

**ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA**

---

**SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA**

*Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali*

*CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA EDILE - ARCHITETTURA*

**TESI DI LAUREA**

in

**SCIENZA DELLE COSTRUZIONI**

**Il Bambù Italiano: prove meccaniche e connessioni assiali per  
prospettive sostenibili**

CANDIDATO

Silvia Greco

RELATORE

Prof.ssa Ing. Luisa Molari

CORRELATORI

Ing. Marco Fabiani

Prof. Ing. Lando Mentrasti

Anno Accademico 2016/2017

Sessione III



## ABSTRACT

Il bambù è un materiale naturale che armonizza ottime prestazioni meccaniche con caratteristiche di sostenibilità ambientale, economica e sociale. In tempi recenti è stato rivalutato in ambito strutturale ricevendo crescente attenzione anche nella ricerca. In Italia, l'approccio culturale, la scarsa conoscenza e la mancanza di un apparato normativo a riguardo, ne ostacolano la diffusione. In questa tesi ci si propone l'obiettivo di contribuire alla ricerca sul bambù strutturale, nella direzione della costruzione di un sistema di conoscenze e regole che possano in futuro conferirgli i medesimi diritti dei materiali il cui utilizzo è consentito e disciplinato dalla normativa. Viene condotta una ricerca mirata alla progettazione e realizzazione di prove di carattere sperimentale per descrivere le caratteristiche meccaniche del bambù, che non può contare su standard di procedure consolidati e validi universalmente per specie e provenienze diverse. Individuando inoltre come punto debole della progettazione le connessioni tra elementi strutturali, si indaga il comportamento di due tipi di connessione assiale eseguiti con tecniche della tradizione costruttiva.

Il risultato, mette in luce come le caratteristiche meccaniche del bambù di provenienza italiana siano all'altezza di quelle dei paesi dove è comunemente utilizzato con ottimi risultati strutturali, proponendosi come alternativa nel campo edile nazionale, in una prospettiva di sostenibilità.

## OUTLINE

Nel primo capitolo, viene contestualizzato l'utilizzo del bambù strutturale, indagandolo da un punto di vista storico e di possibile inserimento all'interno del contesto ambientale, economico e sociale a scala nazionale. Si propone quindi nel secondo capitolo, la descrizione del materiale in riferimento a geografia, composizione e stato dell'arte in termini di conoscenza di proprietà fisiche e meccaniche. Avendo dunque individuato nei collegamenti il punto debole della progettazione e dell'utilizzo del materiale, si decide di focalizzare l'attenzione sul tema ed il terzo capitolo presenta una classificazione delle tipologie di giunti strutturali tra culmi, avendo cura di indagare le tecnologie tradizionali. Si procede dunque ad analizzare le caratteristiche meccaniche di campioni di *Phyllostachys Viridiglaucescens* di origine italiana, per cui vengono condotte prove di trazione parallela ed ortogonale alle fibre, compressione parallela alle fibre, flessione ortogonale alle fibre e taglio, mettendo in evidenza l'alto margine di differenza di risposta resistente a seconda dell'orientamento della sollecitazione. Infine, nell'ultimo capitolo, vengono studiati due meccanismi di connessione assiale utilizzati nelle costruzioni tradizionali, le legature e gli incastri mediante spine di legno.



<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	1
1.1	Perché bambù	2
1.2	Cenni storici	4
1.3	Quadro normativo	12
1.4	Considerazioni di natura economica	13
<b>2</b>	<b>Caratteristiche generali</b>	16
2.1.	Geografia	16
2.2	Struttura e caratteristiche anatomiche	19
2.3	Caratteristiche fisiche	23
2.4	Caratteristiche meccaniche	24
<b>3</b>	<b>Giunti tra elementi strutturali composti da culmi di bambù</b>	32
3.1	Giunti tradizionali (Least-Tech)	33
3.1.1	Culmi legati con corde	33
3.1.2	Culmi forati giuntati da perni in legno	38
3.2.	Giunti non tradizionali (High-Tech)	43
3.2.1	Utilizzo dell'acciaio	43
3.2.2	Riempimento dei culmi	49
3.2.3	Altre soluzioni	52
<b>4</b>	<b>Le prove meccaniche sul materiale</b>	54
4.1	Metodi e materiali	54
4.2	Misurazione dell'umidità	55
4.3	Resistenza a trazione parallela alle fibre	56
4.4	Resistenza a trazione perpendicolare alle fibre	65
4.5	Resistenza a compressione parallela alle fibre	69
4.6	Resistenza a flessione perpendicolare alle fibre	77
4.7	Resistenza a taglio	80
<b>5</b>	<b>Connessioni assiali</b>	84
5.1	Legature	85
5.2	Passanti di legno	91
<b>6</b>	<b>Conclusioni</b>	94
	<b>Bibliografia</b>	96



## INDICE DELLE FIGURE

---

<b>Figure 1- 2</b> <i>Nipa Hut</i> contemporanee (Filippine).....	5
<b>Figure 3 - 4</b> Case tradizionali del Nord-Est India [2] .....	6
<b>Figure 5 - 6 - 7 - 8</b> Tipologie murarie, bambù solo e composto con argilla in basso a destra [2] .....	6
<b>Figura 9 - 10</b> Esempi di <i>bahareque</i> (Centroamerica).....	7
<b>Figura 11</b> Evoluzione della costruzione, [4].....	8
<b>Figura 12</b> The Great Bamboo Wall - Kengo Kuma .....	9
<b>Figura 13</b> Iglesia sin religiòn - Simòn Vèlez .....	9
<b>Figura 14</b> Puente en la China - Simòn Velez .....	10
<b>Figura 15</b> Puente de Guadua, calle 80, Bogotà - Simòn Velez.....	10
<b>Figura 16</b> Residence, Colombia - Simòn Velez.....	11
<b>Figura 17</b> Low Cost Houses - Vo Trong Nghia Architects.....	11
<b>Figura 18</b> Laminated Bamboo Timber .....	11
<b>Figura 19</b> Costo di produzione di bambù, legno, cemento, acciaio, in ordine [6].....	13
<b>Figura 20</b> Key Stakeholders in Bamboo Sector (India) [4] .....	15
<b>Figura 21</b> Alcune specie di bambù. Dall'alto verso il basso: Chusquea, Fardesia, Chefalostachyum, Dendrocalamus, Guadua [10] .....	17
<b>Figura 22</b> Distribuzione delle specie legnose di bambù nativo nel pianeta - <i>Vogel, Gardner. EEOB IowaStateUniversity</i> [11].....	18
<b>Figura 23</b> Distribuzione delle specie legnose di bambù nativo nelle zone temperate – <i>Vogel, Gardner EEOB IowaStateUniversity</i> [11] .....	18
<b>Figura 24</b> Sezione del culmo [33] .....	19
<b>Figure 25 e 26</b> Fascio cibro-vascolare e parenchima.....	20
<b>Figura 27</b> Studio sulla distribuzione delle fibre in relazione allo spessore – Ghavami, Marino (2005).....	21
<b>Figura 28</b> Studio sulla distribuzione delle fibre in relazione allo spessore - Ghavami, Rodrigues, Paciornik (2003) .....	21
<b>Figura 29</b> Sezione perpendicolare alle fibre .....	22
<b>Figura 30</b> Sezione parallela alla fibre, esterno del muro .....	22
<b>Figura 31</b> Sezione parallela alle fibre, interno del muro, con nodo .....	22
<b>Figura 32</b> Distribuzione e capacità per fibre e matrice all'interno del bambù - Amada et al. (1997) .....	25
<b>Figura 33</b> Grafico tensione-deformazione per prova a compressione (4) .....	26
<b>Figura 34</b> Rottura del campione sottoposto a sollecitazione assiale di compressione [5].....	26

<b>Figura 36</b> Grafico tensione-deformazione per la prova a trazione [5] .....	27
<b>Figura 35</b> Rottura dei provini sottoposti a prova di trazione [5] .....	27
<b>Figura 37</b> Grafico carico-spostamento per la prova a flessione [5].....	27
<b>Figura 38</b> Rottura dei provini sottoposti a sforzo di flessione [5] .....	28
<b>Figura 39</b> Diagramma carico-spostamento per muro di Bahareque sollecitato a carichi orizzontali ciclici [16].....	30
<b>Figura 40</b> Undamaged Ikra (bamboo frame construction) building, after 2006 Sikkim earthquake [17] ..	31
<b>Figura 41</b> Damaged reinforced concrete building, after 2006 Sikkim earthquake .....	31
<b>Figura 42</b> Damaged stone masonry building, after 2006 Sikkim earthquake [17] .....	31
<b>Figure 43 - 44 - 45 - 46</b> Dunkelberg (1985).....	33
<b>Figura 47</b> Tecniche di legatura di culmi con corde, in asse e a croce [20] .....	34
<b>Figura 48</b> Tecniche di giunzione di culmi con sagomatura, foratura e legatura [20] .....	35
<b>Figura 50</b> Son La Restaurant, Vo Trong Nghia 2014 .....	37
<b>Figura 49</b> Penda's Pavilion .....	37
<b>Figura 51</b> Plug-in bamboo connector, Dunkelberg (1985) .....	39
<b>Figura 52</b> Unione di elementi perpendicolari con perni in legno [20] .....	40
<b>Figura 53</b> Unione di elementi in asse e non, con perni e corde [20].....	41
<b>Figura 54</b> Unione longitudinale di elementi, secondo la normativa peruviana [21] .....	44
<b>Figura 55</b> Unione tra elementi perpendicolari secondo la normativa colombiana [32] .....	45
<b>Figura 57</b> Copertura Fukoka, Shoen Yoh (1989).....	46
<b>Figura 56</b> Renzo Piano Building Workshop (1997) .....	46
<b>Figure 58</b> Bamboo Pavillon, Keystone Footers, Guaduatech Project.....	46
<b>Figura 59</b> Valori di resistenza per alcuni connettori metallici [14].....	48
<b>Figura 60 e 61</b> Nodo di copertura e di fondazione, expo 2010, Shanghai, MUDI architects.....	49
<b>Figura 62</b> Collegamento con riempimento in malta cementizia, Simòn Vèlez.....	49
<b>Figura 63</b> Schema di Simòn Velez per riempimento .....	50
<b>Figura 64</b> Sistema di giunzione con riempimento ligneo [13] .....	50
<b>Figura 65</b> Collegamento con riempimento in bambù [23] .....	50
<b>Figura 66</b> Collegamento disegnato da Ohta et al. [24].....	52
<b>Figura 69</b> Collegamento piastra, corde e inserti, prima e dopo il collasso [25] .....	53
<b>Figura 70</b> Energy Efficient House, ARUP e Cardenas (2016) .....	53
<b>Figura 71</b> Provino tipo osso di cane.....	56
<b>Figura 72</b> Definizione e dimensioni provino tipo "osso di cane" per prova di trazione, come da [27] .....	56
<b>Figura 73</b> Provini tipo proposti per la prova di trazione.....	57

<b>Figura 74</b> Rottura del provino a trazione TIPO A.....	58
<b>Figura 75</b> Rottura del provino a trazione TIPO B.....	58
<b>Figura 76</b> Rottura del provino a trazione TIPO C.....	58
<b>Figura 77</b> Indicazioni sul provino a trazione, [26] pag.13.....	59
<b>Figura 78</b> Prova di trazione parallela alle fibre, in esecuzione .....	60
<b>Figura 79</b> Provini con nodo dopo l'esecuzione del test.....	60
<b>Figura 80</b> Grafico tensione-deformazione per provini con nodo sottoposti a test di trazione (valori della deformazione ottenuti con estensimetri) .....	64
<b>Figura 81</b> Grafico tensione-deformazione per provini senza nodo sottoposti a test di trazione (valori della deformazione ottenuti con estensimetri) .....	64
<b>Figura 82</b> Istruzioni sul test di trazione perpendicolare alle fibre, in [26].....	66
<b>Figura 83</b> Punta elicoidale e fresa utilizzate per la foratura dei provini.....	68
<b>Figura 84</b> Provino forato .....	68
<b>Figura 85</b> Rottura del provino .....	68
<b>Figura 86</b> Prova in esecuzione.....	68
<b>Figura 87</b> Indicazioni da normativa su prova di compressione in direzione parallela alle fibre.....	69
<b>Figura 88</b> Prova a compressione, in esecuzione.....	71
<b>Figura 89</b> Rottura del provino sottoposto a compressione.....	71
<b>Figura 90</b> Provino rotto dopo prova, schiacciato sulla superficie e fessurato all'interno .....	71
<b>Figura 91</b> Grafico tensione-deformazione in direzione dell'asse di applicazione del carico, provini con nodo .....	75
<b>Figura 92</b> Grafico tensione-deformazione in direzione dell'asse di applicazione del carico, provini senza nodo .....	75
<b>Figura 93</b> Grafico tensione-deformazione in direzione ortogonale a quella di applicazione di carico, provini con nodo .....	76
<b>Figura 94</b> Grafico tensione-deformazione in direzione ortogonale a quella di applicazione di carico, provini senza nodo .....	76
<b>Figura 95</b> Provino da sottoporre al test .....	77
<b>Figura 96</b> Prova in esecuzione.....	79
<b>Figura 97</b> Provino al termine della prova .....	79
<b>Figura 98</b> Specifiche su prova a trazione, [26] p.17 .....	80
<b>Figure 99, 100, 101</b> Risultati della prova non corretto (prime due) e corretto (ultima) .....	81
<b>Figura 102</b> Provino da sottoporre a prova di compressione .....	86
<b>Figura 103</b> Fasi di legatura .....	86
<b>Figura 104</b> Connessione in asse con legatura [20] .....	86

<b>Figura 105</b> Nodo piano .....	86
<b>Figura 106</b> Prova legature a 10 giri in corso, prima e dopo lo scivolamento .....	87
<b>Figura 107</b> Incuneamento dei nodi durante la prova.....	87
<b>Figura 108</b> Posizione dei culmi dopo la prova, slittati ed inclinati .....	87
<b>Figura 109</b> Confronto per i tre tipi di legatura, grafico carico-spostamento .....	88
<b>Figura 110</b> Grafico carico spostamento con scarico e ricarico .....	88
<b>Figura 111</b> Collegamento tra due culmi, affiancati .....	90
<b>Figura 112</b> Collegamento tra due culmi connessi sullo stesso asse, legati ad un terzo culmo di supporto .....	90
<b>Figura 113</b> Rottura del nodo per il passaggio del riempimento.....	92
<b>Figure 114 - 115</b> Prova del collegamento con pins di legno ortogonali, in esecuzione e poi dopo, con rottura del pin .....	92
<b>Figura 116</b> Grafico carico spostamento per i provini con passanti in legno .....	93
<b>Figura 117</b> Collegamento tra culmi realizzato con due pins ortogonali a due internodi per culmo .....	93





*L'uomo viveva nella foresta, sulle cime degli alberi.  
È stato il primo animale a decidere di allontanarsi dalla foresta  
e da tutti gli altri animali per andare a costruirsi una tutta sua.  
La foresta in cui viviamo oggi è fatta di cemento, acciaio, plastiche  
e tante altre cose che abbiamo inventato dimenticando sempre di più  
la foresta da cui veniamo e la natura a cui apparteniamo; ed  
allontanandoci dalla consapevolezza della nostra identità e  
dall'equilibrio con il resto del pianeta che ormai insistentemente ci  
ricorda i limiti fissati dalla natura, che spesso  
abbiamo preteso di superare.*

Il settore dell'edilizia ha una grande voce in capitolo nel discorso legato alla spesa energetica mondiale, sia riguardo la produzione delle materie necessarie alla costruzione, sia durante l'arco della vita utile di una costruzione. La cultura tipica dell'età contemporanea nei paesi detti sviluppati contiene purtroppo una serie innumerevole di *misunderstanding* legati al concetto di benessere dell'individuo. L'immediata percezione di benessere e comfort offerti da un tipo discutibile di evoluzione e di progresso, spesso sono soltanto l'immagine di un benessere fittizio che presenta un conto molto salato in termini di inquinamento ambientale, che deve, per forza di cose, tornare indietro a chi l'ha prodotto.

Pertanto, la ricerca nel settore dell'edilizia può, e deve, fare molto per contribuire al miglioramento sia delle condizioni di salute del pianeta, sia della stessa condizione di benessere degli utenti delle costruzioni. È necessario mettere in discussione i principi costruttivi e tecnologici moderni, che forse a volte hanno sostituito quelli antichi soltanto per via di questioni legate a valutazioni superficiali, mode e business, piuttosto che per effettive questioni qualitative. Dall'altro lato, le competenze e le disponibilità strumentali sono cresciute notevolmente e permettono lo studio, la comprensione e la

costruzione di sicurezze e di argomenti che prima erano semplicemente lasciati al protocollo “da tradizione”. Riprendere in mano materiali e tecniche della tradizione per capirli e migliorarli è il passo preliminare e necessario alla costruzione di un sistema di analisi e previsione che possa consentirne l’utilizzo regolamentato. I materiali tradizionali, naturali, meno legati a dinamiche industriali e di elaborazione produttiva, non sono meno performanti, ma sono meno conosciuti e pertanto non utilizzabili con le dovute garanzie di sicurezza. Chi si occupa di questo mestiere ha il dovere, quantomeno morale, di insistere nella loro comprensione e valutazione con cognizione di causa, che mette finalmente sul piatto della bilancia anche le spese a lunga scadenza.

Il bambù è un materiale naturale che armonizza ottime prestazioni meccaniche con caratteristiche di grande sostenibilità. Per via della richiesta energetica produttiva e lavorativa praticamente nulla, è riconosciuto in tema di sostenibilità ambientale. Rappresenta una grande risorsa in termini di sostenibilità economica per via delle prospettive che lascia intravedere, contando su costi di produzione bassissimi. Infine si considera benefico anche a livello sociale, mettendo in evidenza come, estraneo a circoli di produzione industriale e dipendenza da terzi, metta in condizione il proprietario di uno spazio di essere protagonista della sua costruzione, in termini di consapevolezza dei principi costruttivi che ne sono alla base ed eventuale realizzazione, ponendosi sulla strada che consente la facile risoluzione di problematiche legate alle emergenze abitative.

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

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

## 1.1. PERCHÉ BAMBÙ

Nell'elenco dei materiali riconosciuti come sostenibili viene sempre più spesso inserito il bambù, considerabile a buon diritto estremamente low-cost, da una prospettiva tanto economica quanto ambientale. Il suo successo è dovuto in prima istanza alla grande disponibilità del materiale, concetto che deve essere considerato sia in termini quantitativi, ossia di diffusione fisica, sia in termini qualitativi, ossia di semplicità di reperimento come materiale costruttivo. Di fatto, se da un lato è notevole che le foreste di bambù siano molto diffuse e che si estendano in un'enorme varietà di climi e situazioni morfologiche, è ancor più da sottolineare la rapidità con cui il materiale cresce, arriva a maturazione e subisce processi che gli consentano l'impiego strutturale. In primo luogo deve esserne considerato il processo di crescita e coltivazione, che tratta di una pianta infestante che richiede ben poche cure, manuali e chimiche, che ne facilitino lo sviluppo. Ed oltre ad essere un processo facile, può dirsi anche estremamente rapido, dal momento che si considerano pronte ad impiego edile le piante che hanno raggiunto i 3 anni di vita. In secondo luogo, si consideri il processo di post-coltivazione, che non richiede nessun passaggio di derivazione industriale, dal momento che il materiale può essere impiegato in opera nella medesima forma con cui viene raccolto. Unico tipo di trattamento a cui si sottopone è quello volto ad aumentarne la durabilità, che può in alcuni casi essere un processo estraneo all'utilizzo di sostanze chimiche. Si tratta di dati che hanno estrema rilevanza soprattutto in rapporto al suo "rivale" in termini di sostenibilità, il legno, che piuttosto richiede perché sia pronto all'impiego, sia processi di lavorazione industriale, sia elevate tempistiche di maturazione, estremamente più lunghe del bambù, che lo rendono incisivo nei riguardi ambientali, e che pongono l'urgente necessità di soluzione in relazione alle questioni di disboscamento. Vengono proposti questi aspetti, alla luce del confronto tra le proprietà meccaniche per cui il bambù non si considera inferiore per molti versi.

Oltre ad essere meno dannosa, la coltivazione del bambù ha tutto il diritto di essere definita una coltivazione benefica. Di fatto, la sua presenza offre vantaggi ambientali, in termini di assorbimenti di CO<sub>2</sub> e di biomassa. Si stima che l'incremento di biomassa annuo vari tra il 10 ed il 30%, in misura variabile con la specie e con le condizioni ambientali. E che, sia in vita, sia successivamente alla raccolta, assimili grandi quantità di anidride carbonica nella sua biomassa per il processo di fotosintesi, trattandosi di piante di rapidissima crescita; per fare un esempio, la specie *Guadua Angustifolia* Kunth, durante i suoi primi sei anni di crescita, assimila 54 tonnellate di CO<sub>2</sub> per ettaro. Altre questioni che rendono la coltivazione benefica, vanno ricercate nell'apparato radicale estremamente fitto, che garantisce la tenuta del terreno, evitando frane ed erosione, prevenendo il deflusso e regolando la gestione delle acque. Si segnala che queste caratteristiche suggeriscono l'impiego in progetti di riconversione di aree dismesse, come nel caso di Shangai dove una superficie adibita a discarica e demolizione è stata convertita in un enorme parco di bambù.

Ulteriori considerazioni di natura "umana" vanno fatte in relazione al tipo di opportunità costruttiva che può offrire l'impiego di questo materiale. Di fatto, oltre alle motivazioni di sostenibilità

ambientale, gli vanno riconosciute quelle di sostenibilità sociale. L'utilizzo di un sistema costruttivo così essenziale e semplice permette la facile risoluzione di problematiche di emergenza, tenendo conto del bassissimo rapporto tra i tempi richiesti per la costruzione ed il risultato in termini meccanici ed economici. E si tratta di un aspetto che, soprattutto in questo momento, e soprattutto a livello nazionale, potrebbe e dovrebbe essere preso in considerazione. Ma un'altra questione che deve essere chiarificata è l'opportunità di migliorare il rapporto dell'uomo con la costruzione. Il bambù si presta a sistemi costruttivi di autocostruzione, che prevede il coinvolgimento dell'utente nel sistema di conoscenze e di attività che sono alla base del proprio spazio. La partecipazione del soggetto protagonista dell'utilizzo di un prodotto è e deve essere considerata, fondamentale nella produzione dello stesso. Sicuramente in termini di consapevolezza se non anche in quelli di realizzazione, per cui è fondamentale che gli venga data la possibilità di azione.

Si considerano ad ogni modo alcuni aspetti che costituiscono, ad oggi, l'ostacolo al suo sviluppo nel mercato. In primo luogo alcune questioni riguardano la durabilità del materiale, che deve necessariamente essere protetto dagli agenti atmosferici e dagli attacchi di insetti ed animali a cui è naturalmente esposto. Questo necessita di procedimenti cautelativi ben definiti e di trattamenti che spesso devono passare sotto meccanismi ancora molto legati alle industrie e a produzioni chimiche. In secondo luogo, deve essere fatto riferimento alla questione legata al trasporto della materia prima. Gran parte del bambù che fino ad ora è stato utilizzato in Italia, proviene dall'oriente o dal Sudamerica. Considerando le dimensioni dei culmi e le distanze dei luoghi citati, è facile pensare all'ingente spesa, in termini economici quanto ambientali, che viene generata, e che costituisce quasi la totalità dell'utilizzo del materiale. È pertanto opportuno, per non dire necessario, ridurre al minimo questi costi, nella semplice opportunità di utilizzare bambù provenienti da piantagione vicine al luogo di utilizzo e pertanto di aumentare la conoscenza e l'affidabilità, di specie di provenienza italiana.

È chiaro che in queste righe sono state prese in considerazione situazioni meramente pratiche, ma l'ostacolo maggiore alla diffusione di questo tipo di materiale è la mancata diffusione della cultura dello stesso e di conseguenza la mancanza di un sistema normativo. Uno scoglio culturale importante riguarda l'inserimento nel mercato dell'edilizia, che è ormai molto definito e governato da meccanismi stabili a favore di alcuni materiali e produttori. Ma l'abbattimento di questa barriera deve essere cercato nella curiosità dei professionisti e nella proposta governativo-normativa, che deve prima di tutto oltrepassare l'errata concezione che i materiali naturali in genere non siano "all'altezza" delle nostre costruzioni. Certo, occorre accettare i limiti della natura, in termini di durabilità e di dimensioni delle strutture. Ma d'altronde, se la natura non si spinge oltre certi limiti, perché pensare che l'uomo debba superarli?

Species	Country	SG	MC (%)	MOR (Nmm <sup>-2</sup> )	MOE (Nmm <sup>-2</sup> )
<b>Bamboo</b>					
<i>Bambusa bambos</i>	India	0.65	15.5	67.4	6500
<i>B. blumeana</i>	Philippines	0.50	green	30.8	8640
<i>B. nutans</i>	Bangladesh	0.68	12.8	87.7	12900
<i>B. tulda</i>	India	0.71	14.9	50.6	8265
<i>B. vulgaris</i>	Indonesia	na	17.0	86.0	na
<i>B. balcooa</i>	Bangladesh	0.74	12.5	80.3	10900
<i>Dendrocalamus asper</i>	Indonesia	na	15.0	105	na
<i>D. strictus</i>	India	0.72	10.7	118.4	15949
<b>Timber</b>					
<i>Melocanna bacifera</i>	Bangladesh	0.66	12.0	72.3	23200
<i>Tectona grandis</i>	India	0.60	12.0	95.9	11960
<i>T. grandis</i>	Bangladesh	0.59	12.0	100.8	13100
<i>Shorea robusta</i>	India	0.71	12.0	131.8	16204
<i>S. robusta</i>	Bangladesh	0.78	12.0	103.7	12800
<i>Koompasia malaccensis</i>	Malaysia	na	12.0	122	18600
<i>Intsia palembanica</i>	Malaysia	na	12.0	116	15400
<i>Hevea brasiliensis</i>	Malaysia	na	12.0	66	9240

Note: SG = Specific gravity; MC= Moisture content; MOR = Modulus of rupture; MOE = Modulus of elasticity; na = not available (Sattar, 1995)

Tabella 1 Confronto tra proprietà meccaniche di alcuni tipi di bambù e di legno [1]

## 1.2. CENNI STORICI

L'ingresso del bambù nell'ingegneria – ricerca ed utilizzo - europea, e ancor più italiana, è un fatto molto recente. Tuttavia non può dirsi di certo un materiale “innovativo”. Il bambù appartiene ad una lunga tradizione costruttiva di molti territori extra continentali, prevalentemente tropicali e subtropicali in cui è specie nativa nella sua forma più imponente.

La larga diffusione e la vastità delle piantagioni di bambù hanno suggerito alle popolazioni dei territori limitrofi l'idea e la possibilità del suo utilizzo. La forma imponente e la struttura resistente hanno reso facile l'applicazione che non necessita di quasi nessun tipo di lavorazione. Le prime costruzioni di bambù, e le ultime nelle aree rurali contemporanee, rispondono ai bisogni abitativi in maniera semplice e soprattutto in tempi rapidi. Si costruiscono case, stalle, impalcature, ponti. A seconda dell'area geografica e la cultura di riferimento, vengono concepiti diversi sistemi costruttivi, tutti caratterizzati da semplicità di progetto e di esecuzione.

Un esempio sono le *Nipa Hut* (figure 1-2), o *Kamalig* o *Bahay Kubo* (casa cubica), icona della cultura delle Filippine di epoca precoloniale, strutture abitative che utilizzano canne di bambù come

struttura portante e strisce di bambù splittato<sup>1</sup> intrecciate per la struttura muraria, utilizzate ancora oggi nelle aree rurali.

In India si concentra circa il 45% dei boschi di bambù del globo. Nelle regioni in cui cresce, e soprattutto nel nord-est, come in Assam e Mizoram, si può considerare come la colonna vertebrale dell'economia del paese, parte integrante del benessere sociale e della tradizione culturale, sociale ed economica del paese. Risulta spontaneo pensare come questi popoli abbiano utilizzato per anni, e lo facciano ancora, il bambù come materiale base delle proprie costruzioni oltre che per utensili di artigianato. Le attività edili che ne prevedono l'utilizzo rientrano nelle competenze da artigiano e, quasi sempre, il costruttore di una casa ne è il futuro proprietario, che si avvale dell'aiuto di altri membri della comunità rurale, familiari, amici. Ciascuno ha il suo ruolo, i membri maschili della comunità si occupano del taglio, della tessitura di muri, porte, legature, pilastri, fondazioni; le donne della famiglia si preoccupano dei lavori di finitura, come l'intonacatura di argilla, la preparazione dei pavimenti, e le attività accessorie alla costruzione. È vissuto come un rituale familiare, che ha un determinato periodo dell'anno di esecuzione (ottobre-marzo causa clima e momento di raccolta bambù) ed una durata che oscilla tra i 15 e i 20 giorni. L'edificio ha una struttura molto semplice, genericamente si tratta di tre stanze con cucina e veranda. Di solito si tratta di costruzioni in territori poco asciutti e poco pianeggianti, per cui di sovente si tratta di costruzioni addossate a pendii o su palafitte. Il compito di portare tutta la struttura non è genericamente affidato al bambù per cui si preferisce la distribuzione di pesi ad un altro elemento portante e la composizione e tessitura dei setti murari. [2]



Figure 1- 2 *Nipa Hut* contemporanee (Filippine)

---

<sup>1</sup> Per bambù splittato si intende il bambù sottoposto a splitting, una tecnica di lavorazione che prevede il taglio del culmo in strisce lungo la diametrale



Figure 3 - 4 Case tradizionali del Nord-Est India [2]



Figure 5 - 6 - 7 - 8 Tipologie murarie, bambù solo e composto con argilla in basso a destra [2]



Figura 9 - 10 Esempi di *bahareque* (Centroamerica)

Oltre alle costruzioni tradizionali dove il bambù costituisce la parte principale della struttura, secondo [3] esistono altre due tipologie di costruzioni. Le prime prendono il nome di *bahareque*, tipiche della zona centroamericana. Sono composte da uno scheletro in bambù, genericamente in strisce (splittato) ma alle volte anche intero, coperto da entrambi i lati da una miscela di fango e sterco di vacca secondo un processo tradizionale oppure da malta cementizia in un processo più evoluto. Le seconde invece si riferiscono a strutture prefabbricate dove il bambù si ritrova all'interno di pannelli e tavole laminate.

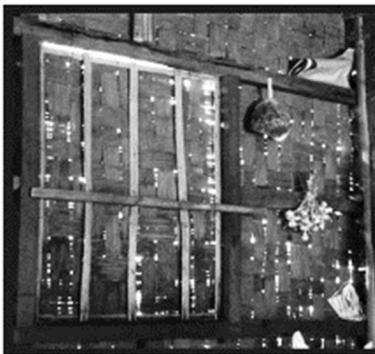
L'utilizzo del bambù è rimasto nell'utilizzo quotidiano dei popoli dov'era tradizione, sicuramente nel senso culturale, un po' meno nel senso costruttivo. Continua ad essere utilizzato di sovente nei paesaggi di clima temperato, secondo procedimenti tradizionali con adattamento a materiali (cemento, acciaio,..) e soprattutto forme più adatte alla contemporaneità.

Di recente il bambù ha assunto una nuova immagine a livello architettonico internazionale. In alcuni casi assume i connotati di simbolo della cultura di un luogo, che ne pregiudica l'utilizzo in progetti di fama internazionale. Questo ha di sicuro contribuito alla valorizzazione di un materiale che smette di essere concepito come "povero", di seconda scelta, e di conseguenza dà una spinta alla ricerca nel campo strutturale, consentendo un utilizzo più consapevole che ha prospettive di diffusione importanti.

Un ulteriore aspetto che contribuisce al suo utilizzo su larga scala è l'adattabilità alle situazioni di emergenza (post-catastrofe o emergenza abitativa). Di fatto l'economicità, disponibilità, semplicità e rapidità di reperimento e di impiego, in rapporto alle alte performance meccaniche, lo rendono un'ottima e frequente scelta in queste situazioni, soprattutto nei paesi asiatici.

Infine, e non per questo meno importante, di recente il bambù sta portandosi sempre più al centro dell'interesse architettonico mondiale per la sostenibilità che lo caratterizza. La ricerca si evolve sostanzialmente in due filoni: da un lato è premiato e studiato, proprio in quanto materiale sostenibile il cui utilizzo non necessita di nessun tipo di lavorazione preliminare, dall'altro lato si propone l'ingegnerizzazione dello stesso, trattato sotto forma di bambù laminato o LBT (Laminated Bamboo Timber), scomposto in strisce e ricomposto con colle. Quest'applicazione sicuramente permette di risolvere tutti i problemi legati alla geometria del materiale, che non sono pochi, ma rappresenta forse una piccola sconfitta per un materiale che presenta alte capacità in stato naturale.

*Traditional Bamboo Window*



*Modern Bamboo Window*



*Traditional Bamboo Roof*



*Modern Bamboo Roof*



*Traditional Wall*



*Modern Bamboo Wall*



Figura 11 Evoluzione della costruzione, [4]



Figura 12 The Great Bamboo Wall - Kengo Kuma

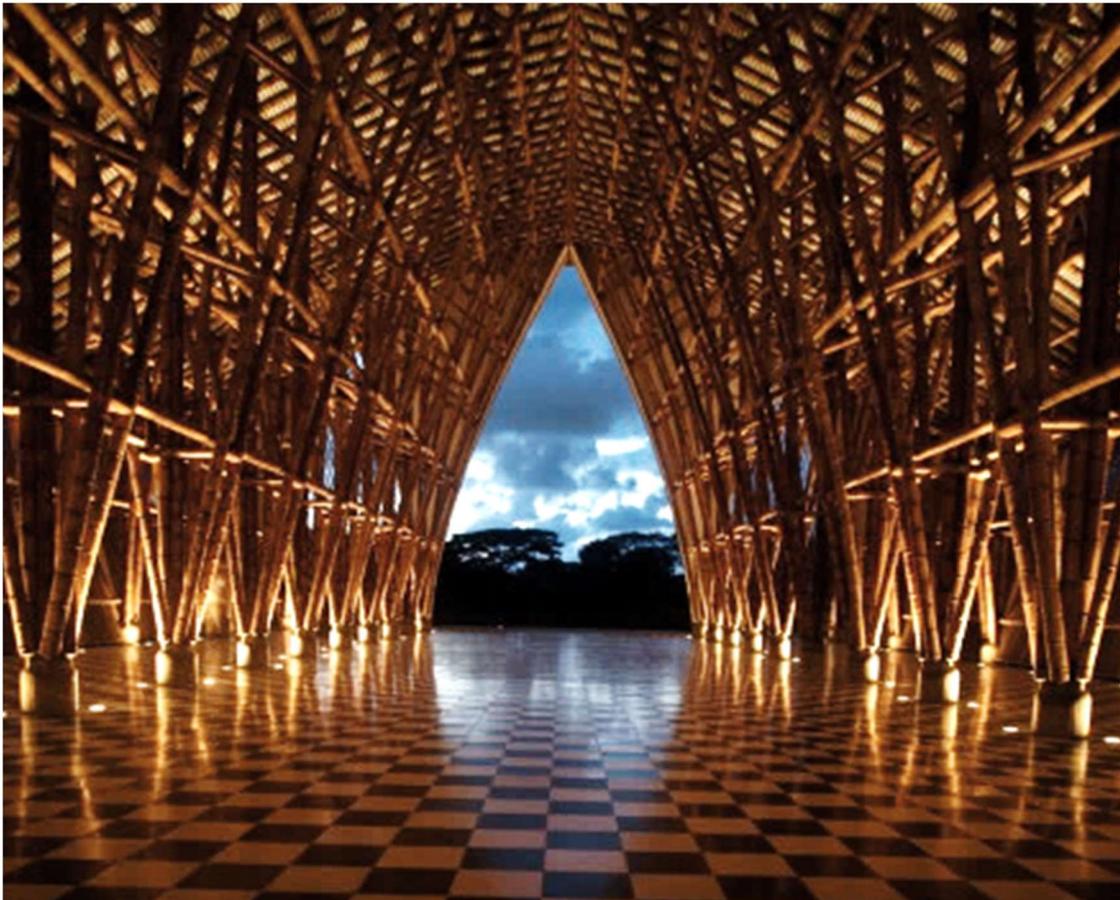


Figura 13 Iglesia sin religión - Simón Vèlez



Figura 14 Puente en la China - Simòn Velez



Figura 15 Puente de Guadua, calle 80, Bogotá - Simòn Velez



Figura 16 Residence, Colombia - Simòn Velez



Figura 17 Low Cost Houses - Vo Trong Nghia Architects

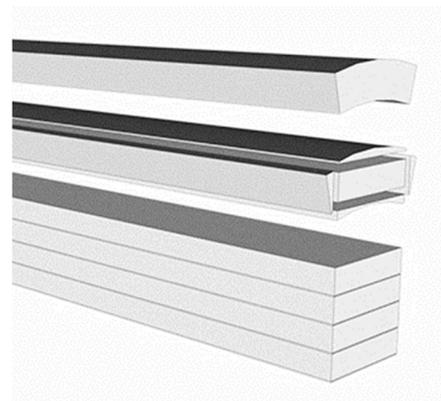


Figura 18 Laminated Bamboo Timber

### 1.3. QUADRO NORMATIVO

Contrariamente a quanto possa essere spontaneo pensare per un materiale naturale, il bambù può contare su un elenco di documenti normativi che rendono legittimato, e ne disciplinano, l'utilizzo, che può considerarsi vasto rispetto agli altri materiali naturali.

In alcuni paesi come Colombia, Perù, Ecuador, India, appartiene alla legislazione nazionale con pari diritti rispetto ai materiali consuetamente utilizzati nell'edilizia. Per il resto dei casi esistono delle norme di standardizzazione, dei criteri per il bambù strutturale, già dal 2000 – da ICBO Evaluation Service, Inc. nell'ambito dell'International Code Council - negli Stati Uniti, o nel 2004 in Europa, nelle norme ISO. Si riporta qui di seguito un elenco della normativa reperibile, tratto da [5]:

- AC162: Acceptance criteria for structural bamboo (USA, 2000)
- ISO 22156:2004 – Bamboo, structural design
- ISO 22157-1:2004 – Bamboo, determination of physical and mechanical properties. Part 1: requirements.
- ISO 22157-2:2004 – Bamboo, determination of physical and mechanical properties. Part 2: laboratory manual
- NORMA TECNICA E100 – Bambù (Perù, 2012)
- IS 68874 – Method of tests for bamboo (India)
- IS 8242 – Method of tests for split bamboos (India)
- IS 9096 – Preservation of bamboo for structural purpose, code of practice (India)
- IS 7344 – Bamboo tent poles (India)
- NTC 5300 – Cosecha y poscosecha de los culmos de Guadua Angustifolia Kunth (Colombia)
- NTC 5301 – Secado e inmunizado de los culmos de Guadua Angustifolia Kunth (Colombia)
- NTC 5405 – Propagación vegetativa de Guadua Angustifolia Kunth (Colombia)
- NTC 5407 – Uniones para estructuras construidas en Guadua Angustifolia Kunth (Colombia)
- NTC 5727 – Terminología aplicada a la Guadua y sus productos (Colombia)
- NSR-10, cap. 12 – Norma de sismoresistencia, estructuras de Guadua (Colombia)
- GPE INEN 20: 1987 – Andamiajes. Madera redonda y bambù (Ecuador)
- GPE INEN 42:1976 – Guía práctica. Bambù caña Guadua (Ecuador)
- NTE INEN ISO/DIS 22156:2004 – Diseño estructural en Bambù (Ecuador)
- NTE INEN ISO/DIS 22157:2004 – Determinación de propiedades físicas y mecánicas del Bambù (Ecuador)
- NTE INEN 002:2004 – Manual de laboratorio sobre métodos de ensayo para la determinación de propiedades físicas y mecánicas del Bambù (Ecuador)
- ASTM D5456 – Standard specifications for evaluation of structural composite lumber products (USA)

A questa lista si aggiunge l'aggiornamento della norma ISO 22157-1:2004, utilizzata in seguito per la realizzazione delle prove:

- ISO/DIS 22157-1:2017 – Bamboo structures, determination of physical and mechanical properties of bamboo culms. Part 1:test method

#### 1.4. CONSIDERAZIONI DI NATURA ECONOMICA

Viene in questo paragrafo approfondito l'aspetto economico del bambù, fondamentale nelle considerazioni in tema di sostenibilità, oltre che ambientale e sociale, di sicuro impatto sull'interesse della società, e vanto per il materiale in questione.

In primo luogo, si ribadisce quanto già sottolineato nei paragrafi precedenti, ovvero la prospettiva di risparmio economico offerta in relazione al confronto con la fase produttiva di altri materiali. È facilmente immaginabile che una coltivazione comporti un costo estremamente inferiore rispetto al mantenimento di un impianto industriale, ancor più se non richiede spese accessorie per aumentarne la rendita, considerando il bambù una pianta infestante. E ancor più successivamente, dalla raccolta all'impiego, non richiede grandi strumentazioni o attività di trasformazione, per cui la spesa che lo caratterizza risulta essere estremamente esigua.

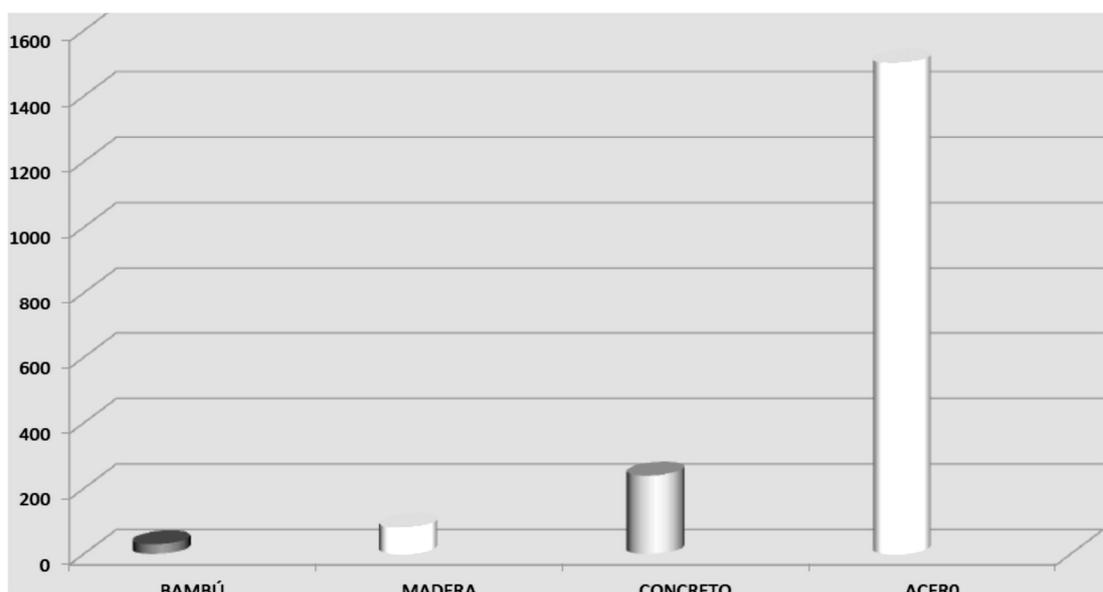


Figura 19 Costo di produzione di bambù, legno, cemento, acciaio, in ordine [6]

È per questi motivi che il bambù è al centro di numerosi progetti esterni all'ambito edilizio, sempre più diffuso soprattutto in quello che oggi viene definito *social design*. È un materiale che si presta in effetti a una estrema poliedricità di impieghi, dalle biciclette ai tessuti. Quello che sta accadendo in molte comunità agricole che tradizionalmente producono e lavorano bambù, è che si motivino alcune imprese a sviluppare prodotti di alta tecnologia, che coinvolgano contadini ed artigiani nelle

attività di produzione, raccolta e trasporto, ed in alcuni casi anche nell'output finale delle produzioni. Si riporta l'esempio del *Bamboo laptop* progettato per Asus Ecobook o la *BoxWave's case* per l'iPhone [7].

Se da un lato questo aspetto assume l'immagine di incentivo allo sviluppo di comunità rurali che potenziano il proprio mercato e la propria indipendenza economica mediante la valorizzazione di materiali e tecniche appartenenti alla propria tradizione, è anche vero che segna l'evidente distanza tra i centri progettuali e produttivi, appartenenti ad aree geograficamente, culturalmente, economicamente estremamente distinte.

Di fatto, la diffusione di bambù nel mercato occidentale si concentra prevalentemente in prodotti di nicchia di arredo, pavimenti e decorazioni, che nella gran parte dei casi sono prodotti in paesi extra-europei. Questo, anche a livello concettuale, favorisce la percezione del bambù come materiale non "all'altezza" di situazioni economicamente più sviluppate, arroccandosi su pregiudizi nei confronti dei paesi di provenienza, sia per ragioni di tipo climatico, sia per ragioni legate proprio al concetto di sviluppo.

Se si ragiona in termini di bambù come valida alternativa ai materiali da costruzione, in un'ipotesi di utilizzo sistematico e su scala industriale, si è inevitabilmente legati alla serie di limitazioni (trasporto, logistica, importazione) dovute al fatto che la produzione di questo materiale sia prevalentemente concentrata in paesi extra-europei. Di fatto, un primo gap riguarda le richieste dei paesi europei rispetto a quelli produttori, estremamente più elevate in termini di certificazioni, legislazioni, normative in termini tanto di caratteristiche del materiale quanto di condizioni di produzione ed utilizzo. La mancanza di un sistema produttivo di standard industriale comporta da un lato una variabilità eccessivamente ampia dell'offerta, dall'altra la percezione di minore sicurezza per gli utilizzatori, contribuendo a quella "frattura" nella catena di valore del materiale [8].

Per sanare questa frattura è dunque necessaria in prima istanza la formazione di conoscenze e strumentazioni che garantiscano la corrispondenza tra i requisiti del mercato e della progettazione europei con quelli presenti offerti dalla proposta del bambù. A tale fine devono intervenire non soltanto le figure che si occupano di ricerca ma è necessario il coinvolgimento di enti di natura governativa ed imprenditoriale, oltre che le associazioni professionali, che favoriscano la nascita e lo sviluppo di un mercato che abbia la qualità concorrenziale necessaria per la diffusione. E che, individuando le immense potenzialità del materiale e del relativo mercato, si occupino di potenziare il suo processo produttivo, di lavorazione e di impiego, interni all'ambito europeo.

Si riporta infine, uno schema di costi relativo al progetto di una struttura in bambù, vetro e acciaio, progettata da Mauricio Cardenas. È progettata come un padiglione che copre una superficie di 200 m<sup>2</sup>, facilmente montabile/smontabile. Si vuole mettere in luce l'incidenza sul prezzo finale della componente bambù rispetto a quella degli altri materiali, come l'acciaio, utilizzato per alcuni pilastri di sostegno e per i nodi tra i culmi. Su un totale di 180000 euro, l'ammontare economico utilizzato per la struttura in bambù, è di appena 1000 euro, pari al 0,55%. I due elementi che concorrono fortemente all'aumentare del prezzo sono le prime due voci, relative all'acciaio ed alla pavimentazione. Nello specifico, l'acciaio viene utilizzato per le connessioni, aggravando, oltre che il costo, anche il peso complessivo della struttura.

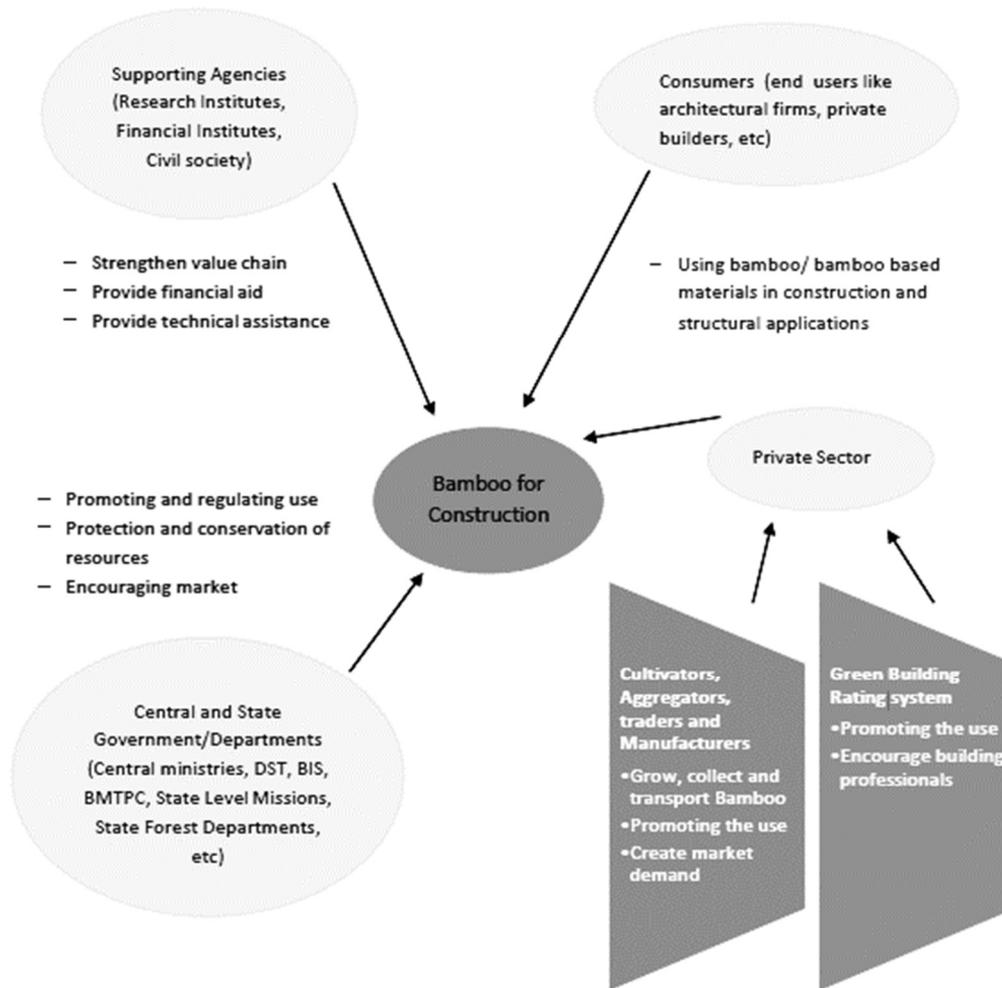


Figura 20 Key Stakeholders in Bamboo Sector (India) [4]

ELEMENTO	COSTO (EURO)
Elementi in acciaio e manodopera relativa	80 000
Pavimentazione e manodopera relativa	50 000
Sistema di illuminazione	10 000
Sistema di raffreddamento e manodopera relativa	10 000
<b>Elementi in bambù</b>	<b>1 000</b>
Plinti prefabbricati in calcestruzzo e manodopera relativa	6 000
Impianto elettrico	5 000
Vari altri	18 000
<b>Totale</b>	<b>180 000</b>

Tabella 2 Costi stimati per la costruzione di una struttura tipo padiglione di Càrdenas, 2006 (1)

### 2.1. GEOGRAFIA

Il bambù è una pianta appartenente alla famiglia delle *Poaceae*, sottofamiglia *Bambusoideae*, largamente diffusa in gran parte del pianeta. La straordinaria diversità di caratteristiche ambientali in cui può svilupparsi dà vita ad un altrettanto vasta capacità di caratterizzazione di specie, di cui se ne contano circa 1500, con proprietà tanto diverse da renderlo atto a un'estrema poliedricità di impiego. La prima grande distinzione che può essere fatta e che si pone all'attenzione è tra le specie erbose e quelle legnose, dimensionalmente molto più consistenti, che trovano impiego nelle costruzioni e che saranno dunque oggetto di questo studio.

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

Tabella 3 Elenco e confronto delle più comuni specie di bambù strutturale [9]



Figura 21 Alcune specie di bambù. Dall'alto verso il basso: *Chusquea*, *Fardesia*, *Chefalostachyum*, *Dendrocalamus*, *Guadua* [10]

La vasta porzione geografica interessata da questa crescita è quella compresa tra i 50°N (Sakhalin, Russia) ed i 47°S (Cile, Argentina) con altitudini fino a 3500 m e temperature tropicali, subtropicali e temperate [1]. La gran parte delle tipologie di bambù utilizzabile per impiego strutturale si sviluppano nelle regioni subtropicali.

La specie di bambù che sarà oggetto delle prove riportate in questa trattazione è il *Phyllostachys viridiglaucescens*, di crescita spontanea nelle regioni asiatiche con climi temperati (Giappone, Cina). Si considera la specie in parola in ragione del fatto che trova altrettanto idonee condizioni di sviluppo nelle regioni europee, nonostante qui il bambù non sia da ritenersi una pianta nativa, soprattutto in condizioni climatiche un po' rigide, come ambienti ombrosi o ad altezze elevate. Si tenga presente inoltre che in Italia sono presenti ormai da diverso tempo (e continuano a crescere in numero) diverse piantagioni di bambù, o bambuseti, in cui spesso viene raccolto e utilizzato a fini commerciali, sia nella forma di pianta che di prodotto finito, ad evidenza della perfetta compatibilità della specie con il luogo in cui l'analisi si svolge.



Figura 22 Distribuzione delle specie legnose di bambù nativo nel pianeta - Vogel, Gardner. EEOB IowaStateUniversity [11]



Figura 23 Distribuzione delle specie legnose di bambù nativo nelle zone temperate -Vogel, Gardner EEOB IowaStateUniversity [11]

## 2.2 STRUTTURA E CARATTERISTICHE ANATOMICHE

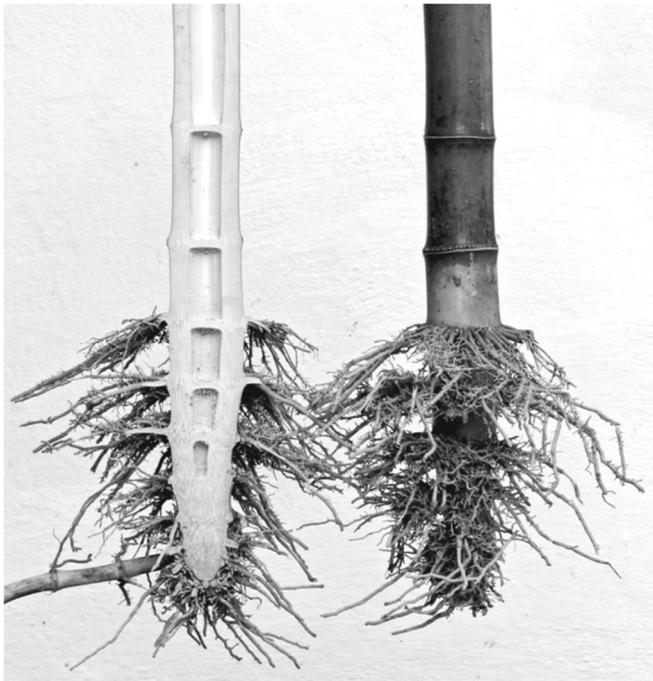


Figura 24 Sezione del culmo [34]

La pianta di bambù ha una struttura schematizzabile in tre parti: rizoma, culmo e diramazioni.

Il rizoma costituisce il sostegno e l'apparato radicale della pianta, estendendosi sino ad un metro di profondità. Può avere uno sviluppo monopodiale in direzione orizzontale, delle specie definite leptomorfe (*runners*).

Altresì lo sviluppo è di tipo simpodiale, in gruppi, delle specie pachimorfe (*clumping*), ossia in gruppi di culmi compatti e ravvicinati, dall'apparato radicale molto meno invasivo rispetto al caso precedente.

È questo il caso della gran parte delle specie esistenti, in crescita su zona tropicale, come *Guadua*, *Bambusa* e *Dendrocalamus*. Dal rizoma dipartono le radici avventizie che si occupano del meccanismo di nutrizione della pianta ed il collo che collega il rizoma alla parte emergente dal terreno, il culmo.

Il culmo della pianta di bambù rappresenta lo sviluppo in elevazione della pianta, la parte "visibile" ed utilizzata nel settore delle costruzioni. Le sue dimensioni possono variare sensibilmente, si contano diametri da 1 sino a 30 cm, altezze da 1 a 40 m e spessore delle pareti da 1 a 10 mm [1], genericamente il 10% dello spessore del diametro. Ha una struttura composta da elementi cavi di forma tubolare e di dimensione più o meno costante, gli *internodi*, separati da *nodi*, diaframmi circolari. I nodi emergono sul terreno della dimensione che manterranno fino a fine crescita ed attraverso il meccanismo di divisione cellulare la distanza tra di essi aumenta con il crescere della pianta, che si sviluppa dunque in maniera "telescopica". Questo sviluppo, molto veloce (si parla in alcune specie di un metro per giorno), dura all'incirca un anno al termine del quale la pianta inizia a maturare in termini di caratteristiche di resistenza, che raggiungono l'apice attorno ai 3-5 anni. In questo periodo, l'indurimento permette il deposito di lignina e silicio nella parete cellulare. Attorno al sesto anno, invece, la resistenza dei culmi inizia a decrescere. [9] A circa metà dell'altezza del culmo, si dipartono i rami e le foglie. In rari casi, la vita della pianta termina con la sua fioritura, che avviene in tutte le piante di una specie nello stesso momento, con intervalli di 60-120 anni. [1]

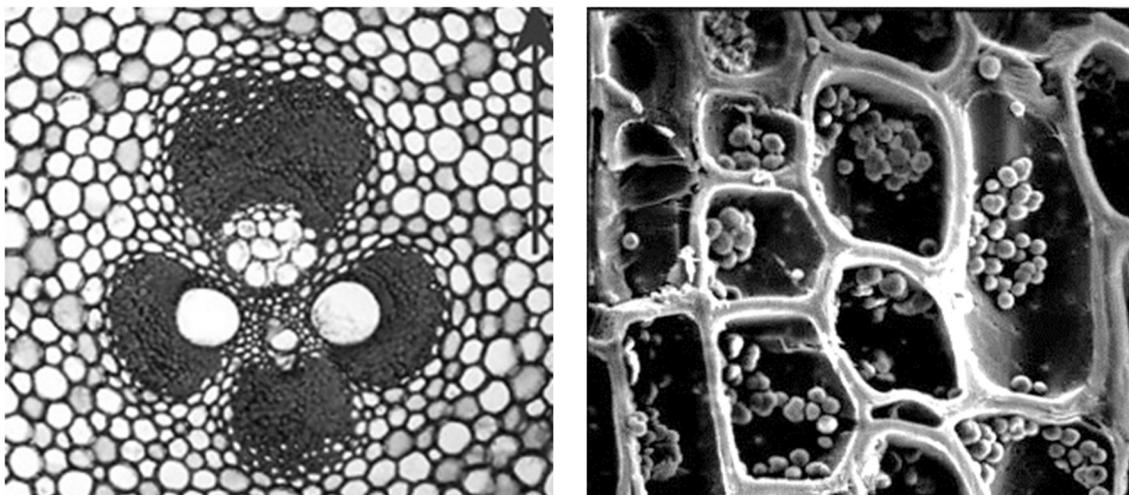
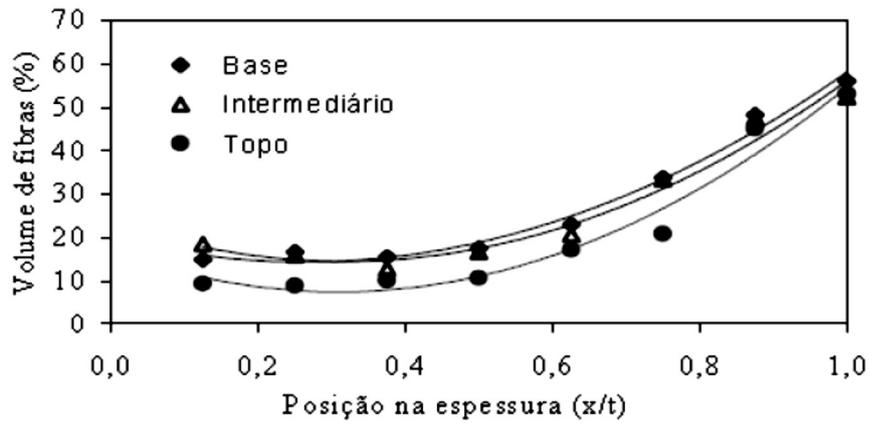


Figure 25 e 26 : Fascio cibo-vascolare e parenchima

La struttura anatomica della pianta determina le sue caratteristiche di resistenza che lo qualificano nell'edilizia. Consta di *fasci cibo-vascolari* e *fibre* che si sviluppano unicamente in senso longitudinale, ossia dirigendo lo sviluppo del culmo. Questo tipo di disposizione varia in corrispondenza dei diaframmi nodali dove si sovrappongono ed intersecano dando vita alla diversa struttura di tale componente. Fibre e fasci cibo-vascolari sono "immersi" nel *parenchima*, tessuto connettivo tra gli elementi longitudinali composto prevalentemente da lignina. La distribuzione di tali elementi non è uniforme sullo sviluppo del culmo: in senso verticale densità rispetto al volume di fibre e vasi aumenta parallelamente alla diminuzione di quella di parenchima. La distribuzione varia anche sullo spessore della pianta: gli elementi longitudinali si raffittiscono in direzione dell'esterno dello spessore, dove sono concentrati circa il 50 % del totale delle fibre, con una conseguente prevalenza del parenchima nella parte interna.

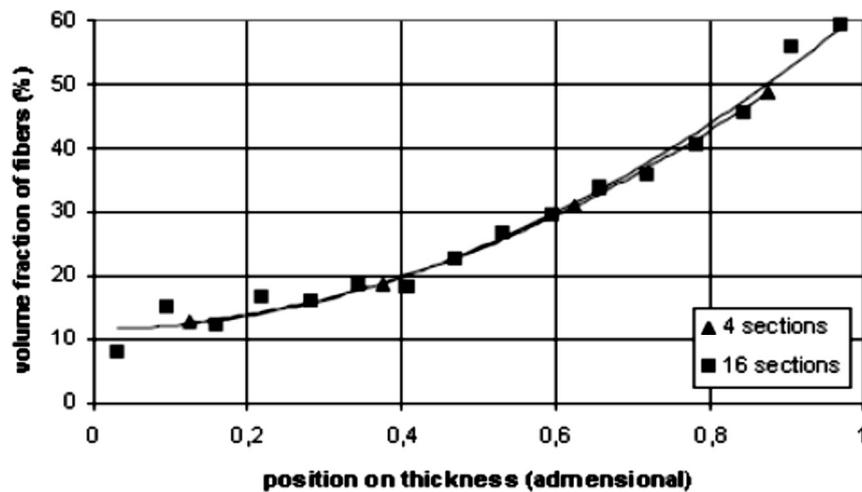
Si consideri che tale distribuzione, associata ad uno studio della resistenza dei singoli elementi, ha l'interessante risvolto di sviluppo di modelli numerici come per i materiali compositi, come per Wan Tarmeze Wan Ariffin(2005) [12].

La parte più esterna risulta invece composta da un doppio strato più rigido. Uno interno di uno spessore maggiore, maggiormente lignificato, ed uno esterno, superficiale, con un ricoprimento polimerico cerato di acidi idrossilici [1].



Parte do colmo	Equação
Base	$V_f = 83,1 \cdot X^2 - 40,7 \cdot X + 19,1$
Centro	$V_f = -101,5 \cdot X^3 + 260,7 \cdot X^2 - 138,4 \cdot X + 33,4$
Topo	$V_f = -412,7 \cdot X^4 + 967,8 \cdot X^3 - 668,3 \cdot X^2 + 171,4 \cdot X - 3,9$

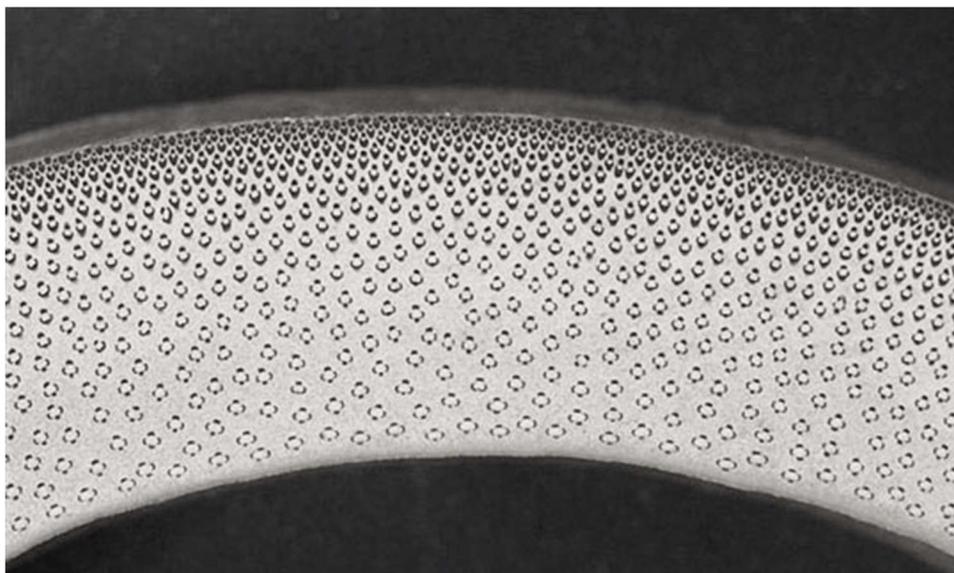
Figura 27 Studio sulla distribuzione delle fibre in relazione allo spessore – Ghavami, Marino (2005)



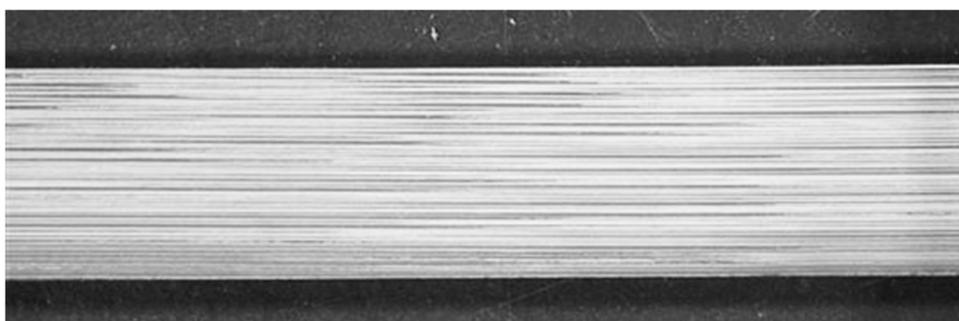
$$V_f(x) = 49.456X^2 + 0.66X + 11.72$$

$$V_f(x) = 40.12X^2 - 0.55X + 16.12$$

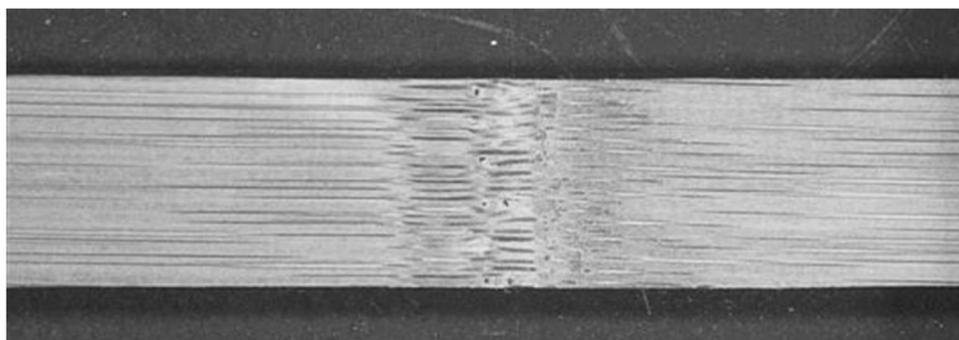
Figura 28 Studio sulla distribuzione delle fibre in relazione allo spessore - Ghavami, Rodrigues, Paciornik (2003)



**Figura 29** Sezione perpendicolare alle fibre



**Figura 30** Sezione parallela alla fibre, esterno del muro



**Figura 31** Sezione parallela alle fibre, interno del muro, con nodo

## 2.3 CARATTERISTICHE FISICHE

Non è obiettivo specifico del presente lavoro l'esposizione delle caratteristiche fisiche del materiale in parola. Per una trattazione approfondita si rimanda ai contributi fondamentali della letteratura sul bambù, che prendono in considerazione le diverse specie diffuse sul pianeta, [6] e [13]. Si vuole in questa sede, presentare le caratteristiche utili ai fini della comprensione delle indagini svolte e focalizzarsi su quelle delle specie locali.

Il bambù è un materiale naturale e pertanto le sue caratteristiche fisiche sono estremamente variabili da specie a specie e da elemento ad elemento. È perciò di fondamentale importanza caratterizzare lo stato fisico in cui si trova almeno inizialmente l'elemento.

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

L'acqua viene ospitata dal parenchima, per cui la sua concentrazione risulta maggiore nella parte interna dove sono presenti meno fasci cibro-vascolari e fibre. Anche in direzione verticale, si ha una variazione della concentrazione d'acqua, maggiore nella fascia inferiore, dove si stima al punto di contatto con il terreno un valore medio di circa il 70%. Esistono numerosi studi a cui si rimanda che valutano la differenza di questi valori per specie e luoghi differenti. Il contenuto d'acqua (*EMC, equilibrium moisture content*) si modifica infatti in relazione alle condizioni atmosferiche ossia umidità relativa e temperatura dell'ambiente in cui cresce la pianta.

È un argomento di estrema delicatezza nella valutazione ed utilizzo del materiale in parola, dal momento che alle variazioni del contenuto d'acqua sono associati perdite o guadagni di capacità resistente del materiale: a maggiore contenuto d'acqua è associata una minore capacità resistente e a variazioni di condizioni ambientali sono associate variazioni di comportamento meccanico. Si tenga poi presente che il contenuto d'acqua ha forti correlazioni con la velocità di decomposizione del materiale, che diventa più facilmente attaccabile da funghi [1].

La *densità o peso specifico ( $\rho$ )* del bambù varia in relazione alla sua composizione, ossia il numero e la struttura dei suoi fasci cibro-vascolari. Si ha pertanto un aumento del valore in corrispondenza della zona esterna del culmo ed in corrispondenza della crescita in verticalità, dove le fibre ed i fasci si raffittiscono. Il valore medio di densità specifica calcolata per peso del campione seccato/volume del campione verde oscilla tra i 500 ed 800 kg/cm<sup>3</sup>. La densità del culmo è un valore variabile temporalmente. Aumenta fino ai sei anni e poi comincia a calare. In tabella si riportano dei test

eseguiti su campioni di bambù italiano, stagionati in assenza di luce solare tra 19 e 23° C ed umidità relativa tra 80 e 95% per tre mesi [5].

<i>no.</i>	<i>culm</i>	<i>pos.</i>	<i>m</i> [g]	<i>V</i> [mm <sup>3</sup> · 10 <sup>-3</sup> ]	<i>m</i> <sub>0</sub> [g]	MC	<i>ρ</i> [kg/m <sup>3</sup> ]
1.	25EG	e	38.23	35.42	26.20	45.91	739.74
		m	45.49	41.95	27.49	65.49	655.24
		e	44.36	41.97	27.72	60.06	660.34
2.	10EG	e	62.14	59.02	42.42	46.49	718.73
		m	69.85	62.77	46.86	49.06	746.55
		e	63.96	56.49	50.38	26.97	891.74
3.	1EG	e	40.74	33.89	31.44	29.58	927.70
		m	50.88	47.75	32.97	54.32	690.50
		e	57.33	55.31	41.08	39.57	742.66
4.	11EG	e	64.94	63.15	47.68	36.19	755.06
		m	69.31	65.49	48.26	43.60	736.98
		e	56.03	54.47	44.17	26.86	810.86

Tabella 4 Analisi su MC e  $\rho$  eseguite su campioni di *Phyllostachys Edulis* italiano [5]

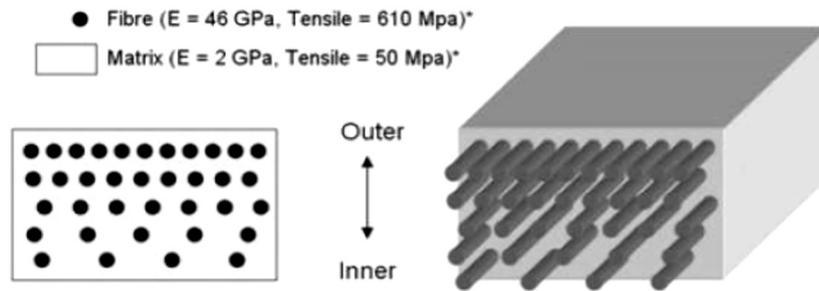
## 2.4 CARATTERISTICHE MECCANICHE

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

Si distinguono all'interno, la resistenza della parte fibrosa e quella della matrice di parenchima, estremamente più esigua. Amada et al. (1996) riporta l'analisi effettuata per la specie *Phyllostachys Edulis* (Moso) delle capacità distinte per le due componenti.

Questa differenziazione nella composizione pregiudica la risposta del bambù agli stimoli esterni in maniera estremamente differenziata.

Nelle zone in cui si ha una maggiore concentrazione di vasi e fibre, la densità ed il peso specifico crescono, in maniera correlata alle prestazioni del materiale: all'aumentare di queste aumenta la resistenza; la parte superiore di un culmo avrà prestazioni meccaniche maggiori rispetto alla sua parte inferiore e così la parte esterna della sezione rispetto quella interna.



Properties	Matrix	Fiber
Tensile strength (MPa)	50	610
Young's modulus (GPa)	2	46
Density (Kg/cm <sup>3</sup> )	0,67	1,16

Figura 32 Distribuzione e capacità per fibre e matrice all'interno del bambù - Amada et al. (1997)

Material	Strength (N/mm <sup>2</sup> )	Weight by volume	Ratio	Stiffness (N/mm <sup>2</sup> )	Weight by volume	Ratio
Concrete	8	2400	0.003	25000	24000	10
Steel	160	7800	0.02	210000	7800	27
Wood	7.5	600	0.013	11000	600	18
Bamboo	10	600	0.017	20000	600	33

Tabella 5 Confronto tra le proprietà dei materiali [6]

Property	N/mm <sup>2</sup>	Source
Compression	28	López & Silva (2000)
(parallel-to-grain)	38	Uribe & Duran (2002)
Tension	35	López & Silva (2000)
(parallel-to-grain)		
Bending	46	Sánchez & Prieto (2002)
Shear	2,3	Clavijo & Trujillo (2000)
Tension		
(perpendicular-to-grain)	0,22	Pacheco (2006)
Modulus of Elasticity - Compression	14500	Uribe & Duran (2002)
Modulus of Elasticity - Tension	11800	Sánchez & Prieto (2002)

Tabella 6 Sintesi letteraria delle caratteristiche per la Guadua Angustifolia Kunth [14]

La **resistenza a compressione** del bambù varia significativamente in funzione della direzione dell'applicazione del carico. Per sollecitazioni parallele all'orientamento delle fibre si ha una massimizzazione delle capacità resistenti e per sollecitazioni ortogonali la minimizzazione delle stesse. Si conta inoltre differenza di comportamento in funzione della localizzazione dell'applicazione del carico relativamente al culmo, che in questo caso risulta essere maggiormente performante nelle zone di internodo. Dai risultati ottenuti sulle specie di bambù italiane [5], si trova per i campioni di *Phyllostachys Viridiglaucescens* analizzati, una resistenza a compressione media di 69,27 MPa, massima di 81 MPa e minima di 50 MPa. La rottura del campione avviene a partire dalle estremità e in seguito per propagazione sull'intera lunghezza del campione.

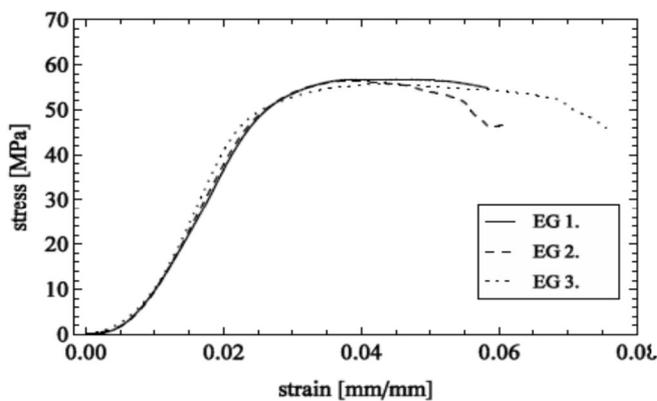


Figura 33 Grafico tensione-deformazione per prova a compressione (4)

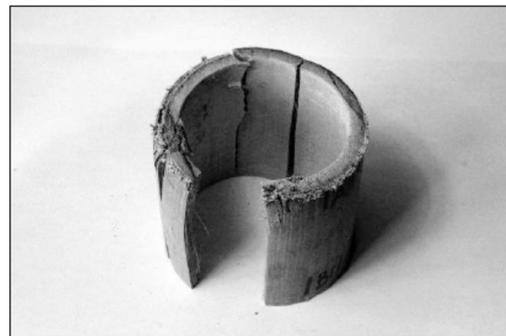


Figura 34 Rottura del campione sottoposto a sollecitazione assiale di compressione [5]

La **resistenza a trazione** raggiunge valori significativi che gli consentono di meritare la comune dicitura di "acciaio vegetale". Dalle prove effettuate sulle specie italiane di *Phyllostachys Viridiglaucescens* [5] si trova una resistenza media a trazione pari a 158 MPa e resistenza massima (minima) a trazione del valore di 172 MPa (145 MPa) per un valore di MC pari al 24,9%.

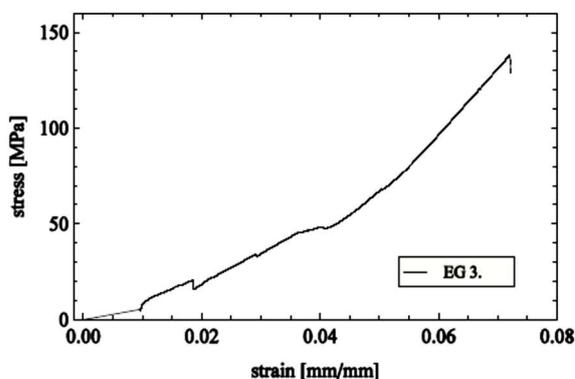


Figura 35 Grafico tensione-deformazione per la prova a trazione [5]

Il comportamento del materiale sottoposto alla prova segue un andamento non perfettamente lineare. La rottura del provino avviene in corrispondenza del nodo o nelle vicinanze, che caratterizza il comportamento rispetto questo tipo di sollecitazione, opposto rispetto a quella di compressione.

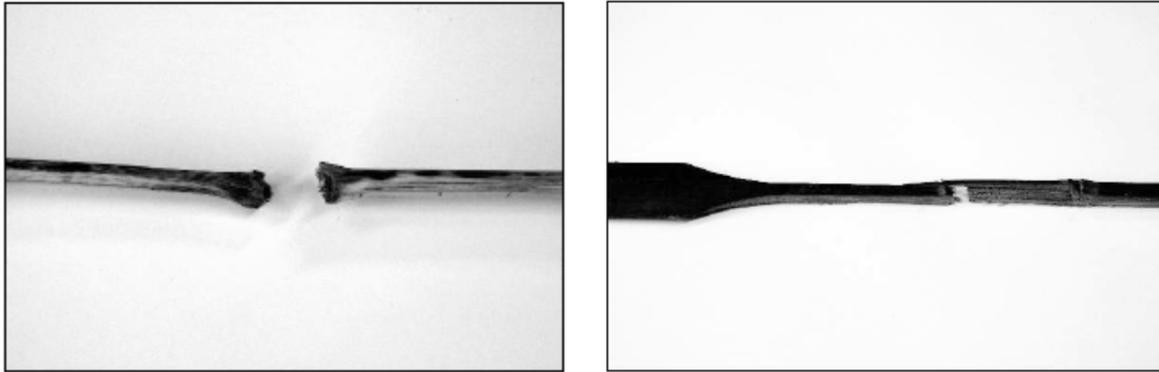


Figura 36 Rottura dei provini sottoposti a prova di trazione [5]

Un ulteriore meccanismo di rottura visibile avviene a partire dalla parte interna dello spessore, le cui fibre iniziano il processo di rottura. Le sperimentazioni di Janssen [6] mostrano infatti il rapporto tra il modulo elastico a trazione e lo spessore del culmo, che parallelamente decrescono dall'esterno verso l'interno. Un ulteriore tipo di considerazione sul comportamento a trazione va fatto in relazione alla massa volumica, per cui si nota una crescita di tipo proporzionale secondo [15]:

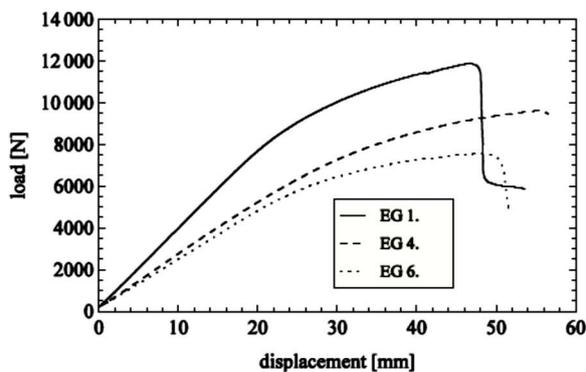
$$\sigma = 0,307\rho$$

e per l'età secondo [15]:

$$\sigma = 132,76 + 38,29 A - 5,87 A^2$$

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

Il comportamento a **flessione** del bambù è di notevole importanza nell'analisi del comportamento



generale della struttura, in cui travi e pilastri sono genericamente sottoposti a questo tipo di sforzo. I valori derivati dallo studio sui campioni italiani di *Phyllostachys Edulis* [5] riportano la resistenza a flessione media il valore di 97,31 MPa, con i valori di massima (minima) pari a 118,40 MPa (72,10 MPa), in relazione al MU del 47,3%.

Figura 37 Grafico carico-spostamento per la prova a flessione [5]

Il comportamento dei campioni durante la prova segue l'andamento descritto in figura, con una prima fase pressoché elastica.

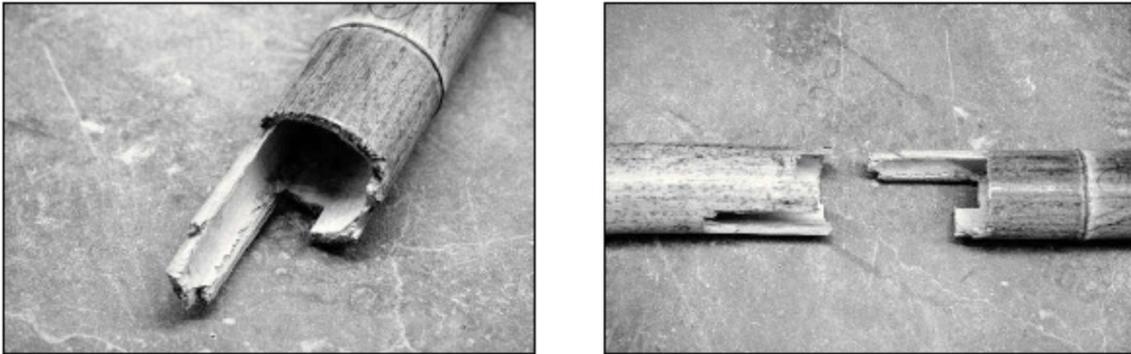


Figura 38 Rottura dei provini sottoposti a sforzo di flessione [5]

Un parametro che influisce sensibilmente sul valore di rottura è il diametro del culmo, per cui è stata dimostrata [6] una decrescita del valore di resistenza in corrispondenza dell'aumento della dimensione del diametro e dello spessore, ossia risultano meno performanti alla sollecitazione di flessione elementi con un diametro ed uno spessore minori.

Ancora come nei casi precedenti si dimostra [15] una relazione tra la massa volumica del culmo e la sua capacità resistente a flessione, secondo:

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

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

e per l'età:

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

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

dove vengono distinte la tensione radiale  $\sigma_r$  da quella tangenziale  $\sigma_t$ . La variazione della massa volumica è dunque ancora una volta proporzionale alla crescita della resistenza ultima a trazione mentre per quanto riguarda le classi di età si evidenzia un netto miglioramento dai 3 ai 6 anni prima e dopo i quali i valori si abbassano notevolmente.

Ulteriori considerazioni vanno fatte riguardo la posizione dei nodi sul provino. Si riscontra infatti [6] che i provini che presentano il nodo al centro della luce del provino piuttosto che alle estremità, raggiungono valori di tensioni e di modulo elastico nettamente superiori, come viene infatti inserito nei The Indian Standard del 1973 che fissa la posizione dei nodi per i provini a flessione [8].

Si evidenzia inoltre come la tensione ed il modulo elastico a flessione del provino siano dipendenti anche dalla posizione sull'interezza del culmo, che sulla parte terminale rispetto quella più bassa può raggiungere valori del 9,5% maggiori. Si registra il valore medio di  $E_{b,m}$  pari a 13815,59 MPa per provini sottratti alla parte media del culmo e di 12315,93 MPa per quelli relativi alla parte inferiore [5].

Le considerazioni da fare circa la **resistenza a taglio** sono di particolare rilievo ai fini dello studio delle connessioni nella struttura. Risulta estremamente debole rispetto le caratteristiche sopra citate, per cui si stima che la resistenza a taglio equivalga approssimativamente all'8% della resistenza a trazione [8]. Non esistono prove a taglio su campioni di bambù italiano, si riportano in letteratura valori di resistenza medi attorno ai 12 MPa.

Valori così deboli vanno considerati tenendo conto della struttura del materiale che non presenta fibre trasversali ma solo una matrice coesiva che non è in grado di resistere a sforzi significativi. Pertanto la resistenza a taglio aumenta per spessori più piccoli del culmo, che hanno una concentrazione di fibre maggiore, così come in corrispondenza dei nodi, dove vi sono fibre trasversali.

Si ritengono inoltre importanti specifiche considerazioni relative al possibile impiego del bambù in costruzioni sismicamente resistenti, da un lato per la necessità di sensibilizzazione al tema nella questione italiana, dall'altro per le innegabili qualità del bambù nella risposta all'evento sismico. Si mette in risalto la relazione tra:

- Leggerezza
- Flessibilità
- Resistenza meccanica

L'alto valore del rapporto resistenza/peso dà la possibilità alle strutture costruite con questo materiale di resistere in modo efficiente alle ridotte azioni di massa indotte dal sisma. A parità di carico sopportato, un peso più contenuto consente alla struttura di essere meno interessata dalle accelerazioni sismiche, avendo una massa minore. Tuttavia, bisogna considerare il fatto che il comportamento del bambù nella progettazione antisismica può essere valutato soltanto in campo elastico, essendo un materiale fragile [16].

Di fatto le sole caratteristiche del materiale non sono sufficienti a garantire la risposta ottimale all'evento sismico ed è pertanto estremamente importante un'accurata progettazione ed un'accurata ricerca nel settore. Non esistono, ancora, nozioni e normative ben definite se non prassi di buon senso, come evitare fondazioni fragili ed elementi orizzontali pesanti. Il punto estremamente debole della progettazione antisismica consiste senz'altro nei giunti, che saranno trattati in questo documento. La normativa ISO 22156 specifica la possibilità di considerare adeguato o meno un

giunto dal punto di vista sismico per imitazione se ha dimostrato in condizioni simili di resistere a disastri [8].

Le considerazioni sulle evidenti qualità del bambù in risposta sismica, hanno portato allo svolgimento di indagini mirate allo studio scientifico delle tecniche tradizionali, sia per la messa in sicurezza delle strutture esistenti, sia in relazione a prototipi più sicuri per le ricostruzioni. Si riporta a tal proposito l'esperimento condotto nel 2005 dall'Università di San José in Costa Rica, dove sono stati ricostruiti muri tipo "bahareque" di tradizione latinoamericana, di bambù splittato in uno schema murario di legno, intonacato. I muri testati a carichi ciclici orizzontali, simulando l'azione del sisma, hanno dimostrato non solo un comportamento duttile ai carichi ciclici, ma anche un'ottima resistenza a carichi imposti da sisma di grandi magnitudo [17].

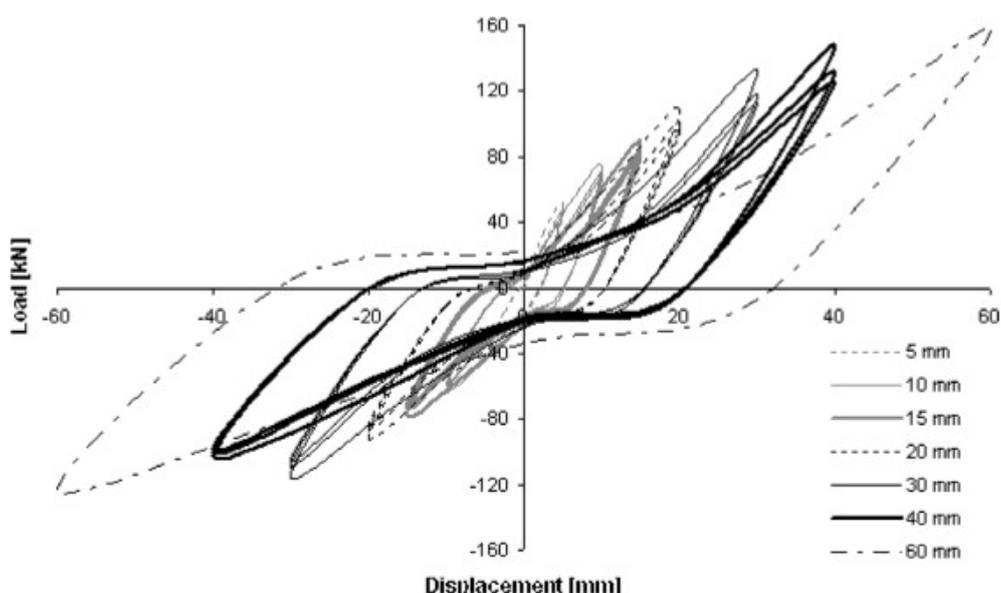


Figura 39 Diagramma carico-spostamento per muro di Bahareque sollecitato a carichi orizzontali ciclici [17]

Si riporta infine in alcune immagini, uno studio condotto a seguito del terremoto del 2006 nel nord-est dell'India (Sikkim), dove viene messa in risalto la differenza della risposta di una struttura costruita secondo le tecniche per noi conosciute come "tradizionali" rispetto quelle che sono "tradizionali" in quei luoghi, in cui la struttura costruita in bambù risulta non presentare quasi alcun danno [18].

Un'ulteriore considerazione che va fatta riferendosi a temi che recano con sé l'urgenza, quindi necessità di tempistiche ridotte e facilità di reperibilità del materiale e della manodopera, per cui si ricorda che il bambù consente di risolvere problemi abitativi con tecniche e materie che non richiedono complesse e lunghe lavorazioni e tempistiche.



Figura 40 Undamaged Ikra (bamboo frame construction) building, after 2006 Sikkim earthquake [18]



Figura 41 Damaged reinforced concrete building, after 2006 Sikkim earthquake



Figura 42 Damaged stone masonry building, after 2006 Sikkim earthquake [18]

Dallo studio della letteratura sulle proprietà del bambù si evincono le sue ottime qualità in termini di sostenibilità e proprietà meccaniche, quanto l'esigenza di tecniche di progettazione raffinate e precise. Di fatto, se le potenzialità del materiale risultano considerevoli, la buona riuscita della costruzione dipende molto dalla tecnologia con cui lo si utilizza, date le disparità notevoli di comportamento relativamente alla sua struttura morfologica microstrutturale.

Il punto debole nella progettazione delle strutture in bambù sicuramente si individua nei giunti tra gli elementi. Le ragioni principali possono essere individuate nelle seguenti:

- **Differenze tra elementi da connettere**  
variabili in diametro, spessore, sezione data la naturalezza della sua origine
- **Profilo circolare e cavo**
- **Superficie esterna rigida e liscia**
- **Scarsa resistenza a taglio**
- **Ortotropicità**  
che rende il materiale disomogeneo nel comportamento relativo a sforzi applicati parallelamente od ortogonalmente alla superficie dell'elemento a causa del fatto che le fibre del bambù crescono soltanto in direzione longitudinale.

Si ritiene sia di grande importanza dunque lo studio e la descrizione del funzionamento dei giunti finora utilizzati, spesso in maniera "inconsapevole" (ci si riferisce alle tecniche di tradizione) o impropria.

Vengono quindi qui di seguito esposte le tipologie di giunzione tra elementi composti da culmi di bambù, presenti in letteratura. Il primo tipo di classificazione che si sceglie è relativa al tipo di tecnica utilizzata. Al suo interno, si distingue secondo il tipo di funzionamento della trasmissione dello sforzo, come proposto da Janssen [19], nella classificazione qui di seguito riportata:

*Gruppo 1 full cross-section*

*Gruppo 2 from inside to an element parallel*

*Gruppo 3 from inside to an element perpendicular*

*Gruppo 4 from cross-section to element parallel*

*Gruppo 5 from cross-section to element perpendicular*

*Gruppo 6 from outside to element parallel*

*Gruppo 7 from outside to element perpendicular*

*Gruppo 8 for split bamboo*

## 2.5 GIUNTI TRADIZIONALI (LEAST-TECH)

### 2.5.1 CULMI LEGATI CON CORDE



Probabilmente il metodo più utilizzato nella tradizione delle costruzioni in culmi di bambù, sia per la facile esecuzione del giunto sia per la facile reperibilità del materiale, che consiste in piante autoctone che non richiedono particolari lavorazioni. Le corde, intrecciate semplicemente o multiple, sono genericamente di canapa, vimini, fibra di cocco, juta, liane o di fibre dello stesso bambù, che hanno il vantaggio di essere più durevoli rispetto le altre, si stima al pari di corde zincate, contando circa circa 70,6 MPa di resistenza a trazione [20]. Il metodo applicativo consiste nell'esecuzione del nodo quando le fibre sono ancora verdi, tali che, con la perdita dell'acqua dovuta al seccarsi delle fibre, il giunto risulti preteso. Oltre a tenere i culmi giuntati per mezzo di attrito, le corde possono essere utilizzate servendosi della creazione di un foro all'interno degli stessi per il passaggio della corda. Se da un lato questo aspetto garantisce una migliore presa sui culmi, dall'altro li rende meno resistenti a seguito delle bucatore, che devono essere eseguite con estrema precisione per mezzo di trapani.

Figure 43 - 44 - 45 - 46 Dunkelberg (1985)



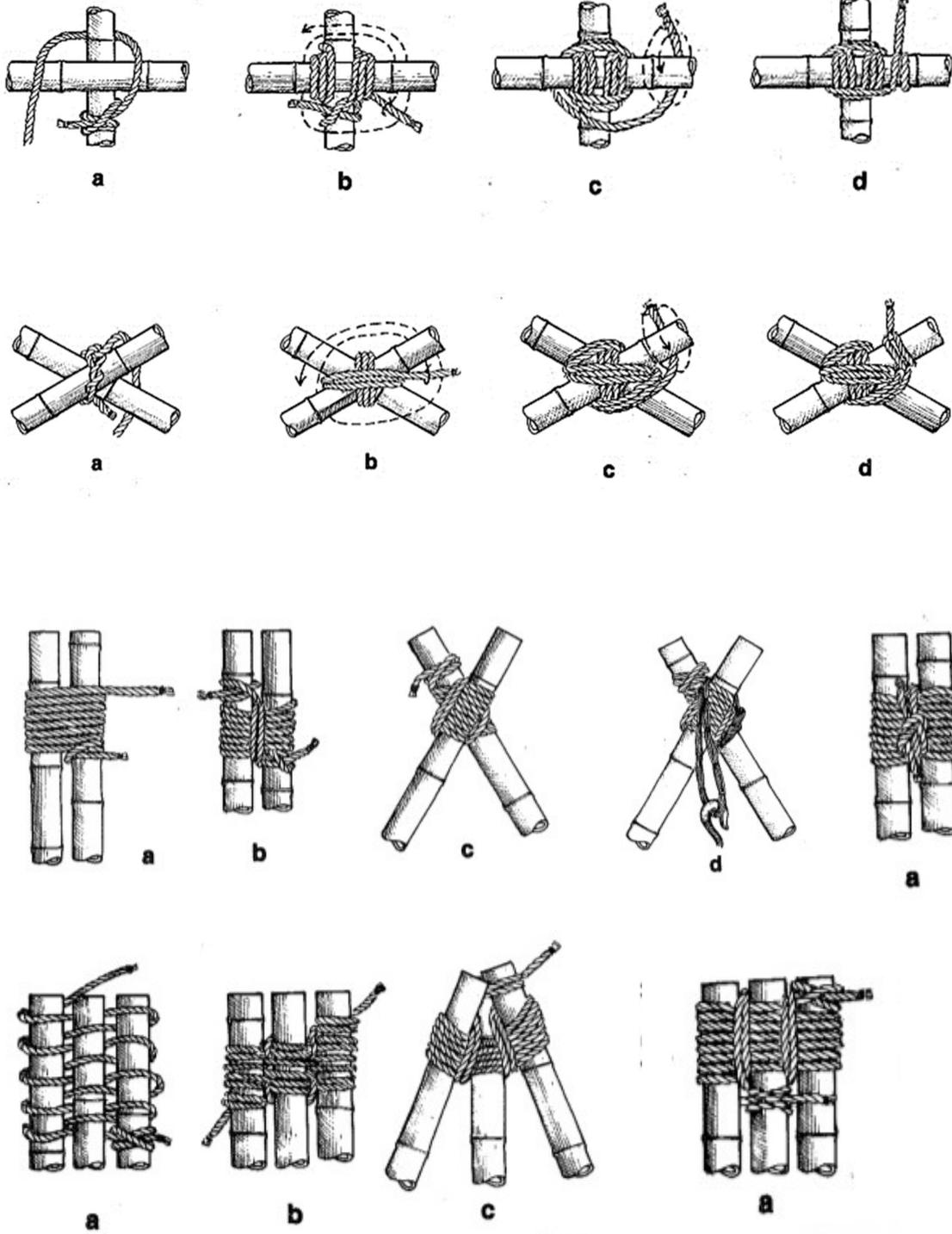
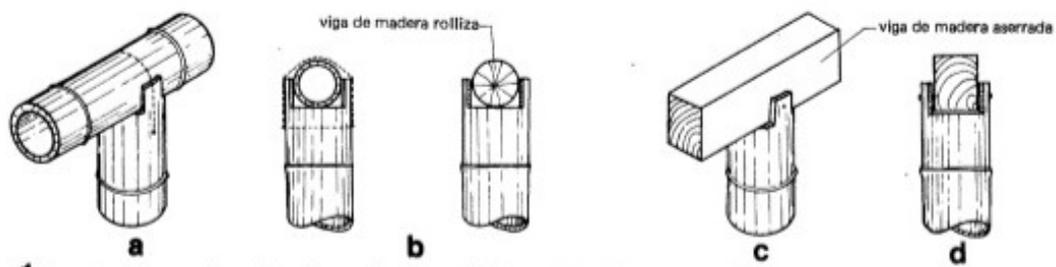
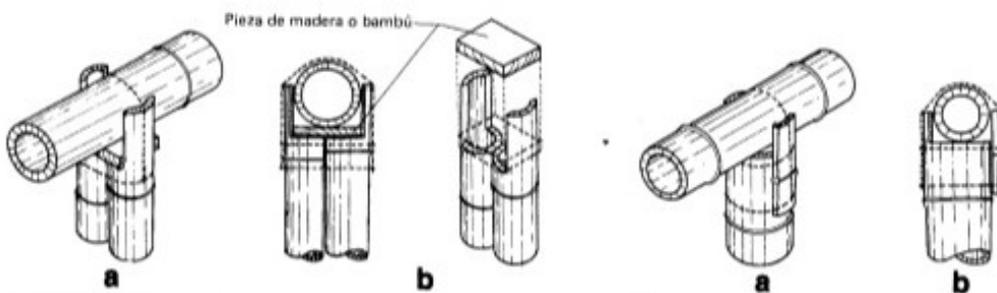


Figura 47 Tecniche di legatura di culmi con corde, in asse e a croce [21]

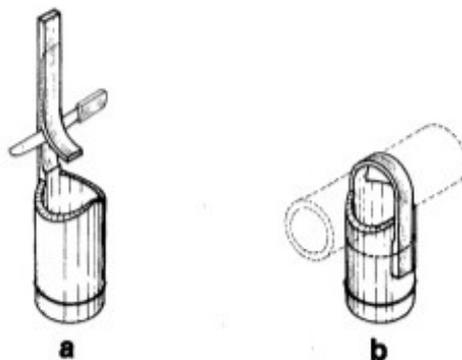


**1 Soporte con una o dos orejas.** Se emplea para recibir vigas de bambú, madera rolliza o aserrada

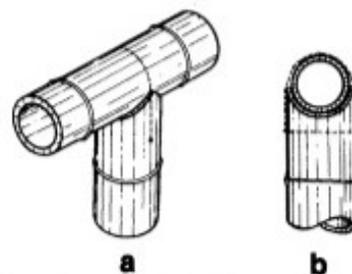


**2 Doble soporte con oreja.** Se emplea cuando las piezas utilizadas como vigas son de mayor diámetro que las utilizadas como columnas.

**3 Soporte con oreja sobrepuesta.**



**4 Soporte con solapa.** Se emplea cuando no se dispone de alambre para el amarre. La solapa se amarra con cintas de bambú

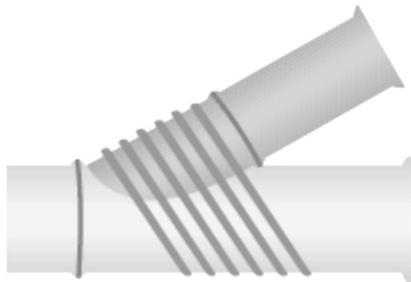


**5 Soporte con entalladura de boca de pescado.**

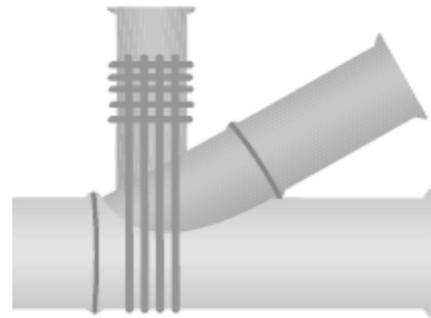
Figura 48 Técnicas de giunzione di culmi con sagomatura, foratura e legatura [21]

Si riportano degli estratti dal libro *Manuàl de Construccìon con Bambù* de O.H. Lòpez, considerato il manuale pratico fondamentale per le tecniche di utilizzo del materiale. Nel primo dei due sono illustrate le sole tecniche di legatura di elementi tramite corde e nel secondo tecniche più raffinate di giunzione tra gli elementi, che prevedono la collaborazione tra la corda ed il bambù per mezzo di foratura. Ciascuno dei pezzi è opportunamente sagomato, e per la tecnica di esecuzione della sagomatura si rimanda allo stesso manuale [21]. Il nodo di tipo 4 della figura 48 è probabilmente il più utilizzato nella tradizione, dove il risolto (solapa) viene eseguito in bambù ancora fresco.

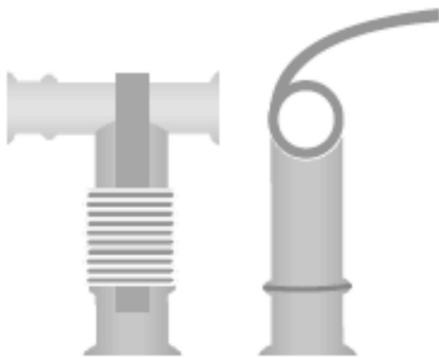
Facendo riferimento alla classificazione di Janssen [19], da cui vengono tratte le immagini e le relative descrizioni, possiamo suddividere i giunti tra culmi di bambù tenuti da corde secondo la trasmissione dello sforzo:



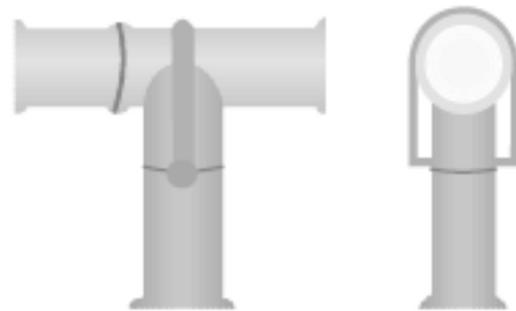
1.1 Contatto delle sezioni



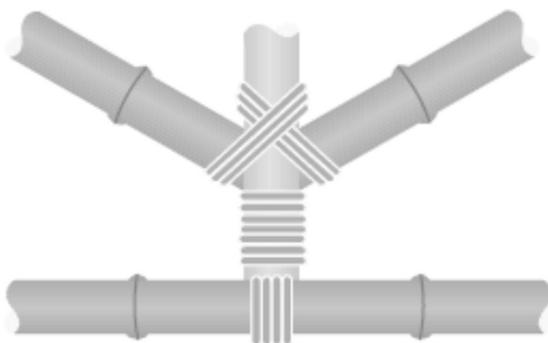
1.2 Trasmissione dello sforzo tramite contatto delle sezioni



1.3 Contatto delle sezioni



5.1 Dalla sezione ad un elemento perpendicolare



6.1 Dall'esterno del culmo ad un elemento parallelo

Le prime tre immagini suggerite da Janssen appartengono alla categoria prima, di trasmissione dello sforzo per contatto tra sezioni, in cui le corde trovano impiego solo per bloccare i movimenti tra i culmi. Nel giunto 1.2, all'elemento verticale compete lo sforzo di compressione, ed a quello diagonale lo sforzo di trazione. La spinta data dal primo dei due elementi, blocca il secondo nei movimenti orizzontali. Il terzo elemento è una delle tecniche maggiormente diffuse in Asia, ricordando quanto

già descritto da [21], ed illustrato in figura 48. Il quarto caso è spesso utilizzato per le recinzioni o come supporto di travi e tubi dell'acqua. Risulta essere estremamente debole rispetto le sollecitazioni di taglio, ma si può opportunamente risolvere il problema mediante l'inserimento di un elemento ligneo. Nell'ultimo caso invece, la corda assume parte attiva. La superficie esterna del culmo è estremamente liscia ed è per questo difficile che qualcosa possa bloccare il movimento tramite attrito. Questo tipo di giunzioni viene generalmente realizzato mediante l'utilizzo di corde solo se è possibile bloccarne il movimento. Un esempio è quello di figura 47.

I tradizionali giunti in corde sono spesso stati ripresi nelle installazioni più di frequente, ed in alcuni edifici in bambù realizzati in tempi recenti. Una possibile variante prevede la sostituzione delle corde di materiale vegetale con quelle in materiale metallico, che tuttavia risente della corrosione.



Figura 50 Son La Restaurant, Vo Trong Nghia 2014



Figura 49 Penda's Pavilion

Si riassumono, infine, le caratteristiche di questo tipo di collegamento:

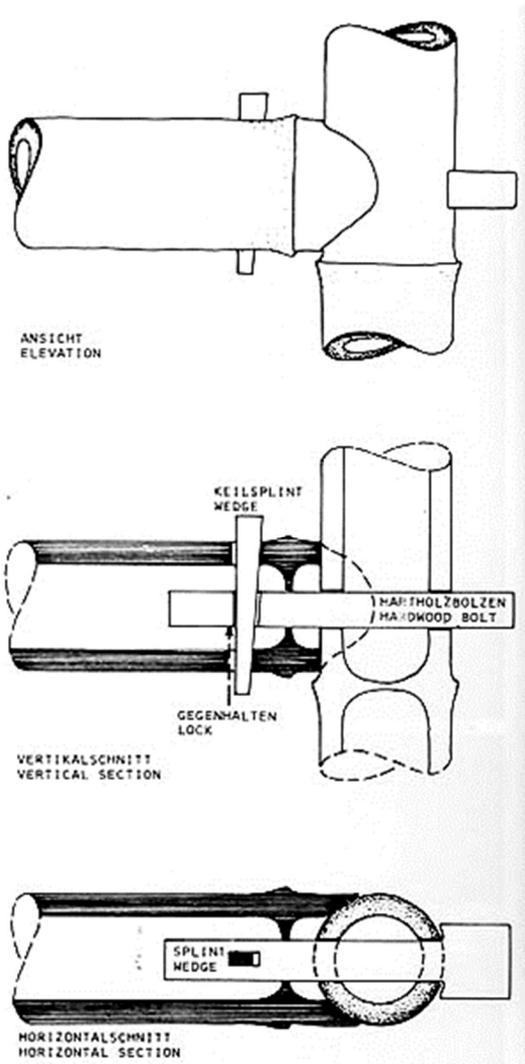
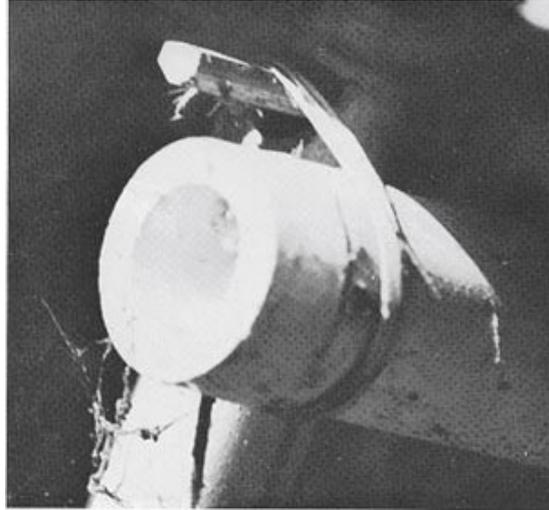
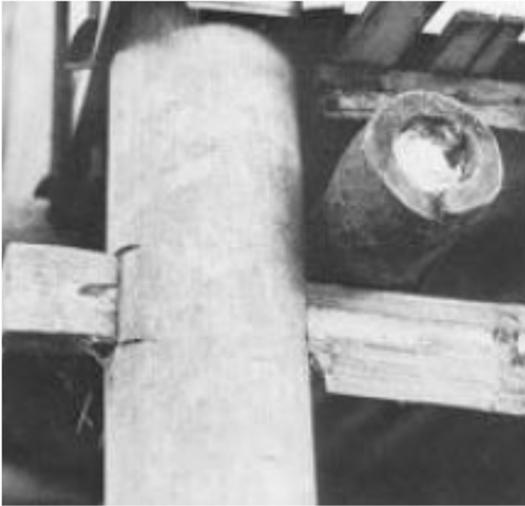
PRO	CONTRO
Semplicità nell'esecuzione	Variabilità (esecutore, momento, materiale..)
Semplicità nella reperibilità dei materiali	La contrazione del bambù a causa della perdita di umidità può portare all'allentamento del nodo
Ottimo rapporto semplicità/prestazione	Tutti i materiali sono esposti ad attacchi di insetti e deterioramento
Adattabilità a tutte le situazioni di costruzione	La resistenza del nodo è pari a quella della corda, non collabora il bambù
Non necessita di forature che favoriscono lo splitting	
Basso costo	
Basso impatto ambientale	

**Tabella 7 Confronto caratteristiche giunzioni mediante corde**

### 3.2.2 CULMI FORATI GIUNTATI DA PERNI IN LEGNO

Un altro tipo di tecnologia consiste nell'incastare un culmo nell'altro e bloccare il movimento mediante l'inserzione di bulloni e/o cunei, realizzati tradizionalmente in legno. Si prevede dunque la creazione di una specifica area dedita ad assorbire lo sforzo, che aumenta la stabilità del giunto riducendo lo slittamento tra i culmi. Il difetto che automaticamente ne deriva è tuttavia quello fare utilizzo di una minore parte di sezione resistente.

Il fatto di tagliare il culmo e creare un'intersezione permette l'unione di più giunti, ma al prezzo di un maggior numero di fori.



Si noti tuttavia che al crescere della complessità nell'esecuzione del giunto, aumenta di conseguenza il potenziale di collasso del giunto, dal momento che la sezione forata viene indebolita, ed è da tenere in conto nel tipo di struttura che viene trattata, che può così riferirsi soltanto a piccoli fabbricati di destinazione residenziale e di massimo due livelli.

La realizzazione dei fori nel bambù presenta delle difficoltà operative dal momento che genera spesso fessurazioni longitudinali lungo la parete del culmo intaccandone la resistenza e minando la stabilità del collegamento da realizzare. Devono essere pertanto realizzati con degli strumenti appositi, difficilmente reperibili in situazioni d' "emergenza".

Figura 51 Plug-in bamboo connector, Dunkelberg (1985)

Si noti che il tipo di collasso che caratterizza questo tipo di giunto, ammesso che non si verifichi lo splitting, è per rottura dei perni in legno (o bambù). La situazione prevede dunque spesso delle soluzioni di tipo collaborativo, ossia utilizzando supporti esterni come delle legature, secondo le tecniche tradizionali [21], oppure nelle evoluzioni contemporanee mediante l'utilizzo di inserti in un materiale particolarmente resistente, ad esempio di tipo metallico.

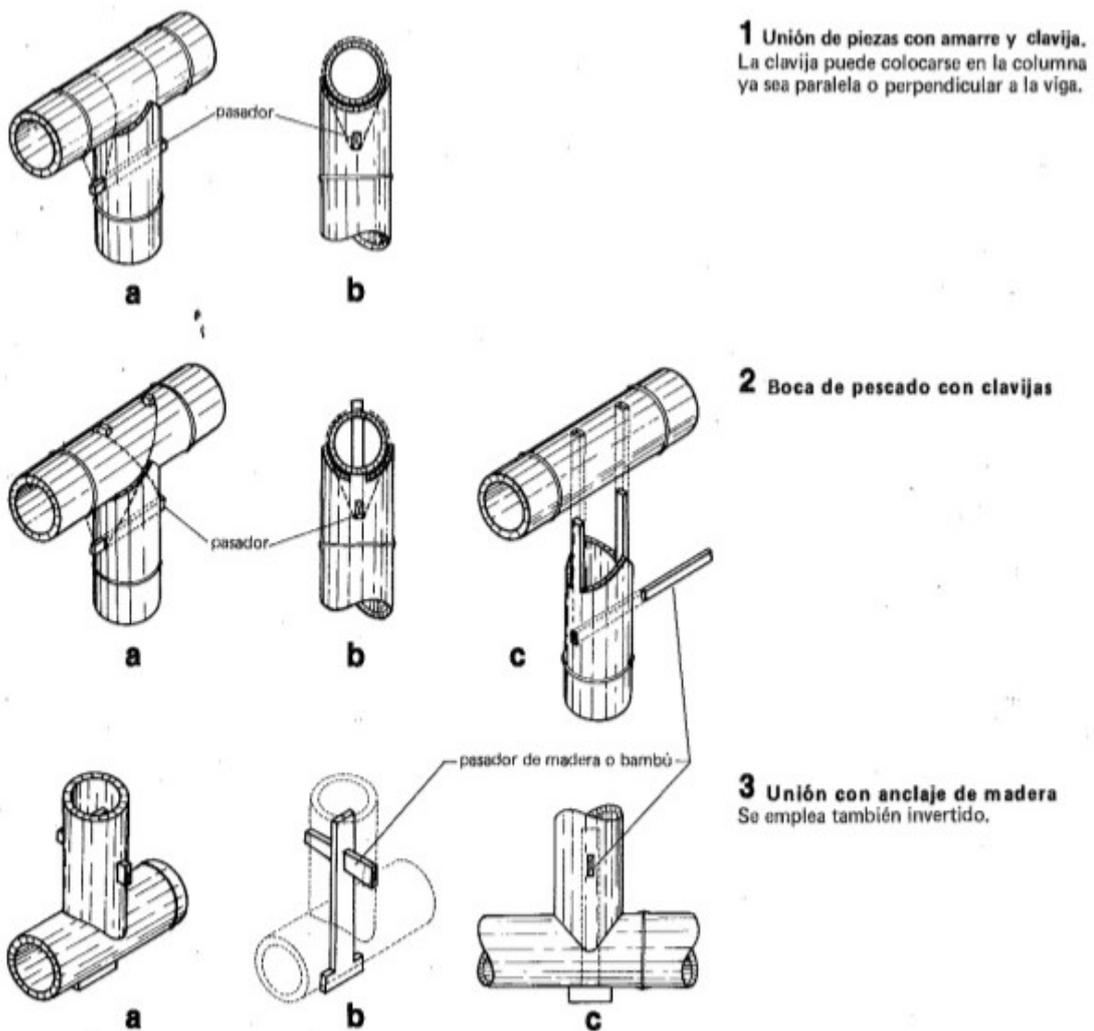


Figura 52 Unione di elementi perpendicolari con perni in legno [21]

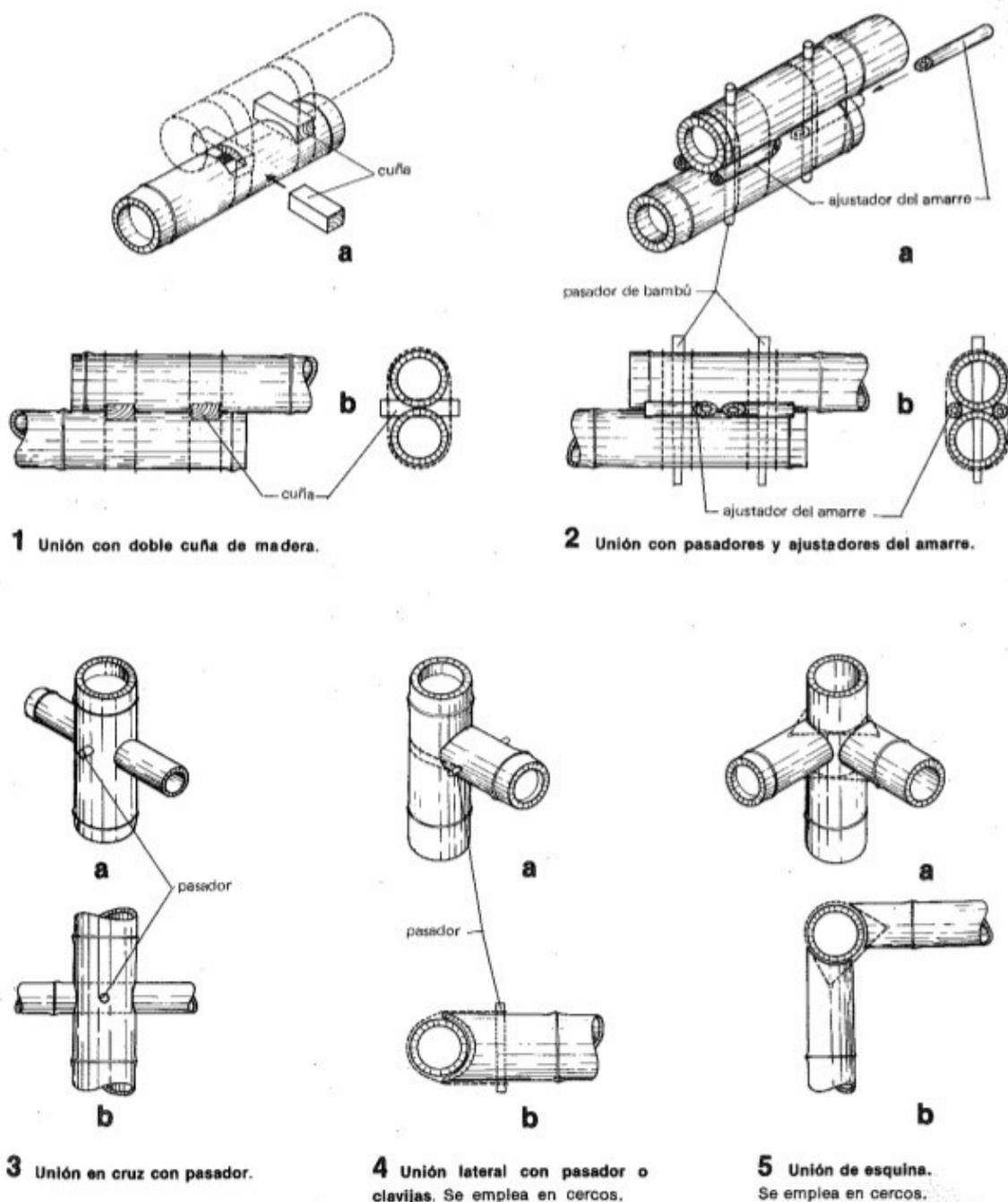
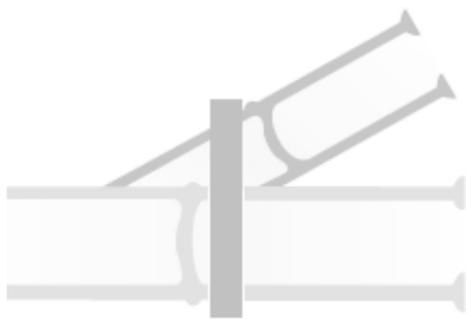


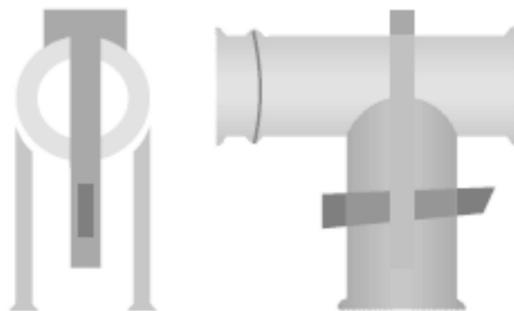
Figura 53 Unione di elementi in asse e non, con perni e corde [21]

Salvo rari casi, è evidente che la sezione del bambù in questo tipo di giunti sia esonerata dal compito di trasmettere lo sforzo, che compete interamente al sistema perno/corda. Vengono generalmente utilizzate in maniera complementare per cui si fa ricadere ad uno dei due il compito di resistere agli sforzi perpendicolari ed all'altro quelli paralleli.

Si riportano i casi previsti da Janssen [19]:



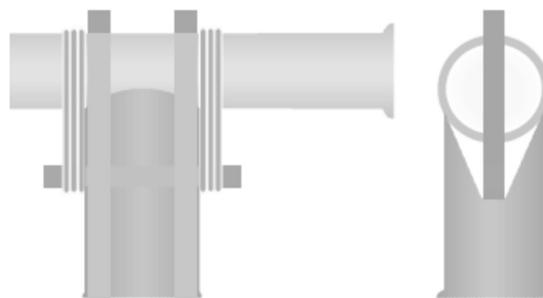
1. Contatto tra le sezioni



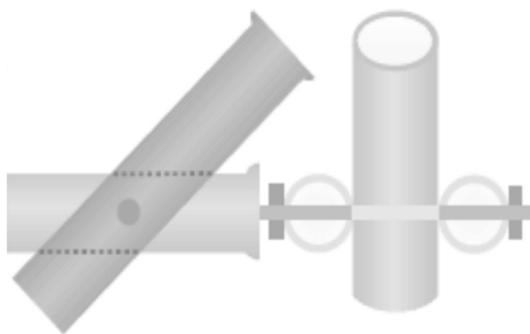
4.1 Dalla sezione ad un elemento parallelo



5.1 Dalla sezione ad un elemento perpendicolare



4.2 Dalla sezione ad un elemento parallelo



6. Dall'esterno del culmo ad un elemento parallelo

Il terzo di questi è il più frequente caso di collaborazione con corde, come descritto sopra. Sono inseriti due elementi estratti direttamente dai culmi che vengono collegati. Ad essi è imputato il compito di resistere alle sollecitazioni orizzontali mentre per le forze verticali esiste la resistenza della corda. Il quinto è frequentemente utilizzato nelle strutture, per trasmettere gli sforzi da elementi diagonali, genericamente di copertura, a sistemi di travi orizzontali.

Si riassumono infine, le caratteristiche di questa categoria di giunzioni nella tabella che segue:

**Tabella 8 Confronto caratteristiche giunzioni tramite ancoraggi in legno**

PRO	CONTRO
Gradevolezza estetica	Manodopera precisa ed accurata
Semplicità nella reperibilità dei materiali	Le bucatore per gli inserti indeboliscono il culmo rendendolo più esposto alla rottura per splitting
Adattabilità a tutte le situazioni di costruzione	Tutti i materiali sono esposti ad attacchi di insetti e deterioramento
Basso impatto ambientale	La resistenza del nodo è pari a quella degli inserti, non c'è contatto tra le sezioni dei culmi
Costo contenuto	Debole rispetto a sollecitazioni verticali causa debolezza di taglio

### 3.2. GIUNTI NON TRADIZIONALI (HIGH-TECH)

L'evoluzione delle conoscenze ha portato ad integrare sistemi tradizionali con nuove tecnologie e all'utilizzo della combinazione tra il bambù e materiali di provenienza industriale come l'acciaio. Il panorama di possibilità si amplia notevolmente, aggiungendo vantaggi in termini di comportamento in termini di duttilità e resistenza.

#### 3.2.1. UTILIZZO DELL'ACCIAIO



Una delle prime variazioni che può essere considerata prevede la sostituzione nelle tecniche tradizionali dei materiali naturali (canapa, bambù, legno) con elementi metallici. Ne sono un esempio le sopracitate connessioni con corde di metallo (fil di ferro ad esempio) e quelle, molto più frequenti, con viti e bulloni.

In questo campo troviamo le giunzioni tra elementi in bambù prescritte dalla normativa dei paesi sudamericani.

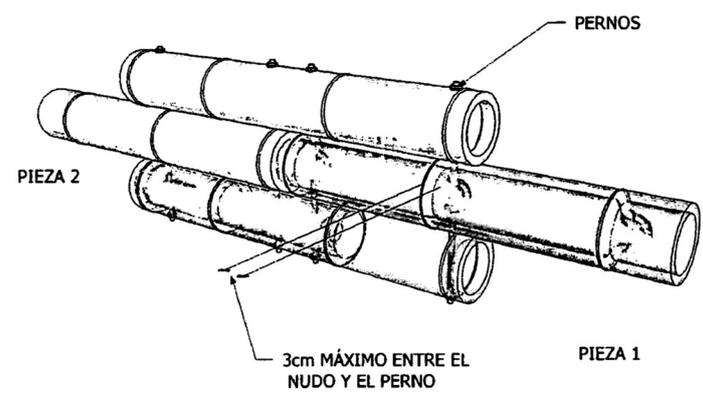
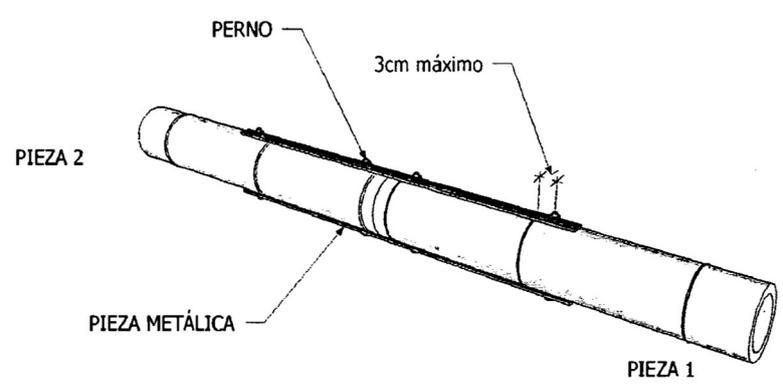
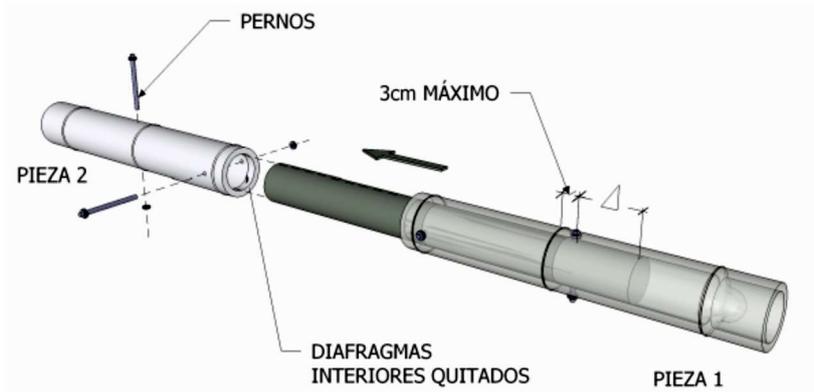


Figura 54 Unione longitudinale di elementi, secondo la normativa peruviana [22]

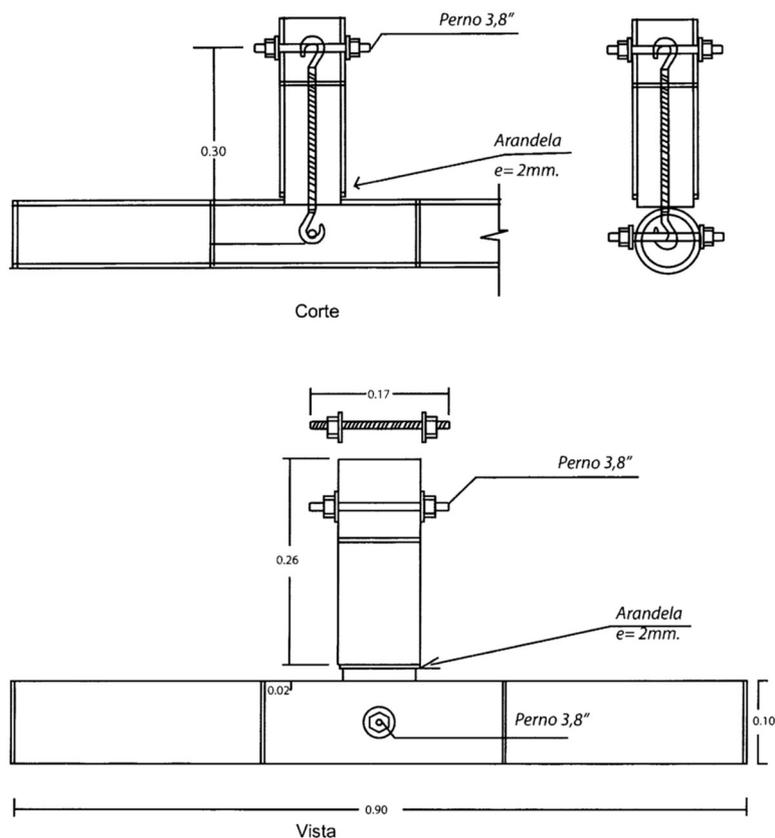


Figura 55 Unione tra elementi perpendicolari secondo la normativa colombiana [33]

Come si può osservare dalle figure proposte da due normative, il tipo di funzionamento di questi giunti è esattamente il medesimo descritto al punto precedente che considera ancoraggi lignei. Si rimanda pertanto al paragrafo in parola per la classificazione delle modalità di funzionamento della trasmissione dello sforzo secondo la classificazione di Janssen [19].

Le connessioni previste dalle normative si basano dunque sostanzialmente sulla resistenza dell'acciaio. Questo significa ampliare da un lato il margine di sicurezza dato dalla maggiore conoscenza del materiale e dall'altro le caratteristiche di resistenza del giunto se si affidano soltanto agli elementi inseriti i carichi tensionali, ma anche indebolire notevolmente l'elemento di bambù sempre più esposto al pericolo di rottura per fessurazione. Un aspetto che si vuole mettere in evidenza in questa sede è il contrasto tra l'utilizzo di una tecnica tradizionale che ha come indubbio pregio quello di riferirsi a semplicità di reperibilità del materiale e lavorazione, e l'utilizzo di oggetti che richiedono lavorazioni e materiali di natura molto più complessa.

Oltre all'adattamento di tecniche tradizionali, in questa categoria si fanno rientrare anche sistemi dal profilo più innovativo data la estrema plasmabilità della morfologia di questo materiale.

Di solito, la realizzazione prevede un elemento centrale in acciaio, appositamente disegnato per il nodo in questione, a cui si connettono i culmi per mezzo di altri elementi in acciaio in essi inseriti. Ne sono famosi esempi quello di Shoei Yoh per la copertura di Fukoka (Figura 34) e di Renzo Piano

(Figura 33). Nel primo di questi due casi è stato inserito un profilo tubolare metallico all'interno del culmo e collegato ad esso mediante bullonature in direzioni ortogonali. Il tubo interno al culmo e quello centrale sono collegati da una piastra saldata. Tale tipo di nodo può sopportare carichi molto ingenti per via del numero di bullonature ma è estremamente complesso nella realizzazione e nell'estetica. Nel secondo dei due casi invece, sono piastre metalliche ad inserirsi dentro i culmi, con fasciature metalliche contenitive per evitarne la rottura. Il vantaggio è di ottenere un nodo tridimensionale, la possibilità di connettere più elementi e scaricare l'assorbimento dello sforzo sulla piastra metallica centrale.

Un'alternativa alla foratura dei culmi consiste nell'irrigidimento degli stessi per mezzo di elementi che ne avvolgono l'estremità. Come nel caso riportato in figura 54, le aste sono collegate ad una cerniera metallica centrale per mezzo di elementi di acciaio che ospitano i culmi evitando il pericolo di splitting ed ampliando notevolmente il raggio di possibili relazioni tra i culmi realizzabili.

Risulta evidente come proseguendo con gli esempi, aumenti sensibilmente la complessità nella realizzazione degli elementi connettori e diminuisca sensibilmente la partecipazione del bambù nel giunto.



Figura 57 Copertura Fukoka, Shoeni Yoh (1989)

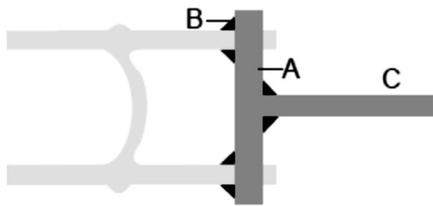


Figura 56 Renzo Piano Building Workshop (1997)

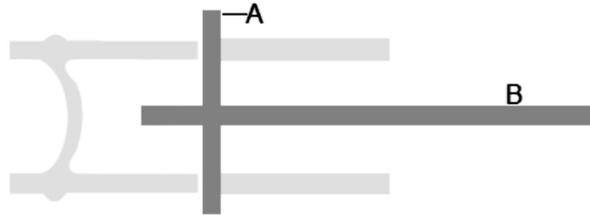


Figure 58 Bamboo Pavillon, Keystone Footers, Guaduatech Project

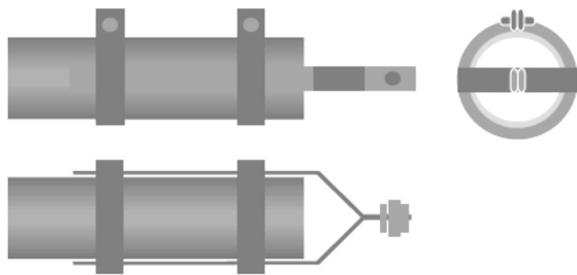
In base alle considerazioni sopra riportate è dunque difficile stabilire una classificazione [19] basata sulle tipologie di funzionamento, che diventano infinite. Ci si riferisce verosimilmente alle seguenti:



4.1 Dall'interno ad un elemento parallelo



4.2 Dall'interno ad un elemento parallelo



6.1 Dall'esterno ad un elemento parallelo

Il terzo dei 3 esempi evita il classico problema della categoria consistente nell'indebolimento della sezione a causa dei fori. Fu testato in laboratorio (Das, 1989-1990) dimostrando alte performances di resistenza. Ragionevolmente, il problema del giunto risiede nella estrema complessità di lavorazione e costo richiesti.

Un altro studio che si ritiene di interesse pone a confronto vari tipi di connessioni mettendo in evidenza l'influenza di numero, posizione e disposizione per connettori metallici applicati a culmi di Guadua Bamboo [14].

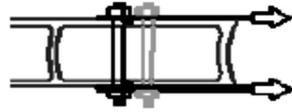
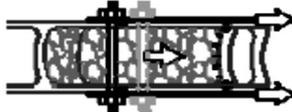
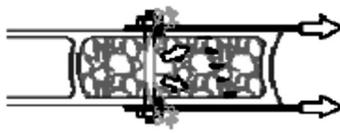
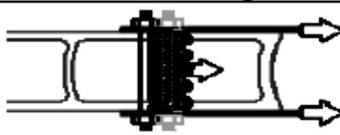
	Connector	Mean Strength (kN)	Diagram / Failure Mode	Ref.
1	Single 12.7 mm $\phi$ through bolt.	16	 <p>Similar to figure 4b. Generally ductile.</p>	Clavijo & Trujillo (2000)
2	Single 12.7 mm $\phi$ through bolt cast into a grouted internode. A node must be present between the bolt and the loaded edge.	30	 <p>Diaphragm rupture. Brittle.</p>	Garzón (1996)
3	Single 15.9 mm $\phi$ through bolt and 8No. 6.35 mm x 100mm (approx.) rebar pins helically fitted cast into a grouted internode. A node must be present between the bolt and the loaded edge. NB: the pins are pushed into predrilled holes. The helical distribution is used to avoid internal clashing.	59	 <p>Bolt failure in bending. Ductile.</p>	Clavijo & Trujillo (2000)
4	Single 15.9 mm $\phi$ through bolt and 10No. 6.35 mm hexagonal head bolts joined by a 0.9mm x 40mm x 1000mm strap wound around the culm.	95	 <p>Local crushing of strap. Ductile.</p>	Clavijo & Trujillo (2000)

Figura 59 Valori di resistenza per alcuni connettori metallici [14]

Si riassumono infine in una tabella le considerazioni conclusive su questa tipologia di giunzioni:

PRO	CONTRO
Aumento sensibile della capacità resistente del giunto	Complessità della progettazione e realizzazione degli elementi di giunzione
Adattabilità a tutte le situazioni di costruzione	Dipendenza da processi industriali ed aziende specializzate per la reperibilità degli elementi di giunzione
	Indebolimento della sezione molto forata (nella maggior parte dei casi)
	Costo elevato
	Elevato impatto ambientale

Tabella 9 Confronto caratteristiche delle giunzioni metalliche

### 3.2.2. RIEMPIMENTO DEI CULMI

Il rischio di fessurazione, che costituisce uno dei principali problemi nella realizzazione delle connessioni, può essere aggirato pensando di connettere gli elementi evitando la foratura, ovvero mediante l'inserimento nel culmo di parti che si colleghino tra loro.

La prima applicazione di questo metodo, a cura di Morisco et al, prevedeva in addizione alle bullonature, un'iniezione di malta cementizia all'interno del culmo [23]. Il riempimento dava da un lato la possibilità di rendere l'estremità non più debolmente cava ma resistente alle sollecitazioni di taglio, e dall'altro la possibilità di posizionare al suo interno un elemento connettore ad una struttura nodale, genericamente di metallo. Il giunto che ne viene fuori è dunque capace di raggiungere alti valori di resistenza a compressione e sono possibili luci che altrimenti, a causa della sezione, cava collasrebbero per instabilità.



A sinistra: Figura 60 e 61 Nodo di copertura e di fondazione, expo 2010, Shanghai, MUDI architects

A destra: Figura 62 Collegamento con riempimento in malta cementizia, Simòn Vèlez

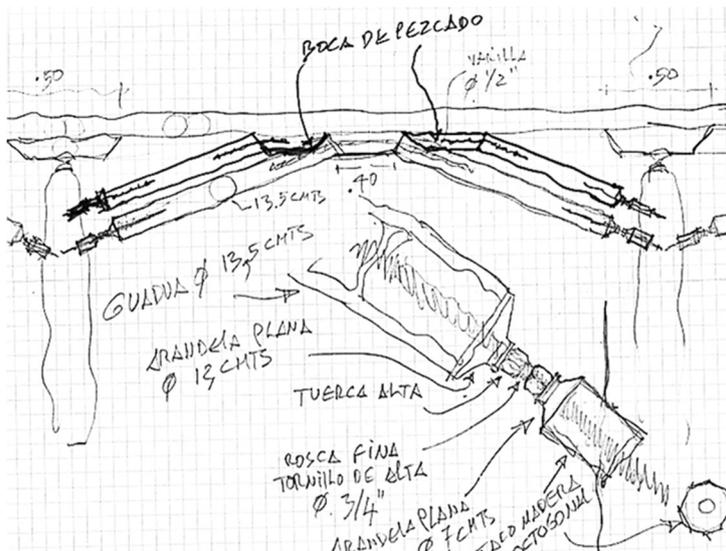


Figura 63 Schema di Simòn Velez per riempimento

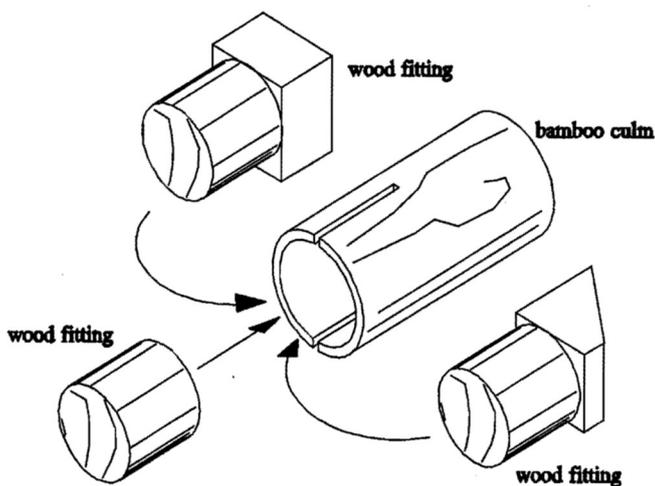


Figura 64 – Sistema di giunzione con riempimento ligneo [13]

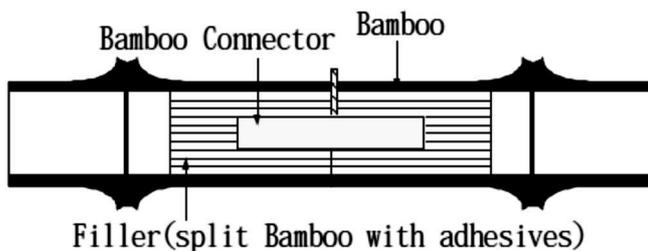


Figura 65 Collegamento con riempimento in bambù [24]

L'utilizzo di questo tipo di sistema ha consentito di aumentare significativamente la presenza del bambù nei sistemi costruttivi, soprattutto sudamericani, in cui è diventata la prassi.

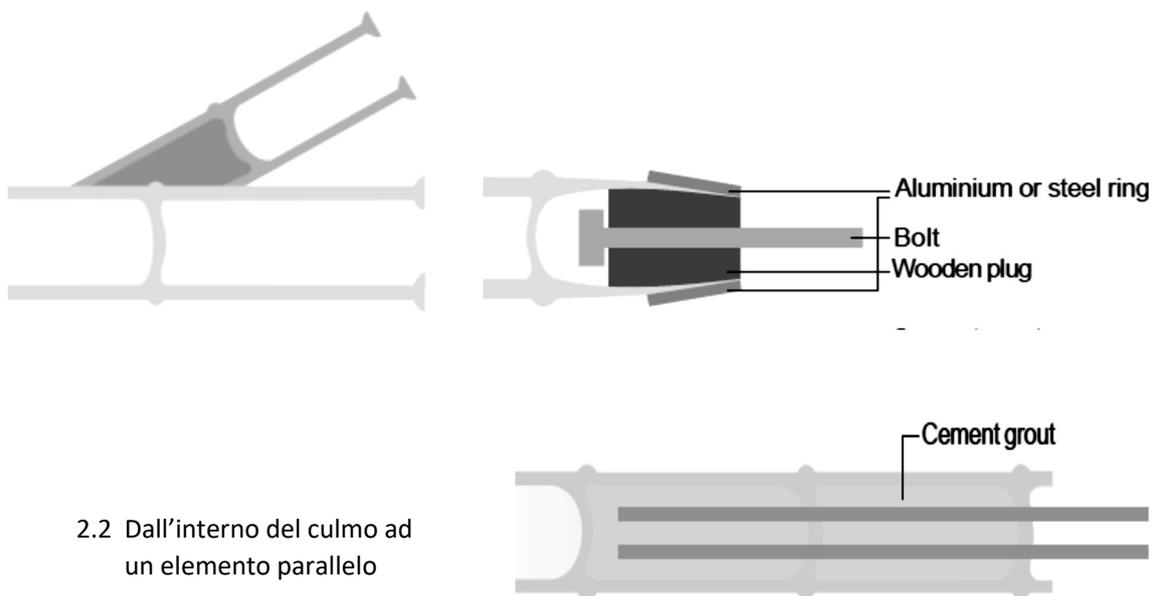
Va tuttavia fatto presente che questo tipo di collegamento oltre a migliorare le prestazioni meccaniche dell'elemento presenta due fattori di criticità importanti: da un lato l'aumento del peso (circa 2,5 volte) e dall'altro il contrasto comportamentale tra il ripieno di malta cementizia e la cavità di bambù che lo contiene. Di fatto, è ben noto che di fronte un cambiamento di umidità dell'aria, che in condizioni di normalità può passare dal 75 al 55%, la reazione del bambù preveda una contrazione radiale attorno a 0.0075 contro i 0.0004 della malta cementizia, quindi in misura 15-20 volte maggiore. Questo può portare facilmente alla fessurazione del bambù che racchiude il riempimento.

Un esempio di riempimento a secco, non soggetto al problema del restringimento, viene proposto da Oscar Arce

Villalobos [13], che, a partire dall'esigenza di riempire la cavità del culmo ai fini di rinforzare l'elemento e renderlo resistente agli sforzi tangenziali per cui il culmo si dimostra poco performante, pensa ad un riempimento consistente in un elemento ligneo che, levigato idoneamente e poi fissato al pezzo mediante l'utilizzo di una colla, si estende al di fuori fino a connetterlo agli altri elementi. La regione di distribuzione interna delle forze da taglio aumenta significativamente così come la sezione trasversale, in maniera da diminuire gli sforzi concentrati che andrebbero a generare fessurazioni lungo la parete. Ai fini di tenere sotto controllo la rottura del culmo per l'inserimento dell'elemento ligneo, vengono praticati due tagli sul bordo esterno che evitano la forzatura causata dalla differenza di diametro realisticamente possibile tra i due elementi. Si ammette con tale tecnica una possibile differenza tra i due diametri fino a 10 mm.

Un altro tipo di riempimento che merita di essere citato è proposto da Inoue et al. [24], in cui il bambù cavo viene riempito con pezzi di bambù splittato e fissato alla superficie interna per mezzo di colle uretaniche. Per mezzo delle stesse colle, il riempimento viene fissato ad un connettore centrale, anch'esso in bambù. Il problema del differente comportamento dei materiali relativamente all'umidità è chiaramente risolto, ma rimane il fatto che il comportamento a trazione del giunto è determinato unicamente dall'adesivo.

Nella categorizzazione di Janssen [19] si distinguono i giunti mediante riempimento:



2.2 Dall'interno del culmo ad un elemento parallelo

Trattandosi di un volume interno, il riempimento caratterizza principalmente la seconda categoria di giunzioni. L'applicazione del punto 2.1 (Duff, 1941) prevede un riempimento ligneo all'interno del quale è inserito un connettore metallico, riporta una resistenza pari a 27 kN per un culmo di 63 mm di diametro. Quella rappresentata nel punto 2.2 invece un esperimento fatto per travi di luce di 15

m dal Building Materials Research in Tblisi. Spoer (1982) riporta una resistenza pari a quella del bambù stesso.

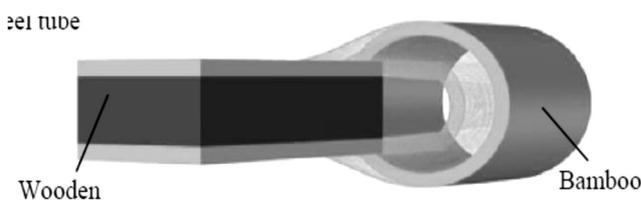
Si riassumono infine, in tabella, le caratteristiche del collegamento:

PRO	CONTRO
Non viene indebolito il culmo da fori	Diverso comportamento di due materiali per variazioni termoigrometriche
La parte terminale del culmo diventa resistente alle sollecitazioni di taglio	Aumento consistente del peso del giunto, quindi della struttura
Alti valori di resistenza del giunto	Necessità di applicare colle
Possibilità di inserire qualsiasi tipo di connettore	Dipendenza da un terzo elemento che funga da connettore (e problematiche relative)

**Tabella 10 Confronto caratteristiche delle giunzioni mediante riempimento del culmo**

### 3.2.3. ALTRE SOLUZIONI

Si considerano, infine, altre soluzioni proposte in letteratura, ritenute di particolare interesse.



**Figura 66 Collegamento disegnato da Ohta et al. [25]**

Il primo caso che si sceglie di presentare, viene proposto da Ohta et al. [25]. La forma del culmo viene modificata pressandone l'estremità attorno ad un distanziatore di legno a cui il bambù è incollato con una resina fenolica, applicata a caldo.

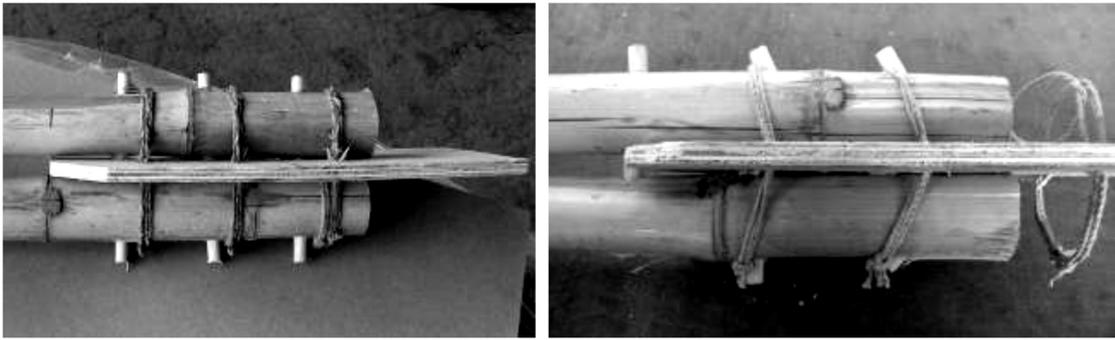


Figura 67 Collegamento piastra, corde e inserti, prima e dopo il collasso [26]

Un lavoro interessante viene sviluppato da Sassu et al. [26]. È un'elaborazione della tecnica di giunzione di elementi di reticolare tramite piastra, che utilizza solamente materiali di basso costo e bassa tecnologia. I culmi sono fissati alla piastra tramite corde e le forature vengono realizzate sulle stesse invece che sul culmo. Lo slittamento è impedito dagli inserti lignei che percorrono il blocco in senso ortogonale. Il collasso del giunto avviene per progressiva rottura dei bastoncini di legno.

Un'evoluzione del concetto di piastra può definirsi una struttura rigida all'interno del quale si possa ingabbiare la struttura di culmi. Si semplifica enormemente il montaggio in cantiere ma si amplifica la procedura di preparazione del giunto prefabbricato.

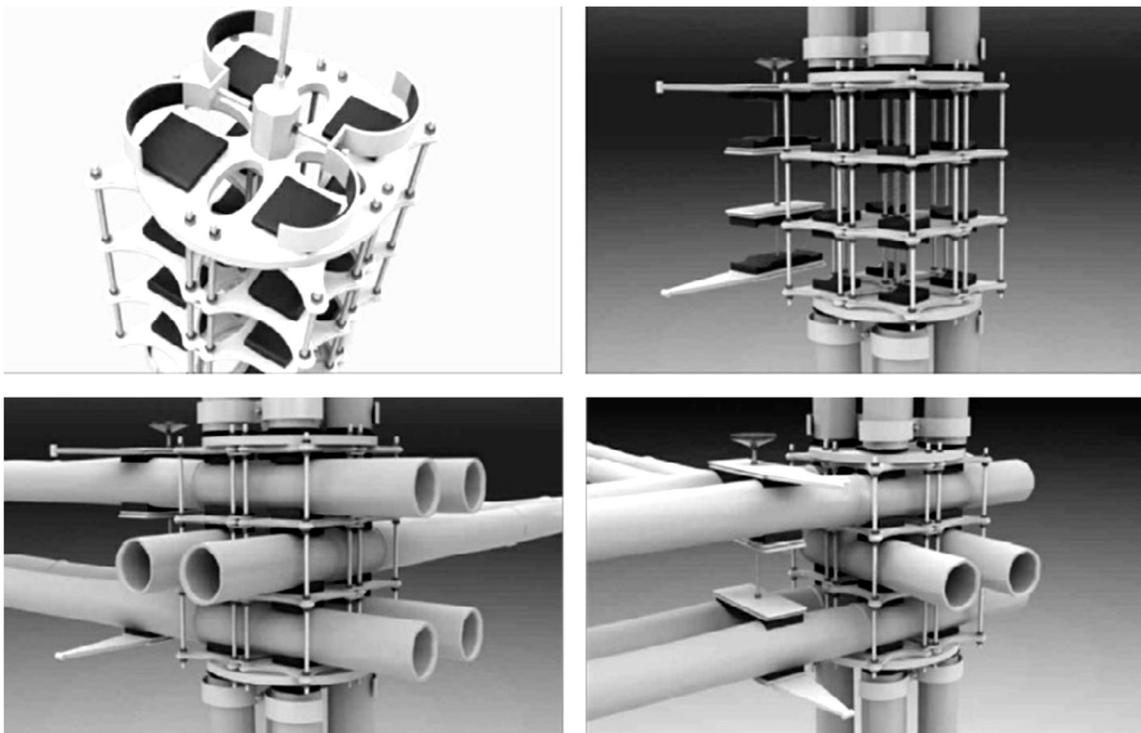


Figura 68 Energy Efficient House, ARUP e Cardenas (2016)

## 4 PROVE MECCANICHE SUL MATERIALE

---

Il punto di partenza della ricerca che si propone si concretizza in una prima tranches di prove rivolte all'identificazione delle caratteristiche meccaniche del materiale di origine italiana, per individuare i valori di resistenza e i modelli comportamentali a cui riferirsi nella valutazione dei collegamenti che si intende indagare.

Si sceglie di selezionare le prove meccaniche più significative per i collegamenti strutturali. Saranno dunque eseguite le prove del tipo compressione e trazione, in direzione parallela alle fibre, e la prova di taglio. Si completa il lavoro con le prove di trazione e flessione in direzione perpendicolare alle fibre, che suggeriscono informazioni su aspetti deboli del materiale e di estrema importanza nella valutazione del collegamento.

### 4.1. METODI E MATERIALI

Ci si affida ai criteri e le pratiche proposte dalle norme ISO 22157-1:2017, ISO 22157-2:2004, ISO/DIS 22156:2004. In questi documenti redatti in accordo tra la commissione tecnica ISO/TC 165 (Timber structures) e INBAR (International Network of Bamboo and Rattan), vengono indicate le procedure standardizzate per la determinazione delle caratteristiche fisco-meccaniche del bambù utilizzato a fini strutturali.

Si segnala come le procedure suggerite dalla normativa siano state oggetto di riprogettazione e modifica. In primo luogo, la differenza tra le varie specie dello stesso materiale è un aspetto problematico, che indebolisce la validità di un procedimento per tutte le situazioni. Ad esempio, gli spessori del materiale su cui sono state eseguite le prove in questione, sono abbastanza esigui, se si pensa al fatto che le specie di bambù dei paesi dove sono stati eseguiti il maggior numero di test, contano spessori che possono superare il doppio. In secondo luogo, le tipologie di attrezzature e di tecniche richieste dal materiale per un'esecuzione corretta dei provini, sono spesso assenti nei laboratori e sconosciuti ai tecnici degli stessi, trattandosi di un materiale, almeno in questi ambienti, "nuovo". Tali difficoltà hanno reso necessaria un'attenzione ed uno studio specifici nella realizzazione delle prove, che in certi casi hanno portato a ritenere opportuno optare per certi procedimenti, per quanto divergenti da quelli suggeriti in normativa [27].

Le prove in questione vengono effettuate su culmi di bambù del tipo *Phyllostachys Viridiglaucescens*, provenienti dai boschi dell'associazione *Bambuseto*, di Camaiore (Lucca). Il taglio è stato eseguito su culmi di età compresa tra 3 e 5 anni, nella parte centrale del culmo, ossia quella che va a partire da

circa il primo metro di altezza alla metà del totale, escludendo la parte basale e quella ramificata per le ragioni esposte in nel paragrafo 2.2. della presente trattazione. I culmi sono stati raccolti nell'inverno del 2016, trattati con sali di boro e stagionati in appositi essiccatoi, luoghi ventilati al riparo dall'esposizione solare e piogge.

La nomenclatura dei provini utilizzati nelle prove seguirà la formulazione definita in tabella:

	TIPO DI PROVA	CON NODO	SENZA NODO	CULMO DI PROVENIENZA
<b>TRAZIONE PARALLELA ALLE FIBRE (TENSION)</b>	T	N	S	n
<b>TRAZIONE PERPENDICOLARE ALLE FIBRE (TENSION PERPENDICULAR)</b>	TP			n
<b>COMPRESSIONE PARALLELA ALLE FIBRE (COMPRESSION)</b>	C	N	S	n
<b>FLESSIONE PERPENDICOLARE ALLE FIBRE (BENDING PERPENDICULAR)</b>	BP			n
<b>TAGLIO (SHEAR)</b>	S			n

Tabella 12 Definizione della nomenclatura dei provini, con n = numero del culmo da cui è stato estratto il provino

## 4.2. MISURAZIONE DELL'UMIDITÀ

Per ciascuna prova descritta nei paragrafi seguenti, sarà correlato ai risultati il valore dell'umidità dei campioni, misurato per ciascuno al termine delle prove. Nelle modalità previste da [27] i campioni sono stati sottoposti ad essiccazione in forno a 103° e i risultati registrati ad intervalli regolari dopo 24h fino al raggiungimento di un valore stabile. Il risultato viene definito secondo:

$$w = \left[ \frac{m_i - m_0}{m_0} \right] \times 100$$

Dove:

$m_i$  è la massa iniziale del campione dopo la prova

$m_0$  è la massa finale del campione dopo l'essiccazione

### 4.3. RESISTENZA A TRAZIONE PARALLELA ALLE FIBRE

La prova in parola ha lo scopo di determinare la resistenza a trazione del bambù per sforzo assiale positivo parallelo alle fibre dello stesso.

Il primo tentativo di prova è stato effettuato su un campione rastremato, tipo provino ad osso di cane, come suggerito da normativa ISO 22157:2004. Le specificità del provino sono definite in figura, così come il risultato ottenuto. Sulla porzione centrale sono stati applicati due estensimetri monodirezionali, uno sulle fibre esterne e l'altro su quelle interne. La prova è stata eseguita su una macchina Galdabini PMA 10.



Figura 69 Provino rastremato

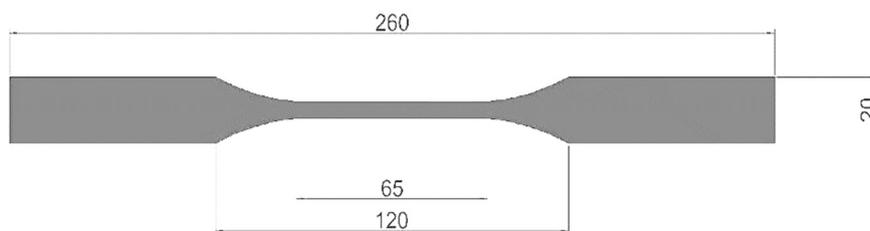


Figura 70 Definizione e dimensioni provino rastremato per prova di trazione, come da [28]

La rottura del provino è avvenuta per un valore di 201,5 MPa, ma si osserva un'inadeguatezza della tipologia di campione manifesta in rottura, che avviene prematuramente alle estremità piuttosto che per rottura delle fibre sulla lunghezza libera. Uno dei problemi principali è legato alla curvatura della superficie di afferraggio, larga 20 mm, che genera tensioni e schiacciamento in fase di afferraggio tra morse parallele.

Vengono dunque elaborate tre proposte differenti di provino da sottoporre alla prova di trazione:

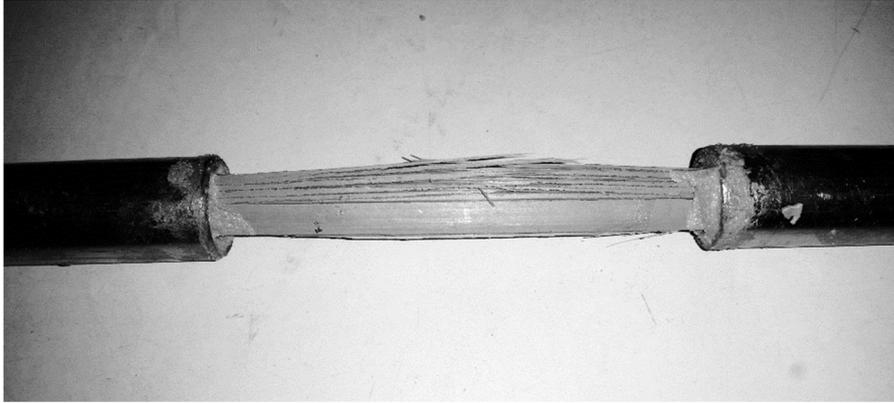
- TIPO A - Provino con estremità rinforzate annegate in resina e sigillate da tubi di acciaio, larghezza 8 mm
- TIPO B - Provino con estremità rinforzate annegate in resina e sigillate da piastre di acciaio parallele, larghezza 20 mm
- TIPO C - Provino con estremità rinforzate annegate in resina e sigillate da piastre di acciaio parallele, larghezza 8 mm



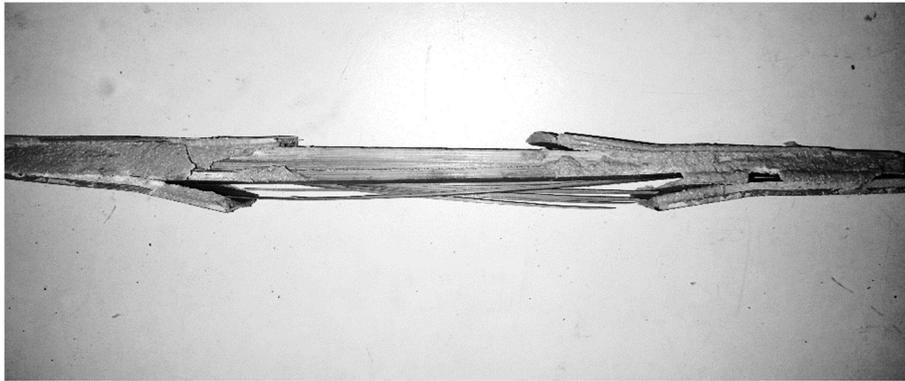
Figura 71 Provini tipo proposti per la prova di trazione

La riduzione di una delle due dimensioni della sezione (larghezza ridotta dai 20 agli 8 mm) consente di ridurre significativamente la curvatura di un lato, e la conseguente possibilità di approssimare la superficie a rettangolare.

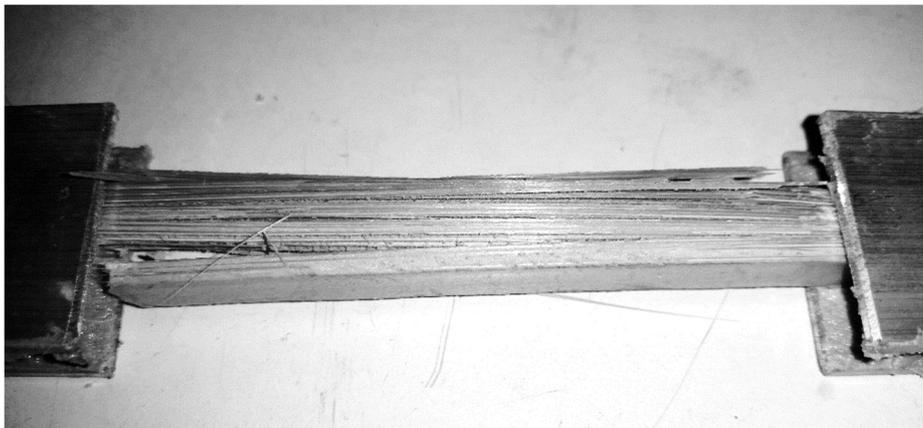
Soltanto per il primo dei tre campioni, con estremità tubolari, si osserva la rottura per rottura delle fibre lungo la lunghezza libera del campione, mentre, per le altre due tipologie, la rottura avviene nel punto di innesto della resina e delle piastre.



**Figura 72 Rottura del provino a trazione TIPO A**



**Figura 73 Rottura del provino a trazione TIPO B**



**Figura 74 Rottura del provino a trazione TIPO C**

Un'ulteriore prova viene condotta secondo indicazioni da normativa [27], dove si precisa di estrarre dei provini di dimensioni massime  $t \times (t/2)$ , protetti alle estremità da "softwood tabs", come riportato in figura.

La prova risulta di difficile esecuzione per via delle diverse dimensioni di campioni di bambù a disposizione rispetto a quelli di riferimento della normativa. Per spessori medi di  $5,5 \text{ mm}$ , si avrebbero campioni di sezione  $(5,5 \times 2,75) \text{ mm}$ , di fattura pressoché impossibile. Si decide allora di stabilire un valore minimo fissato per una delle due dimensioni, equivalente a  $5 \text{ mm}$ , valore ragionevole per le operazioni di taglio dei campioni e per consentire il montaggio di estensimetri.

Infine, in fase di esecuzione della prova, si osserva inoltre lo slittamento del provino rispetto ai supporti di legno, rendendo così impossibile la presa di carico e comportando il fallimento della prova.

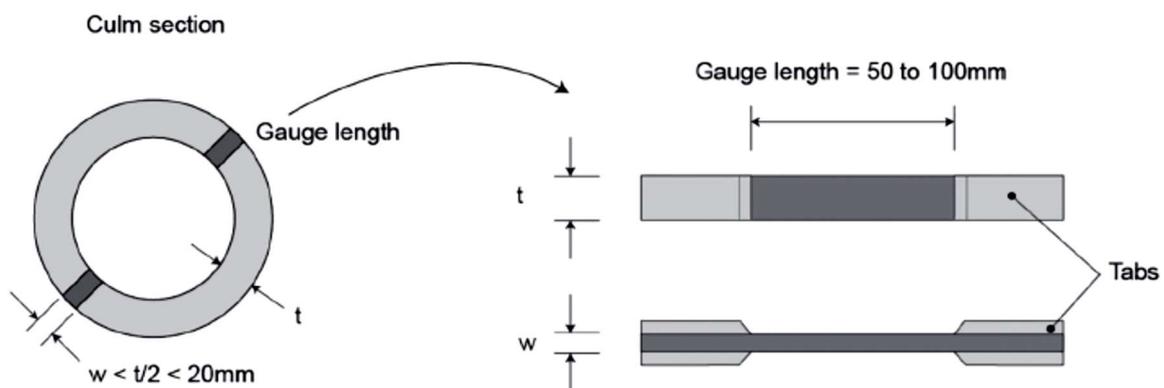


Figura 75 Indicazioni sul provino a trazione, [27] pag.13

Si decide pertanto di eseguire le prove su 12 provini di TIPO A. La normativa impone, per test di trazione a scopo commerciale, l'utilizzo di provini che contengano il nodo, noto il fatto che la sua presenza abbassi la resistenza del campione. Si sceglie di effettuare metà delle prove su provini con nodo ed un'altra metà su provini senza nodo per verificare l'effettiva diminuzione di resistenza data la sua presenza. I provini sono stati estratti da culmi differenti, che si notava avessero aratteristiche compositive (diametro, spessore, quantità di parenchima, ..) non troppo omogenee, ai fini di verificare quanto possibile il margine di variabilità.

Su ciascuno di essi è incollato un estensimetro da  $6 \text{ mm}$  e montato un deformometro meccanico da  $25 \text{ mm}$ .



Figura 76 Prova di trazione parallela alle fibre, in esecuzione

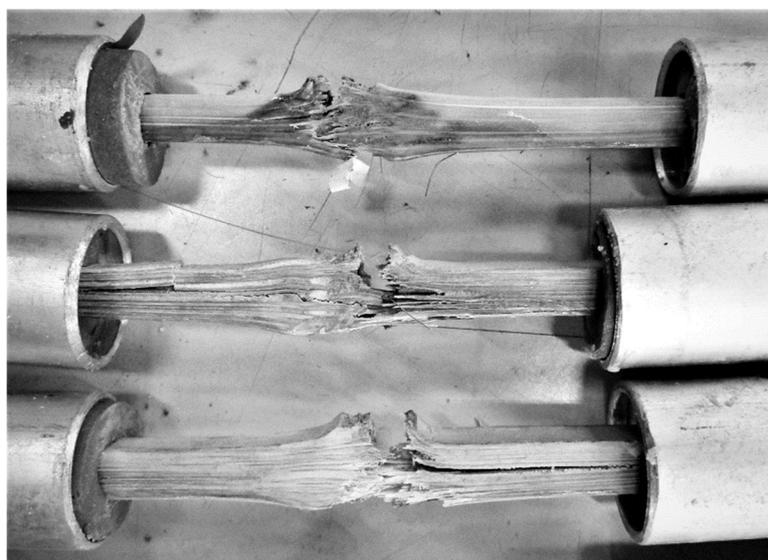


Figura 77 Provini con nodo dopo l'esecuzione del test

Si riportano nella tabella a seguito i risultati della prova. Si tenga conto che:

Le dimensioni dei campioni -  $t$ ,  $b$ - si riferiscono a valori medi di tre misurazioni effettuate sulla lunghezza libera del campione, nell'interasse tra i due ancoraggi. La normativa non specifica quale valore assumere nella valutazione dell'area del provino con nodo. Di fatto, la direzione delle fibre non è perfettamente lineare ma in corrispondenza dello stesso si allarga. E proprio in questo punto avviene la rottura. Pertanto, nel calcolo della sezione media:

$$A_g = t \times b$$

Viene considerata la variabile  $t$  come:

$t_1$  = media di tre misurazioni prese prima e dopo il nodo sulla lunghezza libera del provino

$t_2$  = media di tre misurazioni prese prima del nodo, sul nodo e dopo il nodo, sulla lunghezza libera del provino

$t_3$  = spessore dell'area di rottura, ovvero larghezza del nodo

Il valore della resistenza ultima a trazione viene calcolato, come da [27]:

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

Dove:

$F_{ult}$  = valore massimo del carico, in Newtons (N), per cui si rompe il provino

$A_g$  = area della sezione media

Si riportano i dati in tabelle:

PROVINO	$t_1$ (mm)	B (mm)	$F_{ult}$ (kN)	$f_{t,0}$ (MPa)
TS 2	5,6	5,13	7,106	247,3
TS 3	8	6,7	8,851	165,1
TS 4	6,3	5,1	7,718	240,2
TS 5	6	5,8	9,247	265,7
TS 6	6,1	4,8	7,422	253,4
TS 7	6,83	4,8	6,811	206,0
TN 2	6,1	4,6	5,129	172,8
TN 6	6,45	4,5	6,47	222,9
TN 7	8,1	4,7	7,049	185,1
TN 8	5,9	4,8	4,836	181,8
TN 9	6,12	4,5	5,522	204,5
TN 10	6,95	4,6	7,496	234,4

Tabella 11 Test di trazione parallela alle fibre, risultati

PROVINO	$t_2$ (mm)	B (mm)	$F_{ult}$ (kN)	$f_{t,0}$ (MPa)
TN 2	7,4	4,6	5,129	149,334

<b>TN 6</b>	7,4	4,5	6,47	<b>192,5</b>
<b>TN 7</b>	9,06	4,7	7,049	<b>165,4</b>
<b>TN 8</b>	7,4	4,8	4,836	<b>135,5</b>
<b>TN 9</b>	7,3	4,5	5,522	<b>167,3</b>
<b>TN 10</b>	8,3	4,6	7,496	<b>194,7</b>

**Tabella 12 Valori di resistenza a trazione per provini con nodo, con  $t = t_2$**

<b>PROVINO</b>	<b><math>t_3</math> (mm)</b>	<b>B (mm)</b>	<b><math>F_{ult}</math> (kN)</b>	<b><math>f_{t,0}</math> (MPa)</b>
<b>TN 2</b>	9,5	4,6	5,129	<b>117,4</b>
<b>TN 6</b>	9,5	4,5	6,47	<b>151,36</b>
<b>TN 7</b>	11	4,7	7,049	<b>136,3</b>
<b>TN 8</b>	10,5	4,8	4,836	<b>95,9</b>
<b>TN 9</b>	10	4,5	5,522	<b>122,7</b>
<b>TN 10</b>	11,2	4,6	7,496	<b>145,5</b>

**Tabella 13 Valori di resistenza a trazione per provini con nodo, con  $t = t_3$**

Il valore medio di contenuto d'acqua dei campioni sottoposti a prova è del 9,517%, nelle modalità previste nel paragrafo 4.2.

In accordo con [27] si calcola il modulo di elasticità a trazione parallelo alle fibre, come la tangente tra la tensione e la deformazione al valore tra il valori di 20% e 60% del carico massimo, ossia:

$$E_{t,0} = \frac{F_{60} - F_{20}}{A_g(\varepsilon_{60} - \varepsilon_{20})}$$

dove:

$F_{60}, F_{20}$  = valori del carico applicato al 60% ed al 20% di  $F_{ult}$  rispettivamente, espresso in Newton (N)

$A_g$  = area della sezione media espressa in millimetri (mm)

$\varepsilon_{60}, \varepsilon_{20}$  = valori della deformazione misurata al 60% ed al 20% di  $F_{ult}$ , espresso in percentuale

PROVINO	$F_{20}$ (N)	$F_{60}$ (N)	$A_g$ (mm)	$\epsilon_{60}$	$\epsilon_{60}$	$E_{t,0}$ (GPa)
TS 3	1770	5310	53,6	0,193844	0,598868	<b>16,3</b>
TS 4	1543	4630	32,13	0,266017	0,838923	<b>16,77</b>
TS 5	917	2752	34,8	0,135961	0,401477	<b>19,86</b>
TS 6	1484	4453	29,28	0,260953	0,783421	<b>19,4</b>
TN 2	1025	3077	34,34	0,240684	0,710553	<b>12,7</b>
TN 6	1294	3882	33,6	0,222928	0,657464	<b>17,7</b>
TN 7	1409	4229	42,613	0,243886	0,718313	<b>13,4</b>
TN 8	1030	3090	35,68	0,161487	0,481802	<b>18</b>
TN 9	1104	3313	33	0,183712	0,54403	<b>18,5</b>
TN 10	1499	4497	38,486	0,194663	0,662087	<b>16,67</b>

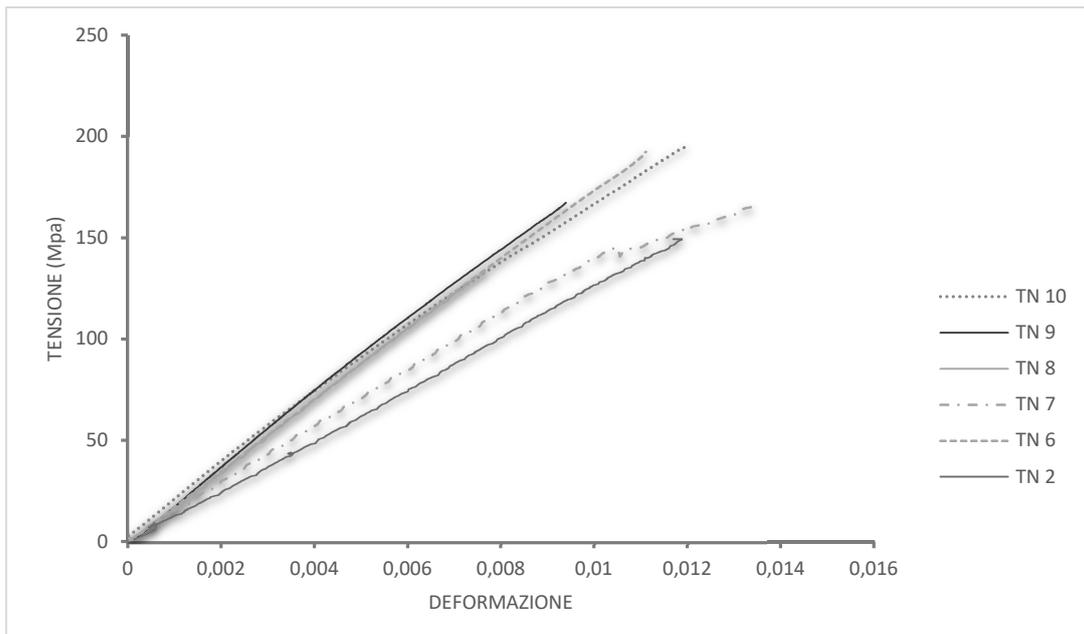
Tabella 14 Modulo di elasticità longitudinale a trazione

Le prove effettuate riportano un valore di tensione massimo medio risultante di 214,989 MPa, con deviazione standard di 33,86599 MPa.

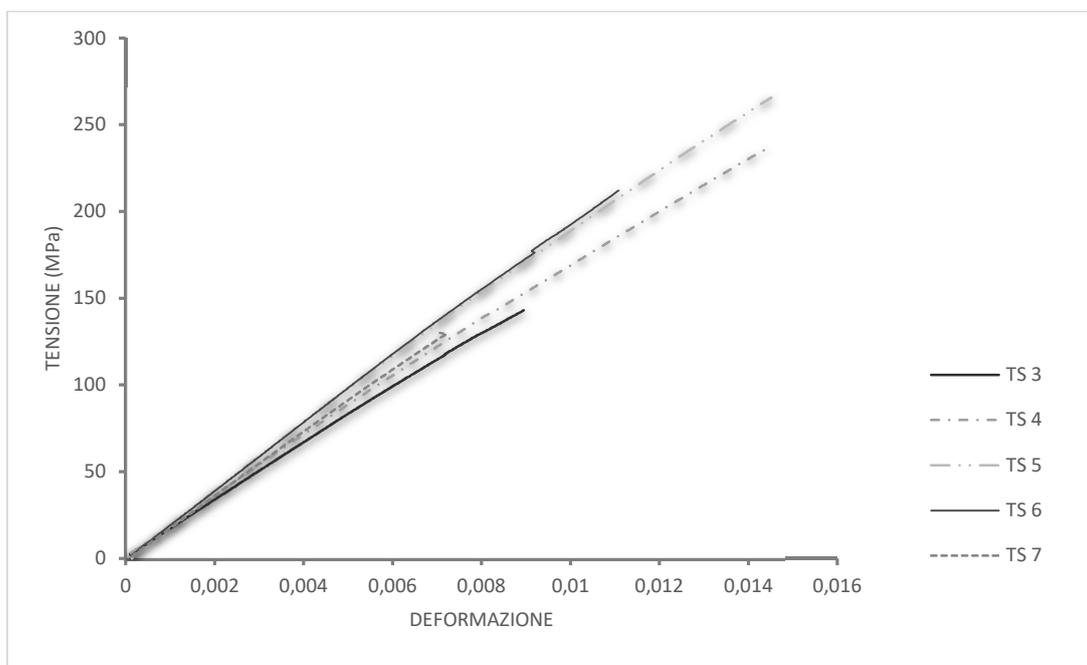
Il valore medio del modulo di elasticità longitudinale del bambù sottoposto a prove di trazione si stima  $E_{t,m} = 16951,04$  MPa, con deviazione standard pari a 2349,184 MPa.

Nei calcoli eseguiti su provini con nodo (TN), sono stati utilizzati i valori dello spessore di tipo  $t_2$ . Le prove condotte su provini con nodo presentano valori in media più bassi ed un grafico più lineare, che conferma l'ipotesi che il nodo implichi un comportamento più rigido dei provini.

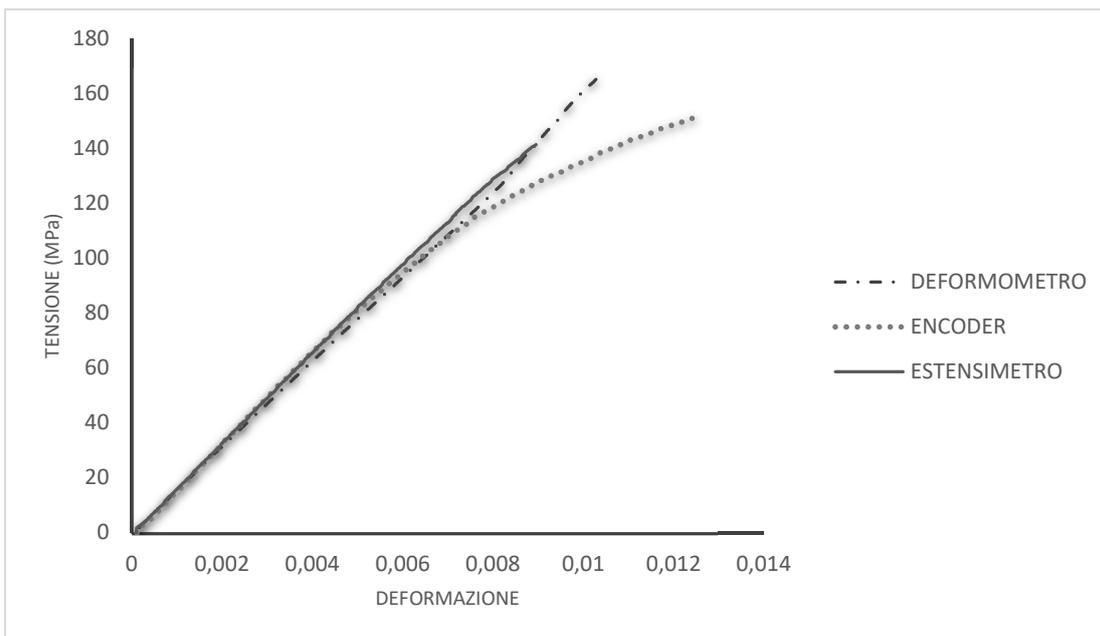
Le indagini condotte su provini senza nodo (TS), raggiungono valori di carico più alti. Il grafico ottenuto dall'utilizzo di estensimetri descrive l'andamento del provino solo fino ad un certo punto, oltre il quale non trasmette più segnale. Ci si rifà in questa sede al grafico ottenuto considerando i valori forniti dal deformometro o dall'encoder della macchina, in figura è mostrato il confronto tra i 3 dati.



**Figura 78** Grafico tensione-deformazione per provini con nodo sottoposti a test di trazione (valori della deformazione ottenuti con estensimetri)



**Figura 79** Grafico tensione-deformazione per provini senza nodo sottoposti a test di trazione (valori della deformazione ottenuti con estensimetri)



**Tabella 15** Grafico tensione deformazione per il provino TS3, relativo ai dati ottenuti con deformometro, encoder, estensimetro

#### 4.4. RESISTENZA A TRAZIONE PERPENDICOLARE ALLE FIBRE

Ci si propone con questa prova di determinare la resistenza a trazione del bambù per sforzo perpendicolare alle fibre dello stesso.

Vale a dire indagare la capacità resistente del parenchima di tenere unite le fibre se sottoposto a sollecitazione. È noto che il parenchima, matrice agglomerante delle fibre, sia molto più debole delle fibre stesse, data la sua natura porosa, per cui ci si aspettano carichi estremamente più bassi di quelli visti in precedenza. Fa eccezione la zona del nodo che non presentando la cavità ha un comportamento estremamente diverso. La prova in parola risulta di particolare importanza nello studio dei collegamenti perché mette in discussione uno degli aspetti più deboli del materiale e delle situazioni più tipiche in cui può essere coinvolto.

La prova in questione viene introdotta soltanto nell'ultimo aggiornamento della normativa sui test di laboratorio per il bambù [27]. Si dispone di pochi riferimenti in letteratura a riguardo, nessuno per il bambù di provenienza nazionale.

Le prove vengono effettuate su 6 provini estratti da culmi disomogenei, senza nodo. Si seguono le istruzioni riportate in normativa per l'elaborazione dei provini, che precisano:

$$L = D + d$$

$$0,25 D < d < 0,5 D$$

Dove:

$L$  = lunghezza totale del provino

$D$  = diametro esterno del culmo

$d$  = diametro del foro per l'inserimento dell'attrezzatura di trazione

Il provino viene forato per permettere l'inserimento di un telaio che trasferisca lo sforzo di trazione dalla macchina ad un semi cilindro coincidente (a meno del 5%) con il semidiametro del foro sul culmo sottoposto a sollecitazione. Il provino viene dunque sollecitato a partire da un foro nella parte centrale in due direzioni opposte.

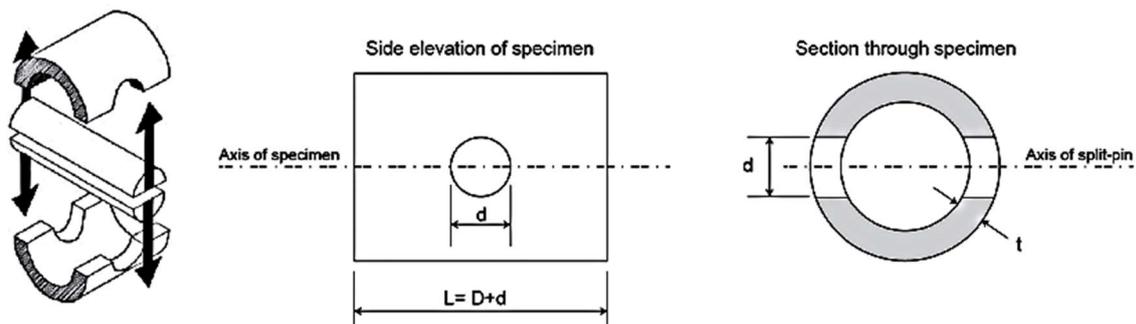


Figura 80 Istruzioni sul test di trazione perpendicolare alle fibre, in [27]

L'esecuzione del foro nel culmo risulta di notevole difficoltà perché il materiale si spacca immediatamente all'ingresso della vite, suggerendo già in questa fase la sua debole natura. Un'altra condizione di difficoltà è la necessità di trovare un elemento per l'esecuzione dei fori che ne garantisca il perfetto allineamento, per permettere il passaggio del cilindro passante all'interno, che deve avere un diametro quanto possibile coincidente con quello del foro. Il primo tentativo di foratura viene eseguito con una punta elicoidale in diametro crescente, fino ai 20 mm, con risultato della spaccatura dei provini. Si sceglie allora di forare con una fresa a codolo a due taglienti, direttamente di diametro pari a 20 mm. Tale tipo di attrezzo consente di forare i provini, utilizzando anche una velocità consistente, senza che si rompano.

Per l'attrezzatura dedita al trasferimento del carico, si costruisce un telaio metallico rettangolare tale che uno dei lati lunghi sia un semicilindro in ottone ed all'altro dei due lati sia collegato il punto di innesto nella macchina.

Prima della prova vengono registrati i dati relativi a  $t$ ,  $L$ ,  $D$  –spessore, lunghezza, diametro-. Ciascuno dei tre valori utilizzati in fase di elaborazione dei dati risulta dal valore medio di tre misurazioni.

Si eseguono dunque le prove su una macchina Galdabini PMA 10, in controllo di carico a velocità controllata di  $0,6 \text{ daN/mm}^2/\text{s}$ , con una durata totale non inferiore ai 3 minuti come previsto da normativa.

Raggiunto il valore di carico massimo il provino si spacca a partire da una frattura sui due piani indotti alla sollecitazione.

Il valore medio di contenuto d'acqua dei campioni sottoposti a prova è del 10,377%, per le prove condotte come descritto in 4.2.

Viene dunque calcolato il valore della resistenza a trazione perpendicolare alle fibre secondo le modalità previste da [27], ossia utilizzando la formula:

$$f_{t,90} = \frac{F_{ult}}{2t(L-d)}$$

Dove:

$F_{ult}$  = carico massimo per cui si spacca il campione, espresso in Newtons (N)

$t$  = spessore della sezione, espresso in millimetri (mm)

$L$  = lunghezza del campione, espressa in millimetri (mm)

$d$  = diametro del foro, espresso in millimetri (mm)

Si considerino i risultati esplicitati in tabella:

PROVINO	D (mm)	t (mm)	L (mm)	$F_{ult}$ (kN)	$f_{t,90}$ (Mpa)
TP 4	64	6,1	84,1	1,553	1,985883
TP 5	64,1	5,9	84,2	1,530	2,309783
TP 8	55,6	5,6	75,8	1,151	1,843072
TP 9	68,1	5,2	88,3	0,698	0,852161
TP 10	55,2	6	75,2	1,535	2,3173
TP 11	54,6	5,6	74,5	1,569	2,618541

Tabella 16 Risultati delle prove di trazione perpendicolare alle fibre



Figura 82 Punta elicoidale e fresa utilizzate per la foratura dei provini



Figura 81 Provino forato

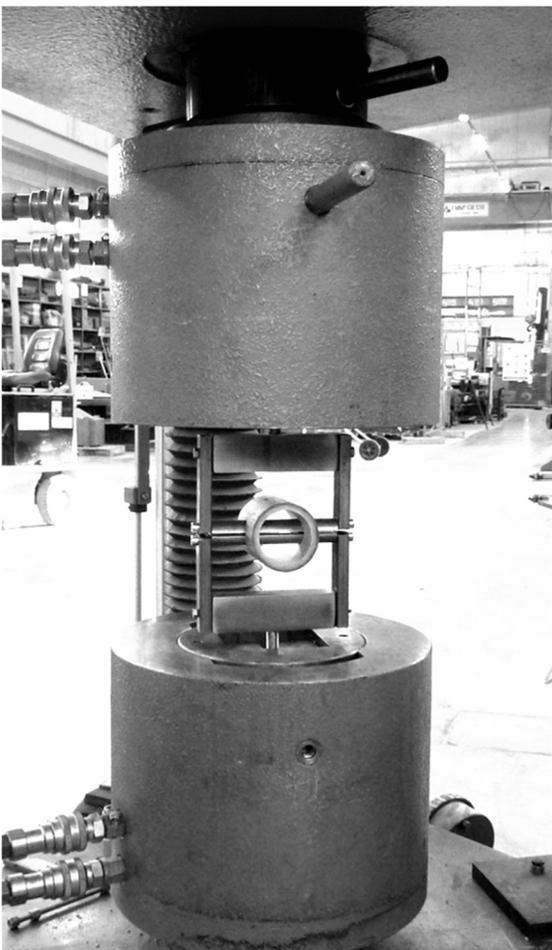


Figura 84 Prova in esecuzione

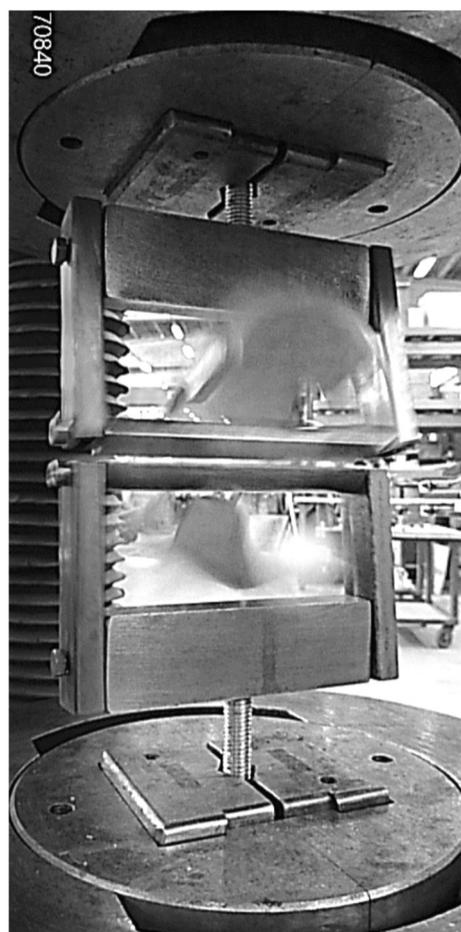


Figura 83 Rottura del provino

Il valore medio considerabile, di resistenza a trazione perpendicolare alle fibre, è di 1,98 MPa, con una deviazione standard di 0,619794 MPa, lasciando concludere quanto affermato inizialmente. La progettazione di un collegamento deve dunque prevedere che non si può superare in tale senso sollecitante questo tipo di sforzo.

È opportuno confrontare tale dato con quanto riportato in un'analisi sulla trazione perpendicolare alla fibra effettuata su provini estratti dalla specie *Guadua Angustifolia* [29], dove si stima un valore medio di 0,74 MPa. Si ipotizza possa esserci una correlazione con l'umidità, che per i provini in parola risulta essere sempre ben maggiore del 10% del nostro caso.

#### 4.5. RESISTENZA A COMPRESSIONE PARALLELA ALLE FIBRE

Si tratta in questo paragrafo la prova che ha come obiettivo l'individuazione del valore di resistenza massima media delle fibre del bambù sottoposte a compressione per sforzo assiale negativo.

La prova viene effettuata in accordo a [27], su 12 provini selezionati da culmi disomogenei, per metà con nodo e per metà senza nodo. Le dimensioni dei provini sono stabilite in accordo con la normativa, tale che:

$$L < D \text{ o } 10t$$

Dove:

$L$  = lunghezza del campione

$t$  = spessore del campione

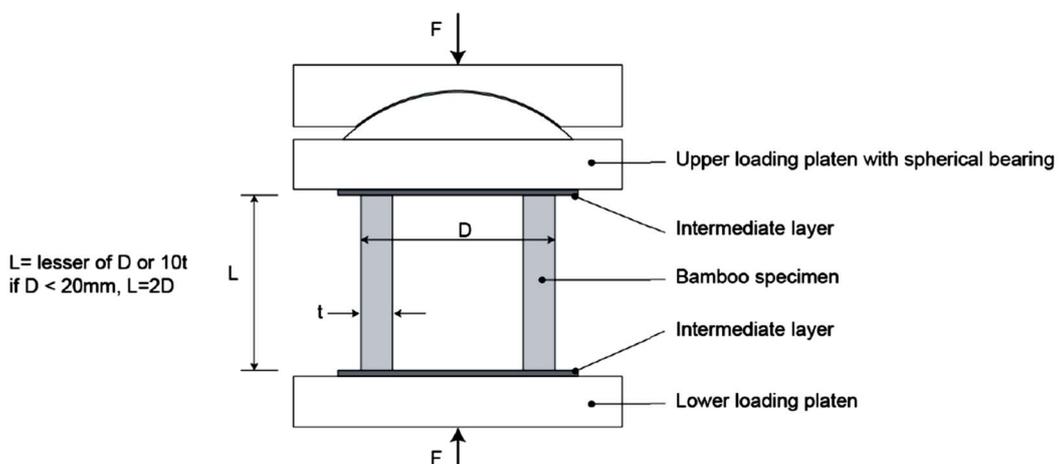


Figura 85 Indicazioni da normativa su prova di compressione in direzione parallela alle fibre

Ciascuno dei provini viene dotato di due estensimetri bidirezionali ortogonali, per calcolare la deformazione delle fibre nella direzione dell'applicazione del carico ed in quella ortogonale.

L'apparato di prova è composto da una macchina Galdabini PMA 10, dotata di una testa metallica che può ruotare e posizionarsi in maniera perfettamente perpendicolare alla superficie dei provini garantendo l'omogenea distribuzione della forza su tutta la sezione. Tra la superficie di applicazione del carico del bambù e la macchina viene interposto uno strato di teflon di spessore estremamente esiguo che limiti l'attrito. La normativa non specifica lo spessore di tale livello. Si è notato durante l'esecuzione delle prove che uno strato rigido del materiale (di spessore pari o maggiore del millimetro) si punzoni in fase di compressione generando un effetto controproducente di cerchiatura del provino, sebbene sia da considerarsi minimo. Si sceglie dunque di utilizzare una velina di teflon.

Prima dell'esecuzione, per ognuno dei provini vengono registrati i valori medi, dati da 3 misurazioni, di:

L = lunghezza per l'intero provino

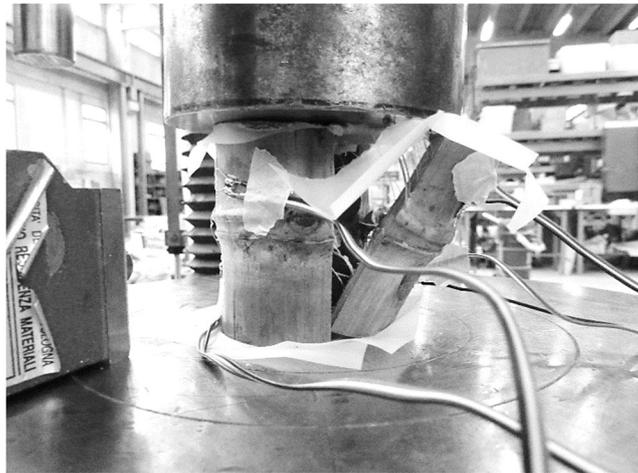
$D_e$ ,  $D_i$ ,  $t$ , = diametro esterno, interno, spessore, per ognuna delle due estremità.

Al raggiungimento del carico massimo, si generano delle fessure che in alcuni casi portano all'apertura del provino. Si osserva sempre uno schiacciamento della superficie. Si considerano alcuni comportamenti particolari:

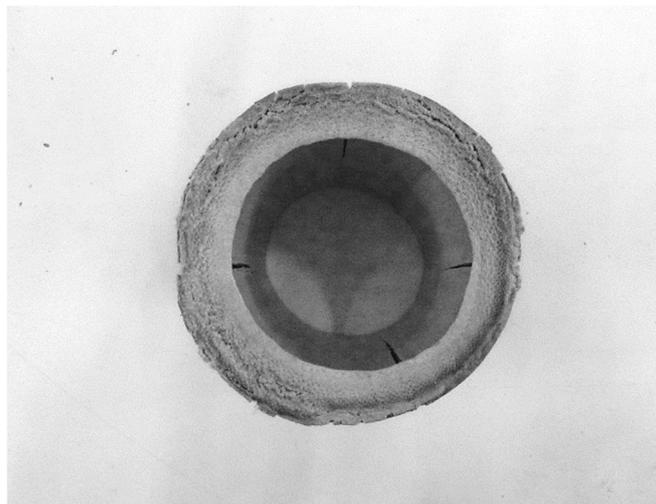
- Due dei provini, provenienti dal medesimo culmo -CN3 e CS3- raggiungono il valore massimo di carico della macchina, pari a 9,99 kN, per cui la prova viene interrotta prima del collasso del provino. Uno dei due provini, CN3, viene sottoposto alla prova in un'altra macchina e si rompe al valore di 11,82 kN. Si considera ai fini statistici il valore massimo realizzato nella prima prova, per rispettare l'omogeneità di condizioni a cui era sottoposto il provino, rispetto gli altri.
- Il provino CN2, vede il formarsi di una fessura ad un livello intermedio (5 kN). Il provino continua a prendere carico significativamente e si rompe per collasso della sezione fessurata.
- Il provino CN5 smette di prendere carico senza mostrare all'esterno nessun segno di cedimento all'esterno, solo alcune fratture visibili soltanto nella parte interna.



**Figura 86 Prova a compressione, in esecuzione**



**Figura 87 Rottura del provino sottoposto a compressione**



**Figura 88 Provino rotto dopo prova, schiacciato sulla superficie e fessurato all'interno**

Si riportano in tabella i risultati delle prove. Il valore di resistenza a compressione viene calcolato, come indicato in [27]:

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

Dove:

$f_{c,0}$  = resistenza a compressione parallela alle fibre, espresso in MPa

$F_{ult}$  = valore massimo del carico per cui il provino si rompe, espresso in Newtons (N)

$A$  = area della sezione sottoposta a compressione, espressa in millimetri quadri (mm<sup>2</sup>)

PROVINO	NODO	$A$ (mm <sup>2</sup> )	$F_{ult}$ (kN)	$f_{c,0}$ (MPa)
CN2	Si	1009,288	79,734	79
CN3	Si	1518,453	99,019	65,21
CN4	Si	1388,229	91,038	65,57
CN5	Si	1151,438	87,117	75,65
CN6	Si	1012,154	78,487	77,54
CN7	Si	1346,139	96,537	71,71
CS2	No	985,4969	73,413	74,49
CS3	No	1520,821	98,069	64,48
CS4	No	1226,275	90,800	74,04
CS5	No	1264,392	79,971	63,2
CS6	No	548,8589	77,971	142
CS7	No	1236,574	91,840	74,2

**Tabella 17 Prova di compressione parallela alle fibre, risultati**

Il valore medio di resistenza a compressione si stima di 71,4 MPa, con una deviazione standard di 5,701 MPa.

Dal calcolo del valore in questione è stato escluso il provino CS6, avendone considerato il valore anomalo.

Il valore medio di contenuto d'acqua dei campioni sottoposti a prova è del 12,033%, calcolato secondo quanto descritto nel paragrafo 4.2.

In accordo con [27] si calcola il modulo di elasticità a compressione parallela alle fibre, come la tangente tra la tensione e la deformazione al valore tra il valori di 20% e 60% del carico massimo, ossia:

$$E_{t,0} = \frac{F_{60} - F_{20}}{A_g(\varepsilon_{60} - \varepsilon_{20})}$$

dove:

$F_{60}, F_{20}$  = valori del carico applicato al 60% ed al 20% di  $F_{ult}$  rispettivamente, espresso in Newton (N)

$A_g$  = area della sezione media espressa in millimetri (mm)

$\varepsilon_{60}, \varepsilon_{20}$  = valori della deformazione misurata al 60% ed al 20% di  $F_{ult}$ , espresso in percentuale

Si riportano i calcoli per la valutazione del modulo elastico in relazione alla deformazione parallela all'asse di applicazione del carico e ortogonale ad essa.

PROVINO	$F_{20}$ (N)	$F_{60}$ (N)	$A_g$ (mm)	$\varepsilon_{20}$	$\varepsilon_{60}$	$E_{c,0}$ (GPa)
CN 2	15946	47840	1009,3	0,000699	0,002744	15,4
CN 3	19803,96	59411,88	1518,4	0,000458	0,001477	25,6
CN 4	18207,7	54623,09	1388,2	0,000934	0,002409	17,8
CN 5	17423,5	52270,5	1151,4	0,000702	0,001797	27,6
CN 6	15697,57	47092,7	1012,1	0,009137	0,02522	19,3
CN 7	19307,48	57922,44	1346,1	0,000487	0,002091	17,9
CS 2	14682,67	44048,02	985,4	0,000897	0,002669	16,8
CS 3	19613,98	58841,93	1520,8	0,000573	0,002407	14
CS 4	18160,08	54480,24	1226,2	0,000585	0,002376	16,5
CS 5	15994,21	47982,62	1264,3	0,000765	0,002555	14,1
CS 6	12454,55	46782,87	548,8	0,000354	0,002243	33,1
CS 7	16500,73	55104,11	1236	0,001124	0,003035	16,3

Tabella 18 Calcolo del modulo di elasticità longitudinale

PROVINO	$F_{20}$ (N)	$F_{60}$ (N)	$A_g$ (mm)	$\varepsilon_{20}$	$\varepsilon_{60}$	$E_{c,0}$ (MPa)
CN 2	15946	47840	1009,288	0,001004	0,001849	<b>37,4</b>
CN 3	19803,96	59411,88	1518,453	0,000442	0,001024	<b>44,8</b>
CN 4	18207,7	54623,09	1388,229	0,000417	0,001153	<b>35,6</b>
CN 5	17423,5	52270,5	1151,438	0,000362	0,000935	<b>52,8</b>
CN 6	15697,57	47092,7	1012,154	0,004177	0,012479	<b>37,3</b>
CN 7	19307,48	57922,44	1346,139	1,43796E	0,000336	<b>89</b>
CS 2	14682,67	44048,02	985,4969	0,000491	0,001576	<b>27,5</b>
CS 3	19613,98	58841,93	1520,821	7,86905E	0,001482	<b>18,3</b>
CS 4	18160,08	54480,24	1226,275	0,000247	0,002424	<b>13,6</b>
CS 5	15994,21	47982,62	1264,392	0,000337	0,001593	<b>20,1</b>
CS 6	12454,55	46782,87	548,8589	0,000191	0,001947	<b>35,6</b>
CS 7	16500,73	55104,11	1236,574	0,00051	0,001318	<b>38,6</b>

Tabella 19 Analisi dei dati e modulo di elasticità tangenziale

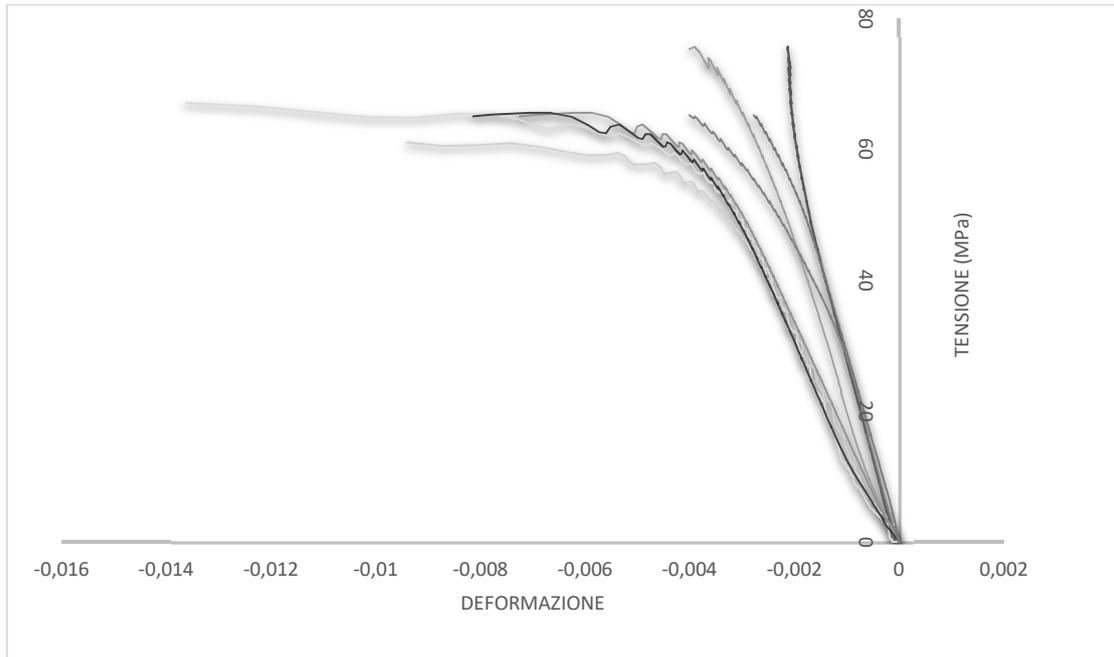
Si definisce un valore medio del modulo di elasticità in relazione alla deformazione in direzione dell'applicazione di carico  $E_{c,m}$  pari a 18109,52 MPa, con una deviazione standard di 7866,737 MPa, considerata la totalità dei campioni. Lo stesso valore, calcolato per la partizione con nodo, è di 21623,78 MPa, con una deviazione standard di 9113,174 MPa e per quella senza nodo, di 18501,75 MPa, con deviazione standard di 7261,479 MPa.

Ripetendo le considerazioni di cui sopra relativamente alla deformazione in direzione ortogonale a quella di applicazione del carico, si riporta un valore di  $E_{c,m}$  pari a 32450,9 MPa, con deviazione standard di 12383,14 MPa, considerata la totalità dei campioni. Lo stesso valore, calcolato relativamente ai provini di tipo CN, è di 42665,97 MPa, con deviazione standard di 21826,77 MPa, e per quelli di tipo CS, di 25640,8486 MPa, con deviazione standard di 9997,04025 MPa.

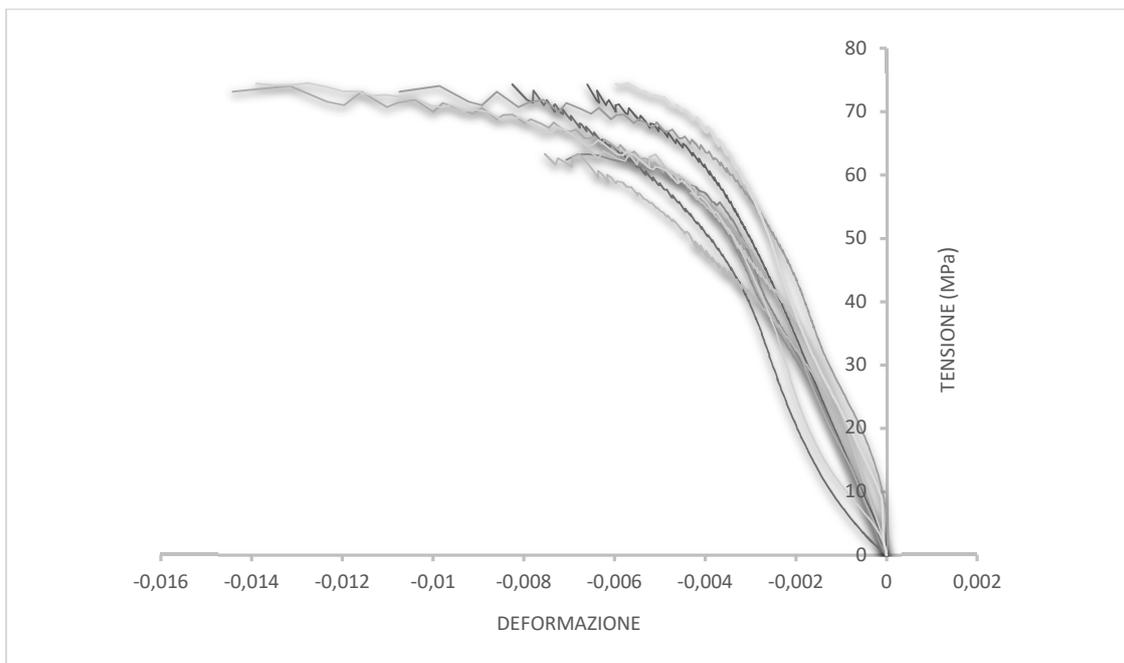
Vengono esclusi dalle valutazioni i provini che presentino valori significativamente discostanti dagli altri, considerandoli errori di misurazione.

In entrambi i casi, si considera che i provini con nodo abbiano un comportamento più rigido rispetto a quelli senza nodo, come presagibile. Il provino assorbe carico in maniera lineare ed elastica, fino al raggiungimento di un valore massimo dopo il quale si spacca senza preavviso alcuno.

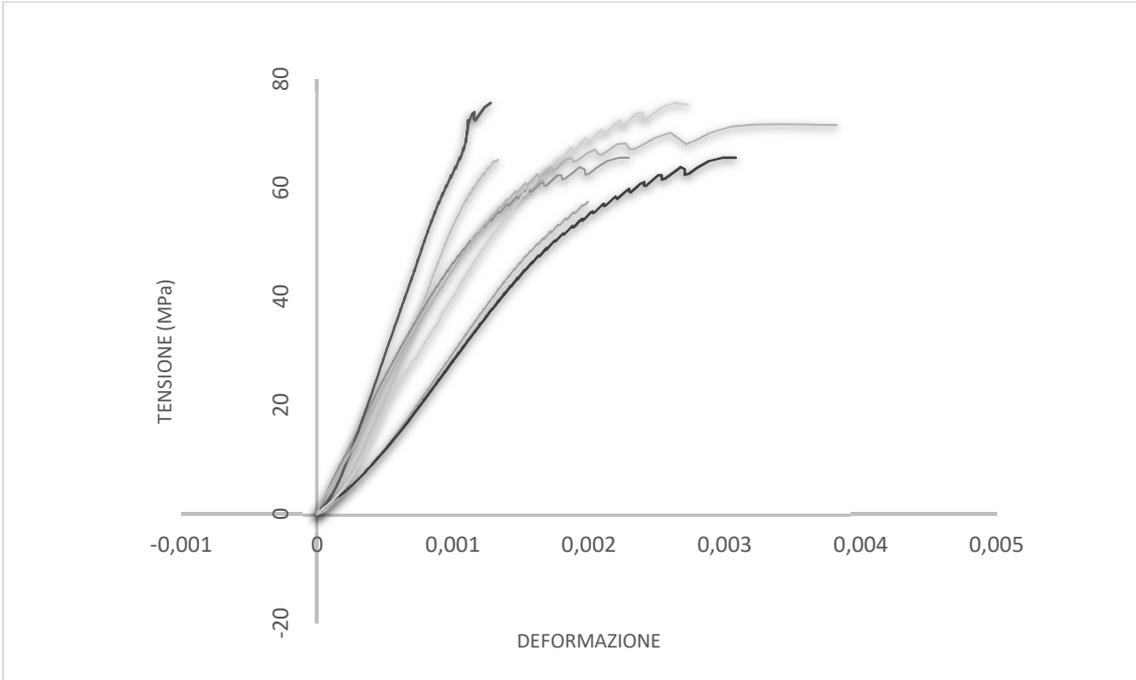
La medesima considerazione si riferisce anche al tipo di sforzo, per cui il secondo tipo di E abbia valori estremamente più alti. Merita tuttavia di essere preso in considerazione il valore di deviazione standard che è significativo, mettendo in luce l'alto margine di variabilità tra i campioni provenienti da culmi diversi.



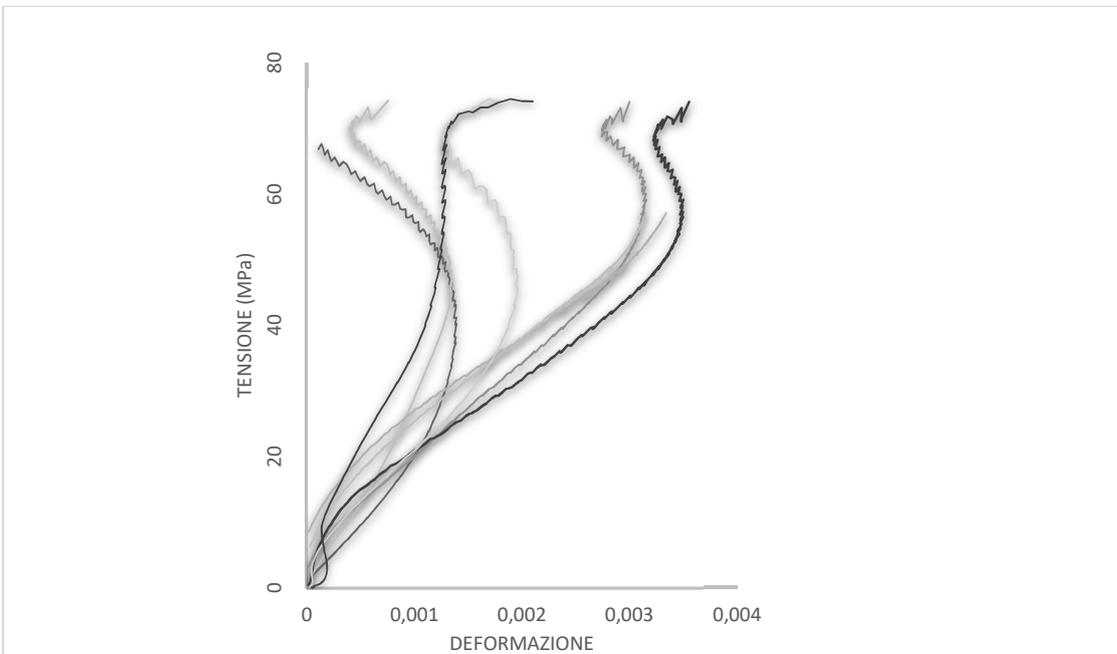
**Figura 89** Grafico tensione-deformazione in direzione dell'asse di applicazione del carico, provini con nodo



**Figura 90** Grafico tensione-deformazione in direzione dell'asse di applicazione del carico, provini senza nodo



**Figura 91** Grafico tensione-deformazione in direzione ortogonale a quella di applicazione di carico, provini con nodo



**Figura 92** Grafico tensione-deformazione in direzione ortogonale a quella di applicazione di carico, provini senza nodo

#### 4.6. RESISTENZA A FLESSIONE PERPENDICOLARE ALLE FIBRE

In tale paragrafo viene trattato un altro aspetto di frequente utilizzo nei collegamenti, ossia la resistenza del culmo allo schiacciamento laterale, punto debole del materiale in esame.

Per ricavare il valore in questione si sottopone il provino ad una compressione lungo due generatrici diametrali, in direzione ortogonale all'asse del culmo. Questo tipo di sollecitazione genera uno stato tensionale che sottopone l'elemento ad un momento flettente trasversale, tale che, nei punti dove raggiunga il valore massimo, il provino si spacchi.

Si scelgono sei provini estratti da parti di culmo senza nodo, tali che il diametro che li caratterizzi sia quanto più regolare possibile, dunque simile ad una circonferenza. Le dimensioni stabilite con cui si effettua il taglio dei culmi sono quelle specificate da [27], che sottolinea l'importanza dell'equazione  $L = D$ , a meno di  $0,05D$ . Vengono segnati per ciascun provino, la posizione di 4 quadranti, denominati negli estremi come N - E - S - W, ed in corrispondenza di questi punti, effettuate le misurazioni relative al diametro  $D$  e lo spessore  $t$ .



Figura 93 Provino da sottoporre al test

Si effettuano dunque le prove su una macchina Galdabini PMA 10, in controllo di carico a velocità  $0,6$  daN/s, tale da rientrare nei limiti temporali stabiliti dalla normativa per l'esecuzione della prova ( $5 \pm 2$  minuti). Tra la macchina ed il provino viene interposto uno strato di neoprene di spessore pari ad un centimetro. Per tutte le prove effettuate, la rottura avviene sui lati E, W, a volte simultaneamente, a volte a distanza di pochi secondi. Solo successivamente, a carichi ovviamente molto più bassi, il provino si rompe nei punti N-S.

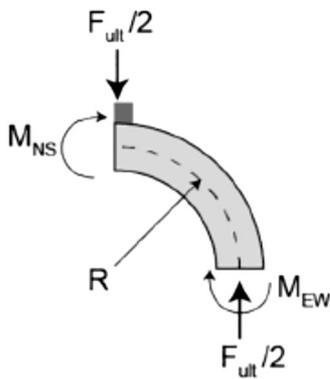


Figura 94 Schema delle reazioni interne di un quarto di culmo sottoposto alla prova

Lo stato tensionale interno del provino viene stimato come in figura a lato. La rottura avviene nel punto sottoposto a pressoflessione data dal momento  $M_{EW}$  e dallo sforzo normale  $F_{ult}/2$  nel punto sottoposto a trazione tra le fibre. Si calcola il calcolo del valore di resistenza a flessione perpendicolare alle fibre viene studiato tenendo conto della formula di Navier:

$$f_{m,90,EW} = \frac{12 M_{ult,EW}}{L t^3} \left(\frac{t}{2}\right) - \frac{F}{2Lt}$$

dove:

$M_{ult,EW}$  = Momento ultimo nella sezione EW       $F_{ult}$  = carico massimo per cui si spacca il campione  
 $L$  = lunghezza del campione       $t$  = spessore della sezione       $d$  = diametro del foro

Il momento viene calcolato secondo quanto proposto dalla normativa [27], avendo verificato l'equazione con quanto proposto in [30]:

$$M_{ult,EW} = \left(F_{ult} \times \frac{R}{\pi}\right) \left[1 - \left(\frac{t^2}{12 R^2}\right)\right] - \frac{F_{ult} R}{2}$$

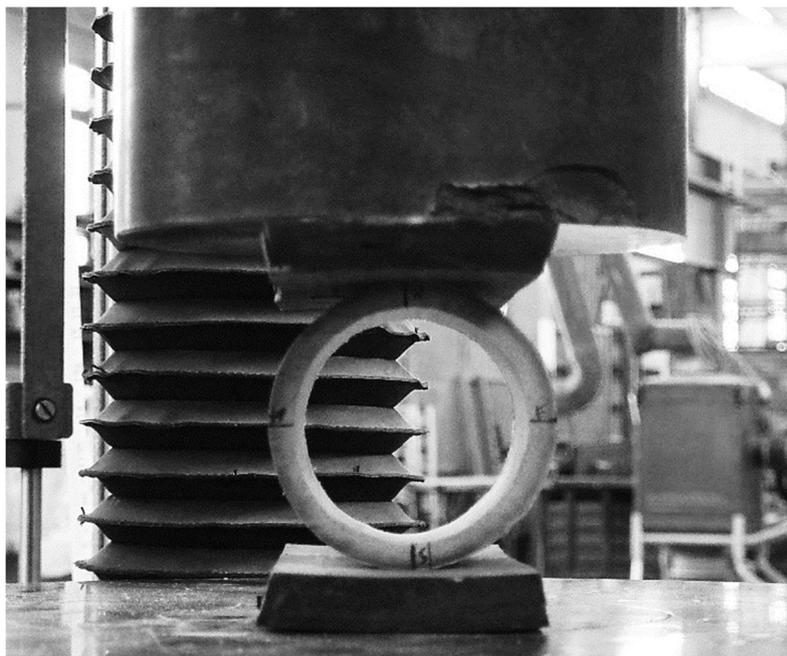
Si riportano di seguito i dati registrati per le prove in analisi:

PROVINO	$D_{NS}$ (mm)	$D_{EW}$ (mm)	$L$ (mm)	$t_N$ (mm)	$t_s$ (mm)	$t_E$ (mm)	$t_w$ (mm)	$F_{ult}$ (kN)	$f_{m,90,EW}$ (MPa)
BP 6	54,1	55,2	54,1	6,2	6,18	6,2	6,1	1,455	<b>16,14</b>
BP 7	61,9	63,1	61,9	7,5	7,6	7,6	7,5	1,405	<b>10,7</b>
BP 9	55,8	56,5	55,8	5	4,9	5,1	5,08	0,845	<b>14,66</b>
BP 10	53,3	51,5	51,5	6,2	6,2	6,1	6,1	1,365	<b>15,93</b>
BP 11	53,7	52,5	52,5	4,9	5	5	4,9	0,815	<b>14,83</b>
BP 12	54,2	53,5	53,5	5,2	5,1	5,1	5,2	0,765	<b>13,27</b>

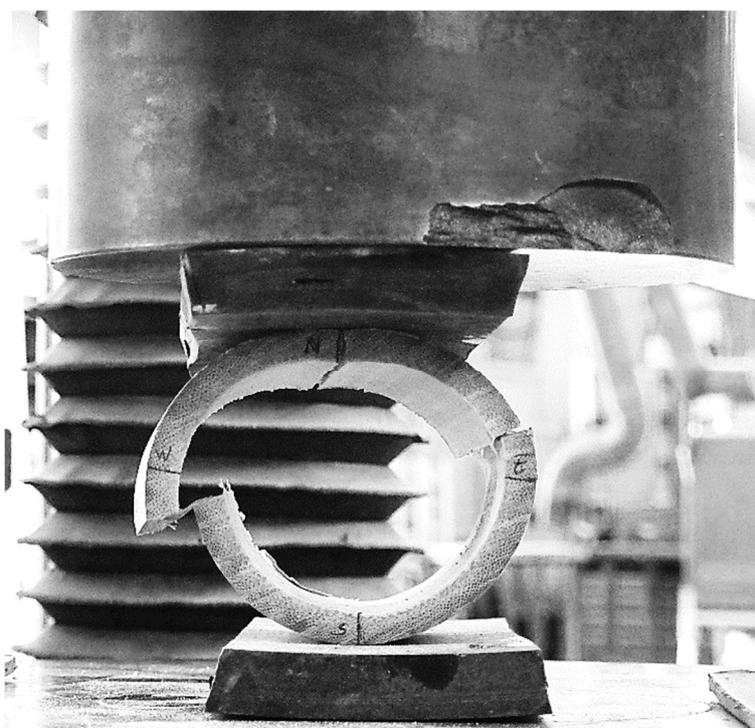
Tabella 20 Risultati prova di flessione ortogonale alla direzione delle fibre

Il valore medio ottenuto è di 14,25 MPa, con una deviazione standard di 2,021 MPa.

Il valore medio di contenuto d'acqua dei campioni sottoposti a prova è del 10,439 %, con le misurazioni effettuate secondo quanto descritto in 4.2.



**Figura 95 Prova in esecuzione**



**Figura 96 Provino al termine della prova**

## 4.7. RESISTENZA A TAGLIO

Ci si propone in tale indagine di definire la resistenza a taglio in direzione parallela alle fibre, per il bambù italiano in questione.

La resistenza a taglio è uno degli aspetti più ostici del bambù perché conta sull'aspetto più debole della sua struttura, il parenchima. Si vuole indagarne la resistenza per mezzo di una prova che solleciti quattro piani di taglio con una compressione esercitata sul provino da quattro triangoli alternati ed opposti alle due estremità. L'attrezzatura è stata costruita come da istruzioni di normativa [27], mediante dei piatti in pvc.

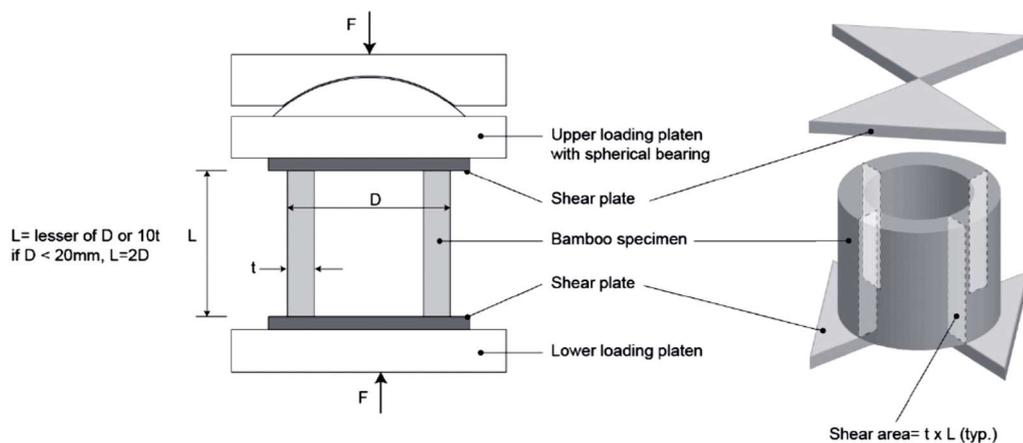


Figura 97 Specifiche su prova a trazione, [27] p.17

Si esegue il test su 6 provini senza nodo estratti in maniera disomogenea tra i campioni di bambù disponibili. Le dimensioni vengono valutate rispettando le indicazioni di [27] che precisano:

$$L < D \text{ o } 10t$$

Dove:

$L$  = lunghezza del campione

$t$  = spessore del campione

e registrate prima dell'esecuzione del test mediante 3 misurazioni di cui si estrae il valore medio. Si esegue la prova in una macchina Galdabini PMA 10 mediante compressione. Al raggiungimento del valore di carico massimo i provini si spaccano senza preavviso. Non in tutti i casi tuttavia si verifica il tipo di rottura prevista ossia lungo il piano indotto alla sollecitazione per taglio. Si considera che in tali situazioni sia prevalso un altro tipo di sollecitazione ed il provino non viene considerato nell'elaborazione dei risultati.



Figure 98, 99, 100 Risultati della prova non corretto (prime due) e corretto (ultima)

Al termine della prova si recuperano i frammenti di provino e si misura il numero e le dimensioni, con precisione di 0,1 mm, dei piani di taglio. Dove le rotture dei piani non siano avvenute contemporaneamente si considera come valore di carico massimo quello relativo alla prima frattura. Si procede dunque all'elaborazione dei risultati ottenuti utilizzando le formule fornite dalla normativa. La resistenza a taglio in direzione parallela alle fibre viene considerata come:

$$f_v = \frac{F_{ult}}{\sum(t \times L)}$$

Dove

$f_v$  = resistenza di taglio di provino, espressa in MPa

$F_{ult}$  = valore di carico di rottura, espresso in N

$\sum(t \times L) = A_{tot}$  = sommatoria delle aree dei piani di taglio, espresso in mm<sup>2</sup>

I primi due test effettuati (SS2 e SS3) vengono considerati anomali, a causa della posizione delle fratture che fa supporre non sia avvenuta per taglio, e quindi non inclusi nei risultati. Il valore medio di resistenza a taglio per i provini in questione è di 2,198 MPa, con una deviazione standard di 0,04339.

Si riportano in tabella i risultati delle misurazioni e delle analisi di dati:

PROVINO	PIANI DI ROTTURA	$A_{tot}$ (mm <sup>2</sup> )	$F_{ult}$ (kN)	$f_v$ (MPa)
SS 2	2	616,16	2,003	3,250779
SS 3	2	1098,73	3,545	3,226452
SS 4	3	1414,92	3,103	2,193057
SS 5	3	983,75	2,213	2,249555
SS 6	3	1172,12	2,588	2,207965
SS 7	3	1530,95	3,283	2,14442

**Tabella 21 Prova di taglio in direzione parallela alle fibre, risultati**

Il valore medio di contenuto d'acqua dei campioni sottoposti a prova è del 10,942%, calcolato secondo la procedura descritta in 4.2.



Dall'analisi della letteratura riportata al capitolo 3 della presente trattazione e in riferimento ai dati acquisiti sulla conoscenza del funzionamento meccanico del materiale, si vuole cominciare ad indagare il funzionamento dei sistemi connettivi tra culmi di bambù.

Il punto di partenza di questa indagine sarà lo studio delle connessioni assiali.

Si prende dunque in esame l'analisi critica riportata per i sistemi conosciuti, individuando nella valorizzazione delle caratteristiche proprie del materiale e nella massimizzazione della neutralità dell'aggiunta comportata dalla connessione, una necessità da rispettare. Sulla base di quanto detto vengono elaborati dei punti fondamentali su cui si ritiene debba insistere il progetto di connessioni, che saranno tenuti in conto nella selezione dei tipi di meccanismo su cui focalizzarsi:

- **Scarsa incidenza del processo di produzione sull'ambiente**  
Intendendo non inficiare le caratteristiche di sostenibilità proprie del materiale, si sceglie di utilizzare materiali di provenienza quanto possibile naturale
- **Semplicità di lavorazione e di reperibilità delle materie prime**  
Una delle principali applicazioni del bambù potrebbe essere la realizzazione di soluzioni in situazioni di emergenza. Questo rende una necessità assoluta la semplicità nella reperibilità dei materiali e nella loro composizione, tale da svincolare la pratica da sussidi di natura industriale
- **Mantenimento dei costi**  
Normalmente estremamente esigui, in riferimento al semplice materiale, ma che allo stato attuale della pratica vengono fortemente modificati dalle tecniche di giunzione degli elementi
- **Possibilità di sostituzione dei culmi**  
Ai fini di un prolungamento di vita della struttura oltre il termine naturale del singolo culmo

La considerazione di questi punti rende inevitabile l'analisi di quei sistemi che appartengono ad un ambito di utilizzo tradizionale. In effetti, la collocazione temporale di quanto è stato inventato in epoca precedente a quella di evoluzione normativa, pone questi sistemi in una condizione di esclusione dalla concezione di utilizzo in sicurezza. È necessario riconsiderarli, studiandoli con un metodo ed una precisione che sono tipici di quei materiali e quelle tecniche di cui oggi disponiamo completa coscienza.

Vengono dunque individuate due tipologie principali di meccanismo con cui sono composte gran parte delle giunzioni tradizionali, ai fini di comprenderne il funzionamento, localizzare l'ambito di applicazione per cui possono essere valutate utili e i limiti per cui bisogna intervenire con altre tecnologie. Si tratta di unioni realizzate per mezzo di legature ed unioni realizzate per mezzo di sistemi di incastro riempimento del culmo e passanti di legno.

## 5.1. LEGATURE

Si conducono prove finalizzate alla descrizione del comportamento delle legature e l'effetto della variazione del numero di giri.

Gran parte delle connessioni che sono state sviluppate in epoca recente per profili tubolari sono pensate su materiali la cui composizione sopporta il passaggio di elementi foranti. È stato verificato nei capitoli precedenti che il bambù abbia l'effettivo limite di mal sopportare tensioni perpendicolari alle fibre, con il risultato di spaccarsi per fessura tra piani di fibre contigue attorno al passante. Si riconosce dunque ai collegamenti che non intaccano la struttura del materiale stesso, un certo valore di potenzialità da verificare. Le giunzioni tra culmi per mezzo di corde, evitano di sottoporre i culmi allo stress di separazione delle fibre, e lo studio vuole verificare quanto questo procedimento sia compatibile con dei risultati meccanici.

I materiali coinvolti in questo studio sono il bambù e la canapa, utilizzata in corde di diametro pari a 5 mm. Ciascuno dei provini è composto da due elementi da collegare, contenenti due nodi nelle estremità, in una misura di circa 40 cm. Viene segnata una lunghezza di interesse fisso pari a 30 cm, da cui far partire due legature estese verso l'interno, in numero doppio per evitare che si crei una coppia di forze che renda impossibile la prova. Per ognuno dei provini viene registrata la posizione delle legature prima dell'esecuzione, per verificarne visualmente l'abbassamento in fase esecutiva della prova.

È chiaro che in questo tipo di tecnica si ha un margine di variabilità del risultato estremamente ampio, considerata l'influenza che può avere la forza con cui si esegue il nodo, variabile da legatura a legatura e da legatore a legatore. Si sceglie di limitare l'effetto della variabilità dando indicazioni precise sulla metodologia seguita per eseguire le legature. Si fa riferimento a quanto indicato in [21].

Le legature vengono eseguite a numero variabile di giri per stabilirne l'incidenza. Si sceglie di verificare la variazione tra:

- 10 giri di corda
- 15 giri di corda
- 20 giri di corda

Vengono realizzati tre provini per tipologia ed eseguite le prove su una macchina di compressione Galdabini PMA 10, in controllo di carico. Dopo un momento iniziale in cui il collegamento rimane completamente rigido, comincia lo scivolamento delle corde ed i due culmi si avvicinano fino al momento in cui entrano a contatto i due nodi. Il provino continua a prendere carico finché questo non permetta lo scivolamento di un nodo sull'altro.

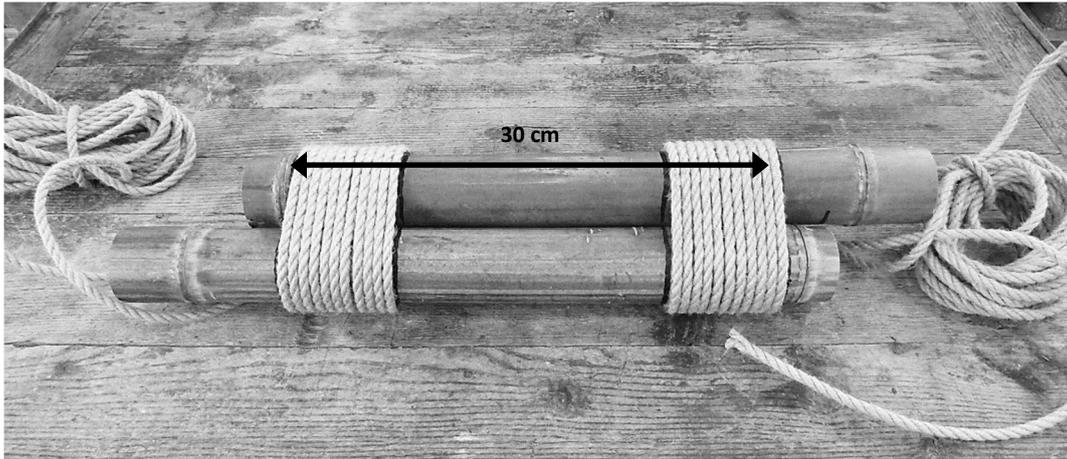


Figura 101 Provino da sottoporre a prova di compressione

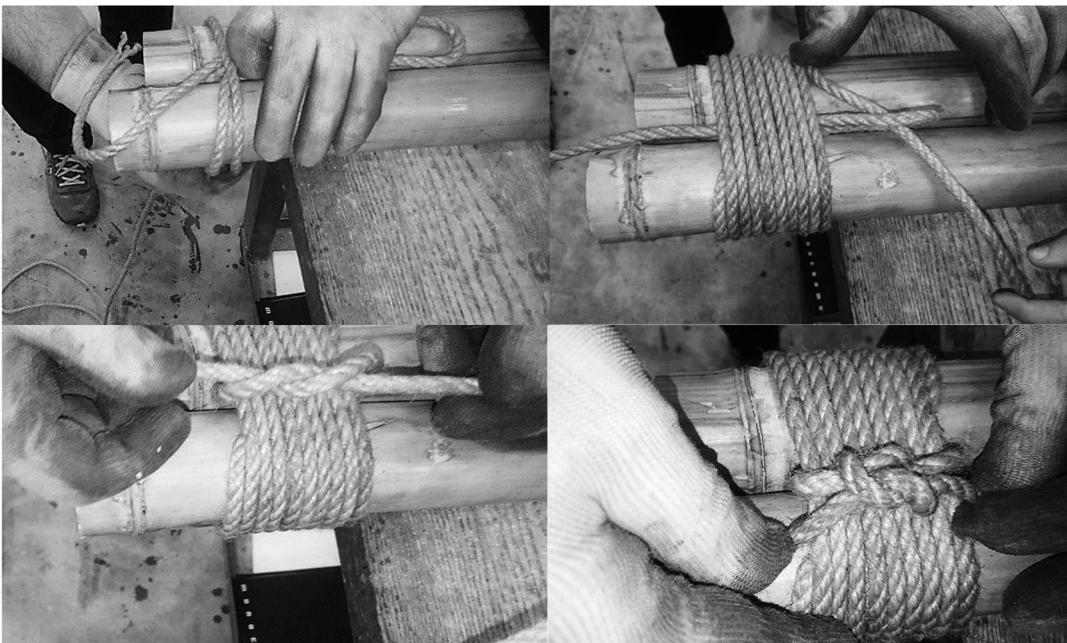


Figura 102 Fasi di legatura

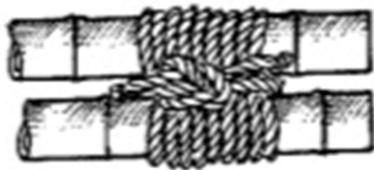


Figura 103 Connessione in asse con legatura [21]



Figura 104 Nodo piano

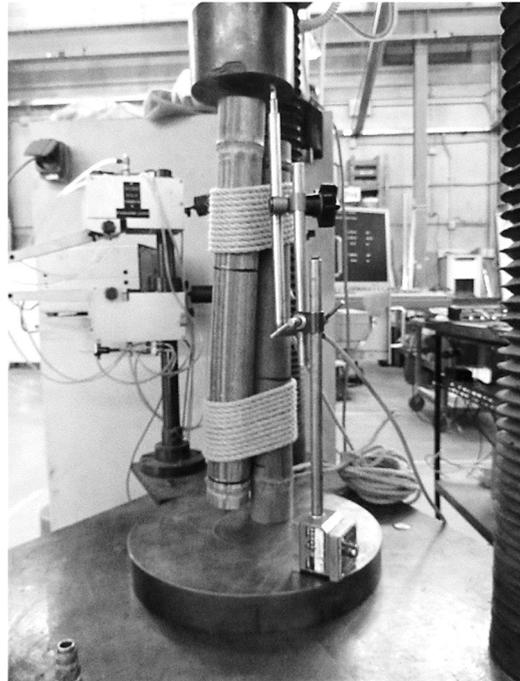
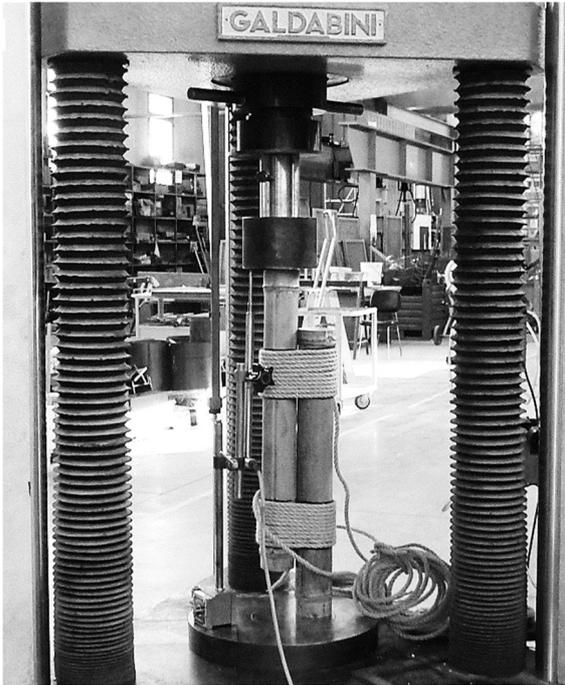


Figura 105 Prova legature a 10 giri in corso, prima e dopo lo scivolamento

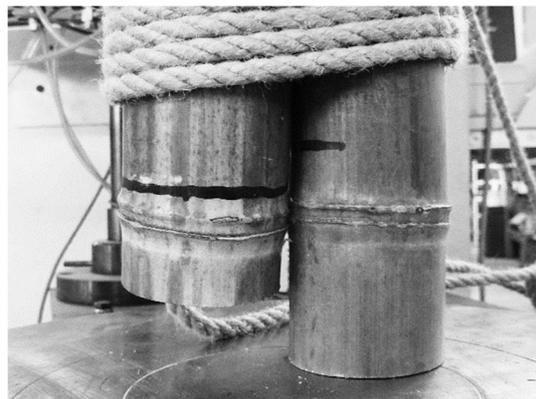
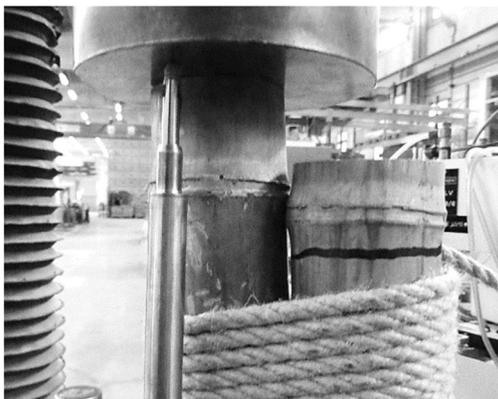


Figura 106 Incuneamento dei nodi durante la prova

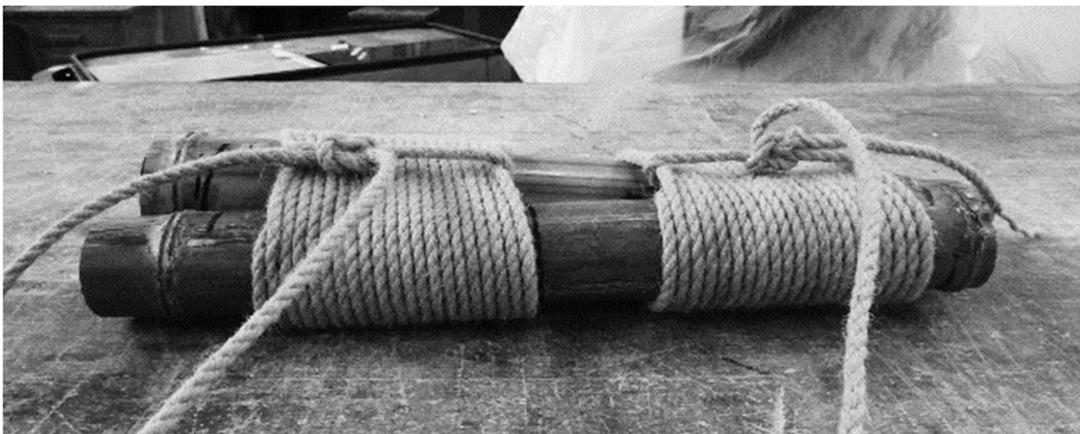


Figura 107 Posizione dei culmi dopo la prova, slittati ed inclinati

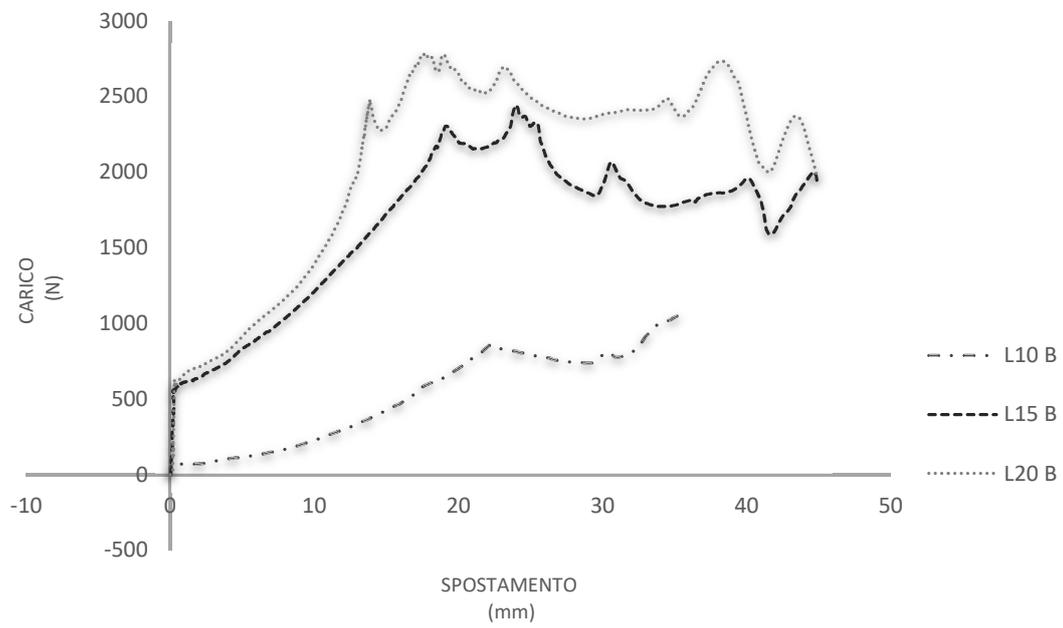


Figura 108 Confronto per i tre tipi di legatura, grafico carico-spostamento

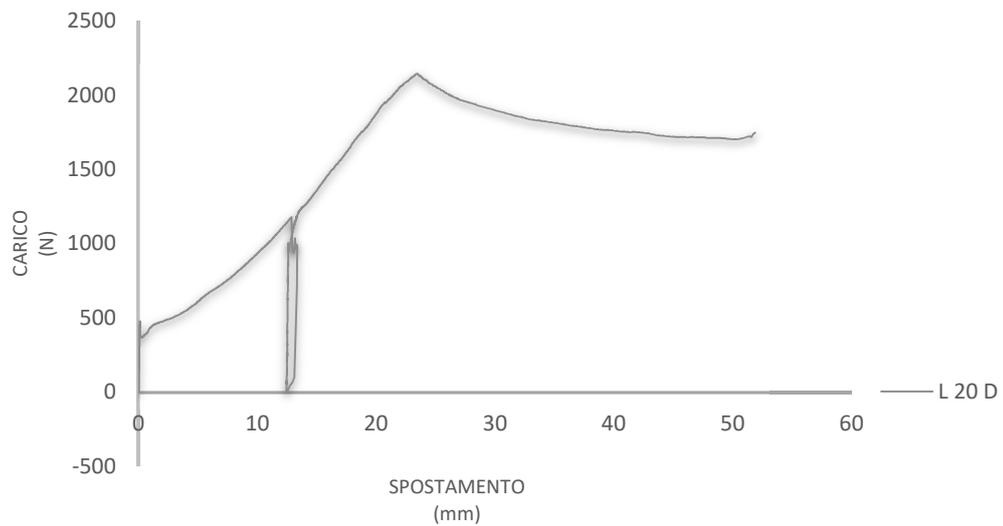


Figura 109 Grafico carico spostamento con scarico e ricarico

È interessante notare dal confronto dei tre grafici carico-spostamento relativi alle tre tipologie di legatura, come ci sia un salto di differenza tra il primo ed il secondo tipo, e come invece siano simili il secondo ed il terzo. Vale a dire che si può ipotizzare che oltre una certa soglia, l'incidenza del numero dei giri non sia più significativa.

È stato effettuato un ciclo di carico, scarico e ricarico, a circa la metà del risultato ipotizzato sulla base delle altre prove. Il grafico risultante mostra una ripresa della medesima inclinazione precedente, ma non esiste un ritorno elastico allo stato iniziale.

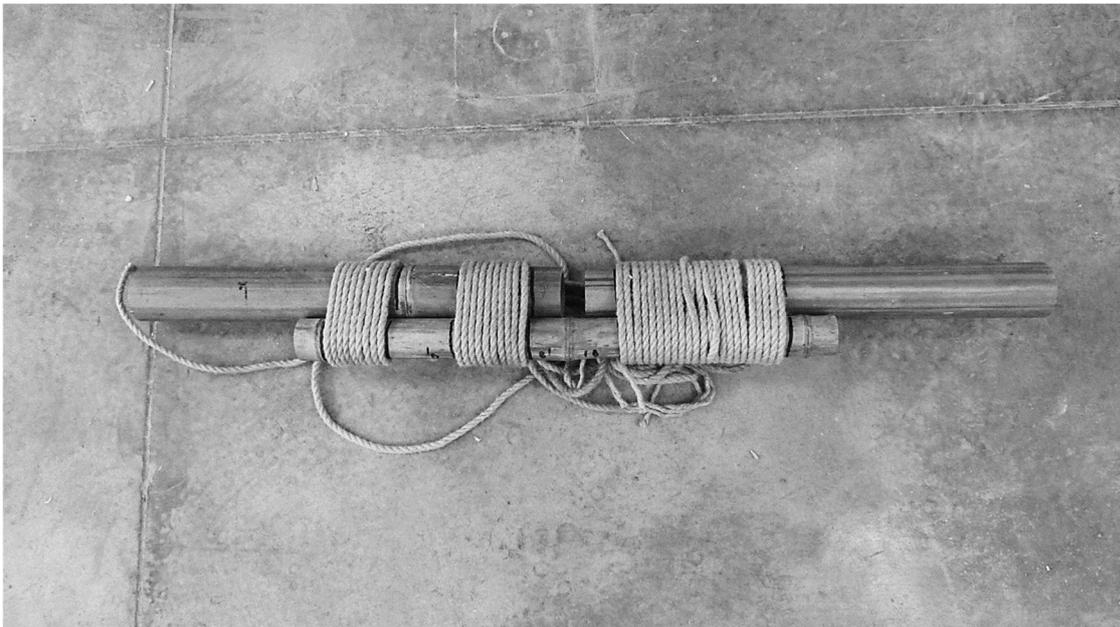
Quello che deve essere osservato in questo tipo di valutazioni, più che il raggiungimento di un valore di carico massimo, è la qualità del collegamento. Di fatto, il valore per cui è garantita la rigidità del collegamento è estremamente bassa (inferiore a 0,1 kN per i collegamenti a 5 giri e attorno a 0,5 kN per gli altri due). Tuttavia la deformazione che subentra successivamente a tale punto, non porta alla rottura del collegamento che continua a prendere carico, con un lento scivolamento che rimane al di sotto dei 2 cm di spostamento. Dove lo slittamento dei culmi per tali valori non risulti problematico, può essere consentito un carico che nel caso di 15 o 20 giri, si aggira attorno ai 2 kN. Questi valori vengono calcolati non relativamente al valore massimo raggiunto nella prova, ma relativamente al valore massimo prima del cambio pendenza, ovvero fin dove si riconosce che il funzionamento del collegamento avvenga per attrito della corda sul culmo.

È evidente che sulla base di questi presupposti, si può lavorare in maniera significativa in fase progettuale, migliorando la superficie di contatto tra i due materiali tale che la forza d'attrito sia maggiore.

Grandissima influenza in queste valutazioni deve avere la considerazione della presenza dei nodi. All'interno dei grafici sono visibili dei punti di cambio pendenza, corrispondenti ad una fase in cui lo scivolamento viene bloccato dall'incuneamento di un nodo sull'altro; e successivamente, per superamento del blocco, la curva diventa discendente finché non si incontra l'incuneamento di un altro nodo (vedi figura 105). Questo aspetto non rientra nelle valutazioni numeriche fatte in questo punto, ma deve essere sicuramente preso in considerazione al momento di progetto di collegamento, dove si pensa abbia senso far coincidere la legatura con la distanza tra due nodi, tale che da essi sia contenuta. Chiaramente, questo implica che la disposizione della legatura debba essere stabilita in base alla dimensione dell'internodo. Il collegamento così fatto non può sicuramente essere considerato puntuale ma arriva ad avere dimensioni vicine al metro.



**Figura 110** Collegamento tra due culmi, affiancati



**Figura 111** Collegamento tra due culmi connessi sullo stesso asse, legati ad un terzo culmo di supporto

## 5.2. PASSANTI DI LEGNO

Si conducono prove finalizzate alla descrizione del comportamento delle giunzioni per mezzo di forature nel culmo con passante in legno.

Tale tipo di tecnica trova larghissima applicazione, non soltanto all'interno dei manuali che raccontano le procedure di esecuzione tradizionale delle connessioni, ma anche nelle connessioni assiali proposte da alcune normative, in versione passanti in acciaio, con bulloni.

Il vantaggio di questa procedura sta senza dubbio nella semplicità con cui viene realizzata, congiunta a rapidità. Il problema invece, sta nel fatto che viene sollecitato il punto più debole del bambù, la resistenza intrafibra. Ciò che però accade solitamente è che il collasso di questo tipo di collegamento non avvenga per fessurazione del culmo in corrispondenza del passante, ma per rottura del passante. Questo significa che in una struttura con tale tipo di meccanismo, il collegamento tra i culmi delega completamente la resistenza alla sollecitazione del carico al passante, ed il bambù non partecipa. Se si utilizzano viti di acciaio, questo tipo di meccanismo può essere vantaggioso, ma non può chiaramente dirsi la stessa cosa per passanti lignei.

Si realizzano numero tre provini. Vengono tagliati in corrispondenza della vicinanza al nodo, dove si intende realizzare i fori. Ciascuno di essi viene poi svuotato del riempimento del nodo per permettere il passaggio di un elemento ligneo in cui far passare le spine di legno. Nei collegamenti come da normativa dove sono previsti più spine deve tenersi in conto che il collegamento passi attraverso due nodi, comportando lo svuotamento di due nodi attraverso la canna. Perché questa operazione venga realizzata, non è possibile utilizzare il martello che può arrivare ad una limitata profondità e bisogna disporre di punte da trapano che abbiano una lunghezza tale da arrivare al nodo più profondo. Non è un'operazione molto semplice e questo sicuramente compromette la validità della scelta del procedimento. Dopo aver svuotato i culmi ed inserito il riempimento, un cilindro di legno di abete, per mezzo di un trapano con vite elicoidale vengono eseguiti dei fori da 6 mm passanti da un lato all'altro del culmo. Anche questa operazione non è estremamente semplice, perché rende necessario avere attrezzature particolari per garantire che il passaggio arrivi da un estremo all'altro dello stesso diametro. Considerando molto più debole il collegamento a trazione, si vuole provare questo tipo di sollecitazione. Vengono allora lasciati 6 cm di spazio tra un culmo e l'altro per evitare che con lo spostamento i due arrivino a coincidere.

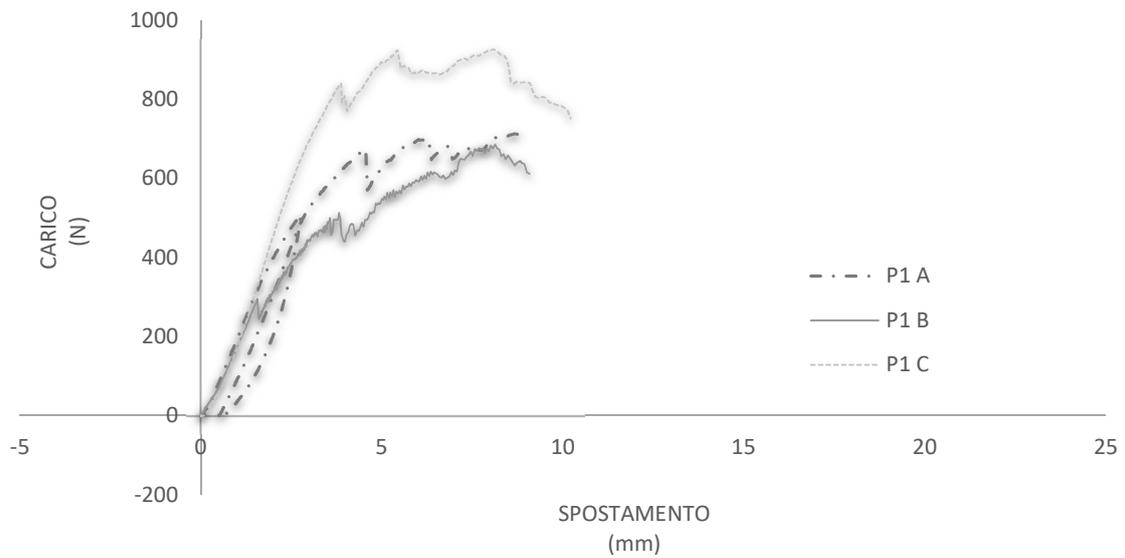
Si eseguono le prove su una macchina Galdabini PMA 10 a controllo di carico. I provini si rompono per cedimento del passante di legno, non si arriva a fessurazione del culmo. Si esegue una prova di scarico e ricarica, il comportamento che descrive la curva carico-spostamento, è di tipo elastico come ci si aspettava. Il valore massimo medio considerato di carico è di 775,107 N, con una deviazione standard di 131,8185. Il valore massimo di spostamento attorno ad 1 cm.



**Figura 112 Rottura del nodo per il passaggio del riempimento**

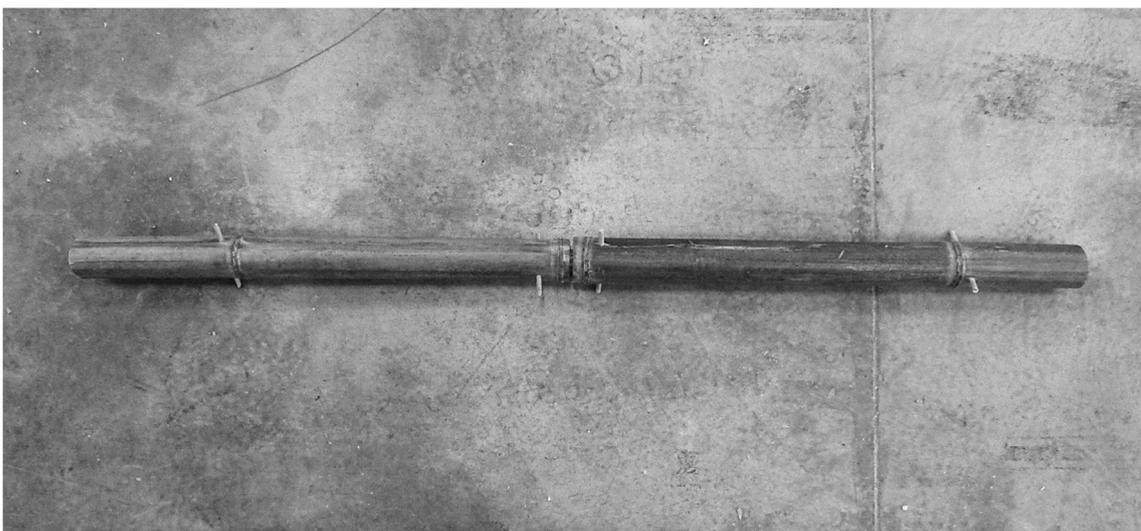


**Figure 113 - 114 Prova del collegamento con spine di legno ortogonali, in esecuzione e poi dopo, con rottura della spina**



**Figura 115 Grafico carico spostamento per i provini con passanti in legno**

Si tenga presente che con queste prove si è voluto studiare il comportamento del sistema piuttosto che il valore di resistenza di un collegamento, ossia quello del passante in relazione al culmo. Questa tecnica viene impiegata nei collegamenti utilizzando due passanti per culmo, a due internodi differenti, in distanza di 3 centimetri massimo dal nodo. È chiaro che raddoppiando il numero di passanti raddoppia l'area resistente e il collegamento ha una resistenza maggiore.



**Figura 116 Collegamento tra culmi realizzato con due spine ortogonali a due internodi per culmo**

Il lavoro presentato in questa tesi rappresenta il punto di partenza di una ricerca che ha come obiettivo basilare la valorizzazione del bambù italiano, creando il fondamento scientifico, tecnico, mirato alla conoscenza ed all'utilizzo consapevole del bambù nell'edilizia.

In particolare, è fine preciso di questo lavoro, il conferimento della dignità e credibilità strutturale al bambù italiano al pari degli altri materiali nel nostro paese, e in altri paesi per questo materiale.

Si apre la trattazione caratterizzando il bambù da una macro-prospettiva che lo contestualizza da un punto di vista storico-evolutivo e ne inquadra il possibile inserimento all'interno del contesto sociale ed economico contemporaneo, in riferimento all'ambito nazionale. Da un lato, si insiste sulla presenza di una consistente tradizione costruttiva in territori extraeuropei, dall'altro sull'applicabilità della stessa al nostro contesto, distanti in termini sociali quanto temporali. Il ponte tra le due si concretizza in uno strumento normativo, di indagine e regolamentazione.

Per dare fondamento a questa prospettiva, nel capitolo quarto, viene descritta la sperimentazione condotta nel laboratorio LISG dell'Università di Bologna per caratterizzare il comportamento del bambù italiano in risposta a vari tipi di sollecitazione (compressione, trazione, taglio), parallelamente ed ortogonalmente alle fibre, mettendo in luce le qualità che lo caratterizzano e i suoi punti deboli. In particolare, si evidenzia la risposta ottimale a tutte le sollecitazioni che coinvolgono le fibre in senso assiale, come per la trazione dove i valori di resistenza lo avvicinano all'acciaio, o compressione, dove supera legno e calcestruzzo. Opposta è invece la risposta alle sollecitazioni che sottopongono il bambù a resistere ortogonalmente alla direzione delle fibre, per l'influenza del taglio. Questo tipo di sollecitazioni sono quelle che coinvolgono principalmente i collegamenti, che allo stato attuale sono di sicuro il punto debole della progettazione della struttura. Viene allora effettuata una revisione di tutta la prassi tecnologica che li riguarda, avendo cura di indagare il momento storico precedente alle tecniche sviluppate da una mentalità abituata a lavorare con materiali moderni. L'ultima parte della tesi, focalizza due tecniche tradizionali, legature e passanti di legno che fissano un riempimento, che vengono studiate in direzione assiale, per la valutazione dei limiti e le qualità dell'utilizzo.

Lo studio dei meccanismi di collegamento è un mondo vastissimo che ha bisogno di essere approfondito ed ampliato. Si è voluto dare l'avvio ad una ricerca che si spera abbia evoluzioni, soprattutto nella direzione di introdurre un'innovazione in termini di concezione e di sicurezza a tecniche tradizionali che hanno l'indubbio vantaggio di avere una spesa ambientale praticamente nulla. D'altro canto il bambù adotta esattamente questo tipo di linguaggio, proponendo soluzioni innovative che offrono sostanziali vantaggi in termini economici, meccanici, ambientali, anche nell'ambito italiano. Questa tesi mette in luce come le caratteristiche meccaniche del nostro bambù non abbiano margini di inferiorità rispetto a quelle dei paesi dove è comunemente utilizzato con ottimi risultati strutturali, proponendosi come alternativa nel campo edile nazionale, in una prospettiva di sostenibilità.



- 
- [1] B. R. A. Anokye, «Bamboo Properties and Suitability as Replacement for wood,» *Pertanika Journal of Scholarly Research Reviews*, vol. 2(1), pp. 64-80, 2016.
- [2] C. K. P. S. S. Puspajali Das, «Traditional bamboo houses of North-Eastern Region: A field study of Assam and Mizoram,» *Key Engineering Materials*, vol. 517, pp. 197-202, 2012.
- [3] S. P. M. P. H. R. J. W. Maxim Lobovikov, *World bamboo resources*, Roma: FAO, 2007.
- [4] APN-GCR, *Bamboo: Green Construction Material*.
- [5] M. Fabiani, *Bamboo structures: italian bamboo as likely resource for green building*, Phd thesis, Università politecnica delle Marche.
- [6] J. Janssen, *Mechanical Properties of Bamboo*, Boston: Kluwer Academic Publishers, 1991.
- [7] C. M.-C. R. P.-M. A. M.-R. T. Esteve-Sendra, «Bamboo, from traditional crafts to contemporary design and architecture,» 2012.
- [8] M. C. Laverde, *il Bambù come materiale da costruzione*, Napoli: Esselibri, 2008.
- [9] Kaminski-Lawrence-Trujillo, «Structural use of bamboo,» *TheStructuralEngineer*, pp. 40-43, August 2016.
- [10] «<https://www.guadubamboo.com>,» [Online].
- [11] «<https://www.eeob.iastate.edu/research/bamboo/index.html>,» [Online].
- [12] M. S. B. Mordà, «Il Bambù: una scelta di "ecologia strutturale"». *Domo Studio*.
- [13] O. A. Arce, *Fundamentals of the design of bamboo structures*, Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven.
- [14] D. J. Trujillo, «Axially loaded connections in Guadua Bamboo,» Bath, 2009.
- [15] Z. Fangchun, «Studies on Physical and Mecanical Properties of Bamboo wood,» *Journal of Nanjing Techn. ,* 1981.
- [16] M. De Miranda, «BAMBOO: a construction material against earthquakes and hurricanes,» in *Lettura al Workshop con O.H. Lopez*, Firenze, 2005.
- [17] J. G. G. GONZÁLEZ, «Structural performance of bamboo 'bahareque' walls under cyclic load,» *J. Bamboo and Rattan*, vol. 4, n. 4, 2005.
- [18] H. D. K. S. D. K. G. Kaushik, *Performance of Structures during The Sikkim Earthquakes of the 14 February 2006*, Current Sciences, 2006.
- [19] J. J. Janssen, *Designing and Building with Bamboo*, INBAR, 2000.
- [20] «<file:///D:/www.bambus/new/eng/reports/connect/index/pdf.html>,» [Online].

- [21] O. H. Lopez, Manual de construcció con bambù, Estudios Tecnicos Colombianos Ltda Editores.
- [22] *Norma Tecnica E. 100 Bambù*, 2012.
- [23] V. A. Ali Awaludina, «Bolted bamboo joints reinforced with fibers,» in *2nd International Conference of SCESCM*, 2014.
- [24] N. T. I. A. M. Inoue, «Development of Connecting Method for Natural Round Bamboo».
- [25] Y. S. M. Ohta, «Development of a new method for connecting bamboo tubes,» Makasar, 2012.
- [26] A. D. F. G. Sassu, «Bamboo Trusses with Low Cost and High Ductility Joint,» *ItalyOpen Journal of Civil Engineering*, n. 2, pp. 229-234, 2012.
- [27] *ISO/DIS 22157-1 Bamboo structures — Determination of physical and mechanical properties, part 1: test method*, 2017.
- [28] *ISO 22157-1:2004*.
- [29] C. A. P. PUENTES, *RESISTENCIA A LA TRACCIÓN PERPENDICULAR A LA FIBRA*, Bogotá: UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, 2006.
- [31] C. Diseèn, «Building with bamboo: a review of culm connection technology,» *Journal of Green Building*, vol. 8, n. 4.
- [32] A. E. S. B. J. R. a. & Rogerson, «Bamboo Properties and Suitability as Replacement for Wood,» *Pertanika Journal of Scholarly Research Reviews*, vol. 2 (1), pp. 64-80, 2016.
- [33] *Titulo G-NSR 10*, 2010.
- [34] [Online]. Available: <http://www.bamboobotanicals.ca>.
- [35] R. G. B. WARREN C. YOUNG, *Roark's Formulas for Stress and Strain*, McGraw-Hill, 2002.





## RINGRAZIAMENTI

Questa tesi di laurea rappresenta per me il punto conclusivo di un lungo percorso di studi, ma soprattutto l'esperienza che mi ha permesso di trovare il mio spazio all'interno del mondo universitario, lasciandomi il ricordo e la prospettiva di un segmento dell'ingegneria diverso da quelli che conoscevo, che mi motiva ed entusiasma. E questo segmento è fatto anche di persone che hanno accompagnato e contribuito a questi mesi di lavoro, e di evoluzione interiore.

Prima di tutte, voglio ringraziare la professoressa Luisa Molari che con grandi capacità tanto professionali quanto umane mi ha guidato, affiancato e valorizzato in tutte le fasi di questo lavoro. Con l'aiuto della sua competenza e del suo entusiasmo ho avuto l'opportunità, non consueta nel mondo universitario, di esprimermi ed essere protagonista del mio lavoro, facendomi sempre sentire che per me ci fossero tempo, fiducia e stima.

Voglio poi ringraziare l'ingegnere Marco Fabiani, che mi ha aiutato ad entrare nel mondo del bambù, per avermi trasmesso tutta la professionalità e la passione con cui lo vive. Senza la sua collaborazione, il suo confronto e le sue conoscenze, gran parte di questo lavoro non sarebbe stato lo stesso.

Ringrazio anche il professor Lando Mentrasti dell'Università degli Studi di Ancona, per la sua disponibilità e il suo contributo professionale.

Infine, un ringraziamento particolare va a Roberto, Roberto, Mario, Alberto, e gli altri tecnici del Laboratorio di Ingegneria Strutturale e Geotecnica dell'Università di Bologna (LISG), in cui ho condotto tutte le prove che sono state oggetto di questa tesi. Gli sono grata perché, con grande competenza sono stati non solo di insegnamento e di supporto, ma anche di diretta partecipazione alla progettazione e realizzazione di tutte le prove. E soprattutto perché, nonostante le tante cose da fare, hanno saputo trovare ad ogni mio bisogno una soluzione, ma soprattutto tempo, pazienza, ed un sorriso.