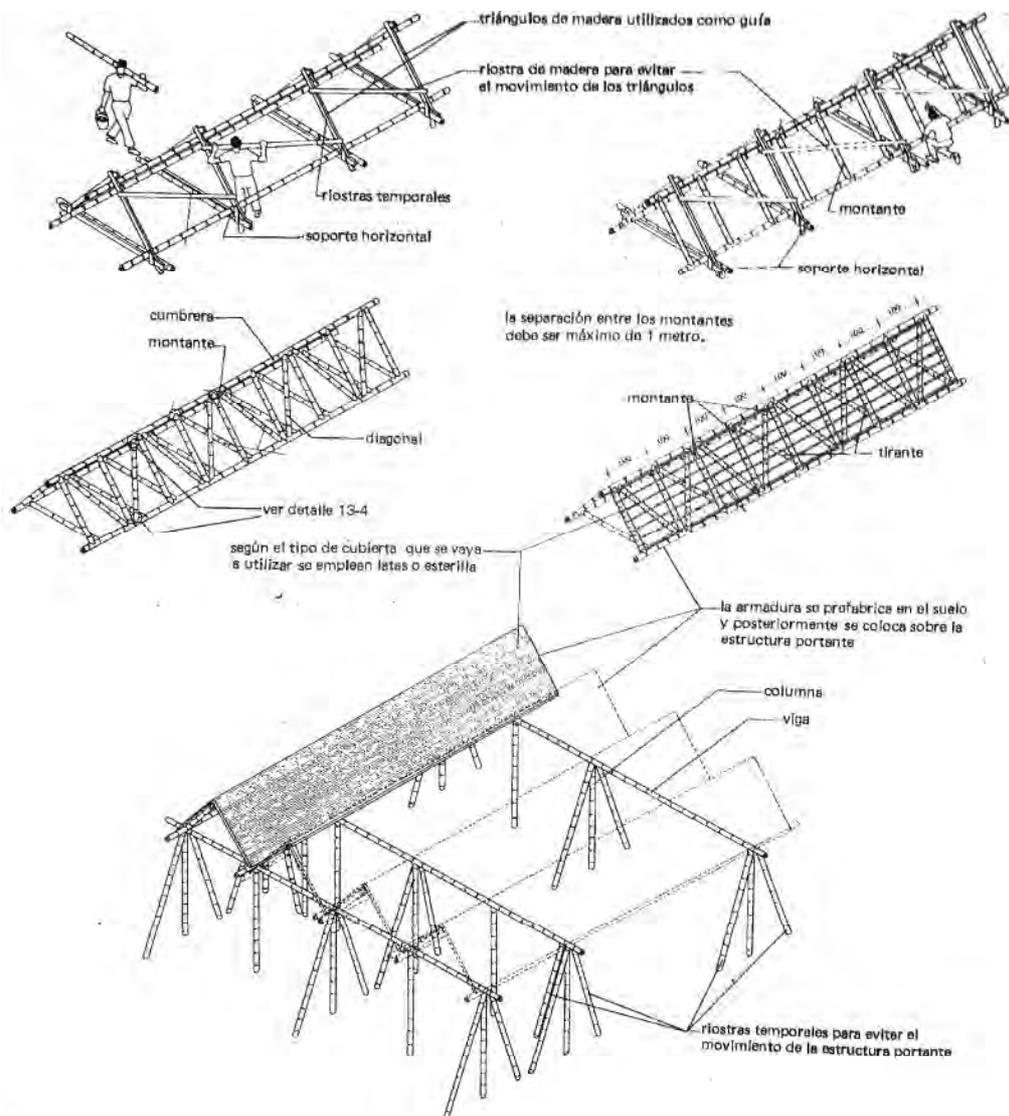


Figura 44. Copertura con estructura tridimensional (travi reticolari), in ID., ibid., p. 42.

### 2.3.2 ARCHI

In questo paragrafo vengono introdotte cinque tipologie di archi in bambù. Alcune di queste saranno approfondite nel paragrafo 5.5 e nei successivi capitoli che riportano casi studio reali di costruzioni in bambù. La natura del materiale estremamente flessibile, e allo stesso tempo molto resistente, consente di realizzare strutture ad arco di diverse forme e composizioni. In base a questi due parametri se ne distinguono le seguenti tipologie<sup>57</sup>.

#### I: archi composti da una singola canna

Lo sforzo flessionale applicato alle due estremità della canna definisce una determinata curvatura compresa entro i limiti di resistenza. La forma conica dell'asta definisce una curva asimmetrica avente raggio di curvatura decrescente dalla base alla punta.

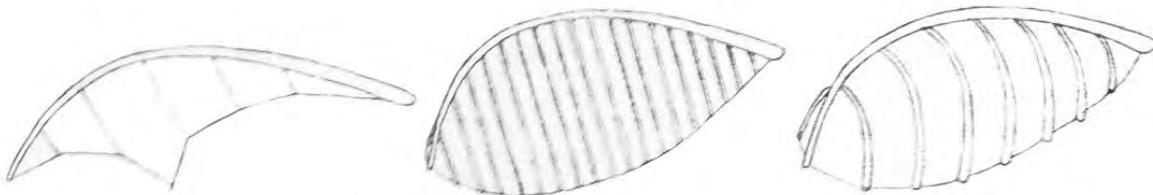


Figura 45. A sinistra. Sistema strutturale con rivestimento in tessuto. In centro. Sistema strutturale con canne rettilinee. A destra. Sistema strutturale con canne curvilinee. In S. GASS, op. cit., p. 306.

L'aggiunta di archi disposti parallelamente, e collegati trasversalmente da tiranti, forma superfici curve. Per aumentare la resistenza si adotta una disposizione triangolare inclinando un arco verso l'altro come in Figura 44. Se gli archi vengono disposti parallelamente, alternando la base con la punta, si creano delle forme intervallate come in Figura 47.



Figura 46. A sinistra. Sistema di archi paralleli. A destra. Sistema di archi inclinati. In S. GASS, op. cit., p. 306.

Infine, con questo arco si possono realizzare strutture di diverse dimensioni e forme adottando canne di diversa lunghezza. Si veda Figura 46.

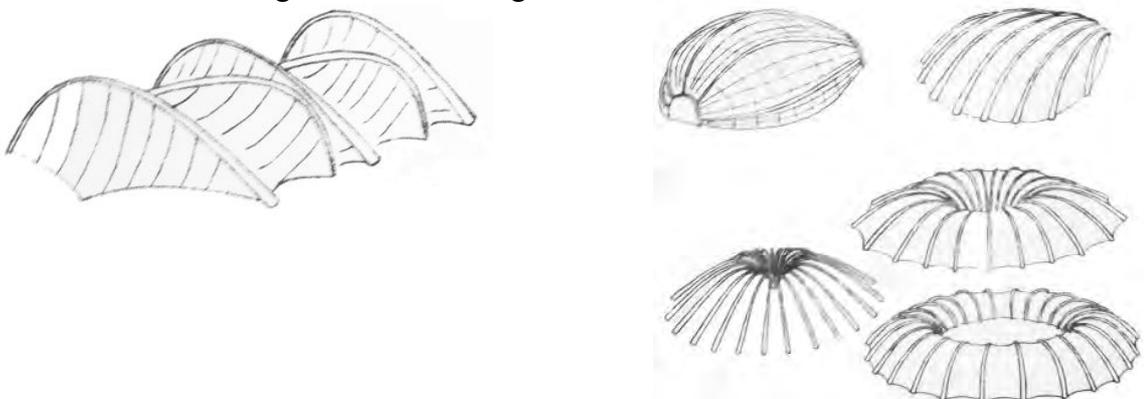


Figura 47. A sinistra. Sistema di archi con le estremità alternate, in S. GASS, op. cit., p. 306.

Figura 48. A destra. Diversi sistemi di cupole in S. GASS, op. cit., p. 306.

<sup>57</sup> S. GASS, op. cit.

## II: archi composti da due canne

In questa tipologia la forma assunta dall'arco dipende dal modo in cui si esegue la connessione. Solitamente si realizzano archi simmetrici, ma sono possibili diverse combinazioni di forme e di luci.

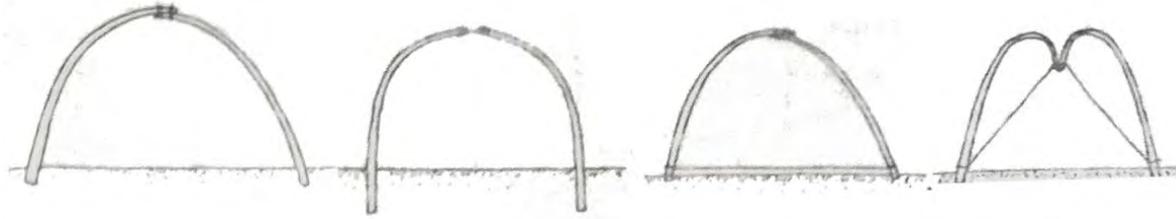


Figura 49. Sistemi di unione di due canne che piegate compongono un arco, in S. GASS, op. cit., p. 308.

Come nell'arco composto da una sola canna, la stabilità viene raggiunta tramite elementi in tensione disposti trasversalmente all'arco.

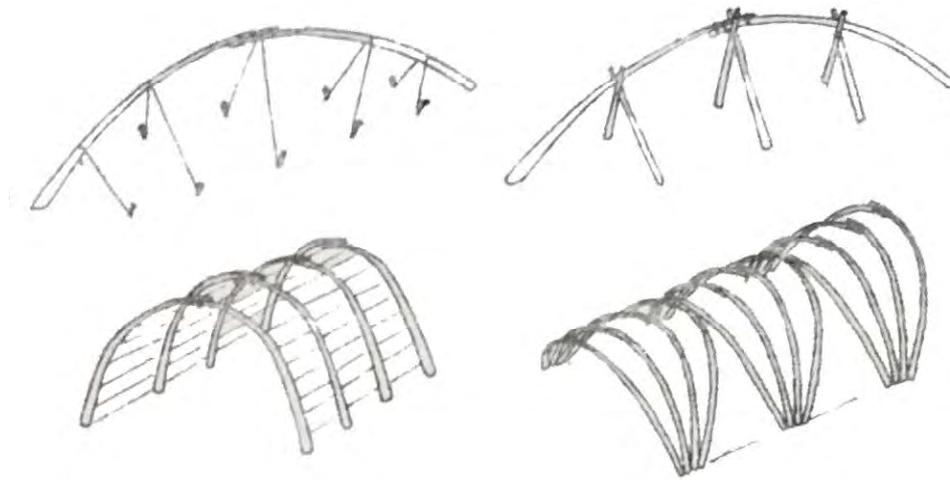


Figura 50. Stabilizzazione laterale per archi di canne, in S. GASS, op. cit., p. 308.

Impiegando canne della stessa lunghezza su una pianta ellittica, si ottengono archi con diverse curvature. Altre forme si possono ricavare usando archi di diverse lunghezze su piante di forme geometriche varie.



Figura 51. Archi o sistema di archi di diverse lunghezze e con curve caratterizzate dai vari piani di forma ellittica, circolare, triangolare e quadrata, in S. GASS, op. cit., p. 308.

Se le canne verticali vengono connesse una all'altra si ottiene un'arco a ogiva.

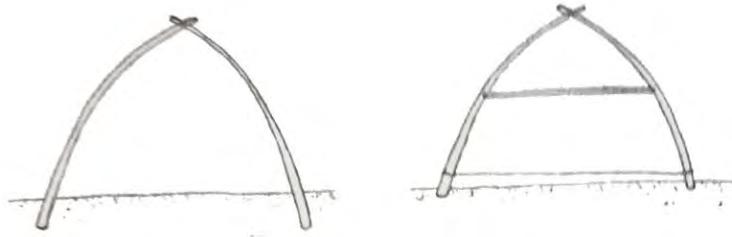


Figura 52. Arco composto da due canne e reso stabile contro le spinte laterali da un'asta e una corda tesa, in S. GASS, op. cit., p. 310.

Gli archi possono essere allineati su asse verticale o inclinato.

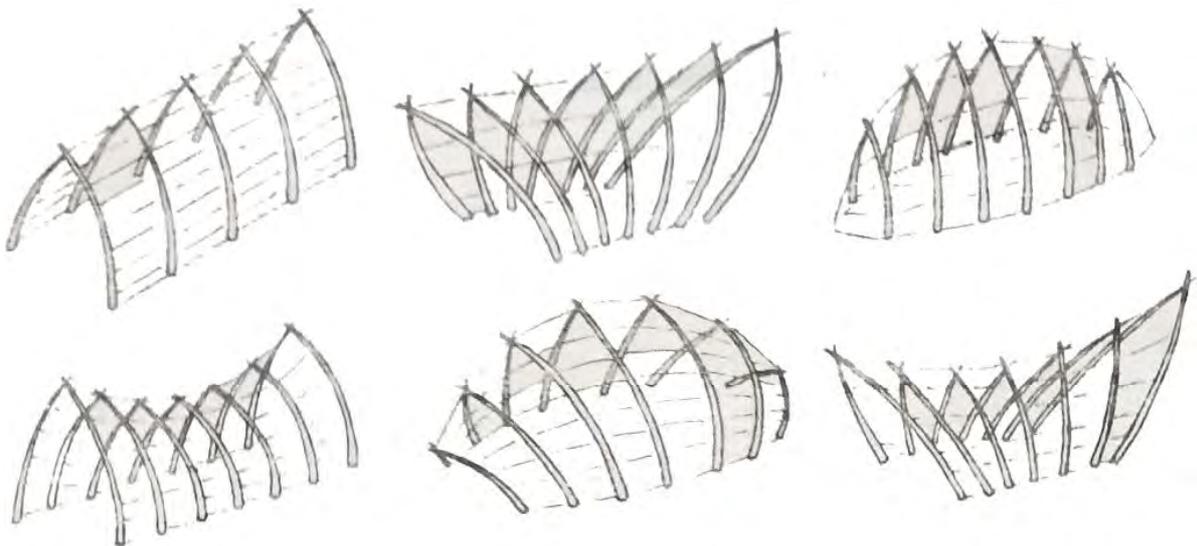


Figura 53. Diversi sistemi ad archi composti da due canne, in S. GASS, op. cit., p. 310

Da questo sistema possono nascere diverse forme. Disponendo le canne su una pianta centrale, si ottiene una struttura molto robusta ma più sottoposta a deformazione sotto carico orizzontale rispetto a un sistema lineare (si veda figura 58).



Figura 54. Archi con diverse altezze, disposti parallelamente, in S. GASS, op. cit., p. 310.

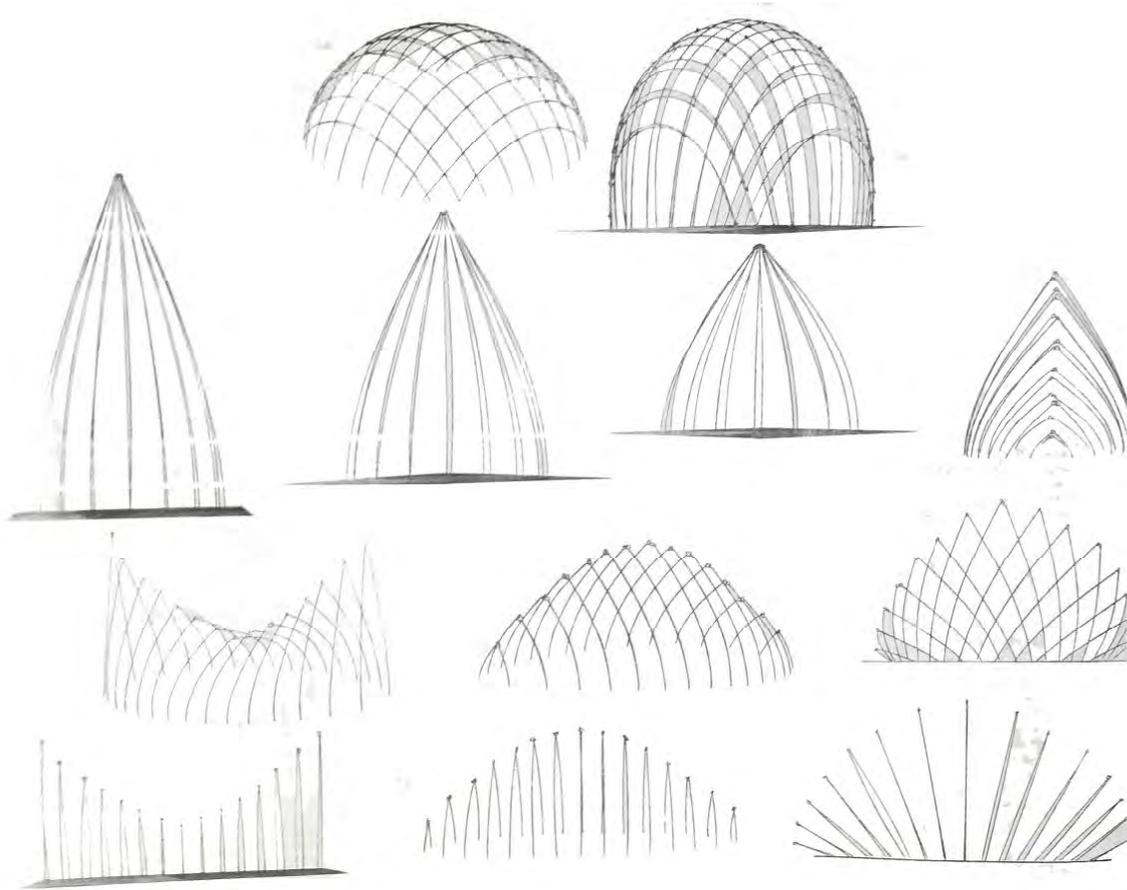


Figura 55. Fotografie di modelli fatti in fil di ferro, S. GASS, op. cit., p. 311.

### III: archi composti da diverse canne

Questa tipologia di arco è adatta per grandi campate e per strutture a griglia con superficie curva.

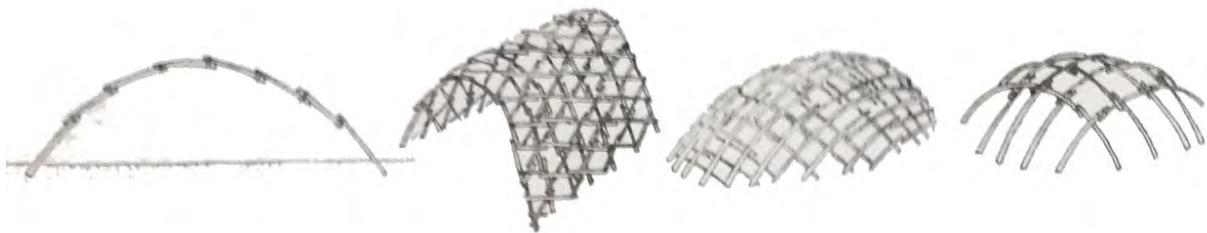


Figura 56. Archi composti da diverse canne e impiegati per grandi luci, in S. GASS, op. cit., p. 310.

### IV: archi inflessi

Unendo le punte delle canne in maniera parallela si ottiene un arco inflesso. Le canne prima si allontanano in direzioni opposte per poi avvicinarsi l'uno all'altro fino all'unione delle estremità. Anche in questa tipologia, la forma può essere ottenuta fissando un'asta e una corda tesa.

Le proprietà del materiale e la sua geometria intrinseca giocano un ruolo decisivo per quanto riguarda la forma.

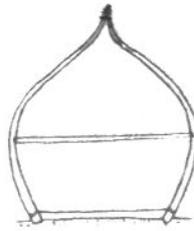


Figura 57. Forma di arco a “cipolla”, in S. GASS, op. cit., p. 312.

L’addizione lineare di archi verticali o inclinati, che giacciono su una pianta rettangolare o ellittica, consente di ottenere diverse forme di copertura.

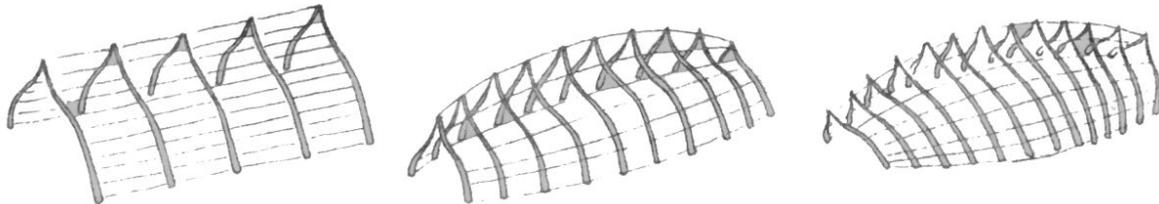


Figura 58. Disposizione lineare e parallela di archi a “cipolla”, in S. GASS, op. cit., p. 312.

Le cupole a bulbo costituite da canne di bambù si ottengono dalla disposizione di singole canne su una pianta circolare unite alla punta. Talvolta si aggiungono anelli di compressione assieme a corde perimetrali.

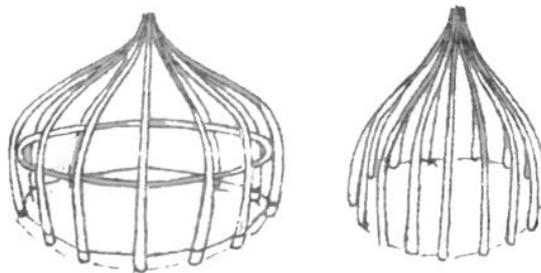


Figura 59. Cupole moresche con anelli che aumentano la rigidità, in S. GASS, op. cit., p. 312.

## V: archi composti da gruppi o fasci di canne

Per ottenere elementi strutturali è possibile far riferimento al sistema di archi composti da un insieme di canne. Di questo sistema si parla nel Capitolo 4 nella descrizione del metodo di CanyaViva.

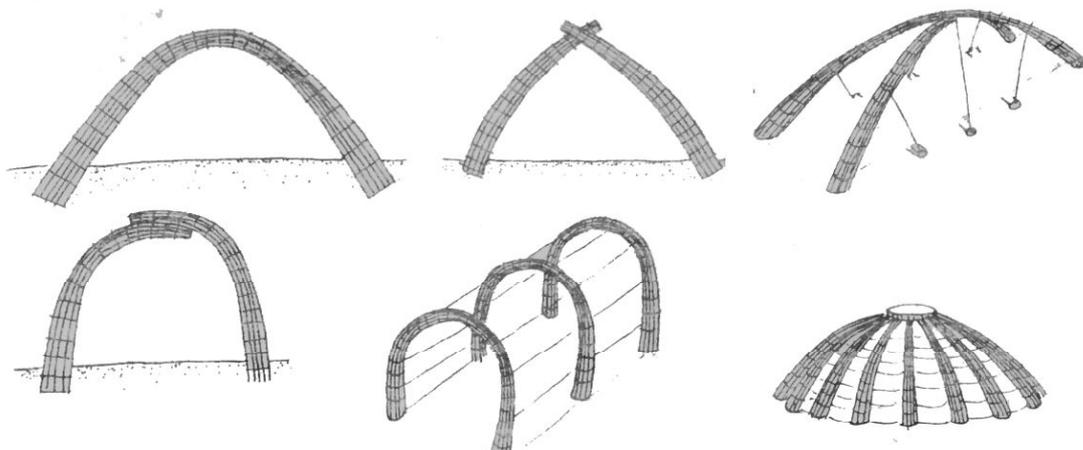


Figura 60. Sistema ad archi con fasci di canne, in S. GASS, op. cit., p. 312.

## 2.4 I MUDHIF NELLE PALUDI MESOPOTAMICHE

Il sistema costruttivo ad archi costituiti da fasci di canne risale all'età sumera, epoca in cui gli abitanti delle paludi del Tigri e dell'Eufrate, detti Arab al-Ahwar, costruivano grandi edifici collettivi chiamati Mudhif, utilizzati come luogo di ritrovo e fatti costruire dagli sceicchi. L'architettura vernacolare araba dei Mudhif è stata tramandata dai Ma'dan, arabi delle paludi mesopotamiche, nell'odierno sud-est iracheno fino al 1990 circa, periodo in cui le paludi meridionali vennero asciugate a causa di insurrezioni avvenute in Iraq<sup>58</sup>. Oggi, buona parte dell'area è stata nuovamente inondata, e gli abitanti dei villaggi hanno ripreso la tipologia strutturale del mudhif applicandola alle loro abitazioni<sup>59</sup>. Tali strutture, possono essere edificate in meno di 3 giorni<sup>60</sup> e durare fino a 25 anni; sorgono sulla riva delle paludi, su isole artificiali di sole canne chiamate "kibasha", e su isole di canne e fango, distribuiti a strati alternati, chiamate "dibin"<sup>61</sup>.



Figura 61. Villaggio del sud-est iracheno, edificato prima delle insurrezioni, con abitazioni mudhif costruite sopra le isole della palude, <http://www.messynessychic.com/2014/11/12/the-floating-basket-homes-of-iraq-a-paradise-almost-lost-to-saddam/>, consultato il 28/07/2018.



Figura 62. Un edificio Mudhif costruito sopra un'isola kibasha, <http://www.messynessychic.com/2014/11/12/the-floating-basket-homes-of-iraq-a-paradise-almost-lost-to-saddam/>, consultato il 28/07/2018.

<sup>58</sup> <https://www.britannica.com/place/Lake-Hammar#ref282463>, consultato il 03/04/2018.

<sup>59</sup> BARBARA BRUNETTI, "La canna palustre nell'architettura vernacolare", <https://www.architetturaecosostenibile.it/architettura/progetti/nel-mondo/canna-architettura-vernacolare-184/>, 2015, consultato il 03/04/2018.

<sup>60</sup> "The Floating Basket Homes of Iraq: A Paradise Almost Lost to Saddam", <http://www.messynessychic.com/2014/11/12/the-floating-basket-homes-of-iraq-a-paradise-almost-lost-to-saddam/>, 2014, consultato il 03/04/2018.

<sup>61</sup> BARBARA BRUNETTI, "La canna palustre nell'architettura vernacolare", <https://www.architetturaecosostenibile.it/architettura/progetti/nel-mondo/canna-architettura-vernacolare-184/>, 2015, consultato il 03/04/2018.

“La costruzione dei mudhif consiste nel legare assieme le sottili canne palustri in fasci che raggiungono fino a 50 cm di spessore sviluppando archi con un’apertura dai 6 ai 12 metri. Gli archi, a loro volta, sono legati con lunghi fasci di canne più sottili che corrono in file orizzontali sul lato lungo dell’edificio. Il tetto viene coperto con stuoie di canne finemente intrecciate, le pareti con un intreccio meno fitto che consente il passaggio dell’aria. Il fondo di questi edifici marcisce in 7-10 anni e a quel punto la base viene tagliata via e l’edificio abbassato, poi usato per un altro periodo prima di essere abbandonato”<sup>62</sup>.

L’antica architettura sumera è oggi tutt’altro che primitiva, anzi, richiama gli aspetti del moderno concetto sull’architettura eco-sostenibile. Di seguito, vediamo le immagini di alcuni mudhif contemporanei costruiti in Iraq.



Figura 63. A sinistra. ROBERT HARDING, *Mudhif (Meeting House)*. Photograph Taken in 1982, Shobaish, Marshes, Iraq, <https://www.art.com/products/p13049935-sa-i2296662/mudhif-meeting-house-photograph-taken-in-1982-shobaish-marshes-iraq-middle-east.htm>, consultato il 27/07/2018.

Figura 64. A destra. Recente costruzione di un edificio Mudhif, <http://www.lan-architetture.org/materiali/arundo-donax-2/>, consultato il 27/07/2018.

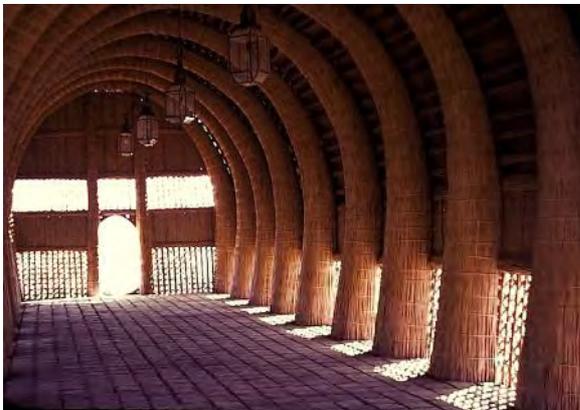


Figura 65. A sinistra. Struttura interna di un edificio Mudhif, <http://architettopoli.blogspot.it/p/arundo-donax.html>, consultato il 27/07/2018.

Figura 66. A destra. Un edificio Mudhif lungo il fiume Eufrate nella regione di Al-Chibayish, <http://dailystorm.it/2014/06/23/larte-del-costruire-con-le-canne-di-bambu/>, consultato il 27/07/2018.

<sup>62</sup> <http://www.lan-architetture.org/materiali/arundo-donax-2/>, consultato il 03/04/2018.

## 2.5 CASO STUDIO: NEW ASSEMBLY HALL OF PANYADEN INTERNATIONAL SCHOOL

- Architetti: Chiangmai Life Architects (CLA) – Markus Roselieb, Tosapon Sittiwong
- Ingegneri: Esteban Morales Montoya, Phuong Nguyen
- Costruttore: Chiangmai Life Construction (CLC)
- Localizzazione: Namprae, Hang Dong, Chiang Mai, Thailandia
- Committente: Panyaden International School
- Anno di realizzazione: 2017
- Superficie: 962 m<sup>2</sup> (787 m<sup>2</sup> livello 1 + 175 m<sup>2</sup> livello 2)
- Budget: 300.000 dollari

A seguito di un colloquio con l'architetto Markus Roselieb, residente in Thailandia, e con l'ingegnere Esteban Morales Montoya, residente in Colombia, è stato possibile ottenere informazioni complete sul caso studio in esame, riportate in questo paragrafo. Oltre all'intervista con i professionisti, le informazioni si basano sul documento inedito *“Evaluation and structural calculation report of Panyaden New Assembly hall”* del quale l'ingegnere Morales Montoya è l'autore.

La scuola internazionale di Panyaden, situata nella città di Chiang Mai nel nord della Thailandia, è stata realizzata con materiali naturali come terra e bambù con l'intento di richiamare i bambini alla natura secondo l'educazione buddista e mostrare loro le potenzialità di un'architettura dal design organico, sostenibile e contemporaneo. Le ampie linee del tetto traggono ispirazione da un bocciolo di fiore di loto, un simbolo di purezza nel buddismo.

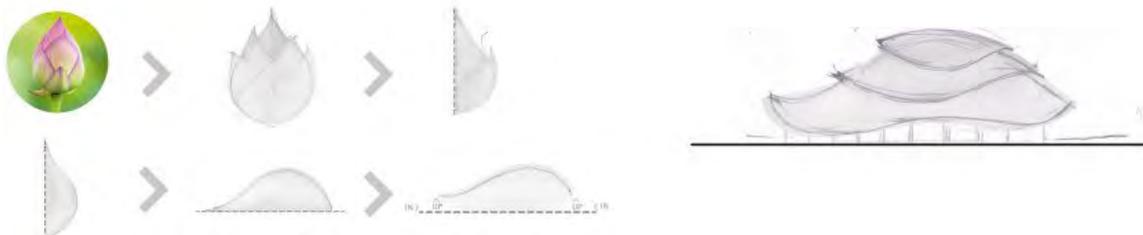


Figura 67. Concept ispirato dai petali del fiore di loto, <http://www.ingegneri.info/news/strutture/strutture-in-bambu-il-prefabbricato-per-lo-sport-di-una-scuola-buddista-in-thailandia/>

Una delle ultime realizzazioni per questo complesso scolastico (che include scuola materna ed elementare) consiste in un'arena al coperto per lo sport, gli spettacoli e le assemblee (Sports & Assembly Hall), messa a punto da Chiangmai Life Architects (CLA) insieme a Chiangmai Life Construction (CLC), specializzati in grandi strutture in bambù, terra e legno. Lo spazio comprende anche un palcoscenico per attività teatrali e un deposito per attrezzature sportive. Le tribune sui due lati lunghi dell'edificio offrono punti di vista ottimali per genitori e visitatori.

Senza pareti perimetrali, l'arena gode di un clima fresco e piacevole durante tutto l'anno poiché è garantita una ventilazione naturale. Dal punto di vista strutturale gli architetti Markus Roselieb e Tosapon Sittiwong hanno collaborato con gli ingegneri Phuong Nguyen e Esteban Morales Montoya per la realizzazione di un sistema strutturale prefabbricato interamente in bambù, in grado di resistere ai forti venti e ai frequenti terremoti che colpiscono questa zona.<sup>63</sup>

<sup>63</sup> Diletta Bracchini, “Strutture in bambù: il prefabbricato per lo sport di una scuola buddista in Thailandia”, <http://www.ingegneri.info/news/strutture/strutture-in-bambu-il-prefabbricato-per-lo-sport-di-una-scuola-buddista-in-thailandia/>, consultato il 03/07/2018.

Markus Roselieb: “La struttura è permanente e non ha bisogno di manutenzione. Il trattamento eseguito con il borace e l’acido borico assicurano una durata di 50 anni. Sono state utilizzate le specie *Dendrocalamus sericeus* e *Thyrsostachys oliveri*, provenienti dal nord della Thailandia, di età compresa tra i 3 e i 5 anni, raccolte e trasportate nel mio impianto di trattamento, localizzato in prossimità della foresta. Il bambù è stato separato in base all’utilizzo e trattato in una vasca riempita con una soluzione di borace e acido borico per 7 giorni consentendo ai sali di penetrare fino nelle parti interne della canna. Successivamente il bambù è stato estratto dalla vasca e collocato in posizione verticale in modo che la soluzione defluisse dalla canna verso la vasca. È stato lasciato essiccare al sole per una settimana. Infine, le canne sono state fatte asciugare in un luogo fresco e asciutto fino al momento in cui sono state trasportate nel sito di costruzione. La scelta di utilizzare specie di bambù non gigante è stata dettata dalla difficoltà nel realizzare le connessioni per una struttura ad archi in fasci di bambù”.

	<b>Dendrocalamus sericeus</b>							
	<i>Pai Sang Mon</i>							
	D [mm]	d [mm]	A [mm <sup>2</sup> ]	W [mm <sup>3</sup> ]	I [mm <sup>4</sup> ]	It [mm <sup>4</sup> ]	Weight [kg]	Density [kg/m <sup>3</sup> ]
97.5	63.5	4299	74623	3637854	7275707.6	20	479	
	<b>Thyrsostachys oliveri</b>							
	<i>Pai Ruak Dum</i>							
	D [mm]	d [mm]	A [mm <sup>2</sup> ]	W [mm <sup>3</sup> ]	I [mm <sup>4</sup> ]	It [mm <sup>4</sup> ]	Weight [kg]	Density [kg/m <sup>3</sup> ]
35	14	813	4108	71881	143763	6	733	

Figura 68. Specie di bambù utilizzate nella costruzione.

Esteban Morales Montoya: “la struttura è stata progettata per avere un’adeguata rigidità al fine di resistere ai carichi minimi di progetto richiesti dalle normative”.

Le normative prese in considerazione per tale progetto sono le seguenti<sup>64</sup>:

Tailandesi:

- *Wind Loading Calculation and Response of Buildings (DPT 1311-50) (A.D. 2007).*
- *DPT 1302 Standard Design of earthquake vibration resistance B.E. 2552 (A.D. 2009).*
- *DPT 1301 Standard Design of earthquake vibration resistance B.E. 2554 (A.D. 2011).*
- *DPT 1303 Standard to evaluate and enhance the stability of building structures in the area that may have been tremors of the earthquake. B.E. 2557 (A.D. 2014).*

• *Mechanical properties of selected bamboo species carried out by Royal Forest Department of Thailand and International Tropical Timber Organization (Thaipetch et al. 2004; Sompoh et al. 2013)*

Internazionali:

- *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures (ASCE/SEI 7-05).*
- *ISO 22156: Bamboo - structural design (ISO, 2004a).*
- *NSR-10: Reglamento Colombiano de Construcción Sismo resistente - Chapter G12 Estructuras de Guadua (Guadua structures) (AIS, 2010).*
- *Reglamento Peruano de Edificaciones, Section III. Code E100 - Diseño y Construcción con Bambú (ICG 2012).*
- *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI 318-14)*

<sup>64</sup> Esteban Morales Montoya, Evaluation and structural calculation report of Panyaden New Assembly Hall, Medellín, inedito, 15/06/2016.

*Le analisi sono state condotte secondo la teoria della meccanica strutturale su un modello matematico appropriato, tramite il software SAP2000 v.14, contemporaneamente a calcoli sviluppati dall'ingegnere responsabile.<sup>3</sup>*



Figura 69. Alberto Cusi, L'arena per lo sport, spettacoli e assemblee coperta da un intricato traliccio strutturale in bambù, <http://www.ingegneri.info/news/strutture/strutture-in-bambu-il-prefabbricato-per-lo-sport-di-una-scuola-buddista-in-thailandia/>, consultato il 28/07/2018.



Figura 70. Alberto Cusi, La sala è coperta da un intricato traliccio strutturale in bambù lasciato a vista, <http://www.ingegneri.info/news/strutture/strutture-in-bambu-il-prefabbricato-per-lo-sport-di-una-scuola-buddista-in-thailandia/>

<sup>3</sup> Esteban Morales Montoya, op. cit.



Figura 71. Dettaglio delle legature, <http://www.ingegneri.info/news/strutture/strutture-in-bambu-il-prefabbricato-per-lo-sport-di-una-scuola-buddista-in-thailandia/>

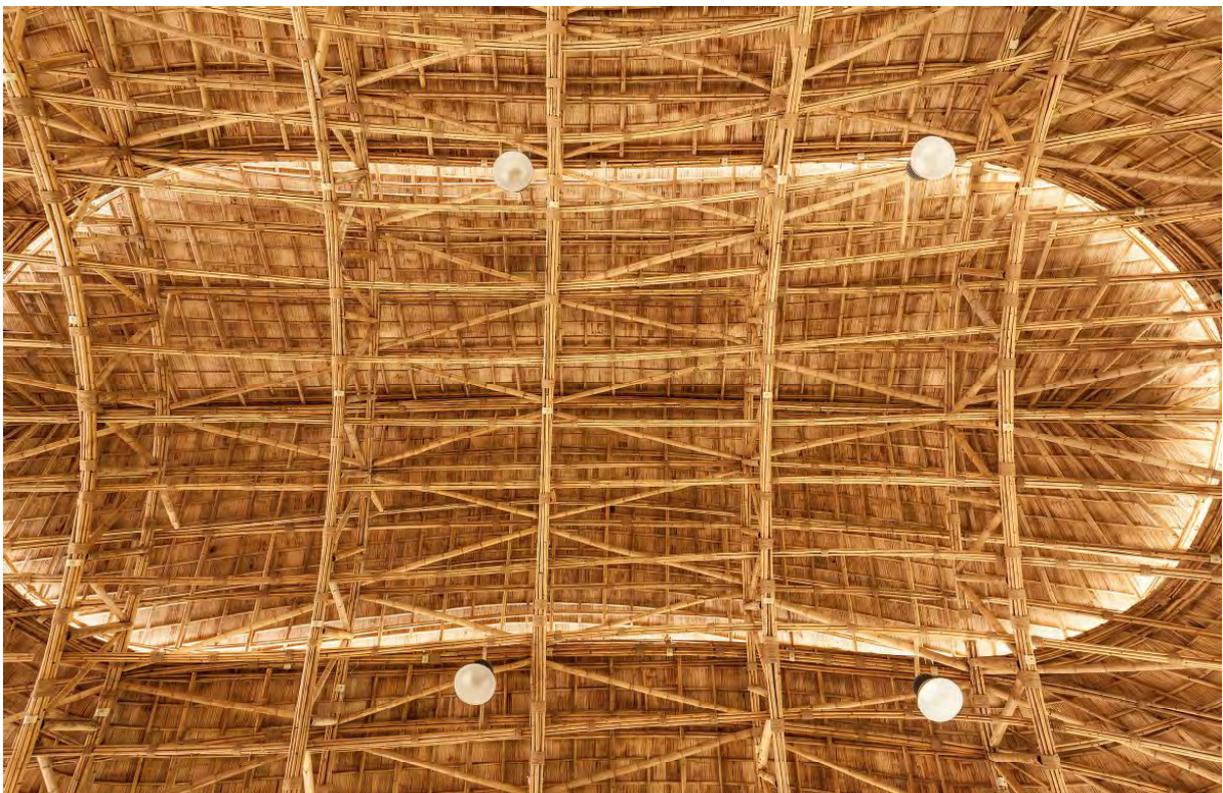


Figura 72. Alberto Cosi, Dettaglio dell'intradosso della copertura in bambù, <http://www.ingegneri.info/news/strutture/strutture-in-bambu-il-prefabbricato-per-lo-sport-di-una-scuola-buddista-in-thailandia/>



Figura 73. Sinistra. ALBERTO COSI, *Balconate ricavate all'interno dell'intreccio strutturale, corrono longitudinalmente ai lati del campo e offrono a visitatori e genitori la possibilità di assistere agli eventi,*  
 Figura 74. Destra. *I tralicci prefabbricati sono precostruiti in loco e sollevati con una gru,*

## La struttura

Markus Roselieb: “*gli archi con struttura reticolare sono costituiti da fasci di canne di bambù, distanziati da un interasse di 3 metri. Su di essi si appoggia la struttura del tetto costituita da una doppia orditura di travetti sui quali si appoggia il manto di copertura costituito da bamboo splittato e scandole. Si è utilizzato una quantità di corda, impiegata per la legatura dei fasci, superiore rispetto alla quella di bulloni impiegate per le connessioni tra gli elementi della trave reticolare. In alcuni punti si sono adottate fascette metalliche per la legatura dei fasci e spesso si è iniettato il calcestruzzo negli internodi che ospitano i bulloni al fine di trasmettere le sollecitazioni nella canna di bambù ed evitare rotture o fenditure longitudinali parallele alla fibra*”.

Esteban Morales Montoya afferma che secondo la normativa edilizia: “*tutti i giunti della struttura devono essere progettati ed eseguiti in modo da evitare trasmissioni di momento tra i diversi elementi che compongono il giunto, eccetto il caso in cui uno degli elementi sia continuo, in questo caso ci sarà trasmissione di momento solo nell'elemento continuo. Montoya afferma infine che: “tutte le legature sono permanenti”*”.<sup>65</sup>

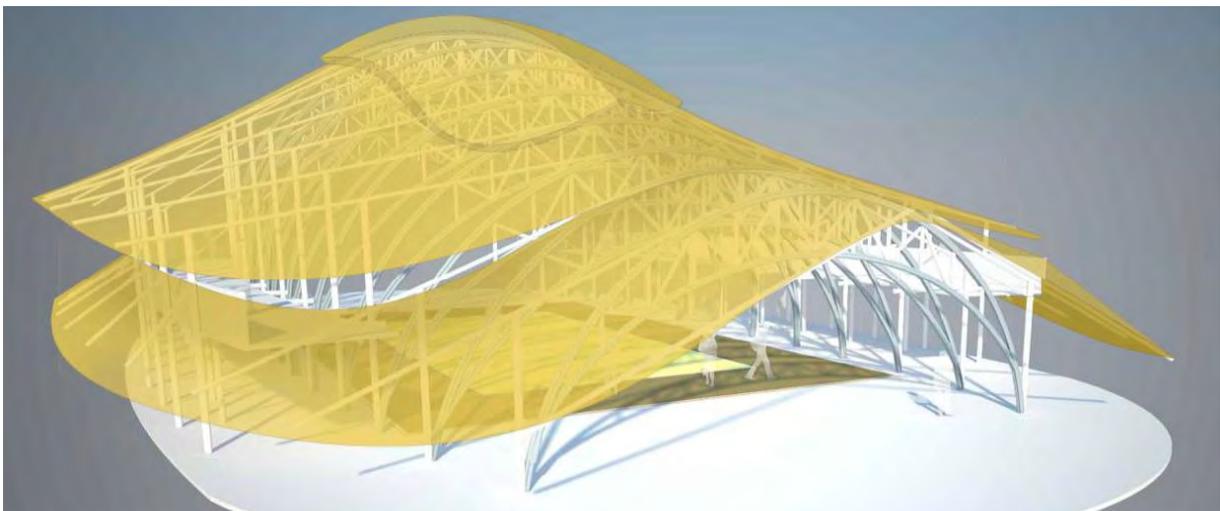


Figura 75. Vista isometrica della Panyaden New Assembly Hall.

<sup>65</sup> Esteban Morales Montoya, op. cit.

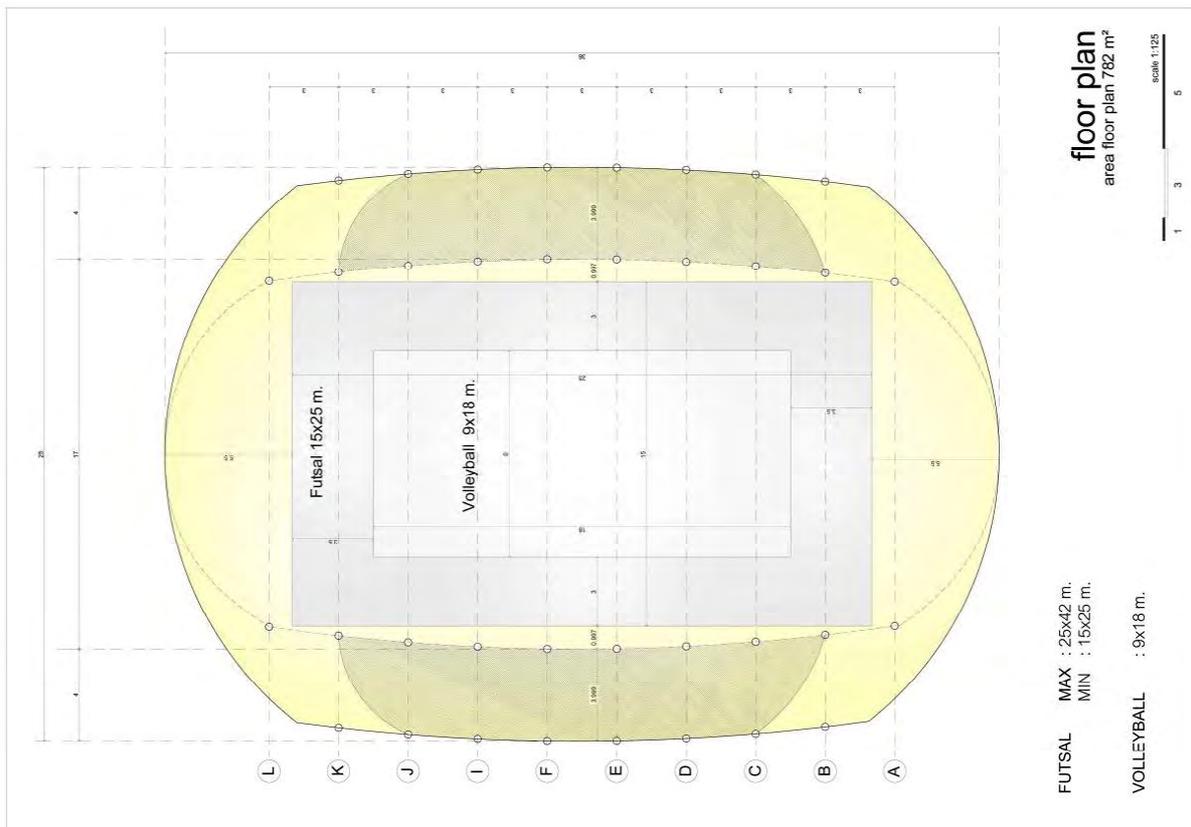


Figura 76. Pianta quotata della Panyaden New Assembly Hall.

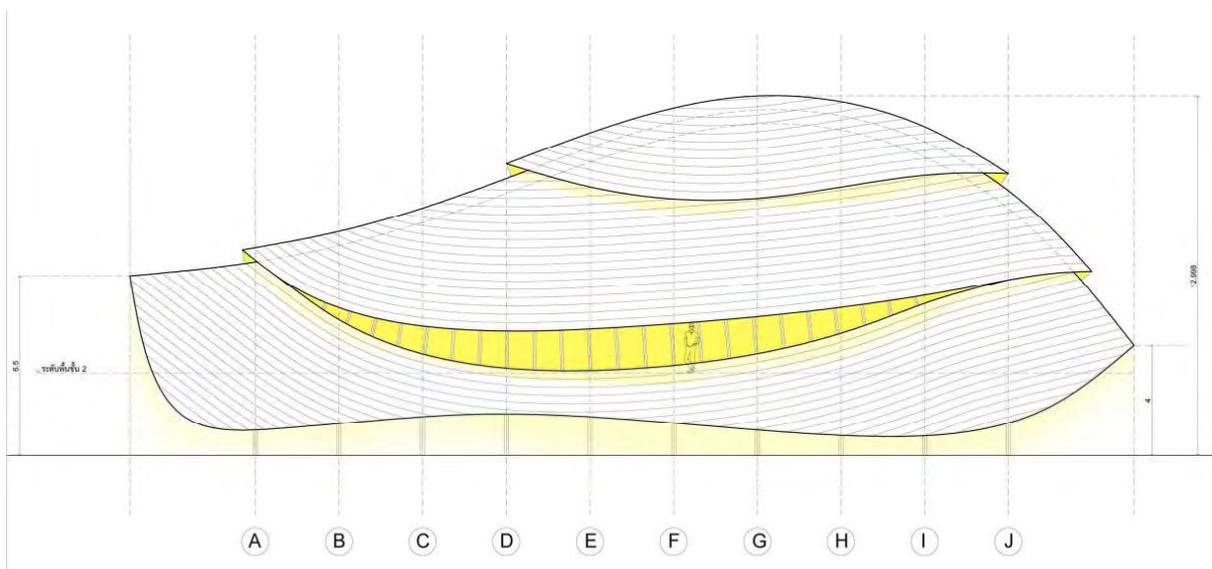


Figura 77. Prospetto della Panyaden New Assembly Hall.

Le travi reticolari ad arco (in totale 10) sono state costruite in loco e sollevate con una gru; sono composte da due fasci di canne (superiore e inferiore) i quali coprono luci di 17 m (si veda figura 93) senza rinforzi o connessioni in acciaio ma impiegando legature e, talvolta, corde metalliche (si vedano figure 70,71 e 80); i restanti del sistema travatura reticolare ad arco, quali montante e diagonale, sono invece connessi tramite bulloni e piastre metalliche.

Le capriate sono state prefabbricate e in seguito posizionate tramite una gru. Il manto di copertura è costituito da scandole.<sup>66</sup>

<sup>66</sup> [https://www.domusweb.it/it/architettura/2017/08/23/centro\\_sportivo\\_di\\_bambu.html](https://www.domusweb.it/it/architettura/2017/08/23/centro_sportivo_di_bambu.html), consultato il 29/08/2018.

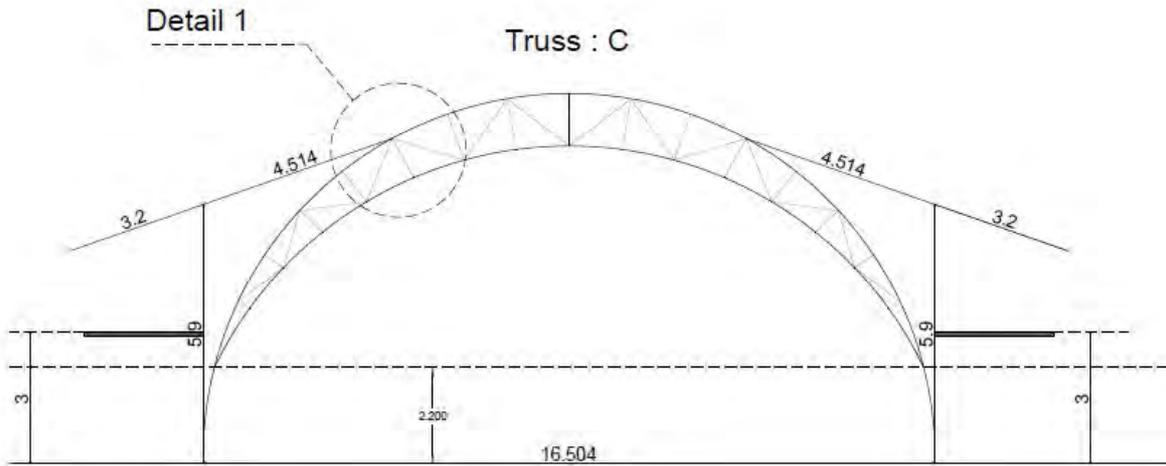


Figura 78. Sezione. Panyaden New Assembly Hall.

L'arco è composto da due fasci di canne legati insieme fino a 2,20 metri di altezza. In corrispondenza di questa altezza i fasci legati insieme si dividono in modo tale da lasciare una luce tra loro nella quale si inseriscono elementi in bambù di sostegno dando vita a un arco con struttura reticolare. L'arco in Figura 78 presenta una luce di 16,50 metri. In corrispondenza delle basi dell'arco sorgono pilastri di sostegno per la copertura con altezza di 5,9 metri e per la tribuna con altezza di 3 metri.

Nella Figura 79 si notano i tiranti in corda al fine di evitare ribaltamento dell'arco durante la costruzione finché lo stesso non viene legato con gli altri elementi strutturali.



Figura 79. Arco con struttura reticolare costituito da fasci di canne di bambù.

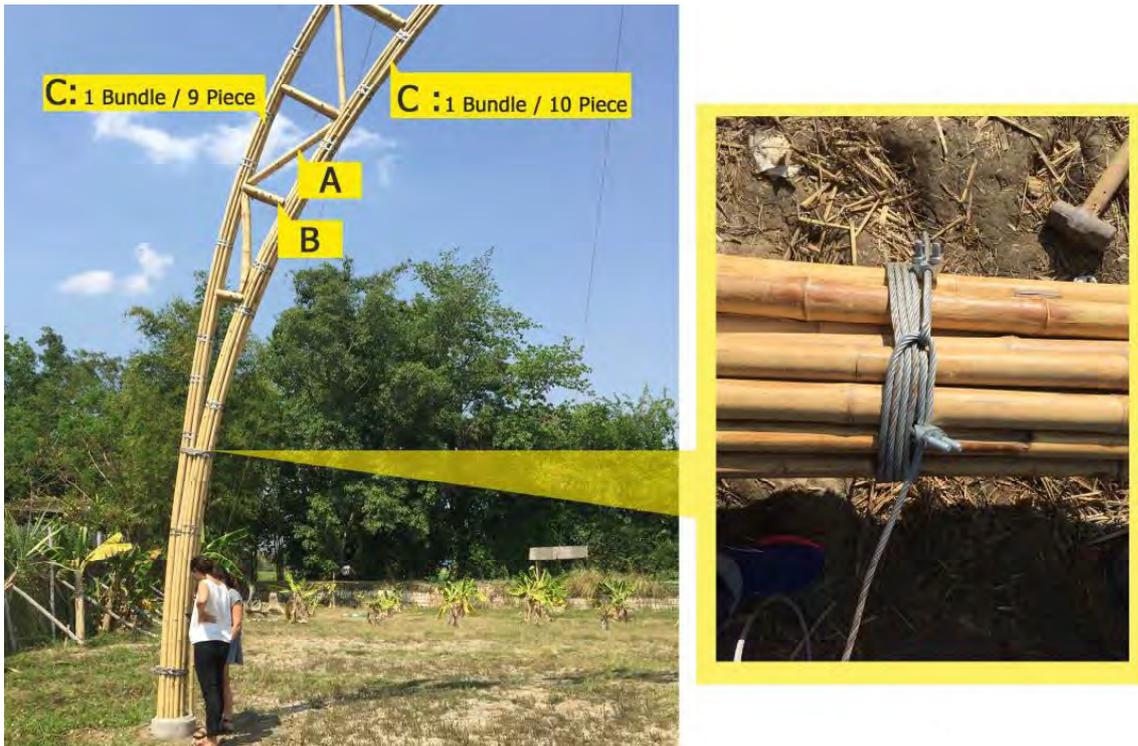


Figura 80. A e B: Elementi di bambù della struttura reticolare. Legatura del fascio di canne.

Nella Figura 80 si nota alla base dell'arco un plinto di fondazione in calcestruzzo fuoriuscire di circa 10 centimetri al di fuori della quota di terreno, all'interno del quale sono fissate le canne che costituiscono i fasci dell'arco. Nel riquadro a destra si nota il particolare del punto di divisione dei due fasci, collocato a un'altezza di 2,20 metri (vedi Figura 78). In questo punto i due fasci sono legati con corda metallica fissata con occhioli metallici stretti da bulloni. Da questo punto l'arco si dirama in due fasci che costituiscono i correnti: quello inferiore è costituito da 10 canne, mentre quello superiore da 9 canne.

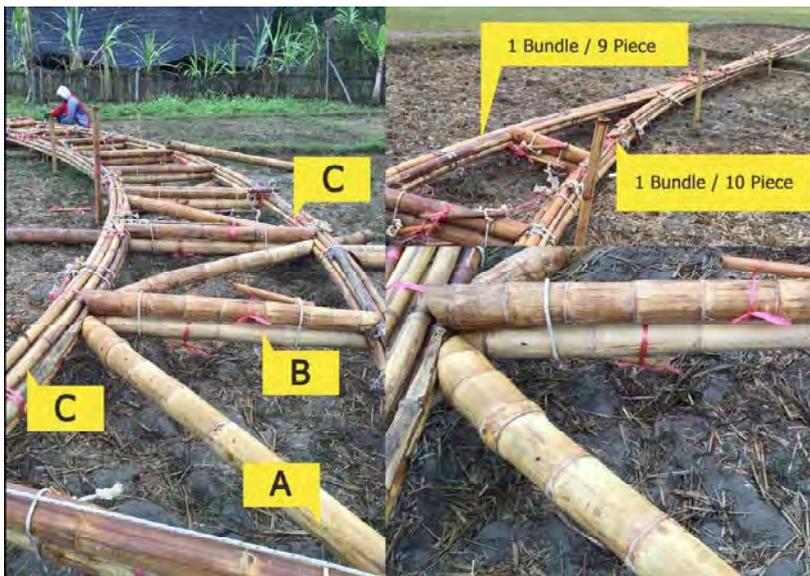


Figura 81. Elementi di bambù nella trave reticolare.

Gli elementi evidenziati in Figura 81 costituiscono: "A" diagonale, "B" montante, e "C" corrente superiore e inferiore.

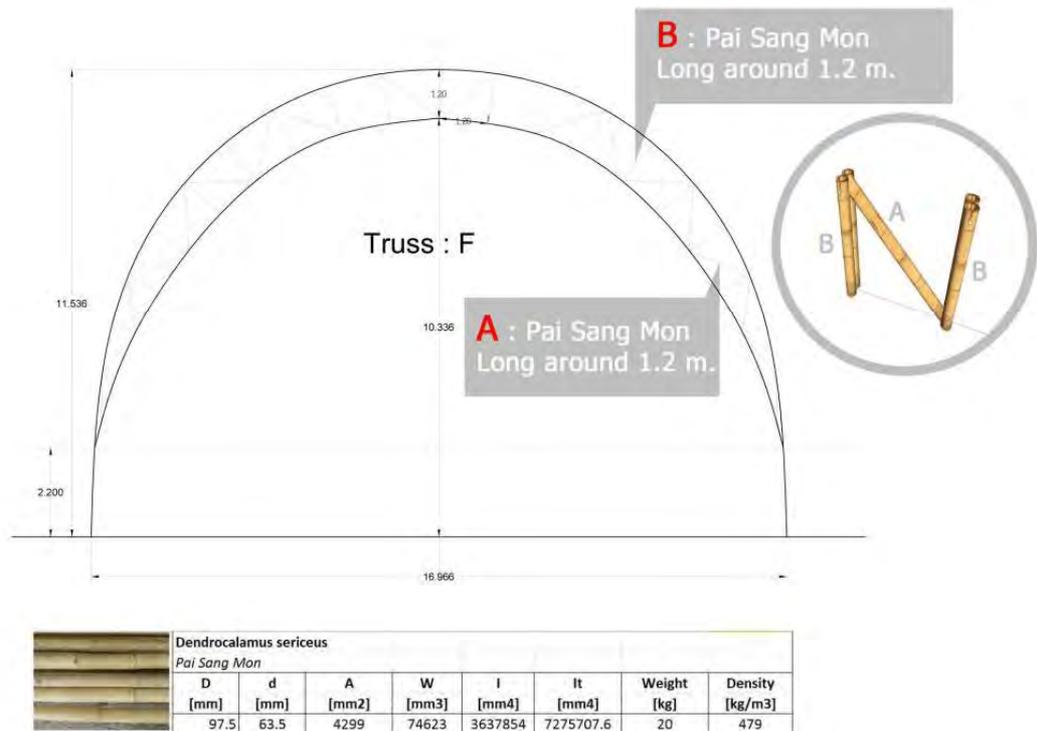


Figura 82. Dettaglio degli elementi A e B della travatura reticolare. La specie adottata per questi elementi è la *Dendrocalamus sericeus* le cui caratteristiche sono riportate in tabella. La lunghezza degli elementi è di circa 1,2

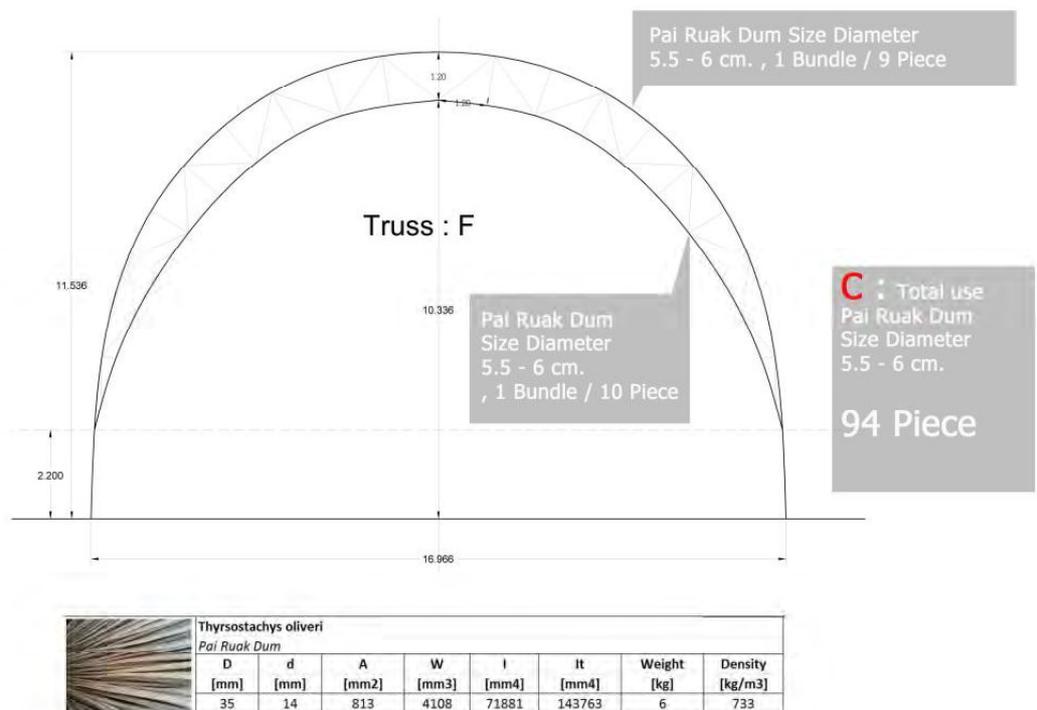


Figura 83. La specie di bambù adottata per i correnti della travatura è la *Thyrsostachys oliveri* le cui caratteristiche sono riportate in tabella. Per la realizzazione dell'arco F sono state impiegate 94 canne con diametro di 5,5/6 centimetri. In chiave, l'interasse tra un corrente e l'altro è di 1,2 metri.

1 bamboo line = bamboo ~6 m. > connection > bamboo ~6 m. > connection

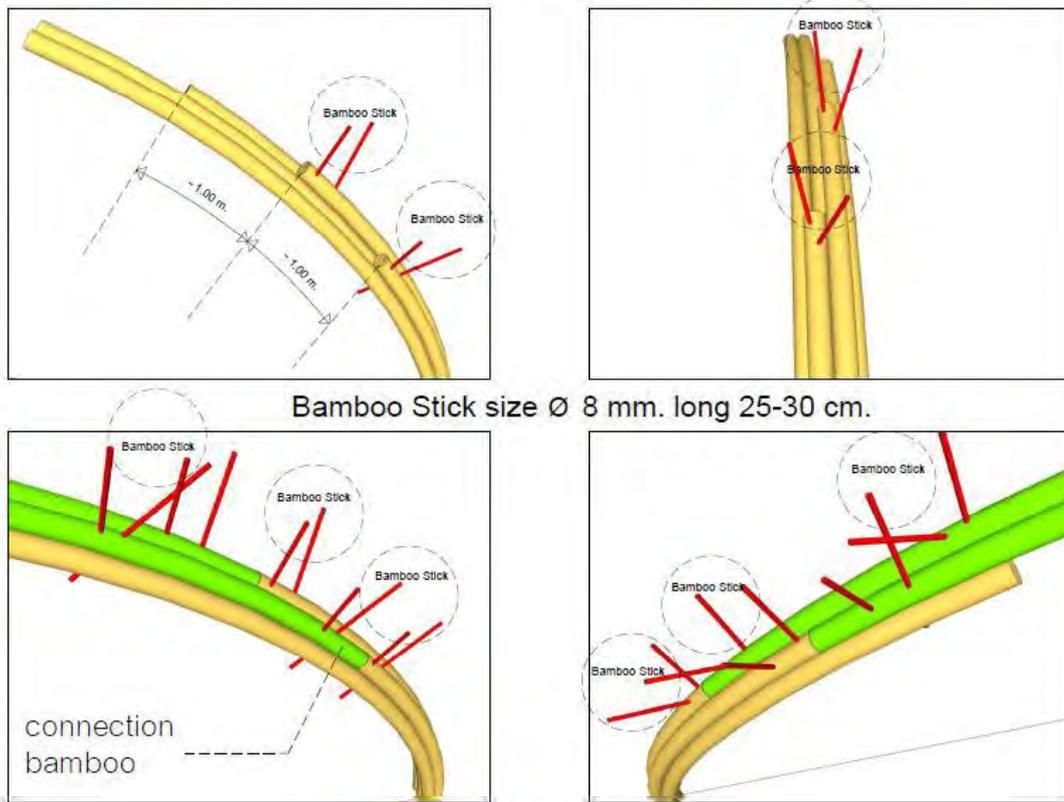


Figura 84. Connessione tra gli elementi di bambù.

I fasci di bambù (“bamboo line”) sono costituiti da canne di *Thyrsostachys oliveri* aventi lunghezza di circa 6 metri e diametro 5,5/6 cm, che vengono connesse tra loro tramite bastoncini di bambù di diametro pari a 8 mm e lunghezza di 25-30 cm. Per cui il fascio si sviluppa in questo modo: canna di lunghezza circa 6 metri - connessione con bastoncini - canna di lunghezza circa 6 metri.

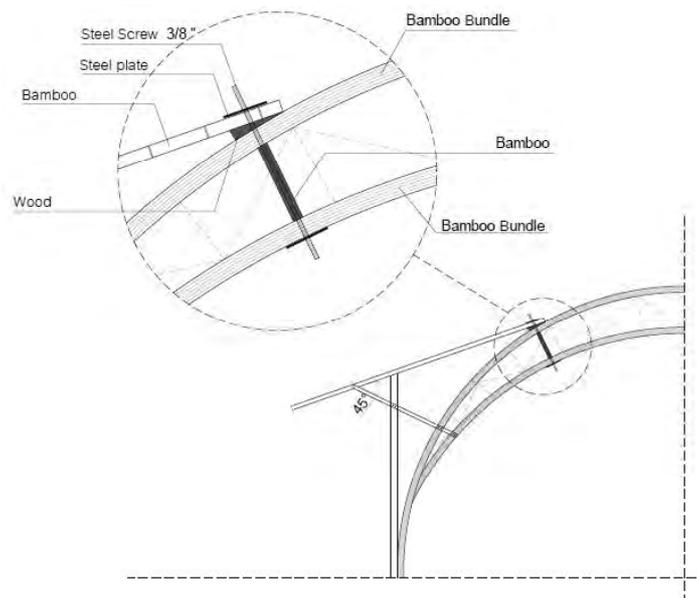


Figura 85. Arco C, scala 1:100. Connessione tra il tetto e l'arco.

Il nodo in Figura 85 tra la copertura e l'arco è così composto: tondino filettato che attraversa tutti gli elementi, il quale viene fissato al corrente inferiore tramite una piastra; tra le due correnti vi è un'asta di bambù che lavora a compressione evitando l'avvicinamento tra i due fasci; al di sopra del corrente superiore vi è un cuneo di legno sul quale si appoggiano le canne della copertura; il sistema viene completato da una seconda piastra sopra la canna della copertura. Viene collocata un'asta di sostegno con un angolo di 45° rispetto alla copertura, che si fissa alle correnti dell'arco.

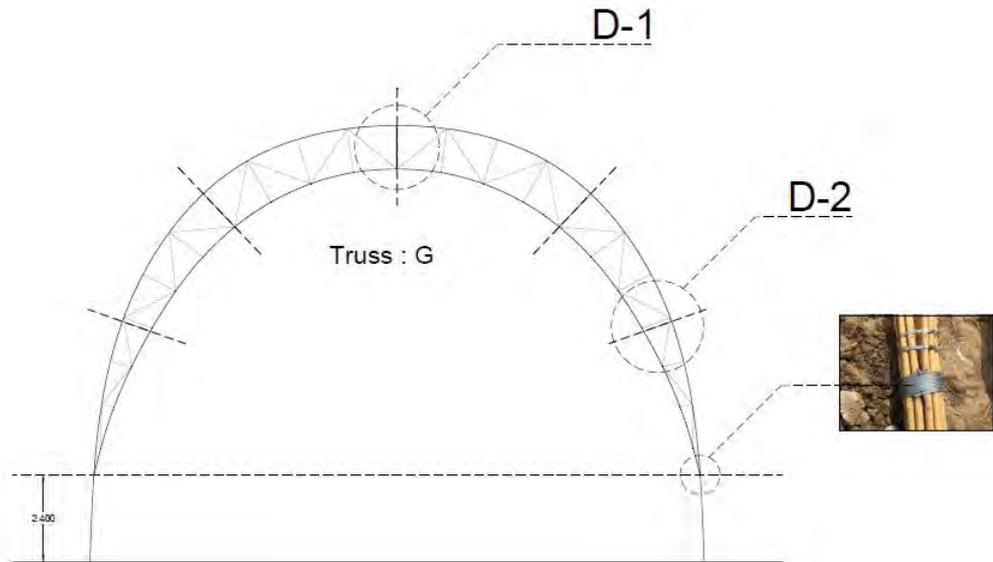


Figura 86. Sono indicati i dettagli D1 e D2 dell'arco G, e il punto di diramazione dei fasci a 2,20 metri di altezza.



Figura 87. Dettaglio D1 della connessione in chiave tra il corrente inferiore e quello superiore, con interasse di 1,20 metri. Il montante è costituito da due canne connesse tra loro da filetti in bullonati alle estremità, tra le canne vi è un tondino filettato di 3/8" che attraversa sia il fascio superiore che quello inferiore, fissato da piastre metalliche curvate alle estremità dei fasci. Nell'immagine a destra si nota la fascetta metallica che lega le canne del fascio.



Figura 88. Dettaglio D2 della connessione tra i due fasci, con interasse di 0,8 m. Tra il corrente inferiore e quello superiore. Il montante è costituito da due canne connesse tra loro da due filetti inbullonati alle estremità, tra le canne vi è un tondino filettato di 3/8" che attraversa sia il fascio superiore che quello inferiore, fissato da piastre metalliche curvate alle estremità dei fasci. Nell'immagine a destra si nota la fascetta metallica che lega le canne del fascio.



Figura 89. Connessione. Fascette metalliche che connettono le canne di un fascio, e filetti inbullonati che connettono il montante. Si notano inoltre i bastoncini di bambù che connettono le canne del fascio.

Di seguito si riporano i disegni quotati di tutti gli archi della costruzione, forniti dall'ingegnere Esteban Morales Montoya.

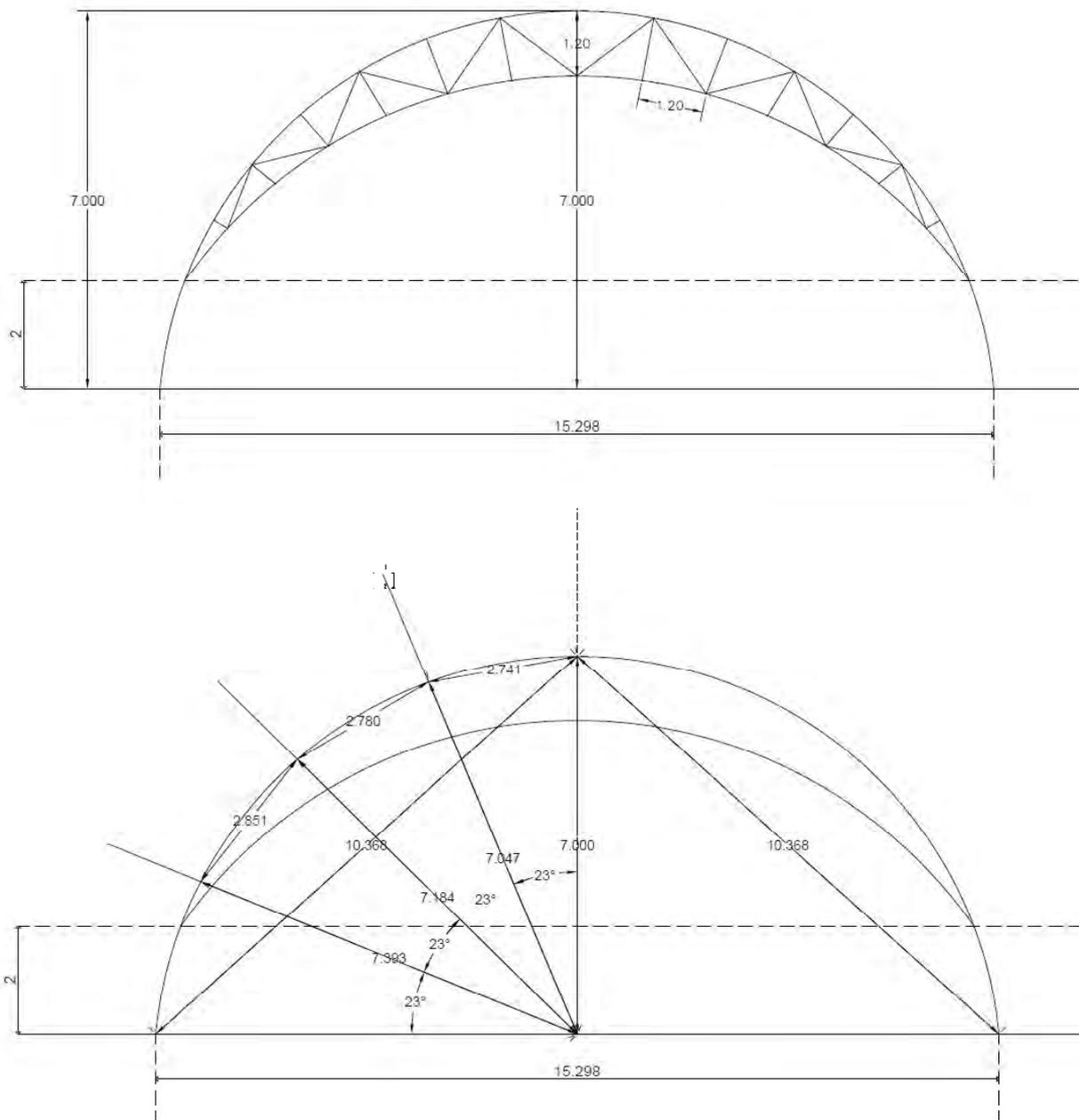


Figura 90. Geometria arco A.

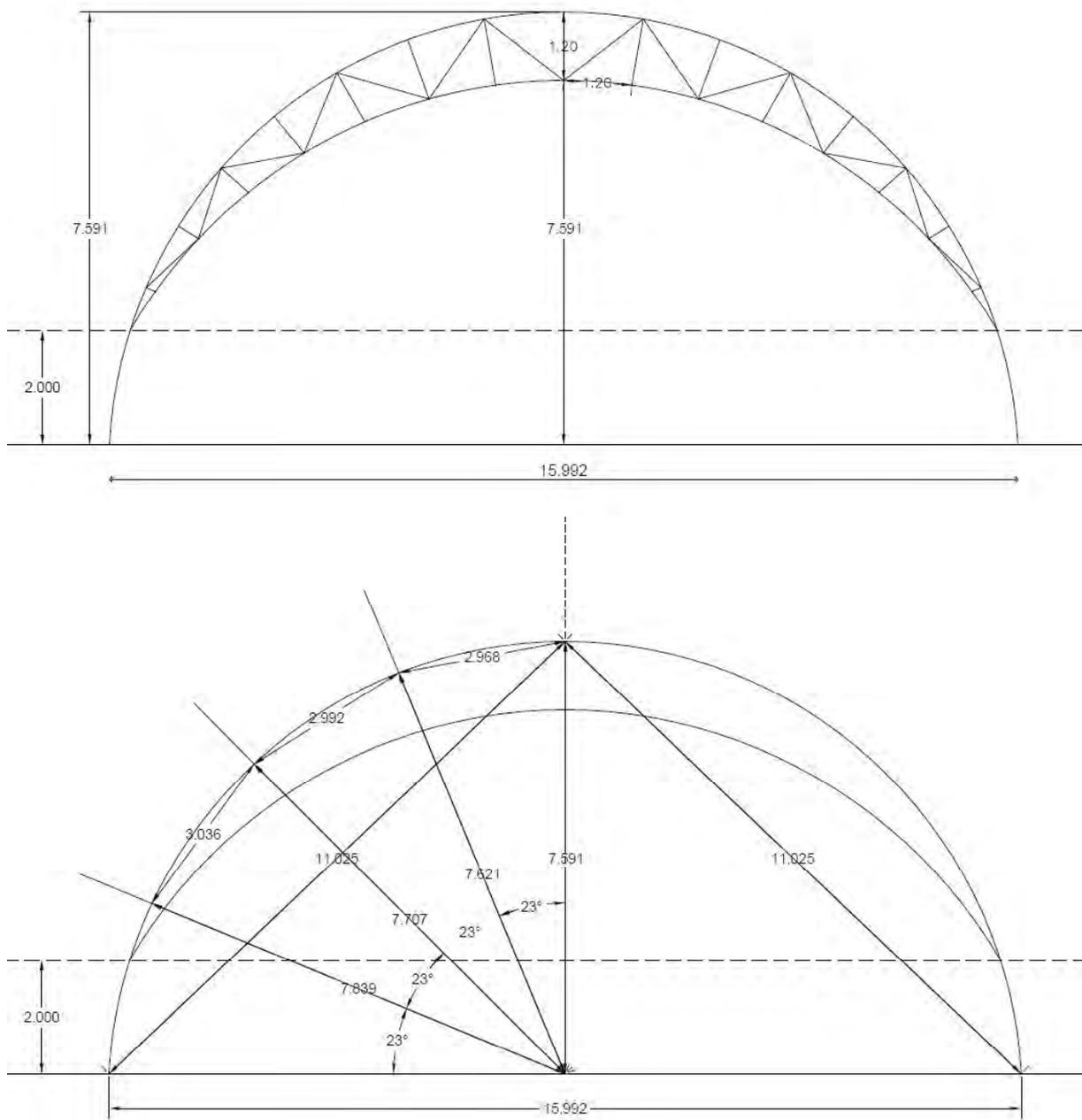


Figura 91. Geometria arco B.

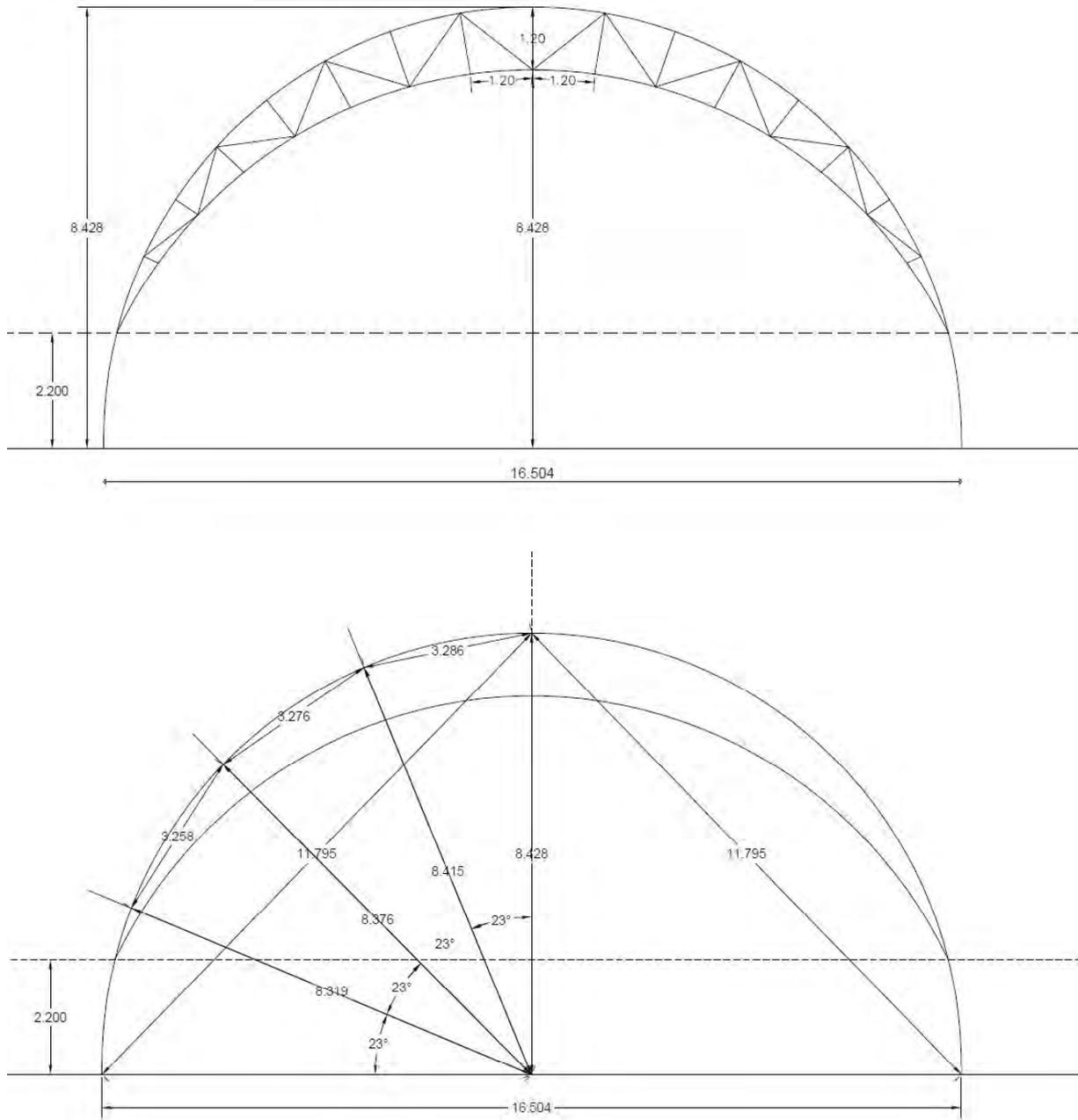


Figura 92. Geometria arco C.

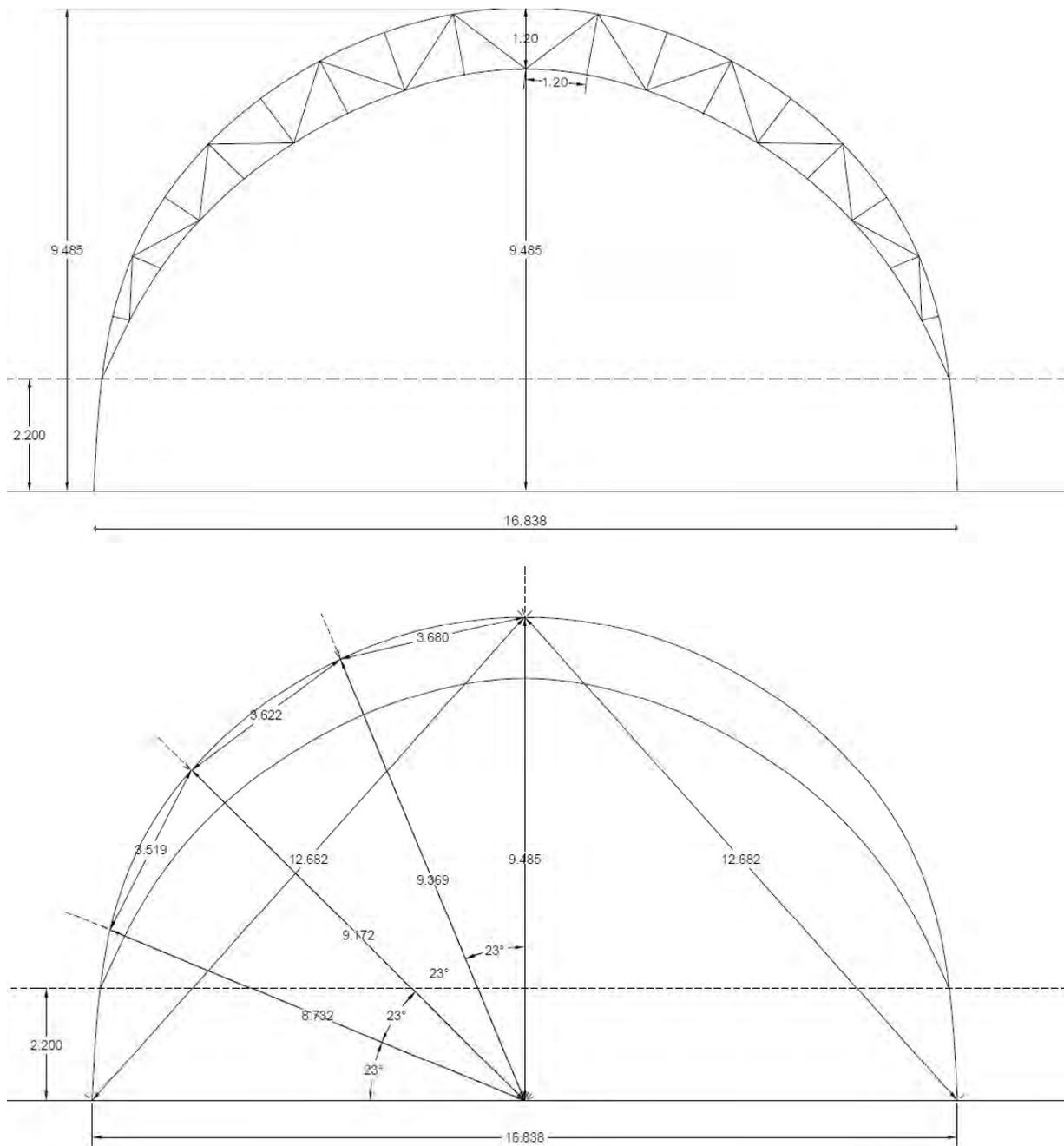


Figura 93. Geometria arco D.

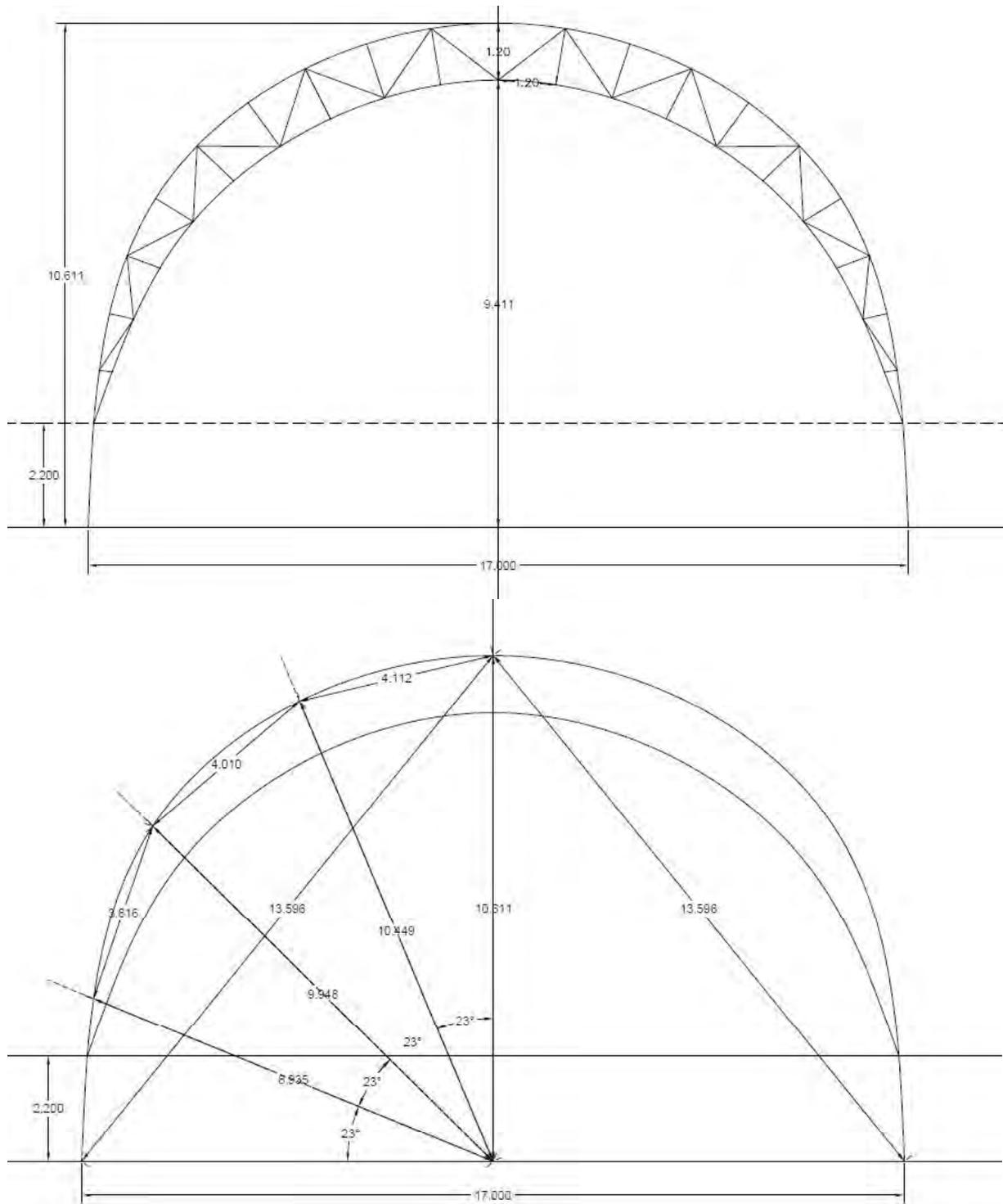


Figura 94. Geometria arco E.

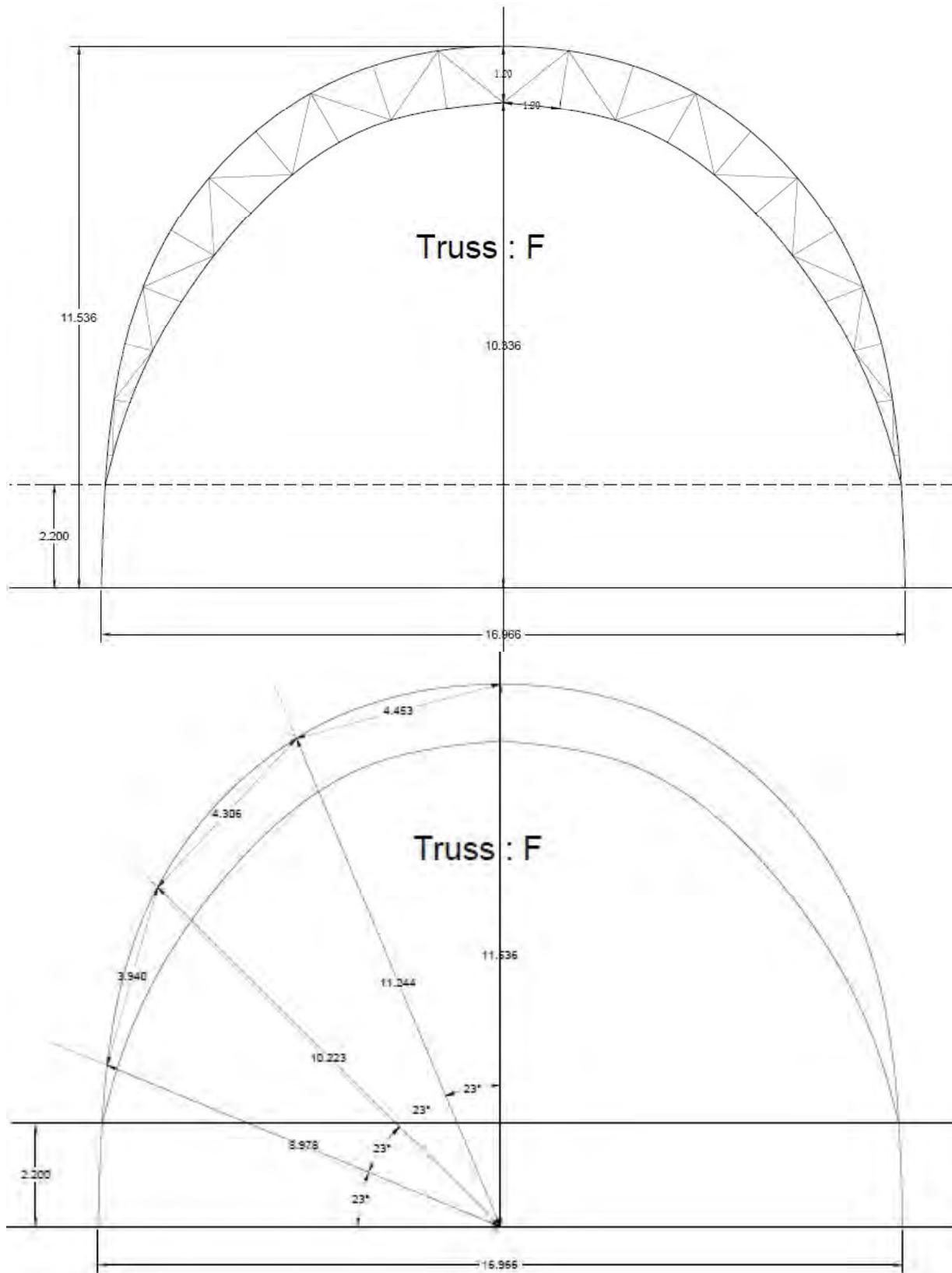


Figura 95. Geometria arco F.

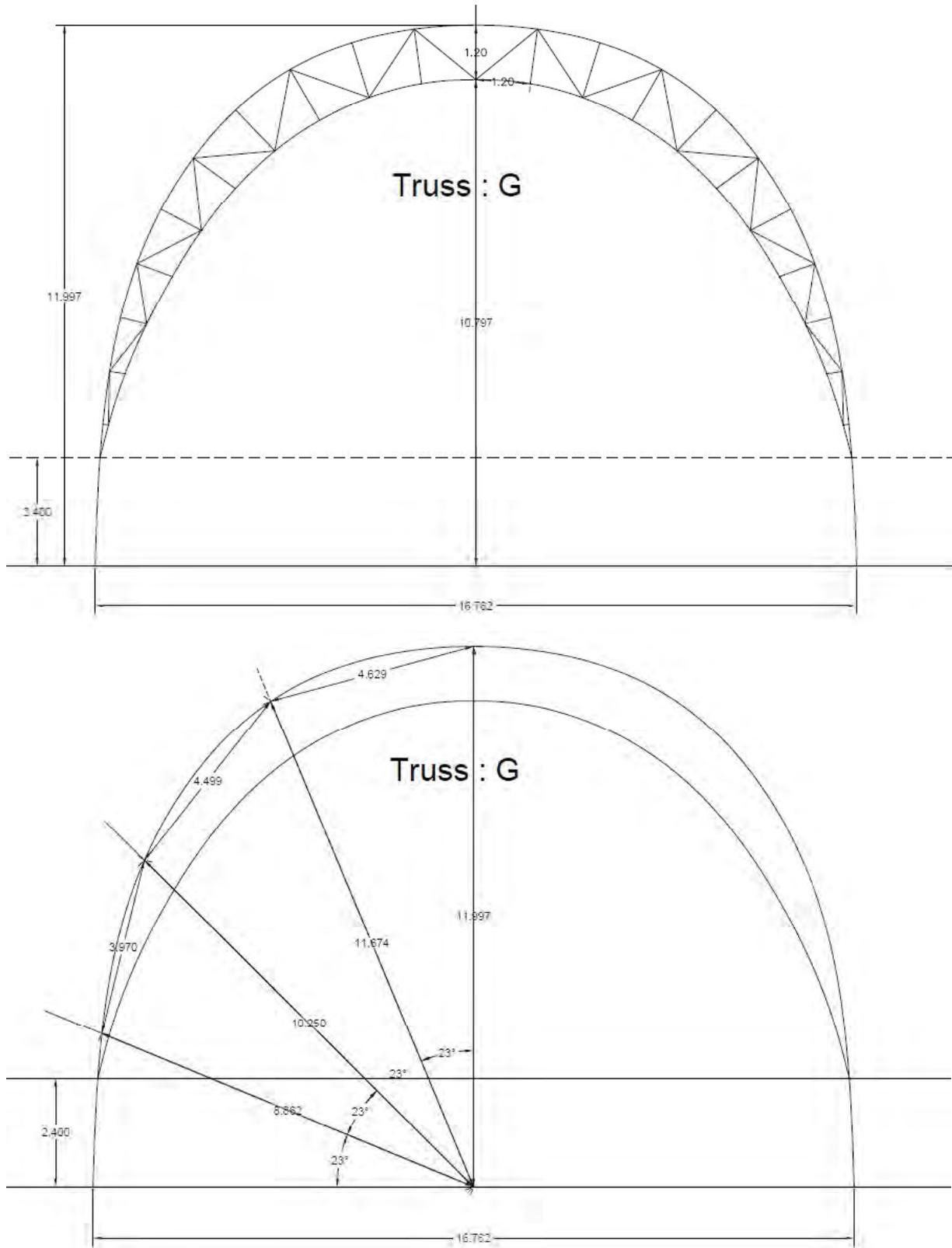


Figura 96. Geometria arco G.

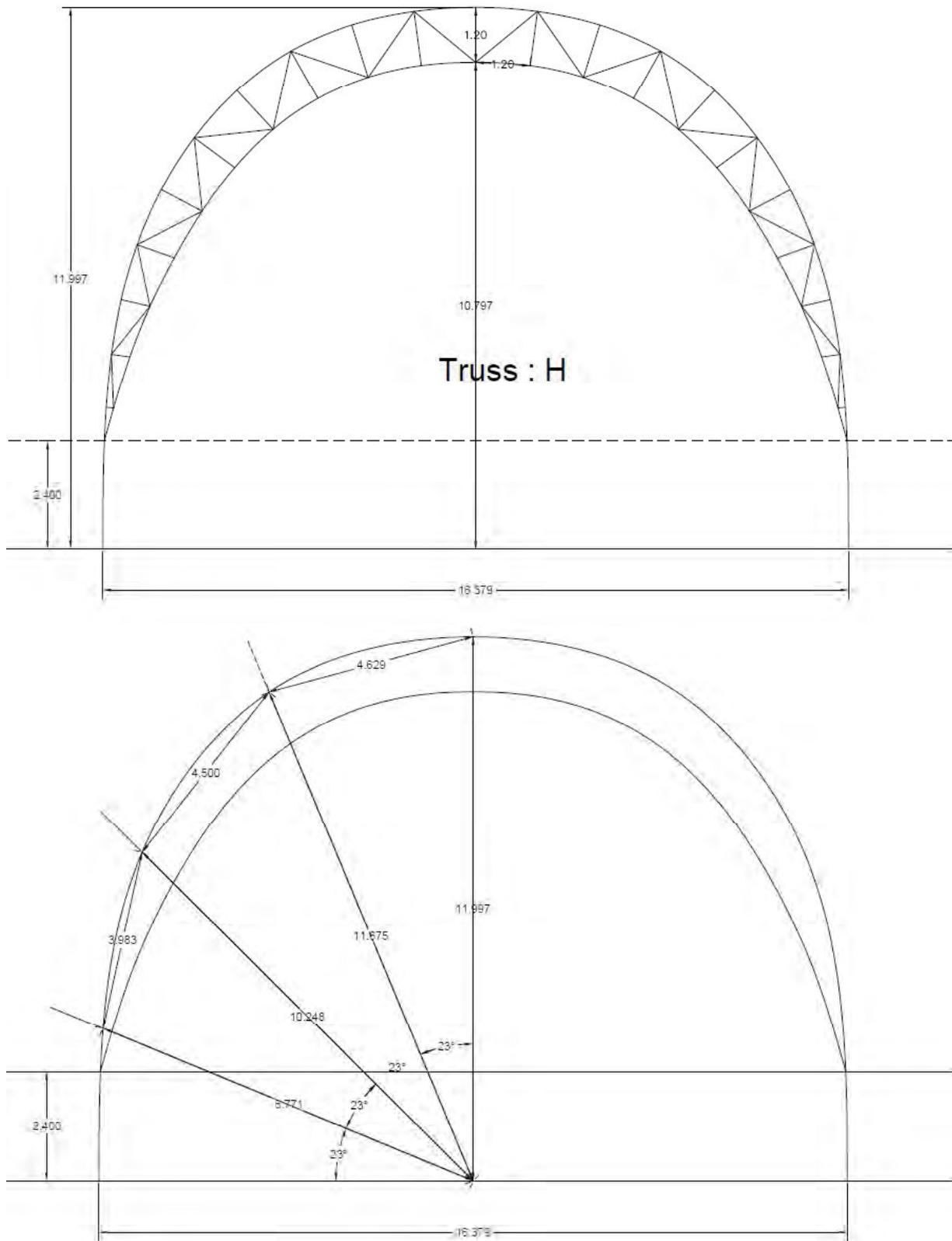


Figura 97. Geometria arco H.

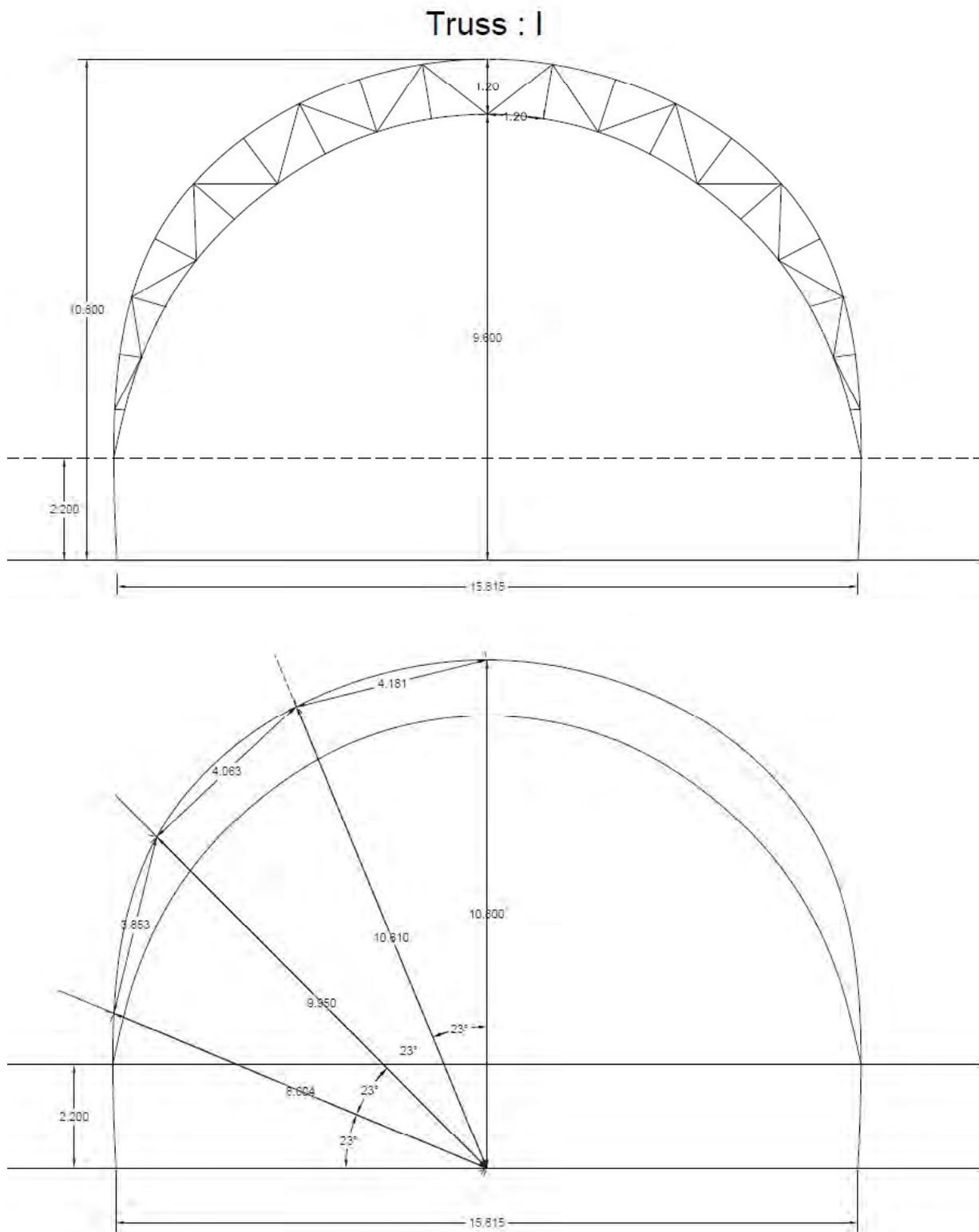


Figura 98. Geometria arco I.

Truss : J

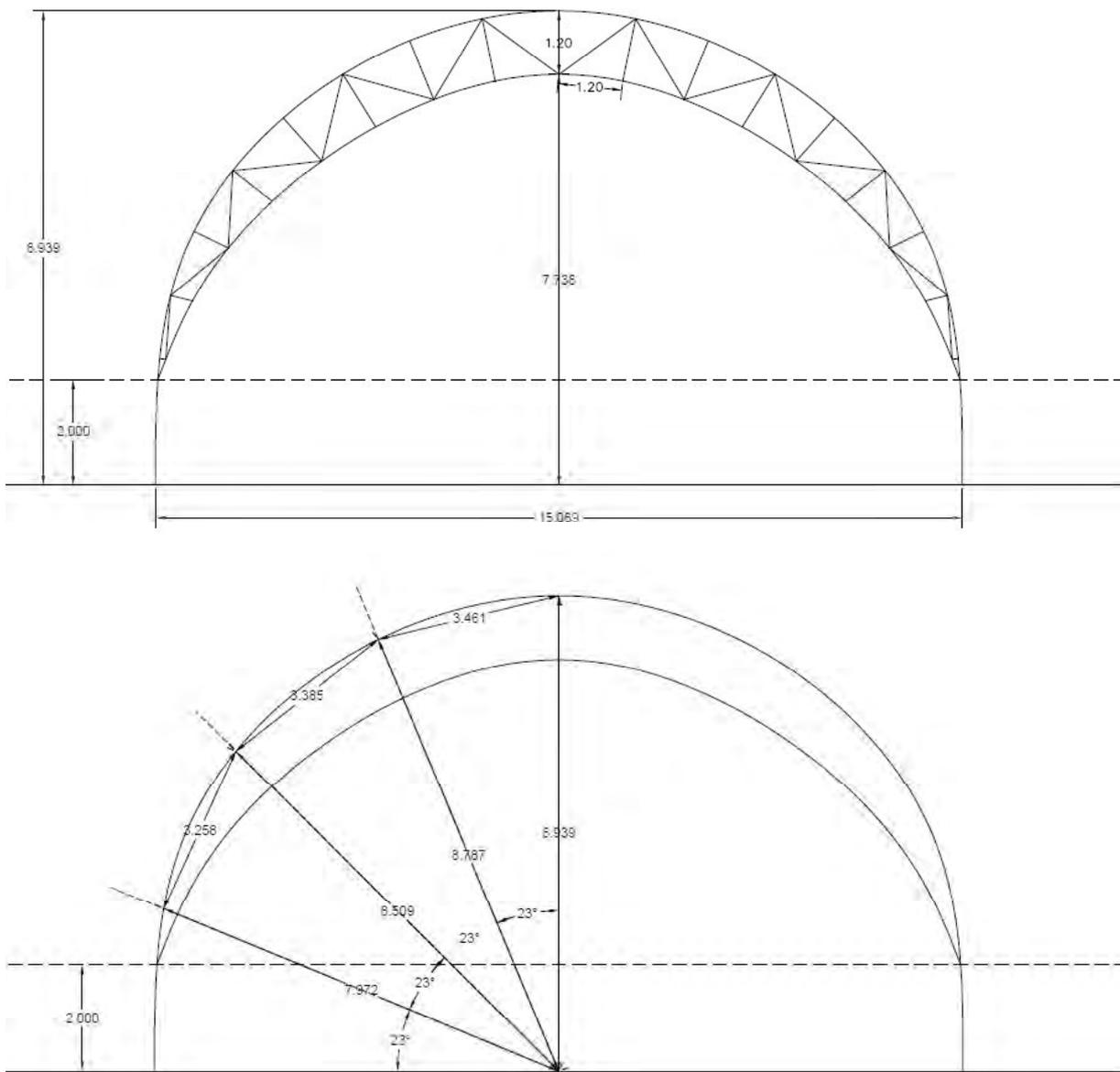


Figura 99. Geometria arco J.

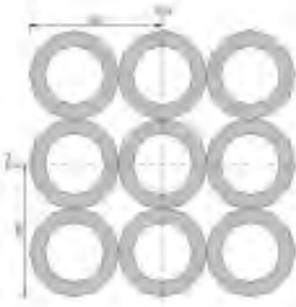
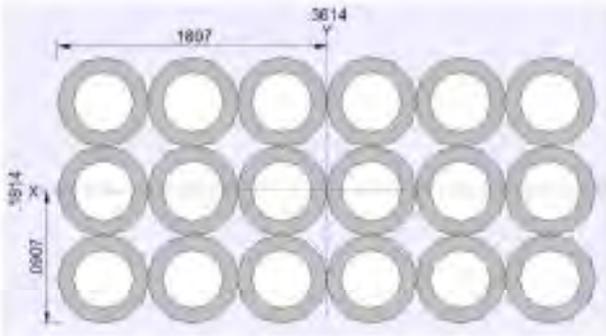
Component		Material	Geometry				
Bundle		*T.O	D (m)	0,06			
		p (kg/m <sup>3</sup> ) 733	d (m)	0,04			
MOE (MPa) 19700	U 0,38		A (m <sup>2</sup> )	1,4137E-02			
		J (m <sup>4</sup> )	3,9340E-05				
2Bundles		*T.O	I33 (m <sup>4</sup> )	3,8525E-05			
			I22 (m <sup>4</sup> )	3,8525E-05			
		MOE (MPa) 19700	U 0,38	AS2 (m <sup>2</sup> )	0,00909		
				AS3 (m <sup>2</sup> )	0,00909		
		p (kg/m <sup>3</sup> ) 733	*T.O	S33 (m <sup>3</sup> )	4,2476E-04		
				S22 (m <sup>3</sup> )	4,2476E-04		
		MOE (MPa) 19700	U 0,38	Z33 (m <sup>3</sup> )	6,4147E-04		
				Z22 (m <sup>3</sup> )	6,4147E-04		
		Diagonal & Strut		**D.S	r33 (m)	5,2203E-02	
					r22 (m)	5,2203E-02	
				p (kg/m <sup>3</sup> ) 479	*T.O	D (m)	0,06
						d (m)	0,04
MOE (MPa) 18900	U 0,38			A (m <sup>2</sup> )	2,8274E-02		
				J (m <sup>4</sup> )	0,0000E+00		
p (kg/m <sup>3</sup> ) 733	*T.O			I33 (m <sup>4</sup> )	7,7050E-05		
				I22 (m <sup>4</sup> )	3,0607E-04		
MOE (MPa) 19700	U 0,38			AS2 (m <sup>2</sup> )	0,00258		
				AS3 (m <sup>2</sup> )	0,01818		
MOE (MPa) 19700	U 0,38			S33 (m <sup>3</sup> )	8,4951E-04		
				S22 (m <sup>3</sup> )	1,6938E-03		
MOE (MPa) 19700	U 0,38	Z33 (m <sup>3</sup> )	1,2829E-03				
		Z22 (m <sup>3</sup> )	2,5447E-03				
MOE (MPa) 19700	U 0,38	r33 (m)	5,2203E-02				
		r22 (m)	1,0404E-01				
MOE (MPa) 18900	U 0,38	D (m)	0,09				
		d (m)	0,06				
MOE (MPa) 18900	U 0,38	A (m <sup>2</sup> )	3,5343E-03				
		J (m <sup>4</sup> )	5,1188E-06				
MOE (MPa) 18900	U 0,38	I33 (m <sup>4</sup> )	2,5844E-06				
		I22 (m <sup>4</sup> )	2,5844E-06				
MOE (MPa) 18900	U 0,38	AS2 (m <sup>2</sup> )	1,8868E-03				
		AS3 (m <sup>2</sup> )	1,8868E-03				
MOE (MPa) 18900	U 0,38	S33 (m <sup>3</sup> )	5,7431E-05				
		S22 (m <sup>3</sup> )	5,7431E-05				
MOE (MPa) 18900	U 0,38	Z33 (m <sup>3</sup> )	8,5500E-05				
		Z22 (m <sup>3</sup> )	8,5500E-05				
MOE (MPa) 18900	U 0,38	r33 (m)	2,7042E-02				
		r22 (m)	2,7042E-02				

Figura 100. Specifiche tecniche degli elementi che costituiscono i fasci, i montanti e le diagonali.

Component		Material	Geometry	
Paral		<b>**D.S</b> $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) 479 MOE (MPa) 18900 U 0,38	D (m)	0,09
			d (m)	0,06
			A (m <sup>2</sup> )	7,0686E-03
			J (m <sup>4</sup> )	1,1460E-05
			I33 (m <sup>4</sup> )	1,9483E-05
			I22 (m <sup>4</sup> )	5,1689E-06
			AS2 (m <sup>2</sup> )	0,00479
			AS3 (m <sup>2</sup> )	0,00528
			S33 (m <sup>3</sup> )	2,1641E-04
			S22 (m <sup>3</sup> )	1,1479E-04
Z33 (m <sup>3</sup> )	3,1809E-04			
Z22 (m <sup>3</sup> )	1,7100E-04			
r33 (m)	5,2500E-02			
r22 (m)	2,7042E-02			
Perlines		<b>**D.S</b> $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> ) 479 MOE (MPa) 18900 U 0,38	D (m)	0,09
			d (m)	0,06
			A (m <sup>2</sup> )	1,4137E-02
			J (m <sup>4</sup> )	3,9340E-05
			I33 (m <sup>4</sup> )	3,8966E-05
			I22 (m <sup>4</sup> )	3,8966E-05
			AS2 (m <sup>2</sup> )	0,00959
			AS3 (m <sup>2</sup> )	0,00959
			S33 (m <sup>3</sup> )	4,3281E-04
			S22 (m <sup>3</sup> )	4,3281E-04
Z33 (m <sup>3</sup> )	6,3617E-04			
Z22 (m <sup>3</sup> )	6,3617E-04			
r33 (m)	5,2500E-02			
r22 (m)	5,2500E-02			

\*T.O.: *Thyrsostachys oliveri*. \*\*D.S.: *Dendrocalamus sericeus*.

D: outer diameter

d: inner diameter

A: cross-section (axial) area

J: torsional constant

I33: moment of inertia about 3 axis

I22: moment of inertia about 2 axis

AS2: shear area in 2 direction

AS3: shear area in 3 direction

S33: section modulus about 3 axis

S22: section modulus about 2 axis

Z33: plastic modulus about 3 axis

Z22: plastic modulus about 2 axis

r33: radius of Gyration about 3 axis

r22: radius of Gyration about 2 axis

MOE: Modulus of Elasticity (Royal Forest Department of Thailand)

U: Poisson's Ratio (Wan and Ko, 2011)

Figura 101. Specifiche tecniche degli elementi che costituiscono i fasci, i montanti e le diagonali.

## Analisi dei carichi

*Tutte le sollecitazioni che possono agire su un edificio second il documento “Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures” sono state valutate nella normativa (ASCE/SEI 7-05). Il testo sopra citato prende in considerazione i seguenti carichi: peso proprio di ciascun arco, carichi variabili, carichi permanenti, forza del vento, deformazioni generate dagli effetti reologici dei materiali strutturali e degli insediamenti del suolo che supportano le fondazioni.<sup>67</sup>*

### Carichi variabili

*Secondo la normativa ASCE/SEI 7-05 il valore di carico minimo variabile sulla copertura per un tetto inclinato con pendenza minore di 15° è pari a 0,50 kN/m<sup>2</sup>.<sup>68</sup>*

### Carichi permanenti

*Gli elementi non strutturali che compongono il manto di copertura e la griglia strutturale presentano un carico permanente pari a 0,50 kN/m<sup>2</sup>.<sup>69</sup>*



Gli elementi strutturali presentano carichi permanenti riportati nella tabella 12.

<sup>67,68,69</sup> Esteban Morales Montoya, op. cit.

	Truss	Component	Length (m)	Area (m <sup>2</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> )	Material	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Weight (kgf)	Weight (N)
<b>STRUCTURAL ELEMENTS</b>	Truss A	top bundle	22,764	0,0141	0,322	T.O.*	733	236	2312
		bottom bundle	18,935	0,0141	0,268			196	1923
		subunits	40,325	0,0035	0,143	D.S.**	479	68	669
	Truss B	top bundle	24,322	0,0141	0,344	T.O.	733	252	2470
		bottom bundle	20,439	0,0141	0,289			212	2076
		subunits	46,179	0,0035	0,163	D.S.	479	78	766
	Truss C	top bundle	26,279	0,0141	0,372	T.O.	733	272	2669
		bottom bundle	22,129	0,0141	0,313			229	2247
		subunits	47,073	0,0035	0,166	D.S.	479	80	781
	Truss D	top bundle	28,561	0,0141	0,404	T.O.	733	296	2900
		bottom bundle	23,937	0,0141	0,338			248	2431
		subunits	57,705	0,0035	0,204	D.S.	479	98	957
	Truss E	top bundle	30,961	0,0141	0,438	T.O.	733	321	3144
		bottom bundle	26,088	0,0141	0,369			270	2649
		subunits	64,043	0,0035	0,226	D.S.	479	108	1063
	Truss F	top bundle	32,547	0,0141	0,460	T.O.	733	337	3305
		bottom bundle	27,464	0,0141	0,388			285	2789
		subunits	70,534	0,0035	0,249	D.S.	479	119	1170
	Truss G	top bundle	33,278	0,0141	0,470	T.O.	733	345	3379
		bottom bundle	27,912	0,0141	0,395			289	2835
		subunits	70,955	0,0035	0,251	D.S.	479	120	1177
	Truss H	top bundle	33,237	0,0141	0,470	T.O.	733	344	3375
		bottom bundle	27,904	0,0141	0,394			289	2834
		subunits	70,401	0,0035	0,249	D.S.	479	119	1168
Truss I	top bundle	31,046	0,0141	0,439	T.O.	733	322	3153	
	bottom bundle	25,919	0,0141	0,366			269	2632	
	subunits	65,371	0,0035	0,231	D.S.	479	111	1085	
Truss J	top bundle	26,517	0,0141	0,375	T.O.	733	275	2693	
	bottom bundle	22,017	0,0141	0,311			228	2236	
	subunits	55,199	0,0035	0,195	D.S.	479	93	916	
Strut		180,000	0,0035	0,636	D.S.	479	305	2986	
Perlin		324,000	0,0141	4,580	D.S.	479	2194	21501	
Conections							1802	17658	
	<b>Total</b>						<b>10811</b>	<b>105949</b>	

\*T.O.: *Thyrsostachys oliveri*. \*\*D.S.: *Dendrocalamus sericeus*.

Tabella 12. Caratteristiche degli elementi strutturali componenti ciascun arco.

## Forza del vento

*Poiché la struttura oggetto di studio presenta una forma irregolare, potrebbe avere una risposta insolita alle sollecitazioni dovute dal vento. Per questo bisognerebbe utilizzare dati forniti da un documento che analizzi gli effetti del carico del vento sulla struttura utilizzando il metodo della galleria del vento.*

Per ragioni pratiche sono stati utilizzati i carichi minimi di progetto per il vento prescritti nella normativa ASCE/SEI 7-05 e DPT 1311-1350. I coefficienti di pressione ed esposizione sono stati applicati agli elementi strutturali considerando la struttura aperta.

La velocità del vento per la zona in cui si trova la struttura è pari a 29m/s (105 km/h). L'esposizione è in categoria C perchè l'edificio si trova in uno spazio aperto con pochi ostacoli. Altri valori inclusi nel calcolo sono stati: fattore di importanza (1); fattore topografico ( $K_{zt}=1$ ); fattore di collisione (0,85); fattore di direzione (0,85).

Per il calcolo è stato utilizzato il software SAP2000.<sup>70</sup>

### Valutazione dell'azione sismica

Si riporta nella figura 100 lo spettro di risposta elastica in accelerazione, secondo la DPT 1302 Standard Design of Earthquake vibration resistance BE2552 (A.D. 2009). La curva  $S_a$  è il rapporto tra l'accelerazione spettrale  $S_n$ , e il periodo di vibrazione  $T$ .<sup>71</sup>

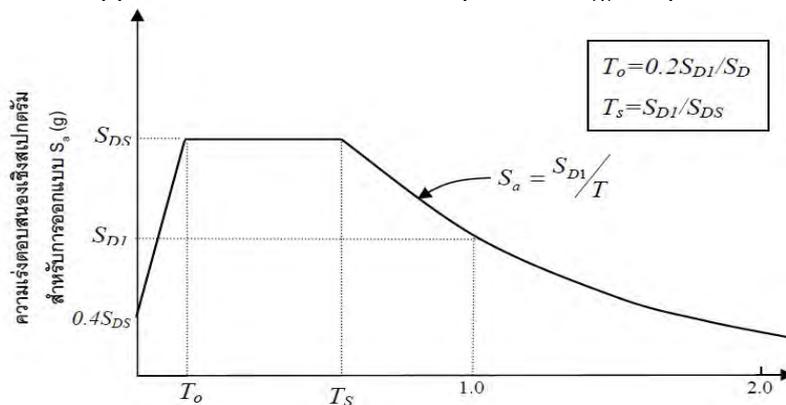


Figura 103. Spettro di risposta elastico in accelerazione.

I parametri per lo spettro di risposta elastica in accelerazione per la struttura localizzata a Hangdong, Chiang Mai sono<sup>72</sup>:

1) Accelerazioni orizzontali massime attese al suolo

$$S_s = 0.853, S_l = 0.243$$

2) Il suolo considerato è di tipo D, quindi i fattori di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale sono  $F_a = 1.2$  e  $F_v = 2.0$

Le accelerazioni orizzontali vengono moltiplicate per i fattori di amplificazioni

$$S_{MS} = F_a * S_s = 1.024$$

$$S_{MI} = F_v * S_l = 0.486$$

Accelerazioni spettrali:

$$S_{DS} = (2/3) * S_{MS} = 0.683$$

$$S_{D1} = (2/3) * S_{MI} = 0.486$$

Periodi di vibrazione:

$$T_0 = 0.2S_{D1}/S_{DS} = 0.095$$

$$T_s = S_{D1}/S_{DS} = 0.474$$

<sup>70,71,72</sup> Esteban Morales Montoya, op. cit.

Pertanto, l'accelerazione spettrale,  $S_a$ , è:

$$\begin{aligned} S_a &= ((S_{DS} - 0.4S_{DS})/T_0)T + 0.4S_{DS} & T < T_0 \\ S_a &= S_{DS} & T_0 \leq T \leq T_s \\ S_a &= S_{DI}/T & T > T_s \end{aligned}$$

Infine:

$$\begin{aligned} S_a &= 4.316T + 0.273 & T < 0.095 \\ S_a &= 0.683 & 0.095 \leq T \leq 0.474 \\ S_a &= 0.324/T & T > 0.474 \end{aligned}$$

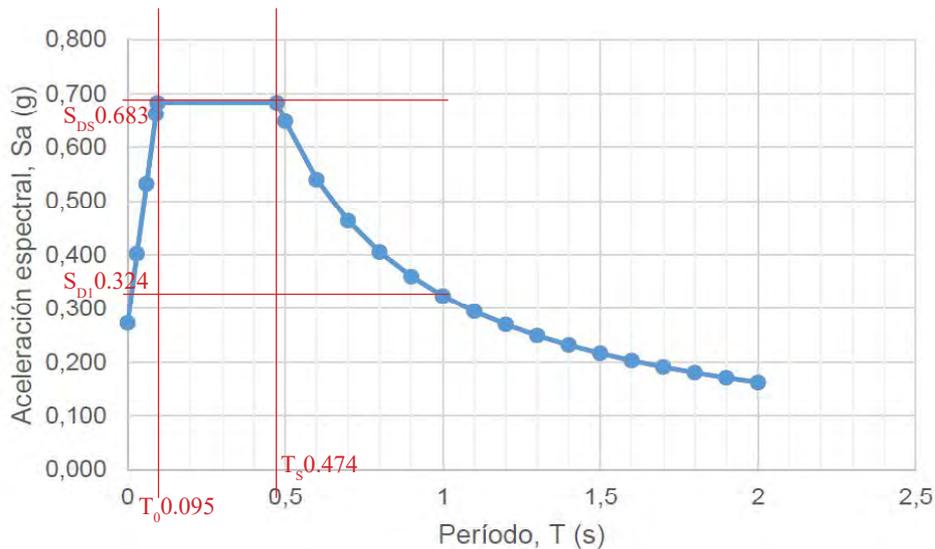


Figura 104. Spettro di risposta elastica in accelerazione con coefficiente del 5% di smorzamento critico per il sito proposto in Hangdong, Chiang Mai.

Lo spettro di progetto è stato usato per ottenere le forze sismiche da applicare alla struttura. Queste forze sono state calcolate usando il software SAP2000.

Il metodo consiste nel calcolo dei valori massimi di spostamento e delle forze vibranti tramite spettri di progetto uniformi.

Inoltre, questo metodo di analisi mette in evidenza le torsioni nelle strutture irregolari, pertanto non è necessario considerare il momento torcente accidentale.

Le analisi dello spettro elastico sono state condotte tramite il progetto sismico dello spettro (si veda pagina 73) in un modello matematico appropriato della struttura nel software SAP2000. Queste analisi sono state condotte senza tenere in considerazione il coefficiente di capacità di dissipazione dell'energia "R". Lo spostamento massimo imposto dal progetto sismico della struttura, e le forze interne che ne risultano sono state determinata.<sup>73</sup>

<sup>73</sup> Esteban Morales Montoya, op. cit.

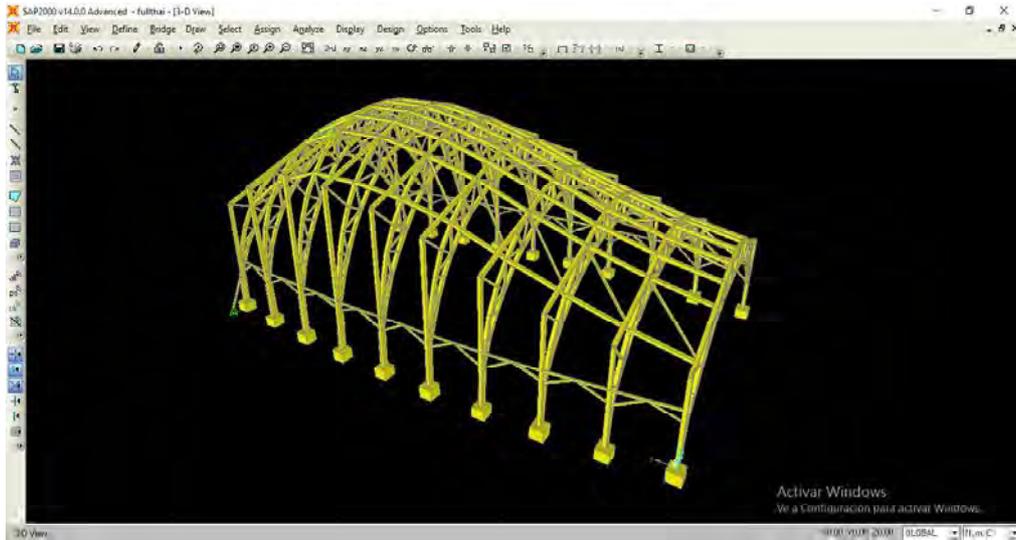


Figura 105. 3D del modello strutturale fatto con SAP2000.

### Metodologia di analisi dello spettro elastico dinamico

a) *Modi di vibrazione.* Dalle analisi eseguite con SAP2000, i modi di vibrazione della struttura che contribuiscono significativamente alla risposta dinamica, secondo la normativa richiesta sono i seguenti:

Mode	Period (s)	UxAcc (m/s <sup>2</sup> )	UyAcc (m/s <sup>2</sup> )
1	0.795969	3.99191	1.19757
2	0.342114	6.6934	2.00802
3	0.277623	6.6934	2.00802
4	0.153614	6.6934	2.00802

In questo caso, il periodo più significativo della struttura corrisponde al primo modo.  
 $T = 0.80$  s

b) *Risposte spettrali modali.* La massima risposta spettrale per ciascun modo di vibrazione è ottenuta utilizzando le ordinate dello spettro di progetto (figura 104), per il periodo del modo di vibrazione.

c) *Risposta totale.* La risposta modale massima è data dalle deviazioni, forze sul piano, taglio di base e forze sugli elementi, inseriti statisticamente per ottenere la risposta complessiva della struttura nel progetto sismico.

Il taglio modale di base corrisponde a  $V_s = 231354$  N.<sup>74</sup>

### Spostamenti orizzontali

Gli spostamenti orizzontali sono stati calcolati con il software SAP2000, per ciascun arco a travatura reticolare, includendo gli effetti torsionali dell'intera struttura secondo quanto indicato da normativa.<sup>75</sup>

<sup>74,75</sup> Esteban Morales Montoya, op. cit.

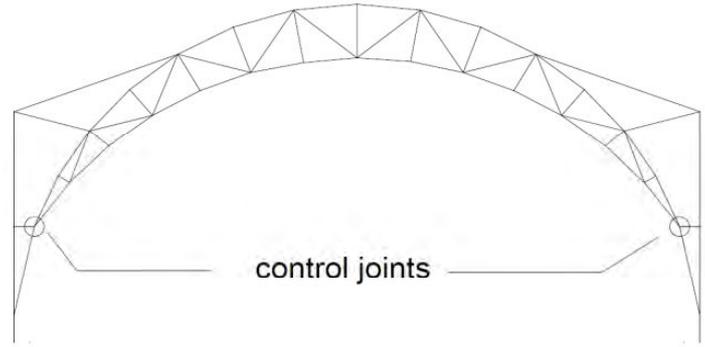


Figura 106. Punti di controllo nella trave reticolare. Spostamenti orizzontali.

*Quando si confrontano i punti di controllo con la configurazione strutturale del progetto, gli spostamenti orizzontali hanno superato i valori prescritti in PTD 1302 Standard Design of earthquake vibration resistance B. E. 2552 (A.D. 2009). Pertanto è stato necessario irrigidire la struttura con controventi.<sup>76</sup>*

Truss	Control Joint	Ux (m)	Uy (m)	Level Height (m)	Drift-x (%)	Drift-y (%)	Allowed Drift (%)	A.Drift ÷ Drift-x	A.Drift ÷ Drift-y	CHECKx	CHECKy
A	401	0.0243	0.0099	2.000	1.21	0.50	2.00	1.65	4.04	OK	OK
B	404	0.0219	0.0102	2.000	1.09	0.51	2.00	1.83	3.91	OK	OK
C	406	0.0206	0.0100	2.200	0.93	0.46	2.00	2.14	4.39	OK	OK
D	135	0.0185	0.0094	2.200	0.84	0.43	2.00	2.38	4.66	OK	OK
E	408	0.0164	0.0093	2.200	0.75	0.42	2.00	2.68	4.71	OK	OK
F	410	0.0148	0.0085	2.200	0.67	0.39	2.00	2.98	5.16	OK	OK
G	412	0.0148	0.0089	2.400	0.61	0.37	2.00	3.25	5.40	OK	OK
H	414	0.0136	0.0083	2.400	0.57	0.35	2.00	3.52	5.75	OK	OK
I	416	0.0119	0.0087	2.200	0.54	0.40	2.00	3.69	5.04	OK	OK
J	418	0.0087	0.0072	2.000	0.43	0.36	2.00	4.62	5.54	OK	OK

Figura 107. Tabella dei punti di controllo.

Lo spostamento massimo ottenuto è stato di 1.21% dell'altezza tra livelli adiacenti. Questo spostamento è inferiore al 2%. Pertanto, non è obbligatorio irrigidire ulteriormente la struttura.

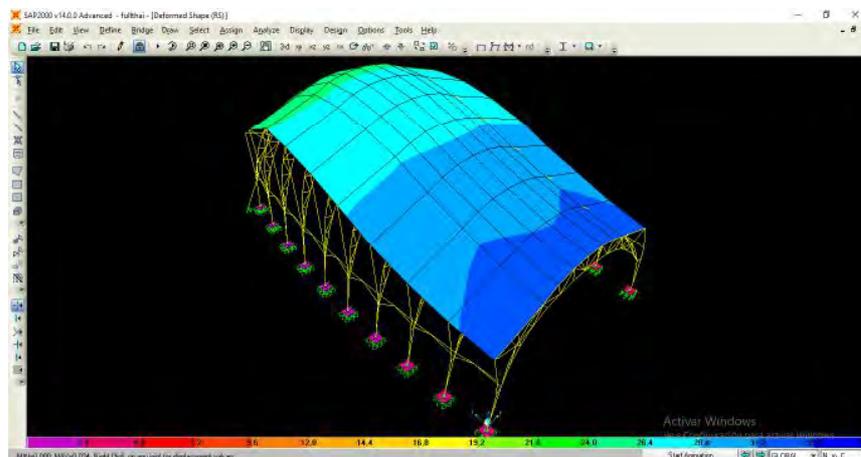


Figura 108. Struttura deformata. Spettro di risposta SAP2000.

<sup>76</sup> Esteban Morales Montoya, op. cit.

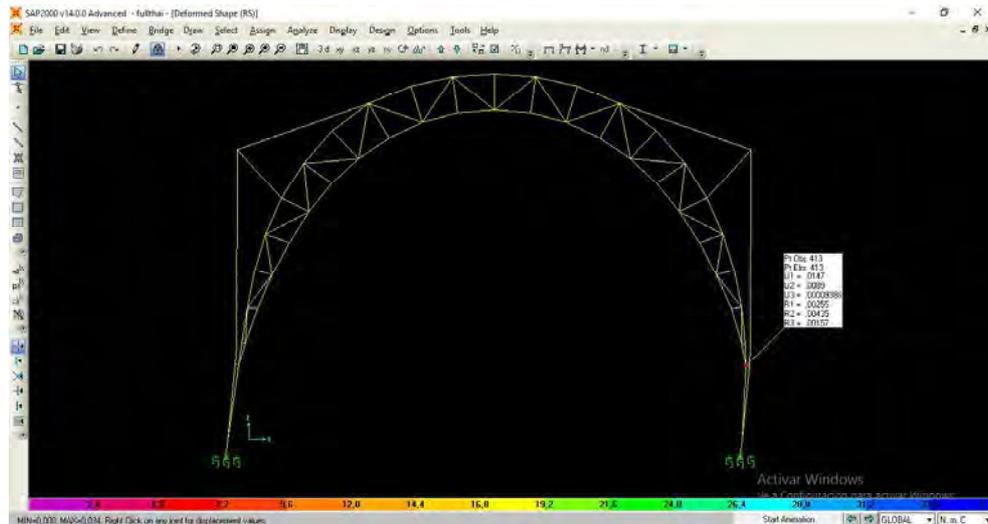


Figura 109. Deformazione arco G. Spettro di risposta SAP2000.

## Combinazioni di differenti sollecitazioni

*Le diverse sollecitazioni che devono essere prese in considerazione nel calcolo, sono state combinate per ottenere le forze interne del progetto strutturale, secondo la normativa edilizia per il metodo di progettazione delle tensioni ammissibili per il bambù strutturale. In ogni combinazione di carico richiesta, gli sforzi vengono moltiplicati per il fattore di carico prescritto per quella combinazione.*

*Il progetto sismico, che tiene in considerazione la capacità di dissipazione dell'energia del sistema strutturale, è stato calcolato dividendo la forza sismica  $F_s$  per il coefficiente di dissipazione dell'energia  $R$  ( $E = F_s/R$ ).*

*Data la tipologia di struttura, è stato assunto un  $R$  pari a 1.8. ( $R =$  fattore modificatore di risposta).<sup>77</sup>*

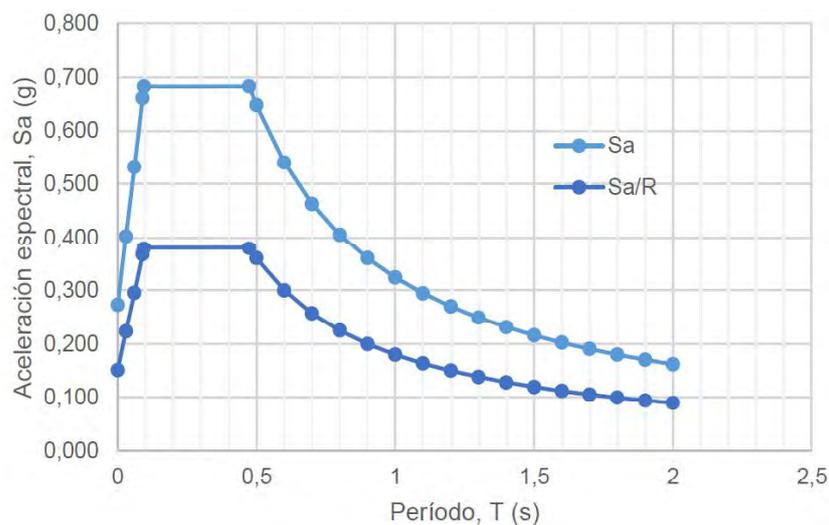


Figura 110. Spettro di risposta elastica in accelerazione con coefficiente del 5% di smorzamento critico per il sito proposto in Hangdong, Chiang Mai.

<sup>77</sup> Esteban Morales Montoya, op. cit.

Secondo la normativa per le strutture in bambù, si devono utilizzare le seguenti combinazioni di carico:

D  
 D+L  
 D+0.75L  
 D+W  
 D+0.7E  
 D+0.75W+0.75L  
 D+0.75(0.7E)+0.75L  
 0.6D+W  
 0.6D+0.7E  
 ENVELOPE

Dove:

D= carico permanente

L= carico variabile

W= carico del vento

E= forze sismiche ridotte ( $E=F_s/R$ ) usato per progettare gli elementi strutturali

ENVELOPE= combinazione contenente la risposta più sfavorevole alla struttura

Dopo aver eseguito l'analisi strutturale, considerando la peggior combinazione di carico (ENVELOPE) sono risultate delle deformazioni eccessive causate dal carico del vento. Pertanto è stato necessario irrigidire la struttura con controventi al fine di soddisfare i valori richiesti.

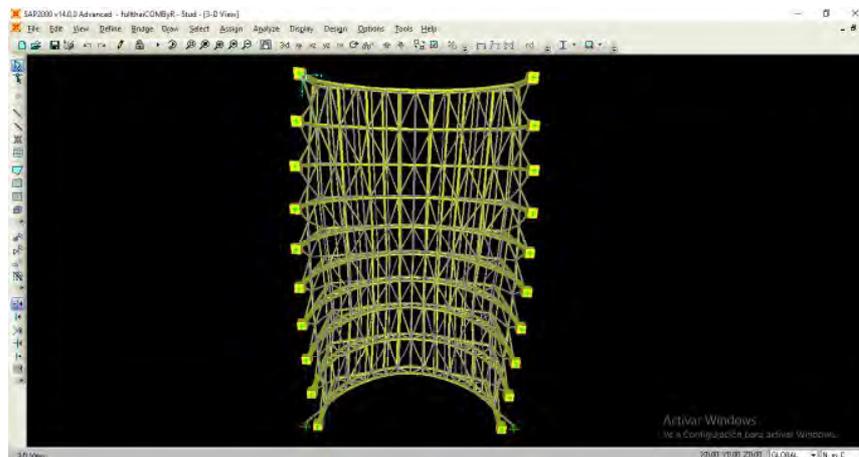


Figura 111. Controventi della struttura oggetto di studio.

ENVELOPE - Element Forces - Frames Trusses							
Section		P	V2	V3	T	M2	M3
		N	N	N	N-m	N-m	N-m
Bundle18	max	53609,68	935,57	6199,76	0	15313,42	1349,75
	min	-76894,33	-941,85	-6199,91	0	-10965,48	-1884,27
Bundle9	max	94154,24	9066,7	3371,47	223,71	1336,83	5458,62
	min	-122180,05	-9024,01	-3421,37	-223,51	-1387,6	-7628,82
ParaIT	max	15937,8	2588,05	20974,76	75,62	1876,78	216,99
	min	-20322,87	-2565,5	-22055,1	-76,66	-1813,02	-216,86
DiagonalIT	max	28666,5	58,11	189,86	16,88	164,52	26,87
	min	-41522,95	-58,81	-189,26	-16,87	-164,72	-25,58
Beam4 (Perlines)	max	21090,04	181,33	1533,75	170,44	1203,91	215,38
	min	-15169,27	-183,16	-1536,14	-179,33	-1203,31	-147,05

Figura 112. Combinazioni più sfavorevoli.

*Le forze interne (reazioni vincolari) ottenute sono risultate eccessive perchè dovute al carico del vento richiesto dalla normativa.*

## Conclusioni

*Secondo il predimensionamento (dimensioni delle travi, numero di canne di bambù per fascio, la dimensione delle sotto unità nelle travi, il materiale per le fondazioni, il numero di travi, l'interasse tra le travi e la loro connessione) e il calcolo presentato, si può concludere che la valutazione del sistema strutturale incontra i requisiti dell'analisi sismica richiesta dai codici edilizi in Thailandia e internazionalmente.<sup>78</sup>*

Il Centro sportivo progettato da Chiangmai Life Architects simbolizza un incontro ideale tra architettura e ingegneria contemporanea tramite lo sfruttamento massimo delle caratteristiche estetiche e meccaniche di un materiale naturale unico quale il bambù.

Design organico e tecnologia contemporanea sono in quest'opera un mix perfetto. Il progetto vanta pubblicazioni su riviste come Dezeen<sup>79</sup>, nella quale è stato inserito in lista per il premio Dezeen Awards 2018 nella categoria Civic and Cultural building. I premi conquistati fino a oggi sono:

- Gold IDA Award (Internation Design Awards) nella categoria Institutional architecture, 2018<sup>80</sup>.
- Gold IDA Award (Internation Design Awards) nella categoria Sustainable/green architecture, 2018<sup>81</sup>.
- Due Design Awards durante la Business of Design week tenuta nella Hong Kong Exhibition and Convention Center nel dicembre dell'anno 2012.<sup>82</sup>

<sup>78</sup> Esteban Morales Montoya, op. cit.

<sup>79</sup><https://www.dezeen.com/2017/08/21/chiangmai-life-architects-construction-sports-hall-panyaden-international-school-thailand-arching-bamboo-trusses/>

<sup>80,81</sup> <https://www.panyaden.ac.th/blog/panyaden-gold-award/>

<sup>82</sup> <https://www.panyaden.ac.th/blog/design-awards-for-panyaden-school/>

Si è visto che per le connessioni si è adottato talvolta solamente corda o fascette metalliche e talvolta bulloni per la connessioni che riguarda gli elementi della travatura quali montante, diagonale, corrente superiore e corrente inferiore.

Ci si pone la domande se fosse possibile in questo progetto realizzare tutte le connessioni in corda per una struttura a trave reticolare. Si vedranno nei capitoli successivi che queste soluzioni sono possibili, in particolare nel caso studio Ujung Alang Community Center (si veda capitolo 3 paragrafo 3.6), casi studio in cui sono state realizzate legature per elementi diagonali e obliqui; un altro progetto che adotta soluzioni simili a quello dello Ujung Alang è il Bamboo Restaurant at Greenville, realizzato in Indonesia, in cui si adottano giunti in corda tra elementi perpendicolari e inclinati. Detto ciò, la differenza è molto chiara tra il la Panyaden School e i progetti appena nominati: in quei casi le connessioni sono realizzate tra due o più elementi singoli in bambù e a volte non giacenti sullo stesso piano (geometria che semplifica il nodo), mentre in questo caso si tratta di una connessione tra due elementi verticali e un fascio di elementi. È possibile che la difficoltà nel realizzare connessioni in corda stia proprio nella soluzione tecnologica adottata di una trave reticolare composta da un fascio di canne e non da un singolo elemento.

Per quanto riguarda la connessione tra diagonale e montante forse, in questo caso, si sarebbe potuta eseguire con un nodo in legatura simile alla legatura per treppiede descritta nel Capitolo 5.

Resta aperta la seguente domanda: non era possibile utilizzare spinotti in bambù invece che bulloni?

Di seguito si elencano alcuni link di video che dimostrano il processo costruttivo:

- [https://www.youtube.com/watch?v=DyYs43N\\_Pvg](https://www.youtube.com/watch?v=DyYs43N_Pvg)
- <https://www.youtube.com/watch?v=CBiMfCSuQ5g>
- <https://www.bamboo-earth-architecture-construction.com/>

3

I GIUNTI IN CORDA

Nel Capitolo 1 sono state presentate le proprietà fisiche del bambù che lo rendono adatto come materiale da costruzione e nel Capitolo 2 si è introdotto il suo utilizzo nelle antiche costruzioni e in quelle contemporanee come elemento asta nelle strutture reticolari dei ponteggi costruiti in Oriente, nei quali le connessioni tra culmi sono realizzate tramite legatura.

In questo capitolo si studia un metodo di connessione tradizionale basato sulle legature in corda dei culmi di bambù. Nel paragrafo 3.1 si descrive l'elemento corda tramite il quale il giunto viene realizzato; nel paragrafo 3.2 si analizzano le proprietà del nodo in corda. Vengono poi descritte le tipologie anche di nodi non in corda (paragrafo 3.3), le tecniche di esecuzione delle legature e dei nodi (3.4), e viene fatta una classificazione dei giunti a seconda della geometria e degli sforzi a cui sono sottoposti (3.5). Infine, si riportano casi studio che dimostrano la sostenibilità e la durabilità di questo metodo (3.6).

### 3.1 LA STRUTTURA DI UNA CORDA

Il tipo di corda più resistente è quello costituito da 3 legnoli attorcigliati verso destra. La sua resistenza è dovuta al fatto che ogni singolo legnolo è attorcigliato su se stesso verso sinistra, opponendosi in questo modo al senso di torsione della corda.

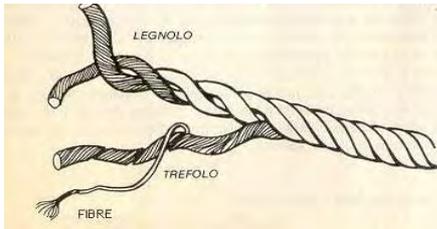


Figura 113. Struttura di una corda a 3 legnoli, <https://dimaredamore.com/2017/03/15/i-6-nodi-essenziali-da-conoscere/>, consultato il 23/04/2018.

Anticamente venivano realizzate corde grezze con fibre naturali come la manilla, il cocco, la canapa, la juta e la raffia. Queste corde, nonostante garantiscano un'ottima compatibilità tra gli elementi della struttura<sup>83</sup>, si gonfiano se soggette a frequenti intemperie, si indeboliscono e si degradano. Inoltre, se i nodi vengono a contatto costante con l'acqua, unumidensodi e seccondosi, tendono a comprimersi molto e successivamente a rompersi.

Oggi per l'esecuzione di connessioni in corda, si preferisce utilizzare corde artificiali come il nailon, il poliestere, il polipropilene, che, rispetto alle fibre naturali, hanno una maggiore resistenza alla tensione, non subiscono alterazioni da intemperie (dunque non dovrebbero degradarsi), e hanno un'elevata resistenza all'invecchiamento<sup>84</sup>. Risultano più brutte e più costose di quelle naturali.

### 3.2 IL NODO E LE SUE PROPRIETÀ

Il nodo viene definito da TRECCANI come: "Intreccio di uno o più tratti di corda, consistente in un avvolgimento del tratto su sé stesso o in un suo collegamento con un altro tratto o con oggetti diversi, e avente lo scopo di realizzare, a seconda dei casi, un accorciamento e ingrossamento della corda, un cappio atto ad agganciare o a serrare, una giunzione di due o più

<sup>83</sup> S. GASS, H. DRÜSEDAU, J. HENNICKE, FREI OTTO (a cura di), *Il 31 Bambus/Bamboo*, Stuttgart, Institut für leichte Flächentragwerke, Stuttgart, 1985, p. 117.

<sup>84</sup> "I 6 nodi essenziali da conoscere", <https://dimaredamore.com, 15/03/2017>, consultato il 23/04/2018.

capi, una legatura fissa o scorsoia. [...] caratteristiche comuni a tutti i nodi sono la sicurezza sotto sforzo e la facilità a essere slegati quando non sono più in tensione”<sup>85</sup>.

Si elencano le proprietà di un nodo<sup>86</sup>:

- Semplicità e rapidità di esecuzione.
- Adattabilità a una determinata applicazione in base alle sue proprietà meccaniche.
- Efficienza (o resistenza), ossia la scarsa diminuzione del carico di rottura rispetto al carico di rottura della corda.
- Sicurezza, ovvero la scarsa tendenza del nodo a slegarsi, in assenza di manipolazione della sua struttura e in maniera indesiderata, se sottoposto a particolari condizioni (ad esempio alcuni nodi risultano particolarmente poco sicuri se sottoposti a strappi, o sfregamenti, o se bagnati).
- Facilità di slegamento anche dopo essere sottoposti a forte tensione.
- Scarsa propensione a danneggiare la corda a causa di un eccessivo serraggio in risposta alla tensione della corda stessa.

### 3.3 TIPOLOGIE DI CONNESSIONI TRA ASTE DI BAMBÙ

Secondo Oscar Hidalgo López (*The Gift of the Gods*, 2003, citato da Roberval Padovan 2010), nelle costruzioni in bambù le maggiori difficoltà si riscontrano nelle connessioni strutturali tra gli elementi, che non consentono di adottare tecniche di giunzioni applicate per altri materiali, come l'acciaio o il legno, ma prevedono tecniche specifiche al fine di trasferire con efficienza gli sforzi sfruttando al massimo le proprietà meccaniche del bambù. Sono presenti varie tecniche di connessione strutturale tra i culmi; tuttavia, nessuna di queste si è imposta sulle altre in termini di efficienza meccanica.

L'obiettivo di una buona connessione è quello di ottenere una continuità strutturale tra gli elementi. Ciò significa garantire che gli sforzi siano trasmessi in modo sicuro secondo le normative edilizie e che le deformazioni siano tenute sotto controllo al fine di garantire l'equilibrio.

Le connessioni tra culmi di bambù riportate nel Capitolo 2 per le strutture dei ponteggi sono eseguite tramite legatura in corda. Le difficoltà riscontrabili in questa tecnica sono dovute alle proprietà meccaniche del materiale e alla sua forma (è un materiale ortotropo, cavo, che varia in diametro, lunghezza e qualità in base a vari fattori tra cui il clima, le cui fibre sono disposte solo in senso longitudinale, a eccezione di quelle dei nodi, e la cui superficie esterna è molto liscia). Inoltre, possono coesistere resistenze diverse dei giunti di una stessa struttura dovute al fatto che sono realizzati da operatori diversi. Pertanto, tenendo conto anche delle proprietà di un nodo descritte precedentemente, è richiesta conoscenza ed esperienza sulle tecniche di legatura e di realizzazione dei nodi da parte degli operatori edili.

Da queste premesse, per costruire strutture con bambù e corda sono necessari test di resistenza alle sollecitazioni eseguiti sui culmi, sui nodi e sulla corda, che dimostrano la fattibilità strutturale del sistema costruttivo.

Si distinguono due tipologie di connessione tra aste di bambù utilizzate nelle costruzioni:

- 1) Le connessioni indirette realizzate tramite interposizione di elementi metallici che ri-

<sup>85</sup> *Nodo*, in *Enciclopedia Treccani*, <http://www.treccani.it/enciclopedia/nodo/>, consultato il 23/04/2018

<sup>86</sup> Geronimo Galli, “I nodi dalla geometria alla nautica”, [slideplayer.it/slide/10129980/](http://slideplayer.it/slide/10129980/), consultato il 23/04/2018

sultano economiche e di facile esecuzione, ma meno ottimale dal punto di vista della sostenibilità ambientale. Il nucleo metallico connette vari culmi in differenti direzioni.

La connessione indiretta è spesso utilizzata tra la fondazione e le colonne di bambù al fine di isolare la struttura dal terreno.



Figure 114, 115. A sinistra, in centro. SHOEI YOH, Nodo multiplo. Diversi culmi confluiscono nel giunto fatto da tubi in acciaio inseriti nel bambù e ad essi connessi mediante bulloni, in M. C. LAVERDE, *Il bambù come materiale da costruzione: caratteristiche fisiche e meccaniche, tecnologie costruttive*, Napoli, Sistemi editoriali, 2008, p. 80.

Figura 116. A destra. Collegamenti con bulloni in acciaio, CHRIS DAVIES, *Bamboo Connections*, Tesi di laurea in Architettura e Ingegneria Civile, rel. Pete Walker, University of Bath, 2008, <https://zh.scribd.com/doc/132409345/Bamboo-Connections>, p. 15, consultato il 24/04/2018.



Figura 117. A sinistra. RENZO PIANO, Nodo in alluminio. Unioni con piastrina. in M. C. LAVERDE, *Il bambù come materiale da costruzione*, Napoli, Sistemi editoriali, 2008, p. 82.

Figure 118, 119. In centro, a destra. MAURICIO CÁRDENAS, Giunto in bambù e acciaio, *ibid.*, p. 84.

2) Le connessioni dirette costituiscono i metodi più rapidi, semplici e antichi, per la realizzazione di strutture reticolari (piane e spaziali).

I metodi di collegamento diretto possono essere realizzati sia senza eseguire forature sul culmo (si vedano Figure 120-122) che realizzando fori in prossimità del nodo della canna dove la fessurazione longitudinale viene contrastata dalla rigidità del nodo nel quale le fibre sono incrociate (si veda Figura 123). Lo sfruttamento della cavità dell'asta può essere utile per l'inserimento di una seconda asta, la quale viene fissata alla prima grazie a un terzo elemento inserito in una foratura trasversale e comune ai primi due. Tale elemento stabilizza il collegamento fra i culmi e può essere rappresentato da connettori (metallici, in legno o in bambù) o da corde nel caso di collegamenti meno rigidi.

La corda non solo collega i due elementi forati, ma li fascia per un certo tratto limitando gli effetti negativi dovuti alla fessurazione longitudinale, principale causa di rottura del bambù (si veda Figura 121).

Se realizzate in fibra di bambù, le corde vengono inumidite prima della legatura. Durante l'essiccazione, le fibre si contraggono e la connessione diventa più resistente.

Un'ulteriore tecnica di connessione diretta è quella usata dall'architetto Simón Vélez (si veda Figura 124), la quale si realizza iniettando il cemento nelle cavità dei culmi al fine di irri-

gidire il nodo. Anche questo metodo è usato ad esempio nelle connessioni tra la fondazione e i culmi di bambù al fine di isolarli dal terreno.



Figura 120 A sinistra. ANTOON VERTEEGDE, Connessione con nastri elastici, in J. DETHIER *et al.*, *Grow your own house. Simón Vélez und die bambusarchitektur*, Weil am Rhein, Vitra Design Museum, 2000, p. 111.

Figura 121. In centro. WALTER LIESE, Connessione con corde. Si noti la fasciatura al fine di evitare crepe longitudinali, *ibid.*, p. 114.

Figura 122 In centro. MAX WETTERWALD, Connessione con strisce in fibra di bambù, *ibid.*

Figura 123. A destra. Connessione tramite corda passanti per le forature sui culmi, [https://issuu.com/collettivo-cerretini/docs/bamboo\\_-\\_collettivo\\_cerretini/36](https://issuu.com/collettivo-cerretini/docs/bamboo_-_collettivo_cerretini/36), 2010, p. 14, consultato il 24/04/2018.



Figura 124, 125, 126. A sinistra, in centro, a destra. Zeri Foundation, Sistema di giunto di bambù sviluppato da Simón Vélez, l'estremità delle canne sono riempite di cemento e connesse con elementi metallici, in J. DETHIER *et al.*, *op. cit.*, p. 115.

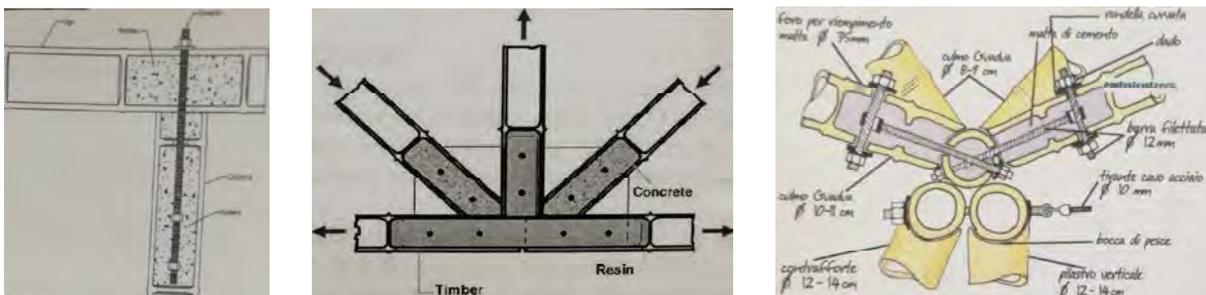


Figura 127. A sinistra. Giunto con bullone e rinforzo in cemento per dare maggiore rigidità al nodo, [https://issuu.com/giuliapistolesi1/docs/bamboo\\_stampa](https://issuu.com/giuliapistolesi1/docs/bamboo_stampa), 2012, p.36, consultato il 25/04/2018.

Figura 128. In centro. Riempimento del culmo con cemento, in CAI LUYANG, *Lashing - a possible way to achieve sustainability*, p. 5.

Figura 129. A destra. Giunto con elemento metallico e malta di cemento, [https://issuu.com/collettivocerretini/docs/bamboo\\_-\\_collettivo\\_cerretini/36](https://issuu.com/collettivocerretini/docs/bamboo_-_collettivo_cerretini/36), 2010, p. 21, consultato il 27/04/2018.

### 3.4 LE TECNICHE DI CONNESSIONE DIRETTA

Per quanto il bambù sia dotato di un'elevata resistenza a trazione, allo stesso tempo è caratterizzato dalla facilità nel fendersi in senso longitudinale. Pertanto, occorre prevenire l'insorgere di tali fenditure dovute al comportamento fragile [si ricorda che il bambù adatto alle costruzioni deve essere di età superiore a 4 anni, completamente asciutto per evitare il ritiro del materiale, e non deve essere infetto da insetti]. Le fibre del bambù si sviluppano solo in senso longitudinale lungo gli internodi, ma sui nodi si incrociano opponendosi positivamente al fenomeno della fenditura<sup>87</sup>.

Al fine di evitare lo schiacciamento della canna in una connessione, è necessario che i due elementi connessi abbiano un nodo alle estremità.

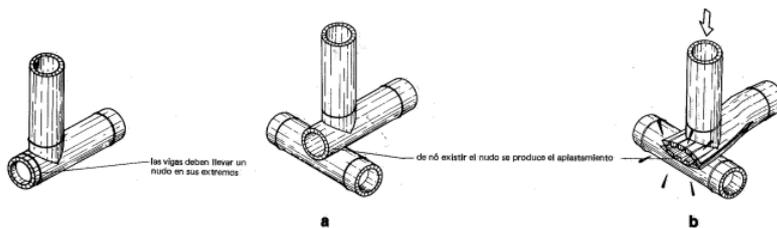


Figura 130. Si ha schiacciamento se sul punto di connessione i culmi non presentano nodi, in O. H. LÓPEZ, *Manual de construcción con bambú*, Bogotá, Estudio Técnico Colombiano LTDA, 1981, p. 12.

Nel caso in cui il nodo del culmo non giaccia sul giunto, viene inserito un tronchetto di legno o di bambù all'interno del culmo (si veda figura 131), oppure si ricorre a un'estensione della lunghezza del culmo quando essa non è sufficiente a coprire una determinata luce (si veda Figura 132).

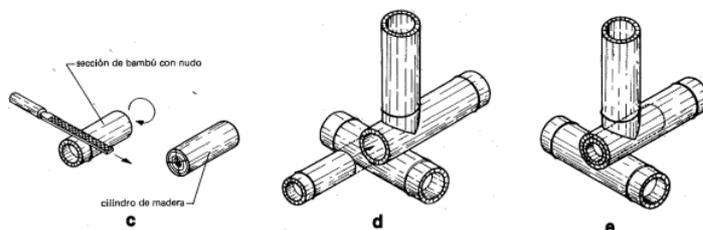


Figura 131. Inserimento di una sezione di legno o di bambù all'interno del culmo per evitare lo schiacciamento all'estremità delle canne, ibid.

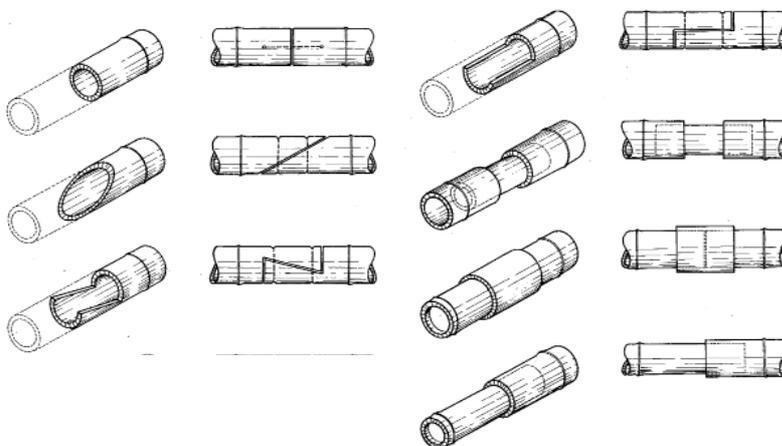


Figura 132. Diversi tipi di giunto per l'estensione del culmo, ibid., p.18.

<sup>87</sup> COLLETTIVO CERRETINI, *Bamboo*, [https://issuu.com/collettivocerretini/docs/bamboo\\_-\\_collettivo\\_cerretini/36](https://issuu.com/collettivocerretini/docs/bamboo_-_collettivo_cerretini/36), 2010, pp. 14-19, consultato il 20/09/2017.

Si riportano di seguito le tecniche di connessioni dirette che si utilizzano nelle costruzioni in bambù.

### Collegamenti realizzati mediante connettori (spine/bulloni/cunei)

Questa tecnica prevede l'esecuzione di un foro nella parete della canna, in prossimità del nodo e del diaframma, in cui viene inserito lo spinotto (preferibilmente in legno duro) dello stesso diametro del foro. Le forature possono ridurre la sezione trasversale di carico; inoltre, spesso le pareti sono molto sottili se paragonate al diametro della canna. Per minimizzare l'indebolimento dovuto ai fori ed evitare una frattura longitudinale nella canna, si deve eseguire una lavorazione molto accurata<sup>88</sup>.

Incastri come la mortasa e il tenone, adottati nella falegnameria, sono raramente usati nelle strutture di bambù. I mezzi ausiliari come le spine e i bulloni sono spesso impiegati insieme alla corda e aiutano ad aumentare le proprietà meccaniche del giunto, il quale è capace di resistere e trasferire gli sforzi di trazione e compressione così come avviene nei giunti di legno (tenone, coda di rondine)<sup>89</sup>.



Figura 133. A sinistra. Giunto con bullone e cuneo di legno, in S. GASS, op. cit., p. 120.

Figura 134. A destra. Giunto con plug (spina di legno) e legatura. Il plug impedisce lo scorrimento dell'asta orizzontale. Si nota il foro vicino al nodo dell'asta orizzontale, ibid., p. 123.



Figura 135. Giunto con tenone, mortasa e cuneo, ibid., p. 151.

Figura 136. Giunto con bullone e spinotto in acciaio, ibid., p. 150.

<sup>88</sup> S. GASS, H. DRÜSEDAU, J. HENNICKE, FREI OTTO (a cura di), op. cit., p. 114.

<sup>89</sup> ID., ibid., p. 120.

Il giunto riportato nella Figura 133 impedisce il fenomeno di scorrimento dell'elemento orizzontale in tutte le direzioni ma richiede molto dispendio di tempo per la sua esecuzione per via dei cinque fori ma si possono eseguire in tre inserimenti.

### Collegamenti realizzati mediante legatura

Si tratta di una tecnica molto comune in Oriente. Infatti, ancora oggi in Cina le giunche, che attraversano le forti correnti del fiume Yangtze, sono trainate da corde realizzate da fasci di bambù lunghi circa 350 metri. Sono preferibili ai cavi di acaba (volgarmente canapa) perché più resistenti allo sfregamento sulle pietre. Lo sforzo di trazione è di circa 70608 kN/m<sup>2</sup>. Una corda del diametro di un braccio d'uomo può resistere fino a circa 14 tonnellate<sup>90</sup>.

Il giunto in corda può essere realizzato nei due seguenti modi:

- Si fa passare la corda all'interno dei fori eseguiti sulla canna.
- Si legano le canne all'esterno della loro superficie senza eseguire fori che indeboliscono il materiale.

In generale, la forza di attrito è proporzionale al numero di giri della legatura. Inoltre, spesso vengono eseguite fasciature con nastri in prossimità dei giunti per aumentare la resistenza della connessione.

Le legature più comuni per l'unione di canne di bambù sono:

- Legatura quadrata (giapponese)
- Legatura diagonale
- Legatura treppiede
- Legatura bipiede
- Legatura parlata
- Legatura *lader*

Alcune delle legature sopra elencate sono analizzate nel Capitolo 5.

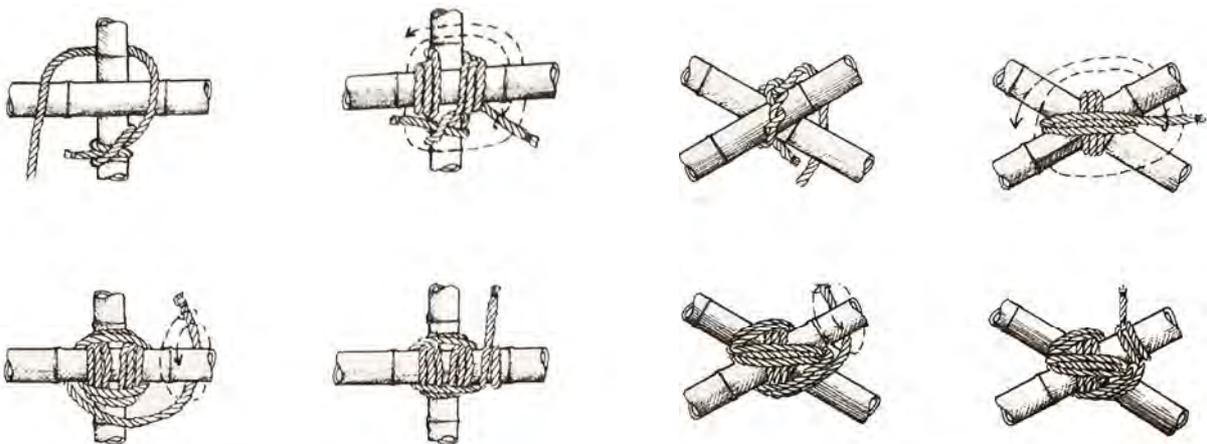


Figura 137. A sinistra. Legatura quadrata, in O. H. LÓPEZ, op. cit., p. 20.

Figura 138. A destra. Legatura diagonale (o legatura in croce), ibid.

<sup>90</sup> S. GASS, H. DRÜSEDAU, J. HENNICKE, FREI OTTO (a cura di), op. cit., p. 118.

## Classificazione geometrica e comportamento meccanico

In questo paragrafo si analizzano i collegamenti diretti tra canne di bambù con giunti realizzati tramite legatura. L'obiettivo [di tale analisi] è studiare le caratteristiche dei giunti che collegano canne di bambù tramite corda e di facilitare la scelta del collegamento più adatto a seconda del numero degli elementi da collegare, dalla geometria del nodo e delle sollecitazioni a cui è soggetto.

L'analisi è basata sul lavoro di Klaus Dunkelberg, il quale ha riportato nella sua tesi *Bamboo as a Building Material* i nodi utilizzati per le case in bambù come quelle in Figura 139.

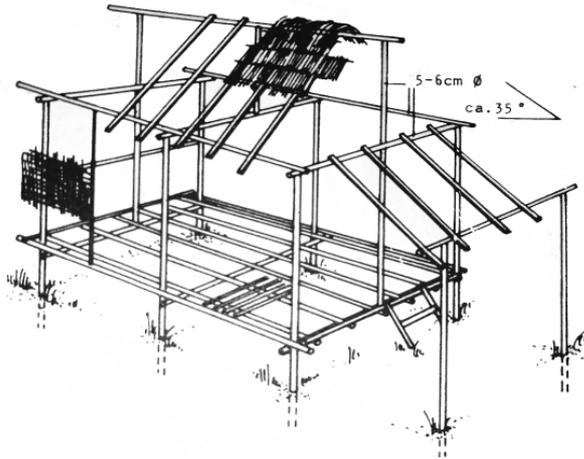


Figura 139. Casa semplice con struttura in bambù. Disegno schematico di costruzione, in S. GASS, H. DRÜSEDAU, J. HENNICKE, FREI OTTO (a cura di), op. cit., p. 144.

In generale, i nodi in corda sono adatti per le strutture leggere.

I giunti presi in esame dal lavoro di Dunkelberg sono riportati nelle tabelle da I a XI.

### Criteri di classificazione dei giunti

Nella prima colonna della tabella, i giunti sono suddivisi secondo il numero di elementi che li compongono e secondo la geometria con la quale gli elementi si relazionano: perpendicolare, non perpendicolare, giacenti sullo stesso piano e non giacenti sullo stesso piano.

I sistemi di collegamento individuati nel lavoro di Dunkelberg sono i seguenti:

- Legatura in corda senza foratura sulla/e canna/e. L'assenza di foratura permette di non indebolire la canna.
- Legatura in corda passante per i fori eseguiti sulla/e canna/e in prossimità del nodo.
- Bullonatura con vite di legno e talvolta con spinotti di legno.
- Legatura in corda con l'ausilio di bulloni.
- Incastro.

Si vedano nella Figura 140 i tagli eseguiti sulle canne per la realizzazione del collegamento. Il taglio più comune è quello a bocca di pesce, come si vedrà nella tabella di classificazione. Tutti i tagli sono eseguiti (di norma) vicino al nodo della canna poiché è la parte più resistente in cui le fibre sono incrociate.

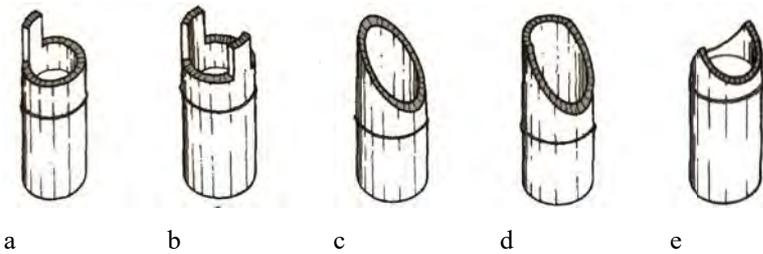


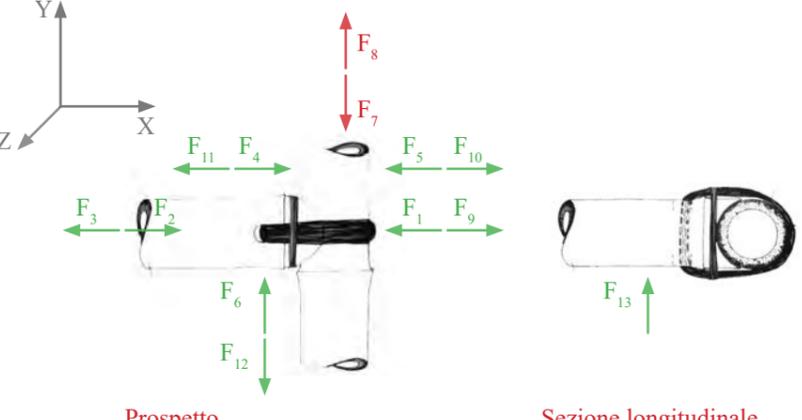
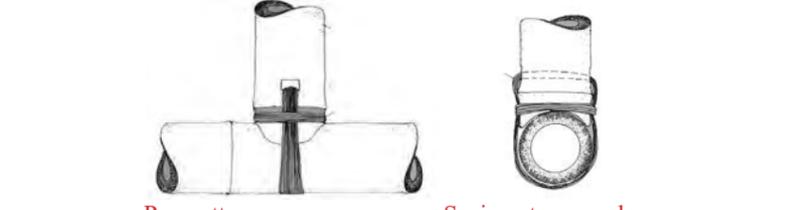
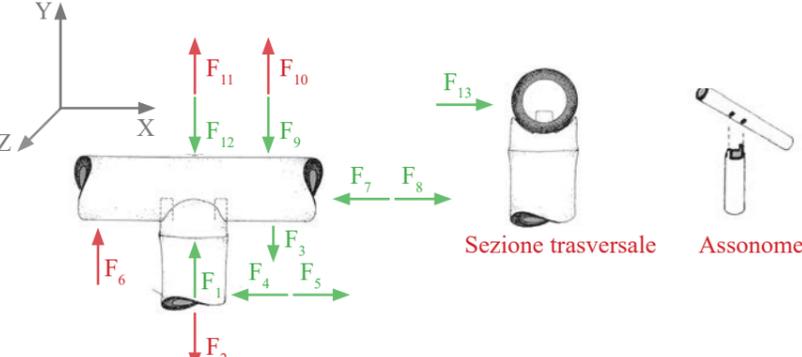
Figura 140. Tagli utilizzati per la realizzazione dei giunti tra canne di bambù, in O. H. LÓPEZ, op. cit., p. 13.

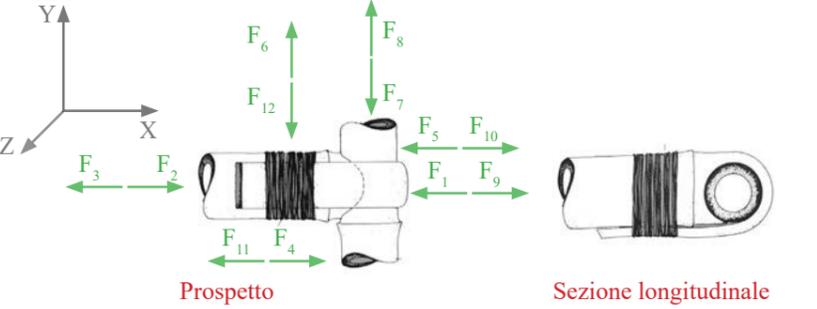
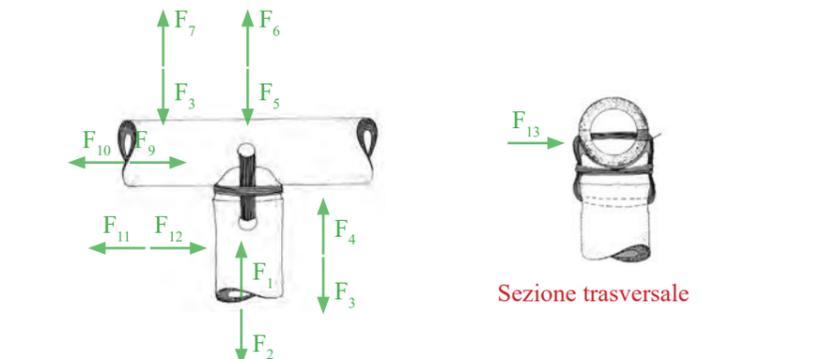
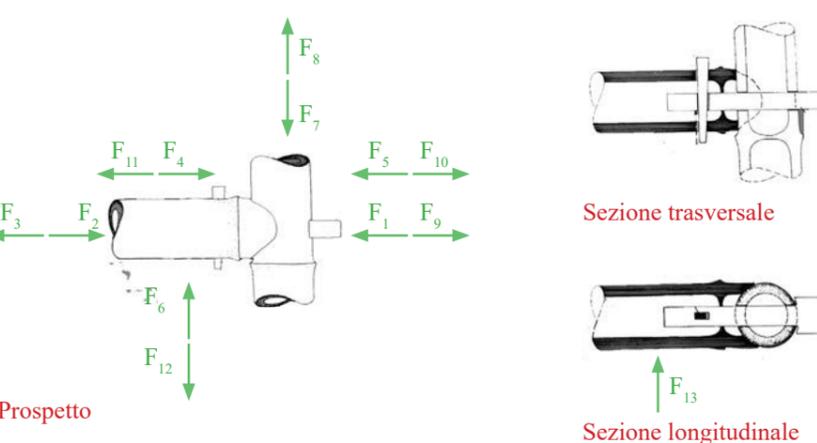
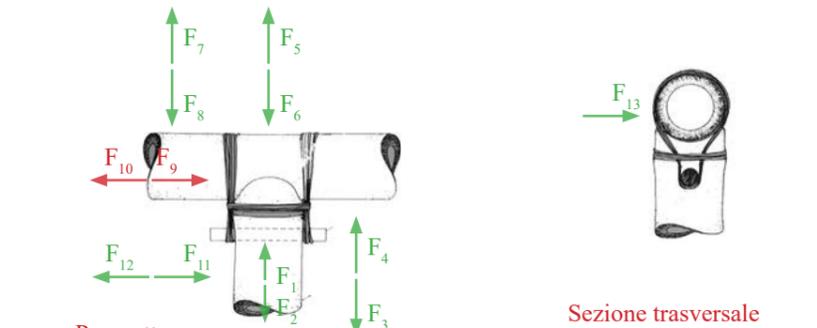
La seconda colonna della tabella riporta lo schema delle forze che convergono sul nodo riferite agli assi  $x, y, z$ .

Nella terza colonna si riporta una breve descrizione specificando:

- Elementi collegati: colonna-trave, trave-colonna, colonna-colonna, trave-trave, trave-trave-trave, trave-travetto, colonna-trave-trave inclinata, trave-tiranti inclinati, colonna-tiranti inclinati.
- Sistema di collegamento.

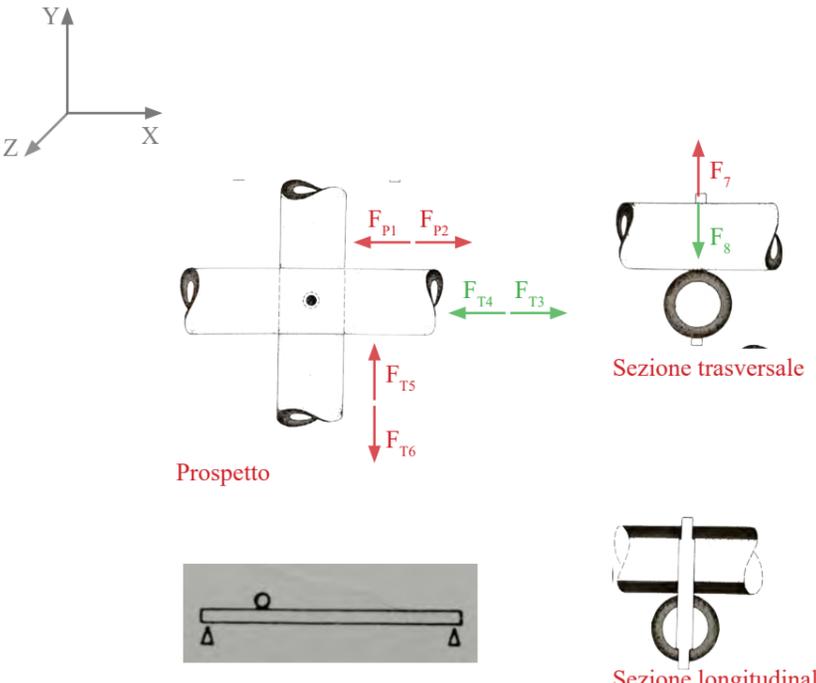
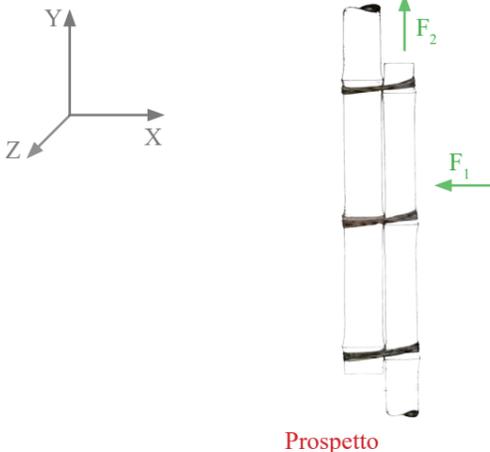
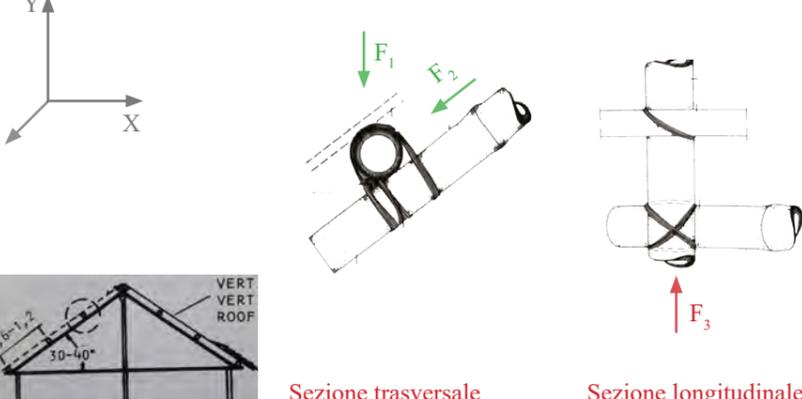
Infine, nell'ultima colonna, vengono descritti il comportamento meccanico del giunto, le sollecitazioni che convergono su di esso, e le sollecitazioni che è in grado di trasmettere. Da queste considerazioni si definisce il giunto come flessibile se consente traslazioni o rotazioni; rigido se non trasmette movimenti del corpo; semirigido se in grado di trasmettere le di sollecitazioni di progetto a eccezione di quelle ultime dell'elemento meno resistente.

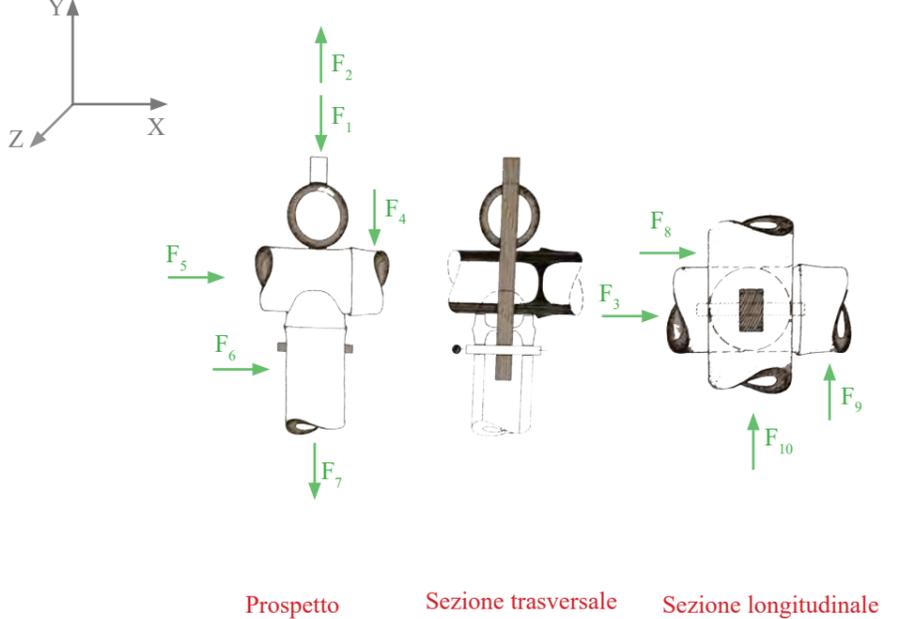
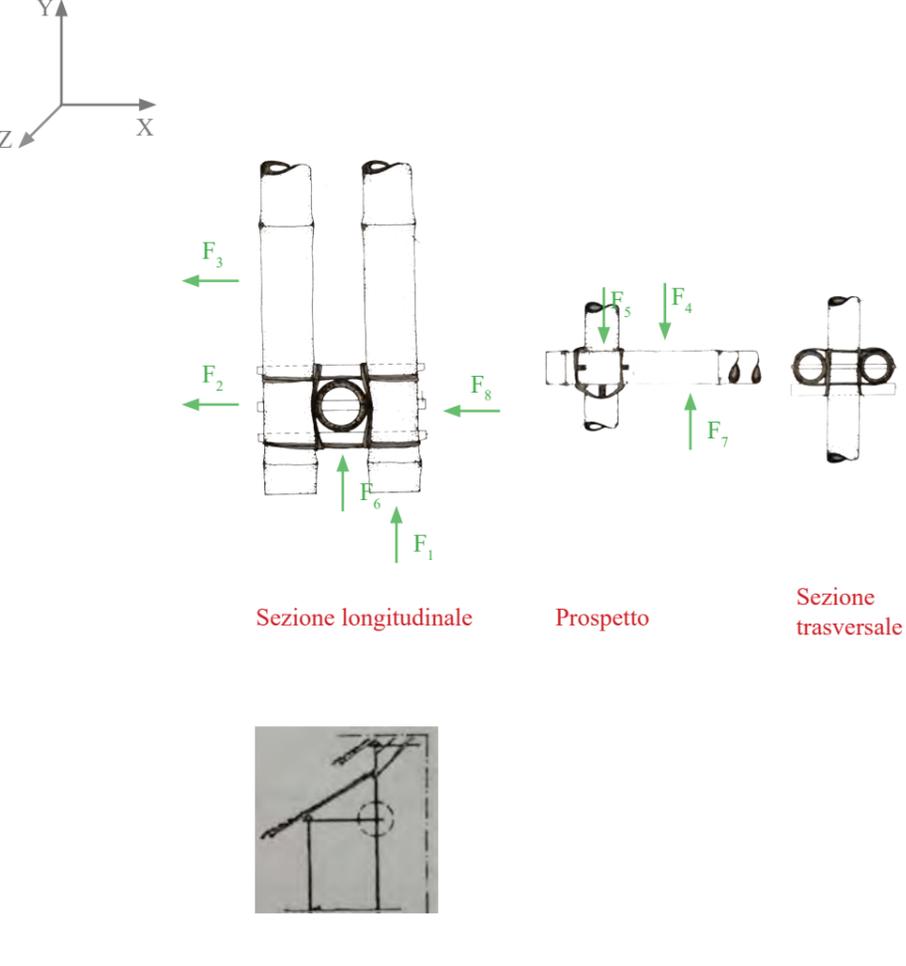
GEOMETRIA	SCHEMA DELLE FORZE AGENTI SUL NODO	DESCRIZIONE	COMPORTAMENTO MECCANICO
<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">GIUNTO DI 2 ELEMENTI PERPENDICOLARI GIACENTI SULLO STESSO PIANO</p>	 <p>Prospetto</p> <p>Sezione longitudinale</p> <p>VARIANTE</p>  <p>Prospetto</p> <p>Sezione trasversale</p> <p>Sezione longitudinale</p>	<p>Giunto colonna-trave realizzato tramite un sistema di collegamento costituito da legatura orizzontale passante attraverso i fori eseguiti sull'elemento orizzontale.</p> <p>La tensione della corda potrebbe provocare una fessurazione longitudinale della canna. Al fine di evitare tale danno si esegue una seconda legatura perpendicolare alla prima.</p> <p>La spina di legno orizzontale impedisce la traslazione assiale.</p> <p>I fori vanno sempre eseguiti in prossimità del nodo della canna così come il taglio a bocca di pesce.</p>	<p>Lo schema delle forze con verso e direzione fa riferimento al piano x,y,z. Si notino in rosso i movimenti cui la legatura non è in grado di opporsi (liberi), mentre in verde quelli a cui si oppone (bloccati).</p> <p>Si considera un giunto sottoposto a sollecitazioni esterne di taglio (<math>F_8</math> e <math>F_7</math>), di compressione (<math>F_1</math> e <math>F_2</math>), di trazione (<math>F_3</math> e <math>F_9</math>), e di flessione (<math>F_4</math>, <math>F_5</math>, <math>F_6</math>, <math>F_{10}</math>, <math>F_{11}</math>, <math>F_{12}</math>, <math>F_{13}</math>).</p> <p>Staticamente il giunto lavora a trazione, a compressione e a flessione. Non lavora a taglio.</p> <p>Cinematicamente consente la traslazione della colonna lungo l'asse Y. Non consente traslazioni lungo l'asse X e non consente rotazioni.</p> <p>Il giunto è flessibile.</p> <p>N.B. La legatura non è sicura contro le forze <math>F_4</math>, <math>F_{11}</math>, <math>F_{10}</math> e <math>F_5</math> poiché dato un carico elevato potrebbero verificarsi rotazioni della colonna attorno all'asse Z.</p>
	 <p>Prospetto</p> <p>Sezione trasversale</p>		
	 <p>Prospetto</p> <p>Sezione trasversale</p>		
	 <p>Prospetto</p> <p>Sezione trasversale</p> <p>Assonometria</p>	<p>Giunto colonna-trave realizzato tramite un sistema a incastro con due linguette intagliate nell'elemento verticale che si incastrano nell'elemento orizzontale. Questo tipo di giunto è consigliato solo per le canne aventi parete molto spessa.</p>	<p>Si considera un giunto sottoposto a sollecitazioni esterne di taglio (<math>F_7</math>, <math>F_8</math>, <math>F_2</math>, <math>F_{11}</math>, <math>F_{13}</math>), di compressione (<math>F_1</math> e <math>F_{12}</math>), e di flessione (<math>F_3</math>, <math>F_9</math>, <math>F_4</math>, <math>F_5</math>, <math>F_6</math>, <math>F_{10}</math>).</p> <p>Staticamente il giunto lavora a compressione, taglio lungo l'asse X e flessione. Non lavora a taglio lungo l'asse Y.</p> <p>Cinematicamente consente la traslazione della trave e della colonna lungo l'asse Y. Non consente traslazioni lungo l'asse X. Non consente rotazioni.</p> <p>Il giunto è flessibile.</p> <p>N.B. Il nodo non è sicuro contro le forze <math>F_9</math>, <math>F_3</math>.</p>

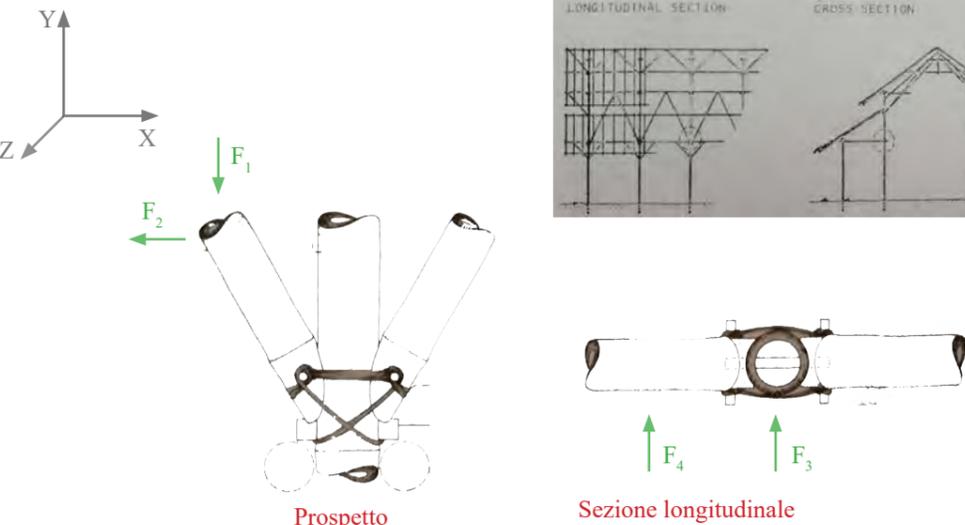
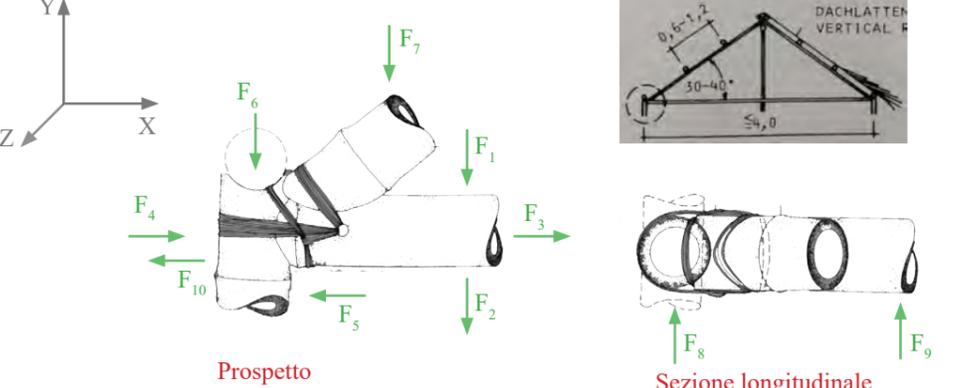
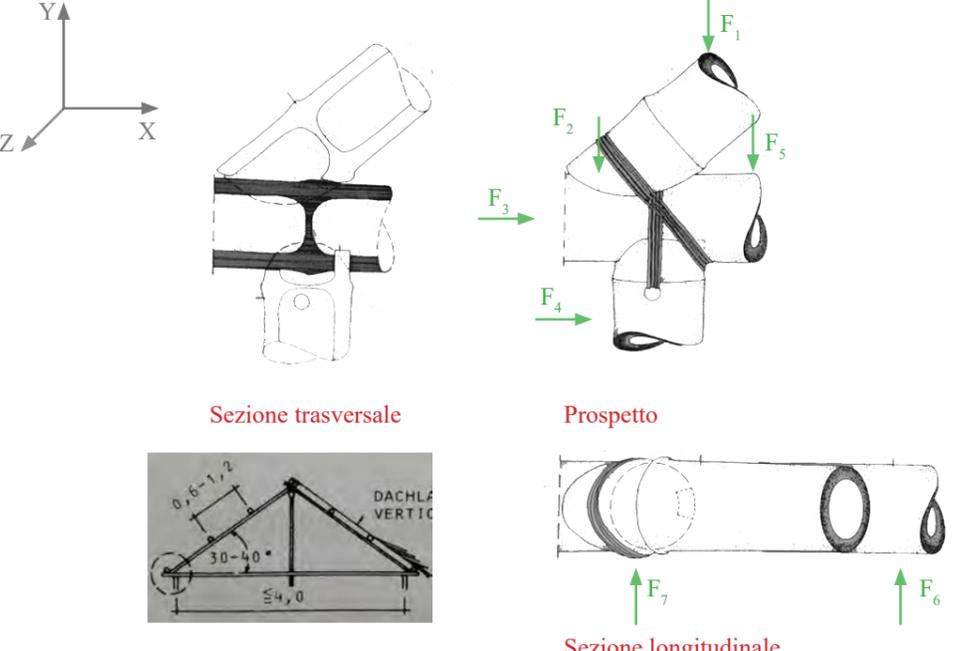
GEOMETRIA	SCHEMA DELLE FORZE AGENTI SUL NODO	DESCRIZIONE	COMPORTAMENTO MECCANICO
GIUNTO DI 2 ELEMENTI PERPENDICOLARI GIACENTI SULLO STESSO PIANO	 <p>Prospetto</p> <p>Sezione longitudinale</p>	<p>Giunto colonna-trave consigliato per canne aventi spessore della parete sottile. È realizzato tramite un sistema in cui viene lasciata una striscia di canna dell'elemento orizzontale che ha il compito di avvolgere la canna verticale. Successivamente la striscia di canna viene bloccata con legatura verticale.</p>	<p>Si considera un giunto sottoposto a sollecitazioni esterne di taglio (<math>F_8</math> e <math>F_7</math>), di compressione (<math>F_1</math> e <math>F_2</math>), di trazione (<math>F_3</math> e <math>F_9</math>), e di flessione (<math>F_4</math>, <math>F_5</math>, <math>F_6</math>, <math>F_{10}</math>, <math>F_{11}</math>, <math>F_{12}</math>, <math>F_{13}</math>).</p> <p>Staticamente il giunto lavora a trazione, a compressione, a flessione e a taglio.</p> <p>Cinematicamente non consente la traslazione della colonna lungo l'asse Y dovuto al nodo della stessa. Non consente traslazioni lungo l'asse X e non consente rotazioni.</p> <p>È un giunto rigido.</p>
	 <p>Prospetto</p> <p>Sezione trasversale</p>	<p>Giunto colonna-trave realizzato tramite un sistema di collegamento con legatura verticale passante nei fori eseguiti sull'elemento verticale e in quelli eseguiti sull'elemento orizzontale.</p>	<p>Si considera un giunto sottoposto a sollecitazioni esterne di taglio (<math>F_{10}</math>, <math>F_9</math>, <math>F_{13}</math>), di compressione (<math>F_1</math> e <math>F_5</math>), di trazione (<math>F_6</math> e <math>F_2</math>), e di flessione (<math>F_4</math>, <math>F_3</math>, <math>F_7</math>, <math>F_8</math>, <math>F_{11}</math>, <math>F_{12}</math>).</p> <p>Staticamente il giunto lavora a trazione, a compressione e a taglio. Lavora discretamente a flessione.</p> <p>Cinematicamente non consente traslazioni e rotazioni. Le forze di flessione potrebbero causare rotazione della trave lungo l'asse Z se di una certa entità. Per tale motivo si definisce il giunto come semirigido.</p>
	 <p>Prospetto</p> <p>Sezione trasversale</p> <p>Sezione longitudinale</p>	<p>Giunto colonna-trave realizzato tramite un sistema di collegamento a bullone passante per tre fori: due fori nell'elemento verticale e un foro nel diaframma dell'elemento orizzontale; infine, spinotto verticale passante per due fori eseguiti sull'elemento orizzontale. I fori in totale sono cinque.</p>	<p>Si considera un giunto sottoposto a sollecitazioni esterne di taglio (<math>F_8</math> e <math>F_7</math>), di compressione (<math>F_1</math> e <math>F_2</math>), di trazione (<math>F_3</math> e <math>F_9</math>), e di flessione (<math>F_4</math>, <math>F_5</math>, <math>F_6</math>, <math>F_{10}</math>, <math>F_{11}</math>, <math>F_{12}</math>, <math>F_{13}</math>).</p> <p>Staticamente il giunto lavora a trazione, a compressione, a flessione e a taglio.</p> <p>Cinematicamente non consente traslazioni e rotazione.</p> <p>Il giunto è rigido.</p>
	 <p>Prospetto</p> <p>Sezione trasversale</p>	<p>Giunto colonna-trave realizzato tramite un sistema di collegamento con due legature verticali passanti attorno all'elemento orizzontale e al bullone in legno parallelo all'elemento orizzontale passante per i fori eseguiti sull'elemento verticale.</p>	<p>Si considera un giunto sottoposto a sollecitazioni esterne di taglio (<math>F_9</math>, <math>F_{10}</math>, <math>F_{13}</math>), di compressione (<math>F_1</math> e <math>F_6</math>), di trazione (<math>F_2</math> e <math>F_5</math>), e di flessione (<math>F_4</math>, <math>F_3</math>, <math>F_7</math>, <math>F_8</math>, <math>F_{11}</math>, <math>F_{12}</math>).</p> <p>Staticamente il giunto lavora a trazione, a compressione, a flessione e a taglio (lungo l'asse Y). Non lavora a taglio lungo l'asse X.</p> <p>Cinematicamente consente traslazioni lungo l'asse X. Non consente rotazione e traslazioni lungo gli assi Y e Z.</p> <p>Il giunto è flessibile.</p>

GEOMETRIA	SCHEMA DELLE FORZE AGENTI SUL NODO	DESCRIZIONE	COMPORTAMENTO MECCANICO
GIUNTO DI 2 ELEMENTI PERPENDICOLARI GIACENTI SULLO STESSO PIANO	<p style="text-align: center;">Prospetto                      Sezione trasversale</p>	<p>Giunto colonna-trave realizzato tramite un sistema di collegamento con due legature verticali passanti attorno all'elemento orizzontale e ad un bullone in legno, questa volta perpendicolare all'elemento orizzontale, passante per i fori eseguiti sull'elemento verticale.</p>	<p>Si considera un giunto sottoposto a sollecitazioni esterne di taglio (<math>F_9, F_{10}, F_{13}</math>), di compressione (<math>F_1</math> e <math>F_6</math>), di trazione (<math>F_2</math> e <math>F_5</math>), e di flessione (<math>F_4, F_3, F_7, F_8, F_{11}, F_{12}</math>).</p> <p>Staticamente il giunto lavora a trazione, a compressione, a flessione e a taglio lungo l'asse Z. Non lavora a taglio lungo l'asse X.</p> <p>Cinematicamente consente la traslazione della colonna lungo l'asse X. Non consente traslazioni lungo l'asse Y e non consente rotazioni.</p> <p>Il giunto è flessibile.</p> <p>N.B. La legatura non è sicura contro le forze <math>F_4, F_3, F_7</math> e <math>F_8</math> poiché dato un carico elevato potrebbero verificarsi rotazioni della trave attorno all'asse Z.</p>
	<p style="text-align: center;">Prospetto                      Sezione longitudinale</p>	<p>Giunto colonna-trave indicato per i collegamenti costituiti da canne con diametro diverso. Il sistema di collegamento è realizzato tramite uno spinotto in legno perpendicolare all'elemento orizzontale e passante per i fori eseguiti sull'elemento verticale.</p>	<p>Si considera un giunto sottoposto a sollecitazioni esterne di taglio (<math>F_1, F_2, F_5, F_6</math>) e di flessione (<math>F_4, F_3, F_7, F_8</math>).</p> <p>Staticamente lo spinotto in legno lavora a tutte le sollecitazioni e cinematicamente non consente movimenti.</p> <p>È un giunto rigido.</p>
GIUNTO DI 3 ELEMENTI PERPENDICOLARI GIACENTI SULLO STESSO PIANO	<p style="text-align: center;">Prospetto                      Pianta</p>	<p>Giunto colonna-trave realizzato tramite un sistema di collegamento con legatura orizzontale passante per 4 fori eseguiti sui due elementi orizzontali che giacciono sullo stesso piano. Gli elementi orizzontali devono avere alle loro estremità un nodo della canna al fine di evitare le fessurazioni longitudinali.</p>	<p>Si considera un giunto sottoposto a sollecitazioni esterne di taglio (<math>F_5</math> e <math>F_6</math>), di compressione (<math>F_1</math> e <math>F_{10}</math>), di trazione (<math>F_2</math> e <math>F_9</math>), e di flessione (<math>F_4, F_3, F_7, F_8, F_{11}</math>).</p> <p>Staticamente il giunto lavora a trazione, a compressione, a flessione e a taglio.</p> <p>Cinematicamente consente movimenti. Le forze di flessione <math>F_7</math> e <math>F_8</math> potrebbero causare rotazione della trave lungo l'asse Z se di una certa entità. Per tale motivo si definisce il giunto come semirigido.</p>

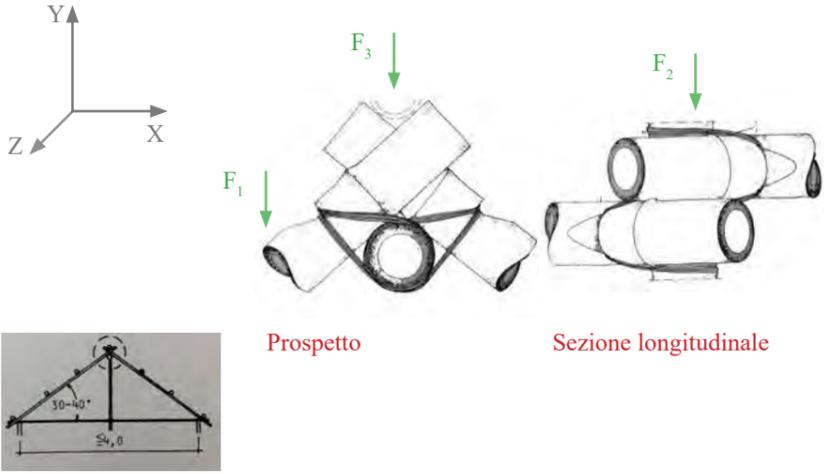
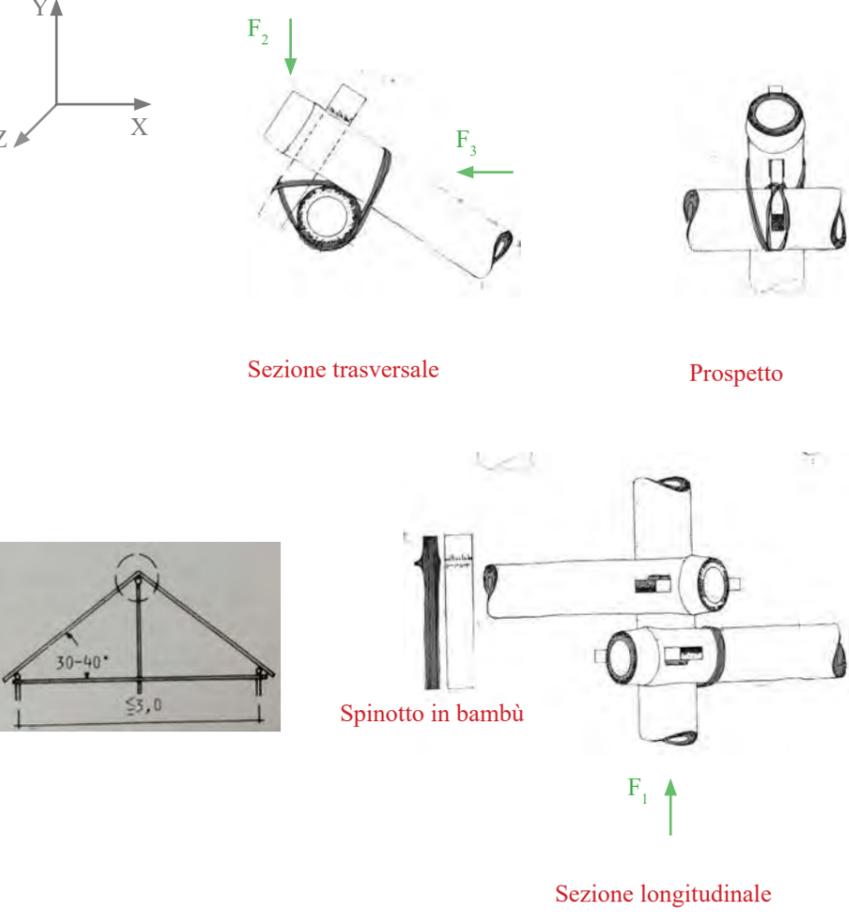
GEOMETRIA	SCHEMA DELLE FORZE AGENTI SUL NODO	DESCRIZIONE	COMPORTAMENTO MECCANICO
GIUNTO DI 2 ELEMENTI PERPENDICOLARI NON GIACENTI SULLO STESSO PIANO	<p> <math>F_T</math> = Forze agenti sulla trave  <math>F_P</math> = Forze agenti sul pilastro         </p> <p>Prospetto                      Pianta                      Sezione trasversale</p>	<p>Giunto colonna-trave realizzato tramite un sistema di collegamento con legatura orizzontale passante attorno all'elemento verticale e legatura verticale passante attorno all'elemento orizzontale. Gli elementi non sono sullo stesso piano ma semplicemente si toccano. Le canne non sono indebolite da forature.</p> <p>Nella variante si nota che la legatura orizzontale viene stretta da un'ulteriore legatura perpendicolare a essa.</p>	<p>Si considera un giunto sottoposto a sollecitazioni esterne di taglio (<math>F_1, F_2, F_9, F_{10}, F_7, F_8, F_{11}, F_{12}</math>), di compressione (<math>F_{13}</math>), di trazione (<math>F_{14}</math>), e di flessione (<math>F_4, F_3, F_5, F_6</math>).</p> <p>Staticamente il giunto lavora a trazione, a compressione, a flessione e a taglio lungo l'asse Z. Non lavora a taglio lungo l'asse X e lungo l'asse Y.</p> <p>Cinematicamente consente la traslazione del pilastro lungo l'asse Y e della trave lungo l'asse X.</p> <p>Il giunto è flessibile.</p>
	<p>Prospetto                      Sezione trasversale</p>	<p>Giunto colonna-trave realizzato tramite doppia legatura diagonale attorno agli elementi. Il ramo della canna può essere utilizzato come ulteriore appoggio per la trave.</p> <p>Nella variante si nota un'unica legatura diagonale e l'appoggio per la trave realizzato con uno spinotto in legno passante per due fori eseguiti sulla colonna.</p>	<p>Si considera un giunto sottoposto a sollecitazioni esterne di taglio (<math>F_5, F_6, F_7, F_8, F_{11}, F_{12}, F_{13}, F_{14}</math>), di compressione (<math>F_{15}</math>), di trazione (<math>F_{16}</math>), e di flessione (<math>F_4, F_3, F_9, F_1, F_2, F_{10}</math>).</p> <p>Staticamente il giunto lavora a trazione, a compressione, a flessione e a taglio lungo l'asse Z. Non lavora a taglio lungo l'asse X e lungo l'asse Y.</p> <p>Cinematicamente consente la traslazione del pilastro lungo l'asse Y verso il basso e della trave lungo l'asse X. Non consente ulteriori movimenti.</p> <p>Il giunto è flessibile.</p>

GEOMETRIA	SCHEMA DELLE FORZE AGENTI SUL NODO	DESCRIZIONE	COMPORTAMENTO MECCANICO
GIUNTO DI 2 ELEMENTI PERPENDICOLARI NON GIACENTI SULLO STESSO PIANO	 <p>Prospetto</p> <p>Sezione trasversale</p> <p>Sezione longitudinale</p>	<p>Giunto trave-trave realizzato tramite un sistema di collegamento a bullone orizzontale passante per quattro fori eseguiti su entrambi gli elementi.</p>	<p>Si considera un giunto sottoposto a sollecitazioni esterne di taglio (<math>F_4, F_3</math>), di compressione (<math>F_8</math>), di trazione (<math>F_7</math>), e di flessione (<math>F_1, F_2, F_5, F_6</math>).</p> <p>Staticamente il giunto lavora a trazione, a compressione, a flessione e a taglio lungo l'asse Z. Non lavora a taglio lungo l'asse X e lungo l'asse Y.</p> <p>Cinematicamente consente la traslazione del pilastro lungo l'asse Y e della trave lungo l'asse X.</p> <p>Il giunto è flessibile.</p>
	 <p>Prospetto</p>	<p>Giunto colonna-colonna tipicamente usato nei ponteggi. È realizzato tramite un sistema di collegamento con varie legature orizzontali lungo l'estensione delle canne e a ridosso dei nodi. Nelle canne dal diametro grande la frizione aumenta eseguendo ulteriori legature verticali tra le canne e attorno alla legatura orizzontale.</p>	<p>Si considera un giunto sottoposto a sollecitazioni esterne di taglio (<math>F_1</math>) e di trazione (<math>F_2</math>).</p> <p>Staticamente il giunto lavora a trazione e a taglio.</p> <p>Cinematicamente non consente traslazioni e rotazioni.</p> <p>Il giunto è rigido.</p>
	 <p>Sezione trasversale</p> <p>Sezione longitudinale</p>	<p>Giunto trave-travetto adatto per essere utilizzato nella copertura. È realizzato tramite un sistema di collegamento con doppia legatura diagonale.</p>	<p>Si considera un giunto sottoposto a sollecitazioni esterne di taglio (<math>F_3</math> e <math>F_2</math>) e di flessione (<math>F_1</math>).</p> <p>Staticamente il giunto lavora a flessione e a taglio lungo l'asse X. Non lavora a taglio lungo l'asse Z poiché non sono presenti legature orizzontali.</p> <p>Cinematicamente non consente traslazioni lungo l'asse X e rotazioni. Consente traslazione lungo l'asse Z.</p> <p>Il giunto è flessibile.</p>

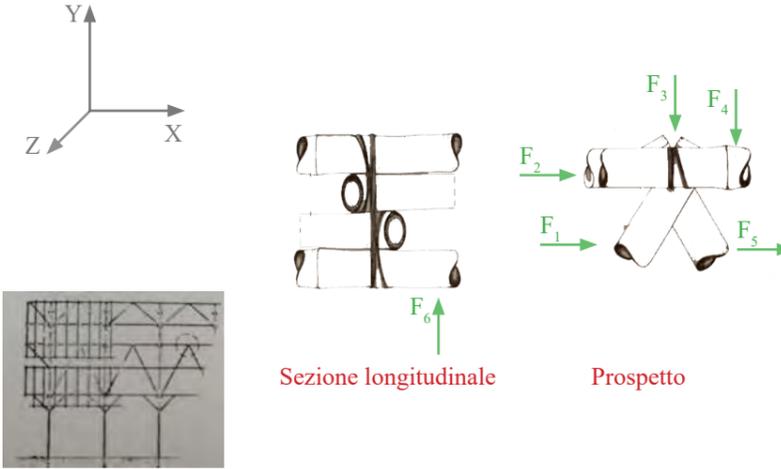
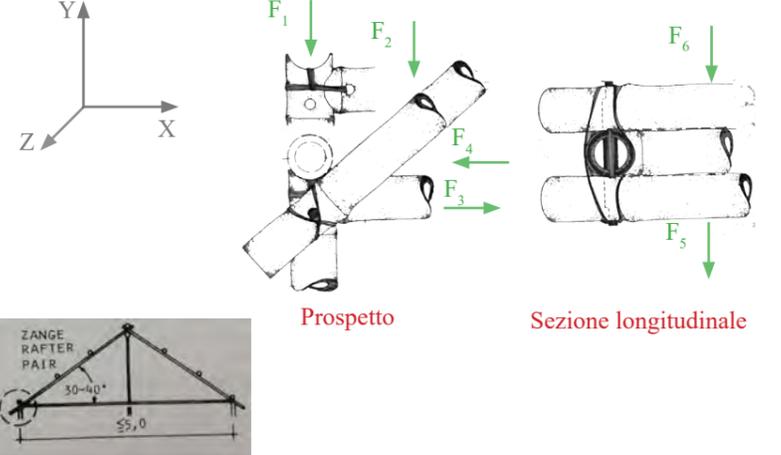
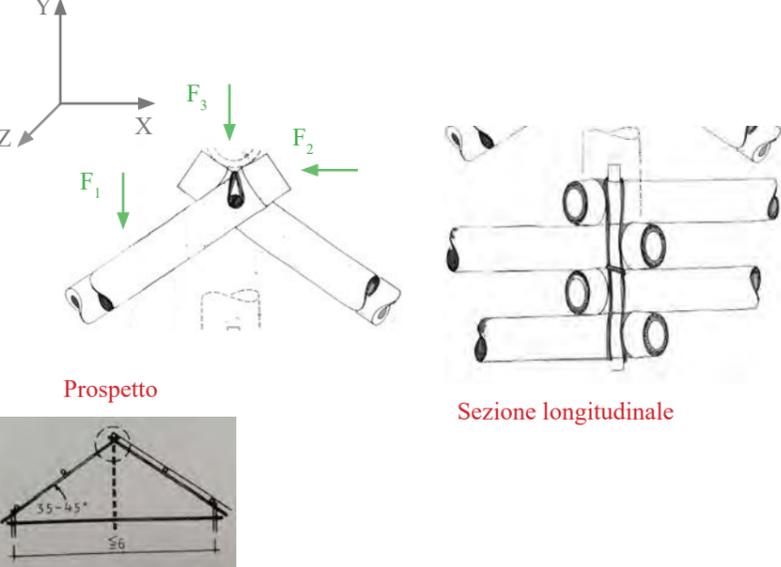
GEOMETRIA	SCHEMA DELLE FORZE AGENTI SUL NODO	DESCRIZIONE	COMPORTAMENTO MECCANICO
<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">GIUNTO DI 3 ELEMENTI PERPENDICOLARI NON GIACENTI SULLO STESSO PIANO</p>	 <p style="text-align: center;">Prospetto      Sezione trasversale      Sezione longitudinale</p>	<p>Giunto colonna-trave-trave realizzato tramite un sistema di collegamento con bullone verticale passante per cinque fori, e spinotto orizzontale passante per due fori.</p>	<p>Si considera un giunto sottoposto a sollecitazioni esterne di trazione (<math>F_2</math> e <math>F_7</math>), compressione (<math>F_1</math>), taglio (<math>F_3, F_5, F_6, F_{10}</math>) e di flessione (<math>F_4, F_8, F_9</math>). Staticamente il giunto lavora a tutte le sollecitazioni cui è soggetto. Cinematicamente non consente movimenti. Il giunto è rigido.</p>
	 <p style="text-align: center;">Sezione longitudinale      Prospetto      Sezione trasversale</p>	<p>Giunto colonna-trave realizzato tramite un sistema di collegamento con legatura quadrata multipla e spinotto orizzontale trasversale alla colonna passante per sei fori. Infine viene collocata una sezione di legno con funzione di appoggio per le travi.</p>	<p>Si considera un giunto sottoposto a sollecitazioni esterne di trazione (<math>F_2</math>), taglio (<math>F_1, F_5, F_6</math>), flessione (<math>F_3, F_4, F_7</math>) e compressione (<math>F_8</math>). Staticamente il giunto lavora a tutte le sollecitazioni cui è soggetto. Cinematicamente non consente movimenti. Il giunto è rigido.</p>

GEOMETRIA	SCHEMA DELLE FORZE AGENTI SUL NODO	DESCRIZIONE	COMPORTAMENTO MECCANICO
<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg); text-align: center;"> <b>GIUNTO DI 3 ELEMENTI NON PERPENDICOLARI E GIACENTI SULLO STESSO PIANO</b> </p>	 <p style="text-align: center;"> <span style="margin-right: 100px;">Prospetto</span> <span>Sezione longitudinale</span> </p>	<p>Giunto colonna-tiranti inclinati realizzato tramite un sistema di collegamento con legatura orizzontale passante per quattro fori realizzati nei tiranti e legatura diagonale passante attorno al pilastro. I tiranti si appoggiano su una sezione di legno collocata nella colonna.</p>	<p>Si considera un giunto sottoposto a sollecitazioni esterne di trazione (<math>F_2</math>), taglio (<math>F_3</math>) e di flessione (<math>F_1</math> e <math>F_4</math>). Staticamente il giunto lavora a tutte le sollecitazioni cui è soggetto.</p> <p>Cinematicamente non consente movimenti. Il giunto è rigido.</p>
	 <p style="text-align: center;"> <span style="margin-right: 100px;">Prospetto</span> <span>Sezione longitudinale</span> </p>	<p>Giunto colonna-trave-trave inclinata realizzato tramite un sistema di collegamento con legatura multipla passante per due fori realizzato sulla trave. La trave e il puntone sono legati assieme e collegati con legatura orizzontale alla colonna.</p>	<p>Si considera un giunto sottoposto a sollecitazioni esterne di trazione (<math>F_3, F_{10}</math>), taglio (<math>F_6, F_8</math>), flessione (<math>F_1, F_2, F_5, F_7, F_9</math>), e compressione (<math>F_4</math>). Staticamente il giunto lavora a tutte le sollecitazioni cui è soggetto.</p> <p>Cinematicamente non consente movimenti. Il giunto è rigido.</p>
	 <p style="text-align: center;"> <span style="margin-right: 100px;">Sezione trasversale</span> <span>Prospetto</span> </p> <p style="text-align: center;"> <span style="margin-right: 100px;">Sezione trasversale</span> <span>Sezione longitudinale</span> </p>	<p>Giunto colonna-trave-trave inclinata realizzato tramite un sistema di collegamento con legatura multipla passante per due fori realizzato sulla colonna. La trave e il puntone sono legati assieme e uniti alla colonna con legatura verticale. Questo giunto è adatto in situazione di luce massima di 4 metri.</p>	<p>Si considera un giunto sottoposto a sollecitazioni esterne di taglio (<math>F_3, F_7</math>) e di flessione (<math>F_1, F_2, F_5, F_4, F_6</math>). Staticamente il giunto lavora a tutte le sollecitazioni cui è soggetto.</p> <p>Cinematicamente non consente movimenti. Il giunto è rigido.</p>

GEOMETRIA	SCHEMA DELLE FORZE AGENTI SUL NODO	DESCRIZIONE	COMPORTAMENTO MECCANICO
<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg); text-align: center;"> <b>GIUNTO DI 3 ELEMENTI NON PERPENDICOLARI E GIACENTI SULLO STESSO PIANO</b> </p>		<p>Giunto colonna-trave-trave inclinata realizzato tramite un sistema di collegamento con legatura multipla, bullone verticale passante per tre fori e spinotto orizzontale passante per due fori. È un giunto che può sopportare luci inferiori a quattro metri.</p>	<p>Si considera un giunto sottoposto a sollecitazioni esterne di taglio (<math>F_3, F_7</math>) e di flessione (<math>F_1, F_2, F_5, F_4, F_6</math>). Staticamente il giunto lavora a tutte le sollecitazioni cui è soggetto. Cinematicamente non consente movimenti. Il giunto è rigido.</p>
		<p>Giunto trave-tiranti inclinati realizzato tramite un sistema di collegamento con legatura a intreccio passante per 4 fori realizzati nei tiranti.</p>	<p>Si considera un giunto sottoposto a sollecitazioni esterne di taglio (<math>F_3</math>), di trazione (<math>F_2</math>) e di flessione (<math>F_1, F_5, F_4</math>). Staticamente il giunto lavora a tutte le sollecitazioni cui è soggetto. Cinematicamente non consente movimenti. Il giunto è rigido.</p>
		<p>Giunto colonna-tiranti inclinati realizzato tramite un sistema di collegamento con legatura orizzontale passante per quattro fori realizzati nei tiranti. Come si nota dalla sezione, due fori sono realizzati sulla colonna e costituiscono un punto di incastro per il tirante. Consigliato solo per strutture leggere.</p>	<p>Si considera un giunto sottoposto a sollecitazioni esterne di trazione (<math>F_2</math>), di compressione (<math>F_1</math>) e di flessione (<math>F_3, F_4</math>). Staticamente il giunto lavora a tutte le sollecitazioni cui è soggetto. Cinematicamente non consente movimenti. Il giunto è rigido.</p>

GEOMETRIA	SCHEMA DELLE FORZE AGENTI SUL NODO	DESCRIZIONE	COMPORTAMENTO MECCANICO
<p style="text-align: center;">GIUNTO DI 3 ELEMENTI NON PERPENDICOLARI E NON GIACENTI SULLO STESSO PIANO</p>	 <p style="text-align: center;">Prospetto                      Sezione longitudinale</p>	<p>Giunto trave di colmo-travi inclinate realizzato tramite un sistema di collegamento con legatura orizzontale tra le due travi inclinate bloccata da intagli sulla canna, e legatura verticale tra le due travi inclinate e la trave di colmo. È necessario un pilastro principale per la trave.</p>	<p>Si considera un giunto sottoposto a sollecitazioni esterne di taglio (<math>F_3</math> e <math>F_2</math>) e di flessione (<math>F_1</math>). Staticamente il giunto lavora a tutte le sollecitazioni cui è soggetto. Cinematicamente non consente movimenti. Il giunto è rigido.</p>
	 <p style="text-align: center;">Sezione trasversale                      Prospetto</p> <p style="text-align: center;">Spinotto in bambù</p> <p style="text-align: center;">Sezione longitudinale</p>	<p>Giunto trave di colmo-travi inclinate realizzato tramite un sistema di collegamento con legatura tra l'elemento inclinato, la trave di colmo e lo spinotto in bambù passante per due fori realizzati sulla trave inclinata.</p>	<p>Si considera un giunto sottoposto a sollecitazioni esterne di taglio (<math>F_2</math>, <math>F_1</math>, <math>F_3</math>). Staticamente il giunto lavora a tutte le sollecitazioni cui è soggetto. Cinematicamente non consente movimenti. Il giunto è rigido.</p>

GEOMETRIA	SCHEMA DELLE FORZE AGENTI SUL NODO	DESCRIZIONE	COMPORTAMENTO MECCANICO
<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">GIUNTO DI 3 ELEMENTI NON PERPENDICOLARI E NON GIACENTI SULLO STESSO PIANO</p>		<p>Giunto colonna-trave-trave inclinata realizzato tramite un sistema di collegamento con legatura tra l'elemento inclinato, la trave di colmo e lo spinotto passante per due fori realizzati sulla trave inclinata. La trave si appoggia su una sezione di legno passante per la colonna.</p>	<p>Si considera un giunto sottoposto a sollecitazioni esterne di taglio (<math>F_4, F_1, F_5</math>) e di flessione (<math>F_2, F_3</math>). Staticamente il giunto lavora a tutte le sollecitazioni cui è soggetto. Cinematicamente non consente movimenti. Il giunto è rigido.</p>
		<p>Giunto travi-tirante inclinato realizzato tramite un sistema di collegamento con spinotto orizzontale passante per i tre elementi e legatura.</p>	<p>Si considera un giunto sottoposto a sollecitazioni esterne di taglio (<math>F_4, F_3</math>) e di flessione (<math>F_2, F_1</math>). Staticamente il giunto lavora a tutte le sollecitazioni cui è soggetto. Cinematicamente non consente movimenti. Il giunto è rigido.</p>

GEOMETRIA	SCHEMA DELLE FORZE AGENTI SUL NODO	DESCRIZIONE	COMPORTAMENTO MECCANICO
<p style="text-align: center;">GIUNTO DI 4 ELEMENTI NON PERPENDICOLARI E NON GIACENTI SULLO STESSO PIANO</p>	 <p style="text-align: center;">Sezione longitudinale      Prospetto</p>	<p>Giunto travi-tiranti realizzato tramite un sistema di collegamento con legatura tra i 4 elementi. Il giunto può essere risolto anche tramite spinotto passante per i quattro elementi.</p>	<p>Si considera un giunto sottoposto a sollecitazioni esterne di taglio (<math>F_3</math> e <math>F_2</math>) e di flessione (<math>F_1</math>, <math>F_4</math>, <math>F_5</math>, <math>F_6</math>). Staticamente il giunto lavora a tutte le sollecitazioni cui è soggetto. Cinematicamente non consente movimenti. Il giunto è rigido.</p>
	 <p style="text-align: center;">Prospetto      Sezione longitudinale</p>	<p>Giunto colonna-trave-travi inclinate realizzato tramite un sistema di collegamento con legatura che connette i tre elementi e un bullone orizzontale trasversale alle travi inclinate collocato all'interno della colonna.</p>	<p>Si considera un giunto sottoposto a sollecitazioni esterne di taglio (<math>F_1</math>), di trazione (<math>F_3</math>, <math>F_5</math>) e di flessione (<math>F_2</math>, <math>F_4</math>, <math>F_6</math>). Staticamente il giunto lavora a tutte le sollecitazioni cui è soggetto. Cinematicamente non consente movimenti. Il giunto è rigido.</p>
	 <p style="text-align: center;">Prospetto      Sezione longitudinale</p>	<p>Giunto trave di colmo-travi inclinate realizzato tramite un sistema di collegamento con spinotto orizzontale passante per otto fori e legatura tra gli elementi. Questo è un giunto adatto anche per carichi pesanti.</p>	<p>Si considera un giunto sottoposto a sollecitazioni esterne di taglio (<math>F_4</math>, <math>F_3</math> e <math>F_2</math>) e di flessione (<math>F_1</math>). Staticamente il giunto lavora a tutte le sollecitazioni cui è soggetto. Cinematicamente non consente movimenti. Il giunto è rigido.</p>

### 3.5 CASI STUDIO: BAMBOO ARK E UJUNG ALANG COMMUNITY CENTER

I progetti Bamboo Ark, realizzato in Giappone, e Ujung Alang Community Center, in Indonesia, sono opere nelle quali si sono adottate soluzioni in legatura per i giunti strutturali. Le informazioni a seguire derivano da documenti tecnici forniti dai progettisti quali Hirokazu Toki per quanto riguarda il primo progetto e Eko Prawoto per il secondo. Ulteriori dati sono stati riportati dal saggio della studentessa Cai Luyang “Lashing - a possible way to achieve sustainability”, grazie al lavoro di traduzione di quest’ultima. In entrambi i progetti sono stati eseguiti test sulle connessioni in corda e sulla resistenza dell’elemento.

#### 3.5.1 [Primo caso studio] Bamboo Ark

La struttura si trova nella città di Kesenuma, in Giappone, ed è stata progettata dall’architetto Hirokazu Toki che assieme a 70 studenti, e con il contributo di pescatori locali esperti di nodi, portò a compimento la costruzione nel mese di ottobre del 2011 a seguito del disastro ambientale provocato dallo tsunami. La struttura ha una superficie di 176 m<sup>2</sup> e una capienza per 100 persone. In essa si svolgono attività culturali e didattiche, e rappresenta un luogo di ritrovo per la comunità.

La struttura è stata costruita con bambù locale e le connessioni sono state realizzate tramite legature in corda e nastri.

Furono distribuiti radialmente 48 culmi di bambù, ognuno distanziato dall’altro con un angolo di 7,5 gradi in pianta. Il lato est è caratterizzato da un’apertura con vista verso il mare.



Figura 141. L’ingresso, in TAKUO NAGAI& HIROKAZU TOKI, Design and construction of emergency building made of bamboo material, 2011.

Figura 142. La grande apertura est, ibid.

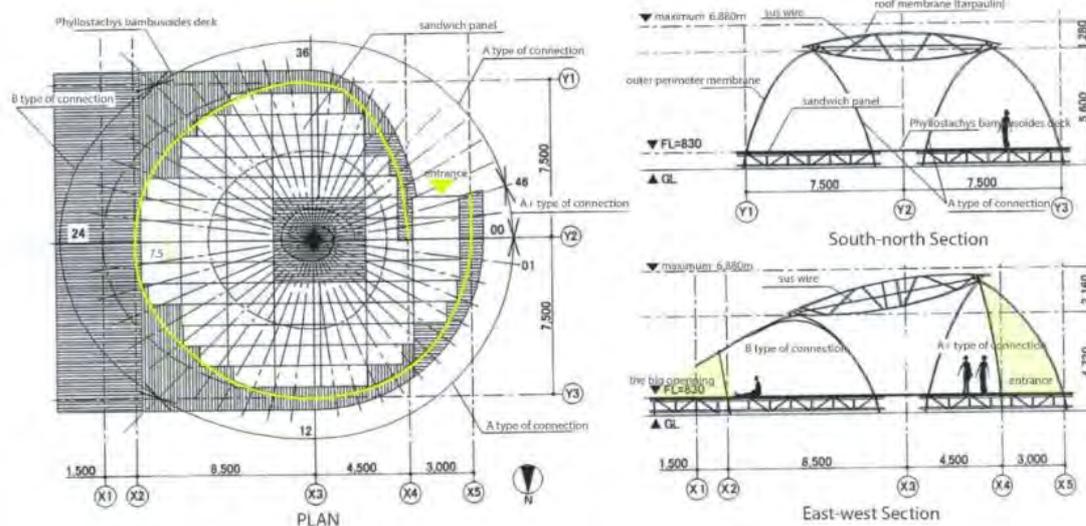


Figura 143. Pianta e sezioni, ibid.

Le specie di bambù impiegate nel progetto sono le seguenti:

- *Phyllostachys edulis*, molto comune in Cina e in Giappone. Può raggiungere 28 metri di altezza e la sua resistenza media a rottura è tre volte superiore di quella del cotone ( $3-7 \times 10^8$  N/m<sup>2</sup>). I culmi di *Phyllostachys edulis* sono stati impiegati ove richiesta maggiore incurvatura (archi).

- *Phyllostachys bambusoides*, utilizzata solitamente nell'artigianato, raggiungere un'altezza massima di 15-22 metri. La sua rettilineità semplifica il processo di costruzione.



Figura 144. A sinistra. *Phyllostachys edulis*, ibid.

Figura 145. In centro. *Phyllostachys bambusoides*, ibid.

Figura 146. A destra. Studenti che lavorano alla costruzione della struttura, in HIROKAZU TOKI, *Bamboo Ark*, WA, 2013.

La *Phyllostachys edulis* (Figura 147 linee blu) presenta un modesto spessore della parete e possiede ottime proprietà meccaniche. È stata utilizzata come elemento strutturale capace di lavorare a grandi momenti flettenti e sollecitazioni assiali. La *Phyllostachys bambusoides* (Figura 147 linee rosse) è stata usata come elemento secondario.

I tipi di connessione si dividono in tre categorie: A, A+, B.

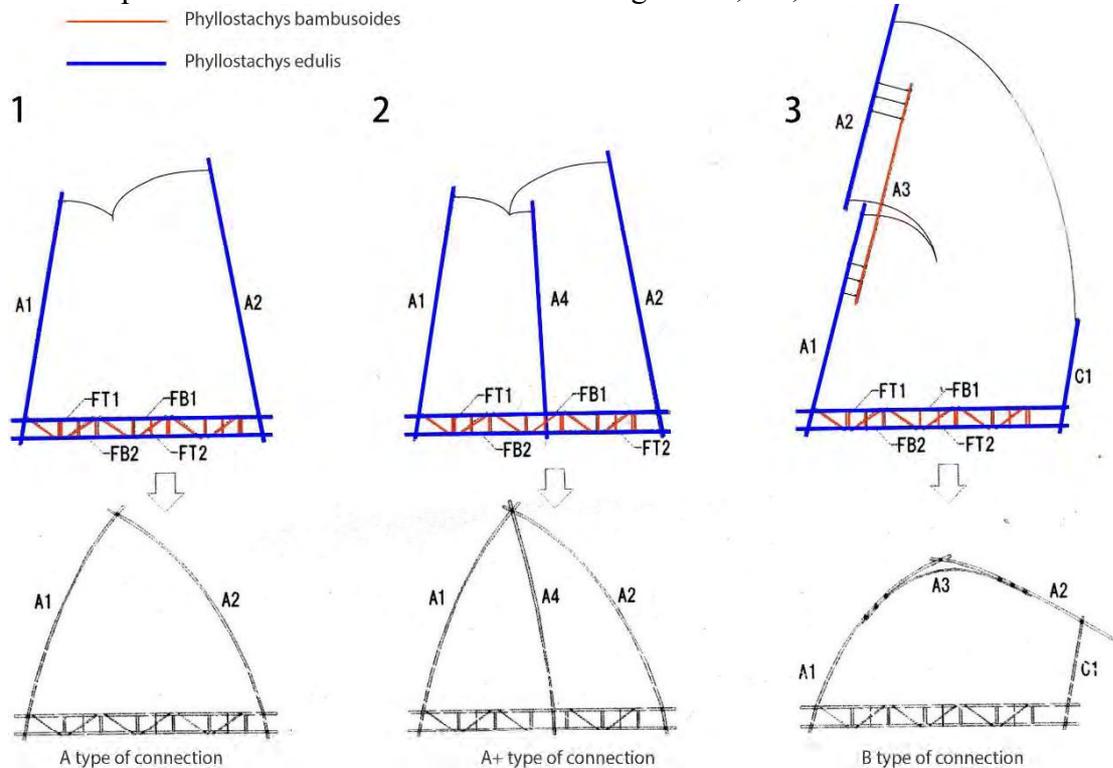


Figura 147. Tre tipi di connessione. I singoli elementi strutturali si dividono in: A1, A2, A4 (archi con diametro 6 cm); A3 (trave incurvata con diametro 4 cm); C1 (colonna con diametro 8 cm); FB1, FB2 (correnti superiori e inferiori della trave reticolare di fondazione con diametro 8 cm); FT1 (trave con diametro 5 cm); FT2 (trave con diametro 8 cm), in TAKUO NAGAI & HIROKAZU TOKI, op. cit.

## Test per ottenere l'incurvatura massima dell'arco

La *Phyllostachys edulis* presenta uno spessore della parete di circa 11% rispetto al suo diametro, mentre la *Phyllostachys bambusoides* circa il 7%. Nel test, il carico applicato è concentrato sulla punta del culmo. L'incurvatura è analizzata su un piano di coordinate  $x, y$ .

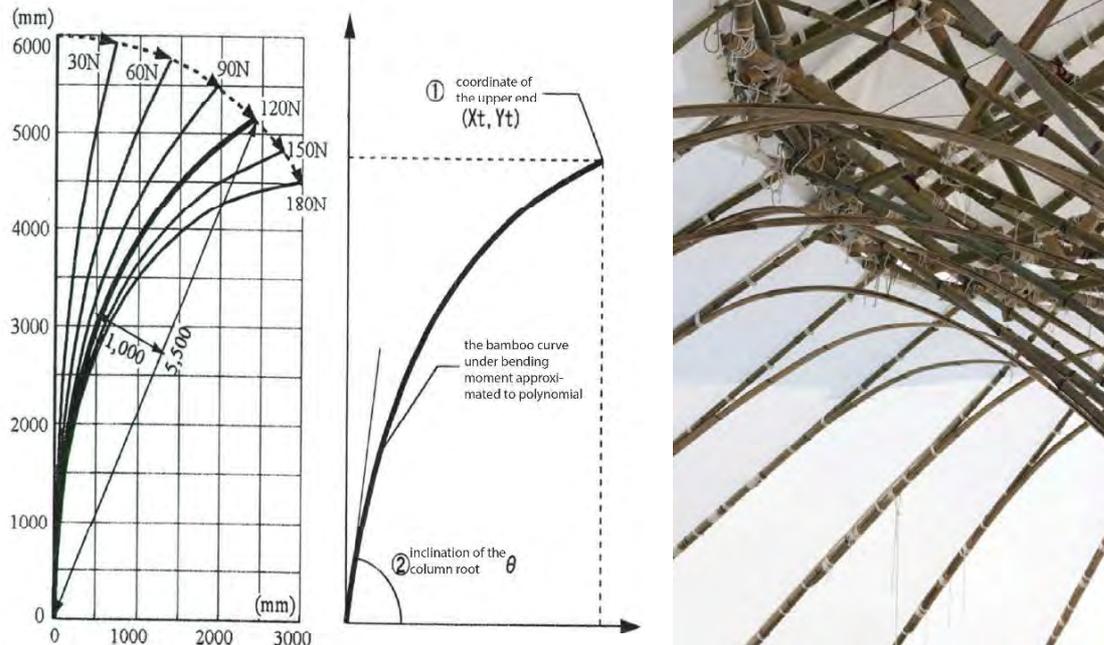


Figura 148. A sinistra. Analisi dell'incurvatura di un culmo di *Phyllostachys edulis* avente diametro massimo 60 mm e diametro minimo 30 mm; (la lunghezza totale è 6 m). Nel grafico a sinistra si riporta l'incurvatura sotto differenti carichi; nel grafico a destra si riporta l'angolo di inclinazione e le coordinate dell'estremità del culmo incurvato,  $x, y$ , ibid.

Figura 149. A destra. Incurvatura dei culmi di bambù e legature, <https://www.japlusu.com/news/ark-bamboo>, consultato il 12/06/2018.

Dato un carico di 180 N la canna si incurva per tre metri lungo l'asse  $x$ . Le coordinate  $x, y$  rappresentano il punto massimo di incurvatura e forniscono l'angolo di incurvatura alla base.

## Test di trazione e flessione sul culmo di bambù

Data l'assenza di norme per le costruzioni in bambù, furono eseguite prove di resistenza dei culmi di specie locale, aventi età superiore a tre anni, diametro tra i 50 mm e i 70 mm e spessore della parete da 4 a 8 mm, condotte dal professore Takuo Nagai assieme ai suoi studenti.

Per il test di flessione è stata adottata la macchina di prova universale (2000 kN).

Per il test di trazione è stata adottata la macchina di prova universale (1000 kN).

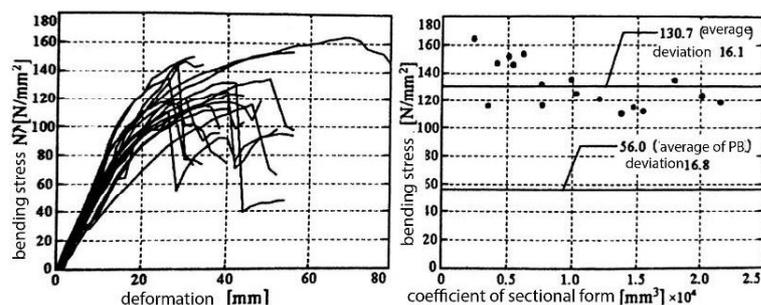


Figura 150. A sinistra. Grafico di deformazione della sollecitazione a flessione. (PB= *Phyllostachys bambusoides*).

Figura 151. A destra. Grafico della sollecitazione di flessione di un modulo di sezione.

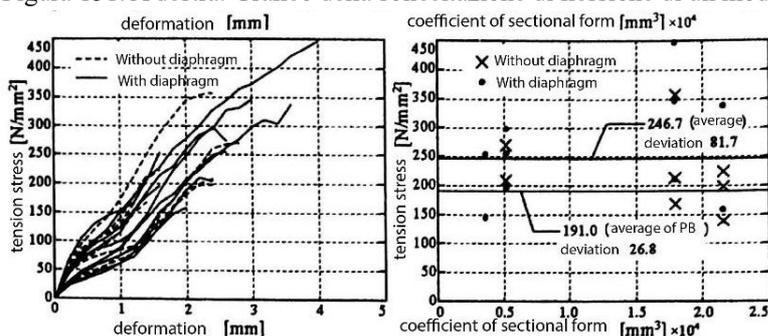


Figura 152. A sinistra. Grafico di deformazione della sollecitazione a trazione.

Figura 153. A destra. Grafico della sollecitazione di trazione di un modulo di sezione.

Group	Specimen	Diameter [mm]	Thickness [mm]	Bending stress [N/mm²]	Tension stress [N/mm²]					
					Without diaphragm			With diaphragm		
A	A-1	71.0	7.5	118.50	199.16	139.30	224.27	159.38	338.38	Fail
	A-2	63.9	6.6	112.10						
	A-3	58.4	6.2	120.80						
	A-4	49.9	5.4	131.90						
	A-5	45.0	4.7	145.90						
	A-6	37.7	4.5	115.90	Fail	Fail	Fail	145.63	254.67	Fail
B	B-1	68.6	7.6	123.10						
	B-2	62.5	6.6	114.90						
	B-3	54.7	5.8	135.20						
	B-4	46.3	5.2	153.50						
	B-5	41.0	4.4	147.00						
	B-6	33.6	3.8	164.40						
C	C-1	65.6	7.5	134.90	169.23	357.29	213.76	447.14	210.83	346.28
	C-2	60.7	6.6	110.30						
	C-3	55.3	5.9	125.30						
	C-4	49.2	5.8	116.40						
	C-5	42.8	5.1	151.80	209.62	272.90	Fail	256.52	297.83	198.00
Average				130.70	223.19			246.68		
Deviation				16.60				81.12		
COV [%]				12.70				32.88		

Figura 154. Risultati dei test di trazione e flessione della *Phyllostachys edulis*, in TAKUO NAGAI& HIROKAZU TOKI, op. cit.

I risultati del test di flessione dimostrano che:

1) I culmi di *Phyllostachys edulis* a sezione minore hanno una rigidità flessionale leggermente superiore. Si veda Figura 154 (A-5, B-6, C-5).

2) La rigidità a flessione della *Phyllostachys edulis* (130,7 N/mm<sup>2</sup>) è circa due volte quella della *Phyllostachys bambusoides* (56,0 N/mm<sup>2</sup>). Si veda Figura 153.

3) La rottura è solitamente dovuta a fessurazioni lungo l'asse longitudinale sul carico di 180 N circa. Si veda Figura 152.

4) La resistenza a flessione dei culmi è molto inferiore della resistenza a trazione. Si veda Figura 154.

I risultati del test di trazione dimostrano che:

1) Non esiste un punto di snervamento dei culmi di bambù. Si comportano in maniera fragile. Si veda Figura 152.

2) Non ci sono grosse differenze tra i culmi con diaframmi da quelli senza diaframmi. Si veda Figura 152.

3) I valori di sollecitazione a trazione sono più alti nella *Phyllostachys edulis* (246,7 N/mm<sup>2</sup>). Si veda Figura 153.

### Test sulle connessioni

Diversi metodi di legatura sono stati confrontati nei test di connessione eseguiti su culmi aventi età superiore a 3 anni, diametro tra i 50 mm ed i 70 mm e spessore della parete di 4-8 mm. È stata usata la macchina universale per i test (1000 kN).

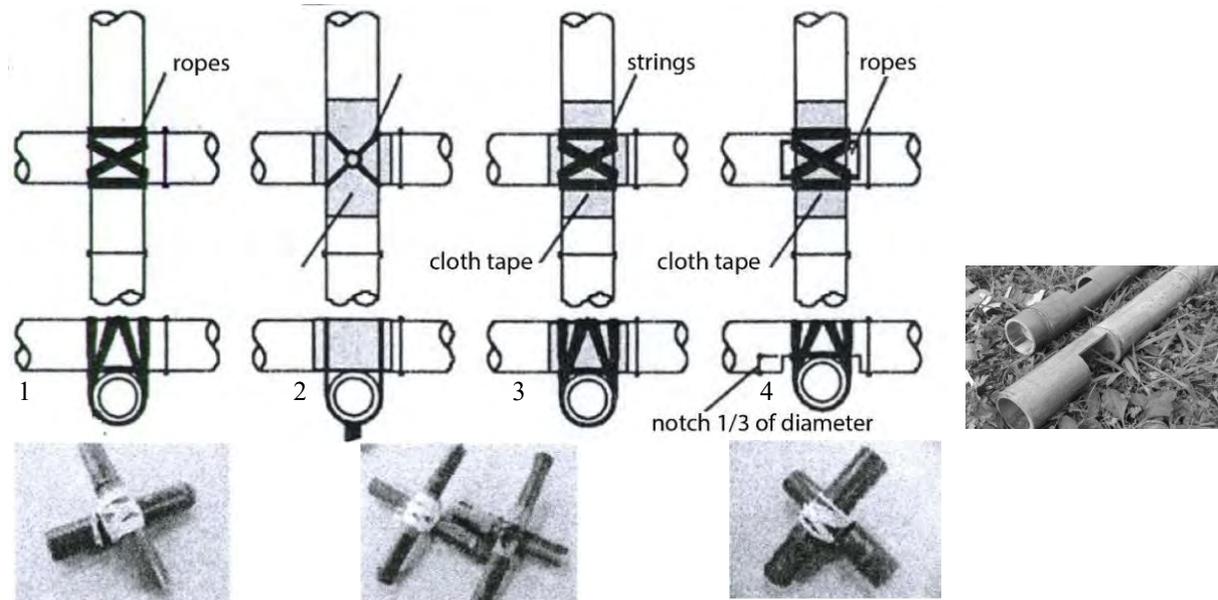


Figura 155. A sinistra. Tre sistemi di collegamento: 1) Connessione in corda. 2) Connessione in corda e nastro. 3) Connessione in corda combinata con nastro. 4) Connessione in corda e nastro con incastro, ibid.

Figura 156. A destra. Incastro, ibid.

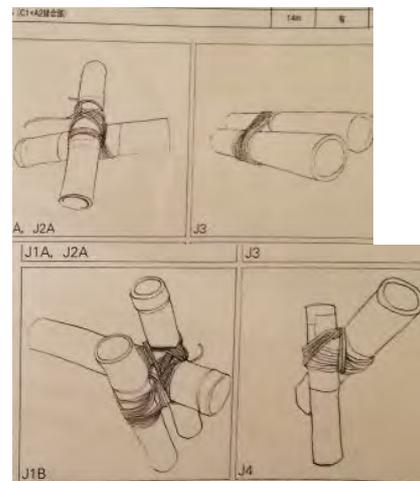
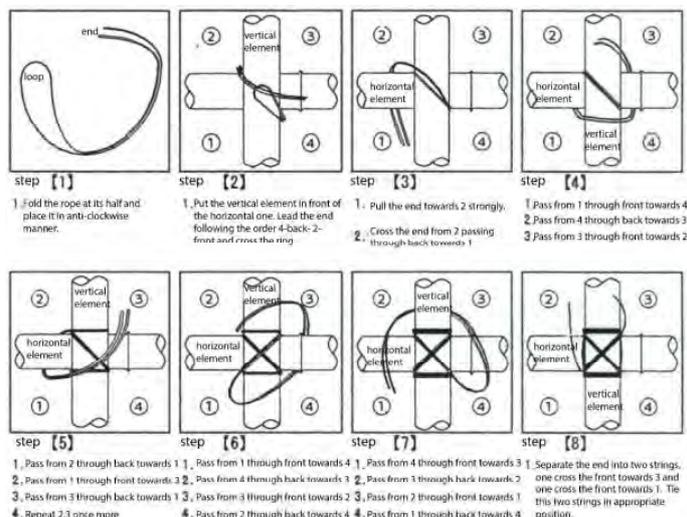


Figura 157. Passaggi per la realizzazione della legatura diagonale.

Figura 158. Legature utilizzate nel progetto: diagonale, bipiede e tripiede, in HIROKAZU TOKI, *Bamboo Ark*, WA, 2013.

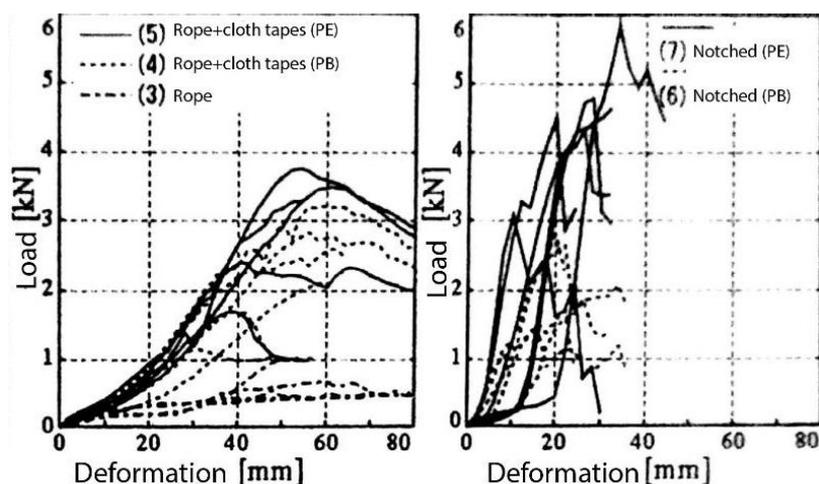


Figura 159. A sinistra. Grafico carico-deformazione del sistema di collegamento con corda e corda+nastro, ibid. Figura 160. A destra. Grafico carico-deformazione del sistema di collegamento incastro, ibid.

Methods of connection	Bamboo species	Average [kN]	Deviation [kN]
(1) Strings	<i>Phyllostachys bambusoides</i>	0.50	0.05 (10.0%)
(2) Strings+cloth tapes	<i>Phyllostachys bambusoides</i>	1.52	0.24 (15.8%)
(3) Rope	<i>Phyllostachys bambusoides</i>	0.69	0.21 (30.0%)
(4) Rope+cloth tapes	<i>Phyllostachys bambusoides</i>	2.31	0.75 (32.5%)
(5) Rope+cloth tapes	<i>Phyllostachys edulis</i>	2.97	0.77 (25.9%)
(6) Notched	<i>Phyllostachys bambusoides</i>	2.14	0.53 (24.8%)
(7) Notched	<i>Phyllostachys edulis</i>	4.56	0.89 (19.5%)

Tabella 13. Livelli medi di resistenza e scarto tipo dei diversi metodi di connessione, in TAKUO NAGAI & HIROKAZU TOKI, op. cit. Per average si intende il carico medio di rottura.

Secondo la Tabella 13 le legature 2 (strings+cloth tapes), 3 (rope) e 4 (rope+cloth tapes) presentano comportamenti a rottura diversi:

1) Connessione a corda (gruppo 1 in Figura 155 - gruppo 3 in Tabella 13): il punto di snervamento (0,69 kN) è molto più basso rispetto alle altre legature.

2) Connessioni con corde combinati con nastri (gruppo 2 in Figura 155 - gruppo 4-5 in Tabella 13): lo snervamento massimo è raggiunto quando avviene la rottura del nastro. Successivamente lo sforzo decresce gradualmente mentre aumentano le deformazioni. La resistenza è più alta per la *Phyllostachys edulis* (2,97 kN).

3) Connessioni a incastro (gruppo 4 in Figura 155 - gruppo 6-7 in Tabella 13): raggiunta la massima resistenza a rottura il culmo si rompe. La resistenza è superiore per la *Phyllostachys edulis* (4,56 kN), e presenta il carico di rottura più alto tra le legature presentate. Il comportamento ad attrito è migliore rispetto agli altri sistemi, ma data, la difficoltà nell'eseguire l'incastro, questo tipo di connessione è stata utilizzata solo nei giunti tra la base degli archi e la fondazione.

Infine, si è eseguito l'ultima prova avente lo scopo di valutare il numero ideale di giri di corda. Si è utilizzata la medesima corda per tutti i test, avente spessore 65 mm, e la stessa specie di bambù (*Phyllostachys bambusoides*).

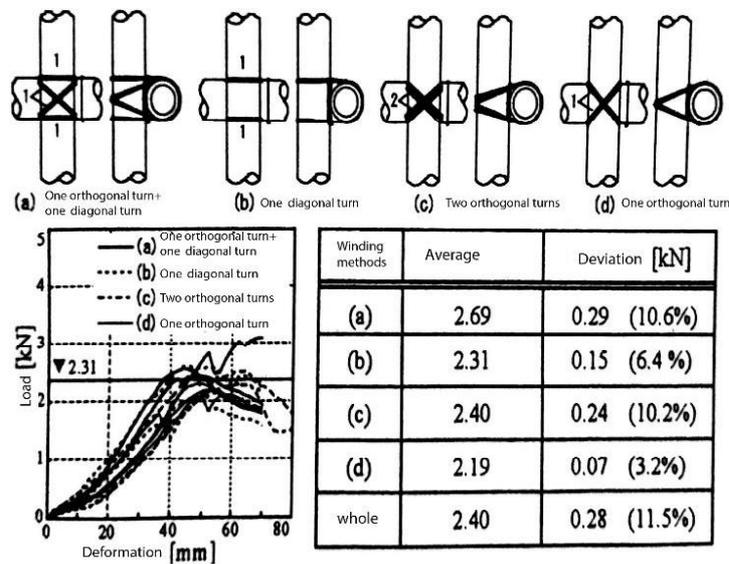


Figura 161. In alto. Tipologie di legature, in TAKUO NAGAI& HIROKAZU TOKI, op. cit.

Figura 162. In basso. Grafico carico-deformazione e tabella che indica la resistenza per le diverse tipologie di legature, ibid.

Dalla tabella in figura 162 si nota che il tipo di legatura che meno si deforma è la legatura diagonale-quadrata (tipo a). Nel grafico in figura 162 si nota che per carichi più bassi vi è maggiore deformazione, viceversa per carichi più elevati.

## Il risultato finale

Dal punto di vista economico il progetto si valuta estremamente sostenibile visto il suo basso costo dovuto alla disponibilità della risorsa locale e all'elemento di copertura donato da un'azienda locale.

La struttura viene utilizzata come luogo per attività culturali, mostre, eventi, e come spazio didattico della scuola "Terakoya". La frequenza del suo utilizzo è di circa due volte al mese ed è mantenuto dalla comunità locale. Secondo la normativa, la struttura sarebbe dovuta essere rimossa dopo 4 anni dalla data di realizzazione (2011-2015), ma visto il suo stato integro ne è stato permesso l'utilizzo fino a oggi.

Il progetto vinse nel 2012 il Japanese Grand Prize del Japan Architects Association (JIA).

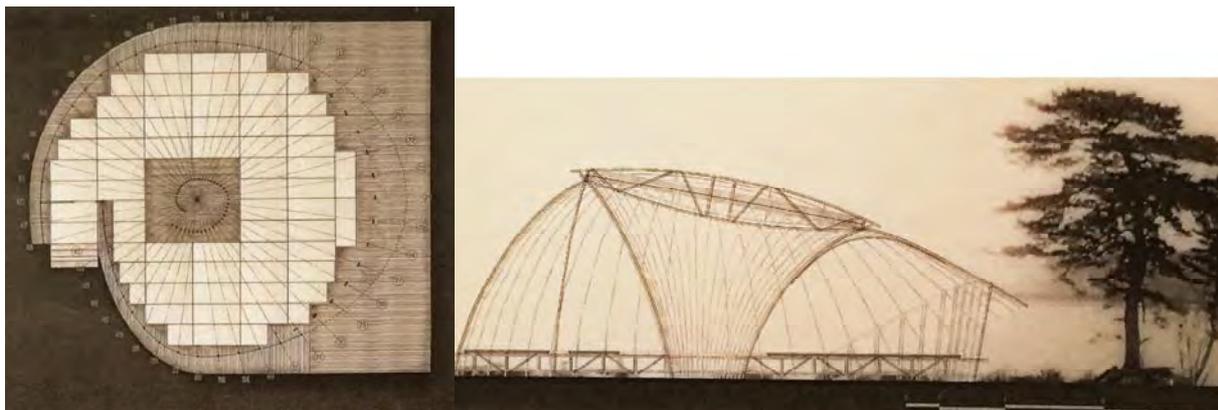


Figura 51. A sinistra. Pianta del Bamboo Ark, in HIROKAZU TOKI, *Bamboo Ark*, WA, 2013.

Figura 163. A destra. Sezione del Bamboo Ark, ibid.



Figura 53. A sinistra. Bamboo Ark, ibid.



Figura 164. A destra. Bamboo Ark: apertura lato est, <https://www.japlusu.com/news/ark-bamboo>, consultato il 12/06/2018.

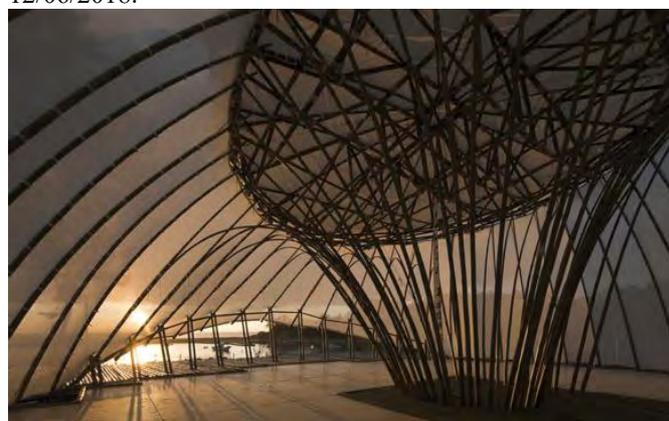


Figura 165. Bamboo Ark, <https://www.japlusu.com/news/ark-bamboo>, consultato il 12/06/2018.



Figura 166, 167. A sinistra, a destra. Eventi che si sono svolti nella struttura, <https://www.japlusu.com/news/ark-bamboo>, consultato il 12/06/2018.

### 3.6 [SECONDO CASO STUDIO] UJUNG ALANG COMMUNITY CENTER

La costruzione risale al 2005 ed è stata edificata presso il villaggio indonesiano di Kampung Laut, secondo un progetto dell'architetto Eko Prawoto. L'opera ha già compiuto 10 anni ed è tuttora in uso.

La specie di bambù locale adottata è chiamata Petung (*Dendrocalamus asper*), che cresce dai 15 ai 20 m in altezza e avere un diametro da 8 a 12 cm.

Il bambù viene impiegato come elementi colonna e trave i quali presentano connessioni realizzate tramite legature in corda ijuk.



Figura 168, 169. A sinistra, a destra. La struttura in bambù (e corda) per il Community Center, <https://archnet.org/sites/6453>, consultato il 12/06/2018.

Il centro comunitario comprende una costruzione in bambù intonacata, progettata da Andry Widyowijatnoko Mustakim, avente strisce di bambù intrecciate in un telaio e rivestite con intanaco, cemento e sabbia. Mentre sotto la struttura aperta si svolgono le attività didattiche (corsi sull'agricoltura), commerciali (vendita di prodotti alimentari), spazi di incontro per la comunità.

La manutenzione è curata da responsabili locali e richiede la supervisione e sostituzione delle corde. Anche i residenti grazie alla conoscenza delle tecniche locali e delle legature sono abilitati a curare la struttura.



Figura 170. Il complesso del centro comunitario, ibid.

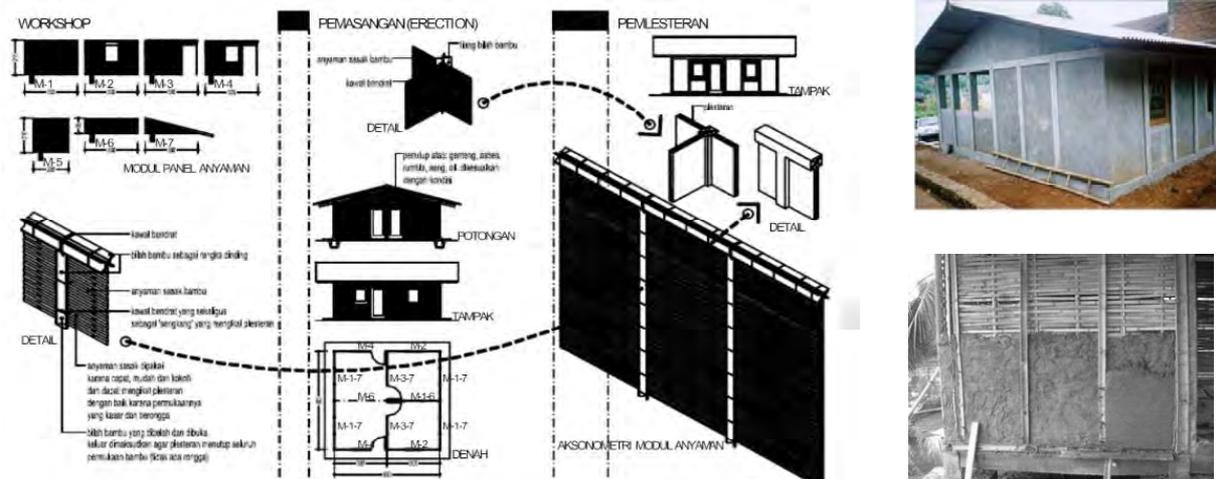


Figura 171. Progetto dell'edificio accanto alla copertura, ibid.

### Il progetto delle legature

Il sistema di connessione tra canne di bambù adottato si basa su un metodo di legature conosciuto e praticato dai costruttori locali con giri di corda quadrati e diagonali.



Figura 172. Tipologie di legature impiegate evidenziate per colore: in viola la legatura obliqua; in blu la legatura treppiede; in giallo la legatura diagonale; in rosso la legatura bipiede, in OSCAR HIDALGO LOPEZ, Bamboo: The gift of the Gods, Bogota, 2003.

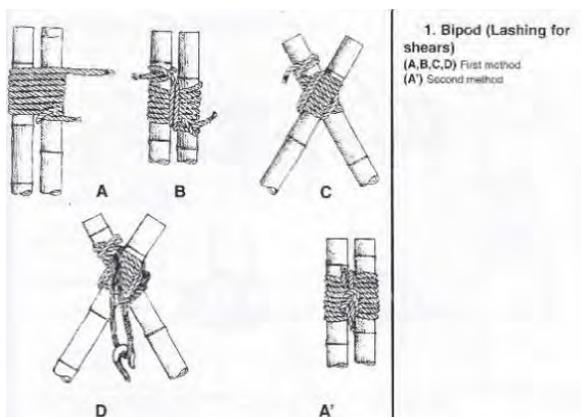


Figura 173. Legatura bipiede, ibid.

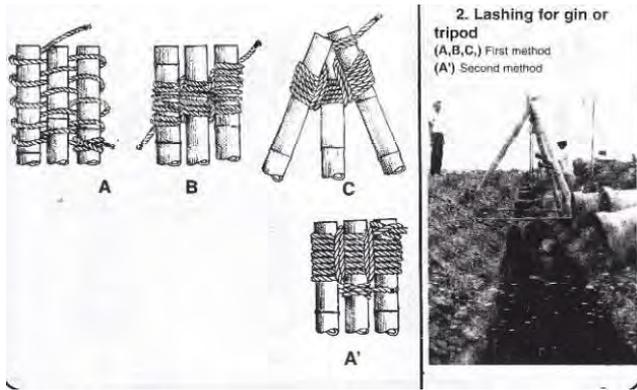


Figura 174. Legatura treppiede, ibid.

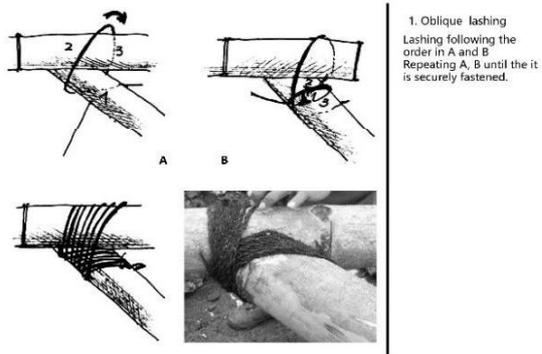


Figura 175. Legatura obliqua, ibid.

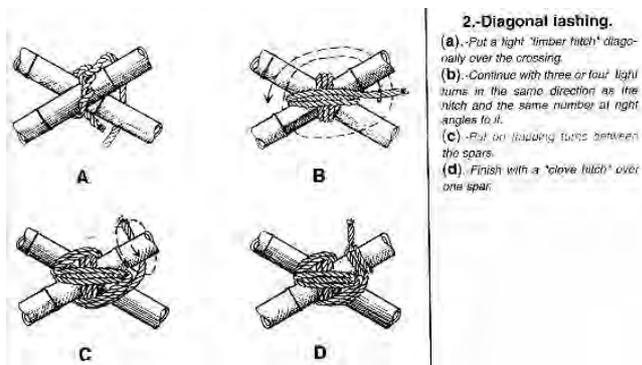


Figura 176. Legatura diagonale, ibid.

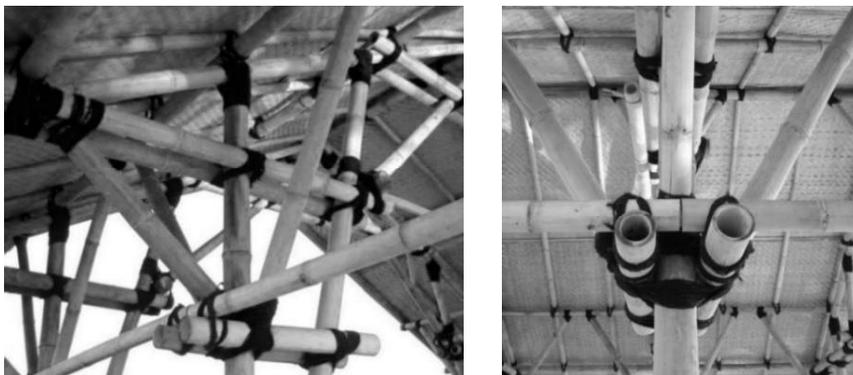


Figura 177. Dettagli di progetto, ibid.

Le connessioni sono state realizzate tramite la corda in *Ijuk* con l'ausilio di spinotti in bambù aventi diametro di 1 cm e lunghezza di 20-30 cm (a seconda della dimensione del giunto), e con funzione di connettori (similmente a bulloni). La *Ijuk* è composta da fibre di palma da zucchero, presenta un coefficiente di attrito superiore alla corda in nylon ( $\mu_s = \text{ijuk } 0,68-0,71$ ;  $\mu_s = \text{nylon } 0,15-0,25$ ) e si comporta come un repellente naturale.

Le legature impiegate sono di semplice esecuzione, rispondono bene ai movimenti della costruzione e non provocano la scissione delle fibre del bambù come può avvenire in caso di inserimento di viti.



Figura 178. Dettaglio di una connessione realizzata con spinotti in bambù, in CAI LUYANG, op. cit.

## Eko Prawoto

Eko Prawoto risiede a Jogjakarta, in Indonesia, ed è un esponente della nuova generazione di architetti che vivono nei paesi in via di sviluppo e che lottano quotidianamente per migliorare le condizioni di vita delle persone meno abbienti.

L'approccio all'architettura di Prawoto è influenzato dalla cultura tradizionale Javanese in cui è cresciuto. A differenza delle grandi opere in bambù come quelle degli architetti Simon Vélez e Marcelo Villegas, gli edifici di Prawoto sono di scala più piccola e adatti per l'autocostruzione grazie alla loro semplicità di realizzazione. Il pensiero dell'architetto è costantemente mirato a progettare sulla collettività e insieme a essa ragionare, sviluppare e operare. Il suo metodo di progettazione si basa sui seguenti punti:

- 1-L'architettura non è un'entità autonoma, essa dovrebbe essere integrata con il suo contesto: sociale, culturale ed ambientale.
- 2-L'architettura deve rafforzare lo spirito dell'unione.
- 3-L'architettura deve apprezzare le varie espressioni culturali che trasmettono i valori trascendentali.
- 4-L'architettura dovrebbe usare i materiali e le competenze e tecniche locali.
- 5-Rispettare gli alberi come risorsa importante per la vita.
- 6-Adattarsi al clima locale con saggezza e creatività.
- 7-Usare componenti o materiali riciclati.
- 8-Usare materiale di scarto.
- 9-Usare il materiale in modo efficiente.
- 10-Creare lavoro e usare meno materiale industriale.
- 11-Creare spazi multifunzionali e adattivi.
- 12-Utilizzare un design aperto-chiuso
- 13-Guardare al bambù come il legno del futuro.

### 3.6 CONCLUSIONI

I casi studio riportati dimostrano la fattibilità di un sistema costruttivo sicuro che adotta connessioni in corda realizzate tramite legature appropriate di semplice (ma non banale) esecuzione. In entrambi i casi citati si è utilizzato materiale localmente disponibile e si è vista l'importanza della conoscenza delle tecniche tradizionali di legatura note a pescatori e costruttori della regione. Rappresentano costruzioni a misura d'uomo, realizzate in breve tempo e a costi molto bassi, garantendo sostenibilità economica e ambientale al progetto. Soddisfano in maniera ottimale le funzioni che si svolgono all'interno di esse permettendo alla comunità di riprendere le proprie attività in breve tempo dopo una calamità naturale.

Sebbene il bambù sia un elemento circolare cavo che comporta difficoltà costruttive, dovute principalmente alla forma (Par. 3.3), le legature non sono difficili da eseguire ma devono essere realizzate a regola d'arte: è essenziale un'ottima conoscenza delle stesse e capacità manuali. Si è visto che è preferibile non eseguire fori sulla canna di bambù a causa della direzione delle fibre, per non diminuire la sua resistenza meccanica e soprattutto per non compromettere la sua integrità fisica. Nonostante ciò, è possibile ovviare al fenomeno della splittatura del culmo rinforzandolo con fasce a ridosso dei nodi e realizzando fori solo in prossimità dei nodi. Per garantire una maggiore durabilità della legatura le corde sintetiche risultano essere più vantaggiose anche se non rappresentano una scelta ottimale dal punto di vista ambientale.

Sarebbe utile avere una normativa che ha come oggetto i giunti in corda. Essa dovrebbe considerare i seguenti punti:

- Specie di bambù ideale da impiegare come elemento strutturale sul quale sono stati condotti test di resistenza meccanica.
- Materiale della corda, sottoposta anch'essa a test di resistenza meccanica.
- Sistema di collegamento, tecniche e numero di avvolgimenti della corda.

Secondo questi punti si potrebbe iniziare a standardizzare un giunto in corda che garantisca sicurezza quando sollecitato e che sia confrontabile a un giunto in acciaio.

La manutenzione di strutture con giunti in corda necessita costanza ma può essere gestita localmente da persone formate sui vari tipi di legature.

4

## IL METODO CANYAVIVA

## 4.1 CANYAVIVA

CanyaViva nasce intorno al 2005, quando l'architetto inglese Jonathan Cory Wright, osservando il comportamento naturale delle canne di *Arundo donax* che crescevano sugli argini del rio Aguas (presso la località di Los Molinos del Rio Aguas, Almería, Andalusia), iniziò a elaborare il metodo costruttivo, oggi denominato "Metodo CanyaViva", in cui le note proprietà dell'*Arundo donax* e del Bambù, quali flessibilità e resistenza, vengono ottimizzate nella costruzione di archi connessi con corda. L'architetto compose un arco con due canne speculari e concretizzò il suo primo progetto che consistette nella costruzione di un ponte.

Nel 2009 si è costituito il primo nucleo dell'Associazione CanyaViva. Negli anni il gruppo ha portato avanti la sperimentazione tecnica e la ricerca artistica, promuovendo corsi di formazione sul modello costruttivo.

La collaborazione con la Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica y Ingeniería de la Edificación della Universitat Politècnica de Catalunya permise di ottenere una standardizzazione del metodo che codifica la scelta delle piante, la loro classificazione e criteri di costruzione che garantiscano la capacità strutturale all'intera opera. Il sistema è registrato con licenza Copyleft al fine di promuoverne la diffusione e la rielaborazione. La linea di ricerca è tuttora aperta presso la UPC.

Il metodo si basa principalmente sull'uso della canna mediterranea come materiale da costruzione; i vantaggi sono legati alle grandi capacità riproduttiva e di adattabilità della pianta, abbondante e rinnovabile con cicli molto brevi, e alla libertà espressiva dovuta alle sue proprietà meccaniche che consentono di creare strutture caratterizzate da forme organiche<sup>91</sup> come quelle del Padiglione The Botijo (si veda Figura 180).

L'ambito di attività include diverse aree, dall'architettura alla permacultura e alla ricerca artistica, terapeutica e culturale. Attraverso corsi di formazione e progetti sociali si sta impegnando per la diffusione di capacità tecniche e competenze specifiche, offrendo gli strumenti necessari per mettere in pratica piccoli progetti personali utilizzando le risorse locali, con un costo minimo e senza impiego di combustibili, incentivando l'autocostruzione<sup>92</sup>.

Gli aspetti della sostenibilità nei progetti di CanyaViva sono:

- Utilizzo di risorse locali (*Arundo donax* e bambù).
- Recupero degli scarti (la massa di materiale che avanza dal processo costruttivo viene impiegata per le coperture o come combustibile).
- Approccio collaborativo e comunitario che promuove una sostenibilità culturale capace di creare coesione sociale e di offrire un senso di benessere in cui l'uomo è in armonia con la natura attraverso l'utilizzo delle sue risorse.

### Generalità sull'*Arundo donax*

La canna mediterranea (*Arundo donax*) è una specie invasiva la cui altezza può variare da 4 a 8 metri. Possiede un culmo con diametro massimo di 4 cm mentre lo spessore della sua parete è di circa 5 mm. Similmente al bambù, il culmo di questa pianta è suddiviso in internodi, aventi lunghezza tra i 12 e i 30 cm. È una pianta molto produttiva, con un'incredibile rapidità di

<sup>91</sup> <http://www.farecose.it/site/le-cose-che-succedono?id=1>, 2016, consultato il 03/04/2018.

<sup>92</sup> "Architettura organica: l'uso costruttivo dell'*Arundo donax* secondo CanyaViva", <http://www.architetto.info/news/green-building/architettura-organica-luso-costruttivo-dellarundo-donax-secondo-canyaviva/?print=pdf>, 2015, consultato il 03/04/2018.

crescita (dai 5 ai 10 cm al giorno), perciò occorre averla costantemente sotto controllo<sup>93</sup>.

L'uso dell' *Arundo donax* come materiale da costruzione, in Europa, può risalire alle prime manifestazioni di architettura, sia con funzione portante per la realizzazione di capanne (generalmente formate da canne legate insieme con corde), sia con funzione di copertura per strutture in pietra o legno, fino a i giorni nostri<sup>94</sup>. L'uso dell' *Arundo donax* come materiale da costruzione in Europa è stato studiato in dettaglio da Teresa García Ortuño (2003).

La pianta offre vantaggi non sono in edilizia grazie alla sua elasticità, leggerezza e resistenza, ma è considerata una delle migliori specie per la produzione di biomassa lignocellulosica ad uso energetico nei paesi del Mediterraneo. La biomassa prodotta dalla canna comune, oltre che alla produzione di carta, può essere destinata alla conversione termo-elettrica, per combustione, e/o alla produzione di bioetanolo. La specie si contraddistingue anche per le sue capacità di accumulo del Carbonio nel suolo e per la capacità di proteggere le falde dalla lisciviazione dei nitrati e di inquinanti<sup>95</sup>.

Coltura	C nel terreno (t ha <sup>-1</sup> )	Incremento annuo di C (t ha <sup>-1</sup> )	Stoccaggio annuo di CO <sub>2</sub> (t ha <sup>-1</sup> )
canna comune	37.7 a	1.70	6.23
miscanto	34.0 ab	1.18	4.32
robinia	33.9 ab	1.15	4.23
pioppo	37.7 a	1.70	6.23
salice	39.4 a	1.94	7.12
prato stabile	31.7 ab	0.84	3.07
colture annuali	25.8 b	0.00	0.00

Figura 179. *Contenuti di carbonio organico accumulati nello strato 0-20 cm del terreno, rilevati 7 anni dopo l'avvio delle coltivazioni*, <http://www.gruppo-panacea.it/biomasse/images/03coltureerbacepoliennali.pdf>, p. 643, consultato il 07/06/2018.

Come si è detto nel capitolo II, la costruzione in *Arundo donax* non è una novità. Già nell'età sumera, l'attività architettonica dei Ma'dan, abitanti delle paludi mesopotamiche, nell'odierno Iraq, consisteva nell'utilizzo del sistema costruttivo a fasci di canne (fino a 50 cm di spessore). Non si realizzavano soltanto semplici abitazioni, ma anche palazzi e ambienti sacri. Questi edifici prendono il nome di "mudhif"<sup>96</sup>.

## 4.2 LE OPERE DI CanyaViva

Le prime strutture costruite da CanyaViva risalgono al 2004. Sono state realizzate pensiline e sistemi di ombreggiamento per festival ed eventi come il Boom festival in Portogallo e l'Expo di Saragozza, spazi multifunzionali temporanei e permanenti all'interno dei quali hanno avuto luogo concerti, incontri, corsi, performance ed esposizioni.

Tra le strutture permanenti costruite negli ultimi anni, Casa de Laila, realizzata nei pressi di Malaga nel 2013, è certamente l'esempio più significativo. L'intera struttura, di circa 100 m<sup>2</sup>, è realizzata in fasci di canna<sup>97</sup>; il rivestimento è composto da terra cruda, calce-canapa e malta preparata con calce spenta mescolata a polvere di marmo (malta marmorino).

<sup>93</sup> TERESA GARCÍA ORTUÑO, *Caracterización de la caña común (Arundo donax L.) para su uso como material de construcción*, Tesi di dottorato in Ingegneria, rel. J. Pastor Pérez, Universidad Miguel Hernández, Orihuela, 2003.

<sup>94</sup> "Architettura organica", cit.

<sup>95</sup> "Colture erbacee", <http://www.gruppo-panacea.it/biomasse/images/03coltureerbacepoliennali.pdf>, consultato il 07/06/2018.

<sup>96</sup> <http://www.lan-architetture.org/materiali/arundo-donax-2/>

<sup>97</sup> "Architettura organica", cit.



Figura 180. CANYAVIVA, Padiglione “El Botijo” all’Expo Zaragoza, 2008. Struttura in canna e copertura in tela di iuta, <http://canyaviva.com/proyectos-efimeras.html>, consultato il 10/04/2018.



Figura 181. CANYAVIVA, Struttura in canna per il palco del Boom Festival a Idanha Nova, 2008, <http://canyaviva.com/proyectos-efimeras.html>, consultato il 10/04/2018.



Figura 182. CANYA VIVA, Casa de Laila: spazio aperto multifunzionale realizzato a Málaga, 2013. Struttura in canna e finiture in terra cruda, calce-canapa, malta marmorino, <http://canyaviva.com/proyectos-permanentes.html>, consultato il 10/04/2018.



Figura 183. CANYA VIVA, Mirador Sagunto: spazio multiuso per il Parco naturale del Delta, València, 2011. Struttura in canna e finiture in adobe, fibra di canapa, calce e aggregati, <http://canyaviva.com/proyectos-permanentes.html>, consultato il 10/04/2018.



Figura 184. CANYA VIVA, Domo Burriana, Castellón de la Plana, 2009. Struttura in canna, paglia come materiale isolante, e membrana impermeabilizzante. Rivestimento esterno in sughero naturale. Rivestimento interno con intonaco, <http://canyaviva.com/proyectos-domos.html>, consultato il 10/04/2018.



Figura 185. CANYA VIVA, Domo NBDA, Dimapur, India, 2011, <http://canyaviva.com/proyectos-domos.html>, consultato il 10/04/2018.

### 4.3 COSTRUZIONE DI UNA STRUTTURA TEMPORANEA IN BAMBÙ DESTINATA AD ATTIVITÀ CULTURALE: IL PROCESSO COSTRUTTIVO

Il lavoro di ricerca sul metodo CanyaViva prevede una descrizione del processo costruttivo degli archi realizzati durante un workshop tenuto al Parco di Settefrati sul monte Peglia a Orvieto nel luglio 2017, in cui i partecipanti hanno costruito due archi in bambù. Il lavoro è stato svolto in cinque gruppi, ognuno dei quali ha lavorato sulla costruzione di un fascio di canne. Ciascun gruppo era composto da tre partecipanti. Il workshop si è svolto nell'arco di tre giornate e gli archi in bambù costruiti durante il workshop avevano la funzione di copertura per il festival di musica che si è tenuto nel mese di agosto.

Si elencano di seguito i punti principali del processo costruttivo di CanyaViva per la realizzazione della struttura ad archi per il festival. Ciascun punto verrà approfondito nei successivi paragrafi. I passi chiave del metodo sono:

- 1) Raccolta, stagionatura e trasporto
- 2) Pulizia
- 3) Classificazione
- 4) Costruzione dei fasci
- 5) Connessione dei fasci e incurvatura dell'arco
- 6) Accorgimenti per le fondazioni e per la durabilità delle canne
- 7) Messa in opera dell'arco
- 8) Copertura

#### 4.3.1 RACCOLTA, STAGIONATURA E TRASPORTO

La specie di bambù utilizzata per la struttura è la *Phyllostachys viridiglaucescens*, proveniente da un bosco di bambù che dista circa 5 km dal sito di costruzione. Questa specie presenta canne con andamento rettilineo, diametro medio di cinque cm per una lunghezza di 10-12 metri. Lo spessore delle pareti è di circa 8 mm.

La raccolta dei culmi di bambù è avvenuta tra gennaio e febbraio, nei giorni di luna calante e clima secco, in quanto l'attività della pianta è ridotta: la linfa si trova alle radici e i culmi contengono meno zuccheri (bassa vulnerabilità all'attacco da parte degli insetti). I culmi scelti, di età compresa tra i 3 e i 6 anni, sono stati tagliati con una sega, al di sopra il primo nodo per evitare che si depositasse l'acqua piovana e che facesse marcire il rizoma.



Figura 186, 187 A sinistra, in centro. Bosco di bambù della specie *Phyllostachys viridiglaucescens*.  
Figura 188. A destra. Raccolta di *Arundo donax* (utilizzato nella costruzione del palco).

Le canne di bambù sono state raccolte manualmente, legate in fasci secondo i diametri dei culmi, tramite nodi provvisori, e trasportate per mezzo di un autoveicolo dal bosco di bambù al cantiere.

Successivamente, le canne sono state conservate in luogo ombroso, ventilato e asciutto, e stoccate in posizione orizzontale su una piattaforma. Sono state essiccate naturalmente per 10 settimane circa, senza subire alcun trattamento di conservazione né fisico né chimico.



Figura 189. Veicolo utilizzato per il trasporto sia delle canne di bambù che delle canne di *Arundo donax*.

#### 4.3.2 PULIZIA

Prima di procedere alla pulizia, vengono scelte le canne che hanno un diametro massimo di 10 mm alla punta, dopodiché su di queste viene eseguita una prova di flessibilità a partire dal punto in cui il culmo misura 20 mm di diametro flettendo la canna: le canne che non si flettono o che si spezzano vanno scartate.

Superata questa prova, si procede al taglio dei rami con una sega giapponese, e allo smussamento dei nodi tramite una lima al fine di rendere continua la superficie della canna.



Figura 190. Canne di bambù pronte per la pulizia, appartenenti alla specie *Phyllostachys viridiglaucens* e provenienti da un bosco di bambù distante circa 5 km dal sito di costruzione.



Figura 191. Taglio dei rami con seghetto giapponese



Figura 192. Limatura dei nodi

### 4.3.3 CLASSIFICAZIONE

La classificazione consiste nel separare le canne secondo la loro lunghezza e torsione naturale (oraria o antioraria), tramite un classificatore (si veda Figura 198) composto da paletti di bambù posizionati alle seguenti distanze: 0 m (punta della canna o punto finale); 2,80 m (punto V); 3 m; 4 m; 5 m; 6 m; 7 m; 8 m; 9 m.

La canna viene posizionata a lato dei paletti e si verificano i seguenti parametri:

1 - Si trova la V: cioè il punto in cui il diametro della canna misura 20 mm. Questo è il punto in cui il fascio, una volta completato, verrà diramato in due gruppi di canne per essere connesso ad un altro fascio, componendo l'arco. Questo punto è stato individuato come ideale al fine di evitare che la canna si spezzi a seguito dell'incurvatura. Si veda Figura 193.

2 - Si posiziona la canna nel classificatore affiancando il punto V al paletto dei 2,80 m con la punta rivolta verso il paletto dei 0 m verificando che in quel punto il diametro della canna non superi i 10 mm. È permesso che la lunghezza della canna ecceda di 20 cm rispetto al punto finale. Se la canna eccede i 3 m dal punto V viene tagliata. Si veda Figura 194.



Figura 193. A sinistra. Per trovare il punto V si è utilizzata una piccola sezione di canna (calibro) avente 2 cm di diametro, contrassegnata da un adesivo rosso.

Figura 194. A destra. Si notano due paletti fissati verticalmente: quello a sinistra segna il punto V ( $d \leq 20$  mm); quello a destra segna il punto finale ( $d \leq 10$  mm). Nel riquadro in basso a destra si riporta un ingrandimento del punto finale.

A questo punto, verificati questi parametri, occorre definire la lunghezza della canna. Solitamente le canne tendono ad essere leggermente curve in prossimità della base. Perciò, per definirne l'altezza, si taglia la canna sotto il nodo appartenente all'ultimo internodo più rettilineo, a una distanza da tale nodo pari al diametro della canna. Si veda Figura 195.

Di seguito, tenendo fermo il punto V, si osserva su quale picchetto è stata tagliata la base della canna e si trova la sua lunghezza. Infine, tenendo la canna con una mano e lasciandole toccare il terreno si osserva la sua torsione naturale. Si veda Figura 197.



Figura 195. Taglio della canna sotto il nodo appartenente all'internodo più rettilineo e più vicino alla base.

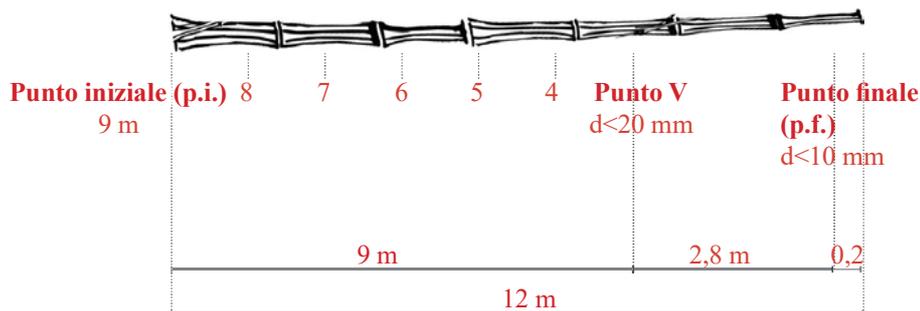


Figura 196. Lo schema raffigura una canna classificata con una lunghezza di 12 metri. Si notino i punti principali (p.i.; V; p.f.) segnati tramite i paletti del classificatore.



Figura 197. Osservazione della torsione della canna. La canna riportata in foto ha una torsione oraria. Per capire il senso della torsione occorre osservare il tratto che va dalla base della canna fino a circa 3/4 della sua lunghezza



Figura 198. Classificatore: spazio rettangolare con paletti di bambù posizionati sul lato lungo segnano la lunghezza e i punti principali del culmo; quelli sul lato corto determinano lo spazio in cui raggruppare le canne aventi stessa lunghezza e torsione.



Figura 199. Paletti del classificatore posizionati sul lato corto che indicano la lunghezza della canna (5 m) e il senso di torsione (orario; antiorario).

La canna di bambù è caratterizzata da una torsione che può essere di senso orario antiorario: nel momento della connessione dei fasci, per la costruzione dell'arco, le forze di rotazione vengono rese nulle connettendo il fascio costituito da canne con torsione di senso orario con il fascio costituito da canne con torsione di senso antiorario.

Si ricorda che il bambù ha una forma conica e che il fascio finito deve avere un diametro costante. Dunque, durante la costruzione di un fascio, tutte le canne che compongono il suo nucleo centrale (il "modulo" si veda 4.3.4) devono avere la stessa lunghezza al fine di ottenere, nel momento dell'unione dei fasci, degli archi proporzionali a essa. Per costruire gli archi vengono utilizzati fasci composti da un numero di canne inversamente proporzionale alla lunghezza dell'arco, aventi un diametro crescente al diminuire del numero di canne utilizzate. Il metodo CanyaViva prevede che gli archi di una struttura abbiano un diametro costante lungo l'intera loro lunghezza. (Le canne di *Arundo donax* mostrano una più chiara proporzione tra diametro e lunghezza rispetto al bambù).

### 4.3.4 COSTRUZIONE DEI FASCI

#### I fase: composizione del nucleo centrale

Il fascio è composto da: un nucleo centrale radiale costituito da 7 canne della stessa lunghezza e senso di torsione, e ulteriori aggiunte di canne dalle medesime caratteristiche a seconda del tipo di arco che si vuole realizzare.



Figura 200. INVESTIGACIÓ CANYERA, *Secció de núcleo tipo*, R. ANDÚJAR, M. F. MORELL, O. P. JULIÁN, “Estudi del comportament mecànic d’arcs de canya Arundo donax”, *Quaderns d’Estructures*, n. 46 (2013), p. 29.

Per comporre il nucleo centrale di un fascio si eseguono le seguenti operazioni:

1 - Si prendono 7 canne della stessa lunghezza, con il medesimo senso di torsione e diametro simile; si misurano (con un metro) i punti principali segnati sulla canna precedentemente: punto iniziale, punto V e punto finale. Si veda Figura 202.

2 - Si picchettano a terra tre paletti, distanziati dalle misure dei punti sopra nominati. Ad esempio, per una canna da 12 metri, il paletto del punto V sarà collocato a 9 m dal punto iniziale, e il paletto del punto finale sarà collocato a 2,80 m dal paletto del punto V. Si veda Figura 196.

3 - Si collocano le basi delle canne sul punto iniziale, si verifica che almeno 4 di esse arrivino sul punto finale sul quale devono avere un diametro massimo di 10 mm. Per le canne rimanenti, è ammesso uno scarto prima del paletto finale di massimo 20 cm. Si veda Figura 203.

4 - Si dividono le 7 canne in due gruppi: uno composto dalle 5 canne con diametro maggiore, e uno composto dalle due canne aventi diametro minore. Fra le canne maggiori si individua la più rettilinea. Si veda Figura 204.

5 - Si collocano le 4 canne con il diametro maggiore (in verde) una accanto all’altra e la quinta canna (in giallo), quella più rettilinea, al centro. Si aggiungono sopra le due canne dal diametro minore (in rosso) per concludere la composizione del nucleo centrale. Le canne minori vengono collocate all’intradosso poiché hanno minore rigidità flessionale.

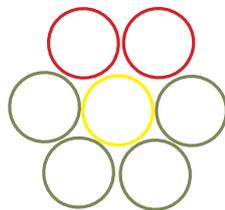


Figura 201. Sezione trasversale del nucleo centrale di un fascio.

6 - Si posiziona il nucleo su 3 treppiedi. Si veda Figura 205.

7 - Si lega il nucleo con un nodo parlato a 10 cm dalla base. Si veda Figura 206.

8 - Si lega il fascio con nodi parlati distanti 50-100 cm tra loro. Si veda Figura 207.

9 - Si applica una controtorsione al nucleo al fine di contrastare la torsione naturale delle canne. Si veda Figura 208.



Figura 202. A sinistra. 7 canne della stessa lunghezza e stesso senso di torsione. Scelta delle 5 canne dal diametro maggiore (in figura sono quelle prossime al soggetto) e le due canne dal diametro minore.

Figura 203. In centro. Misurati i punti principali della canna con un metro, si collocano i 3 paletti corrispondenti a essi (uno sotto il primo treppiedi, il secondo sotto il terzo treppiedi e l'ultimo a 2,80 m dal secondo).

Figura 204. A destra. Scelta della canna più rettilinea tra quelle con il diametro maggiore.



Figura 205. A sinistra. Il nucleo centrale viene appoggiato sopra i tre treppiedi. Sono necessarie almeno tre persone.

Figura 206. A destra. Si procede alla prima legatura del nucleo con nodo parlato stretto da un tornichetto di bambù.



Figura 207. A sinistra. Viene legato tutto il nucleo centrale con nodi parlati.

Figura 208. A destra. Si procede al raddrizzamento del nucleo che tende a torcersi.

## Il nodo parlato (o barcaiole): semplice, incatenato e doppio

Come si è visto, in questa fase di costruzione si è eseguito il nodo parlato detto anche nodo barcaiole. Il nome gergale deriva dal fatto che viene utilizzato per legare le cime delle barche agli ormeggi del molo. È costituito da due giri nel medesimo senso in modo che tirante e cima, parallele nel nodo, escano in direzioni opposte. È molto teso ed è facile e rapido da sciogliere. Serve per legare una fune a un palo o come nodo iniziale per le legature<sup>98</sup>.

In generale, questo nodo non è molto sicuro, perciò è meglio impiegarlo in situazioni temporanee. Il nodo parlato rimarrà allacciato finché la tensione sarà costante, poiché si stringerà da sé. Non è raccomandabile usarlo per sostenere carichi eccessivi poiché potrebbe sciogliersi<sup>99</sup>. Per carichi più elevati è consigliabile considerare il nodo parlato doppio o triplo. Se si desidera chiuderlo definitivamente occorre concluderlo con un nodo piatto detto anche nodo piano.



Figura 209. A sinistra. Nodo parlato semplice, <http://www.mitidelmare.it/Nodi.html>

Figura 210. In centro. Nodo parlato incatenato: variante più sicura del nodo parlato semplice, ibid.

Figura 211. A destra. Nodo parlato doppio, ibid.

## II fase: aggiunta di n canne sull'intradosso del nucleo centrale

Dopo aver legato e raddrizzato il nucleo centrale, lo si appoggia a terra per determinare il lato del suo intradosso e segnarlo (si veda Figura 212). Successivamente viene collocato sui 3 treppiedi con l'intradosso rivolto verso l'alto. Per rafforzare il nucleo si aggiungono n canne a partire dall'intradosso e seguendo il senso di torsione (ad esempio se il fascio è composto da canne con torsione oraria le n canne si aggiungono in senso orario). Il numero di canne aggiunte varia secondo la lunghezza dell'arco che si vuole realizzare (15 m; 13 m; 11 m; 9 m; 7 m; 5 m). Si veda Figura 213.

I fasci possono essere composti da 2 nuclei di 7 canne senza ulteriori aggiunte, oppure da un nucleo al quale vengono aggiunte n canne di rinforzo.



- Modulo
- Intradosso
- Aggiunte

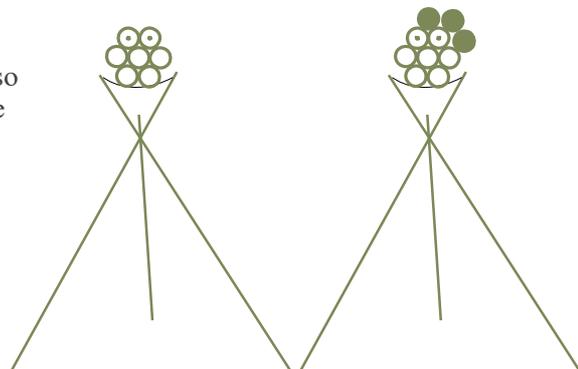


Figura 212. A sinistra. Si individua l'intradosso del nucleo che corrisponde al lato in cui esso tende a incurvarsi.

Figura 213. A destra. Nel primo schema possiamo vedere l'intradosso segnato sul nucleo e rivolto verso l'alto; nel secondo schema si vedono le aggiunte di canne sull'intradosso del nucleo (in questo caso il nucleo ha torsione oraria, perciò le canne si aggiungono verso destra).

<sup>98</sup> <https://www.cnandora.org/manuali-dei-nodi.html>

<sup>99</sup> <https://www.wikihow.it/Fare-un-Nodo-Parlato>

### III fase: aggiunta di n canne sull'estradosso del nucleo centrale

Arrivati a questo punto, per mantenere costante il diametro del fascio, vengono aggiunte n canne a spirale sul lato esterno del nucleo centrale (estradosso), a partire da 1 metro dal punto iniziale al punto V in cui viene aggiunta l'ultima canna. La lunghezza delle canne aggiunte sull'estradosso deve raggiungere il punto finale e avere diametricamente le stesse caratteristiche esplicitate sinora. Si eseguono delle legature a ogni 50 cm circa con nodi parlati a giro multiplo chiusi con nodo piano, e strette con tornichetti di bambù. È importante che le canne non si incrocino ma permangano parallele.

Infine, si verifica che tutte le canne aggiunte non abbiano diametro maggiore di 2 cm sul punto V e che siano sufficientemente flessibili.

Una volta aggiunte le canne sull'estradosso il fascio è completato.



Figura 214. A sinistra. Nucleo centrale (7 canne) con 5 canne aggiunte alla base (vedi II fase).

Figura 215. A destra. Aggiunta di una canna sull'estradosso del nucleo centrale.



Figura 216. A sinistra. Base di un fascio di 7+5 canne con torsione oraria e lunghezza pari a 7 m. Si noti evidenziato in rosso l'intradosso del modulo e 5 canne aggiunte alla base in senso orario per rafforzare l'intradosso del fascio. Con questo fascio si ottiene un arco di 11 m di lunghezza ( $7\text{ m} + 7\text{ m} - 3\text{ m}$ ).

Figura 217. A destra. Si notino le canne aggiunte a partire da 1 m dalla base, in senso orario. Vengono eseguiti nodi parlati tripli ogni 50 cm e stretti con tornichetti di bambù.

#### IV fase: diramazione del fascio in due gruppi a partire dal punto V

A partire dall'intradosso del nucleo e in corrispondenza del punto V, si dirama il fascio in due gruppi omogenei per numero di canne; le superfici interne dei gruppi devono essere il più possibile rettilinee e parallele (è importante aver fatto una buona limatura dei nodi). I due gruppi vengono legati separatamente con nodo parlato semplice. Si veda Figura 219.

Nel momento della costruzione dell'arco vengono connessi due fasci di canne: uno costituito da canne orarie, e l'altro costituito da canne antiorarie, al fine di annullare le forze di torsione. Per eseguire la connessione è necessario che i fasci orari siano stati diramati orizzontalmente sul piano xz, mentre quelli antiorari verticalmente sul piano xy, come mostrato nella figura in basso.

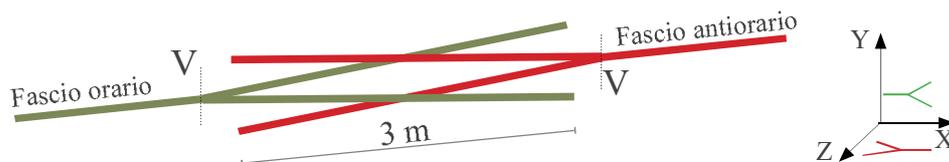


Figura 218. Schema della diramazione dei fasci in due gruppi di canne e della loro connessione. In verde, il fascio orario con apertura orizzontale; in rosso, il fascio antiorario con apertura verticale. La distanza tra le due V è di 3 metri.

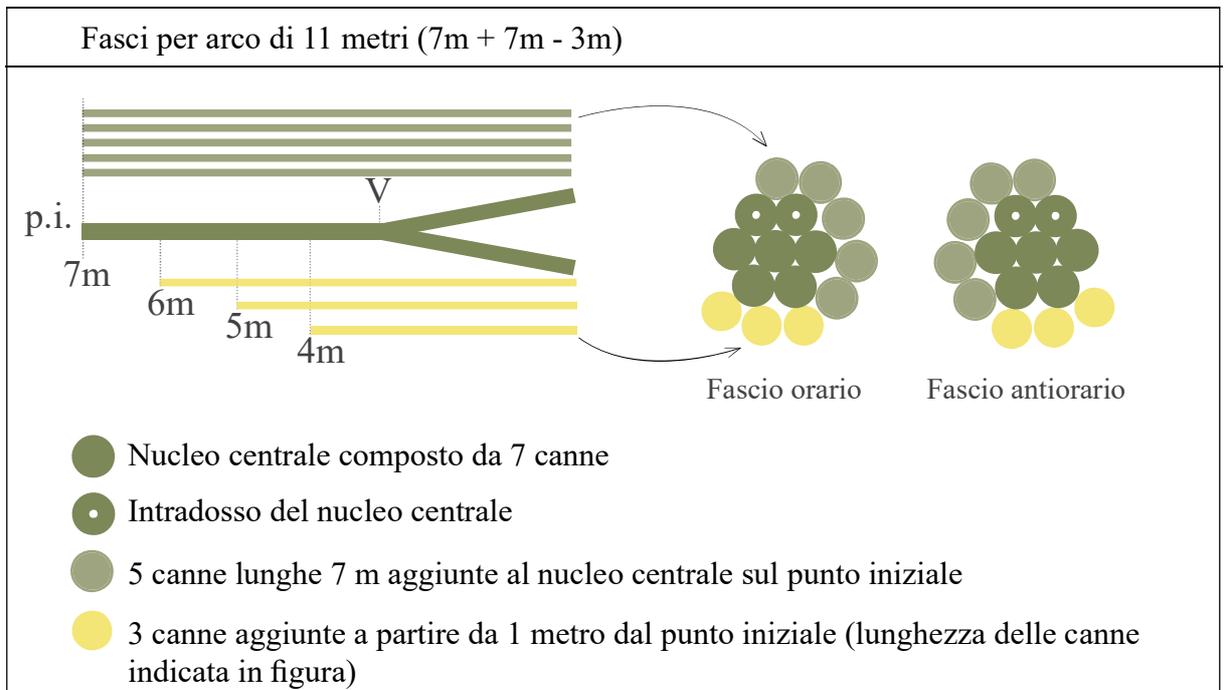
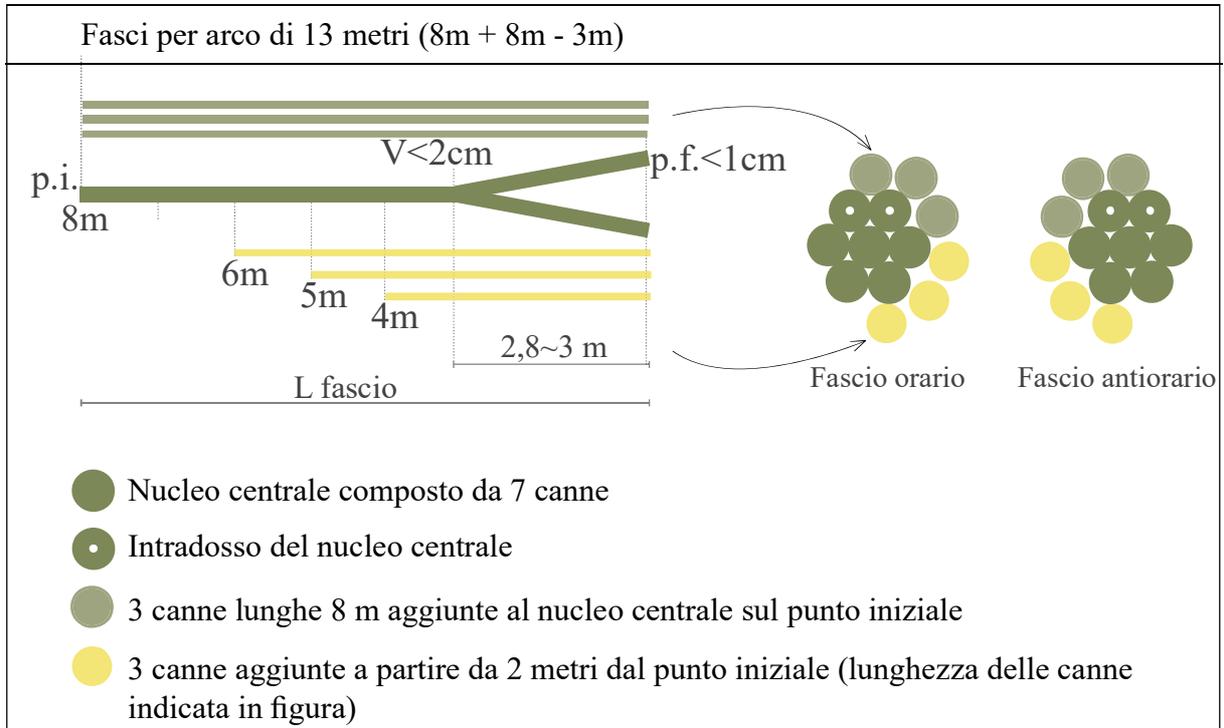


Figura 219, 220. A sinistra, a destra. Diramazione orizzontale del fascio sul punto V in due gruppi.



Figura 221. Fascio orario aperto orizzontalmente sul piano xz, pronto per essere trasportato (in cantiere) e connesso all'altro fascio per comporre l'arco.

Di seguito, si riportano quattro schede contenenti ognuna le principali combinazioni di canne che compongono il fascio a seconda della lunghezza dell'arco che si vuole ottenere.



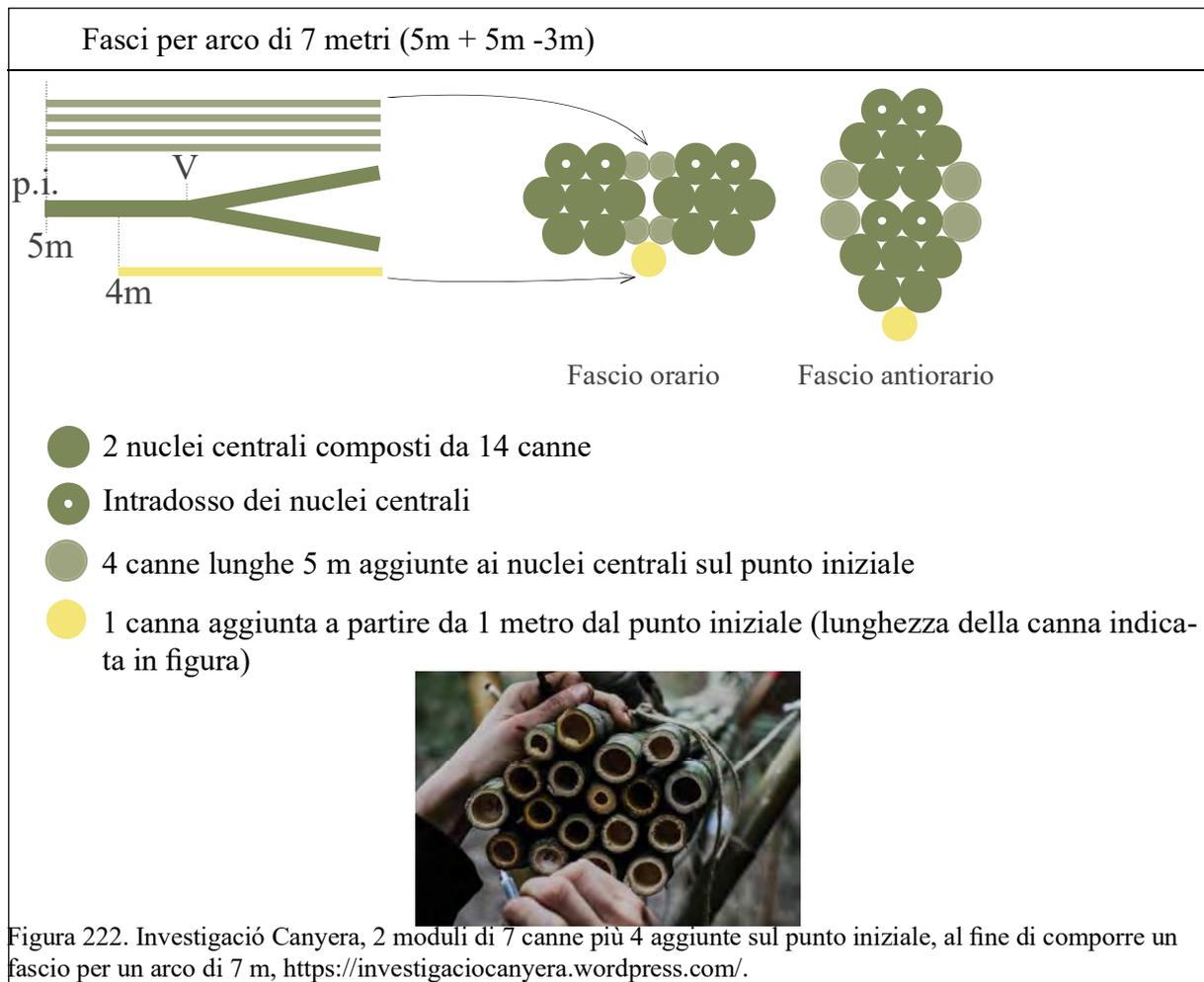
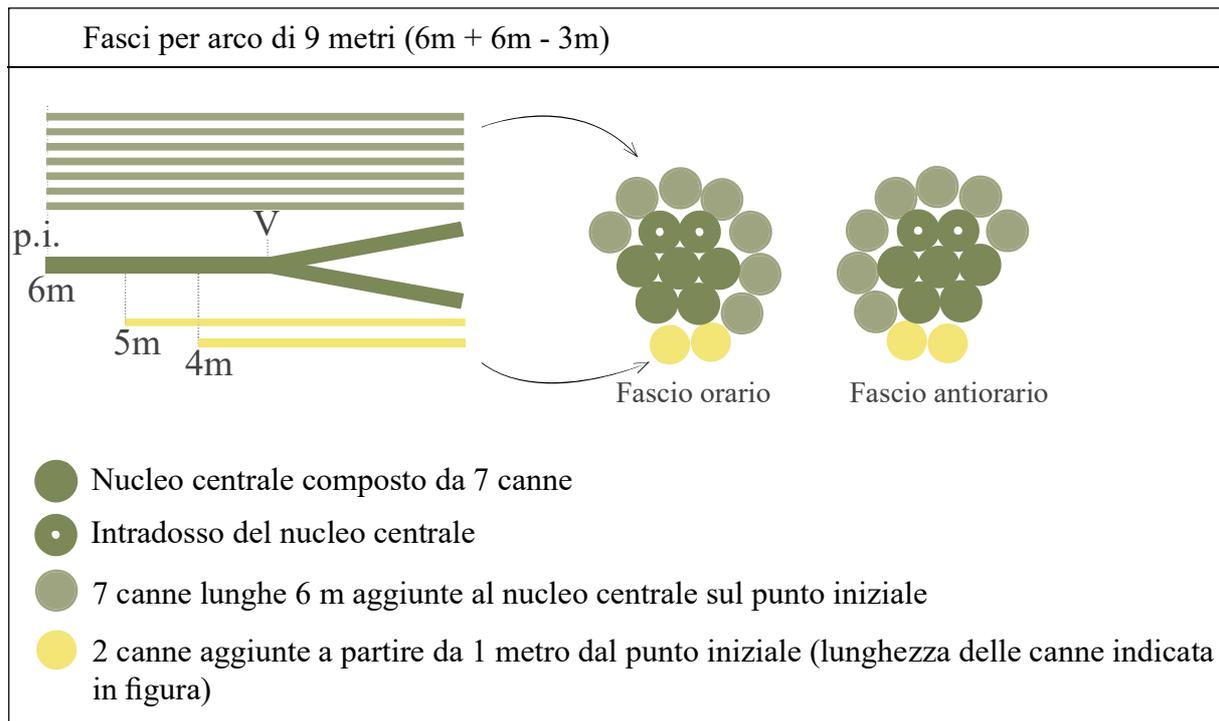


Figura 222. Investigació Canyera, 2 moduli di 7 canne più 4 aggiunte sul punto iniziale, al fine di comporre un fascio per un arco di 7 m, <https://investigaciocanyera.wordpress.com/>.

A partire dal punto V (vedi IV fase) ciascun fascio viene diramato per connettersi uno all'altro mediante legatura per comporre l'arco.

Si ricorda che la distanza longitudinale dalla V del primo fascio a quella del secondo fascio è di 3 m e costituisce il tratto della curvatura dell'arco. Ad esempio, per ottenere un arco di 15 m di lunghezza, ci si basa sulla seguente equazione per comporre il nucleo centrale:

$$\text{Lunghezza totale dell'arco} = \text{lunghezza canna oraria} + \text{lunghezza canna antioraria} - VV'$$

$$L_{\text{tot arco}} = 9 + 9 - 3 = 15 \text{ m}$$

VV' = tratto curvo di connessione compreso tra la V del fascio orario e la V del fascio antiorario di lunghezza pari a 3 metri.

Ossia, per ottenere un arco di 15 m di lunghezza dovrò usare le canne di 9 metri di lunghezza per comporre ciascuno dei due nuclei. Nella figura 44 notiamo la composizione dell'arco tramite la connessione di due fasci di canne. Inoltre, si osservi l'apertura del fascio nel punto V.



Figura 223. CANYA VIVA, INVESTIGACIÓ CANYERA, cit., p. 28.

Lo schema che segue rappresentato in Figura 224 vuole esprimere sinteticamente i criteri attuati fino a questo punto per la composizione di un arco: lunghezza delle canne del fascio; connessione della V del fascio orario con la V del fascio antiorario; lunghezza totale dell'arco ottenuta dalla connessione dei fasci; fasci composti da un numero diverso di canne a seconda della lunghezza dell'arco desiderato; relazione tra lunghezza dell'arco e il numero delle canne del suo fascio e tra il diametro delle canne e numero delle canne utilizzate nel fascio.

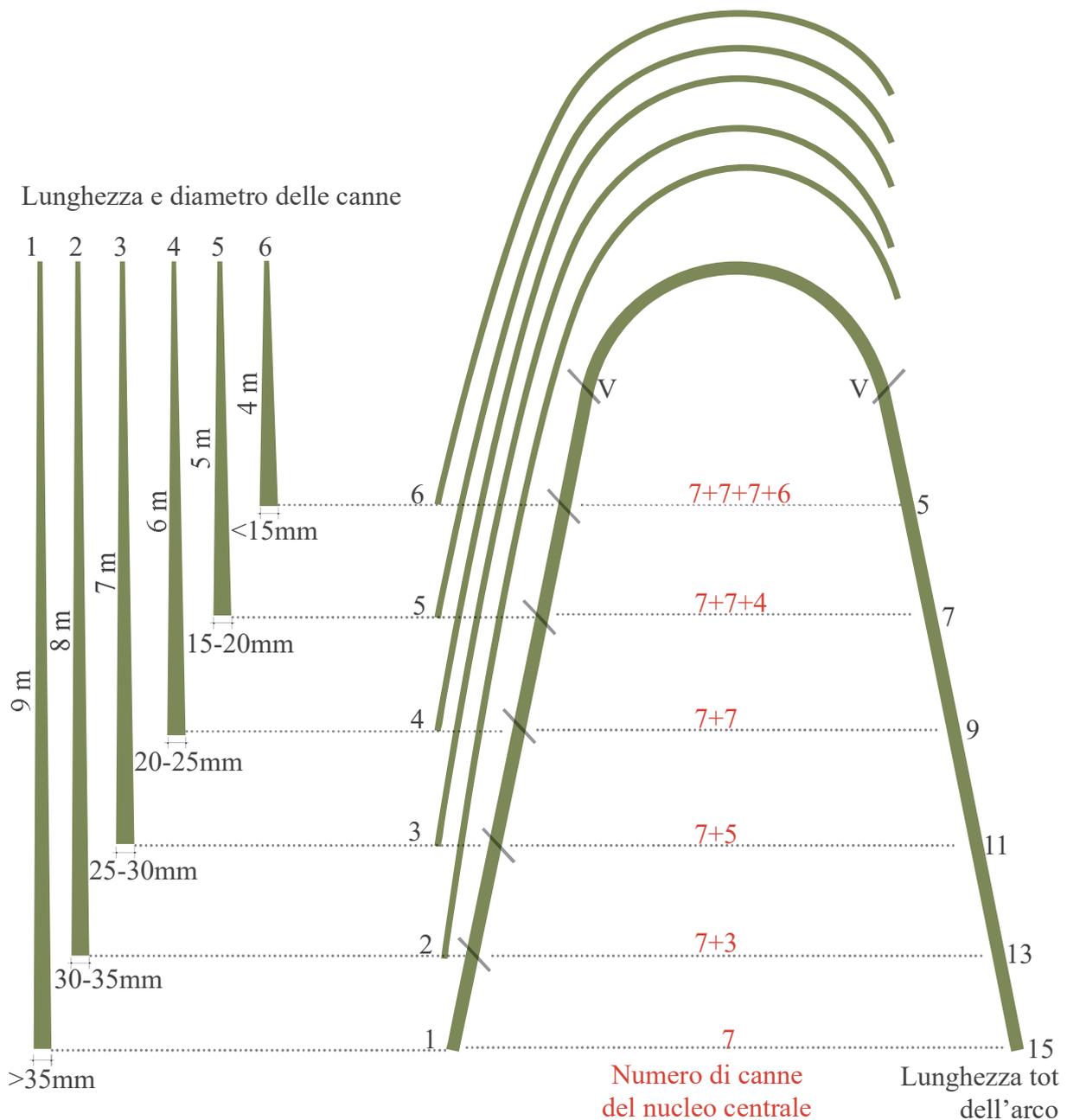


Figura 224. Schema sintetico dei criteri per la costruzione di un arco. Si noti che gli archi utilizzano fasci composti da un numero di canne inversamente proporzionale alla lunghezza dell'arco, aventi un diametro crescente al diminuire del numero di canne utilizzate. Il metodo CanyaViva prevede che gli archi di una struttura abbiano un diametro costante a prescindere dalla lunghezza. In rosso è riportato il nucleo centrale (7 canne), assieme alle  $n$  aggiunte sull'intradosso. A sinistra sono indicate le canne aggiunte a spirale sull'estradosso a completamento del fascio. A destra si riportano le lunghezze totali degli archi.

Negli schemi successivi, è possibile osservare il metodo di costruzione di un sistema a cupola realizzato in Arundo donax con il medesimo metodo descritto sopra. In questa cupola vengono uniti archi di diverse lunghezze tramite nervature e anelli che aumentano la rigidezza strutturale.

Gli schemi non riguardano la struttura oggetto di questo capitolo; sono documenti pubblicati dal gruppo di ricerca INVESTIGACIÓ CANYERA composto da studenti dell'associazione ESFA, e che da molti anni studia il comportamento meccanico della canna mediterranea nelle costruzioni.

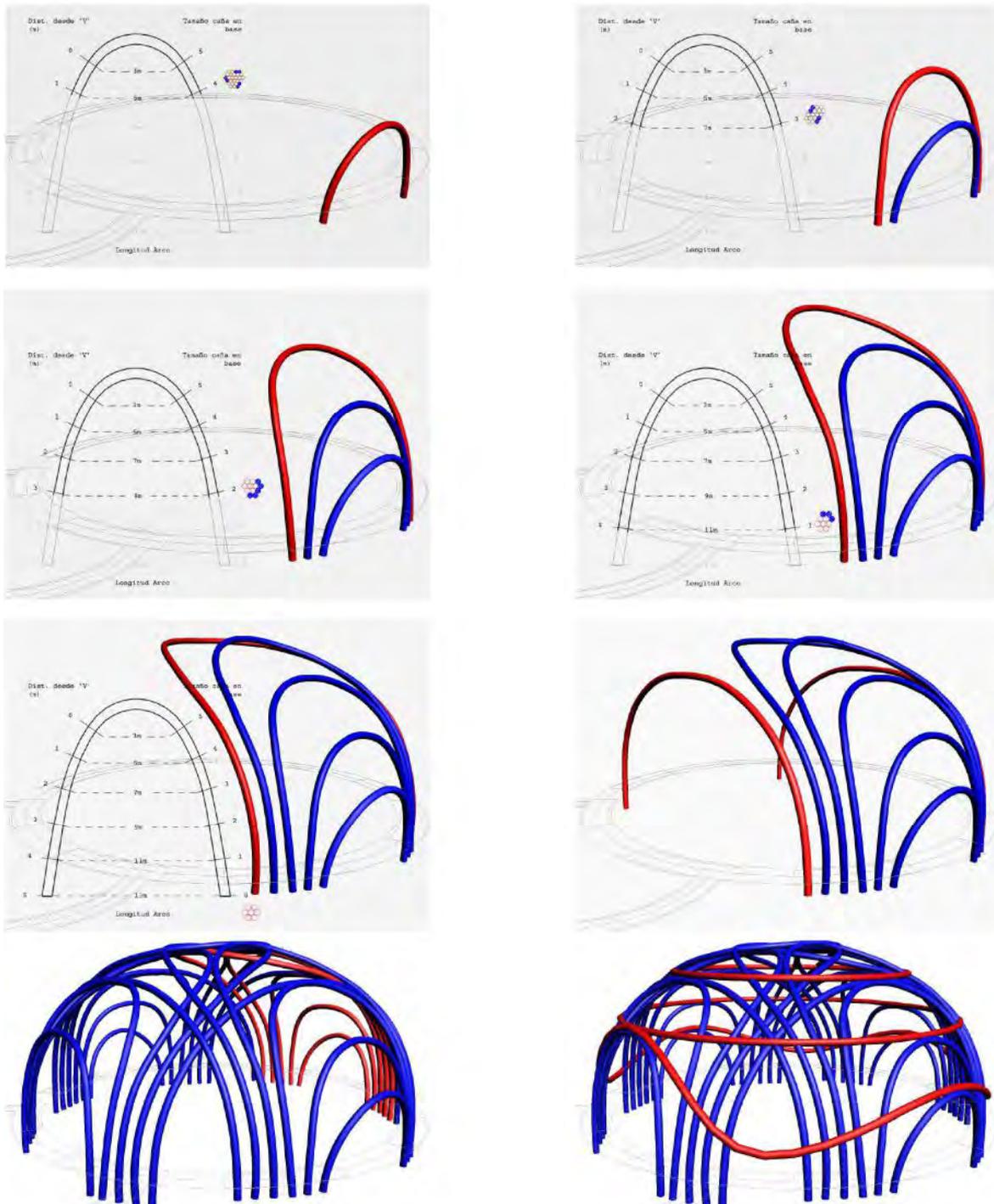


Figura 225. INVESTIGACIÓ CANYERA, Schemi per il montaggio di una cupola tramite archi aventi di diverse dimensioni, <https://investigaciocanyera.wordpress.com/>.

### 4.3.5 CONNESSIONE DEI FASCI E INCURVATURA DELL'ARCO

#### Connessione

Questa è la fase in cui i due fasci di canne, della stessa lunghezza ma di torsione opposta, si connettono fino all'ottenimento della lunghezza totale dell'arco. La sequenza delle lavorazioni prevede le seguenti fasi:

1 - Collocare gli intradossi verso l'alto. Se il fascio non è rettilineo (ciò può essere dovuto alla torsione delle canne) occorre torcerlo nel senso opposto a quello in cui tende a torcersi fino a ottenere un fascio rettilineo. Si vedano Figure 226 e 227.

2 - Verificare che le canne dei fasci siano parallele. Si veda Figura 228.

3 - Connettere i due fasci. Si vedano Figure 229, 230 e 231.

4 - Misurare la lunghezza totale, verificando la distanza fra V e V' che deve essere di 3 m. Si veda Figura 232.

5 - Segnare il punto medio dell'arco (chiave). Si veda Figura 233.

6 - Fare tre nodi provvisori fra i punti V e la chiave.

7 - Tagliare le estremità dei fasci che eccedono i punti V.

8 - Legare il tratto VV' con una corda da 3 mm e chiudere temporaneamente la legatura con un nodo parlato triplo. Si vedano Figure 234 e 235.



Figura 226. A sinistra. I due fasci che comporranno l'arco: il fascio orario e il fascio antiorario.

Figura 227. A destra. Si noti l'intradosso dell'arco segnato in rosso e rivolto verso l'alto. È necessario che una persona rimanga sul posto per tenerlo bloccato.

Figura 228. In centro. Alcune canne potrebbero essersi incrociate durante il trasporto in cantiere poiché i fasci tendono a torcersi. Quindi è necessario ricontrollare che le canne del fascio siano parallele.



Figura 229. A sinistra. Si notino i due fasci diramati dopo il punto V in due gruppi.

Figura 230. In centro. Connessione dei due fasci.

Figura 231. A destra. Una volta connessi i fasci è necessario che una persona mantenga le canne unite.



Figura 232. A sinistra. Misura della lunghezza totale dell'arco con un metro a nastro.

Figura 233. A destra. Viene segnata la chiave dell'arco con nastro rosso.



Figura 234. A sinistra. Legatura stretta del tratto V-V'.

Figura 235. A destra. Chiusura temporanea della legatura su uno dei due punti V con un nodo parlato triplo.

## Incurvatura

I fasci connessi vengono trasportati in uno spazio delimitato da picchetti che sono distanziati secondo la geometria dell'arco, e nel quale si procederà alla sua incurvatura. Si posiziona la chiave, segnata precedentemente, in corrispondenza del picchetto centrale (si veda Figura 237), e si legano due corde a destra e a sinistra della chiave due corde. Alle due estremità viene collocato un grillo in acciaio (si veda Figura 238) all'interno del quale viene fatta passare una corda (si veda Figura 239). Le corde sulla chiave hanno la funzione di mantenere corretta tensione dell'arco nel momento della incurvatura. Le corde alle estremità servono a tirare e incurvare i fasci.



Figura 236. Trasporto dei fasci connessi nello spazio in cui verranno incurvati.



Figura 237. Da questa posizione, avendo collocato la chiave dell'arco nel picchetto centrale, si può procedere alla incurvatura dell'arco.



Figura 238. A sinistra. Si noti il grillo in acciaio all'estremità del fascio.

Figura 239. A destra. La corda viene inserita all'interno del grillo e usata per tirare il fascio.

Successivamente, l'arco viene incurvato regolando le corde corte in chiave e quelle lunghe alle estremità, con operazioni manuali eseguite lentamente. Questa operazione necessita da 3 a 5 persone, una delle quali posizionata in chiave, e che sia una persona esperta, in grado di sentire, attraverso l'operazione con le corde corte, la giusta tensione che viene a crearsi tra i due fasci nel momento in cui vengono incurvati, e quindi di guidare l'incurvamento di entrambi contemporaneamente.



Figura 240. Incurvatura dell'arco. Si notino una persona in chiave che guida il movimento (le altre due persone sono apprendisti), due persone che sollevano le basi incatramate dell'arco, e due persone che tirano le basi tramite una corda.

Una volta incurvato l'arco, vengono fissate le corde in chiave, mentre quelle alle estremità si legano una all'altra a formare una catena con la funzione di mantenere l'incurvatura dell'arco, contrastando le spinte orizzontali, fino al momento della sua messa in opera. Si esegue un'ulteriore legatura dall'estremità di un fascio a un picchetto centrale, che si trova fuori dalla figura dell'arco e perpendicolare alle basi (si veda Figura 251), effettuando dei nodi occhielli che consentono di tirare in maniera ottimale i fasci e concludere definitivamente l'incurvamento.



Figura 241. A sinistra. I soggetti in figura stanno fissando la corda dell'estremità dell'arco con un nodo piatto  
Figura 242. A destra. L'arco incurvato e fissato tramite le legature delle basi al picchetto centrale (tondino di ferro).

Il nodo occhiello è un tipo di nodo adatto per mettere in tensione la corda esercitando una forte trazione; è conosciuto anche come nodo paranco. Viene eseguito radoppiando una parte della cima con un cappio, eseguendo un nodo semplice, e all'interno dell'occhiello si passa il corrente (cioè la parte libera della cima) dopo che è stato collegato all'oggetto. Il dormiente

(parte ferma della corda, generalmente trattenuta dalla mano sinistra che blocca il nodo di momento in momento, durante la formazione) deve essere assicurato ad un punto fermo e stabile, atto a sopportare lo sforzo. Per concludere il paranco basterà eseguire qualche collo e chiudere con un mezzo collo. Per scioglierlo sarà sufficiente tirare il corrente e liberare così la cima<sup>2</sup>.

Il paranco semplice consente di utilizzare una potenza pari alla metà della resistenza<sup>3</sup>.



Figura 243. A sinistra. *Paranco semplice*, [http://www.vejacrica.com/tecnica/nodi/nodi\\_marinari.htm](http://www.vejacrica.com/tecnica/nodi/nodi_marinari.htm), consultato il 09/04/2018.

Figura 244. In centro. Nodi occhielli.

Figura 245. A destra. Variante di un paranco semplice e chiusura con un mezzo collo, <https://www.tuttobarche.it/magazine/nodo-paranco-occhiello.html>, consultato il 09/04/2018.

I passaggi finali per la realizzazione dell'arco consistono nel completare il giro di corda nel tratto di arco incurvato fra i due punti V, nel senso opposto a quello già presente, e nel legare una catena, realizzata con due canne di bambù dal diametro simile e legate insieme con nodo parlato semplice, tra i punti V eseguendo una legatura diagonale (si veda Figura 250) conclusa con un nodo parlato semplice.

Le catene sono elementi provvisori; a completamento dell'opera vengono entrambe smontate: quella in corda che tiene in tensione le basi e quella rigida tra i due punti V.



Figura 246. A sinistra. Legatura tra i due punti V in senso opposto alla prima legatura.

Figura 247. A destra. Legatura del tratto VV' conclusa con nodo triplo parlato bloccato con nodo piano; legatura diagonale della catena tra le V bloccata temporaneamente con nodo parlato semplice senza nodo piano.

<sup>2</sup> <https://www.tuttobarche.it/magazine/nodo-paranco-occhiello.html>

<sup>3</sup> [http://www.vejacrica.com/tecnica/nodi/nodi\\_marinari.htm](http://www.vejacrica.com/tecnica/nodi/nodi_marinari.htm)

La legatura diagonale serve alla connessione di due elementi trasversali. È impiegata nelle diverse e numerose connessioni tra arco e nervature trasversali, ossia durante le fasi di incurvatura, di montaggio e di copertura (si veda Par. 4.3.8).



Figura 248, 249. A sinistra, in centro. Legatura diagonale tra la catena e il fascio chiusa con nodo parlato.  
 Figura 250. A destra. *Legatura diagonale*, [https://www.cnandora.org/uploads/4/0/0/1/4001606/manuale\\_dei\\_nodi.pdf](https://www.cnandora.org/uploads/4/0/0/1/4001606/manuale_dei_nodi.pdf), consultato il 09/04/2018.



picchetto centrale

Figura 251. Arco incurvato con conformazione definitiva.

### 4.3.6 ACCORGIMENTI PER LE FONDAZIONI E PER LA DURABILITÀ DELLE CANNE

Contemporaneamente al lavoro di costruzione dell'arco, un'altra squadra lavorava agli scavi per le fondazioni. In caso di ristagno d'acqua occasionale nelle fondazioni, dovuto a infiltrazioni di acqua piovana, per evitare la comparsa di degrado sulle basi della canna si è applicata una guaina liquida impermeabilizzante tra le canne del fascio, e successivamente si è avvolta la base del fascio con una membrana bituminosa.



Figura 252. A sinistra. Si notino le basi dei fasci impermeabilizzate.  
Figura 253, 254. In centro, a destra. Scavi per le fondazioni.

In questa struttura, le canne non sono trattate prima della loro messa in opera e gli archi non sono rivestiti (come nei casi di Casa de Laila e Mirador Sagunto) ma sono direttamente esposti all'azione diretta delle intemperie (acqua e irraggiamento solare). Per impedire il degrado superficiale dei fasci, dovuto a tali azioni, una volta completata la struttura si ricorre all'applicazione di un trattamento della superficie con oli vegetali o cera per allungare la durata della vita delle canne. D'altro canto, tali trattamenti superficiali non impediscono la formazione di fessure da ritiro o la deformazione degli elementi, che possono avvenire entro l'anno di costruzione.

(Mancano norme che regolino l'uso del bambù nelle costruzioni, cionondimeno è necessario garantire la sicurezza per i fruitori). La manutenzione è frequente e consiste nel rinnovamento dei prodotti chimici sulla superficie della canna, nel controllo delle fessurazioni e nell'eventuale sostituzione di alcune canne. Nel caso di ristagni nella fondazione, la base dei fasci deve essere tagliata. Nelle strutture ben progettate, poiché se si verifica la necessità di sostituzione di alcune parti, questa può avvenire senza che si smonti l'intera struttura.

Nel progetto di Casa de Laila si è deciso di mantenere la struttura in canne staccata da terra di almeno mezzo metro, adottare dei plinti di calcestruzzo e drenarli lungo tutto il loro perimetro. L'isolamento e l'impermeabilizzazione della struttura sono stati ottenuti rivestendola con strati composti da materiali naturali quali la terra cruda, la calce-canapa e la malta marmorino. Questa composizione di strati è a proteggere le canne per un paio di anni senza che subissero fessurazioni.



Figura 255. A sinistra. Casa de Laila. Primo strato di rivestimento della struttura con terra cruda, <http://canyaviva.com/proyectos-permanentes.html>, consultato il 10/04/2018.

Figura 256. In centro. Casa de Laila. Rivestimento delle canne con terra cruda e calce-canapa, <https://investigaciocanyera.wordpress.com/>, consultato il 5/01/2018.

Figura 257. A destra. Casa de Laila. Ultimo strato di rivestimento in malta marmorino. Si nota che sono presenti delle parti interne non rivestite in malta, <http://canyaviva.com/proyectos-permanentes.html>, consultato il 10/04/2018.

Il rivestimento per il Mirador Sagunto ha seguito un procedimento simile a quello di Casa de Laila.



Figura 258. A sinistra. Rivestimenti impermeabilizzanti per aumentare la durabilità delle canne: terra cruda e fibra di canapa, <https://investigaciocanyera.wordpress.com/>, consultato il 5/01/2018.

Figura 259. In centro. Rivestimenti impermeabilizzanti, *ibid.*

Figura 260. A destra. Struttura rivestita esternamente con malta marmorino, <http://canyaviva.com/proyectos-permanentes.html>, consultato il 10/04/2018.



Figura 261. A sinistra. Intradosso rivestito con malta marmorino, <http://canyaviva.com/proyectos-permanentes.html>, consultato il 10/04/2018.

Figura 262. A destra. Estradosso e copertura rivestiti con malta marmorino, *ibid.*

Ultimamente, il gruppo CanyaViva ha sperimentato tecniche alternative di impermeabilizzazione della struttura tramite i seguenti strati:

- Impasto di terra cruda.
- Membrana impermeabilizzante in gesso.
- Doppio strato di membrana liquida impermeabilizzante
- Intonaco di malta marmorino.

Con questo metodo, da un anno e mezzo circa, è stato risolto il problema dell'impermeabilizzazione e non si presentano crepe nelle canne. L'unica manutenzione riguarda l'ultimo strato di intonaco.

Per quanto riguarda le fondazioni, si distinguono tre tipologie:

- Fondazioni prodonde: profondità minima 70 cm, con inclinazione per il drenaggio. Tubo di drenaggio perimetrale, strato di ghiaia profondo 15 cm, tondini di ferro conficcati nel terreno che emergono 20 cm dalla fondazione, legati al fascio di canne e con funzione di resistere agli sforzi di trazione e taglio completando la resistenza dell'arco. Si vedano Figure 263 e 264.

- Fondazioni superficiali: profondità da 40 a 50 cm. Si veda Figura 264.

- Fondazioni al di sopra della linea di terra: i fasci vengono collocati all'interno di cassoni alti 60 cm su uno strato di ghiaia profondo 10 cm (si vedano Figure 265 e 266), o su plinti di calcestruzzo emergenti dal terreno per circa 60 cm (si vedano Figure 267 e 268).



Figura 263. A sinistra. Fondazioni prodonde, <http://canyaviva.com/proyectos-permanentes.html>, consultato il 10/04/2018.

Figura 264. A destra. Fondazioni superficiali, *ibid.*



Figura 265. A sinistra. Fondazioni elevate con uso di cassettoni e strato di ghiaia, <https://investigaciocanyera.wordpress.com/>, consultato il 10/04/2018.

Figura 266. A destra. Struttura realizzata a Oeiras, [http://canyaviva.blogspot.it/2010/04/oeiras-lisboa\\_24.html](http://canyaviva.blogspot.it/2010/04/oeiras-lisboa_24.html), consultato il 5/01/2018.



Figura 267. A sinistra. Archi su plinti di calcestruzzo, <http://canyaviva.com/proyectos-permanentes.html>, consultato il 10/04/2018.

Figura 268. A destra. CANYAVIVA, Domo NBDA, India, 2011, *ibid.*

La fondazione per la costruzione di Orvieto è del tipo superficiale con scavo profondo 50 cm, riempito da ghiaia, pietre grosse e pietrisco. Non sono utilizzati tondini di ferro e l'arco viene mantenuto in equilibrio attraverso 7 corde di ancoraggio (si veda Figura 274) che vengono slegate a fine lavori.

#### 4.3.7 MESSA IN OPERA DELL'ARCO

La messa in opera viene eseguita svolgendo le seguenti operazioni:

1 - Si trasporta l'arco (Figura 270) e lo si posiziona sopra lo scavo di fondazione (Figura 271). Sono necessarie cinque persone, due che controllano la posizione di ogni base, due che lo trasportano dai punti V, e una persona che lo trasporta dal punto della chiave dell'arco.

2 - Si innalza l'arco: le persone sui punti V innalzano l'arco spingendolo, quelle presso le basi controllano che i fasci siano ben posizionati e stabili, e la persona sul punto della chiave dell'arco tirerà l'arco con una corda.

3 - Si bloccano le basi: dopo essere state fissate tramite legature ai tondini, vengono bloccate con pietre grosse, mentre lo scavo viene riempito da pietre grosse, pietrisco e terriccio di riporto. Si veda Figura 273.

4 - Si legano 7 corde di ancoraggio: due corde in prossimità della chiave, una corda su ogni V, una corda su ogni fascio a circa due metri dalla base, e l'ultima corda che collega un fascio all'altro. Le corde di ancoraggio vengono legate ai picchetti e bloccate con nodi occhiello. Si veda Figura 274.



Figura 269. L'arco incurvato viene innalzato. L'incurvatura viene mantenuta dalla catena e dalla corda fissata tra le basi.

Figura 270. Trasporto dell'arco.



Figura 271. Posizionamento dell'arco nello scavo di fondazione.

Figura 272. Scavo per la fondazione superficiale (profondità 50 cm) e posizionamento dei fasci.

Figura 273. Schema della fondazione.



Dopo aver posto l'arco in posizione verticale, si procede a una seconda incurvatura (si veda Figura 275) eseguita con operazioni manuali di tiraggio delle corde di ancoraggio legate in chiave e nei punti V (si veda Figura 274, linee in rosso). Le altre corde di ancoraggio (si veda Figura 274, linee in blu) hanno la funzione di mantenere in asse i due fasci mentre si esegue l'incurvatura.



Figura 274. Arco innalzato e tenuto in tensione con 7 corde di ancoraggio (4 evidenziate in rosso e 3 in blu).



Figura 275. Arco inclinato e fissato con corde di ancoraggio e un fascio di canne in chiave.

### 4.3.8 LA COPERTURA

La piccola orditura è composta da fasci di coppie di canne, e da strisce di canne splittate (si notino le Figure 278 e 279). Questi elementi vengono connessi con legature diagonali.

Per prima cosa, vengono legate coppie di canne aventi diametro uniforme che costituiscono i fasci per la copertura. Si noti la Figura 276.

Le coppie di canne vengono classificate in base all'arco sul quale saranno impiegate e suddivise per lunghezza. Ad esempio, nei fasci classificati come B1, la B sta per il tipo di arco (si veda Figura 304), mentre il numero 1 indica che quello è il fascio più corto. Si vedano le Figure 305-308.



Figura 276. A sinistra. Fasci costituiti da coppie di canne di bambù, aventi lo stesso diametro.

Figura 277. A destra. Fasci per le coperture suddivisi in gruppi a seconda dell'arco sul quale saranno impiegati.



Figura 278. A sinistra. Bambù splittato, pronto per essere impiegato sopra i fasci della copertura.

Figura 279, 280. A destra, al centro. Tecnica di splittaggio del bambù mediante uno splitter con 6 lame, in J. DETHIER *et al.*, *Grow your own house. Simón Vélez und die Bambusarchitektur/Simón Vélez and bamboo architecture*, Weil am Rhein, Vitra Design Museum, 2000, p. 170.

I fasci dell'orditura secondaria, vengono legati sopra gli archi, connessi con legature diagonali, a partire dalla chiave, e in direzione trasversale su tutta la lunghezza degli archi. Hanno la funzione di sostenere le strisce di bambù splittato. Tra un fascio di copertura e l'altro vi è un interasse decrescente dalla base alla chiave dell'arco, a partire da 1 metro fino a 50 cm.



Figura 281. A sinistra. Fascio composto da due canne di bambù collocato in chiave.

Figura 282. A destra. Fasci legati su tutta la lunghezza degli archi con un interasse decrescente dalla base verso la chiave dell'arco.

Per ultimo, si legano le strisce di bambù, ottenute dall'operazione di splittaggio, trasversalmente ai fasci dell'orditura secondaria. Le strisce possono avere larghezze diverse a seconda del diametro della canna utilizzata per lo splittaggio. Le strisce più larghe si legano in corrispondenza dei fasci distanziati di 1 metro e connettono un gruppo di archi all'altro creando una forma ondulata (si nota Figura 288), mentre le strisce più sottili si legano ai fasci distanziati di 50 cm, disposti a partire dal punto V circa.



Figura 283. A sinistra. Legatura dei fasci per la copertura con interasse di 1 metro.

Figura 284. A destra. Si noti che le strisce di bambù splittato non seguono tutta la lunghezza dell'arco. Quelle più larghe vengono impiegate nella parte bassa degli archi e connettono un gruppo di archi all'altro, creando una forma ondulata.



Figura 285, 286. A sinistra, al centro. Orditura con fasci di doppie canne e strisce di bambù splittato.

Figura 287. A destra. Le strisce di bambù vengono interrate e fissate a terra mediante pietre grosse.



Figura 288. Tre persone lavorano alla legatura dei fasci su un arco e una persona sulla legatura delle strisce sull'arco successivo.



Figura 289. A sinistra. Strisce che collegano un gruppo di archi all'altro.



Figura 290. A destra. Legatura diagonale delle strisce sui fasci dell'orditura secondaria.



Figura 291. Gruppi di archi di diversa altezza, collegati tramite strisce di bambù.

In questo progetto si è scelto di non rivestire la struttura ma di lasciarla completamente a vista essendo essa una costruzione temporanea.

Dopo aver eseguito queste operazioni si sarebbe potuto procedere con strati di rivestimento, sia per quanto riguarda i fasci strutturali come si è descritto nel paragrafo 3.3.5, che per il manto di copertura.

Di seguito, si riportano in sintesi alcuni manti di copertura (tra loro) alternativi che Canya Viva ha adottato in altri progetti.

### A) Manto di copertura con terra cruda e sughero

In questo sistema si realizza un'orditura composta da:

- Maglia ortogonale di fasci di canne
- Strisce di bambù splittato



Figura 292. Strisce di bambù splittato sopra la maglia ortogonale, <http://canyaviva.com/proyectos-permanentes.html>

Figura 293. Orditura composta da maglia ortogonale di fasci composti da 2/3 canne, ibid.

Per il manto di copertura è stato impiegato un impasto di terra cruda sopra le strisce di bambù, sul quale è stata posata una membrana impermeabile, e infine lastre di sughero naturale.



Figura 294. Impasto di terra cruda sopra le strisce di bambù e membrana impermeabile, ibid.

Figura 295. Sughero naturale, ibid.

## B) Manto di copertura con terra cruda e malta marmorino

La piccola orditura è composta da:

- Fasci di doppie canne
- Strisce di bambù splittato

Sopra la piccola orditura si è applicata la terra cruda, la calce-canapa e malta marmorino come rivestimento esterno.



Figura 296. Orditura composta da fasci di due canne e strisce di bambù splittato, ibid.

Figura 297. Rivestimento parziale di malta marmorino, ibid.

## C) Manto di copertura con tela di iuta

Adottato per il padiglione “Expo del Agua”, realizzato a Zaragoza nel 2008. La struttura è stata lasciata a vista, mentre il manto (con funzione essenzialmente ombreggiante) era costituito da teli di iuta legati lungo il loro perimetro ai fasci.



Figura 298, 299. A sinistra, a destra. Struttura in canna *Arundo donax* e manto di copertura in tela di iuta, <http://canyaviva.com/proyectos-efimeras.html>.

#### 4.4 ELABORATI GRAFICI DEL PROGETTO DI CUI AL 4.3

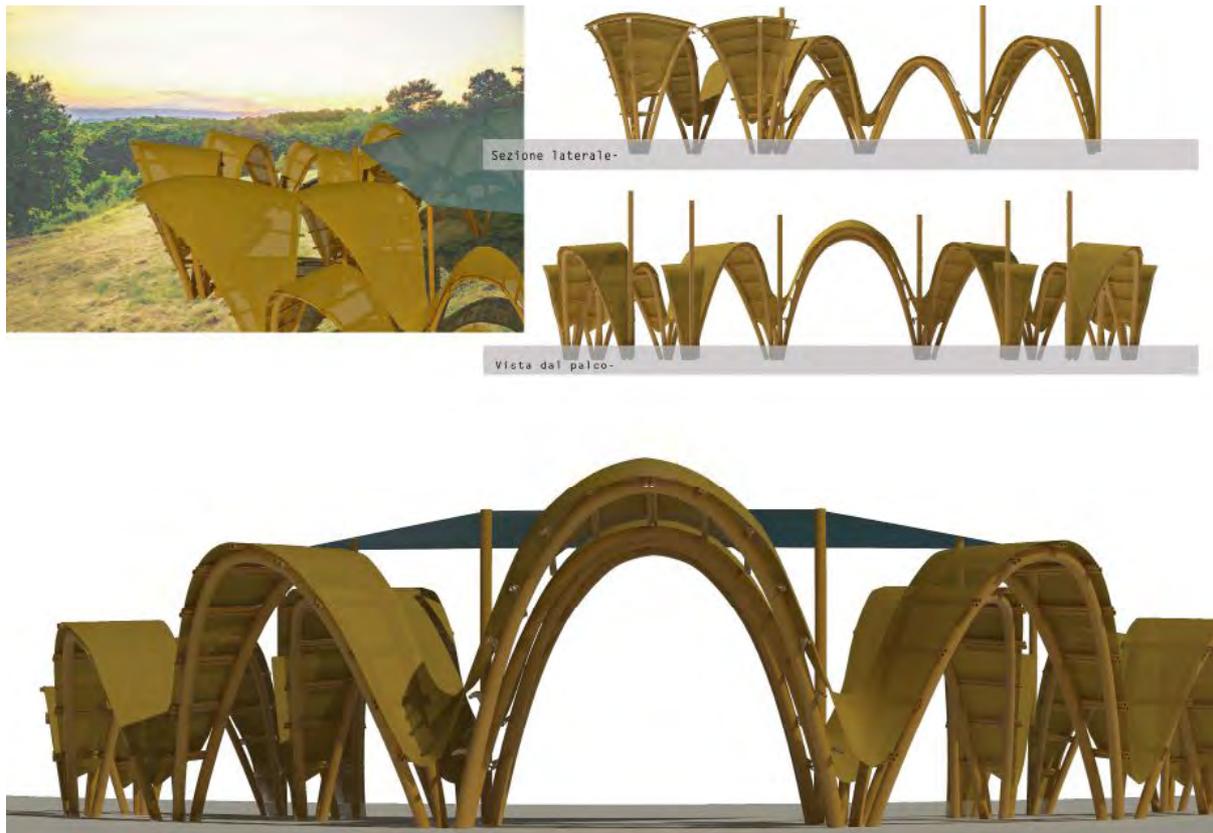


Figura 300. Render del progetto con inserimento nel contesto.

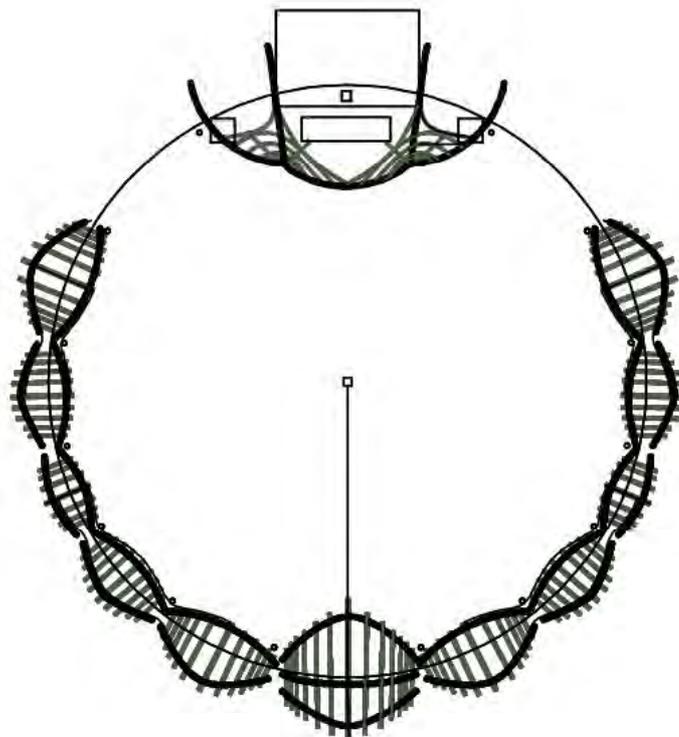


Figura 301. Pianta della struttura

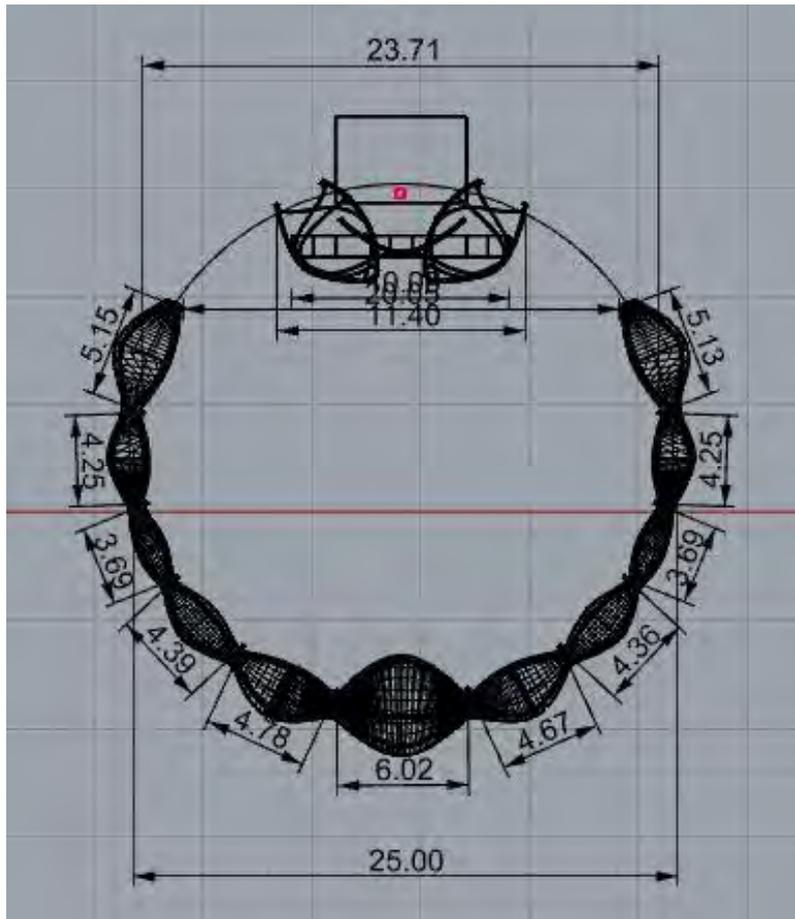


Figura 302. Pianta della struttura quotata.

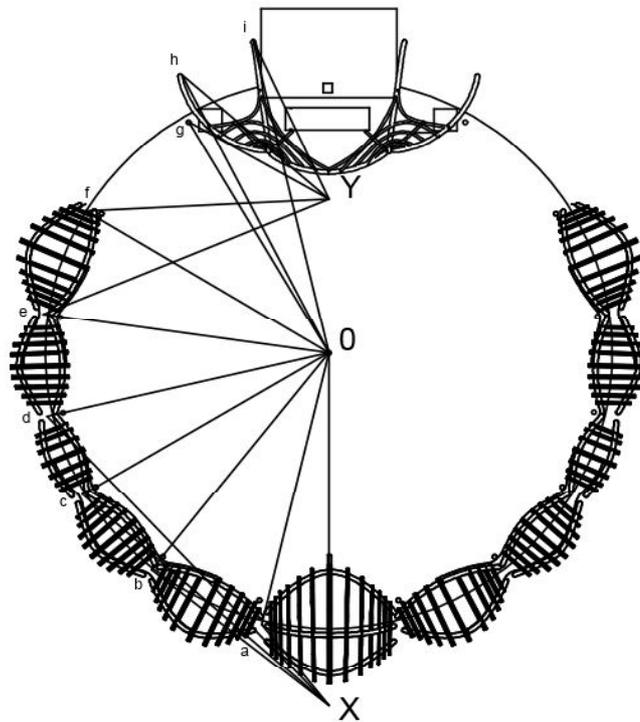


Figura 303. Pianta con l'indicazione dei punti per lo scavo (a,b,c,d,r,f,g,h,i).

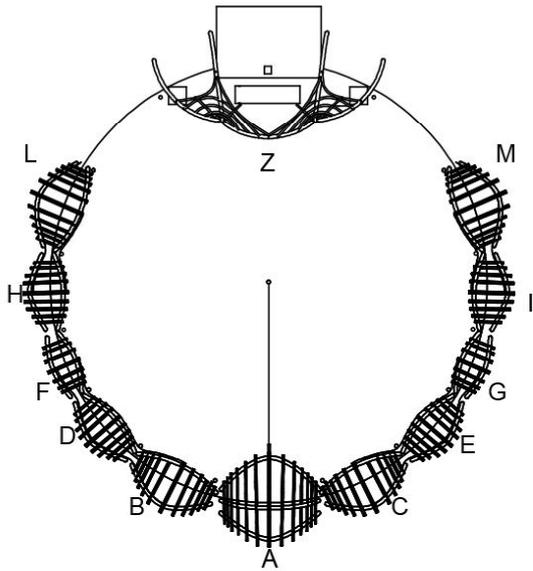


Figura 304. Pianta con indicazione delle tipologie di archi della struttura.

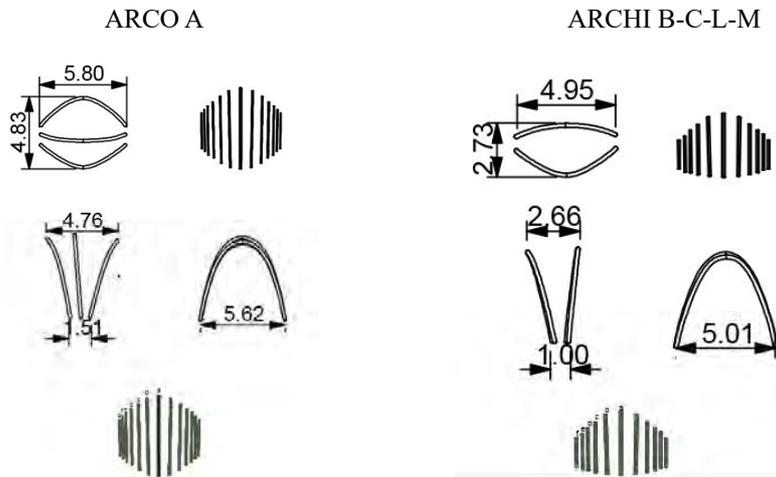


Figura 305. A sinistra. Pianta e sezioni della tipologia di arco A (13 metri di lunghezza).  
 Figura 306. A destra. Pianta e sezioni della tipologia di arco B, C, L e M (11 metri di lunghezza).

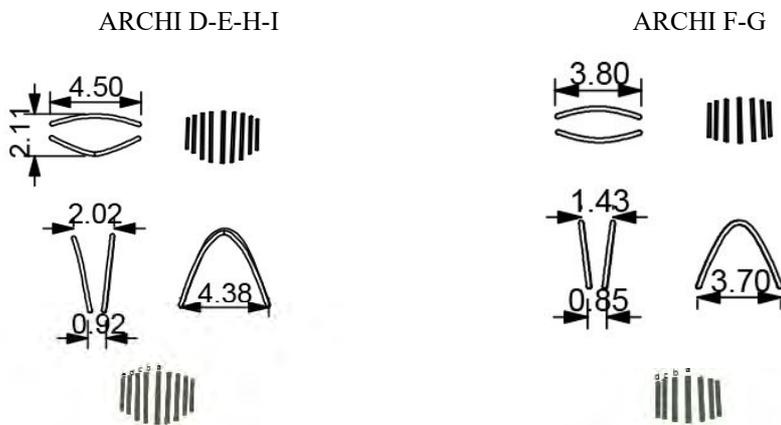


Figura 307 A sinistra. Pianta e sezioni della tipologia di arco D, E, H, I (9 metri di lunghezza).  
 Figura 308. A destra. Pianta e sezioni della tipologia di arco F e G (7 metri di lunghezza).

## Allestimento in Arundo donax per il palco

La zona del palco, costruito con struttura metallica, doveva essere il punto di attrazione principale dell'evento e perciò necessitava di un allestimento con forme più particolari rispetto agli archi di bambù. Per questo motivo si è scelto di costruire una struttura indipendente con archi di Arundo donax, un materiale più flessibile rispetto al bambù, che consente di ottenere curve intrecciate (in armonia con la scenografia naturale del monte Peglia).



Figura 309. Archi in Arundo donax.

Figura 310. Forme curve create dai fasci in Arundo donax.



Figura 311. Struttura in Arundo donax per la copertura del palco. La parte bassa degli archi è rivestita in gesso

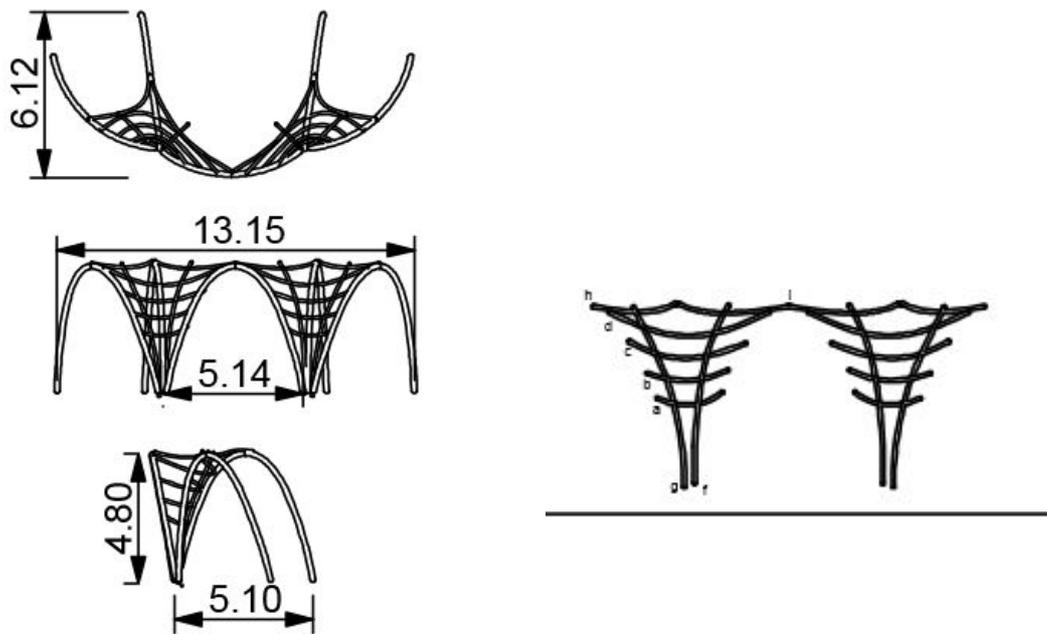


Figura 312. A sinistra. Pianta e sezioni dell'arco Z del palco.

Figura 313. A destra. Schema per il posizionamento dei fasci per la copertura (in figura sono chiamati nervi).

#### 4.5 SINTESI SUI NODI, SULLE LEGATURE, E SULLE CORDE

Una volta completata la struttura vengono rimosse le catene legate sui punti V degli archi, e si slegano le corde di ancoraggio. I nodi che permangono sulla struttura sono tutti nodi parlati tripli, utilizzati durante la costruzione dei fasci. Permangono inoltre le legature diagonali (chiusse da nodi parlati che a loro volta sono bloccati da nodi piani) che sono state utilizzate per la connessione tra arco e fasci per la copertura e per la connessione tra questi ultimi e le strisce di bambù splittato.

I nodi che non sono più necessari, e che quindi vengono rimossi, sono:

- I nodi parlati semplici, utilizzati nella costruzione dei nuclei.
- I nodi parlati eseguiti sulla legatura diagonale delle catene degli archi, non bloccati da nodi piani.

CanyaViva utilizza, ove possibile, corde di canapa naturale e corda di sisal naturale. In questo caso, non è stato possibile ricorrere a questi materiali, perciò si è utilizzata una corda di nylon costituita da canapa (fibra particolarmente tenace, ma allo stesso tempo morbida, e resistentissima all'acqua) e poliestere, prodotta dall'azienda tedesca Liros.



Figura 314. Nodo parlato triplo eseguito sui punti V di un arco.



Figura 315. Si notano il nodo parlato triplo fatto durante la costruzione dei fasci, e le corde di ancoraggio legate provvisoriamente sugli archi con nodi occhielli.



Figura 316. A sinistra. Catena connessa al punto V per mezzo di una legatura diagonale chiusa con nodo parlato ma non bloccata con nodo piano.

Figura 317. A destra. Legature diagonali permanenti eseguite tra i fasci per la copertura e le strisce di bambù splittato.



Figura 318. Legatura diagonale chiusa con nodo parlato e bloccata con nodo piano tra gli archi e i fasci per le coperture costituiti da due canne, legate a loro volta con nodo parlato bloccato da nodo piano.

## 4.6 CONCLUSIONI

La struttura è stata costruita in due mesi e per la sua realizzazione hanno contribuito circa 20 persone, suddivise in piccole squadre aventi ciascuna il proprio ruolo, ma con possibili alternanze al fine di imparare diverse mansioni.

Tutti i partecipanti, prima di accedere al cantiere, hanno preso parte al corso formativo proposto da CanyaViva, nel quale si impara il metodo di costruzione di un arco con fasci di bambù e la sua messa in opera (assemblaggio con altri archi).

Il lavoro è volontario: si offre la propria manodopera in cambio dell'apprendimento della tecnica costruttiva, che avviene tramite il contatto diretto con due insegnanti, responsabili di CanyaViva Italia, e con gli allievi già esperti. Ci sono vari momenti di scambio culturale tra i

partecipanti.

Grazie all'impiego di materiali localmente disponibili quali *Arundo donax* e *Phyllostachys viridiglaucescens* (donato dal proprietario del bosco di bambù), all'impiego della corda per le connessioni, e al lavoro di volontariato, il costo per la realizzazione del progetto è stato molto basso e ha rappresentato una soluzione veloce e funzionale per allestire una location per eventi. Inoltre, le caratteristiche del bambù e dell'*Arundo donax* hanno permesso ai progettisti di creare forme uniche.

La struttura, costruita per avere la durata di un anno, è stata utilizzata in tre occasioni durante il periodo estivo/autunnale 2017 ed è stata mantenuta dall'associazione locale "Casa Laboratorio Il Cerquosino", attiva sul territorio tramite attività mirate alla riqualificazione del parco Sette Frati.

La Tabella 13 indica il tempo che si impiega e il numero di persone necessarie per ciascuna fase di costruzione di un arco avente 11 metri di lunghezza (si veda Figura 306).

I valori sono indicativi e non tengono conto di possibili lavorazioni contemporanee.

Arco di 11 m (30 canne)	Pulizia	Classificazione	Costruzione dei fasci	Connessione dei fasci	Incurvatura	Messa in opera	Orditura secondaria
Tempo (h)	10	2.5	6	1	1	6*	10.5
Numero (min.) di persone	1	2	3	4	5	5	4
TOT (h)	37 (circa 5 giorni lavorativi)						

Tabella 13. Tempo e numero di persone impiegate per ciascuna lavorazione.

\*Si considera il tempo impiegato per la messa in opera di una coppia di archi.

Sono stati impiegati circa 18125 metri di corda circa per le legature eseguite negli archi A, B, C, D, E, F, H, I, L e M. Tale dato è stato ottenuto sommando i metri di corda impiegati per la completa realizzazione dell'arco A (13 metri di lunghezza totale ottenuta tramite due fasci di 8 metri di lunghezza), avente dimensioni maggiori rispetto agli altri. Il calcolo per i metri di corda utilizzati comprende la legatura impiegata per il manto di copertura composto da bambù splittato. È stato possibile sommare questi valori grazie all'esperienza diretta avuta in cantiere. Non sono stati considerati i metri di corda utilizzati per la realizzazione degli archi del palco così come quelli impiegati temporaneamente. Di seguito si elencano la quantità di corda utilizzata suddivisa per le fasi di costruzione dell'arco A:

- 45 m per la legatura di un fascio avente 8 metri di lunghezza (per ogni fascio circa 10 legature con nodo triplo parlato realizzato con segmenti di corda lunghi 160 cm, circa 4 legature per le aggiunte).
- 9,2 m per la legatura tra le V dei fasci che si uniscono (6 m di legatura a spirale da V a V' e 3,2 m per il nodo triplo parlato di chiusura).
- 3,2 m per la legatura diagonale tra arco e catena.
- 126 m per la legatura dei travetti nella copertura (circa 9 legature con segmenti di corda lunghi 80 cm per ogni travetto (l'arco A possiede 13 travetti); 3 legature diagonali tra travetto e arco con segmenti di corda lunghi 80 cm).
- 330 m per la legatura diagonale tra le strisce di bambù e i travetti (per ogni splittato 13 nodi diagonali con segmento di corda lungo 80 cm; in totale sono 30 splittati).

Si elenca la quantità di corda utilizzata per tutti gli archi tenendo in considerazione i calcoli per l'arco A:

- 1334 metri adoperati per la legatura di 23 archi (58 m x 23)
- 13161 metri utilizzati per la legatura di 107 travetti (126 m x 107)
- 3630 metri impiegati per la legatura di 330 strisce di bambù splittato (11 m x 330)

Sommando questi valori si ottiene 18125 metri di corda.  
La struttura è stata smantellata nel mese di marzo 2018.

Il bambù è un materiale versatile con caratteristiche uniche, che però in Italia a causa della sua scarsa presenza ma soprattutto per l'ignoranza rispetto alle sue capacità è scarsamente utilizzato.

CanyaViva ha dimostrato una delle potenzialità di questo materiale anche nella zona del Mediterraneo. Nonostante ciò, questo lavoro non è da considerarsi concluso, anzi, è necessario eseguire ulteriori studi ed esperimenti.

Ad oggi è difficile pensare a strutture permanenti poichè si costruisce con un materiale grezzo, non sottoposto a trattamenti permanenti che gli conferirebbe una durabilità sul lungo periodo. Si affrontano due scelte:

1) Adottare un trattamento superficiale, poco costoso ma poco efficace, che consente una durata massima del materiale di 2 anni. Di conseguenza, realizzare strutture che, una volta conclusa l'utilità dell'opera, vengono facilmente disassemblate in via definitiva (per via dell'uso delle corde) e all'occasione ricostruite a partire dalla fase di raccolta del materiale.

2) Adottare un trattamento profondo, molto costoso ma più efficace, che consente una durata di vita sul lungo periodo.

Queste scelte dipendono dalla funzione che si vuole assegnare alla struttura. Nel caso del progetto in esame, la scelta di adottare un trattamento superficiale è giustificata dal fatto che la struttura ha avuto funzione di copertura e allestimento per l'evento culturale che si ripete annualmente, sfruttandone l'occasione per promuovere corsi di apprendimento sulla tecnica e lavori di volontariato tramite i quali la costruzione è stata realizzata.



Figura 319. A sinistra. Struttura completata composta da 23 archi di bambù.

Figura 320. A destra. Gli archi coperti di neve nel mese di gennaio 2018.



Figura 321. A sinistra. Allievi durante una lezione pratica in cantiere.

Figura 322. A destra. Momento di confronto tra allievi e maestri sul metodo imparato.



Figura 323. A sinistra. Pause relax durante la giornata.

Figura 324. A destra. La struttura di accoglienza “Casa laboratorio Il Cerquosino” a disposizione dei partecipanti.



Figura 325, 326. A sinistra, a destra. YARA NARDI, illuminazione scenografica degli archi durante l'evento culturale.

## 4.7 STUDIO DEL COMPORTAMENTO MECCANICO DEGLI ARCHI DI CANNA ARUNDO DONAX SECONDO IL METODO CANYA VIVA

Come si è visto, il metodo Canyaviva si avvale del bambù e dell'*Arundo donax* come materiali da costruzione al fine della realizzazione di strutture temporanee e permanenti, composte da archi costituiti da fasci di canne.

Nel 2011 è stato effettuato uno studio sul comportamento meccanico degli archi di canna di *Arundo donax*, proveniente dalla zona di Mataró, realizzati secondo il metodo di Canya-Viva. Le prove sono state condotte dal gruppo INVESTIGACIÓ CANYERA, costituito da studenti dell'associazione ESFA (Espacio Social y de Formación de Arquitectura), con il supporto di professionisti e professori della Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona (ET-SAB-UPC)<sup>100</sup>.

Gli esperimenti sono stati eseguiti con prove di carico low-tech, al fine di dimostrare che era possibile eseguirli in qualsiasi luogo, non necessariamente con macchinari o personale specializzato. Inoltre è stata condotta la verifica dei modelli matematici sul comportamento strutturale, e in seguito è stato identificato il modulo di rigidità ed è stata utilizzata la fotogrammetria al fine di elaborare modelli 3D.

Per verificare il comportamento meccanico del sistema di costruzione sono state eseguite le seguenti prove di carico:

- Prova di flesso-compressione eseguita su 3 archi con caratteristiche simili.
- Prova di flessione eseguita su 8 segmenti di arco con lunghezza pari a 1,5 m, e con caratteristiche simili.

### 4.7.1 PROVA DI FLESSO-COMPRESSIONE SU TRE ARCHI

Le prove sono state eseguite su archi costruiti in sito (il luogo scelto per l'effettuazione delle prove) in periodi diversi, alcuni costruiti durante workshop, aventi le caratteristiche dimensionali indicate in tabella 2.

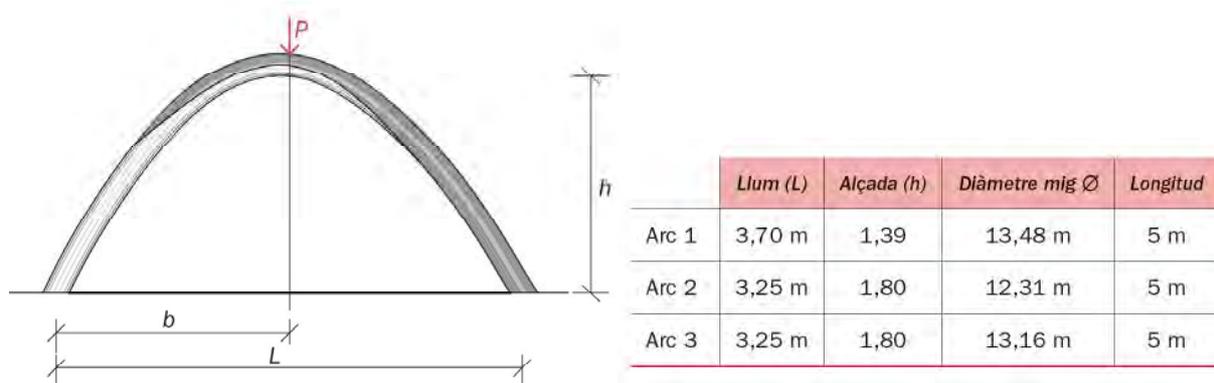


Figura 327. Arco de calibre 4, in R. ANDÚJAR *et al*, op. cit., p. 41

Tabella 2. Caracterització dels arcs del calibre 4, ibidem.

<sup>100</sup> R. ANDÚJAR *et al*, "Estudi del comportament mecànic d'arcs de canya Arundo Donax", *Quaderns d'Estructures*, n. 46, (2013), pp. 38-48

Per le prove è stato applicato un carico concentrato di 1200 N a gruppi di 200 N per mezzo di una cinghia di ancoraggio con tenditore a cricchetto e ganci (“carraca” in catalano). In questo modo è stato possibile caricare gradualmente e, attraverso un dinamometro, misurare l’intensità delle forze.

Le misure sono state effettuate con nastro metrico (M), laser (L), e un sistema di fotogrammetria (F). I test sono stati effettuati su cinque carichi puntali in chiave, ciascuno di 200 N.

Si è misurata la deformazione nel punto centrale in ciascuna delle 5 fasi di caricamento. Lo stesso procedimento è stato adottato per lo scarico<sup>101</sup>.

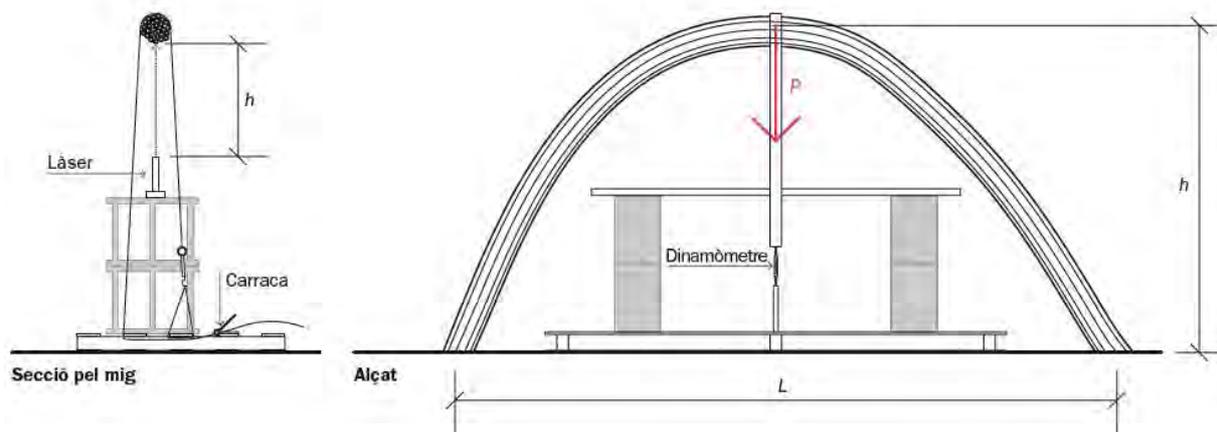


Figura 328. *Esquema de la prueba P2*, in R. ANDÚJAR *et al*, op. cit., n. 46, (2013), p. 42.



Figura 329, 330. A sinistra, a destra. Prova di presso-flessione su un arco, <https://investigaciocanyera.wordpress.com>, consultato il 21/04/2018.

<sup>101</sup> R. ANDÚJAR *et al*, op. cit., p. 42

Sono state considerate le seguenti ipotesi:

- L'arco (realizzato con il metodo CanyaViva) può essere considerato un arco parabolico di secondo grado che segue l'equazione:

$$p_2(x) = a_2x^2 + a_1x + a_0$$

- L'arco è incernierato a terra e quindi non trasmette momento.
- L'arco non è soggetto a momento flettente né a taglio prima di essere sollecitato.
- Ai fini del calcolo, il modulo EI è costante lungo tutto l'arco.

### Equazione parabolica dell'arco

Attraverso la fotogrammetria eseguita sull'Arco 2, è stato possibile segnare su un piano cartesiano con coordinate in metri, un numero determinato di punti dell'asse dell'arco, dove al punto (0, 0) corrisponde la chiave.

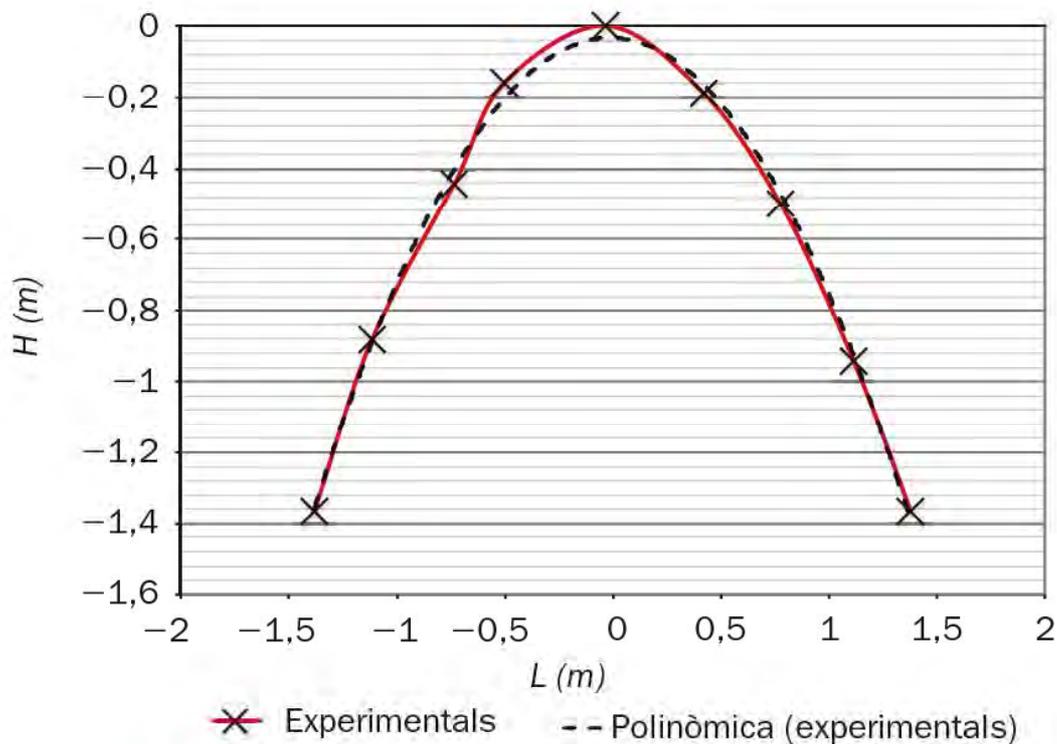


Figura 331. Aproximació polinòmica de segon grau, R. ANDÚJAR *et al*, op. cit., p. 43.

Da questi dati sperimentali è stato possibile scrivere l'equazione dell'arco come una funzione polinomiale di secondo grado<sup>102</sup>:

$$Y = -0,7x^2 - 0,014x - 0,0337$$

<sup>102</sup> R. ANDÚJAR *et al*, op. cit., p. 43

## Modulo di rigidezza (EI)

Partendo dall'ipotesi secondo cui il modulo di rigidezza EI è costante lungo l'arco, considerato come un arco parabolico, per ottenere la rigidezza dell'arco a flessione è stata utilizzata una formula, sviluppata da J. T. Celigüeta dell'università di Navarra<sup>103</sup>, per archi parabolici a due cerniere sottoposti a carico concentrato, grazie alla quale lo spostamento verticale  $\delta y$  prodotto da un carico puntuale P può essere rappresentato da:

$$\delta_y = \frac{5}{48} \cdot \frac{P \cdot h \cdot b^2}{EI} \rightarrow EI = \frac{5}{48} \cdot \frac{P \cdot h \cdot b^2}{\delta} \quad [1]$$

dove b è la metà della larghezza totale dell'arco e h la sua altezza (figura 144).

### 3.7.2 RISULTATI DELLA PROVA A FLESSO-COMPRESSIONE

Sono state misurate le deformazioni istantanee causata dai carichi (a gruppi di 200 N), la deformazione permanente una volta che la struttura è stata scaricata, e l'umidità relativa delle canne (molto elevata nell'arco 1 rispetto agli archi 2 e 3).

Humitat relativa de les canyes														Mitjana	
Arc 1	42,80	39,70	34,00	30,90	27,60	20,20	29,20	24,50	26,00	17,70	19,60	26,00	34,40	28,10	28,35
Arc 2	12,50	9,60	10,50	10,10	10,60	10,00	10,00	9,50	10,70	12,80	13,90	12,00	11,20	11,20	10,93
Arc 3	12,30	12,30	11,00	10,20	11,00	10,40	10,00	12,70	10,50	10,00	11,50	9,70			10,92

Tabella 14. Humitats relatives (%) a les canyes, en blau s'indiquen els valors superiors a la mitjana i en groc els inferior; in R. ANDÚJAR et al, op. cit., p. 45.

Sul grafico carico-spostamento si osservino i valori dello spostamento del punto centrale degli archi sollecitati, oscillanti tra le rette  $y=2,5x$  e  $y=1,4x$  in colore nero tratteggiate. La deformazione  $\delta y$  più sfavorevole corrisponde a 800 N, nella quale la freccia dell'arco  $\delta y$  risulta compresa tra 32 mm e 46 mm (per una luce di 3,7 m per l'arco 1 e di 3,25 m per gli archi 2 e 3).

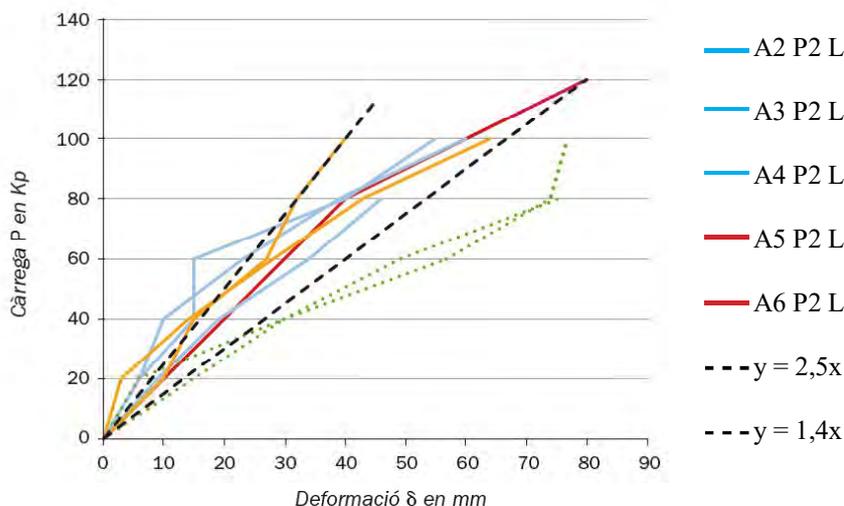


Figura 332. Gràfic càrrega-desplaçament (kp e mm). Cada color indica un arc diferent, in R. ANDÚJAR et al, op. cit., p. 45. P2 (prova 2); L (misurazione laser); A (arco) n (numero della prova realizzata).

<sup>103</sup> R. ANDÚJAR et al, op. cit., p. 43

Nella Tabella 15 sono indicate le prove eseguite per ciascun arco; i risultati sono riportati nel grafico precedente in Figura 332.

	Tipus de prova de càrrega		Realització dels mesuraments		
	Prova 1 (P1)	Prova 2 (P2)	Fotogrammetria (F)	Làser (L)	Manual (M)
Arc 1	A1				A1
Arc 2		A2, A3, A4		A2, A3, A4	
Arc 3		A5, A6	A5, A6	A5, A6	

Tabella 15. *Assaigs realitzats*, in R. ANDÚJAR *et al*, op. cit., p. 45. In questa analisi non è considerata la prova P1. La prova di fotogrammetria è analizzata successivamente.

La Tabella 16 riporta i risultati ottenuti per il modulo di rigidezza EI, calcolati per ogni arco attraverso la formula [1], sul carico concentrato di 1200 N applicato a gruppi di 200 N, considerando la media aritmetica per ciascun caso.

	Mòdul de rigidesa ( $E \cdot I$ ) en $N \cdot mm^2$
Arc 1	$1,16 \cdot 10^{10}$
Arc 2	$1,20 \cdot 10^{10}$
Arc 3	$0,99 \cdot 10^{10}$

Tabella 16. *Mòduls de rigidesa mitjans a partir de les dades experimentals*, in R. ANDÚJAR *et al*, *Estudi del comportament mecànic d'arcs de canya Arundo Donax*, in "Quaderns d'Estructures", n. 46, (2013), p. 45.

### Analisi della deformazione attraverso la fotogrammetria

Si è preso in esame l'Arco 3 avente il minor modulo EI, e sono state effettuate due misurazioni con la fotogrammetria (test A5 e A6 tab. 4). Si riportano i risultati suddivisi per carichi graduali a gruppi di 200 N fino a 1000 N nello schema sottostante che riguarda la prima misurazione:

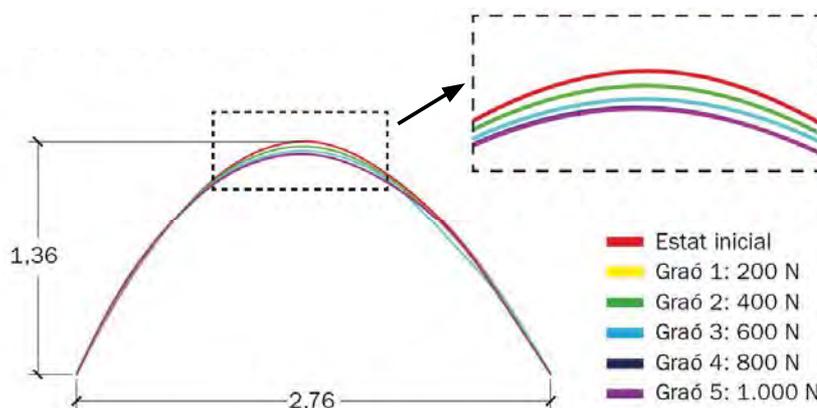


Figura 333. *Resultats de fotogrammetria amb comparatives de diferents graons de càrrega*, in R. ANDÚJAR *et al*, op. cit., p. 46.

La Figura 330 riporta la seconda misurazione:

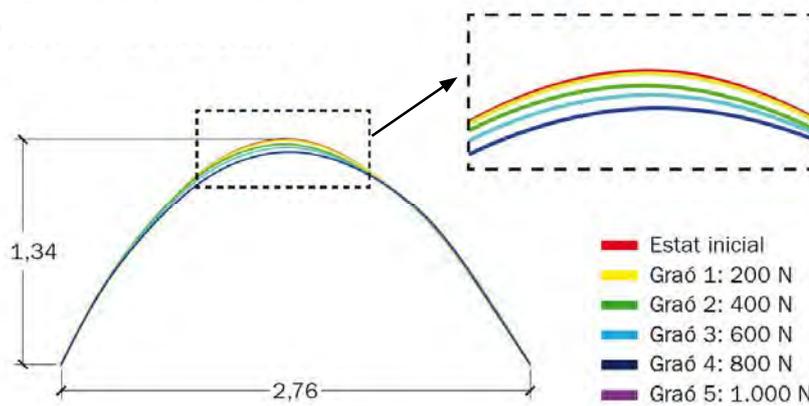


Figura 334. *Resultats de fotogrametria amb comparatives de diferents graons de càrrega*, in R. ANDÚJAR *et al*, op. cit., p. 46

Si può dedurre dai diagrammi precedenti che:

- La deformazione verticale massima  $\delta y$  si verifica nel punto centrale (punto di applicazione del carico) ma si osserva una seconda deformazione sui lati dell'arco nella direzione opposta alla sua curvatura e di minore intensità rispetto a quella in chiave. La sezione centrale dell'arco è la sezione con la minor rigidezza, che assorbe maggiormente le deformazioni.
- Il comportamento dell'arco, quando sollecitato, non è simmetrico ma tende a uno spostamento orizzontale. Si ritiene che ciò sia dovuto a una certa eccentricità del carico, anisotropia della sezione e non omogeneità della sezione lungo lo sviluppo dell'arco.

Le prove sono state eseguite su archi vincolati a due cerniere, soggetti a carico concentrato (P) che ha prodotto deformazioni flessionali. Gli archi sono stati posizionati direttamente a terra in una fondazione, profonda 40 cm, e connessi a essa con tondini di ferro di 50 cm che sono stati legati all'arco con una corda di sisal da 6 mm. Il carico è stato trasmesso attraverso compressioni.

Si suppone (per mancanza di dati) che gli archi sottoposti alle prove non avessero una catena interrata che contrastasse la spinta orizzontale esercitata dall'arco; il posizionamento di una catena permetterebbe di contrastare le spinte orizzontali gravare sul terreno, permettendo di posizionare la fondazione a una profondità minore, rispetto a un arco sprovvisto di catena, dove tali spinte sarebbero invece contrastate dal terreno.

La figura 335 riporta un arco parabolico soggetto a carico concentrato, dotato di una catena interrata che svolge la funzione descritta precedentemente e due tondini di ferro conficcati nel terreno che emergono per 20 cm dalla fondazione, legati al fascio di canne. La funzione dei tondini è quella di resistere agli sforzi di trazione e taglio.

L'arco così vincolato tende ad avere una deformazione flessionale (linea tratteggiata nera nella Figura 335) lavorando sempre entro il limite elastico. Forze e reazioni nelle figure 335 e 337:

- V1, V2 = forze di reazione del terreno
- H1, H2 = forze di reazione della catena
- H3, H4 = forze di reazione dei tondini
- P = carico concentrato

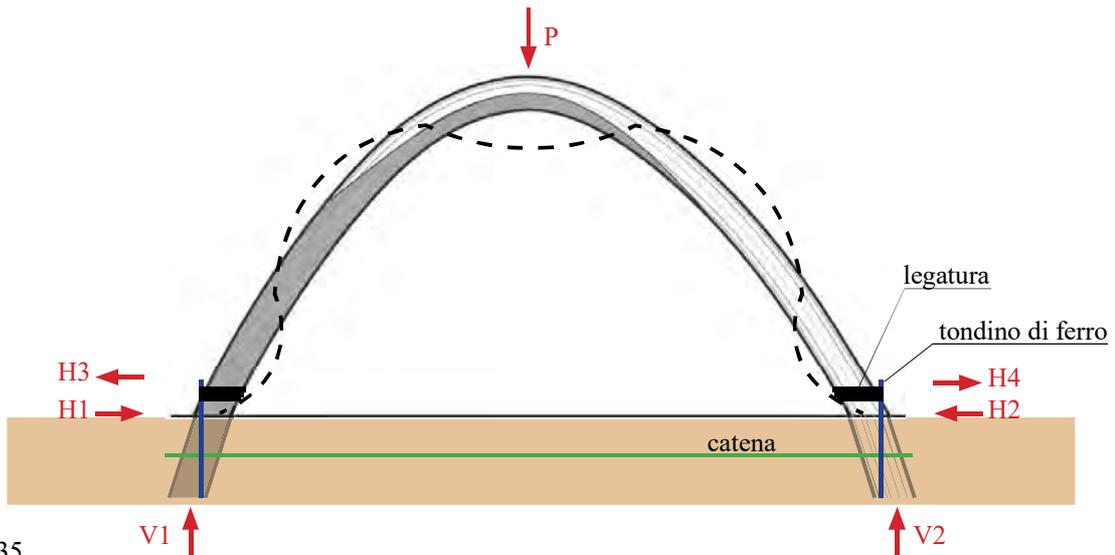


Figura 335.

Si considera ora il caso in cui le forze laterali lungo la direzione ortogonale a quella del piano in cui l'arco giace producono ribaltamenti.

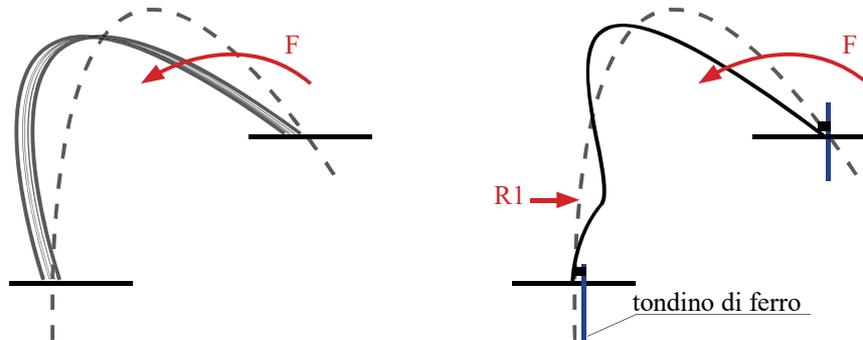


Figura 336. A sinistra. Arco parabolico soggetto a spinta orizzontale  $F$  lungo la direzione ortogonale a quella del piano in cui esso giace.

Figura 337. A destra. Arco parabolico soggetto a spinta orizzontale  $F$  lungo la direzione ortogonale a quella del piano in cui esso giace e vincolato a terra da due tondini.

La spinta orizzontale  $F$  può provare il ribaltamento dell'arco nel caso in cui non sia vincolato a tondini di ferro (Figura 336). In caso lo sia (Figura 337) bisogna evitare che l'arco si instabilizzi lateralmente a causa delle elevate forze di compressione. Per evitare che ciò accada è possibile ricorrere a tre soluzioni:

- 1) Aumentare lo spessore dell'arco.
- 2) Ricorrere a un'orditura di travetti orizzontali e controventi laterali in bambù lungo lo sviluppo dell'arco che impediscono anche il ribaltamento. Si veda Figura 338.
- 3) Ricorrere a metodi di irrigidimento (si veda Figura 225 linee rosse).

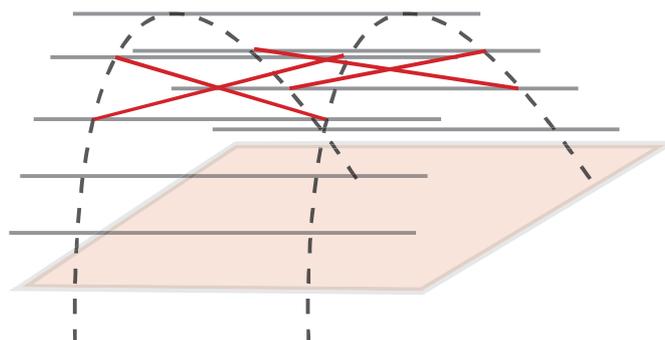


Figura 338.

### 3.7.3 PROVE DI CARICO A FLESSIONE SULLE PROVETTE

Sono stati considerati segmenti d'arco con lunghezza 1,5 m e diametro  $15 \pm 2$  cm, ottenuti dall'arco 3 (si veda Tabella 2), classificati in segmenti B se provenienti della base, e segmenti D se provenienti dal terzo superiore dell'arco.

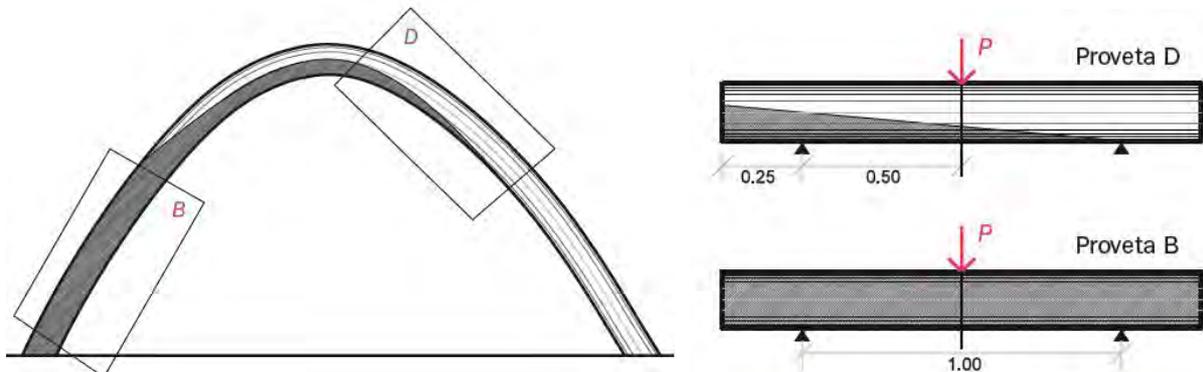


Figura 339. Esquema de la localització de les provetes a l'arc de calibre 4 i la seva posició horitzontal per fer les proves de càrrega, in R. ANDÚJAR *et al*, op. cit., p.43.

### Le prove eseguite

Le prove sono state eseguite in un cantiere nella zona di Mataró, prossima al bosco dal quale sono state raccolte le canne di *Arundo donax*.

Sono state realizzate due colonne di blocchi di calcestruzzo per l'appoggio del provino, distanziate di 1 metro l'una dall'altra e appoggiate su una superficie livellata in pallet. Come nella prova precedente, sono stati utilizzati una cinghia di ancoraggio con tenditore a cricchetto e ganci per il sollevamento graduale del carico. All'estremità del cricchetto era fissato un dinamometro che rimaneva fisso sulla piattaforma in pallet, mentre è stato fissato un misuratore di distanza laser su una traversa collocata tra le due colonne per misurare la freccia (della deformazione).

Sono state eseguite cinque fasi di carico di 200 N ciascuna, e sono state misurate le deformazioni istantanee di ogni fase. Dopo aver raggiunto il carico massimo si è proceduto allo scarico (graduando con il cricchetto fino a 0 N).

Infine, è stata misurata la deformazione permanente<sup>104</sup>.

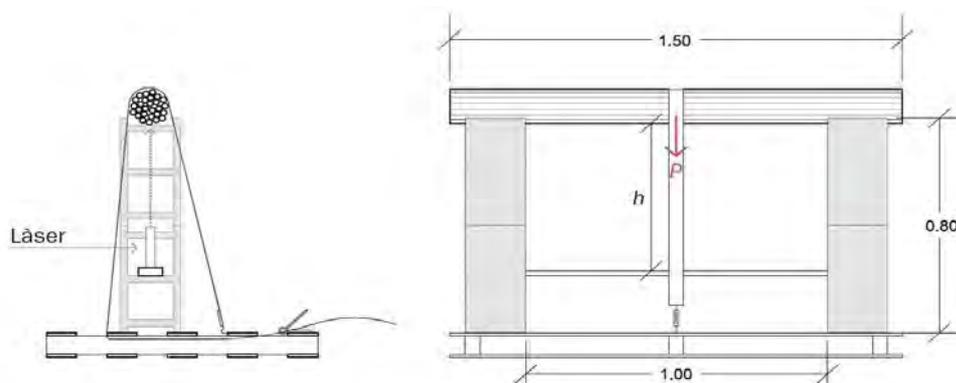


Figura 340. Esquema de la prova de càrrega sobre les provetes realitzades, in R. ANDÚJAR *et al*, op. cit., p. 44.

<sup>104</sup> R. ANDÚJAR *et al*, op. cit., p. 43..



Figura 341. A sinistra. Provino di lunghezza 1,5 m ottenuto dalla sezione di un fascio, <https://investigaciocanyera.wordpress.com>, consultato il 21/04/2018.

Figura 342. In centro. Provino di tipo B, ibidem.

Figura 343. A destra. Provino di tipo D, ibidem.



Figura 344. A sinistra. Il provino appoggiato su due colonne di blocchi di calcestruzzo, <https://investigaciocanyera.wordpress.com>, consultato il 21/04/2018.

Figura 345. A destra. Misurazioni in cantiere, ibidem.



## Ottenimento del modulo di rigidezza (EI) dei provini

Si studia la rigidezza a flessione di un fascio retto di canne a sezione costante, con luce pari a 1 metro e con doppio appoggio. Si applica un carico puntuale centrale e si suppone che il fascio lavori sempre in campo elastico (senza arrivare allo stato plastico).

Per il calcolo del modulo di rigidezza a flessione è stata applicata la seguente formula<sup>105</sup>:

$$\delta_y = \frac{P \cdot L^3}{48 EI} \rightarrow EI = \frac{P \cdot L^3}{48 \delta} \quad [2]$$

dove “P” è il carico puntuale centrale, “L” la luce (=1 metro), e “ $\delta_y$ ” la freccia.

<sup>105</sup> R. ANDÚJAR *et al*, op. cit., p. 44.

### 3.7.4 RISULTATI DELLA PROVA A FLESSIONE

Le prove di carico sono state eseguite su otto provini, misurando la deformazione istantanea nelle diverse fasi di caricamento, la deformazione permanente, e l'umidità relativa dei fasci (in media 11,8%)<sup>106</sup>.

	Prova 1	Prova 2	Prova 3		Prova 1	Prova 2	Prova 3
B1	P1 B1	P2 B1	P3 B1	D1	P1 D1		P3 D1
B2	P1 B2	P2 B2	P3 B2	D2	P1 D2	P2 D2	P3 D3
B3		P2 B3	P3 B3	D3	P1 D3	P2 D3	
B4	P1 B4	P2 B4	P3 B4	D4	P1 D4	P2 D4	

Tabella 17, 18. A sinistra, a destra. *Assaigs realitzats*, in R. ANDÚJAR *et al*, op. cit., p. 46.

	Humitat relativa de les canyes														Mitjana
	7,4	7,3	7	6,8	5,5	9,6	15,4	16	9,4	9,5	10	7,5	7,5	10	
D1	7,4	7,3	7	6,8	5,5	9,6	15,4	16	9,4	9,5	10	7,5	7,5	10	10,59
D2	9,2	9,2	10,5	10,6	16	13,9	10	9,1	14,2	18,9					11,69
D3	9,5	9,5	10,7	10	11,4	9,4	8,9	9,9	9,1	12,2					9,94
D4	12	15,3	14	13,1	10,8	9,6	16,6	12,4	10,2						12,54
B1	12,4	13,9	14,2	10,8	10,3	11,5	9,9	10,4	10,4	10,5					11,28
B2	9,2	9,9	9,6	11,6	16	12	18,1	15,9	14,4	10,5					12,49
B3	14,6	16,3	14,1	14	13,1	11,6	15,3	13,4	13,1	14,1					13,96
B4	11,5	11,3	9,5	10,1	14,6	14,2	18,6	13,1	10	9	13,3				11,96

Tabella 19. *Humitats relatives (%) a les canyes*, en blau s'indiquen els valors superiors a la mitjana i en groc els inferiors, in R. ANDÚJAR *et al*, op. cit., p. 47.

Il grafico in Figura 346 riporta gli spostamenti del punto medio del provino (deformazione istantanea), sottoposto a carico puntuale centrale, con un'intensità che aumenta gradualmente da 0 a 800 N.

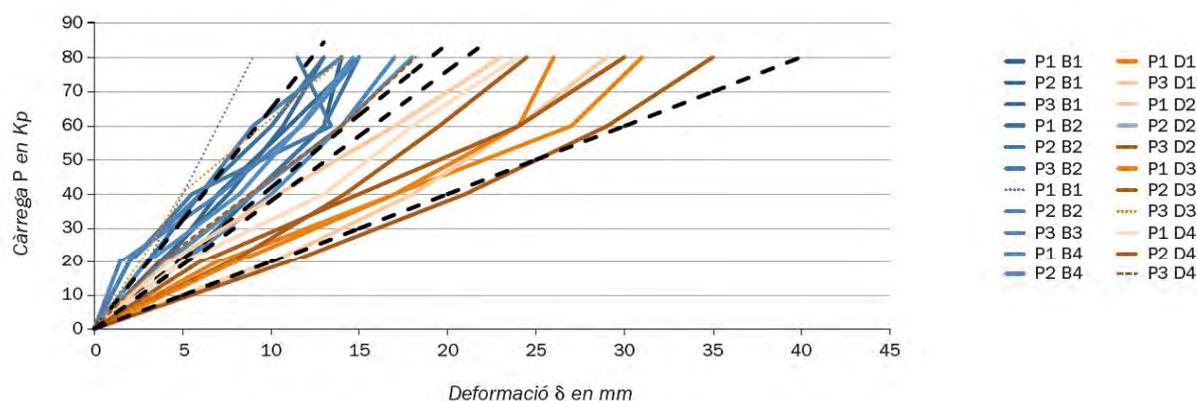


Figura 346. *Gràfic càrrega-desplaçament (kp e mm)*. En blau, les proves de la base (B) i en taronja les provinents del terç superior (D) - en tots els casos la llum entre recolzaments es d'un metre, in R. ANDÚJAR *et al*, op. cit., p. 47.

<sup>106</sup> R. ANDÚJAR *et al*, op. cit., p. 46.

Il grafico mostra un comportamento diverso tra i provini delle basi dell'arco (B) da quelli del terzo superiore (D):

- Lo spostamento dei provini D è compreso tra le rette  $y=3,8x$  e  $y=2,0x$ . La deformazione  $\delta y$  sul carico più sfavorevole (800 N) è compresa tra 23 [mm] e 35 mm.

- Lo spostamento dei provini B (sottoposti allo stesso carico dei provini D) oscilla tra le rette  $y=6,5x$  e  $y=4,2x$ . La deformazione  $\delta y$  sul carico più sfavorevole (800 N) è compresa tra 12 [mm] e 18 mm.

La deformazione maggiore si verifica sui provini del terzo superiore dell'arco e ciò può essere dovuto al fatto che in quella sezione di arco, composta da due fasci di canne di diverso spessore, presenta un'intrinseca differenza di conformazione (e quindi di rigidezza) tra le due porzioni dell'arco. È possibile trarre tale considerazione anche dai risultati del modulo di rigidezza EI, calcolati per ciascun test, riportati nella Tabella 20.

	Mòdul de rigidesa (E · I) en N · mm <sup>2</sup>		Mòdul de rigidesa (E · I) en N · mm <sup>2</sup>
B1	9,85 · 10 <sup>8</sup>	D1	5,79 · 10 <sup>8</sup>
B2	11,18 · 10 <sup>8</sup>	D2	4,90 · 10 <sup>8</sup>
B3	13,79 · 10 <sup>8</sup>	D3	4,32 · 10 <sup>8</sup>
B4	8,93 · 10 <sup>8</sup>	D4	5,85 · 10 <sup>8</sup>

Tabella 20, 21. A sinistra, a destra. Mòduls de rigidesa mitjans a partir de les dades experimentals, in R. ANDÚJAR *et al*, op. cit., p. 47

### 3.7.5 CONCLUSIONI

Dalle prove effettuate sugli archi e sulle sezioni di arco sono state tratte le seguenti conclusioni<sup>107</sup>:

- Poiché non si registra una deformazione permanente dei provini, si ritiene con certezza che l'arco lavori sempre entro il limite elastico (proprio del materiale), senza averne determinato il valore.

- Dati i diversi valori del modulo di rigidezza, maggiore nei provini B e minori nei provini D, e l'analisi dei risultati della fotogrammetria eseguita sull'intero arco, si deduce che l'inerzia varia lungo l'arco: ciò giustifica la forma parabolica, con raggio di curvatura maggiore nel terzo superiore dell'arco rispetto a quello sulla sua base.

- Dall'analisi dei risultati si ottengono i valori dei diversi moduli di rigidezza EI:

1. Provini tipo B            9,85 ~ 13,79 × 10<sup>8</sup> N×mm<sup>2</sup>

2. Provini tipo D            4,32 ~ 5,85 × 10<sup>8</sup> N×mm<sup>2</sup>

3. Archi interi                0,99 ~ 1,25 × 10<sup>8</sup> N×mm<sup>2</sup>

Per confronto:

Legno                         560 ~ 1300 × 10<sup>8</sup> N×mm<sup>2</sup>

Acciaio                        2000 × 10<sup>8</sup> N×mm<sup>2</sup>

<sup>107</sup> R. ANDÚJAR *et al*, op. cit., p. 47.

Comparando questi valori di rigidezza con quelli di materiali meglio conosciuti quali il legno e l'acciaio, R. Andújar afferma che l'arco di canna di *Arundo donax* costruito con il metodo CanyaViva è un elemento strutturale con una grande deformazione elastica e un basso modulo di rigidezza, (secondo i dati ottenuti con un'umidità relativa media, che nei provini era pari a 11,8 % mentre negli archi risultava 16,7%)<sup>108</sup>.

Queste caratteristiche meccaniche del materiale sfruttate in un sistema ad archi come quello sviluppato da CanyaViva consentono un utilizzo ottimale del materiale nella realizzazione di strutture modulari per stand e fiere [generalmente realizzate in materiale metallico], allestimenti e coperture in occasione di manifestazioni o di esposizioni presso eventi vari; gli archi oltre a essere funzionali ed economici esprimono un sentimento artistico legato all'architettura e dimostrano quello che è possibile realizzare con un materiale naturale. Il metodo non esclude la possibilità di realizzare strutture di lunga durata come lo è stato per Casa de Laila.

Nella Figura 347 si vede una struttura in *Arundo donax* utilizzata come un'altalena al parco.



Figura 347. Prove di carico eseguite presso la Universidad Politécnica de Madrid, in <https://investigaciocanyera.wordpress.com/2013/03/10/146/>, consultato il 21/04/2018.

Si elencano i seguenti link di video sulle costruzioni di CanyaViva:

- <https://www.facebook.com/ArteyArquitecturaOrganica/videos/1529798950428167/>
- [https://www.produzionidalbasso.com/project/canyaviva-abitare-il-pianeta-in-un-nuovo-paradigma/?after\\_update=True](https://www.produzionidalbasso.com/project/canyaviva-abitare-il-pianeta-in-un-nuovo-paradigma/?after_update=True)

<sup>108</sup> R. ANDÚJAR *et al*, op. cit., p. 47.

5

RICERCA QUALITATIVA SULLE CONNESSIONI  
BAMBÙ E CORDA

Il lavoro finale di questa tesi consiste nello svolgimento di una ricerca di natura qualitativa attraverso l'esperienza diretta, empirica ed esplorativa, che riguarda la realizzazione di alcuni nodi tra quelli presentati nei capitoli precedenti. Il procedimento è stato analizzato durante l'esecuzione dei nodi, e la descrizione dell'esperienza è soggettiva.

Teoria ed sperimentazione hanno agito contemporaneamente al fine di capire tramite osservazione diretta come si comportano i nodi soggetti a diversi sforzi (manuali), e legati tramite corde di diverso materiale.

## 5.1 MATERIALI

Sono state utilizzate canne di bambù di diametro compreso tra 22 e 24 mm, reperibili in commercio e prodotte dall'azienda *Verdemax*. Le canne si presentano con superficie liscia, rettilinea, colore naturale, priva di rami e con nodi limati.

I criteri di scelta sono stati: rettilineità, diametro maggiore (tra le canne presenti) e costanze per la lunghezza della canna, similarità dimensionale tra le varie canne.

Inoltre sono state impiegate canne di diametro 8-10 mm utilizzate come spinotti ove richiesto.

Sono state utilizzate corde di fibra naturale vegetale e di materiale artificiale. Le fibre vegetali sono formate principalmente da cellulosa, emicellulosa e lignina; l'origine di tali fibre è varia in quanto provengono da piante di diversa specie, e vengono ricavate dai seguenti organi della pianta: foglie (es. sisal), stelo (es. canapa, juta, lino, kenaf, bambù), frutto (es. cocco) e seme (es. cotone).<sup>109</sup>

Le corde utilizzate in questo esperimento sono le seguenti:

- Corda ritorta in *juta* di diametro 2 mm.
- Corda intrecciata in polipropilene di diametro 3 mm.
- Corda in *sisal* di diametro 2,5 mm.

In generale per le legature si consiglia un diametro di corda compreso tra i 4 e i 10 mm. In questo caso, avendo trovato in commercio canne con diametro relativamente modesto, si sono adottate corde con diametro proporzionale a quello delle canne. Le relazioni tra diametro della corda e diametro del culmo, viste finora, sono:

- Bamboo Ark: diametro corda 6,5 mm e diametro bambù 50 mm (valore medio tra le canne utilizzate).
- Panyaden School: diametro corda non noto e diametro bambù 98 mm.
- CanyaViva: diametro corda 5 mm e diametro bambù 50 mm.

La juta è una fibra naturale ricavata dallo stelo di alcune piante *chorchorus* coltivate principalmente in India e in Cina. La fibra è ottenuta dall'essiccazione, macerazione e lavorazione dei fusti delle piante. È la seconda fibra naturale più diffusa al mondo, dopo il cotone, nonché la più economica. La juta è una fibra 100% ecologica, biodegradabile e riciclabile. Ogni ettaro di juta consuma +/- 15 tonnellate di anidride carbonica e rilascia nell'atmosfera 11 tonnellate di ossigeno<sup>110</sup>. Questa pianta contribuisce attivamente e passivamente al miglioramento ambientale. Esteticamente presenta riflessi lucenti e dorati.

<sup>109</sup> ALBERTO GIARETTA, *Materiali compositi in applicazioni automotive con fibre di origine naturale*, Tesi di laurea in Ingegneria meccanica, rel. Enrico Bernardo, Università degli studi di Padova, 2013.

<sup>110</sup> <http://www.anydesignsrl.com/service-view/le-fibre-naturali/>, consultato il 14/08/2018.

La fibra di *juta* presenta un modulo elastico  $E$  di circa  $30000 \text{ N/mm}^2$  e una resistenza a trazione compresa tra  $500$  e  $1000 \text{ N/mm}^2$ ; tali valori la collocano tra le fibre vegetali più resistenti. Questi dati sono stati ottenuti da un lavoro sperimentale condotto dal Dott. S. S. Tripathy.<sup>111</sup>



Figura 348. A sinistra. Piante di *Juta*, <https://www.chimica-online.it/materiali/fibre-tessili/juta.htm>, consultato il 14/08/2018.

Figura 349. A destra. Fibre di *Juta*.

La *sisal* è una fibra naturale vegetale ottenuta dalla foglia dell'*Agava sisalana* originaria dell'America centrale. La fibra è di colore bianco-avorio o giallastra, ruvida, e presenta un carico di rottura compreso tra  $500$  e  $600 \text{ N/mm}^2$ .<sup>112</sup>



Figura 350. A sinistra. Piante di *Sisal*, in ALBERTO GIARETTA, op. cit.

Figura 351. A destra. Fibre di *Sisal*, in ALBERTO GIARETTA, op. cit.

Fibra	Densità [kg/m <sup>3</sup> ]	Carico di rottura [MPa]	Resistenza specifica [MPa*m <sup>3</sup> /kg]	Costo relativo [\$/kg]
Carbonio	1880	1700 – 2400	0,90 – 1,28	220
Vetro	2540	1400 – 2500	0,57 – 0,98	5
Cotone	1520	300 – 600	0,20 – 0,39	1,5
Juta	1450	400 – 600	0,28 – 0,41	0,3
Lino	1540	900 – 1200	0,58 – 0,80	1,5
Canapa	1480	400 – 700	0,27 – 0,47	1,3
Sisal	1450	500 – 600	0,34 – 0,41	0,75
Cocco	1150	100 – 200	0,09 – 0,17	0,5
Kenaf	1450	800 – 900	0,55 – 0,62	0,6

Figura 352. Confronto delle caratteristiche delle fibre naturali. In giallo sono evidenziate le fibre vegetali adottate per le legatura tra elementi di bambù, in ALBERTO GIARETTA, op. cit.

<sup>111</sup> <http://xoomer.virgilio.it/apjqgi/Cap.%203/cap.%203%20-%2062-74.pdf>, consultato il 14/08/2018.

<sup>112</sup> ALBERTO GIARETTA, op. cit.

Per quanto riguarda le corde sintetiche, si utilizzano vari tipi di fibre tra le quali<sup>113</sup>:

- Polipropilene: resistente sia agli acidi che agli alcali; non ha grande resistenza al calore; non subisce alterazioni se bagnato; ha ridotte proprietà elastiche.
- Poliestere: resistente al calore e alla maggior parte degli acidi; non subisce alterazione se bagnato; presenta un'ottima tenacità e resilienza; non è soggetto a significative deformazioni; può essere impiegato puro o in mista con altre fibre naturali, artificiali o sintetiche
- Nylon (o Poliammide): resistente al fuoco, ma non consigliato per uso prolungato al calore; resistente ai principali alcali, ma da non utilizzare in ambienti acidi; non è soggetto a significative deformazioni.

Di seguito si riportano le proprietà chimico-fisiche delle fibre sintetiche.

Fibra	Nylon	Poliestere	Polipropilene
Tenacità fibra asciutta in gr./den.	9.00	8.50	6.50
Carico di lavoro sugg. espresso in % sul carico di rottura	9.00 - 12.00	8.50	6.50
Resistenza della fibra bagnata in rapporto a quella asciutta	85 - 90%	100%	100%
Resistenza del nodo comparato alla resistenza normale	62%	47%	58%
Peso specifico	1.14	1.38	0.91
Assorbimento di acqua	moderato	moderato	basso
Rapporto resistenza-peso	3.00	2.25	2.50
Allungamento a carico costante	moderato	basso	alto
Resistenza alla luce	buona	eccellente	discreta
Resistenza all'invecchiamento	eccellente	eccellente	eccellente
Resistenza dopo due anni di esposizione alle intemperie	70%	90%	30 - 90%
Resistenza agli acidi	si disintegra	si disintegra se caldi	buona resistenza
Resistenza agli alcali	si disintegra	buona resistenza	alta resistenza
Resistenza ai solventi organici	solubile nei fenoli e formal	solubile nei composti fenoli	solubile nei cloruri
Resistenza all'abrasione	molto buona	ottima	buona

Tabella 22. Proprietà chimico-fisiche delle fibre sintetiche, [http://www.dizeta.it/images/dz\\_corde/caratteristiche\\_corde.pdf](http://www.dizeta.it/images/dz_corde/caratteristiche_corde.pdf), consultato il 29/08/2018.

Per la sperimentazione è stata scelta la corda in fibra di polipropilene, in quanto si tratta di realizzare nodi che non saranno esposti a intemperie né a carichi eccessivi, inoltre è la più economica tra le corde in fibra sintetica.

<sup>113</sup> [http://www.dizeta.it/images/dz\\_corde/caratteristiche\\_corde.pdf](http://www.dizeta.it/images/dz_corde/caratteristiche_corde.pdf)

Le corde sono rese resistenti dall'anima che le compone. Si sono utilizzate per la ricerca due tipologie di corda: intrecciata, costituita da un'anima di fibre resistenti, ricoperte da fili intrecciati che le proteggono (tipo prevalentemente utilizzato); ritorta, costituita da tanti fili attorcigliati su sè stessi, nella quale più fibre intrecciate formano il filo, più fili formano il legnuolo, e infine tre o più legnuoli formano una corda.

Le principali differenze tra una corda ritorta e una intrecciata sono<sup>114</sup>:

Corde intrecciate	Corde ritorte
Morbide e gradevoli al tatto	Rigide
Anche dopo essere state usate molto mantengono una sezione rotonda	Alla fine si appiattiscono
Sono resistenti all'usura	Alcuni nodi si possono sciogliere
I nodi non si sciolgono	È versatile e maneggevole, ma non adatta a tutti i lavori
Può essere utilizzata per lavori gravosi	

Al fine evitare fenditure longitudinali nella canna dovute a fori, possono essere impiegati nastri in tessuto che fasciano parte di essa in prossimità del nodo. Dunque si è deciso di testare tale misura di prevenzione contro le fessurazioni sulla canna adottando un nastro in tessuto con spessore di 4 cm.

Gli strumenti adottati per la realizzazione dei nodi sono: seghetti vari, tronchesina, coltellino, lima, trapano.



Figura 353. Alcuni dei materiali e strumenti necessari per l'esecuzione dei nodi in bambù e corda.

*Qualsiasi nodo da costruzione esige molta cura: deve essere ben tirato e i giri di corda ben unti e stretti. Non fare mai uno di questi nodi con corde troppo grosse o nuove, perché non si stringono facilmente. È bene ricordare sempre che una legatura non diventa più solida se ha più giri di corda; in genere ne bastano tre o quattro.*<sup>115</sup>

<sup>114</sup> <https://digilander.libero.it/pensierotonante/corde.htm>, consultato il 14/08/2018.

<sup>115</sup> [https://www.cnandora.org/uploads/4/0/0/1/4001606/manuale\\_dei\\_nodi.pdf](https://www.cnandora.org/uploads/4/0/0/1/4001606/manuale_dei_nodi.pdf), consultato il 14/08/2018.

## 5.2 [1° NODO] NODO TRIPLO PARLATO

Nel Par. 4.3.4 viene descritto l'utilizzo del nodo triplo parlato al fine di legare tra loro le canne che costituiscono i fasci con i quali vengono realizzati gli archi. Infatti questo è un *nodo di avvolgimento*, realizzato tramite *legatura dritta*, e può essere impiegato per legare elementi paralleli o una corda a un elemento fisso, come avviene nelle imbarcazioni.

La legatura è stata eseguita in prossimità dei nodi e in maniera stretta per evitare lo scorrimento delle canne e lo splitting.

Al fine di prevenire possibili scorrimenti la legatura è stata eseguita nello spazio compreso tra il nodo di una canna e quello dell'altra. Inoltre si è rivelato utile realizzare delle leggere incisioni sulla canna (senza forarla) che ospitano la corda mantenendola fissa.

La canna ha una superficie molto liscia e non perfettamente rettilinea, per questo motivo nel momento in cui si affiancano due canne occorre allinearle per non lasciare spazi tra una canna e l'altra al fine di realizzare nodi stretti il più possibile.



Figura 354. A sinistra. Due canne di lunghezza 40 cm, diametro 24 mm, aventi un nodo ciascuna; corda in poliestere di lunghezza 160 cm; tornichetto in bambù.

Figura 355. A destra. Nodi ravvicinati e canne allineate.

Il nodo triplo parlato è stato eseguito tra due nodi ognuno appartenente a una canna. Si è utilizzata la corda in poliestere e successivamente (per confronto) si è realizzato lo stesso nodo con la corda in sisal. Il procedimento è illustrato nelle immagini seguenti.

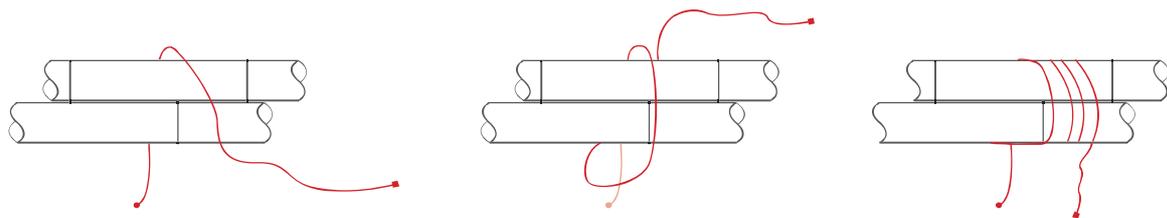


Figura 356. A sinistra. Step 1: il dormiente (capo rappresentato dal pallino pieno) passa sotto le canne e il corrente sopra (quadrato pieno).

Figura 357. In centro. Step 2: il corrente passa all'esterno del dormiente e lo incrocia compiendo un giro completo.

Figura 358. A destra. Step 3: il corrente compie altri tre giri paralleli al primo.

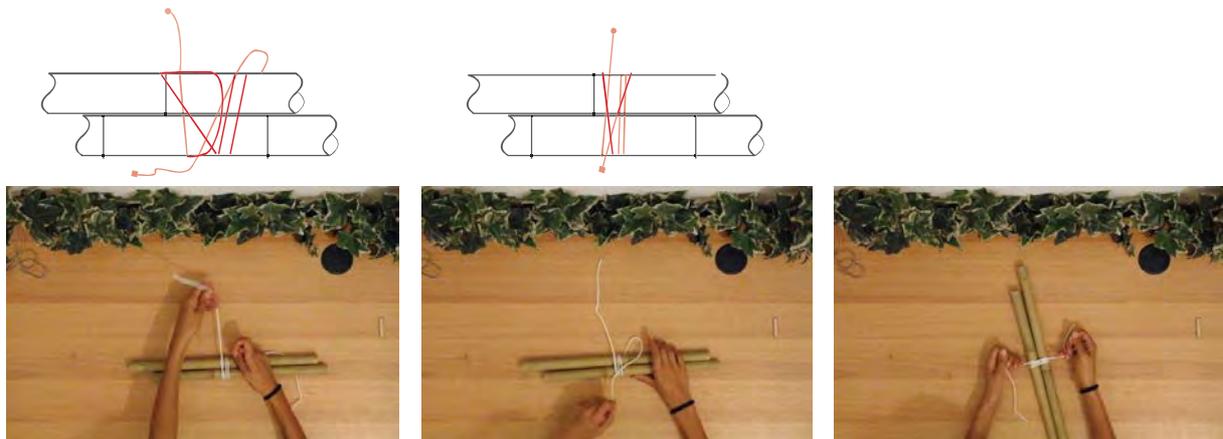


Figura 359. A sinistra. Step 4: si ribaltano le canne. Il dormiente è quello che esce in alto (pallino pieno).

Figura 360. In centro. Step 5: il corrente passa all'interno del primo giro di corda e esce dalla parte opposta al dormiente.

Figura 361. A destra. Step 6: il nodo parlato è corretto se dormiente e corrente sono attraversati da una diagonale.



Figura 362. A sinistra. Step 7: la chiusura del nodo deve avvenire sulla canna.

Figura 363. In centro. Step 8: si realizza un nodo piano di chiusura.

Figura 364. A destra. Step 9: al fine di stringere il più possibile il nodo è stato tagliato un tornichetto (piccola sezione di bambù) dalla stessa canna, inserito tra i giri della corda nello spazio vuoto tra le canne; si ruota tornichetto su stesso per due volte stringendo il nodo.

Se viene eseguita solo una legatura le canne traslano longitudinalmente e ruotano. Si è deciso dunque di realizzare una seconda legatura, uguale alla prima, in prossimità del nodo successivo. Le due canne sono state forzate manualmente in tutte le direzioni ma non hanno presentato movimenti. Perciò il nodo si è dimostrato rigido.

La medesima legatura è stata eseguita con la corda in sisal e le differenze rispetto alla corda in poliestere sono state le seguenti:

- Meno attrito.
- Meno elasticità (si è riuscito a fare solo un giro con il tornichetto).
- Piccoli movimenti rotatori consentiti.
- Traslazioni consentite lungo l'asse della canna.

Le traslazioni possono essere dovute al fatto che la corda in sisal è meno morbida e perciò non consente di stringere il nodo come nel primo caso, infatti è stato permesso di fare un solo giro con il tornichetto; inoltre una delle canne ha un solo nodo quindi la traslazione longitudinale è consentita in una direzione.

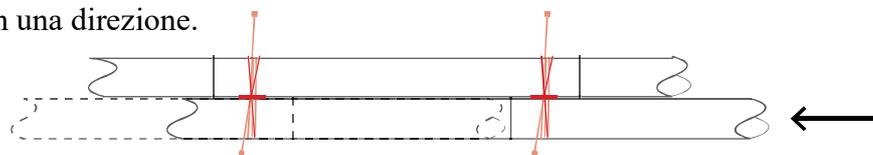


Figura 365. La canna inferiore presenta solo un nodo e per tal motivo può verificarsi lo scorrimento dovuto all'applicazione della forza F.



Figura 366. La legatura tramite corda in poliestere (bianca) e legatura tramite corda in sisal (giallino)

### 5.3 [2° NODO] NODO DIAGONALE

La legatura diagonale è stata affrontata nel Par. 4.3.5, nella descrizione della fase di incurvatura dell'arco per la connessione di due elementi che si intersecano con angolo compreso tra  $90^\circ$  e  $45^\circ$ ; in quel caso gli elementi erano arco e catena. Si è visto lo stesso tipo legatura nei casi studio Bamboo ark e Community Learning Center affrontati nel capitolo 3.

Questo è un *nodo di avvolgimento* realizzato tramite *legatura diagonale* in prossimità dei nodi della canna. Si presentano di seguito due modi di realizzazione: il primo secondo le modalità di Canyonviva e il secondo mediante la tecnica giapponese adottata da Hirokazu Toki per il Bamboo Ark.

Le seguenti immagini descrivono i passaggi eseguiti per la realizzazione del nodo diagonale impiegato nella costruzione di Canyonviva.

Il nodo è stato realizzato con una serie di spire incrociate e strozzate, stringendo ogni singolo giro. Si è usata la corda in poliestere.

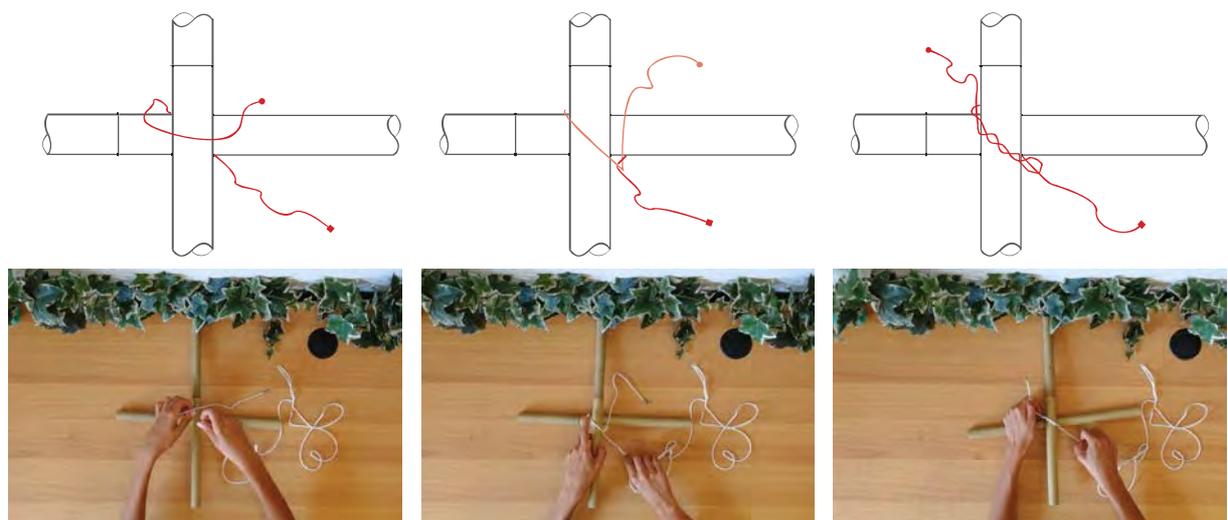


Figura 367, 368. A sinistra, in mezzo. Step 1: canne disposte a  $90^\circ$  con i nodi ravvicinati. Si fa passare il dormiente (capo contrassegnato in nero nella foto) sotto l'incrocio delle canne e si realizza un nodo piano facendo in modo che il dormiente esca verso l'alto e il corrente verso il basso.

Figura 369. A destra. Step 2: si realizza il nodo *boscaiolo* come nodo di partenza

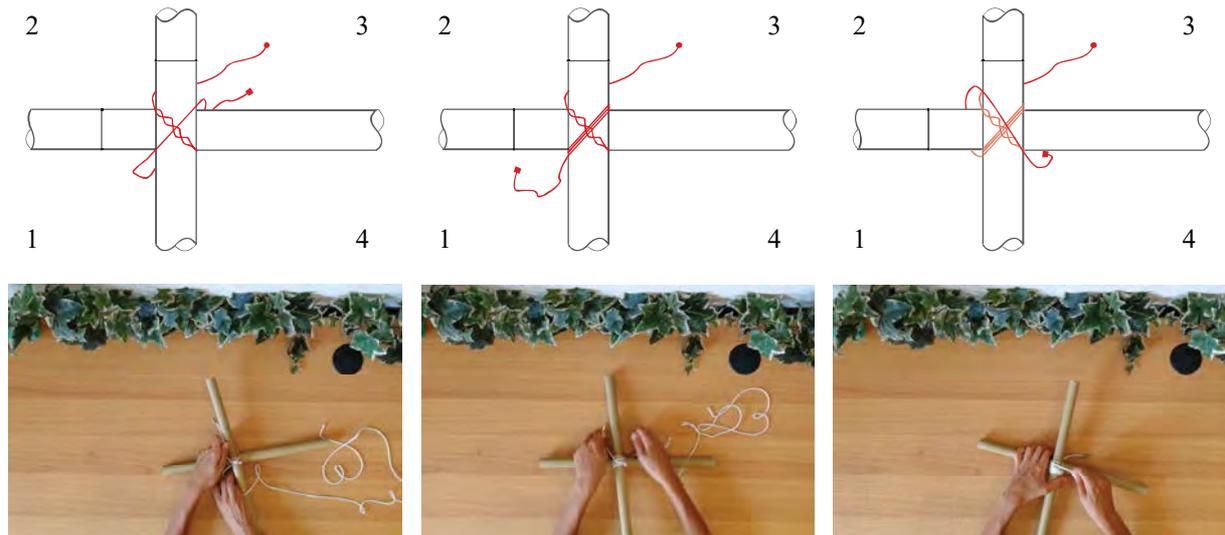


Figura 370. A sinistra. Step 3: il corrente passa sotto la canna orizzontale dal quadrante 4 al quadrante 3, e successivamente compie un giro completo in diagonale passando sopra la canna verticale dal quadrante 3 al q. 1  
Figura 371. In mezzo. Step 4: si ripete l'operazione precedente per un giro e mezzo ritrovandosi ad avere il corrente nel q. 1.

Figura 372. A destra. Step 5: dal q. 1 passa dietro verso il quadrante 2, successivamente il corrente incrocia dal q. 2 al q. 4. L'operazione viene ripetuta per due giri e mezzo, facendo passare il corrente dal q. 4 al q. 2 e dal q. 2 al q. 4.

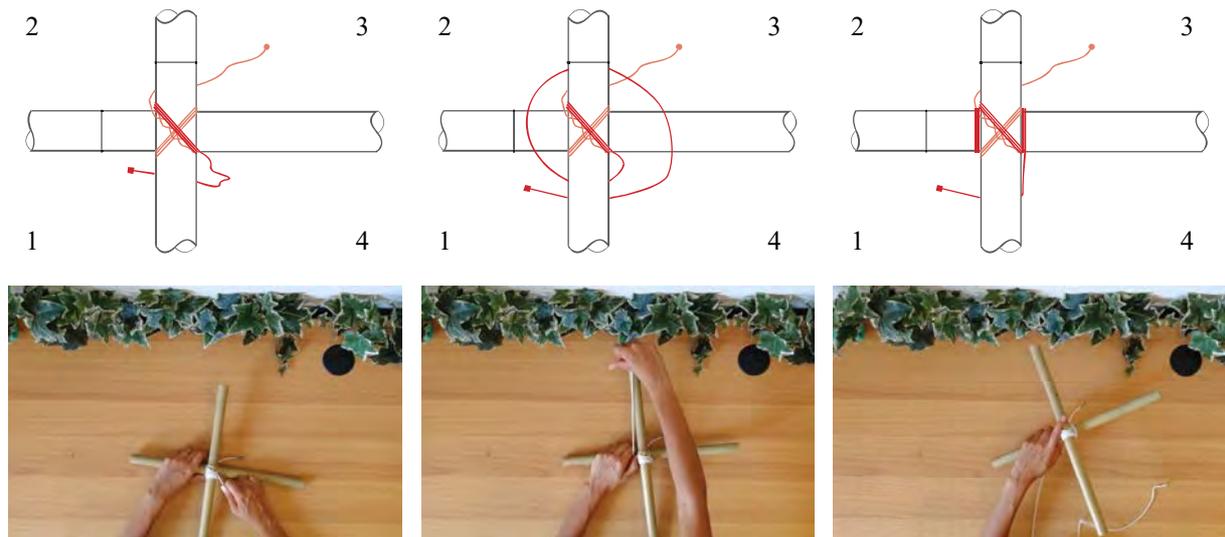


Figura 373. A sinistra. Step 6: il corrente passa sotto la canna verticale dal q. 4 al q. 1

Figura 374, 375. In mezzo, a destra. Step 7: dal q. 1 si passa sopra la canna orizzontale al q. 2, sotto la canna verticale al q. 3, sopra la canna orizzontale al q. 4, e sotto la canna verticale al q.1 compiendo un giro completo in cui si strozzano le diagonali realizzate precedentemente. L'operazione viene compiuta due volte e alla fine il corrente si deve trovare nel q. 1.

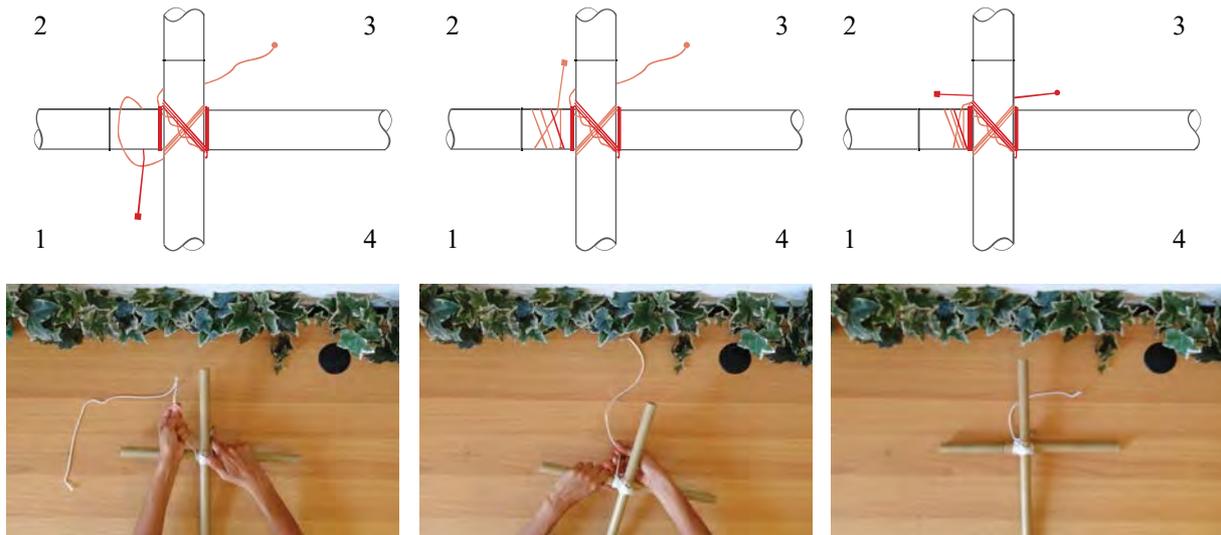


Figura 376. A sinistra. Step 8: si esegue un nodo triplo parlato con il corrente sulla canna orizzontale. Dal q. 1 si passa sopra la canna orizzontale al q. 2, il corrente gira attorno alla canna orizzontale tornando al q. 1 e passando dentro l'anello del giro.

Figura 377. In mezzo. Step 9: Dal q. 2 il corrente compie due giri e mezzo rientrando dentro l'anello del primo giro nel q. 2. Per il nodo triplo parlato valgono le stesse regole descritte in Figura 357.

Figura 378. A destra. Step 10: Dal q. 2 il corrente compie un giro di strozzamento e la legatura viene conclusa con un nodo piano realizzato con il capo morto.

Si riporta di seguito lo stesso tipo di legatura (diagonale) ma eseguita con il metodo giapponese adottato per la costruzione Bamboo Ark.

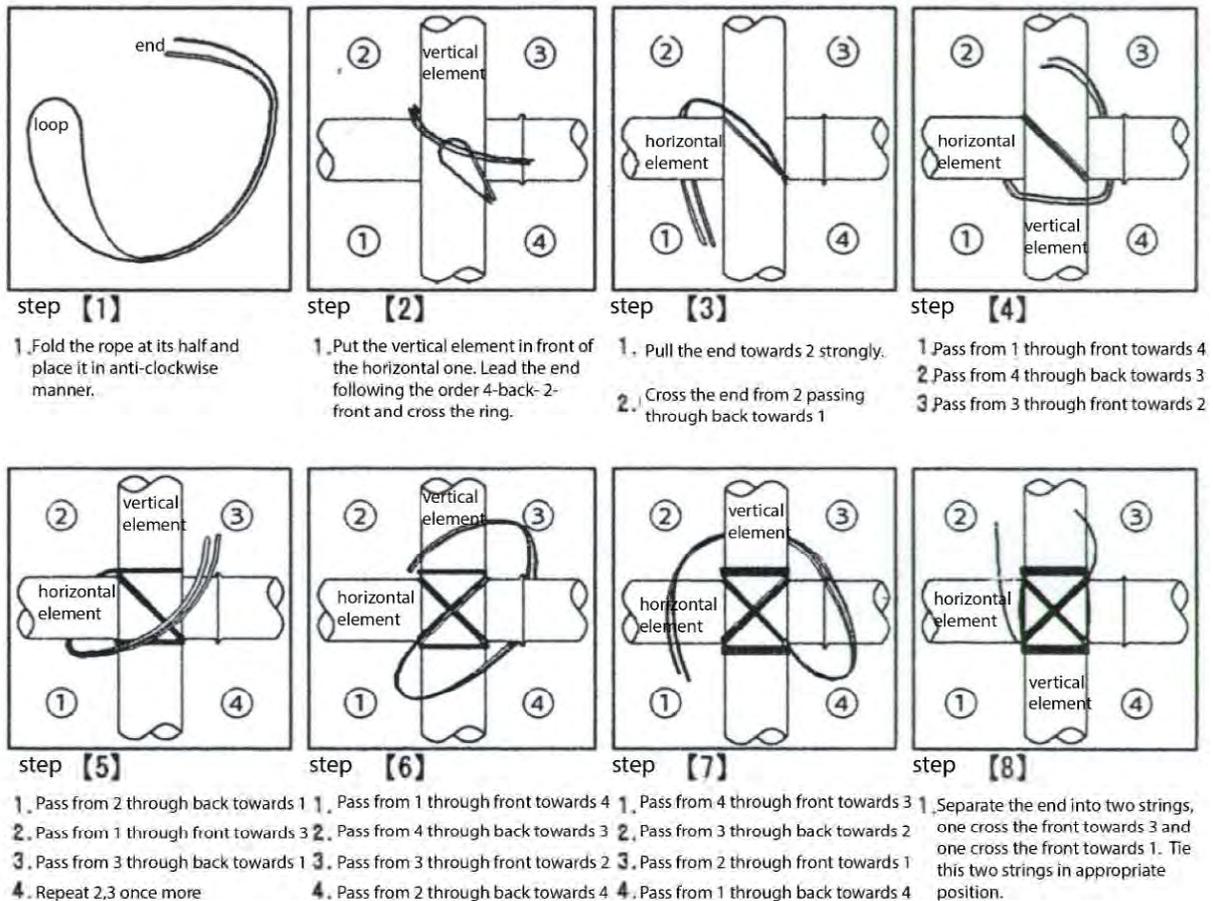


Figura 379. Metodo di legatura diagonale, in TAKUO NAGAI, HIROKAZU TOKI, *Design and construction of emergency building made of bamboo material.*



Figura 380. A sinistra. Il nodo di partenza consiste nell'utilizzo di un doppino. La parte finale del doppino incrocia le canne e passa all'internodel cappio formatosi.

Figura 381, 382. In mezzo, a destra. Dal quadrante 2 passando sotto la canna orizzontale si compie un giro diagonale completo



Figura 383. A sinistra. Dal quadrante 2 si passa sotto la canna orizzontale al quadrante 1, successivamente si passa sopra la canna verticale dal quadrante 1 al quadrante 4.

Figura 384. In mezzo. Dal q. 4 si passa sotto la canna orizzontale al quadrante 3. Si stringe forte.

Figura 385. A destra. Dal q. 3 si passa sopra la canna verticale al quadrante 2.



Figura 386. A sinistra. Dal quadrante 2 si passa sotto la canna orizzontale al quadrante 1.

Figura 387. In mezzo. Dal q. 1 si incrocia passando sopra le canne al q. 3. Si ripete l'operazione per due volte.

Figura 388. A destra. Dal q. 1 si passa sopra la canna orizzontale al q. 4



Figura 389. A sinistra. Dal q. 4 si passa sotto la canna orizzontale al q. 3, sopra la canna verticale al q. 2, si incrocia dal q. 2 al q. 4 passando sotto le canne. Successivamente si passa sopra la canna orizzontale dal q. 4 al q. 3

Figura 390. In mezzo. Dal q. 3 si compie un giro di strozzamento attorno alla legatura fermandosi al q. 4.

Figura 391. A destra. Nel q. 4 il doppino viene diviso nei due capi.



Figura 392. Infine si esegue un nodo piano di chiusura con i due capi.

Le due legature presentano lo stesso risultato nonostante la seconda (apparentemente) si dimostra più resistente della prima forse per via della legatura eseguita con doppino.

La legatura di Canyonviva è stata completata con un nodo parlato triplo e successivamente con un nodo piano di chiusura, mentre la legatura giapponese è stata conclusa direttamente con il nodo piano.

Si è notato che:

- La chiusura con nodo parlato risulta più sicura rispetto a quella con solo nodo piano.
- Le rotazioni attorno all'asse della canna non sono consentite così come le traslazioni.
- Le rotazioni di una canna attorno all'asse dell'altra sono consentite in assenza di un secondo vincolo. Il nodo in questo caso si comporta come una cerniera.

Questo tipo di legatura permette di unire due elementi che si intersecano con angolo compreso tra  $90^\circ$  e  $45^\circ$  e si presta bene per sistemi costruttivi come telaio e arco. Viene impiegato anche nella costruzione di ponteggi visti già nel Cap. 2.



Figura 393. A sinistra. Telaio realizzato con nodo diagonale tramite corda in canapa e corda in poliestere.

Figura 394. A destra. Struttura per ponteggi in bambù legato. Probabile impiego della legatura diagonale o quadrata per le connessioni delle canne, <https://www.istockphoto.com/it/immagine/bamboo-scaffolding?media-type=photography&phrase=bamboo%20scaffolding&sort=mostpopular>

Nella figura 393 si nota che tre nodi sono stati realizzati con la corda in juta, mentre l'ultimo con quella in poliestere (bianca). A differenza della corda in sisal (utilizzata per il nodo parlato) la corda in juta, una volta ben stretta, risulta meno scivolosa.

La corda in juta è stata immersa nell'acqua prima del suo impiego al fine di osservare il comportamento: una volta completata la legatura la corda tende a stringersi e il nodo risulta ben saldato.

Si tenga presente che le canne utilizzate sono state eccessivamente limate, privandole della sporgenza utile sui nodi. La limatura deve essere leggera. Non ci devono essere nodi spigolosi ma contemporaneamente è utile la presenza di una piccola sporgenza che non permette lo scorrimento della corda in caso di piccoli movimenti (situazione mai verificatasi nei fasci di Canyonviva).

La legatura diagonale differisce da quella quadrata solo dal punto di vista estetico. Richiede attenzione e praticità nell'esecuzione in modo che i giri di corda risultino omogenei e simmetrici.

## 5.4 [3° NODO] LEGATURA PER TREPIEDE

Questo tipo di legatura, vista nel Par. 3.6, è stata utilizzata per la costruzione della Ujung Alang community center. È utile per legare tre canne ad angolazione variabile. Viene impiegata anche per la costruzione di ponteggi in oriente, come quelli visti nel Capitolo 2, adottando la legatura bipiede che è uguale alla treppiede ma diversa per il numero di canne.

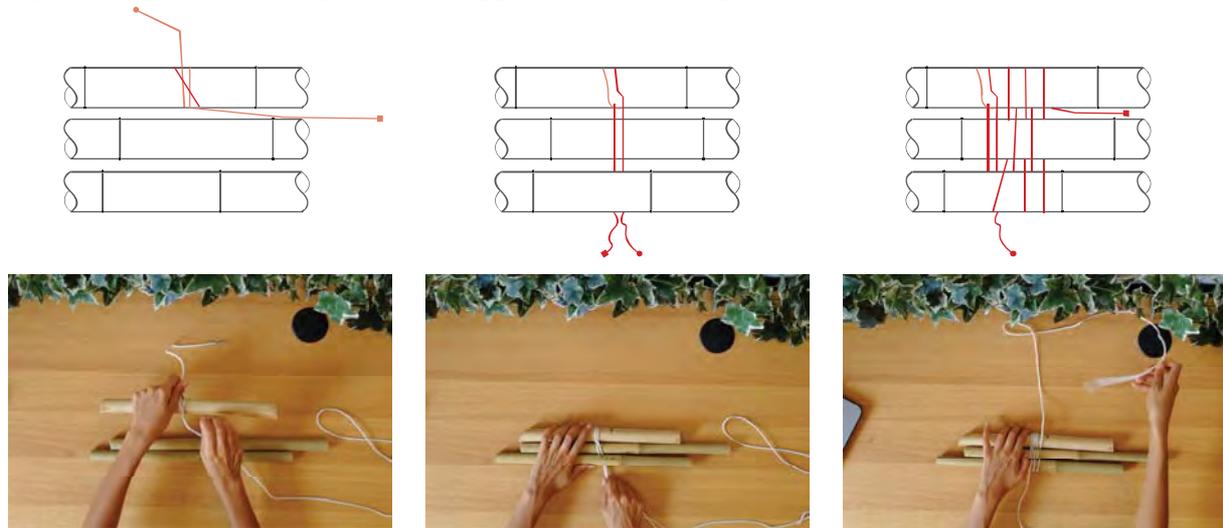


Figura 395. A sinistra. La legatura ha inizio con un nodo parlato semplice eseguita su una canna.

Figura 396. In mezzo. I due capi attraversano le canne prima sopra e poi sotto l'ultima.

Figura 397. A destra. A questo punto si fanno compiere al corrente dei giri attorno alle canne che si alternano una volta sopra e una volta sotto, fino a ottenere la forma raffigurata in cui il corrente è passato sotto l'ultima canna dall'esterno e si trova tra le due canne più esterne rispetto a chi esegue la legatura.

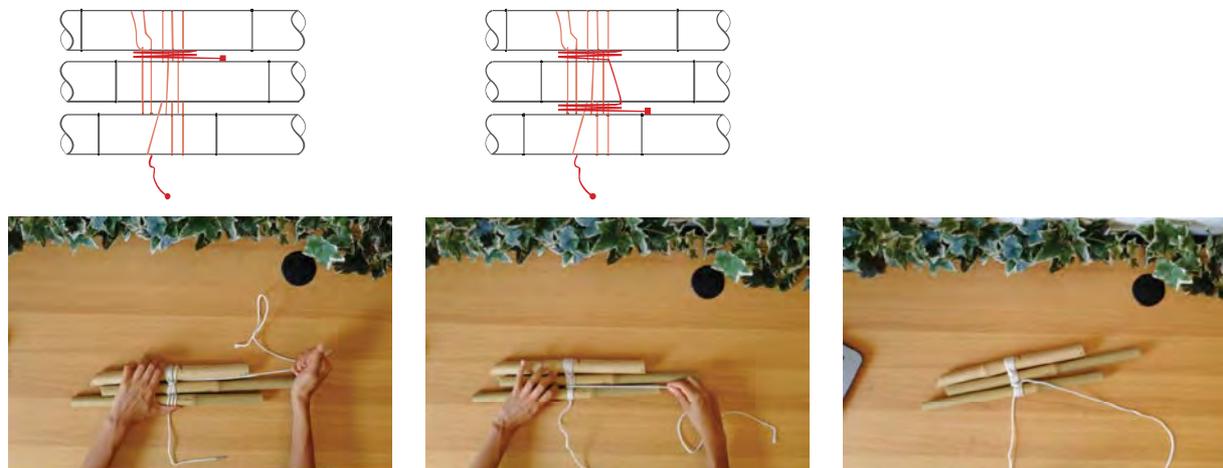


Figura 398 399. A sinistra, in mezzo. Si fa fare al corrente due giri di strozzamento attorno alla corda come in figura. Lo stesso procedimento viene eseguito tra le altre due canne.

Figura 400. A destra. Si esegue un nodo parlato di chiusura.

Il nodo realizzato su tre elementi si comporta come una cerniera consentendo solo la rotazione. È utile laddove si hanno elementi con diversa inclinazione tra loro. Si veda il caso di Ujung Alang.



Figura 401. A sinistra. Legatura treppiede realizzata.

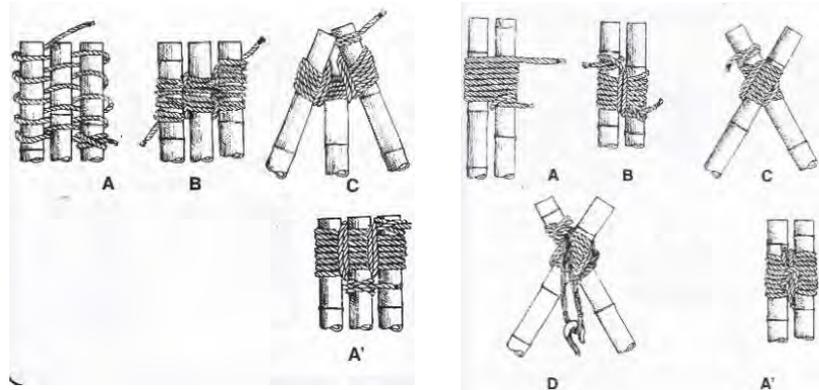


Figura 402. A destra. Differenza tra legatura treppiede (sinistra) e legatura bipiede (destra).

Il sistema strutturale visto nel Capitolo 2, impiegato per la realizzazione dei ponteggi in bambù e corda, potrebbe utilizzare la legatura triplo parlato oppure quella bipiede (che garantisce maggior attrito dovuto al passaggio della corda tra le canne) per legare le canne parallele, e utilizzare la legatura diagonale per legare le canne trasversali come si vede nelle seguenti figure.



Figura 403. A sinistra. Ponteggi in bambù legato con legatura bipiede e obliqua, <https://www.cpjobs.com/hk/article/skilled-bamboo-scaffolding-craftsmen-can-earn-attractive-wages-hong-kong's-construction>;



Figura 404. A destra. Ponteggi in bambù legato con legatura diagonale, <https://www.shutterstock.com/search/bamboo+scaffolding>.



Figura 405. A sinistra. Operatore che lega le canne di bambù, <https://www.sbs.com.au/news/small-business-secrets/article/2016/08/12/booming-bamboo-business>



Figura 406. A destra. Operatori sui ponteggi, <https://www.independent.co.uk/property/house-and-home/hong-kongs-spiders-stick-to-bamboo-scaffolding-1825044.html>

## 5.5 [4° NODO] CONNESSIONE DI DUE ELEMENTI PERPENDICOLARI GIACENTI SULLO STESSO PIANO

Finora sono stati scelti nodi impiegati nei casi studio analizzati, al fine di dimostrare la loro facilità e praticità di esecuzione oltre alle ottime risposte contro le sollecitazioni.

Si volge ora l'attenzione a uno dei nodi riportati nelle tabelle del Capitolo 3, considerati da un punto di vista puramente teorico, la cui fonte risale al lavoro di K. Dunkelberg. In particolare, il nodo scelto per il 4° esperimento è caratterizzato da due elementi perpendicolari giacenti sullo stesso piano; fa uso di uno spinotto di bambù e di due fori eseguiti sulla canna verticale attraversati dallo spinotto.



Figura 407. Legatura per elementi perpendicolari tra loro e giacenti sullo stesso piano.

Si vede di seguito la realizzazione e il comportamento della connessione.

La realizzazione del nodo è avvenuta in due fasi: nella prima si è proceduto all'esecuzione del taglio a "bocca di pesce", in prossimità del nodo della canna verticale; nella seconda è stata eseguita la legatura come in figura 407.

Nella figura 408 si riportano i materiali e gli strumenti utilizzati per la realizzazione del giunto. Le due sezioni di canna presentano due nodi e sono di dimensioni simili. Gli spinotti in bambù hanno una lunghezza di circa 15 cm. La lima e il coltellino sono stati utilizzati per scolpire, modellare e limare le estremità della canna e la cavità del taglio per un appoggio ottimale della canna orizzontale. Il seghetto rigido è servito a completare il taglio diagonale.

Nella figura 409 è presente la sega utilizzata per l'esecuzione del taglio trasversale della canna, mentre il trapano è servito per la foratura della canna.



Figura 408, 409. A sinistra, a destra. Materiali e strumenti utilizzati per realizzare la connessione.

Il primo passo per la realizzazione del taglio a “bocca di pesce” è quello di disegnare sulla canna i tracciati del taglio, come si vede in figura 396.

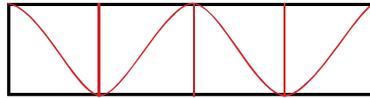


Figura 410. A sinistra. Disegno sulla canna della geometria del taglio a “bocca di pesce”, realizzata a distanza di circa 2 cm dal nodo della canna.

Figura 411, 412. In mezzo, a destra. Schema della geometria da disegnare sulla canna: due linee orizzontali, quattro linee verticali ugualmente distanziate, e quattro diagonali. Disegno del taglio.

Si realizza la “bocca di pesce” in tre passaggi: un taglio trasversale alla canna; due tagli longitudinali; quattro tagli diagonali.



Figura 413. A sinistra. Taglio lungo il tracciato orizzontale.

Figura 414. In mezzo. Taglio lungo il tracciato verticale.

Figura 415. A destra. Taglio delle diagonali.

Si procede limando i bordi della sezione tagliata e modellando tramite il coltellino fino a quando la “bocca di pesce” risulti una “sede” perfetta nella quale viene inserita l’altra canna “ospite”.

Successivamente si procede con la foratura della canna utilizzando un trapano e 3 punte: la prima con diametro 4 mm, la seconda di 6 mm e l’ultima di 8 mm, forandola gradualmente al fine di evitare fessurazioni longitudinali.

Si tagliano alcune sezioni delle canne di bambù aventi 8 mm di diametro, utili come spinotti che vengono inseriti nei fori. Occorre trovare lo spinotto che riesce ad attraversare i fori e incastrarsi tra essi, senza scorrere via.



Figura 416. A sinistra. Foratura della canna mediante trapano, eseguita prima da un lato e poi dal lato opposto al fine di non frastagliare le fibre.

Figura 417. In mezzo. Canna tagliata con forma a “bocca di pesce” e forata. Spinotto in bambù che attraversa il diametro della canna.

Figura 418. A destra. Elementi pronti per essere legati.

Si passa ora alla fase della legatura. Si realizza un nodo parlato semplice di partenza, attorno alla canna verticale, tra il nodo della canna e lo spinotto orizzontale di bambù, e lo si chiude con un nodo piano.

Una volta serrato il capo morto (estremità della linea rossa indicata con pallino pieno) si procede allo svolgimento della legatura. Si compiono tre giri verticali e sei giri orizzontali (trasversali agli elementi), che si alternano passando una volta davanti alla canna e una volta dietro a essa. L'obiettivo è quello di contrastare le sollecitazioni indicate nella figura 405 tramite la legatura.

Si riporta quanto detto teoricamente nella tabella della classificazione dei nodi al Capitolo 3: si considera il giunto sottoposto a sollecitazioni esterne di taglio ( $F_9, F_{10}, F_{13}$ ), di compressione ( $F_1$  e  $F_6$ ), di trazione ( $F_2$  e  $F_5$ ), e di flessione ( $F_4, F_3, F_7, F_8, F_{11}, F_{12}$ ); staticamente il giunto lavora a trazione, a compressione, a flessione e a taglio (lungo l'asse Y); non lavora a taglio lungo l'asse X; cinematicamente consente traslazioni lungo l'asse X; non consente rotazione e traslazioni lungo gli assi Y e Z; il giunto è flessibile.

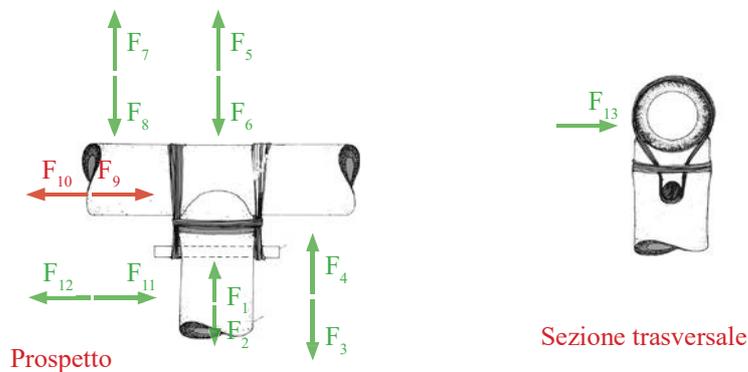


Figura 419. Giunto di due elementi perpendicolari giacenti sullo stesso piano. Si indicano le sollecitazioni a cui è sottoposto: il giunto lavora a quelle indicate con il colore verde.

Nelle seguenti figure si mostrano i passaggi eseguiti per la realizzazione della 4° legatura.

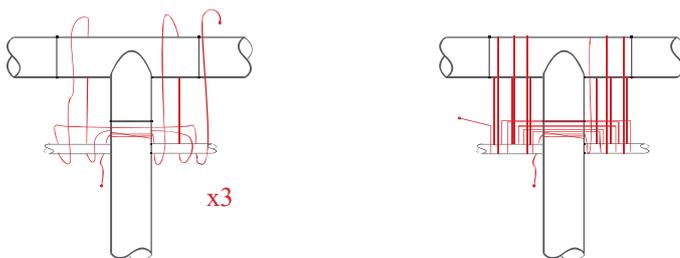


Figura 420 A sinistra. Il corrente, partendo dal lato destro del nodo, fa un giro attorno allo spinotto e un giro attorno alla canna orizzontale. Successivamente fa un secondo giro attorno allo spinotto per poi dirigersi in orizzontale verso il lato sinistro del nodo in cui vengono compiuti gli stessi movimenti. Una volta completato un giro, se ne fanno altri tre.

Figura 421. In mezzo. Legatura orizzontale che serve a stringere la legatura verticale.

Figura 422. A destra. Ogni giro deve essere estremamente tirato per mantenere la corda in massima tensione.

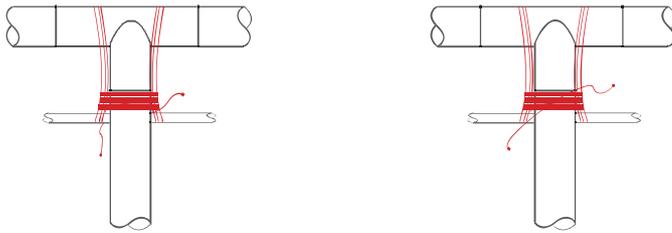


Figura 423. A sinistra. La legatura viene completata con un doppio giro orizzontale per “strozzare” le legature verticali, eseguito nello spazio tra lo spinotto e il nodo della canna verticale.

Figura 424. In mezzo. La legatura si conclude con un nodo piano di chiusura tra corrente (che si trova sotto lo spinotto a sinistra) e dormiente (che si trova sopra lo spinotto a destra).

Figura 425. A destra. Verifica dei movimenti impediti dalla legatura.

Paragonando l’esperienza pratica all’analisi teorica delle sollecitazioni secondo la figura 405, si afferma che il nodo (a differenza di quanto affermato nella teoria) è rigido poiché contrasta tutte le sollecitazioni, in particolare la  $F_{10}$  e la  $F_9$ , indicate in rosso nella Figura 419.

La corda in juta non è stata bagnata, risultando molto rigida. La sua rigidità non permette di tirare in maniera ottimale la corda e si ha conseguente allentamento della legatura.

Si nota che la legatura è stata eseguita a metà internodo. Si consiglia di eseguirla su un nodo, con i giri di corda verticali di sinistra a sinistra del nodo della canna, stessa cosa a destra.

La connessione può essere utile anche secondo la Figura 426, nella quale l’elemento verticale può rappresentare un pilastro e quello orizzontale una trave.

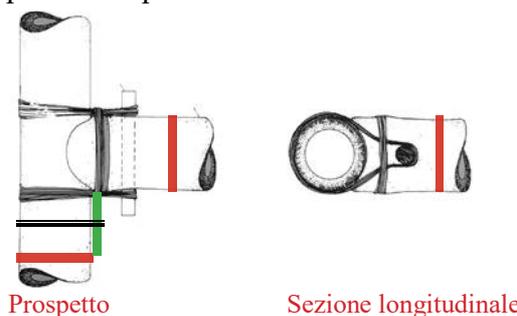


Figura 426. Legatura per elementi perpendicolari tra loro e giacenti sullo stesso piano.

Gli accorgimenti da tenere presente in questo caso sono:

- Realizzare la legatura vicino ai nodi delle due canne (indicati in rosso nella Figura 426) per evitare gli slittamenti dovuti alle sollecitazioni che gravano sull’elemento verticale, e per le fessurazioni longitudinali dovute al foro nell’elemento orizzontale. Oppure direttamente sul nodo come scritto precedentemente.

- Aggiungere (se necessario) una sezione corta di canna (indicata in verde nella Figura 426) avente funzione di sostegno per l’elemento orizzontale, mentre contrasta lo slittamento di quello verticale. Tale elemento aggiunto può essere legato all’elemento verticale tramite nodo utile a unire due canne parallele. La necessità di tale aggiunta può essere dovuta al fatto che non

sempre il nodo della canna coincide con il punto pensato per la legatura. A volte i nodi sono più lontani del previsto trattandosi di un materiale naturale. In tal caso questa aggiunta può sopprimere la mancanza del nodo in prossimità della legatura.

### 5.6 [5° NODO] CONNESSIONE DI TRE ELEMENTI NON PERPENDICOLARI GIACENTI SULLO STESSO PIANO

La connessione oggetto della 5° realizzazione è la n° 19 della tabella di classificazione dei nodi presente nel Capitolo 3. Essa è composta da tre elementi non perpendicolari e giacenti sullo stesso piano, si realizzano 6 fori attraverso i quali passano tre spinotti di bambù: due passanti per le canne oblique e uno per la canna verticale, come dimostrato in figura 427.



Figura 427. Legatura per 3 elementi non perpendicolari tra loro e giacenti sullo stesso piano.

Come nel caso precedente, non risultano impieghi in casi reali analizzati in questa tesi. Lo studio del nodo, effettuato nel Capitolo 3, è di natura teorica, e tramite questo esperimento si vuole verificare il comportamento secondo i ragionamenti sviluppati.

Il procedimento per la legatura è stato interpretato tramite l'osservazione dei giri di corda della figura 427.

Le canne sono state forate secondo la stessa procedura eseguita per il 4° nodo, così come sono stati utilizzati gli stessi materiali e strumenti.

In questo caso il taglio è diverso e corrisponde a quello rappresentato in figura 428.

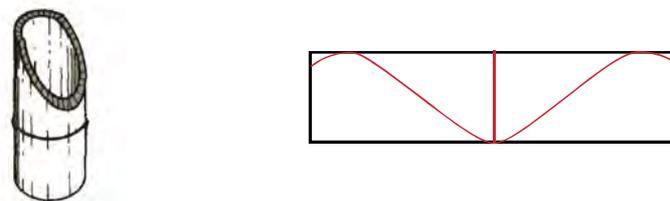


Figura 428. Taglio eseguito e schema del tracciato disegnato sulla canna.

Si riportano di seguito alcuni passaggi eseguiti per la legatura, senza illustrare il procedimento completo poiché tale soluzione non ha avuto un buon esito.

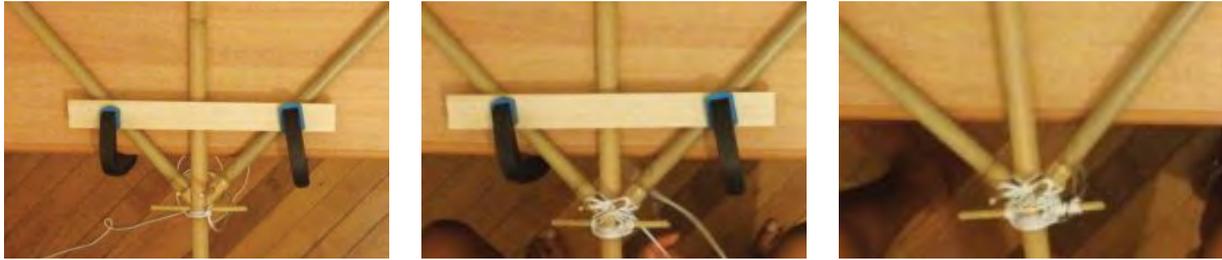


Figura 429. A sinistra. Inizio della legatura con nodo parlato di partenza.

Figura 430. In mezzo. La legatura è eseguita con una serie di avvolgimenti orizzontali e diagonali, speculari, della corda attorno alle canne e allo spinotto.

Figura 431. A destra. Legatura completata.

La geometria di questa connessione è simile ad altre viste nei capitoli precedenti (si vedano Figure 432, 433, 434), ma si nota che in nessuno di quei casi gli elementi giacevano sullo stesso piano.

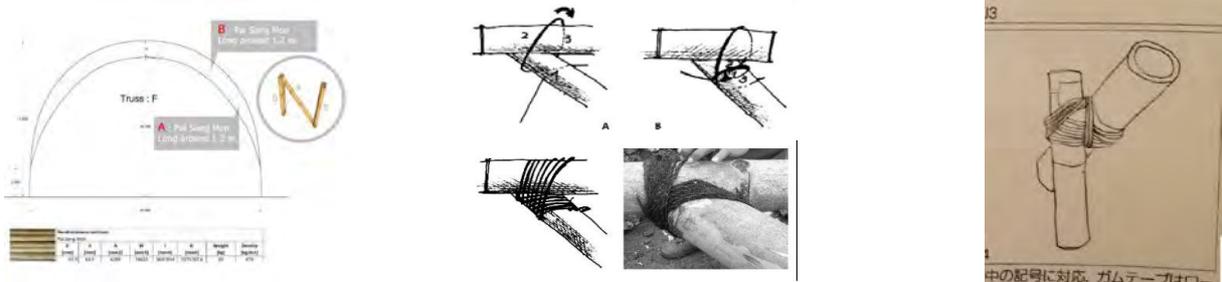


Figura 432. A sinistra. Panyaden school, elementi A e B della trave reticolare.

Figura 433. In mezzo. Ujung Lang, una delle connessioni realizzate.

Figura 434. A destra. Bamboo Ark, quarta tipologia di connessione.

Dopo aver realizzato la connessione la si è sottoposta ad alcuni sforzi, come quelli indicati nella figura 435, per verificare il suo comportamento.

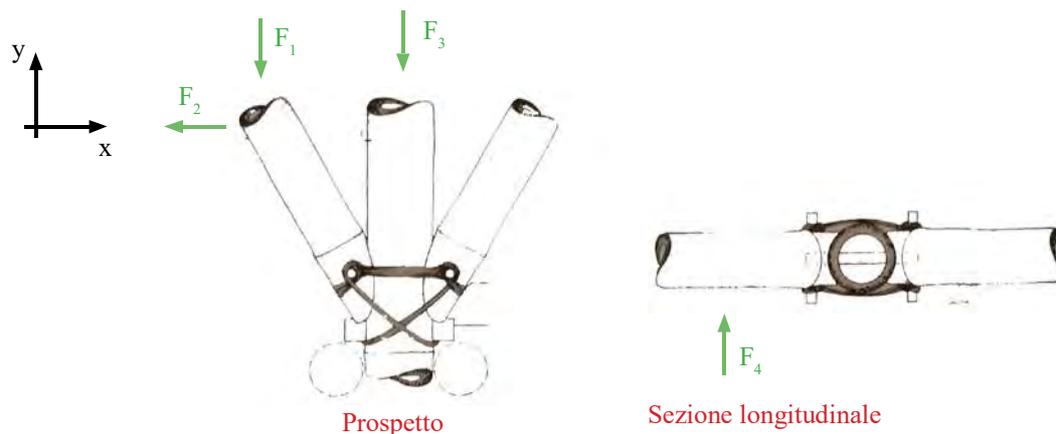
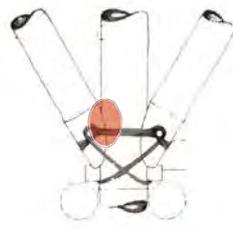


Figura 435. Le sollecitazioni a cui il nodo viene sottoposto.

In teoria il nodo è stato definito rigido, ma dopo la sua esecuzione si sono presentate le seguenti criticità:

- Sottoposta alle sollecitazioni  $F_2$  e  $F_3$  la legatura lavora.
- Sottoposta all'azione della forza  $F_1$ , la canna diagonale tende a perdere il contatto con la

canna verticale, nel punto indicato nell'immagine sottostante, allontanandosi da essa.



- Sottospota all'azione della forza  $F_4$  la legatura non lavora.

Questi aspetti negativi portano ad affermare che tale legatura non è adatta alla realizzazione di un nodo rigido in un sistema che richiama la geometria di una trave reticolare.

La maggior difficoltà riscontrata nell'esecuzione della connessione è stata quella di fare una connessione obliqua giacente sullo stesso piano.

La diagonale lavora discretamente sul piano  $xy$ , mentre sullo spazio non esegue il lavoro per il quale la si impiega, cioè quello di contrastare il taglio  $F_4$ .

Sono state pensate varie soluzioni alternative a questa connessione, osservando i casi studio analizzati, e soprattutto le connessioni eseguite nei ponteggi in bambù.

La geometria della connessione fa pensare a un suo utilizzo nel sistema della trave reticolare, composta da corrente superiore, corrente inferiore, montante e diagonale.

Se si riprende il 4° nodo (si veda Par. 5.5) si può dire che anche quello è parte di un sistema simile alla trave reticolare.

Date queste osservazioni si è deciso di realizzare questa connessione come un proseguimento del 4° nodo, volta alla realizzazione di un sistema simile alla travatura reticolare, il quale viene realizzato con bambù legato.

Per quanto riguarda l'asta obliqua si provano due soluzioni:

1) Impiego di una canna di bambù a sezione inferiore rispetto alle altre, che si inserisce da una parte in un foro eseguito sulla canna orizzontale e dell'altra in un foro eseguito su quella verticale. Si veda Figura 436 asta verde.

2) Impiego di una canna, non giacente sullo stesso piano delle altre e legata con nodo obliquo su queste ultime. Si veda Figura 437.

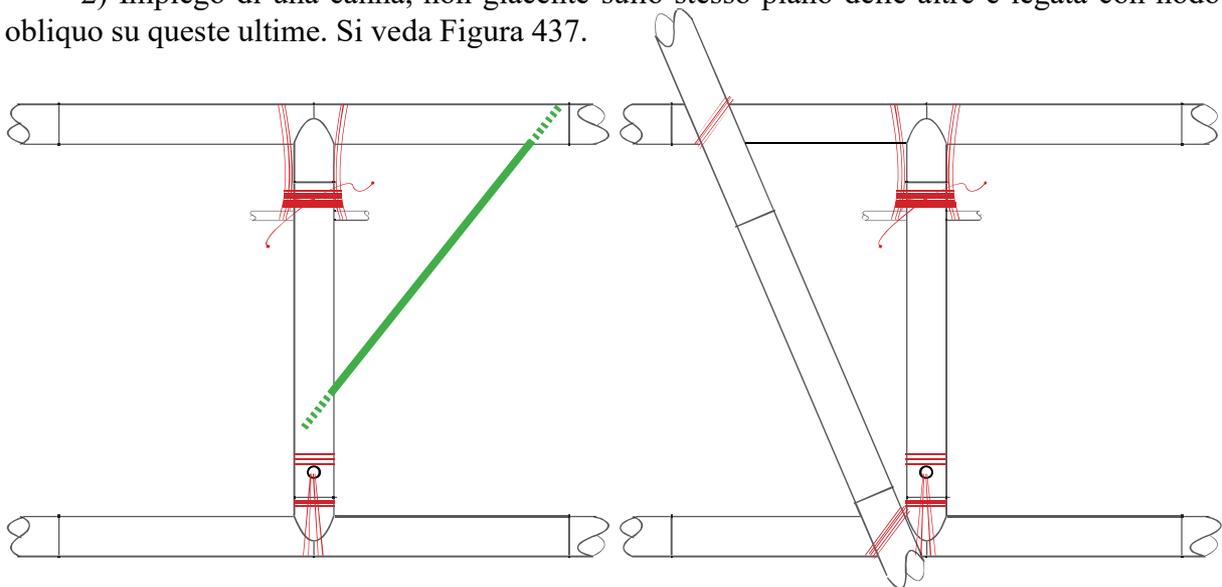


Figura 436. A sinistra. Prima soluzione con asta che passa per i fori delle canne orizzontale e verticale, inserendosi all'interno di esse.

Figura 437. A destra. Seconda soluzione con asta obliqua non giacente sul piano.

I materiali utilizzati per la realizzazione della connessione sono mostrati in figura 438, e sono:

- 1 canna avente 3 nodi (corrente superiore)
- 1 canna avente almeno 2 nodi (corrente inferiore)
- 1 canna avente 2 nodi (montante)
- 1 canna avente almeno 2 nodi (diagonale)
- 1 asticella di bambù (o canna di diametro inferiore alle altre in modo che riesca a inserirsi nei fori)
- Corda sintetica in polipropilene di diametro 3 mm.
- Corda in fibra di juta di diametro 2 mm, bagnata.
- Spinotti di bambù



Figura 438. Materiali utilizzati per la 5° connessione.

Per prima cosa sono state preparate le canne:

- Canna verticale (montante): taglio a “bocca di pesce” nelle due estremità e tre fori in prossimità dei nodi (in uno si inserisce l’asticella e negli altri due lo spinotto);
- Canna orizzontale (corrente superiore): un foro obliquo nell’estremità destra in prossimità del nodo, nel quale si inserisce l’asticella;



Figura 439. A sinistra. Foro perpendicolare alla canna, utile per l’inserimento dello spinotto.



Figura 440. A destra. Foro obliquo utile per l’inserimento dell’asticella in diagonale.

Per la connessione tra elemento verticale e elementi orizzontali si è utilizzata la corda in juta umida per donarle maggiore morbidezza nel momento della legatura e permettere di applicare maggior tensione ai singoli avvolgimenti della corda. Una volta asciutta, la corda si restringe e diventa molto rigida e resistente.

Una volta preparato il materiale si è proceduto alla realizzazione del sistema di connessione secondo i passaggi illustrati nelle successive immagini.



Figura 441. A sinistra. Asticella di bambù inserita nei fori della canna orizzontale e di quella verticale.

Figura 442. Realizzazione del 4° nodo dimostrata precedentemente.

Figura 443. Prima soluzione del sistema di connessione tra aste perpendicolari e oblique.

La soluzione che impiega l'asticella in bambù dimostra un comportamento ottimale nei confronti degli sforzi che possono giungere sulle canne. Il sistema è rigido, non consente movimenti nè sul piano nè nello spazio.

Si è proceduto alla seconda soluzione al fine di paragonare i due metodi: nel primo vengono utilizzati mezzi meccanici mentre nel secondo solamente legature oblique.

Si riprende la connessione a T realizzata precedentemente, giacente sullo stesso piano, e si lega un'altra canna orizzontale nell'estremità libera della canna verticale. Si esegue una legatura diversa da quella realizzata per il corrente superiore al fine di verificare quale sia la migliore



Figura 444. Confronto tra le legature possibili tra elementi perpendicolari giacenti sullo stesso piano. La legatura di sinistra è stata realizzata per la connessione tra montante e corrente superiore; la legatura di destra è stata realizzata per la connessione tra montante e corrente inferiore

La legatura che più dona equilibrio e resistenza al sistema di connessione tra due elementi perpendicolari giacenti sullo stesso piano è quella realizzata per il corrente superiore eseguita con avvolgimenti verticali attorno alla canna orizzontale (a sinistra e a destra del nodo della canna), servendosi dello spinotto, e con strozzature orizzontali attorno alla canna verticale.



Figura 445. A sinistra. Elemento verticale legato alle canne orizzontali mediante due metodi diversi.

Figura 446. In mezzo. Elemento diagonale legato alla canna orizzontale superiore mediante legatura obliqua con nodo parlato e nodo piano di chiusura.

Figura 447. A destra. Sistema di connessione tra elementi obliquo, orizzontale e verticale, tramite legature.

Si menziona per la prima volta la legatura obliqua. Essa si realizza al fine di connettere due aste tonde non perpendicolari tra loro, che si intersecano con inclinazione da  $30^\circ$  a  $45^\circ$ . È una legatura dritta. È stata realizzata secondo i seguenti passaggi illustrati nelle prossime figure.

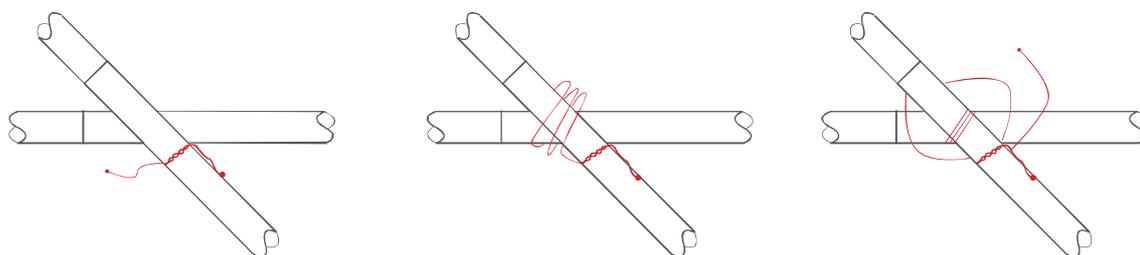


Figura 448. A sinistra. Si realizza un nodo boscaiolo di partenza sulla canna obliqua.

Figura 449. In centro. Si compiono un numero appropriato di spire che avvolgono entrambe le aste.

Figura 450. A destra. Si eseguono "strozzature" sull'incrocio dei pali stringendo fortemente a ogni mezzo giro

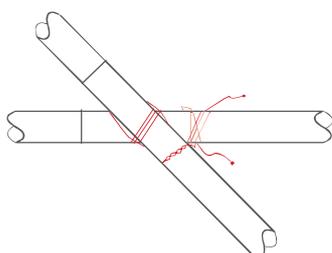


Figura 451. La legatura si conclude con il nodo parlato seguito da quello piano.

Il numero delle spire dipende dalle dimensioni della canna, dall'esperienza e da un eventuale calcolo di resistenza.



Figura 452. Soluzioni finali per il sistema di connessione tra aste orizzontali-verticali-oblique.

Entrambe le soluzioni sono rigide. Si nota che nella prima soluzione l'asta di sezione inferiore viene inserita nel montante, collegandolo al corrente superiore, prestandosi all'impiego laddove sia necessario distribuire carichi tra trave e pilastro o irrigidire un sistema a L; mentre nella seconda soluzione si collegano i due correnti tramite la canna obliqua. Quest'ultima soluzione sembra più resistente della prima in quanto la sezione di canna utilizzata per la diagonale è maggiore rispetto a quella utilizzata nella prima soluzione e ha il vantaggio di non indebolire le canne per via dell'esecuzione di fori; inoltre la realizzazione avviene in maniera più rapida in quanto non sono necessarie lavorazioni meccaniche.

# 6

## CONCLUSIONI

## 6.1 CONSIDERAZIONI GENERALI: domande, sfide, obiettivi e aspettative

In questa tesi è stato condotto uno studio approfondito su una tecnologia costruttiva sostenibile, molto comune in Oriente, che si basa sull'utilizzo del bambù come elemento strutturale e della corda come elemento di connessione.

A tal fine è stata condotta una breve ricerca teorica sulle proprietà meccaniche dei due elementi, usufruendo di testi specifici sull'argomento. Sono stati analizzati casi studio, dei quali uno inedito, localizzati in Thailandia, Giappone e Indonesia, paesi nei quali da secoli si esercita la tecnica del bambù legato su strutture di varie dimensioni; si è cercato di individuare e classificare le connessioni principali utilizzate in questi luoghi e di riflettere sul loro comportamento una volta sottoposte a sforzi.

Durante lo studio sono sorte domande di natura tecnica e motivazionale di seguito elencate:

- Come un giunto in legatura può sostituire un giunto rigido in materiale metallico?
- Come viene realizzato un giunto rigido in legatura?
- Qual è il livello di difficoltà nel realizzare una legatura efficace tra culmi di bambù?
- Quali dimensioni può avere un edificio costruito con bambù legato?
- Qual è la durabilità di una connessione in corda?
- Quale manutenzione necessita una connessione in corda?
- Come si comporta la corda sottoposta alle intemperie?
- Quali tipi di corda sono preferibili per realizzare la legatura: naturali o sintetiche?
- Il sistema nel suo insieme (tecnologia e realizzazione) può essere una soluzione da adottare per edifici di emergenza? Che valore sociale può rappresentare per la comunità?
- Che possibilità può avere la tecnologia di essere accettata nella cultura occidentale una volta dimostrata la sua fattibilità nel territorio europeo?

Pertanto, la sfida di questa ricerca è stata: mostrare la fattibilità delle costruzioni realizzate con giunti in legatura, i quali possono ambire a essere un'alternativa a connessioni metalliche che sono adottate per la maggior parte delle costruzioni contemporanee in bambù. In questo modo tali costruzioni potrebbero rappresentare un progetto sostenibile dal punto di vista ambientale e, magari, economico.

L'obiettivo del lavoro è stato quello di approfondire i metodi per la realizzazione di questo sistema costruttivo e di rispondere in maniera positiva alle domande iniziali, caratterizzate da dubbi, perplessità, e diffidenza verso una tecnica poco conosciuta in Occidente. Inoltre ha cercato di fornire un'analisi dettagliata sulle costruzioni contemporanee in bambù e corda, attraverso la raccolta di dati oggettivi, di fatti e di esperienze dirette sul campo con la collaborazione di professionisti del settore. Infine, l'approfondimento si è concluso tramite una ricerca personale qualitativa sui nodi in legatura.

L'aspettativa è stata quella di affermare con certezza la reale possibilità di costruire una struttura in bambù con connessioni in corda, nella quale i giunti sono rigidi e la struttura è conforme gli standard internazionali.

L'Architettura per il progetto sostenibile che si studia in questa tesi appartiene a una piccola nicchia delle costruzioni sostenibili, e presenta una personalità genuina dal punto di vista del materiale naturale utilizzato e della tecnologia applicata, la quale non adotta attrezzature meccaniche ma si serve solo della manodopera dell'uomo.

Tale Architettura può essere ottimale nei scenari post calamità naturali nei quali nasce l'immediata esigenza di ricostruire spazi vivibili in tempi brevi e a basso costo. Tale bisogno può essere soddisfatto tramite la presa di posizione degli abitanti delle regioni colpite, che possono diventare gli attori protagonisti della scena (il culmo di bambù si presenta già in natura come elemento strutturale e non ha bisogno di lavorazioni per diventare tale; inoltre è leggero e pertanto consente la raccolta e il trasporto anche da parte di una sola persona).

Il sistema bambù e corda è ideale per la costruzione di strutture temporanee di emergenza, come si è visto nel caso del Bamboo Ark per opera dell'architetto Toki Hirokazu. Al contempo, se opportunamente trattato, il sistema può essere adottato per edifici permanenti, come nel caso della Panyaden Internation School su progetto di Markus Roselieb.

## 6.2 QUADRO SINTETICO DEI RISULTATI

I casi studio presentati in questa tesi hanno mostrato la concreta possibilità di realizzare strutture con bambù e corda.

Si pensa alla struttura Bamboo Ark costruita da studenti e volontari in appena 30 giorni, a seguito di uno tsunami che ha colpito la regione giapponese. La velocità nell'elaborare l'idea e nel realizzarla è stupefacente, ed è dovuta principalmente all'esperienza degli abitanti locali nel realizzare le legature e alla maturità del progettista che, conoscendo a dovere il materiale locale, sa che il progetto avrà esito positivo. Infatti, anche i test sul materiale sono stati condotti in tempi brevi, e hanno rivelato risultati soddisfacenti per la realizzazione della struttura. Il progetto della connessione dimostra la possibilità di realizzare un giunto rigido in legatura capace di resistere a un carico di rottura pari a 6000 N/mm (tramite nodo "notched"). Tra le varie combinazioni di giunti testate, fu sufficiente il metodo di connessione costituito solo da corda ed eseguito con legatura diagonale. La connessione adottata presenta una resistenza media di 2690 N/mm. Per confronto, secondo la NTC 14/01/2008, i bulloni per giunzioni devono presentare tensioni di snervamento  $f_{yb}$  comprese tra 240 N/mm<sup>2</sup> e 900 N/mm<sup>2</sup> a seconda della classe, e tensione di rottura  $f_{tb}$  compresa tra 400 N/mm<sup>2</sup> e 1000 N/mm<sup>2</sup> a seconda della classe.<sup>116</sup>

La forma dell'arco in bambù e le connessioni adottate hanno permesso di realizzare una struttura avente luce di 17 m circa e una superficie di 176 m<sup>2</sup>.

I culmi non hanno patito le intemperie locali e la struttura costruita nel mese di ottobre del 2011 è tuttora in ottime condizioni di utilizzo.

Il giovane architetto inglese Jonathan Cory Wright, amante dell'architettura naturale, ha voluto sperimentare qualcosa di simile anche in Europa, ed è riuscito a creare un metodo di costruzione nuovo e codificato che consente di realizzare archi strutturali in fasci di bambù di dimensioni diverse e legati con corda. Nell'architettura di Cory Wright vari archi compongono un sistema di archi connessi tra loro con corda, e creano una struttura dalle forme libere. Ragionando ancora una volta su uno scenario post catastrofico, il sistema che meglio si avvicina all'immagine di uno spazio vivibile temporaneo, che può essere realizzato in tempi brevi e per manodopera di una persona non specializzata, è quello della Domo, un sistema a cupola (Domo NBDA, Domo Burriana, Domo Sant Joan, Domo Canevillage)<sup>117</sup>. Il metodo di Cory Wright non richiede particolari abilità e conoscenze sul campo ingegneristico da parte di chi lo realizza, nè di forza fisica. È un metodo semplice ma richiede regole e passaggi precisi per la realizzazione

<sup>116</sup> [http://people.dicea.unifi.it/gianni.bartoli/normative/DM\\_14.01.08\\_NTC.pdf](http://people.dicea.unifi.it/gianni.bartoli/normative/DM_14.01.08_NTC.pdf), consultato il 04/09/2018.

<sup>117</sup> [https://issuu.com/alessandraranesi/docs/portafolio\\_cv](https://issuu.com/alessandraranesi/docs/portafolio_cv), consultato il 05/09/2018.

di una struttura sicura. Tali regole derivano dai test eseguiti sull'arco in fasci di canne, i quali rivelano la sua resistenza a fronte di determinate prove di carico eseguite quali: flesso-comprensione e flessione. I risultati dimostrano che un arco in fasci di canne di *Arundo donax* con luce di 3,25 m e sviluppo di 5 m, sul quale grava un carico concentrato di 1200 N posizionato sulla chiave, l'arco lavora entro il limite elastico, presentando deformazione massima di 46 mm e modulo di rigidezza di valore compreso tra  $0,99 \sim 1,25 \times 10^8 \text{ N} \cdot \text{mm}^2$ .

La legatura adottata per questo metodo è quella diagonale, simile alla legatura impiegata per il Bamboo Ark, e rappresenta un nodo rigido.

L'opera migliore per dimensione e durabilità, realizzata fino a oggi, è quella di Casa Laila costruita nel 2013 a Malaga come spazio multifunzionale. La struttura copre una superficie di 100 m<sup>2</sup>. È tuttora in utilizzo ma necessita di costante manutenzione poiché dopo due anni dalla costruzione ha presentato piccole fessurazioni nelle canne di *Arundo donax*.

Per ultimo, ma non meno importante, sono i benefici psicologici ottenuti dall'esperienza diretta sull'intero processo costruttivo con il materiale naturale. La relazione che si è creata dal contatto diretto tra l'individuo e la pianta ha prodotto benefici psicologici quali benessere e rilassamento. Inoltre è stato possibile percepire i limiti naturali del materiale e di accumulare conoscenza ed esperienza sulle possibilità di impiego.

Il Bamboo Sports Hall per la Panyaden Internation School, costruito nel 2017 in una zona fortemente sismica, può essere considerato un'icona delle straordinarie caratteristiche naturali del bambù (resistenza e flessibilità, introvabili in altri materiali) e della sua bellezza estetica. È una dimostrazione delle capacità meccaniche di una specie non gigante. Tali capacità lo rendono idoneo per un'opera di dimensioni simili a quelle di questo progetto: l'arco maggiore presenta una luce di 17 m e un'altezza di 11 metri circa; la superficie della costruzione è pari a 962 m<sup>2</sup>.

Il progetto strutturale effettuato dall'ingegnere Esteban Morales Montoya dimostra che il sistema costruttivo del Bamboo Sports Hall soddisfa i requisiti richiesti dei codici edilizi della Thailandia e di quelli internazionali. Tutti i nodi della struttura sono rigidi.

Il sistema ingegneristico contemporaneo ideato per il progetto si ispira a quello degli archi in fasci di canne le quali sono connesse tramite legatura lungo l'intero sviluppo del fascio. Gli archi in questo sistema rappresentano i correnti della travatura reticolare nella quale montanti e diagonali sono anch'essi costituiti da canne di bambù. Questi ultimi sono connessi tramite elementi metallici.

In questo caso, diverso dai primi due soprattutto per la dimensione, l'esecuzione dei giunti tramite bulloni richiede il lavoro di operatori specializzati, annullando la possibilità di praticare l'autocostruzione. D'altro canto le legature sono di facile esecuzione e sono presenti in quantità nettamente superiore rispetto a quella di bulloni impiegati. La struttura è permanente e non ha bisogno di manutenzione. L'aspettativa è che tale opera, eccezionale per l'innovazione sull'utilizzo del materiale naturale e del sistema costruttivo, duri fino a 50 anni grazie al trattamento chimico eseguito sulle canne.

La peculiarità del bambù di essere flessibile non offusca la possibilità di essere impiegato anche come asta dritta nelle strutture con sistema a telaio. È questo il caso del Community Center costruito a Ujung Alang, Indonesia, nel 2005, che ha già compiuto 10 anni di vita. La composizione architettonica richiama forme vicine a quelle occidentali tramite pilastri, travi e capriate. Tutti gli elementi sono connessi con corda in *juta*. Le connessioni sono state realizzate dagli abitanti locali i quali curano anche la manutenzione di tutta la costruzione.

Eko Prawoto, architetto dell'opera, ha trovato un compromesso tra design contemporaneo e conoscenze locali, in un contesto sociale, quello dell'Indonesia, che presenta fazioni molto ricche e altre estramente povere. Nella cultura del paese il bambù è visto come materiale dei

poveri e nelle grandi città si preferisce adottare il calcestruzzo armato rispetto la ricca risorsa locale.

Il progetto di Prawoto, oltre a dimostrare risultati eccellenti della tecnologia con bambù legato, rappresenta un'architettura integrata con il contesto ambientale, culturale, economico, inoltre esercita il valore sociale con il coinvolgimento di tutta la comunità nelle scelte e nella realizzazione delle opere.

Le costruzioni in bambù e corda presentano metodi, dimensioni e durabilità diversi tra loro, ma allo stesso tempo esse sono concettualmente simili. Il lavoro finale presentato in questa tesi è consistito nello svolgimento dei principali nodi in legatura visti nei casi studio, scelti affinché potessero rappresentare soluzioni diverse a seconda dell'impiego necessario. L'obiettivo è stato quello di scoprire il metodo di esecuzione della legatura, verificare il livello di difficoltà, osservare il comportamento del giunto (rigido o flessibile) e quello di corde di natura diversa.

I risultati di questa ricerca hanno presentato aspetti positivi per 5 casi su 6 per quanto riguarda il comportamento del giunto (rigido nei casi in cui ci si aspettava questa risposta, flessibile nei casi in cui era quella l'aspettativa); è stata confermata la facilità di esecuzione della legatura che al contempo necessita l'utilizzo di strumenti adatti, e l'esperienza manuale con il materiale al fine di realizzare un buon giunto fino ad arrivare ad avere rapidità nell'esecuzione.

L'ultimo esperimento ha avuto esito negativo. La soluzione trovata per tale giunto è derivata da vari ragionamenti sulla geometria del nodo e sul possibile impiego. Il risultato sembra rispondere positivamente alle aspettative pensate per il sistema. Non resta altro che proseguire testando quest'ultimo con macchinari e adottando materiali scelti accuratamente.

Infine, i giunti risolti tramite solo legatura si sono rivelati più semplici da realizzare rispetto a quelli eseguiti con l'utilizzo di attrezzatura meccanica poiché richiedono tecniche di estrema precisione nell'esecuzione dei fori e dei tagli caratterizzati da geometrie diverse.

Il taglio a "bocca di pesce" deve essere realizzato con molta cura poiché l'incastro della canna ospite deve essere perfetto, o si rischia di non avere le superfici delle due sezioni di canne a contatto. Oltre alla facilità di esecuzione dei nodi realizzati solo in legatura vi è anche la rapidità e la praticità che li caratterizza: aspetti fondamentali per opere che implicano montaggio e smontaggio frequente o intenzioni di smontaggio futuro.

Tra le corde utilizzate per la ricerca (esse sono state in sisal, in polipropilene e in juta), quelle che hanno permesso di realizzare legature più solide sono state le corde intrecciate. Queste ultime rispetto alla corda ritorta si sono rivelate più gradevoli al tatto e più morbide nel momento in cui si tirava ogni singolo giro di corda. La corda naturale in *juta* è stata bagnata prima di essere utilizzata, e una volta asciutta non ha presentato un comportamento diverso rispetto alla corda sintetica, anzi, si è dimostrata leggermente più rigida rispetto quest'ultima.

L'ideale è avere morbidezza mentre si compiono i giri di legatura e rigidità una volta completato il nodo. Le legature realizzate con le corde in sisal e polipropilene hanno dimostrato di riuscire a conservare la tensione attribuite a esse nel momento della legatura. I nodi non si sono mai sciolti se non quando manomessi.

### 6.3 FATTIBILITÀ DELLA TECNOLOGIA IN BAMBÙ LEGATO

*“Qual è la fattibilità di un sistema costruttivo che utilizza culmi di bambù come elemento strutturale, e adotta la corda come elemento di connessione?”*

#### **Fattibilità tecnica e normativa**

Tutti i progetti presentati dimostrano la fattibilità tecnica della tecnologia costruttiva in bambù con connessioni in corda, adottata per diversi sistemi costruttivi: archi, telai e capriate. La tecnologia è attuabile non solo per edifici di piccole dimensioni, anzi, si è visto il suo impiego anche su grandi costruzioni.

Secondo i risultati, la corda è un elemento di connessione capace di resistere ai carichi minimi di progetto per le singole strutture presentate; un metodo di legatura adeguato consente di ottenere un giunto rigido tra canne di bambù.

Questi risultati sono coerenti con l’aspettativa inizialmente espressa nell’elaborato, secondo la quale si afferma la realizzabilità di strutture in bambù con connessioni in corda i cui giunti sono rigidi.

Il campo normativo rappresenta il “tallone d’Achille” della tecnologia, ma tale debolezza non ha impedito la realizzazione di opere come Bamboo Ark e Bamboo Sports Hall.

Nel caso del Bamboo Ark, al fine di soddisfare gli standard di legge sulle costruzioni per un edificio temporaneo a uso pubblico, sono stati eseguiti test sugli elementi della struttura raggiungendo un esito che permise di ottenere un permesso di costruzione. Tale licenza prevedeva una durata per la struttura di 4 anni, fino a quando un nuovo spazio d’incontro fosse costruito.

Si è visto che per il Bamboo Sports Hall è stato redatto un calcolo strutturale dettagliato che dimostra la fattibilità strutturale nei confronti delle azioni del vento e dell’azione sismica, fino ad affermare che: *“la struttura è stata progettata per avere un’adeguata rigidità al fine di resistere ai carichi minimi di progetto richiesti dalle normative”* Esteban Morales Montoya.

#### **Fattibilità economica**

La fattibilità economica non è stata approfondita in questo lavoro ma si possono elencare alcuni punti che hanno reso i progetti vantaggiosi dal punto di vista economico. Ad esempio:

- Utilizzo di materiali naturali locali per l’intera costruzione.
- Impiego di un materiale che per natura non ha bisogno di lavorazioni per diventare un elemento strutturale poiché si presenta come un profilato naturale cavo a sezione circolare.
- Utilizzo di corde per le connessioni con la possibilità di impiegare corde in fibra naturale.
- Possibilità di poter contare su operatori volontari data l’accessibilità alla tecnica delle legature e la leggerezza del materiale, in particolare per costruzioni di emergenza post alluvioni, terremoti, calamità naturali.

#### **Fattibilità organizzativa e sociale**

Per tale aspetto si può far riferimento in particolare a due progetti: la costruzione di CanyaViva e il Bamboo Ark.

Per quanto riguarda il progetto di CanyaViva si trattava di costruire un’opera temporanea destinata per un evento culturale. Il tempo previsto per la realizzazione era di due mesi e non

era presente un'impresa di costruzioni: il cantiere era diretto dai responsabili dell'associazione CanyaViva con a capo l'architetto Jonathan Cory Wright. Non vi erano operatori specializzati se non i responsabili.

In sintesi, al fine realizzare la proposta progettuale nell'arco di tempo assegnato, il lavoro è stato così organizzato: è stato redatto un cronoprogramma dei lavori che è stato rispettato; si è suddiviso il cantiere per tipologie e fasi lavorative; sono stati costituiti gruppi di lavoro aventi ciascuno una specializzazione; gli operatori erano circa 20 e tutti erano volontari i quali hanno preso l'attestato di partecipazione al corso base sulla tecnica.

Con questo tipo di organizzazione è stato possibile realizzare la struttura.

Il progetto Bamboo Ark è stato realizzato nell'arco di 30 giorni; questo è stato reso possibile grazie alla manodopera di un gruppo di lavoro di 70 studenti così organizzati: circa 30 persone al giorno lavoravano sulla struttura a turni. I materiali furono ricercati nei dintorni dell'area e lo studio per la struttura dei giunti nacque attraverso ricerche e dialoghi con i pescatori locali mentre un gruppo si forniva del materiale necessario.

Per ottimizzare i tempi fu costruito un modello al fine di comprendere quale sarebbe stata la miglior forma per l'edificio.

Su idea degli studenti, successivamente alla realizzazione della struttura, è nata un'associazione per le costruzioni in bambù. Nella struttura si tengono lezioni didattiche sulla scrittura e lettura per bambini locali gestita dalla scuola privata Terakoya.

Hirokazu Toki: “non è mai stata una navigazione serena, ma non ci siamo mai arresi, neanche quando il tifone ha distrutto i telai nel mezzo della costruzione...ci siamo resi conto che anche se una persona non può far nulla, l'unità può fare qualsiasi cosa”. Questa affermazione fa riflettere sul valore sociale che caratterizza tale costruzione.

## **Fattibilità ambientale**

Il bambù è un materiale naturale straordinario anche per le caratteristiche della pianta. Tra gli aspetti ecologici principali si ha: crescita media giornaliera di 25 cm e raggiungimento della maturità utile per essere utilizzato come materiale da costruzione in 5 anni (molto pochi se paragonati al range di 15-30 che impiega un albero che produce legname per le costruzioni); incremento della biomassa nell'arco di un anno che varia dal 10% al 30% (gli alberi che producono legname da costruzione hanno un incremento di soli 2-3%); inoltre un bosco di bambù assorbe una quantità di 10-15 tonnellate di CO<sub>2</sub> per ettaro per anno, producendo circa 35% di ossigeno in più rispetto agli altri alberi.<sup>118</sup>

Queste qualità del materiale hanno permesso di mantenere molto bassa l'impronta di carbonio nei progetti presentati.

<sup>118</sup> <https://www.architetturaecosostenibile.it/materiali/bambu/bambu-materiale-da-costruzione-sostenibile-flessibile-resistente-454/>, consultato il 07/09/2018.

## 6.4 CONFRONTI TRA I PROGETTI

La presente tesi integra alcune letterature già esistente riguardanti nello specifico le connessioni in bambù e corda, il cui merito è dovuto principalmente a Klaus Dunkelberg, Frei Otto, Siegfried Gass, Oscar Hidalgo López. Gli studi precedenti hanno fornito importanti informazioni sulle tecniche di legature tra canne di bambù dimostrando la possibilità di realizzazione.

Tali concetti si riprendono in questa ricerca dove vengono presentati casi reali contemporanei che dimostrano la realizzabilità della tecnologia, soddisfacendo l'aspettativa iniziale.

Si confrontano i casi studio sia in base alle loro somiglianze che alle dissomiglianze che presentano. Ad esempio, il Bamboo Ark di Toki Hirokazu e la Casa Laila di CanyaViva sono concettualmente simili: struttura ad arco di bambù legato con corda.

Nel primo si vede l'utilizzo di singole canne che compongono l'arco, mentre nel secondo l'elemento strutturale è composto da un fascio di canne.

Tutti e due gli esempi presentano un altro punto in comune: l'utilizzo di materiale locale. Per il Bamboo Ark sono state impiegate la *Phyllostachys bambusoides* e la *Phyllostachys edulis* che sono specie locali. Per Casa Laila è stato adottato l'*Arundo donax* che è una specie autoctona mediterranea con caratteristiche simili al bambù.

Nonostante in un caso si parla di canne singole e nell'altro di fasci di canne, in tutti e due i casi si è adottato per la connessione tra gli elementi la legatura diagonale, con piccole differenze.

Il risultato ottenuto dal caso giapponese e da quello spagnolo è il medesimo sia dal punto di vista tecnico che funzionale.

Se si confrontano i due casi appena citati a quello del Bamboo Sports Hall, è subito evidente la differenza di quest'ultimo nella dimensione della sua struttura e nelle connessioni adottate.

Anche il Bamboo Sports Hall, come Casa Laila, adotta la soluzione di archi in fasci di canne di specie locale. Nonostante ciò, a differenza di Casa Laila, il sistema thailandese si compone di una travatura reticolare ad arco interamente realizzata in bambù. Per tali archi reticolari si sono adottate connessioni metalliche tra gli elementi della trave, e si sono eseguite forature nelle canne. Questo aspetto potrebbe rendere il progetto meno sostenibile degli altri. D'altronde, forse, è stata l'unica soluzione possibile per una costruzione simile.

Tale progetto fa riflettere sulla visione genuina iniziale secondo la quale una costruzione, anche di grandi dimensioni, potrebbe essere realizzata solamente con connessioni in corda. Osservando la situazione da un altro punto di vista, si potrebbe pensare a una costruzione di grandi dimensioni che utilizza il più possibile la legatura come metodo di connessione, e laddove non si trovasse nessun'altra soluzione si impiegherebbero elementi metallici.

Detto ciò, non si esclude la possibilità che una struttura come quella del Bamboo Sports Hall sarebbe potuta essere costruita solo con connessioni in legatura.

Di fronte a tale riflessione, si è voluto schizzare una piccola idea di collegamento tra elementi verticali e inclinati al fine di trovare un modo per realizzare una travatura reticolare in bambù. La soluzione trovata non è del tutto nuova, anzi, si è vista una soluzione simile nel caso di Ujung Alang in cui, a differenza del Bamboo Sports Hall, si è adottata una legatura obliqua tra elementi verticali e diagonali. Da notare che gli elementi in quest'ultimo non sono singoli né rettilinei: la connessione nella travatura reticolare è tra un elemento singolo e un insieme di elementi (il fascio).

## 6.5 LIMITI DELLO STUDIO E SBOCHI FUTURI

Si tiene presente che questa ricerca si è concentrata esclusivamente sullo studio delle connessioni in corda tra elementi di bambù. Tuttavia, in un progetto si innestano anche altre questioni importanti che devono essere considerate e valutate per una completa progettazione.

Lo studio non ha indagato alcuni campi della costruzione in bambù, e neanche alcuni aspetti dei progetti presentati. Per tal motivo la tesi presenta limiti che possono essere affrontati e superati tramite ulteriori approfondimenti futuri.

I limiti sono:

- Assenza di normativa di settore valido per tutti i casi.
- Mancanza della risorsa locale nel territorio europeo.
- Assenza di test meccanici eseguiti secondo le normative per gli archi in fasci di *Canya-viva*
- Mancanza di un approfondimento a dovere sul sistema delle fondazioni in tutti i progetti.
- Assenza di test meccanici sulle connessioni oggetto della ricerca qualitativa.

Le questioni che rimangono in attesa di risposte sono:

- Qual è stata la fattibilità economica dei progetti presentati?
- È possibile adottare la tecnologia in Europa?
- È possibile raggiungere una fattibilità motivazionale sulle costruzioni in bambù e corda in Europa?

Per superare tali limiti è necessaria una presa di coscienza sulle straordinarie proprietà del materiale e sul suo potenziale. Gli studi dovrebbero condurre alla stesura di una normativa sulle costruzioni in bambù e sulle diverse possibilità di connessioni.

Le domande sopra elencate potrebbero trovare risposte in ricerche future su campi come: tecnologia, ingegneria, economia, psicologia, design.

Secondo i ricercatori del gruppo “Bambù strutturale” dell’Università di Bologna e l’Università Politecnica delle Marche le specie di bambù che possono crescere in Europa sono la *Phyllostachys bambusoides* e la *Phyllostachys edulis*, entrambe adatte per scopi strutturali.

Il lavoro non è concluso, anzi, lo si può considerare agli inizi. Esso, oltre ad aver dimostrato la fattibilità della tecnologia, fornisce una base dalla quale partire per un’applicazione pratica di quanto affermato nella teoria e di quanto mostrato nei modelli della ricerca qualitativa.

Inoltre, al fine di riuscire a comprendere le potenzialità del bambù è di fondamentale importanza aprirsi a relazioni internazionali verso professionisti esperti sul campo, i quali possono trasmettere la loro conoscenza ed esperienza su una materia distante dalla nostra cultura, tramite seminari, workshops teorici e pratici, ecc.

La tesi vuole motivare il proseguimento degli studi sul campo, al fine di arrivare a comprendere il giusto compromesso tra le varie fattibilità progettuali delle costruzioni in bambù con connessioni alternative a quelle metalliche, immaginandolo in futuro come una possibile alternativa al legno grazie alle caratteristiche simili a quest’ultimo che per alcuni aspetti risultano persino migliori.

# FONTI

## VOLUMI

- OSCAR HIDALGO LÓPEZ, *Nuevas técnicas de construcción con bambú*, Bogotá, Estudio Técnico Colombiano LTDA, 1978.
- OSCAR HIDALGO LÓPEZ, *Manual de construcción con bambú*, Bogotá, Estudio Técnico Colombiano LTDA, 1981.
- S. GASS, H. DRÜSEDAU, J. HENNICKE, F. OTTO (a cura di), *IL 31 Bambus/Bamboo*, Stuttgart, Institut für leichte Flächentragwerke, Stuttgart, 1985.
- J. J. A. JASSEN, *Mechanical properties of bamboo*, Boston, Kluwer Academy Publishers, 1991.
- W. LIESE, *The anatomy of bamboo culms, Technical report nr. 18*, INBAR publication, 1998.
- J. DETHIER *et al.*, *Grow your own house. Simón Vélez und die bambusarchitektur/Simón Vélez and bamboo architecture*, Weil am Rhein, Vitra Design Museum, 2000.
- M. CÀRDENAS LAVERDE, *Il bambù come materiale da costruzione: caratteristiche fisiche e meccaniche, tecnologie costruttive*, Napoli, Sistemi editoriali, 2008.
- G. MINKE, *Building with Bamboo, Design and Technology of a sustainable architecture*, Basel, Birkhäuser, 2012.

## DISPENSE

- EKO PRAWOTO, *Locality in Global context. Maintaining the Spirit of Community through Art*, Canova International Architect Encounter, 2013, inedito.
- EKO PRAWOTO, *Searching for a new balance. Doing architecture in a globalized world*, Seminario, Duta Wacana Christian University, Yogyakarta, inedito.
- EKO PRAWOTO, *Locality in the Global Era. Doing architecture in the Changing World*, Seminario, Duta Wacana Christian University, inedito.
- EKO PRAWOTO, *Enhancing Locality /Growth from within*, Seminario, Duta Wacana Christian University, Yogyakarta, inedito.
- EKO PRAWOTO, *Strengthening the Spirit of Togetherness/Art Installations and Community Projects*, Seminario, Duta Wacana Christian University, Yogyakarta, inedito.

## RISORSE ONLINE

- SATISH KUMAR, Bamboo preservation technique: a review, in <https://www.slideshare.net/AkkiJasani/bamboo-preservation-technique-a-review-73060046>, INBAR, 1994, consultato il 10/10/2017.
- R. LAL BANIK, A manual for vegetative propagation of bamboos, in <http://www.aha-kh.com/wp-content/uploads/2017/01/2-inbar-a-manual-for-vegetative-propagation-of-bamboos.pdf>, India, Scenario Publications, 1995, consultato il 10/10/2017.
- A. K. F. CHUNG, S. L. CHANG, Design of bamboo scaffolds, in <https://www.scribd.com/document/325206329/Design-of-Bamboo-Scaffolds-K-F-Chung-S-L-Chan-InBAR-Technical-Report-No23> Technical report nr. 23, INBAR, 2002, consultato il 26/09/2017.
- Y. XIAO, M. INOUE, S. K. PAUDEL, Modern Bamboo Structures: Proceedings of the First International Conference, in <https://books.google.it>, 2008, consultato il 09/02/2018.
- T. FIRRONE, Il Bambù, in <http://www.aracneeditrice.it/pdf/9788854823259.pdf>, Roma, Arac-

ne, 2009, consultato il 12/12/2017.

- A. CROVARA, S. DATI, F. MORESCALCHI, About Bamboo, in <https://issuu.com/westcoastbs/docs/bamboo>, 2010, consultato il 20/09/2017.
- COLLETTIVO CERRETINI, Bamboo, in [https://issuu.com/collettivocerretini/docs/bamboo\\_-\\_collettivo\\_cerretini/36](https://issuu.com/collettivocerretini/docs/bamboo_-_collettivo_cerretini/36), 2010, consultato il 20/09/2017.
- PROF. ING. FRANCESCO ZANGHÌ, Travi reticolari, in [http://profzanghi.weebly.com/uplads/9/0/0/4/9004706/travi\\_reticolari.pdf](http://profzanghi.weebly.com/uplads/9/0/0/4/9004706/travi_reticolari.pdf), 2011, consultato il 22/10/2017.
- JOSEPH ROSENBERG, Bamboo connections, in [https://issuu.com/jhrosenb/docs/bamboo\\_connections](https://issuu.com/jhrosenb/docs/bamboo_connections), 2012, consultato il 26/09/2017.
- GIULIA PISTOLESI, Acciaio dolce, in [https://issuu.com/giuliapistolesi1/docs/bamboo\\_stamp](https://issuu.com/giuliapistolesi1/docs/bamboo_stamp), 2012, consultato il 25/04/2017.
- INSTITUTO NACIONAL TECNOLÓGICO, Construcción de vivienda de bambù, in [https://issuu.com/raulmunozjimenez/docs/manual\\_de\\_construccion\\_de\\_vivienda](https://issuu.com/raulmunozjimenez/docs/manual_de_construccion_de_vivienda), 2013, consultato il 10/10/2017.
- El pequeño manual del bambù, in [https://issuu.com/ljdp/docs/el\\_pequeno\\_manual\\_del\\_bambu.pdf](https://issuu.com/ljdp/docs/el_pequeno_manual_del_bambu.pdf), 2015, consultato il 10/09/2017.
- MAURIZIO PIAZZA, ROBERTO TOMASI, Sistemi di connessioni. Connessioni di carpenteria, in [www.promolegno.com/tecnologia/connessioni](http://www.promolegno.com/tecnologia/connessioni), consultato il 05/12/2017.

## TESI

- TERESA GARCÍA ORTUÑO, *Caracterización de la caña común (Arundo donax L.) para su uso como material de construcción*, Tesi di dottorato in Ingegneria, rel. J. J. Pastor Pérez, Universidad Miguel Hernández, 2003.
- SIMONE CANTONI, *Il bambù nelle costruzioni: studio di un giunto reversibile per strutture reticolari in bambù*, Tesi di laurea magistrale in Architettura, rel. N. Maritano Comoglio, Politecnico di Torino, 2007.
- CHRIS DAVIES, *Bamboo Connections*, Tesi di laurea in Architettura e Ingegneria Civile, rel. Pete Walker, The University of Bath, 2008, in <https://zh.scribd.com/doc/132409345/Bamboo-Connections>, consultato il 24/04/2018.
- ROBERVAL BRÁZ PADOVAN, *O Bambu na arquitetura: design de conexões estruturais*, Tesi di laurea magistrale in Architettura, rel. A. Reis Pereira, P. Cruz Landim, Universidade estadual Paulista, 2010.
- VALERIA PIPINO, *Studio di un sistema costruttivo in bambù per la realizzazione di edifici ecosostenibili in Europa*, Tesi di laurea magistrale in Architettura, rel. A. Bocco, D. Sabia, Politecnico di Torino, 2012.
- KATARZYNA KRAWCZUK, *Bamboo as sustainable material for future building industry*, 7th semester Bachelor Dissertation, rel. R. Miller, KEA, Copenhagen, 2013.
- S. V. CARLOS ENRIQUE, *Estructura de bambú caso estudio: Escenario Sustentable*, Tesi di laurea magistrale in Architettura, rel. G. R. Ricardo, C. V. Mario de Jesús, Universidad Nacional Autónoma de México, 2013.
- P. CHIACCHIERA, D. GHIRARDOTTI, *Costruzioni in bambù secondo i manuali di Yona Friedman*, Tesi di laurea magistrale in Architettura, rel. A. Bocco, W. Ceretto, Politecnico di Torino, 2016.
- CAI LUYANG, *Lashing - a possible way to achieve sustainability*, Saggio di ricerca, Politecnico di Torino.

## ARTICOLI

- IOLA LENZI, *An interview with architect/artist Eko Prawoto*, 2010.
- HIROKAZU TOKI, *Bamboo Ark*, WA, 2013.
- R. ANDÚJAR, M. F. MORELL, O. P. JULIÁN, *Estudi del comportament mecànic d'arcs de canya Arundo Donax*, «Quaderns d'Estructures», (2013) n. 46, pp. 38-48.
- *Bamboo Ark II*, Université de Shiga, Hirokazu Toki Lab.
- *Bamboo House Projects*.
- R. ANDÚJAR, M. F. MORELL, O. P. JULIÁN, *Estudi del comportament mecànic d'arcs de canya Arundo Donax*, in «Quaderns d'Estructures», n. 46 (2013), pp. 28-32.

## ARTICOLI ONLINE

- D. Deboer, K. Bareis, "Bamboo Building and Culture", <https://permacoletivo.files.wordpress.com/2008/06/>

bamboo-building.pdf, 2000, consultato il 10/09/2017

- Abdul Khalil, “Bamboo fibre reinforced biocomposites: A review”, [https://www.researchgate.net/publication/229140175\\_Bamboo\\_fibre\\_reinforced\\_biocomposites\\_A\\_review](https://www.researchgate.net/publication/229140175_Bamboo_fibre_reinforced_biocomposites_A_review), 07/2012, consultato il 19/10/2017
- Gianfranco Marra, “Bambù: architettura, ingegneria e natura”, <http://www.zerottonove.it/bambu-architettura-ingegneria-e-natura/>, 31/03/2015, consultato il 22/10/2017.
- N. Mordà, “Il bambù: una scelta di ecologia strutturale”, [https://www.ingenio-web.it/immagini/articolo\\_bamboo\\_1.pdf](https://www.ingenio-web.it/immagini/articolo_bamboo_1.pdf), consultato il 22/10/2017.
- Massimiliano Russo, “Il bambù come materiale da costruzione”, <https://building.closeupengineering.it/bambu-materiale-costruzione/10075/>, 02/03/2017, consultato il 25/10/2017
- Gunawan Tjahjono, “Context, Change, and Social Responsibility in the Work of Eko Prawoto”, «Journal of Architectural Education», 63 (2) (2010), 5/03/2013, pp. 147-152, <https://doi.org/10.1111/j.1531314X.2010.01078.x>, consultato il 15/01/2018.

## SITOGRAFIA

- <https://www.produzionidalbasso.com/project/canyaviva-abitare-il-pianeta-in-un-nuovo-paradigma/>
- <http://www.architetto.info/news/green-building/architettura-organica-luso-costruttivo-dellarundo-donax-secondo-canyaviva/>
- <http://www.eurobambu.it>
- <http://bambus.rwth-aachen.de/eng/reports/buildingmaterial/buildingmaterial.html>
- <https://www.tuttogreen.it>
- <http://www.agraria.org>
- [https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_subtribes\\_and\\_genera\\_of\\_Bambuseae](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_subtribes_and_genera_of_Bambuseae)
- [http://www.nationalgeographic.it/scienza/2015/05/20/news/la\\_matematica\\_del\\_bamnu\\_-2615478/](http://www.nationalgeographic.it/scienza/2015/05/20/news/la_matematica_del_bamnu_-2615478/)
- <http://www.bambueco.com>
- <http://www.bambusetto.it>
- <http://www.pollicegreen.com>
- <http://www.piantinedibambu.it>
- <http://qualecoltura.com/colture/bambu/>
- <http://www.bamboobotanicals.ca>
- <http://www.actaplantarum.org/morfologia/morfologia3.php>
- <https://www.slideshare.net/ganapathymohan/bamboo-70267889>
- [http://www.legnipregiati.com/prodotto/bamboo-bambuseae/?add\\_to\\_wishlist=1397](http://www.legnipregiati.com/prodotto/bamboo-bambuseae/?add_to_wishlist=1397)
- <http://www.wikitecnica.com>
- [https://www.unirc.it/documentazione/materiale\\_didattico/1464\\_2015\\_396\\_22370.pdf](https://www.unirc.it/documentazione/materiale_didattico/1464_2015_396_22370.pdf)
- [http://people.unipi.it/static/ciro.santus/MaterialeDidattica/MTCM/Eserc\\_PI10.pdf](http://people.unipi.it/static/ciro.santus/MaterialeDidattica/MTCM/Eserc_PI10.pdf)
- <http://www00.unibg.it/dati/corsi/20096/68287-Lezione-09-Chiusure%20orizzontali%20di%20copertura%20incline.pdf>
- <http://www-3.unipv.it/step/file/0814187001263477481.pdf>
- <https://www.professionearchitetto.it/bacheca/info/328757/travetti-e-travicelli>
- <http://www.forestlegnami.it/sistemi-tecnologie/tipologia-di-tetto.html>
- <http://www.ingegneri.info/news/strutture/le-straordinarie-cupole-in-bambu-e-paglia-di-un-centro-polifunzionale-in-vietnam/>
- <http://waaaat.welovead.com/en/top/detail/df5wjuuxi.html>
- <https://www.plataformarquitectura.cl/cl/883504/domo-de-ceremonias-son-la-vtn-architects>
- <https://www.archdaily.com/775317/sen-village-community-center-vo-trong-nghia-architects>
- <https://www.dezeen.com/2015/10/14/vo-trong-nghia-bamboo-community-centre-vietname-architecture-thatch-roof/>
- <http://www.ingegneri.info/news/strutture/strutture-in-bambu-il-prefabbricato-per-lo-sport-di-una-scuola-buddista-in-thailandia/>
- <https://www.dezeen.com/2017/08/21/chiangmai-life-architects-construction-sports-hall-panyaden-international-school-thailand-arching-bamboo-trusses/>
- <http://www.arcoweb.com.br/projetodesign/arquitetura/amima-arquitetura-centro-cultural-28-07-2009>

- [https://www.galeriadaarquitectura.com.br/projeto/amima\\_/centro-max-feffer-cultura-e-sustentabilidade/1695](https://www.galeriadaarquitectura.com.br/projeto/amima_/centro-max-feffer-cultura-e-sustentabilidade/1695)
- [http://www.ecodesenvolvimento.org/noticias/cidade-no-interior-paulista-ganha-centro-cultural/popup\\_impressao](http://www.ecodesenvolvimento.org/noticias/cidade-no-interior-paulista-ganha-centro-cultural/popup_impressao)
- <http://www.fau.usp.br/deprojeto/revistalabverde/edicoes/ed02.pdf>
- <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/756247/restaurante-son-la-vo-trong-nghia-architects>
- <https://www.dezeen.com/2015/10/06/vo-trong-nghia-bamboo-restaurant-beach-bar-naman-spa-resort-vietnam/>
- <https://www.dezeen.com/2013/10/11/kontum-indochine-wedding-restaurant-by-vo-trong-nghia-architects/>
- <https://archnet.org/sites/6453>
- <http://spatialagency.net/database/why/ecological/eko.prawoto>
- <https://movingcities.org/movingmemos/eko-prawoto-nasirun-yogyakarta/>
- [www.ebah.com.br/content/ABAAA9jUAK/uso-bambu-na-construcao-civil?part=3](http://www.ebah.com.br/content/ABAAA9jUAK/uso-bambu-na-construcao-civil?part=3)
- <https://www.slideshare.net/tusharchoudhari5/bamboo-construction-final-ppt>
- <https://theconstructor.org/building/bamboo-as-a-building-material-uses-advantages/14838/>
- <https://www.slideshare.net/DeepankerRas/bamboo-species-good-for-construction-in-india-nd-as-a-material>
- <https://www.slideshare.net/ganapathymohan/bamboo-70267889>
- <https://www.slideshare.net/77AJMG/the-bamboo-book-final-12-513>
- <https://investigaciocanyera.wordpress.com/2013/03/10/proves-de-carrega-sobre-arcs/>
- <https://investigaciocanyera.wordpress.com/>