

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

**Analisi sperimentale e numerica di un telaio in Guadua
Angustifolia Kunth caricato orizzontalmente:**

il bambù come possibile alternativa ecosostenibile ai tradizionali materiali da costruzione.

CANDIDATA

Michela Denittis

RELATRICE

Prof.ssa Ing. Luisa Molari

CORRELATRICE

Ing. Caori Patricia Takeuchi Tam

Anno Accademico 2018/2019

Sessione I

*E alla domanda che ricorre
-Che cosa c'è di buono in tutto questo, ahimè, ah vita? -
La risposta è:
che tu sei qui, che esiste la vita, che tu sei vivo
che il potente spettacolo continua,
e tu puoi contribuirvi
con un tuo verso.*

Walt Whitman (1819-1892)

ABSTRACT

In un contesto di grave crisi ambientale, dovuta ad un conflitto tra il rapido sviluppo della società industrializzata e i lenti tempi biologici della natura, è di fondamentale importanza porre le basi per uno sviluppo sostenibile.

Il mio studio pone l'attenzione sul bambù come materiale da costruzione in quanto permette di coniugare ottime caratteristiche meccaniche a requisiti di sostenibilità in termini ambientali, economici e sociali. Il mio interesse per questo materiale mi ha portato a passare alcuni mesi in Colombia, paese subtropicale dove il bambù, in particolare la *Guadua angustifolia* Kunth, cresce spontaneamente ed è usato come materiale da costruzione. Presso l'Università Nazionale della Colombia da più di quindici anni si stanno indagando le caratteristiche meccaniche e fisiche della guadua e le sue applicazioni in ambito strutturale. Recentemente la ricerca si è focalizzata sullo sviluppo di un sistema costruttivo che si presti all'industrializzazione.

In questo contesto, la mia tesi si pone l'obiettivo di ottimizzare un sistema costruttivo che prevede un telaio costituito da due colonne portanti a doppia altezza su cui vengono assemblati due pannelli. Questi ultimi sono concepiti per essere prefabbricati, nell'ottica di poter essere assemblati in maniera semplice e rapida in situ. Per raggiungere questo obiettivo è stato necessario, prima di tutto, studiare e reperire il materiale, caratterizzarlo attraverso delle prove in laboratorio, costruire i prototipi, ed infine testarli a carico orizzontale. È stato poi elaborato un modello con un programma di calcolo strutturale che ha reso possibile la simulazione numerica dei prototipi, permettendo la comprensione dei meccanismi di rottura avvenuti in sede sperimentale. In particolare, dall'analisi tensionale è emerso come la rottura di alcune parti localizzate del telaio avvenute in sede sperimentale sia derivata dalla concentrazione di tensione in corrispondenza delle giunzioni.

Proprio sul miglioramento delle giunzioni si dovrà concentrare la ricerca per migliorare il comportamento strutturale dei telai.

INDICE

1	INTRODUZIONE ed OBIETTIVI	1
2	GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNTH.....	5
2.1	INQUADRAMENTO STORICO DEL MATERIALE.....	5
2.2	QUADRO TEORICO.....	6
2.3	CONDIZIONI AMBIENTALI PER LO SVILUPPO E LA COLTIVAZIONE DELLA GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNTH	8
2.4	MORFOLOGIA.....	9
2.5	ANATOMIA DELLA PIANTA	12
2.6	FASI DI SVILUPPO DELLA GUADUA.....	13
2.7	TAGLIO	14
2.8	RIMOZIONE DELL'AMIDO E ASCIUGATURA	15
2.9	TRATTAMENTI CHIMICI DI PRESERVAZIONE	16
3	CARATTERIZZAZIONE DEL MATERIALE	19
3.1	METODOLOGIA.....	19
3.2	RESISTENZA A COMPRESSIONE PARALLELA ALLE FIBRE	21
3.2.1	Descrizione della prova.....	21
3.2.2	Calcolo ed espressione dei risultati.....	23
3.3	RESISTENZA A TAGLIO	30
3.3.1	Descrizione della prova.....	30
3.3.2	Calcolo ed espressioni dei risultati.....	32
3.4	CONTENUTO DI UMIDITA'	36
3.4.1	Descrizione della prova.....	36
3.4.2	Calcolo ed espressione dei risultati.....	36
3.5	CONFRONTO DEI RISULTATI CON TESI PRECEDENTI	38
4	IL PROGETTO.....	41

4.1	DESCRIZIONE DEL SISTEMA COSTRUTTIVO	41
4.1.1	Connessione tra i culmi	42
4.1.2	Configurazione geometrica	46
4.2	IL SISTEMA COSTRUTTIVO NELL'OTTICA GENERALE DELL'EDIFICIO	56
4.2.1	Assemblaggio.....	56
4.2.2	Attacco a terra.....	58
4.2.3	Chiusure perimetrali.....	59
4.2.4	Partizioni interne dei solai	61
5	COSTRUZIONE DEI PROTOTIPI	63
5.1	SELEZIONE DEL MATERIALE	63
5.2	TAGLIO DEL MATERIALE.....	66
5.3	PERFORAZIONE E ASSEMBLAGGIO.....	68
5.3.1	Sequenza costruttiva dei pannelli modulari	68
5.3.2	Connessione tra i culmi	69
6	ANALISI SPERIMENTALE	77
6.1	STRUMENTAZIONE DI PROVA.....	77
6.2	PROVA DI CARICO ORIZZONTALE	81
6.2.1	Telaio tipo B con pannelli con controventi concentrici	81
6.2.2	Telaio tipo C con pannelli con controventi eccentrici.....	83
6.3	QUADRO FESSURATIVO	86
6.3.1	Telaio Tipo B	86
6.3.2	Telaio tipo C.....	88
7	ANALISI NUMERICA.....	91
7.1	DESCRIZIONE DEL MODELLO.....	91
7.1.1	Materiali.....	91
7.1.2	Geometria ed Elementi utilizzati	93
7.1.3	Sezioni trasversali.....	93
7.1.4	Tipologie di vincolo.....	94
7.1.5	Applicazione del carico.....	96
7.2	RISULTATI	96
7.2.1	Diagrammi delle caratteristiche di sollecitazione	102

7.3	STUDIO TEORICO DELLE SEZIONI MAGGIORMENTE SOLLECITATE	118
7.3.1	Analisi del Nodo 1: Diagonale Sganciata.....	118
7.3.2	Analisi del Nodo 2	120
7.3.3	Analisi Nodo 3.....	121
7.3.4	Analisi Nodo 4.....	127
8	CONCLUSIONI	133
	APPENDICE A.....	136
	APPENDICE B	145
8.1.1	Difetti.....	145
	Bibliografia	147
	Ringraziamenti	151

1 INTRODUZIONE ed OBIETTIVI

Il settore delle costruzioni è uno dei principali protagonisti della questione ambientale: esso incide in gran misura sia sul consumo di risorse che sull'inquinamento del territorio. L'intero processo edificatorio infatti genera un complesso impatto ambientale, non solo per quel che concerne l'effettivo consumo di suolo: dall'approvvigionamento delle materie prime, alla produzione dei materiali da costruzione, dal trasporto fino allo smaltimento dei rifiuti. (1)

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

"Lo sviluppo sostenibile persegue contemporaneamente lo sviluppo economico della società, il benessere sociale degli individui e la salvaguardia dell'ambiente, sia attuali che futuri." (2)

"(...) soddisfa i bisogni delle generazioni presenti senza compromettere la possibilità delle generazioni future di soddisfare i propri." (2)

"Il tasso di utilizzazione di qualsiasi risorsa non deve superare il tasso di rigenerazione della risorsa stessa." (2)

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

Tiezzi nella sua principale opera "Tempi storici, tempi biologici" (3) teorizza uno degli aspetti essenziali di questo argomento, affermando che alla base della crisi ambientale odierna vi è il conflitto tra i rapidi tempi dello sviluppo della società e i tempi biologici lenti delle trasformazioni dell'ambiente e di rigenerazione delle risorse naturali.

Partendo dal concetto espresso da Tiezzi nasce quindi la consapevolezza della necessità di ripensare le regole del progresso e della progettazione, con l'obiettivo di risolvere questo conflitto. Perché ciò avvenga, un ruolo essenziale deve essere giocato dalla ricerca.

Le figure dell'ingegnere e dell'architetto hanno quindi anch'essi il compito di perseguire i principi della sostenibilità. L'indagine nell'ambito delle costruzioni deve muoversi in diverse direzioni: sullo studio dei materiali, sulle tecniche di realizzazione degli interventi edilizi, sull'integrazione di tecnologie, sul controllo e gestione delle procedure di valutazione di sostenibilità.

Per quanto concerne i materiali è di primaria importanza ridurre il consumo di energia e l'impatto sull'ambiente derivanti dalle fasi di produzione e dal loro smaltimento, nonché la ricerca di nuove

applicazioni dei materiali naturali che forniscano soluzioni a basso costo ambientale ed economico.

Il mio studio pone quindi l'attenzione sul bambù in quanto promettente a soddisfare i requisiti di sostenibilità in termini ambientali, economici e sociali.

Purtroppo in Europa ed ancor di più in Italia, sebbene negli ultimi anni sia cresciuto l'interesse per questo materiale, nella pratica esso non ha trovato una grossa diffusione in campo edilizio e non è stato sufficientemente indagato per quanto riguarda le sue prestazioni in ambito architettonico e strutturale. Tale fenomeno è da ricondurre ad un generale scetticismo nei confronti di un materiale che non appartiene alla nostra tradizione costruttiva, oltre a non avere una crescita spontanea nel territorio europeo.

Il personale interesse per questo materiale mi ha portato quindi a trasferirmi per alcuni mesi nella zona subtropicale del Sud America, in Colombia, paese in cui il bambù si sviluppa naturalmente e gode ormai di un ruolo di centrale importanza nell'ambito delle costruzioni e dell'industria.

In Colombia, la specie autoctona *Guadua Angustifolia Kunth* che ha avuto vasta applicazione nelle costruzioni locali è stata progressivamente sostituita nei decenni dal calcestruzzo e dall'acciaio, in seguito all'influenza occidentale. A risvegliarne l'interesse è stato il violento evento sismico del 25 Gennaio 1999 che ha colpito le città di Armenia, Pereira e le zone limitrofe. Gli edifici realizzati in bambù, anche se costruiti in maniera rudimentale dagli abitanti del luogo privi di una competenza ingegneristica, sono stati gli unici a non subire danni rilevanti.

In seguito a questo evento, si è regolamentato il bambù in ambito strutturale, inserendolo nella "Normas Colombianas Diseño y Construcción Sismo Resistente N.S.R. -98, con il titolo E.7.(4).

In seguito alla modifica della legislazione, sono iniziate una serie di indagini scientifiche atte allo studio del suo comportamento strutturale al fine di stabilirne i limiti e alla progettazione di metodologie e processi costruttivi che ne minimizzassero le debolezze, con l'obiettivo di superare il carattere empirico e artigianale che avevano contraddistinto le costruzioni fino a quel momento, integrando nuove tecnologie e componenti sofisticati.

È in questo contesto che si va quindi a inserire la mia ricerca, svoltasi inizialmente nel dipartimento di Ingegneria Civile ed Agricola dell'Università Nazionale Colombiana all'interno del ben più ampio progetto di indagine intrapreso ormai da più di quindici anni dall'Ingegnere Takeuchi Tam Caori Patricia.

In particolare, la mia tesi si propone di studiare il comportamento a carico orizzontale di un sistema strutturale a telaio costituito da due colonne portanti a doppia altezza e pannelli prefabbricati in *Guadua Angustifolia Kunth*.

Questo sistema costruttivo segue precise "linee guida" quali: l'industrializzazione del processo edilizio, la modularità, la semplicità di costruzione e la sostenibilità.

Sebbene questo materiale sia stato sottoposto ad indagini scientifiche a livello nazionale e internazionale, il suo processo di costruzione non è stato ancora industrializzato né standardizzato

per la produzione in serie di elementi strutturali modulari che possano essere assemblati in situ in maniera semplice e rapida.

L'obiettivo, quindi, è l'ottimizzazione del sistema strutturale nell'ottica dell'industrializzazione del processo costruttivo, al fine di ridurre e velocizzare al massimo le operazioni in cantiere.

2 GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNTH

Il materiale utilizzato per il progetto di questa tesi è il Bambù genere *Guadua Angustifolia* Kunth, che cresce abbondantemente in Colombia, specialmente nella zona Andina (Antioquia, Caldas, Risaralda, Quindío e il nord della Valle del Cauca).

La *Guadua* è il genere di bambù nativo della Colombia ampiamente inserito nel campo della costruzione e dell'industria, tanto che viene ormai identificato come un simbolo della cultura locale.

In questo capitolo saranno introdotti diversi aspetti che la caratterizzano: la morfologia e la struttura anatomica, le fasi dello sviluppo di crescita, i suoi utilizzi, e il modo in cui viene tagliata e preservata prima di essere utilizzata come materiale da costruzione.

Prima di studiare il materiale dal punto di vista meccanico attraverso prove sperimentali in laboratorio è importante conoscere questa pianta in tutti i suoi aspetti, per capire come questi interagiscono tra di loro e come influenzano le proprietà del materiale e per avere quindi maggiore consapevolezza sul suo comportamento strutturale.

2.1 INQUADRAMENTO STORICO DEL MATERIALE



Figura 1: " CHU" carattere cinese che viene dai primi ideogrammi cinesi

La pianta di Bambù è una graminacea gigante, che cresce rigogliosamente nel territorio colombiano da cui si fondano le radici della cultura artigianale e architettonica colombiana.

Il Bambù è una pianta millenaria: dagli studi finora effettuati si pensa che la sua prima apparizione sulla terra risalga all'era Cretacea, leggermente prima dell'inizio dell'era terziaria, cioè quando l'uomo apparso sulla terra.

La storia del Bambù e del suo rapporto con l'uomo inizia in Asia: in Cina il bambù e l'uomo sono stati molto legati fin dai tempi preistorici. Infatti uno dei primi ideogrammi cinesi fu un disegno di un bambù, costituito da due steli con rami e foglie che si chiamò CHU. (6)

Storicamente, la Cina, l'India e la Colombia sono i paesi che hanno maggiormente sfruttato questo materiale nelle costruzioni e hanno contribuito allo sviluppo della sua crescita e delle sue tecniche di utilizzo. La civiltà cinese e quella indiana hanno utilizzato il bambù per costruire, nell'arco della loro storia, imponenti strutture come cupole e ponti.

In Colombia, questo materiale è stato utilizzato fin dall'epoca precolombiana dagli indigeni per costruire ponti rinforzati. (7)

Quando arrivarono gli spagnoli nel nuovo continente, l'intera America centrale e America latina era tappezzata di boschi di Guadua, tanto che si legge nelle memorie di Cristoforo Colombo:

"Cañas tan gruesas como el muslo de un hombre" (8)

Culmi così grossi da sembrare la gamba di un uomo.

Questa frase non è l'unica prova dell'abbondanza dei boschi di guadua nel territorio colombiano. Gli spagnoli stabilitesi nella valle del Cauca, dove trovarono terreno fertile e fiumi abbondanti, scrivono riguardo queste terre: "questo paese è circondato da una montagna costituita da boschi di guadua, con culmi talmente grossi da non riuscire a vedere cosa ci sia aldilà" (6)

Durante la colonizzazione questo materiale divenne un pilastro portante della cultura colombiana, come testimoniato dai resti di costruzioni in guadua appartenenti a quell'epoca nelle vie di villaggi e paesi della zona Cafetera. I coloni giunti nell'attuale dipartimento del Quindío, nella regione Cafetera, infatti, trovarono una grande quantità di guadua e la utilizzarono per le loro costruzioni e utensili della quotidianità come letti, strumenti musicali, sgabelli, credenze, barattoli, setacci, giochi per bambini, culle di neonati, bare e croci per i cimiteri.

"La guadua, fu il supporto dei popoli che si stabilirono in Colombia, come la porcellana in Asia, la pietra in Europa, il ferro e il cemento degli Stati Uniti." (9)

Le costruzioni di questo periodo sono per la maggior parte infrastrutture come acquedotti e ponti e nel campo delle abitazioni si sviluppò un particolare sistema costruttivo: il *bahareque tradicional*.

Il successo di questo sistema era dovuto al fatto che permetteva di costruire degli edifici simili a quelli europei anche in mancanza dei materiali tradizionali, soddisfacendo quindi il desiderio della borghesia emergente di avere degli edifici simili a quelli del Vecchio Continente. (10)

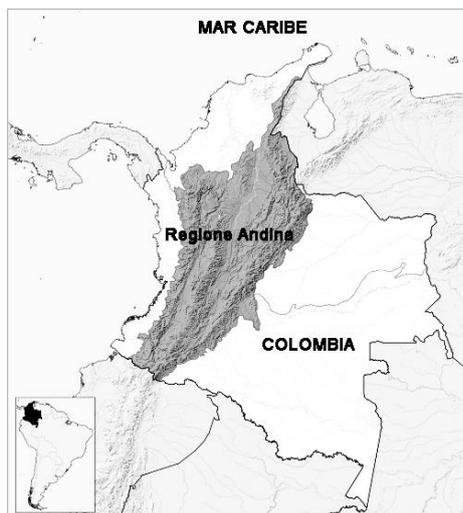
Furono quindi prima i colonizzatori, e successivamente gli agricoltori colombiani i maestri delle costruzioni in guadua, e a loro si attribuisce il merito di aver dato a questo materiale l'importanza che ora riveste in tutto il paese. E' responsabilità delle generazioni attuali e future approfondire lo studio e la ricerca di questa specie per onorare la traiettoria culturale che avevano iniziato gli avi colombiani. (11)

2.2 QUADRO TEORICO

La guadua è una pianta autoctona colombiana di grande distribuzione in America, dove ha un importante ruolo ambientale socioculturale ed economico. Appartiene alla famiglia delle graminacee, sottofamiglia bambusoidea, supertribù Bambusodae. Si sono classificati più di 40 tipi o generi con 450 specie. In Colombia il genere più diffuso è la "guadua" di specie "angustifolia".

In botanica il bambù è classificato come *Bambusae*, una tribù dell'immensa famiglia delle graminacee, della quale fanno anche parte piante come il mais, l'orzo e il grano. Per le caratteristiche del suo gambo, si considera come una pianta legnosa.

Classificare il bambù è stato molto difficile per le caratteristiche stesse della pianta, in quanto la sua fioritura si presenta solo ad intervalli di 30, 60, 90 e addirittura 100 anni, e sia i fiori che i frutti sono indispensabili per la classificazione.



In Colombia esistono quattro specie di guadua differenti:

- *ANGUSTIFOLIA*: si trova distribuita nella regione centrale dell'Andina
- *AMPLEXIFOLIA*: si trova nelle pianure orientali e parte del nord della regione Orinoquia e sulla costa Atlántica.
- *SUPERBA* e *WEBERBAUERI*: ubicate nell'amazzonia e nel corridoio chocuano del Pacifico.

Figura 2: Zona geografica in cui cresce la Guadua

Anquistifolia. Fonte: wikimedia commons

CLASSIFICAZIONE TASSONOMICA DELLA GUADUA

REGNO	Vegetale
DIVISIONE	Spermatofitas
SOTTODIVISIONE	Angiospermas
ORDINE	Glumiflorales
CLASSE	Monocotiledóneas
FAMIGLIA	Poaceae (Graminacee)
SOTTOFAMIGLIA	Bambusoideae
SUPERTRIBU	Bambusodae
TRIBU	Bambuseae
SOTTOTRIBU	Guadinae
GENERE	Guadua
SPECIE	Angustifolia Kunth
VARIETÀ	Bicolore
FORMA	Castilla, Cebolla, Macana, Cotuda, Rayada
NOME SCIENTIFICO	Guadua Angustifolia Kunth

2.3 CONDIZIONI AMBIENTALI PER LO SVILUPPO E LA COLTIVAZIONE DELLA GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNTH

La guadua si sviluppa in un grande spazio geografico e questo indica sicuramente la sua adattabilità; osservazioni tecniche dimostrano che i fattori che determinano lo sviluppo della pianta sono la qualità del terreno, le precipitazioni e la temperatura. (12).

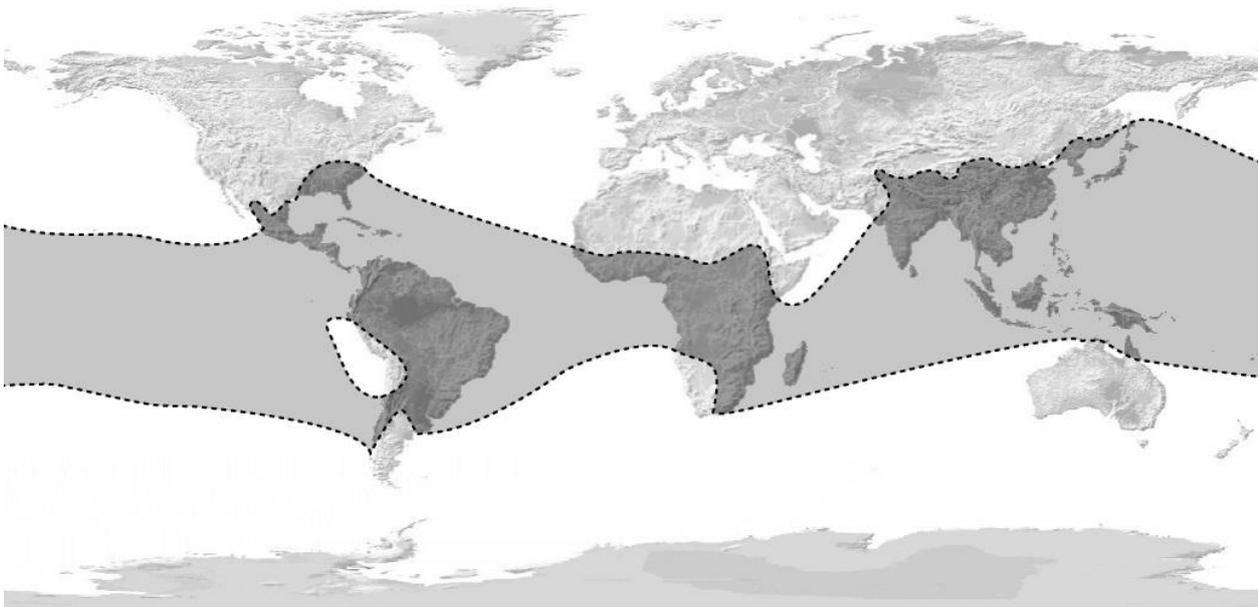


Figura 3: Aree di crescita spontanea del Bambù. Fonte: Web

- Temperatura: la temperatura è uno dei fattori climatici limitante nella distribuzione geografica di questa specie. L'intervallo ottimale oscilla tra i 20 °C e i 26°C. Quando si coltiva in luoghi dove l'intervallo delle temperature si allontana da quello ottimale, i diametri e le altezze dei culmi si riducono, specialmente con temperature molto inferiori.
- Altitudine: in Colombia la Guadua Angustifolia, cresce tra gli 0 e i 2000 metri sul livello del mare, con il massimo sviluppo che si raggiunge tra i 900 e i 1600 m sul livello del mare.
- Precipitazioni: questo genere cresce meno laddove le precipitazioni sono inferiori a 1200 mm annuali. La migliore condizione sarebbe tra i 2000 mm e i 2500 mm per anno.
- Umidità: l'umidità relativa è un fattore determinante nello sviluppo della specie. L'umidità relativa che maggiormente favorisce lo sviluppo dei boschi di guadua è compresa tra il 75% e l'85%.
- Luminosità: la luminosità per un eccellente sviluppo della guadua deve essere compresa tra i 1800 e i 2000 ore di luce all'anno, approssimativamente 5 o 6 ore di luce ogni giorno.
- Vento e nuvolosità: di norma, il vento nella zona dove cresce la guadua ha una velocità che passa dalle cosiddette brezze deboli e quelle forti ossia tra i di 4,4 m/sec fino ai 12,3 m/sec. Quando i venti superano i 22,6 m/sec si cominciano ad evidenziare danni meccanici sui fusti della guadua. La guadua presenta un miglior sviluppo quando ha in media tra 1 e 4 okta di nuvolosità.

- Suolo: il suolo che favorisce lo sviluppo di questa pianta è il limoso, franco, franco-argilloso, franco-limoso. Il suolo ideale per la guadua è con una tessitura grossa o media, ricco di materia organica, con un buon drenaggio e umido. Suoli troppo argillosi non sono indicati per lo sviluppo della pianta. Il pH adeguato per lo stabilimento della guadua è di 5.5 o 6.0, ossia moderatamente acido. La maggior parte dei guaduali trovano in suoli derivanti da ceneri vulcaniche, povera di fosforo e ricca di potassio.

2.4 MORFOLOGIA

Se volessimo schematizzare la struttura della Guadua potremmo suddividerla in tre parti: rizoma, culmo e le diramazioni.



Figura 4: Rizoma, Fonte: propria

Il rizoma è la radice della pianta, che raggiunge normalmente da 1 m fino a 3 metri di profondità e, come in tutte le piante, ha una duplice funzione: da una parte la raccolta delle sostanze nutritive e degli alimenti necessari per lo sviluppo del resto della pianta, dall'altra la riproduzione, la quale si effettua sessualmente per ramificazione dei rizomi.

Dal rizoma partono le radici avventizie che si provvedono della nutrizione della pianta ed il collo che collega il rizoma con il culmo.

Uno dei vantaggi che ha il bambù, dovuto alla presenza del rizoma, è il suo contributo nella stabilità dei versanti. I rizomi, infatti, essendo forti e consistenti, formano un sistema che trattiene il suolo, aiutando principalmente sulle sponde dei fiumi, ed evitano l'erosione dovuta ai forti venti e la frana del terreno.

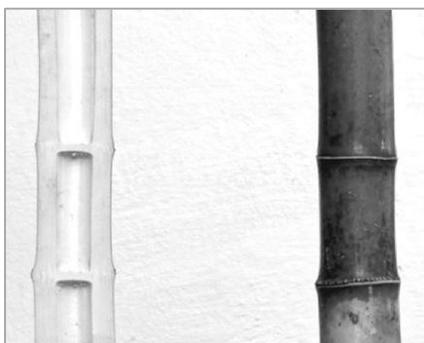


Figura 5: Sezione interna del culmo

Il culmo, la cui sezione è raffigurata in Figura 5, è l'asse aereo segmentato che emerge dal rizoma in elevazione della pianta ed è la porzione più utile del bambù. La sua struttura era composta da elementi di forma tubolare cavi, gli internodi, i quali sono separati da nodi, diaframmi circolari. Questi moduli variano di diametro, spessore di parete, densità e lunghezza di internodo a seconda dell'altezza del fusto. Il diametro e lo spessore della parte del culmo, diminuiscono con l'altezza, al contrario la densità e la lunghezza tra i nodi aumentano con questa. La sua forma cilindrica e affusolata può raggiungere di media i 18-20 metri di altezza.

Le caratteristiche dei moduli variano inoltre a seconda della specie. In particolare, la *Guadua Angustifolia*, si può collocare nel sottogruppo dei cosiddetti "culmi retti", ossia in quelle specie la cui crescita si sviluppa verticalmente in direzione pressochè retta, anche se leggermente arcuata sulla punta.

I germogli iniziano a nascere quando il culmo completa la sua crescita. Nel caso della *Guadua* i germogli nascono nella parte alta della linea nodale, solitamente con un unico germoglio per nodo. I rami nodali della base si trasformano in spine mentre quelli della parte alta del culmo hanno un alto contenuto di fibra e possono essere sfruttati per la produzione di carta. Sui rami della parte alta si sviluppa il fogliame.

Per quanto riguarda il suo utilizzo invece, secondo il *Centro Nacional para el estudio del Bambù Guadua (CNEBG)*, la *Guadua* può essere suddivisa in sei parti lungo la sua sezione longitudinale.

Il bambù è un materiale che può essere utilizzato in ogni sua parte, lasciando intravedere ottime prospettive dal punto di vista economico. Può essere infatti commercializzato in tanti ambiti: dalla cucina, all'edilizia, dalla medicina all'industria tessile.

Nella tabella sottostante sono presentate le parti della pianta e i suoi rispettivi utilizzi in Colombia:

RIZOMA	E' il supporto della pianta, sotterraneo. Si utilizzano in decorazioni e nei giochi infantili.
CEPPO	E' la sezione basale del culmo con maggior diametro, la distanza tra i suoi internodi è corta, e questo le dà una maggiore resistenza. La sua lunghezza è approssimativamente di 3,0 metri. Si utilizza per colonne in costruzione o recinzioni; per la sua grossa sezione viene utilizzato anche come per paratie. In quanto al comportamento sotto gli sforzi di flessione, questa parte della <i>Guadua</i> si comporta molto bene, grazie alla poca distanza tra i nodi della pianta.
BASE	E' la parte della <i>Guadua</i> maggiormente utilizzata, a causa del suo diametro di medie dimensioni, e al fatto che la distanza tra i nodi è maggiore che nel ceppo; questa fascia è lunga circa 8 metri. Se il fusto ha un buon diametro si utilizza per le colonne portanti, ma può essere utilizzata anche per rivestimenti. E' sicuramente la parte della <i>Guadua</i> più commercializzata.
SOPRA-BASE	Il diametro è minore e la distanza tra i nodi è un po' più grande rispetto alla base. Le sue dimensioni permettono un buon commercio e la lunghezza è

	approssimativamente di 4 metri. Viene utilizzata per i ponteggi delle costruzioni oltre che come trave nei solai.
VARILLÓN	Sezione di minor diametro, la sua lunghezza è approssimativamente di 3,0 metri generalmente si utilizza nelle costruzioni come puntelli o come supporti sulle coperture per disporre i coppi di terracotta o di paglia.
COPA	E' la parte apicale della guadua, con una lunghezza di 1,20 fino a 2,0 metri. Si mette nel terreno come concime di materia organica.

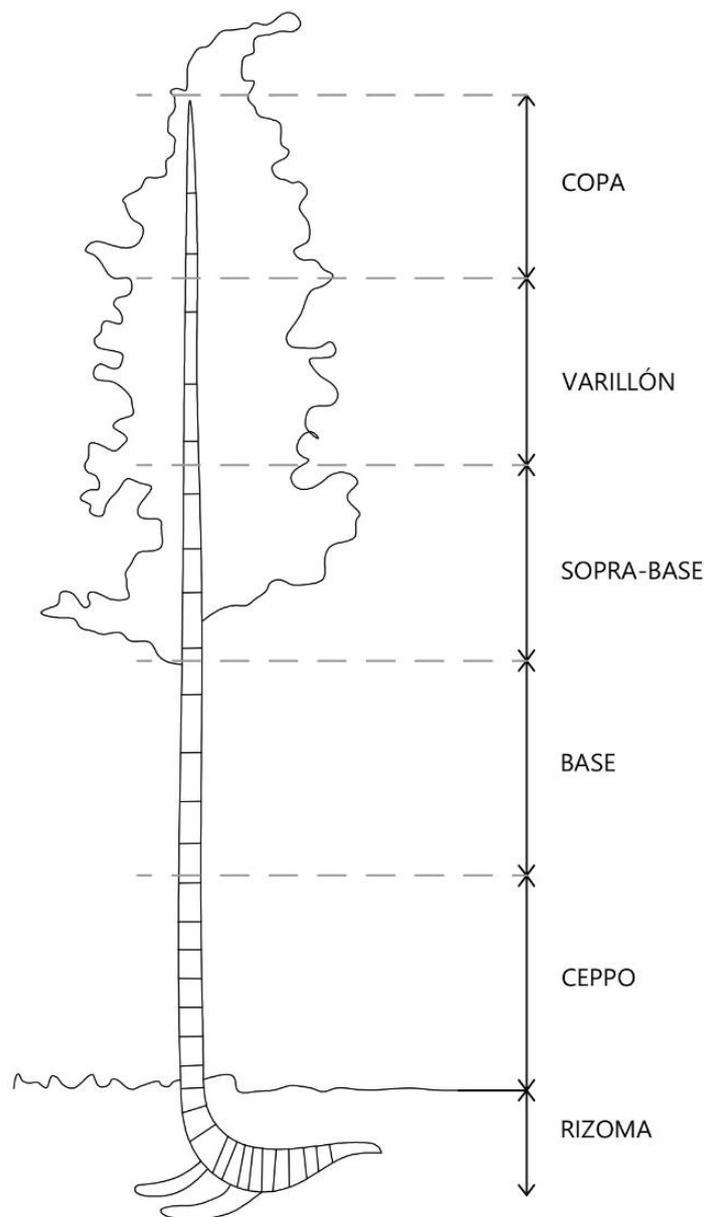


Figura 6: Parti della Guadua Angustifolia Kunth

2.5 ANATOMIA DELLA PIANTA

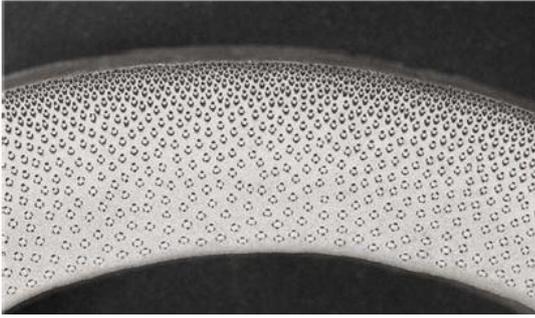


Figura 7: Sezione perpendicolare alle fibre. Fonte

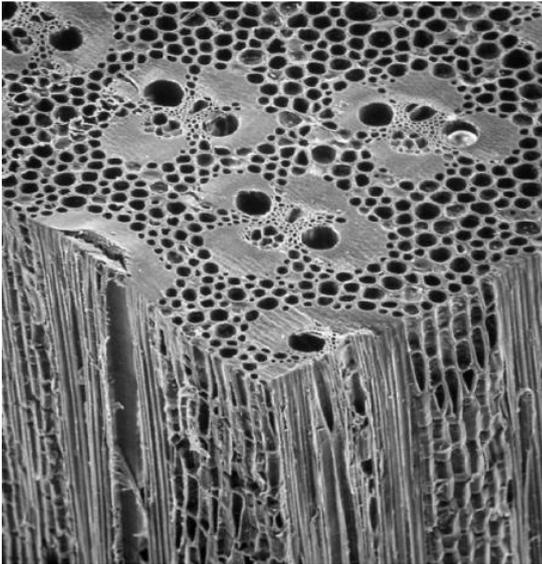


Figura 8: Vista tridimensionale del culmo, mostrando l'area fibro-vascolare e il parenchima. Fonte Liese, 1998

Conoscere l'anatomia della pianta è importante per capire le sue caratteristiche di resistenza. La struttura anatomica della pianta in esame è costituita dal tessuto conduttivo, *i fasci fibro-vascolari* e dalle fibre o *tessuto sclerenchimale* che si sviluppa in direzione dello sviluppo del culmo. Inoltre le fibre e i fasci fibro-vascolari sono "annegati" nel *parenchima*, un tessuto composto prevalentemente da lignina che ha lo scopo di connettere gli elementi longitudinali.

Questo tipo di disposizione non vale per i diaframmi nodali, nei quali la struttura è totalmente differente e nei quali gli elementi si intrecciano e si sovrappongono tra di loro.

La distribuzione degli elementi cambia sullo sviluppo del culmo: nella direzione verticale la quantità di fibre aumenta percentualmente dalla base verso la punta e orizzontalmente diminuisce dall'esterno verso l'interno. Ovviamente questo fattore incide sulla densità e sulla resistenza della guadua.

La parte più esterna è costituita dall'epidermide composta da due strati: uno interno di uno spessore superiore, maggiormente lignificato, ed uno esterno, ricoperti da polimeri cerati di acidi idrossilici (13)

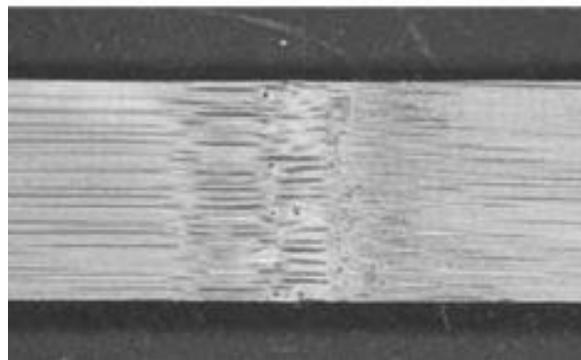


Figura 9: A sinistra: Sezione parallela alle fibre zona internodo; A destra: sezione parallela alle fibre, zona del nodo.

Fonte: (38)

2.6 FASI DI SVILUPPO DELLA GUADUA

Al momento della selezione del materiale, è importante conoscere il processo di crescita e le varie fasi di sviluppo, in quanto le caratteristiche fisiche e meccaniche della pianta cambiano con esse.

Il processo di crescita ha inizio quando, a partire dall'apice del rizoma, si ha la fuoriuscita dal terreno del così detto rebrote o cogollo. Il numero di nodi di cui è costituito questo elemento è lo stesso che caratterizzerà la pianta durante tutto il suo ciclo di vita, mentre il suo diametro coincide con il diametro massimo della pianta. Lo sviluppo del fusto avviene infatti per allungamento degli internodi, cominciando dalla parte inferiore e terminando con la parte superiore; sulla parte superiore dell'internodo cresceranno i rami e le gemme delle foglie. Durante la crescita la superficie è molto delicata, il fusto quindi è protetto con foglie di forma triangolare che nascono su ogni nodo e ricoprono interamente tutta la superficie. Dopo aver raggiunto la sua quota massima e il suo massimo diametro, lo strato protettivo si stacca lentamente, lasciando ormai il fusto maturo esposto alle intemperie (Figura 10). La maturazione continua fino ad arrivare al massimo delle sue prestazioni, dai 3 ai 6 anni.



Figura 10: Lo strato protettivo si stacca dopo che la pianta ha raggiunto il suo massimo livello. Fonte: propria

Lo sviluppo della guadua può essere diviso in quattro fasi: la Rebrote, la Guadua Giovane, la Guadua matura, la Guadua troppo matura.

La Rebrote è la prima fase di sviluppo, dagli 0 ai 6 mesi di età. Durante i primi 30 giorni la crescita raggiunge i 4-6 cm ogni 24 ore. Dopo i 90 cm si stabilizza in un media di 9-11 cm di crescita in 24 ore; si ritrova rivestito completamente di foglie di canna che variano secondo il luogo e le condizioni climatiche dove si sviluppa. Nei primi 30 giorni di crescita si può usare come alimento umano e si può anche sfruttare per fini decorativi, deformando la sezione e inducendo la crescita secondo forme distinte.

Durante la seconda fase di sviluppo viene chiamata Guadua Giovane.

Essa va dai 6 mesi ai 3 anni di età. Questa fase inizia quando le foglie che ricoprono il fusto della parte apicale del culmo cominciano a distaccarsi, lasciando spazio ai rami primari e consecutivamente ai secondari.

In questa fase il materiale possiede poca durezza in quanto non ha ancora lignificato completamente. Il suo utilizzo quindi si limita a cestini, tessuti e tappeti. Si riconosce in quanto possiede un color verde molto intenso, la sua superficie è pulita da muschi e i nodi sono caratterizzati da fasce nodali bianche, dove si trovano i germogli.

Durante la terza fase dello sviluppo si parla di Guadua matura.

Essa va dai 3 ai 6 anni di età. In questa fase la Guadua raggiunge la sua maggiore resistenza e durezza; questo è il momento ideale per il suo utilizzo in edilizia e può essere utilizzato anche per piastrelle in laminato o parquet in bambù laminato. Si riconosce in quanto scompare nel fusto l'effetto lucido e il colore verde intenso e si ha l'apparizione di macchie color grigio dovuto ai funghi, arrotondati con diametri fino a 3 cm sopra la superficie.

Dai 6 anni in avanti si parla di Guadua troppo matura. Questa è una guadua poco produttiva: tende a fessurarsi molto facilmente, non resiste se vengono posti dei chiodi né se viene colpita con un martello; si riconosce perché perde il colore verde scuro della guadua matura e prende un colore arancio, inoltre non presenta fogliame, e questo indica che fisiologicamente non è attiva.



Figura 11: Guadua Matura. Età ideale per essere utilizzata in edilizia. Fonte: (14)

2.7 TAGLIO



Per effettuare il taglio della guadua è indispensabile avere una piena e sicura conoscenza dell'età della pianta, in quanto come abbiamo detto precedentemente in relazione all'età della guadua le sue caratteristiche e proprietà fisiche e meccaniche cambiano, incidendo sulla resistenza e sul suo utilizzo. L'età adeguata per effettuare il taglio, per un utilizzo in costruzione, è tra i 3 e i 5 anni. Se viene tagliata prima dei 3 anni la sua resistenza è decisamente minore in quanto la lignificazione che non è ancora avvenuta totalmente e il contenuto di umidità è

molto alto. Di conseguenza, seccandosi, la contrazione prodotta fessura e deforma la guadua, rendendola poco resistente e alcune volte quasi inutilizzabile; inoltre la guadua giovane è più suscettibile all'attacco di insetti xilofagi per il suo alto contenuto di amido. Al contrario, se i fusti hanno età maggiore di 5 anni, la resistenza comincia a diminuire lentamente. Un fusto di età tra i

3 e i 5 anni si riconosce in quanto non ha la foglia di canna, lo strato che protegge la superficie, e c'è il fogliame sulla sommità del fusto e sul culmo si trovano macchie di alghe in gran quantità. (15)

Il Taglio nel fusto della guadua deve essere realizzato dopo il primo internodo completo che esce dalla terra, approssimativamente ad un'altezza di 15-30 cm sopra il livello del suolo, con precauzione di tagliarlo subito sopra il nodo e facendo attenzione a quello che c'è sopra con l'obiettivo di evitare che l'acqua entri e ristagni nel culmo rimasto, putrefacendolo e rovinando conseguentemente la radice. Il taglio deve essere il più pulito possibile, si usa infatti un macete o una sega, e deve essere fatto diagonalmente rispetto al culmo per far uscire l'acqua e non farla ristagnare in esso.

2.8 RIMOZIONE DELL'AMIDO E ASCIUGATURA

Il bambù, in particolare se il bambù è giovane o minore di 3 anni, subito dopo essere tagliato è vulnerabile all'attacco di insetti xilofagi come il *Dinoderus minutus*. Questi ultimi sono attratti dall'amido che si deposita sulla parete del fusto, costruiscono lunghe gallerie facendo diventare il materiale inutilizzabile.

Successivamente alla fase di taglio dei fusti, per evitare l'attacco di insetti. Lo si può sottoporre o ad un trattamento che ha il fine di ridurre e scomporre il contenuto di amido e di umidità dei fusti, o ad un trattamento di preservazione chimica contro gli insetti e funghi.

Vi sono diverse tecniche per la fase di rimozione dell'amido e l'essiccazione: direttamente nel guaduale, per immersione, con calore e con fumo.

Il primo metodo viene svolto direttamente nel sito di raccolta e consiste nel tagliare il fusto lasciandolo, con rami e foglie, il più verticale possibile appoggiato ad altri fusti di bambù ancora vivi, in modo da seccarsi in maniera graduale da dentro verso fuori. E' importante che il fusto tagliato sia appoggiato su una pietra, un pezzo di plastica o un altro rizoma così da non assorbire l'umidità del terreno.

Il fusto deve rimanere in questa posizione almeno per 4 settimane, successivamente si tagliano i rami e le foglie, e lo si lascia seccare ancora, ma in un luogo coperto e ben ventilato.

E' il procedimento fino ad ora più diffuso, poiché i fusti non si macchiano, conservano il loro colore, non si fessurano, e non sono attaccati da insetti o funghi. E' il procedimento più utilizzato e maggiormente raccomandato per il suo basso costo e anche perché è un processo naturale che non macchia i fusti.

Altro possibile procedimento di rimozione dell'amido è con l'immersione in acqua. I fusti appena tagliati vengono immersi in un serbatoio o un fiume, per un periodo non superiore alle 4 settimane. Questo metodo non è molto efficace: durante il processo i fusti si macchiano, e nel caso rimangano più tempo del previsto nell'acqua perdono resistenza e diventano fragili.

Nel procedimento di cura con calore i fusti di guadua si collocano orizzontalmente sopra una brace. Vengono disposti non troppo vicini alle fiamme per evitare che si brucino e vengono girati costantemente. In generale questo trattamento viene fatto all'aperto. E' un processo efficace ma bisogna porre particolare cura nella distribuzione dosata ed uniforme del calore, in quanto le bruciature e i picchi di calore portano alla produzione di sforzi differenziali dall'interno e all'esterno del fusto che causano fessurazioni.

Il metodo di cura con fumo consiste in affumicare i fusti di guadua con l'aiuto di un falò: si collocano orizzontalmente all'interno di una camera sopra un fuoco acceso, si lasciano in questa posizione fino a quando sono ricoperti esteriormente dalla fuliggine, con l'obiettivo di raggiungere una umidità del 10%. Il fumo produce la cristallizzazione della lignina, portando una maggiore resistenza all'attacco di insetti, impermeabilità e migliori proprietà meccaniche.

2.9 TRATTAMENTI CHIMICI DI PRESERVAZIONE

Il problema più grande di una struttura in guadua è la durabilità.

E' di fondamentale importanza, quindi utilizzare dei trattamenti efficaci che preservino il materiale dalle principali cause di questo problema: l'attacco di insetti, l'umidità e il sole.

Per preservare il materiale da questi fattori ci sono diverse soluzioni che dipendono dal tipo di utilizzo che si fa del materiale e dal tipo di agenti cui è esposto.

Per preservare la guadua dall'attacco di insetti e funghi, il materiale viene trattato con prodotti chimici insetticida e fungicida, sia nel campo che successivamente allo stoccaggio. Questi prodotti si distinguono in oleo solubili e idrosolubili e si trovano facilmente in commercio.

Per l'immunizzazione, invece, esistono differenti metodi tra cui: lo sfruttamento della traspirazione delle foglie, per immersione, il metodo Boucherie semplice o il metodo Boucherie modificato.

Il primo metodo, di traspirazione delle foglie, viene effettuato solo quando si utilizza il primo metodo di cura del paragrafo precedente, cioè la cura direttamente nel guaduale. Dunque, una volta terminato si colloca il fusto in posizione verticale e si scambia l'appoggio utilizzato con un recipiente che contenga un trattamento (5% di DDT e talco), il quale viene assorbito dalla pianta fino alla parte alta tramite traspirazione delle foglie. Il trattamento si mantiene durante tutto il tempo della cura.

Nel metodo per immersione i fusti tagliati vengono immersi per più di 12 ore in un serbatoio con all'interno una soluzione che contenga il prodotto chimico del trattamento. Affinché la guadua rimanga totalmente coperta dal trattamento è necessario immergere totalmente i fusti, appoggiando sugli estremi di essi delle pietre abbastanza grandi.

Il metodo Boucherie semplice, o anche detto "per gravità", consiste nel riempire l'internodo superiore con il trattamento, lasciando il fusto in posizione verticale fino a che il prodotto chimico non scenda lungo le pareti, in quanto per gravità spinge e sposta la linfa occupando il suo posto.

E' un metodo che può durare più giorni a seconda dalla dimensione del fusto. E' poco usato in ambito commerciale.

Il metodo Boucherie modificato, o anche "per pressione", è simile al precedente con la differenza che il serbatoio lavora a pressione. Questo metodo è molto più veloce (richiede solo poche ore) ed è molto efficace, in quanto c'è una migliore penetrazione e un migliore assorbimento del trattamento. Inoltre si possono trattare più culmi contemporaneamente.

L'uso del trattamento e dei prodotti chimici applicati sopra la superficie della guada non è molto raccomandabile, dato che non esiste un'adeguata penetrazione verso l'interno del fusto, ed inoltre può essere facilmente rimosso dalla pioggia se la guada è esposta alle intemperie.

3 CARATTERIZZAZIONE DEL MATERIALE

Le proprietà sia fisiche che meccaniche della guadua dipendono da innumerevoli fattori: le caratteristiche ambientali della regione dove viene raccolto, l'età, il contenuto di umidità e lo stato fisico della stessa. A ciò si aggiunge il fatto che i precedenti studi e le prove di laboratorio effettuate nelle diverse investigazioni scientifiche presentano risultati molto eterogenei.

Si è ritenuto opportuno, quindi, caratterizzare e conoscere le proprietà fisico-meccaniche della specifica guadua utilizzata, prima di analizzare il comportamento dei telai oggetti di studio.

Il materiale è lo stesso utilizzato per la costruzione dei telai, ossia la guadua "Angustifolia Kunth", di circa 3-4 anni, estratta da un guaduale ubicato nel settore rurale della città di Armenia del Dipartimento del Quindío (*Armenia è la capitale del Departamento del Quindío, e si trova a 1.483 m sopra il livello del mare, la sua temperatura oscilla tra i 18 e i 29 gradi centigradi ed è conosciuta come una delle più grandi regioni dedicata alla coltivazione della guadua all'interno della zona dell'Eje Cafetero*).

Le prove da effettuare non richiedevano alcun trattamento estetico o di immunizzazione, e si è utilizzata quindi una guadua non sottoposta ad alcun trattamento. I diametri utilizzati oscillano tra gli 8 e i 13 cm.

3.1 METODOLOGIA

Per determinare le proprietà meccaniche dei provini sono state eseguite delle prove a compressione, a taglio, e prove specifiche per il calcolo del Modulo elastico. Si è poi individuata la percentuale di umidità in alcuni dei provini testati.

Per le procedure dei test e per la lettura dei risultati si è seguita la Normativa Tecnica Colombiana NTC5525 e la Normativa ISO/DIS 22157-1. La NTC5525 fu ratificata dal Consiglio Direttivo il 26 settembre del 2007 ed è diretta espressamente alla Guadua angustifolia Kunth coltivata in Colombia. La Normativa ISO/DIS 22157-1 invece è una normativa sul bambù redatta in accordo tra la commissione tecnica ISO/TC 165 (Timber structures) e INBAR (International Network of Bamboo and Rattan), in cui vengono indicate le procedure standardizzate per la determinazione delle caratteristiche fisico-meccaniche del bambù utilizzato a fini strutturali e/o commerciali in Europa.

I provini utilizzati sono stati tagliati e preparati conformemente alle prescrizioni della Norma Tecnica Colombiana NTC5525. (16)

Si sono selezionati provini privi di difetti e che non comprendessero nodi. La quantità dei provini per ogni prova di carico è stata, come imposto da normativa, pari a 12, e l'altezza dei provini non inferiore a 100 mm. La superficie degli estremi ortogonale all'asse del provino aveva deviazione massima di 0,2 mm.



Figura 12: Preparazione delle provette

Come ci si aspetta normalmente da ogni materiale naturale, ogni provino presentava delle irregolarità. Come suggerito da normativa si è approssimata la forma irregolare ad un cilindro cavo regolare caratterizzato dalle dimensioni medie di diametro, altezza e spessore misurate come descritto nel seguito:

- 1 Il diametro esterno medio è la media aritmetica di nove misurazioni differenti: tre misurazioni per la parte superiore della provetta, tre per la parte media e tre per quella inferiore.
- 2 L'altezza media dei provini è la media aritmetica di 3 misurazioni in punti diversi che distano tra loro 120°.
- 3 Lo spessore medio dei provini è la media aritmetica di 3 misurazioni dello spessore della parte superiore del provino, distanti tra loro 120°.

Per le misurazioni si è adoperato un calibro meccanico digitale con precisione di 0,01mm, che ha garantito precisione e velocità di misurazione.



Figura 13: Calibro meccanico digitale

3.2 RESISTENZA A COMPRESSIONE PARALLELA ALLE FIBRE

3.2.1 Descrizione della prova

La prova a compressione parallela alle fibre aveva due obiettivi:

1. l'individuazione delle tensioni normali massime di compressione in direzione parallela alle fibre dei provini di *Guadua Angustifolia*;
2. l'individuazione del modulo di elasticità parallelo alla fibra.

Le prove relative al primo punto sono state eseguite con una Macchina Universale marca DIRIMPEX modello CT-1500 caratterizzata da 1500 KN di capacità, con cilindro idraulico inferiore e due piatte di carico di 183 mm di diametro. In conformità con la normativa (16) è stato inserito uno snodo per ottenere una distribuzione uniforme del carico sugli estremi del provino, come rappresentato in *Figura 14*.

Tra le due piastre di acciaio e i due estremi della provetta va collocato uno strato intermedio per ridurre al minimo l'attrito.

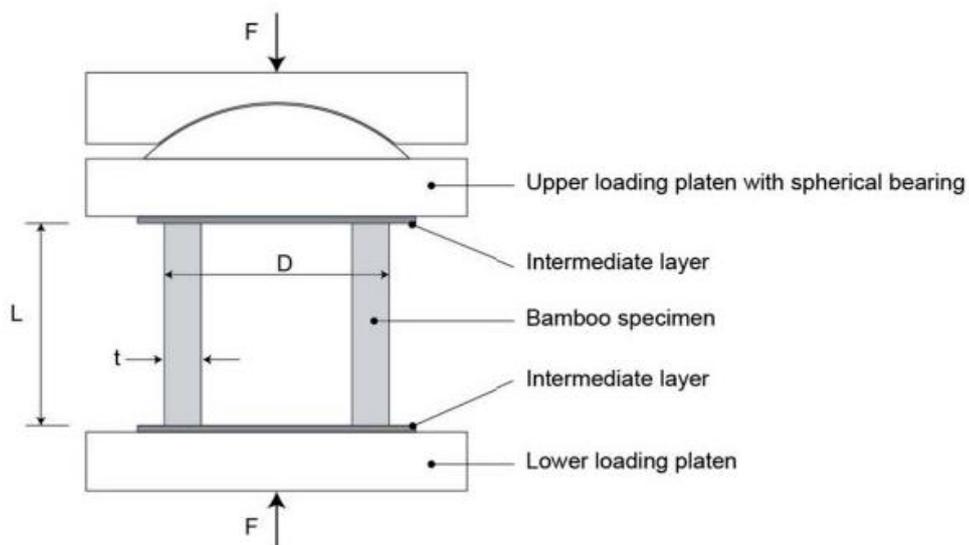


Figura 14: Prova a compressione in direzione parallela alla fibra, schema della macchina dalla Normativa (17)



Figura 15: Foto macchina a compressione DIIMPEX modello CT-1500

Le prove relative al punto 2 sono state eseguite utilizzando una Macchina Universale marca SCHIMADZU Autograf DCS-25T (rappresentata in *Figura 16*) con una capacità massima di 25 tonnellate, il controllo del circuito elettronico e uno spazio in larghezza di 600mm. Le prove sono state condotte in controllo di spostamento in regime quasi statico con una velocità imposta di 1mm/min.

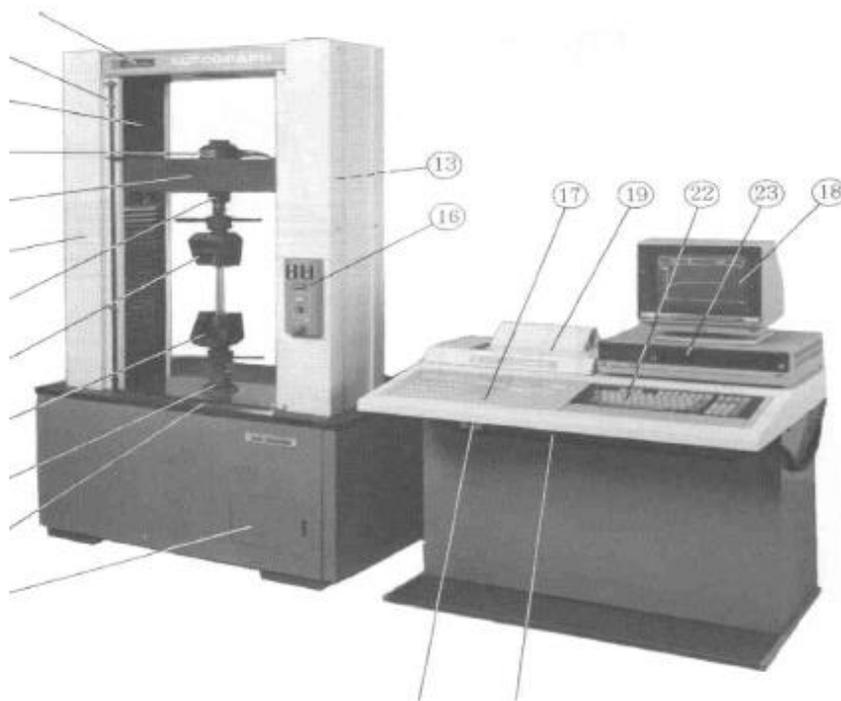


Figura 16: Macchina Universale SCHIMADZU Autograf-25T

3.2.2 Calcolo ed espressione dei risultati

Sono state effettuate 12 prove su provini con le dimensioni riportate in *Tabella 1*.

	Diametro esterno superiore (mm)			Diametro esterno medio (mm)			Diametro esterno inferiore (mm)		
C1	88,6	88,55	87,71	90,02	87,61	86,68	87,29	90,29	87,21
C2	87,4	87,69	88,39	87,79	88,16	88,9	87,97	87,83	89,21
C3	87,39	89,46	87,24	87,15	87,57	87,21	88,63	87,5	87,41
C4	88,52	89,19	86,21	87,63	88,62	87,37	89,64	89,68	89,67
C5	92,56	92,81	94,02	92,07	92,56	93,15	92,59	92,35	92,14
C6	86,89	86,19	87,17	87,31	86,59	87,82	87,04	87,39	86,93
C7	89,96	90,2	89,78	88,07	89,72	88,04	89,44	87,08	89,39
C8	111,33	114,54	110,38	110,64	115,2	111,6	114,61	110,98	115,3
C9	118,67	118,53	119,23	119,33	119,69	119,16	120,39	120,22	120,68
C10	113,9	114	114,45	114,58	113,77	114	112,45	113,84	112,38
C11	11,78	115,91	110,41	110,82	115,35	113,15	110,15	111,52	115,25
C12	115,43	113,91	114,69	114,27	113,82	115,62	112,13	115	111,49

	Altezza (mm)			Spessore (mm)			Diametro media(mm)	Altezza media (mm)	Spessore media(mm)
C1	10,33	10,2	10,18	8,47	10,41	8,38	88,217	10,236	9,086
C2	10,43	10,32	10,18	8,76	8,65	8,42	88,148	10,31	8,61
C3	10,44	10,44	10,33	8,84	9,31	9,57	87,728	10,403	9,24
C4	10,09	10,11	10,09	9,06	10,88	8,69	88,503	10,096	9,543
C5	10,36	10,34	10,33	9,07	10,08	9,11	92,694	10,343	9,42
C6	9,96	9,97	10,02	8,42	8,51	7,67	87,036	9,9833	8,2
C7	10,28	10,29	10,35	9,28	8,21	8,93	89,075	10,306	8,806
C8	10,27	10,31	10,46	20,36	19,34	16,94	112,73	10,346	18,88
C9	10,15	10,12	10,16	13,53	12,76	11,58	119,54	10,143	12,62
C10	9,86	9,82	9,78	17,73	16,09	15,34	113,70	9,82	16,38
C11	10,08	10,15	10,22	17,69	17,16	17,61	101,59	10,15	17,48
C12	10,47	10,46	10,42	14,61	16,39	17,25	114,04	10,45	16,08

Tabella 1: Prova di compressione parallela alle fibre, dati iniziali

Il valore di resistenza a compressione è calcolato come indicato in normativa (16)

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

Dove

$f_{c,0}$ è lo sforzo ultimo di compressione parallela alle fibre, espresso in MPa (o N / mm²).

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

A è l'area della sezione trasversale, sottoposta a compressione, in millimetri quadri (mm²).

Per calcolare l'area della sezione trasversale si utilizza la seguente formula:

$$A = \frac{\pi}{4} [d_e^2 - (d_e - 2e)^2]$$

Dove

A è l'area della sezione trasversale (in mm²)

d_e è il diametro medio esterno

e è lo spessore medio

Si riportano in *Grafico 1* l'andamento qualitativo di forza spostamento ottenuti, e in *Tabella 2* i valori della forza ultima e tensione ultima.

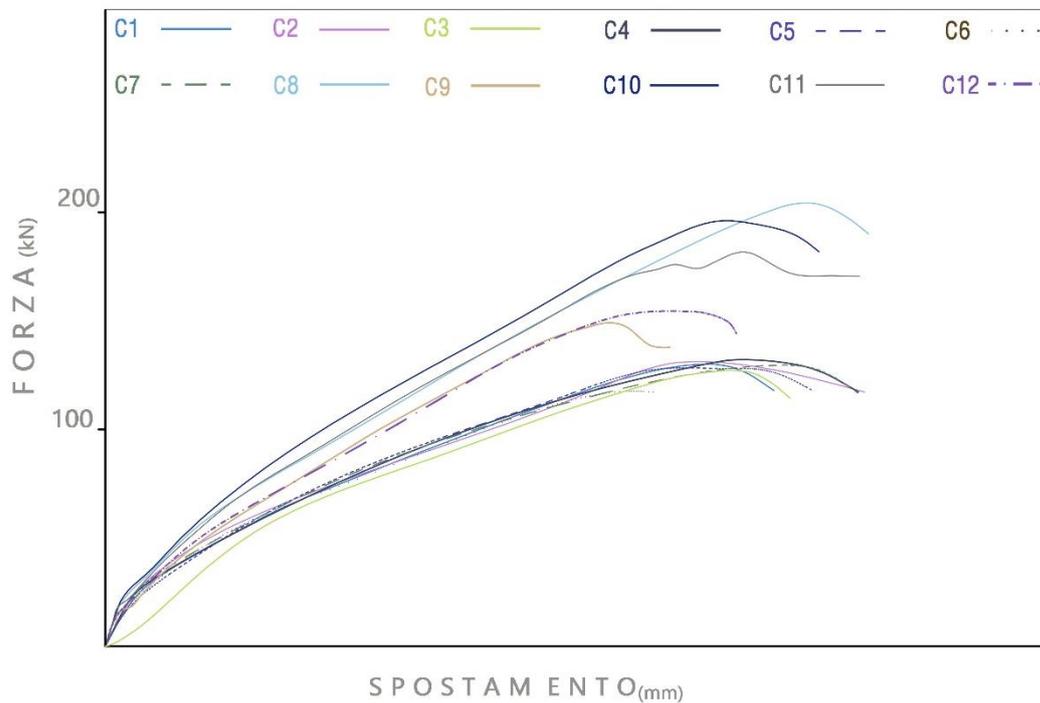


Grafico 1: Prova a compressione parallela alle fibre: Grafico Forza-Spostamento (qualitativo)

	Area (mm ²)	Fult (N)	σ_{ult} (MPa)
C1	2257,78	130.200	57,67
C2	2150,36	131.350	61,08
C3	2277,24	131.410	57,7
C4	2366,12	132.210	55,88
C5	2463,16	128.460	52,15
C6	2029,89	117.770	58,02
C7	2219,67	129.490	58,34
C8	5563,79	206.570	37,13
C9	4238,06	183.100	43,21
C10	5007,57	191.710	38,29
C11	4618,4	186.150	40,31
C12	4946,97	197.130	39,85

Tabella 2: Prova a compressione parallela alle fibre, risultati.

Il valore medio di resistenza ultima a compressione è di 49,69 MPa, con una deviazione standard di 9,341 MPa, come visibile nella *Figura 17* e nel *Grafico 2*.

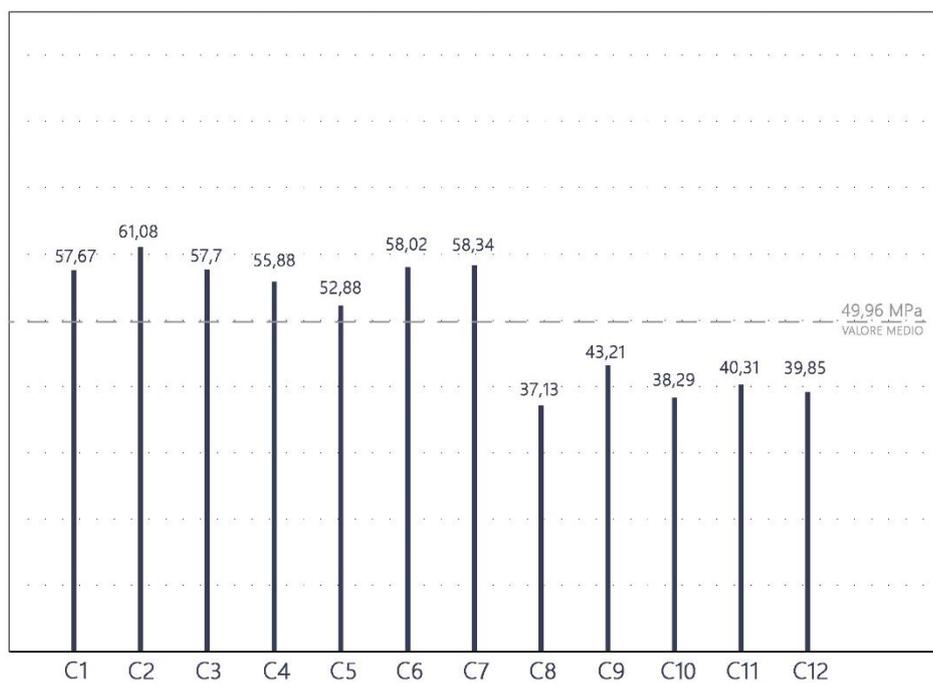


Figura 17: Prova a compressione parallela alle fibre, risultati

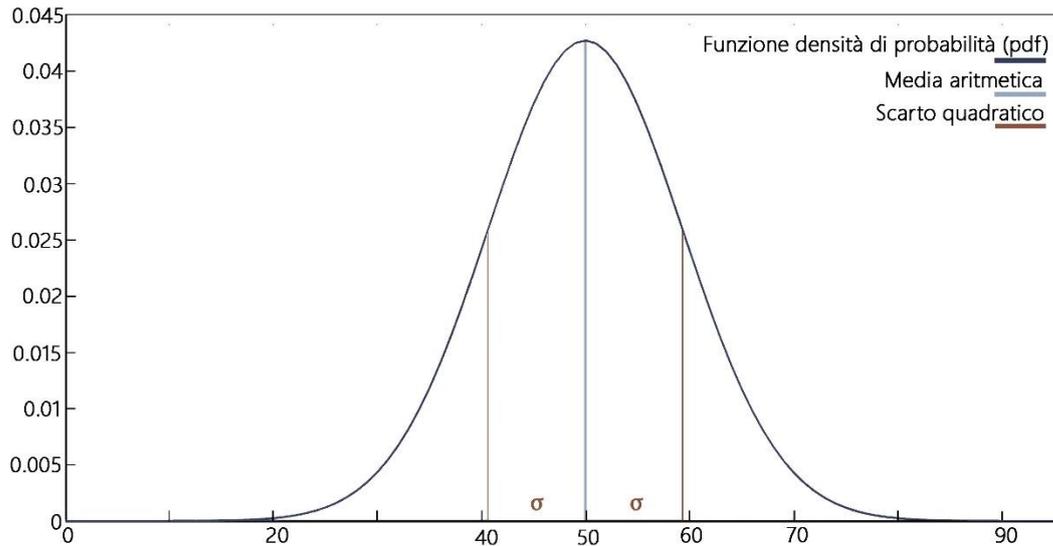


Grafico 2: Prova a compressione parallela alle fibre.

Funzione di densità di probabilità (pdf), ottenuta con il software Matlab.

Analizzando il grafico Forza-Spostamento di ogni provino (*Grafico 1*) si nota, dopo una prima fase di assestamento dei provini, un tratto pressoché elastico lineare, per poi passare in una fase dove il comportamento è non lineare fino ad arrivare al carico massimo, in cui il provino arriva a rottura.

Guardando i provini deformati si osserva in quasi tutti un corrugamento della superficie interna accompagnato da segni di schiacciamento della superficie trasversale (*Figura 18*).

Si considerano inoltre alcuni comportamenti particolari:

- a. In alcuni casi, come i provini C9, C10, C11, oltre allo schiacciamento, si vede il formarsi di una fessura o più fessure in direzione longitudinale, sulla superficie interna al provino nella direzione del carico. In questo caso la prova viene interrotta ma non si ha il collasso del provino (*Figura 20 Figura 21*).
- b. Nei provini C5 e C13 le fessure passanti provocano la rottura dei provini (*Figura 24 e Figura 25*).



Figura 18: lesione caratteristica provino C3, schiacciamento



Figura 20 - Sinistra. Lesione caratteristica provino C9, schiacciamento e lesioni longitudinali esterne

Figura 21: Destra. Lesione caratteristica provino C11, schiacciamento e lesioni longitudinali esterne



Figura 24: Sinistra. Lesione casatteristica provino C13, rottura per lesione longitudinale passante

Figura 25: Destra. Lesione caratteristica provino C5, rottura per lesione longitudinale passante

Non è stato possibile effettuare il calcolo del modulo elastico di queste 12 provette appena analizzate, in quanto la Macchina Universale utilizzata (marca DIRIMPEX modello CT-1500) non registrava lo spostamento associato al carico impresso al provino. E' stato necessario quindi utilizzare altri 6 provini, appartenenti ad altri culmi utilizzati nel progetto, i quali sono stati tagliati di una dimensione leggermente differente per essere idonei alla prova di carico con la Macchina Universale SCHIMADZU Autograf DCS-25T.

Nella seguente tabella sono riportate le misurazioni dei provini utilizzati per il calcolo del modulo elastico, e le relative medie aritmetiche.

	Diametro esterno superiore (mm)			Diametro esterno medio (mm)			Diametro esterno inferiore (mm)		
ME1	92,92	90,73	93,02	90,83	91,54	91,9	91,64	90,19	92,39
ME2	108,46	108,43	108,12	107,43	100,64	106,67	107,61	110,83	107,85
ME3	74,94	70,92	74,56	72,94	71,8	74,38	73,28	72,4	72,67
ME4	104,43	107,9	106,65	107,7	106,62	106,57	109,4	109,83	109,67
ME5	110,66	110,04	111	112,19	108,49	112,24	113,51	111,33	113,28
ME6	83,18	85,54	83,38	84,11	84,13	84,44	83,91	82,93	84,33

	Altezza (mm)			Spessore (mm)			Diametro media (mm)	Altezza media (mm)	Spessore media (mm)
ME1	199,22	199,84	200,03	10,72	10,38	11,44	91,684	199,696	10,846
ME2	198,98	198	198,27	9,42	10,07	11,3	107,42	198,416	10,263
ME3	148,56	148,55	147,23	7,75	7,12	7,36	73,098	148,113	7,41
ME4	196,98	197,69	197,15	11,95	11,78	10,01	107,64	197,273	11,246
ME5	196,2	197,99	195,97	12,72	11,77	10,03	111,41	196,72	11,506
ME6	149,64	148,55	148,26	7,95	9,42	8,56	83,994	148,816	8,6433

Tabella 3: Prova per il Modulo Elastico, dati iniziali

In accordo con la Normativa (17) il modulo di elasticità a compressione parallela alle fibre, è definito come la tangente tra la tensione e la deformazione al valore tra il valori di 20% e 60% del carico massimo F_{ult} ,

ossia:

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

dove:

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

A = area della sezione media espressa in millimetri al quadrato (mm^2)

ε_{60} , ε_{20} = valori della deformazione misurata al 60% ed al 20% di F_{ult} .

Si riportano, in *Tabella 4*, i risultati del calcolo del Modulo Elastico:

	F_{20} (N)	F_{60} (N)	A (mm ²)	ϵ_{20}	ϵ_{60}	$E_{c,0}$ (MPa)
ME1	20728,336	62185,007	2753,2	0,0021	0,0047	5791,397
ME2	29375,977	88127,931	3131,1	0,0037	0,0071	5518,823
ME3	12776,145	38328,434	1528,4	0,0030	0,0071	4077,641
ME4	13496,741	40490,224	3404,1	0,0043	0,0077	2332,264
ME5	30626,913	91880,740	3609,8	0,0045	0,0101	3030,136
ME6	16846,067	50538,202	2045,03	0,0033	0,0064	5314,558

Tabella 4: Prova per il Modulo Elastico, risultati

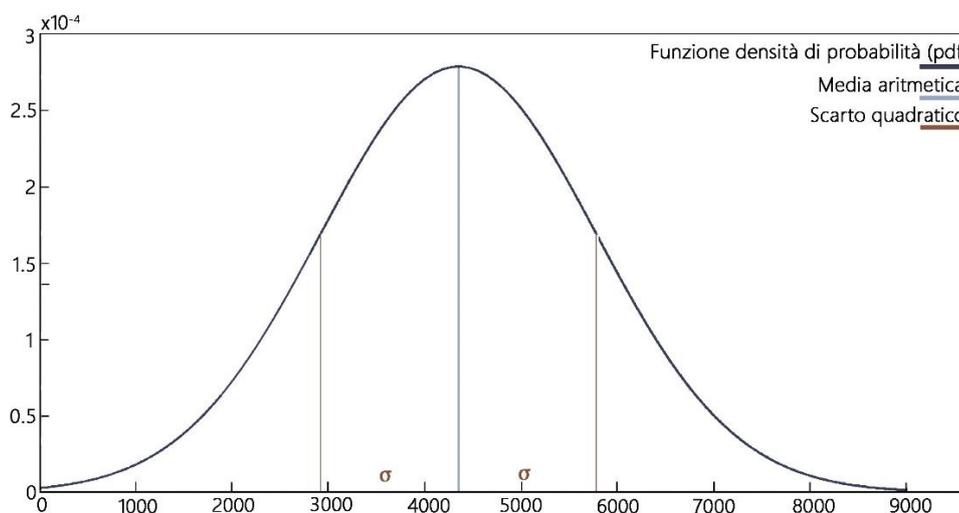


Grafico 3: Prova per il Modulo Elastico. Funzione densità di probabilità (pdf)

Prendendo in considerazione la totalità dei provini analizzati, il valore medio del modulo di elasticità in relazione alla deformazione in direzione dell'applicazione del carico è pari a 4344,10 MPa, con una deviazione standard di 1432,6 MPa, come evidenziato nel *Grafico 3*.

In questo caso, però, il valore di scarto quadratico medio è decisamente significativo, ciò mette in luce il grande margine di variabilità che c'è tra i vari provini analizzati.

Per questo motivo si è ritenuto opportuno escludere dalla valutazione del valore medio i provini ME3, ME4, ME5, in quanto presentano dei valori troppo bassi, che si discostano dal resto dei provini.

Alla luce di queste considerazioni, il valore medio del modulo di elasticità è di 5541,59 MPa con una deviazione standard di 239,234 MPa.

In appendice A si riportano i grafici relativi ad ogni provino e una foto dello stato deformativo dello stesso alla fine della prova.

Osservando le curve tensione-deformazione (in APPENDICE A) ottenute dalle prove realizzate si osservano tre zone:

1. Nella prima zona, si osserva un comportamento non lineare, nel quale si presentano grandi deformazioni su piccoli aumenti di carico; questo comportamento non è dovuto alla

deformazione della guadua bensì all'assestamento dei dispositivi di carico e degli appoggi con il provino;

2. Nella seconda zona si presenta un comportamento tendenzialmente elastico lineare; in questa fase le deformazioni sono reversibili e una volta tolto il carico sul provino il materiale torna nella sua situazione originale;
3. Nella terza zona, che va dal limite della parte lineare fino al momento di rottura del materiale, si arriva in zona plastica: in questa fase man mano che il carico aumenta si iniziano a formare lesioni e deformazioni permanenti; nella maggior parte dei casi la prova si interrompe senza che il provino collassi.

L'analisi delle curve tensione-deformazione, è molto importante per studiare il comportamento di un materiale, in quanto è caratteristica dello stesso e permette di stabilire i parametri per un progetto.

3.3 RESISTENZA A TAGLIO

3.3.1 Descrizione della prova

Ci si propone di determinare la resistenza ultima a sforzo di taglio, parallelo alle fibre, in provette di culmi di *Guadua angustifolia* Kunth.

La prova si è realizzata con la stessa macchina usata per la prova di compressione, ossia la Macchina Universale marca DIIMPEX modello CT-1500, con cilindro idraulico inferiore e due piatti di carico di 183 mm di diametro. In questo caso il provino è stato collocato in un dispositivo metallico, che ha nella parte inferiore due quarte parti di una superficie, e sulla parte superiore le due quarte parti complementari (Figura 26 e Figura 27), atto a indurre tensione tangenziale su quattro aree parallele alla fibra.

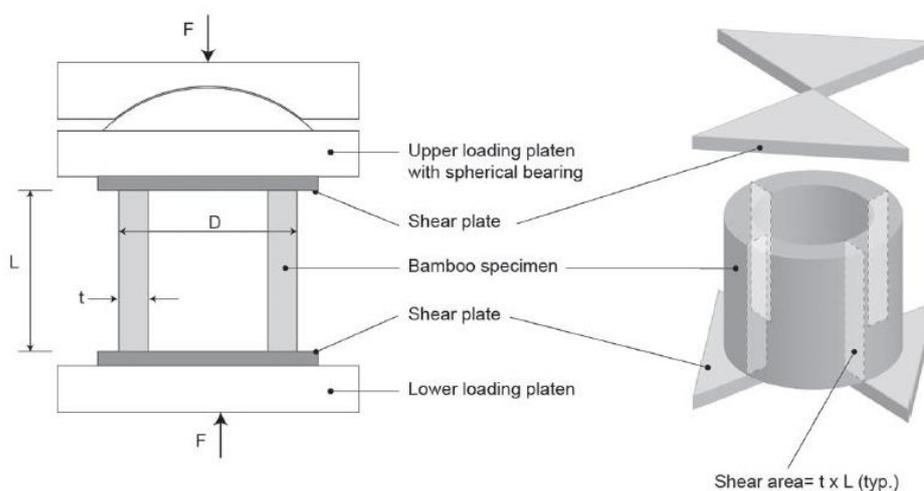


Figura 26: Set up della prova a taglio, macchina. Fonte: (15)



Figura 27: Foto dispositivo metallico per la prova di carico a taglio parallelo alle fibre.

Il test viene eseguito su 12 provini senza nodo estratti in maniera casuale tra i culmi utilizzati per il progetto. In *Tabella 5* sono riportati i dati geometrici dei provini.

Oltre alle raccomandazioni precedentemente elencate per i provini, è necessario avere le misure dello spessore della parete, chiamato t , e dell'altezza del provino, chiamata L , nelle quattro aree del taglio.

Inoltre è importante che le superfici degli estremi del provino abbiano angolo retto con la superficie longitudinale della stessa e che le superfici a contatto con la macchina siano piane.

	Diametro esterno superiore (mm)			Diametro esterno medio (mm)			Diametro esterno inferiore (mm)		
T1	89,89	88,18	89,91	89,87	89,06	89,91	89,53	89,7	89,4
T2	86,35	86,54	86,37	85,92	88,79	87,01	88,92	86,01	89,23
T3	85,48	87,78	85,89	85,02	87,9	86,38	86,75	85,45	87,59
T4	86,75	88,04	86,72	87,2	88,83	89,51	87,4	88,45	89,19
T5	91,07	90,19	91,24	88,44	89,25	89	89	88,28	88,77
T6	88,14	87,38	88	87,35	89,05	88,35	88,41	89,36	87,77
T7	110,6	111,22	109,15	111,75	112,19	113,11	112,77	112,78	113,08
T8	123,88	121,37	123,25	123,28	121,53	121,02	121,18	121,1	122,7
T9	124,25	124,08	126,25	122,68	123,05	121,94	121,76	122,02	122,89
T10	118,13	117,96	118,25	118,09	118,05	118,25	118,01	118,23	118,53
T11	114,6	112,59	100,6	100,89	114,87	113,89	112,56	109,9	115,4
T12	117,99	118,11	118,23	119,04	118,02	118,61	118,86	117,38	118,56
T13	113,89	108,36	112,07	112,95	113,86	111,16	109,1	113,19	112,12

	Altezza (L) (mm)				Spessore (t) (mm)			
	A1	B1	A2	B2	A1	B1	A2	B2
T1	103,43	104,33	102,75	103,67	8,47	9,46	8,29	8,72
T2	103,28	103,25	102,02	102,26	9,08	8,6	10,64	8,21
T3	102,72	100,93	102,65	101,03	8,74	10,43	9,65	9,63
T4	103,37	103,49	102,61	101,96	8,94	8,92	10,16	8,33
T5	101,39	101,56	103,2	103,35	10,22	10,69	10,86	9,45
T6	101,77	101,95	100,84	101,17	8,51	7,7	7,81	7,99
T7	99,74	99,82	100,11	100,6	10,25	9,43	9,78	8,89
T8	100,7	100,73	98,67	99,08	17,96	18,35	20,59	21,1
T9	98,25	98,9	101,01	102,2	26,75	22,82	25,16	22,39
T10	101,5	101,76	101,03	101,01	10,66	12,27	12,49	13,24
T11	99,74	99,15	99,28	98,94	18,57	19,26	15,52	16,28
T12	96,82	100,03	94,59	97,24	12,48	13,11	11,58	12,87
T13	100,1	101,35	100,35	101,8	20,82	17,32	19,52	16,45

Tabella 5: Prova a taglio, dati iniziali

La prova di carico consiste nell'applicare carico verticale, fino a rottura a taglio, tramite il dispositivo della *Figura 27*.

Il provino si colloca in modo tale che il centro dei due quarti si trovi verticalmente sopra il centro della sezione trasversale del provino e centrata in relazione ai quarti del supporto e del carico. Inizialmente si applica un carico piccolo, non superiore a 1 kN, per far assestare il provino, e si continua in controllo di spostamento la prova con una velocità di 0,01 mm/s

Si registra la lettura finale del carico massimo al quale si ha la rottura del provino.



Figura 29: Provino T3, prima della prova a taglio

3.3.2 Calcolo ed espressioni dei risultati

La resistenza a taglio in direzione parallela alle fibre viene calcolata con:

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

dove

τ_{ult} è la resistenza ultima a taglio, in MPa con approssimazione per eccesso o difetto a una cifra decimale.

F_{ult} è il valore massimo del carico applicato al quale si rompe la provetta, espressa in N.

$\Sigma(t \times L)$ è la somma dei prodotti dello spessore s della provetta e dell'altezza L , espresso in mm^2 .

Si riportano in *Tabella 6* i risultati dei test:

	Altezza (L) medio(mm)	Spessore (s) medio(mm)	Diametro medio(mm)	Fult (N)	t x L (mm^2)	T _{ult} (MPa)
T1	103,545	8,735	89,494	23.110	904,46	6,387
T2	102,702	9,132	87,237	47.510	937,930	12,66
T3	101,832	9,612	86,471	29.260	978,84	7,473
T4	102,857	9,087	88,01	36.080	934,649	9,65
T5	102,375	10,30	89,471	27.980	1054,97	6,63
T6	101,432	8,002	88,201	29.810	811,693	9,18
T7	100,067	9,587	111,85	43.750	959,397	11,4
T8	99,795	19,5	122,14	56.360	1911,07	7,37
T9	100,09	24,28	123,21	62.830	2430,18	6,46
T10	101,325	12,165	118,16	41.190	1232,61	8,354
T11	99,2775	17,407	110,58	61.820	1727,42	8,946
T12	97,17	12,51	118,31	29.620	1215,59	6,066
T13	100,9	18,527	87,318	70.960	1869,42	9,489

Tabella 6: Prova a taglio, risultati

Il valore medio di resistenza a taglio per i provini in questione è di 8,4668 MPa, con una deviazione standard di 2,0226, come appare dalla *Figura 30* e dal *Grafico 4*.



Figura 30: Prova a taglio, risultati

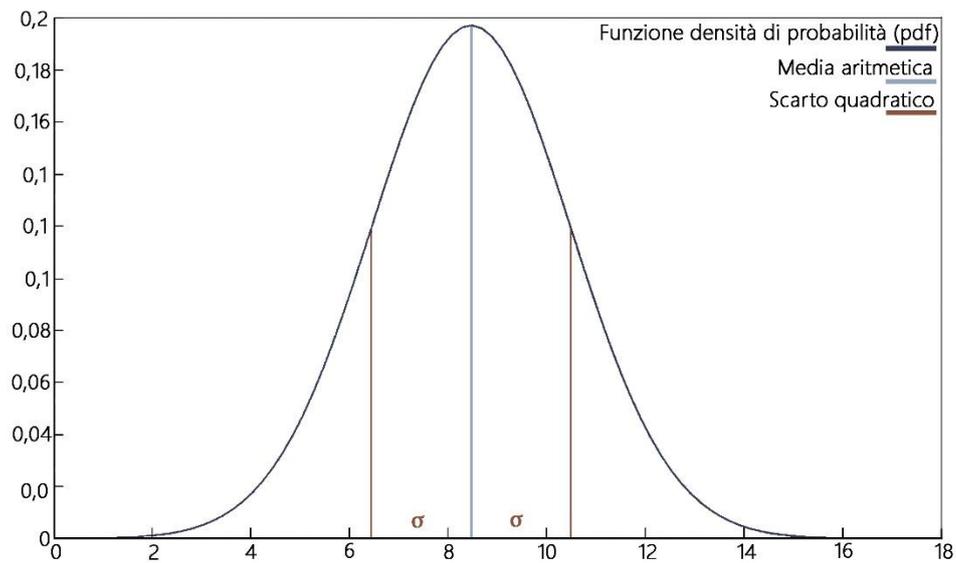


Grafico 4: Prova a taglio, funzione di densità di probabilità (pdf)

Al raggiungimento del valore di carico massimo i provini si rompono senza preavviso. La maggior parte dei provini presenta una fessura in direzione del carico, che nel caso sia passante, può portare alla rottura del provino in corrispondenza del piano indotto alla sollecitazione per taglio (vedi *Figura 31*, *Figura 32* e *Figura 33*).

In alcuni provini come T4, T9, T13 non è stata riscontrata la lesione prevista, ma una lesione fuori dal piano di sollecitazione (vedi *Figura 34*).



Figura 31: Provino T6, dopo la prova a taglio



Figura 32: Provino T7, dopo la prova di carico



Figura 33: Provino T9, dopo la prova a taglio



Figura 34: Provino T13, dopo la prova a taglio

3.4 CONTENUTO DI UMIDITA'

3.4.1 Descrizione della prova

Il calcolo del contenuto dell'umidità è stato effettuato per i 13 provini della prova a taglio parallela alle fibre. I dati sono significativi anche per i provini degli altri test dato che tutti i culmi sono stati tenuti nelle medesime condizioni ambientali.

Le prove di umidità sono state condotte al termine della prova a taglio, sulla parte del provino che prima si era staccata nella prova a taglio, circa pari ad un quarto di provino. La prova è condotta misurando il peso con pesate successive fino a quando non si raggiunge un valore costante. In questo modo si è in grado di quantificare la perdita di massa del provino che corrisponde alla quantità di acqua presente nel provino stesso. Si calcola, infine, la massa di acqua in percentuale rispetto al peso del provino secco.

In particolare, i provini vengono pesati e successivamente posti nel forno elettrico a temperatura $103\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, mostrato in *Figura 35*.

Dopo 24h, si registra la massa a intervalli regolari non inferiori a 2h, stando attenti a non cambiare il contenuto di umidità dei provini nell'intervallo di tempo durante la pesatura dei provini. La seccatura si considera terminata quando la differenza tra la determinazione successiva della massa non eccede di 0,01g.



Figura 35: Prova per il calcolo del contenuto di umidità.

3.4.2 Calcolo ed espressione dei risultati

Il contenuto di umidità di ogni provetta si deve calcolare come la perdita di massa, espressa come percentuale della massa secca della provetta, usando la seguente formula. (16)

$$w = \frac{m_i - m_0}{m_0} \times 100$$

dove

W è la quantità di umidità in percentuale,

m_i è la massa de la provetta prima di seccarla.

m_0 è la massa de la provetta dopo averla seccata. Ognuna con un esattezza di 0,01 g.

Per trovare il valore medio del contenuto di umidità dei provini si opera con la media aritmetica dei risultati ottenuti dai provini individuali.

Si riportano in *Tabella 7* i risultati del calcolo dell'umidità per ogni provino, e il grafico tensione-umidità (*Grafico 5*) per analizzare la correlazione tra i due fattori.

	m_i (g)	m_0 dopo 24h (g)	m_0 dopo 26h (g)	W umidità %	Fult (N)	T_{ult} (MPa)
T1	43,4	38,2	38,2	13,61	23.110	6,387
T2	45,2	39,8	39,8	13,56	47.510	12,66
T3	45,2	39,4	39,4	14,72	29.260	7,473
T4	40,1	35,1	35,1	14,24	36.080	9,65
T5	46	40,3	40,3	14,14	27.980	6,63
T6	40,3	35,4	35,4	13,84	29.810	9,18
T7	64,3	56,2	56,2	14,41	43.750	11,4
T8	106,6	84,3	84,3	26,45	56.360	7,37
T9	106,2	74,5	74,5	43,08	62.830	6,46
T10	50	41	41	21,95	41.190	8,354
T11	68,4	52,6	52,6	30,03	61.820	8,946
T12	46,5	38,5	38,5	20,77	29.620	6,066
T13	49,9	38,2	38,2	30,62	70.960	9,489

Tabella 7: Calcolo del contenuto di umidità, risultati

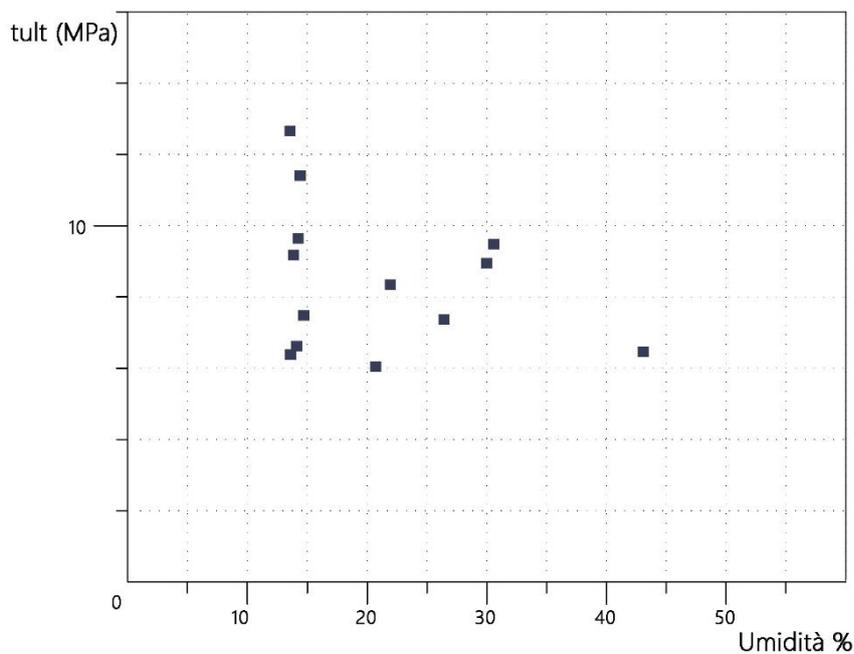


Grafico 5: Grafico tensione-umidità

Purtroppo, l'esigua quantità di provini analizzati non permette di cogliere dati significativi riguardo alla relazione tra l'umidità e la tensione a taglio. Tuttavia, in precedenti ricerche scientifiche è emerso che il contenuto di umidità nei culmi di *Guadua angustifolia* Kunth, come anche nelle travi in legno, condiziona notevolmente le prestazioni fisiche e meccaniche del materiale.

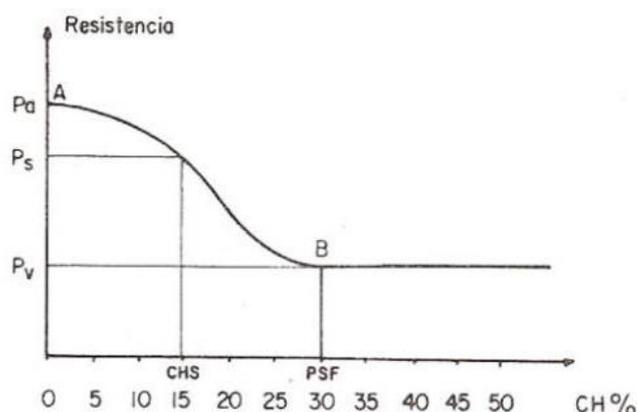


Figura 36: Influenza del contenuto dell'umidità nella resistenza del legno. (Junta del Acuerdo di Cartagena, Colombia)

(18)

Ad esempio nella tesi (18) "Factor de corrección por contenido de humedad para la resistencia a tensión paralela a la fibra de la guadua *Angustifolia* Kunth" di Mateo Gutiérrez González (2011), si evince che la resistenza a tensione parallela alla fibra presenta una variazione importante quando il contenuto di umidità si trova al di sotto del 10%, o al di sopra del 21%, ma non presenta una variazione consistente tra i valori di umidità intermedi.

In particolare la resistenza a tensione parallela della *Guadua Angustifolia* Kunth, può diminuire fino al 27% per un contenuto di umidità al di sotto del 10%, mentre la resistenza può diminuire fino al 41% per un contenuto di umidità al di sopra del 30%.

Al contrario, per un contenuto di umidità tra l'11% e il 21%, intervallo in cui il materiale lavora normalmente come elemento strutturale, si presenta una diminuzione della resistenza che non supera il 4%. In altre parole, si può dire che in questo intervallo di umidità, la resistenza a tensione parallela alla fibra è indifferente al cambio del contenuto di umidità.

3.5 CONFRONTO DEI RISULTATI CON TESI PRECEDENTI

Nella *Tabella 8* che segue, sono riportati i valori di f_{ult} , T_{ult} , e di $E_{c,0}$ ricavati in altre tesi di ricerca sul materiale oggetto di studio, la *Guadua angustifolia* Kunth, ed elaborate da studenti dell'Università Nazionale Colombiana.

Vedi Riferimenti:

Herrera: (19) Malaver: (20) Rivera: (21) Castillo: (5)

	f_{ult} medio MPa	$E_{c,0}$ medio MPa	τ_{ult} medio Mpa
Herrera	60,4	19.118	7,50
Malaver	49,4	----	6,99
Rivera	57,6	16.109	8,50
Castillo	37,13	14.823	----
Denittis	49,97	5.542	8,46

Tabella 8: confronto dei risultati con i valori di altre tesi di ricerca

Per quanto riguarda la tensione ultima a compressione e a taglio parallela alla fibra, i valori di questa tesi sono in linea con i lavori di ricerca degli anni precedenti. Al contrario, i valori del Modulo elastico ottenuti in questa ricerca sono particolarmente bassi rispetto ai valori delle altre tesi. Questo potrebbe essere dovuto ad errori metodologici nella procedura durante la prova di carico.

4 IL PROGETTO

Questa tesi si inserisce in una ricerca più ampia sul Bambù che l'Ingegnere Takeuchi Tam Caori Patricia sta intraprendendo fin dal 2000 con il contributo degli studenti del Dipartimento di Ingegneria Civile e Agricola, dell'Università Nazionale della Colombia, a Bogotà.

Essa si presenta come ulteriore sviluppo delle ricerche effettuate nel 2017 con la Professoressa Takeuchi e in particolare della tesi di Castillo (2017) (5) nella quale si studia un Telaio in Guadua Angustifolia Kunth costituito anche esso da pannelli prefabbricabili. La mia ricerca di tesi si propone quindi di ottimizzare questo sistema costruttivo rispetto alla configurazione geometrica e alla connessione tra i culmi, con l'obiettivo dell'industrializzazione del processo costruttivo.

4.1 DESCRIZIONE DEL SISTEMA COSTRUTTIVO

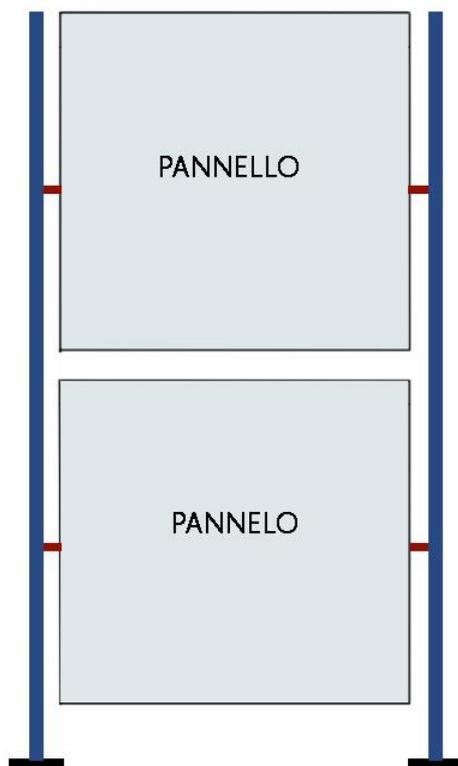


Figura 37: Schema Telaio con pannelli

diversa soluzione in tema di connessione tra i culmi.

Il sistema strutturale oggetto di studio nasce con il proposito di raggiungere l'obiettivo dell'industrializzazione del processo costruttivo delle abitazioni in Guadua angustifolia Kunth, e si sviluppa concependo degli elementi strutturali modulari capaci di essere assemblati in maniera semplice e rapida direttamente in situ.

La struttura modulare è su due piani, costituita da due colonne portanti a doppia altezza e da due pannelli prefabbricabili. Questi elementi arrivano in cantiere già pronti per essere assemblati: le due colonne portanti vengono ancorate al terreno e rese solidali alle fondazioni, mentre i pannelli si agganciano alle colonne portanti.

Questo sistema costruttivo era stato già utilizzato nella tesi di Camilo Andrés Castillo Cardona (2017) (5); La mia tesi lo riprende, con l'obiettivo di un approfondimento della configurazione geometrica e la proposta di una

4.1.1 Connessione tra i culmi

La differenza sostanziale del sistema costruttivo della mia tesi rispetto alla tesi di Castillo (2017) (5) è rispetto al tipo di connessione utilizzato.

Esistono diversi tipi di connessioni tra i culmi di guadua. I più utilizzati sono quelli a "taglio retto", a taglio "bocca di pesce" e a taglio "becco di flauto". Le tipologie di taglio sono mostrate in *Figura 38*, mentre i tipi di connessione sono mostrati in *Figura 40*.

Il taglio a bocca di pesce e a becco di flauto (variazione del taglio a bocca di pesce con angolo di inclinazione differente da 0° a 90°) permettono di unire gli elementi nello stesso piano, ottenendo delle connessioni complanari e ottimizzando lo spazio della parte strutturale. Questo non accade con le connessioni a taglio retto dove gli elementi devono unirsi tramite perni trasversali e i culmi si trovano in piani distinti. (5)

I tipi di connessioni a bocca di pesce e a bocca di flauto, sebbene siano quelli maggiormente utilizzati nelle costruzioni fino ad ora, presentano un inconveniente: richiedono una mano d'opera qualificata per la loro costruzione; inoltre ogni connessione deve essere realizzata su misura in base all'elemento di guadua cui andrà a connettersi. Questo porta ad avere dei tempi di costruzione inevitabilmente molto lenti. Le connessioni a taglio retto, invece, non presentano questo inconveniente, in quanto i pezzi possono essere tagliati in officina con una sega circolare elettrica, in maniera semplice e rapida, e arrivare in cantiere pronti per essere assemblati, accorciando e semplificando il processo costruttivo.



Figura 38: Tipologie di tagli della guadua. Taglio Retto; Bocca di pesce; Bocca di Flauto. Fonte: NSR-10 Cap. G (4)

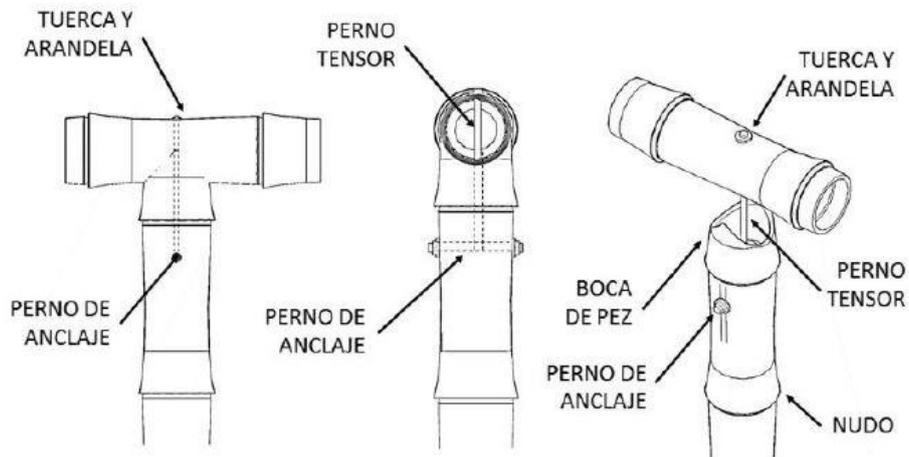


Figura 39: Connessione tipo "Bocca di pesce" Fonte: NEC (22)

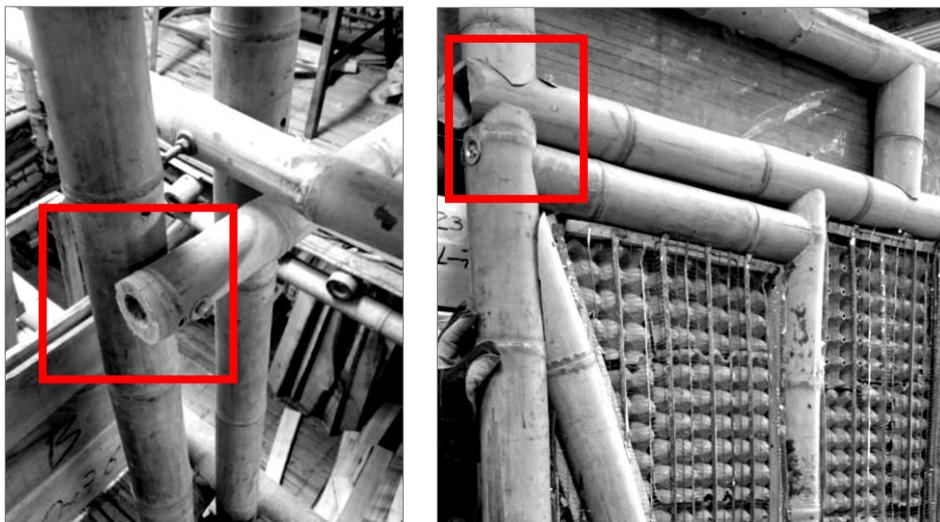


Figura 40: Tipologie di connessioni: a Taglio retto (sinistra), a bocca di pesce e becco di flauto (destra). Fonte: Arme Ideas en Guadua Ltda

In una delle ultime ricerche effettuata dall'Ingenere Takeuchi, con Ayala e Castillo nel 2017 (23), si è constatato che le connessioni a bocca di pesce presentano lo svantaggio di ridurre del 40% la resistenza a compressione parallela alla fibra del culmo.

In particolare, in (23) si è analizzato numericamente e sperimentalmente il comportamento a compressione parallelo alle fibre con provini a taglio retto e con altri a bocca di pesce (*Figura 41*).

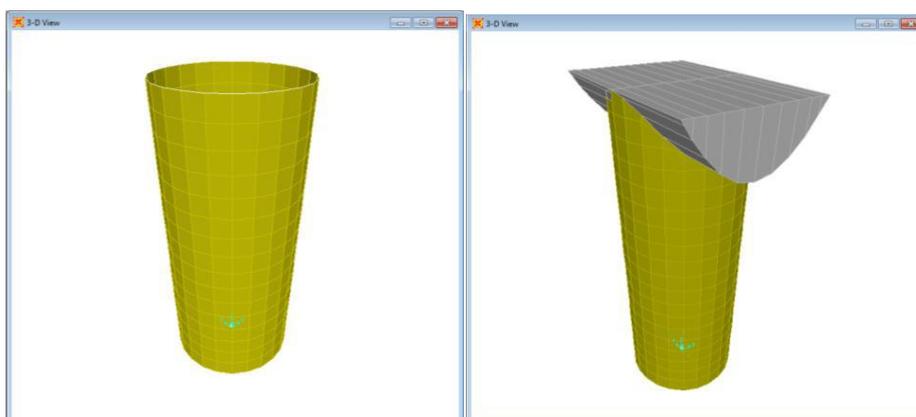


Figura 41: Modello a taglio retto (sinistra), Modello a taglio bocca di pesce (destra).

È stata condotta una analisi ad elementi finiti con il programma strutturale SAP2000 V14.00

Dalle simulazioni numeriche e dalle prove di carico realizzate si osserva che per il modello a taglio retto si ha una distribuzione di sforzi assiali uniforme in tutto il provino (*Figura 42*).

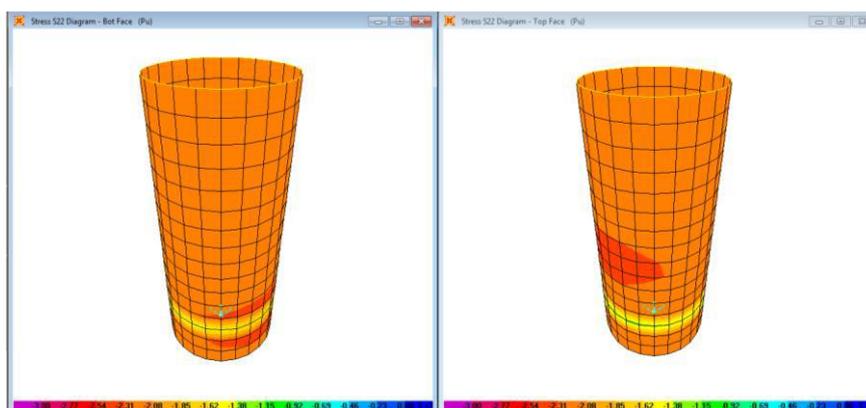


Figura 42: Modello provino taglio retto: Sforzo longitudinale faccia esterna (sinistra), faccia interna (destra).

Al contrario, per i provini a bocca di pesce si generano sforzi tangenziali di tensione nella parte superiore del taglio creando una fessura nella direzione del carico e uno sforzo ultimo minore rispetto a quella a taglio retto (*Figura 43*). In *Figura 44* si osserva la distribuzione degli sforzi nel modello a bocca di pesce: si nota come vi sia una concentrazione di sforzi nella zona inferiore centrale della bocca, raggiungendo un valore massimo a compressione di entità doppia rispetto al caso a taglio retto.

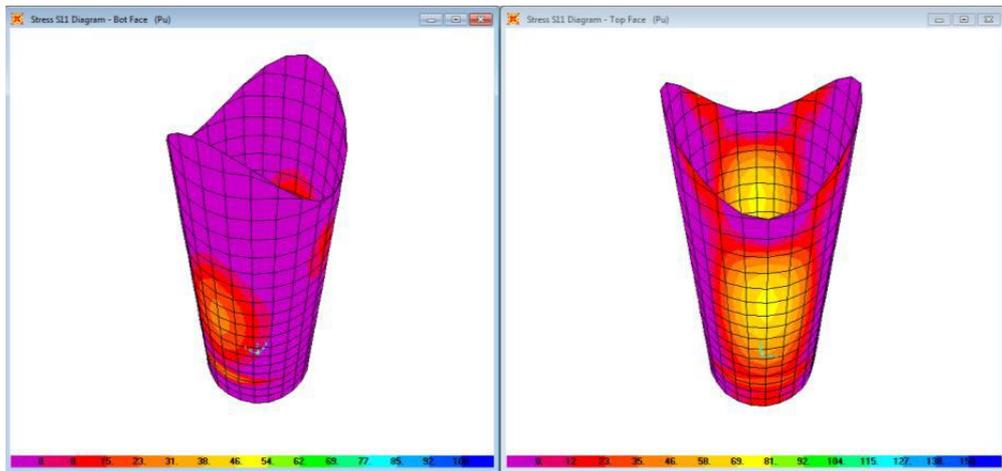


Figura 43: Distribuzione dello sforzo tangenziale di tensione nel provino con taglio "bocca di pesce". Faccia esterna (sinistra), faccia interna (destra). (23)

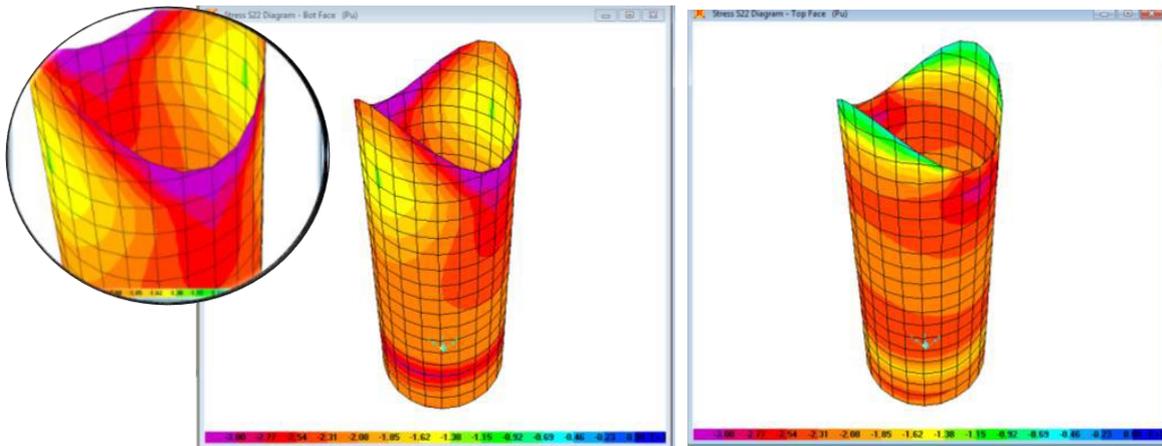


Figura 44: Analisi numerica in Sap2000 del modello con taglio a bocca di pesce: Sforzi longitudinali faccia esterna (sinistra), faccia interna (destra). Fonte: (23)

Dal grafico delle tensioni emerge come l'inizio della fessura coincida proprio con il punto di concentrazione delle tensioni (*Figura 45*).



Figura 45: Lesione tipica a compressione per un provino a taglio bocca di pesce sottoposto a compressione parallela alla fibra. Fonte: (23)

Si osserva dunque che per uno stesso carico, il valore di sforzo medio per le due tipologie di taglio è lo stesso. La differenza sta nel fatto che se nel modello a taglio retto la distribuzione è pressoché omogenea, in quella a bocca di pesce si hanno degli sforzi concentrati molto alti, quasi il doppio rispetto alla media.

Alla luce di queste conclusioni, la mia tesi si propone di approfondire le connessioni a "taglio retto" come possibile miglioramento rispetto alla tipologia a bocca di pesce, sia dal punto di vista delle prestazioni meccaniche che come ottimizzazione del processo costruttivo.

In particolare, le connessioni a taglio retto utilizzate in questa tesi impiegano barre filettate di diametro 3/8 pollici, fissate alle estremità con dadi.

Per una maggiore comprensione si rimanda a fine capitolo dove è possibile consultare le illustrazioni di due connessioni tipo. La trattazione prosegue con la descrizione delle configurazioni geometriche dei pannelli utilizzate.

4.1.2 Configurazione geometrica

Castillo (2017) (5), propone diverse configurazioni geometriche di pannelli da utilizzare, prendendo in considerazione diversi aspetti come la flessibilità architettonica, la rigidità strutturale sotto sforzi orizzontali e la facilità e rapidità di costruzione. In *Figura 46* si presenta lo schema di tutte le configurazioni geometriche analizzate.

La numero 1 presenta la configurazione base per tutte le altre configurazioni geometriche, senza controventi. Questa è la tipologia maggiormente utilizzata per i tamponamenti interni degli edifici,

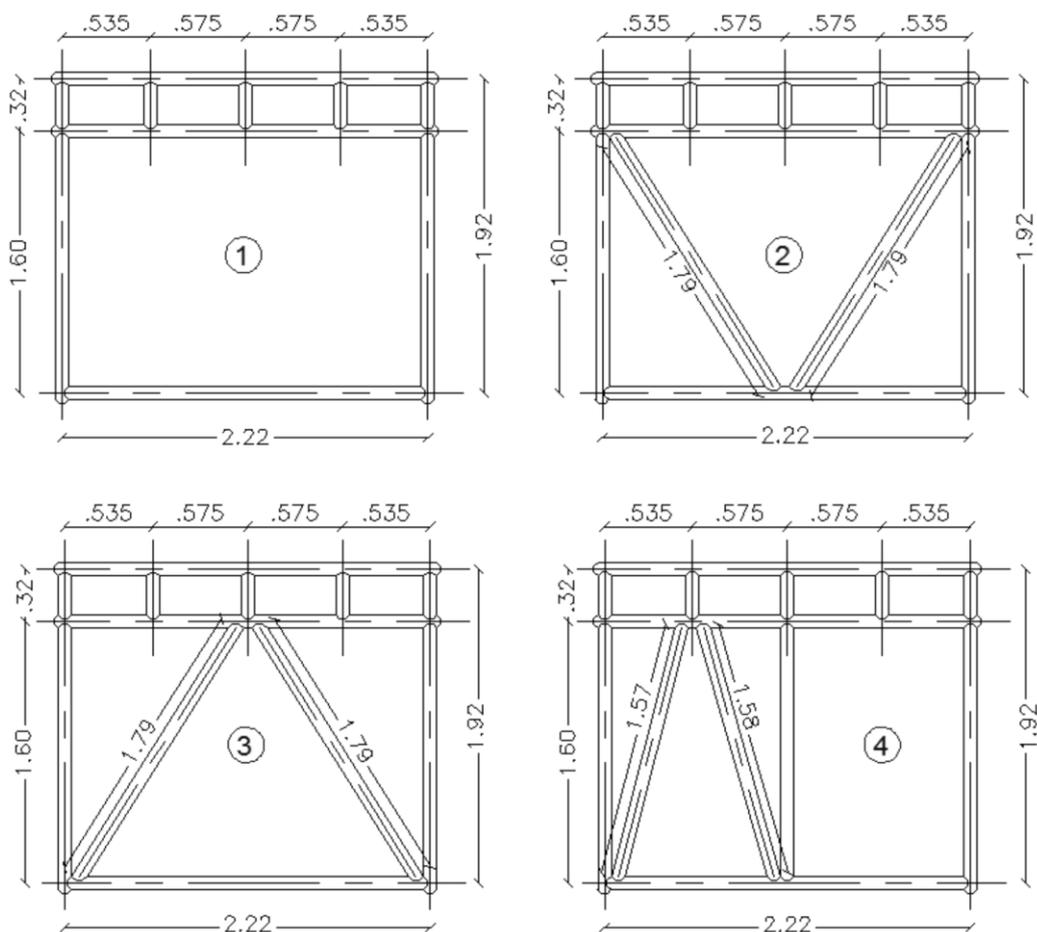
mentre i pannelli dal 2 al 7 (i quali presentano controventi) sono quelli finalizzati per le pareti esterne.

Rispetto alla flessibilità architettonica si considera la possibilità di includere dentro il pannello elementi come porte e finestre: è il caso del tipo 4 e 5 mostrato in *Figura 46*.

Riguardo all'aspetto strutturale, si valuta la rigidezza del pannello allo spostamento orizzontale mediante dei controventi, in questo caso intervengono anche aspetti di tipo economico come il minor numero di metri lineari di guadua utilizzata per irrigidire.

La geometria dei pannelli numero 2 e 3 si analizzano con l'obiettivo di definire l'orientazione di diagonali maggiormente efficiente.

Il pannello numero 7 presenta una certa difficoltà costruttiva specialmente nel punto di intersezione delle due diagonali (dovuto alle connessioni complanari di tutti gli elementi del pannello).



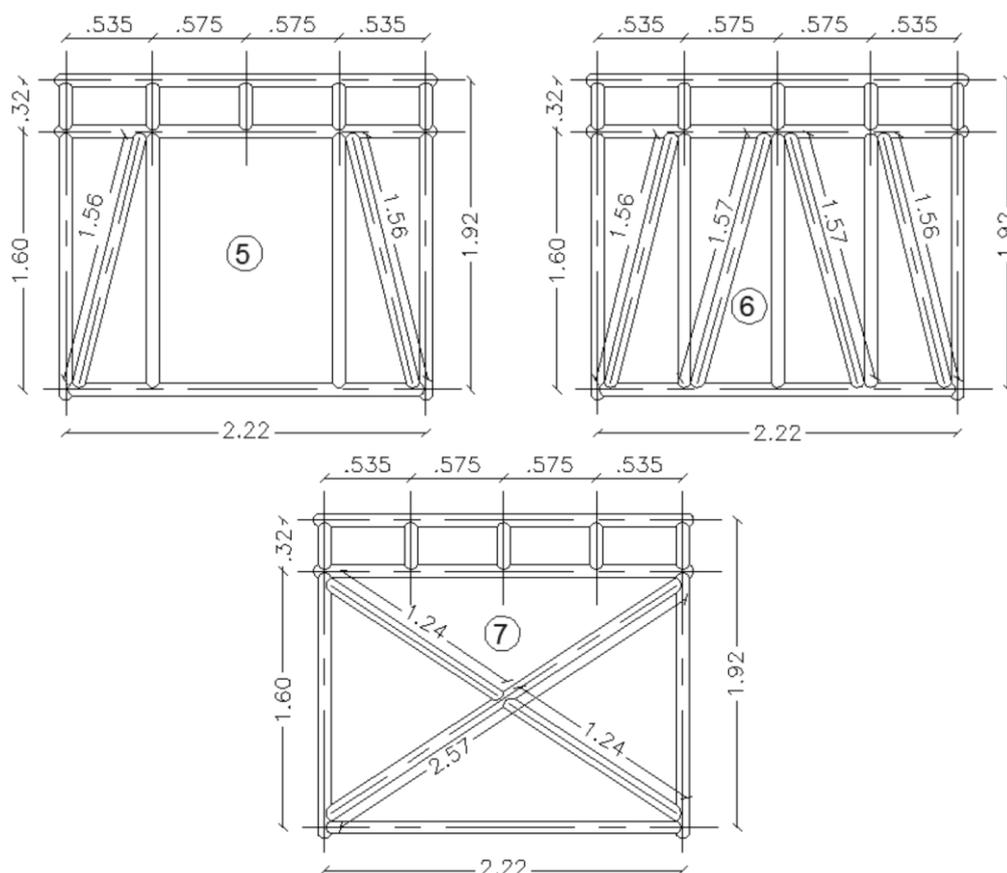


Figura 46: Configurazioni geometriche proposte nella tesi di Camilo Andrés Castillo Cardona. Fonte: (5)

Dopo averle analizzate, Camilo Andrés Castillo Cardona seleziona tre configurazioni geometriche da utilizzare nella sua tesi:

1. il pannello n.1 denominato pannello tipo A senza controventi;
2. il pannello n.3 denominato pannello tipo B con controventi concentrici;
3. il pannello n.5 denominato pannello di tipo C con controventi eccentrici.

Si è selezionato il pannello n.3 in quanto più rigido allo spostamento orizzontale, oltre ad essere anche il più semplice e rapido da costruire. Questa tipologia inoltre ha il minor numero di metri lineari di guadua necessaria per la sua fabbricazione, ulteriore vantaggio dal punto di vista economico.

Inoltre, si è selezionato il n.5, in quanto era il migliore per flessibilità architettonica. Questo pannello infatti permette l'inclusione di porte, finestre o qualsiasi altro elemento architettonico di un progetto di un'abitazione. Questa tipologia riesce inoltre a diminuire adeguatamente gli spostamenti generati dal carico orizzontale grazie alla configurazione eccentrica dei controventi.

Infine, il pannello n.1 è stato scelto per fini comparativi, ossia per valutare di quanto gli altri due pannelli diminuissero lo spostamento orizzontale rispetto ad un pannello senza controventi.

Nella mia tesi di ricerca verranno analizzate due delle tipologie utilizzate nella Tesi di Camilo Andrés Castillo Cardona (5), per fini comparativi; in particolare vengono scelte:

1. la configurazione numero 2, che nel mio caso viene chiamato TELAIO TIPO B, a controventi concentrici.
2. la configurazione numero 5, chiamata TELAIO TIPO C, a controventi eccentrici.

Le dimensioni dei pannelli nella scala reale è di 3,00 m di altezza e la luce di 2,94 m, composti unicamente da culmi in guadua angustifolia Kunth. I diametri sono di 18 cm per gli elementi verticali e i controventi, e di 12 cm per gli elementi-trave orizzontali.

Come vedremo più avanti, al momento della costruzione dei prototipi è stato necessario scalare le dimensioni del pannello al 66%, tenendo in conto lo spazio fisico del laboratorio, e in particolare la parte disponibile per la prova di carico.

Per poter confrontare la differenza di dimensione tra la scala reale e quella utilizzata per la prova sperimentale in laboratorio, si mostra in *Figura 47* la Tipologia Base del Pannello nella dimensione reale e scalata per la costruzione del prototipo che verrà testato orizzontalmente in laboratorio. Sono state scalate anche le dimensioni dei diametri dei culmi: nel modello a dimensioni ridotte abbiamo dei culmi di 12 cm circa per gli elementi verticali, controventi e distanziatori, e dei culmi di 8 cm circa per gli elementi-trave orizzontale.

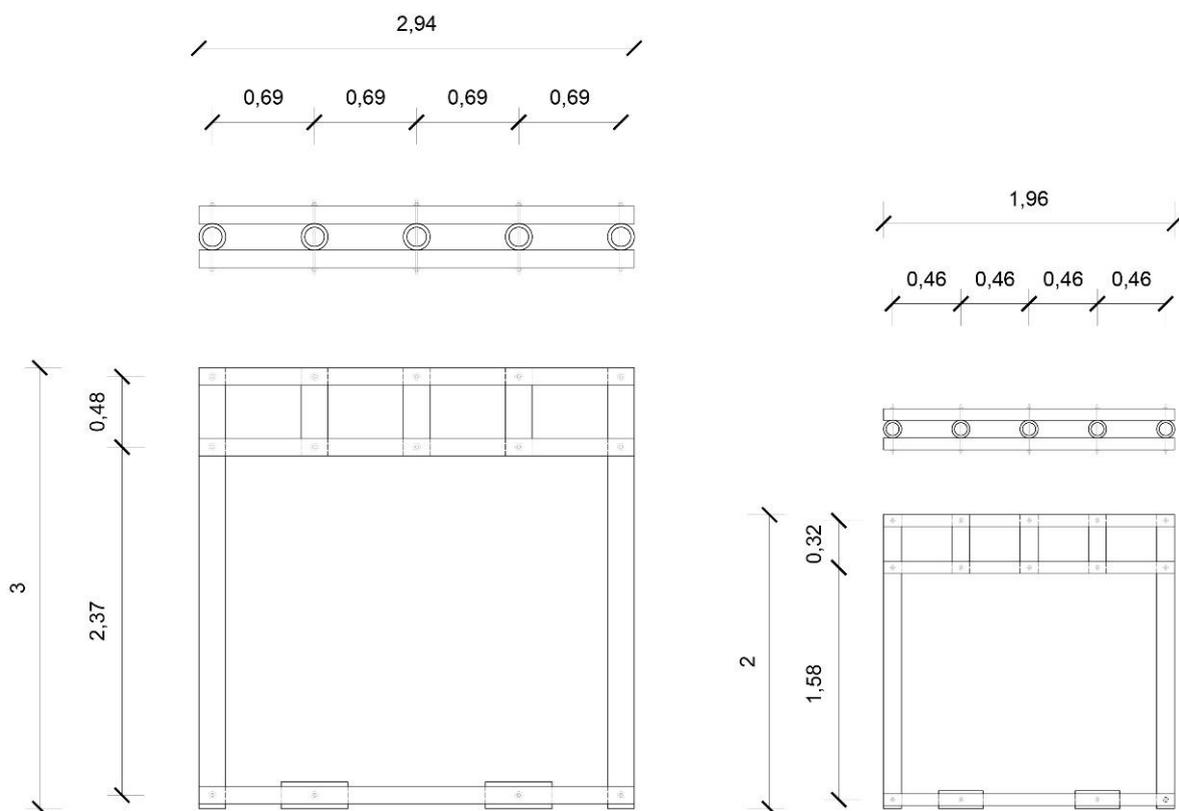


Figura 47: Confronto delle dimensioni del pannello in scala reale (a sinistra) e in scala ridotta (a destra). Disegni quotati in metri.

A seguire si riportano i disegni, quotati in metri, delle due tipologie di configurazione geometrica di pannelli utilizzati nella mia tesi (PANNELLO DI TIPO B, con diagonali concentriche in *Figura 48*, PANNELLO DI TIPO C, con diagonali eccentriche in *Figura 49*) e successivamente i due prototipi completi delle due colonne portanti a doppia altezza e le due tipologie di pannelli (tipo B in *Figura 51* e tipo C in *Figura 52*).

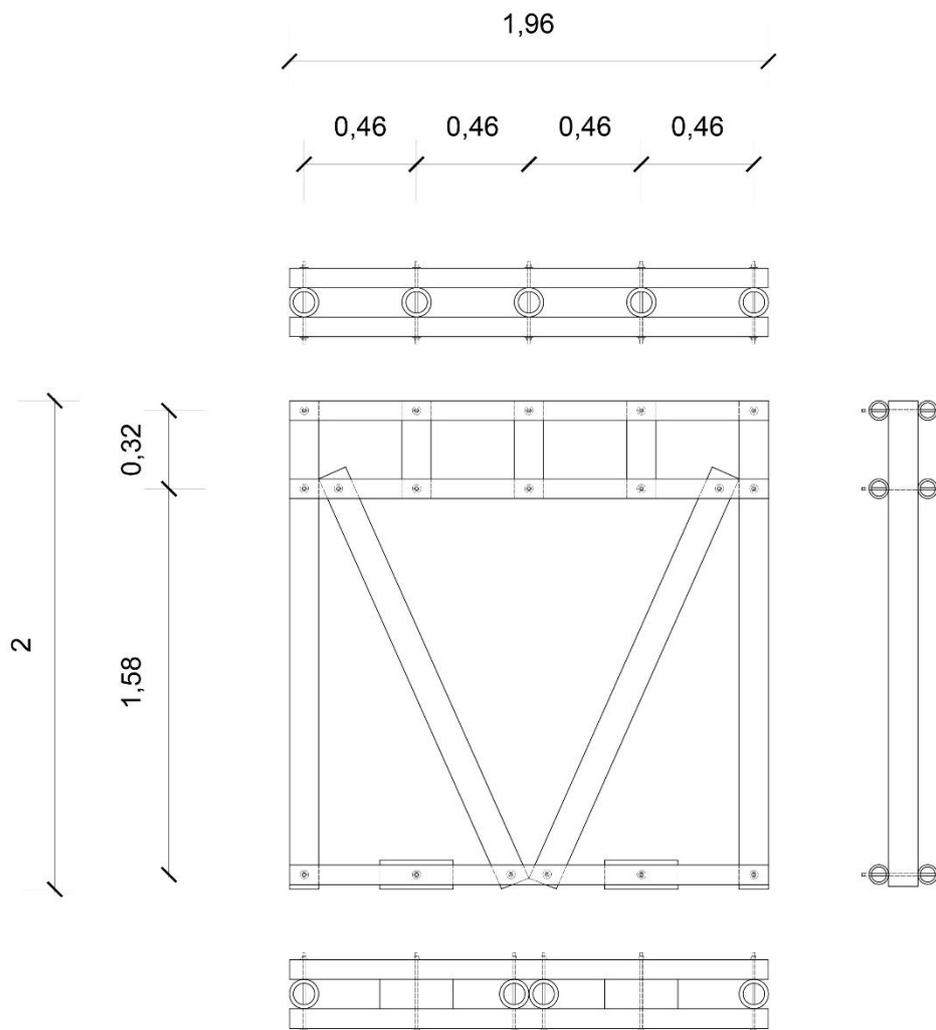


Figura 48: Pannello di tipo B, con controventi concentrici. Quote in metri.

In *Figura 48* è mostrato il pannello di tipo B, con le dimensioni ridotte rispetto a quelle previste dal progetto. Il pannello ha nella parte superiore la trave tipo "Vierendeel", composta da quattro culmi orizzontali, ancorati ai culmi colonna portanti laterali e a 3 distanziatori tramite delle connessioni a "taglio retto". La trave *Vierendeel* ha il compito di sorreggere le travi del solaio, appoggiate in corrispondenza dei due culmi- colonna e dei distanziatori ogni 0,46m. *Figura 50*

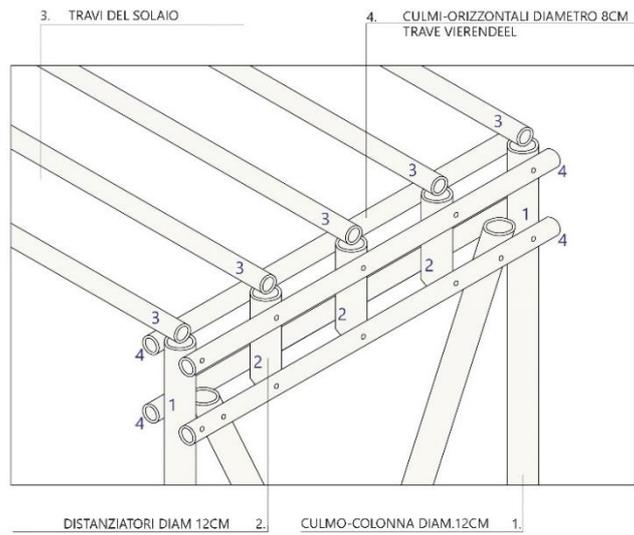


Figura 50: Trave tipo "Vierendeel"

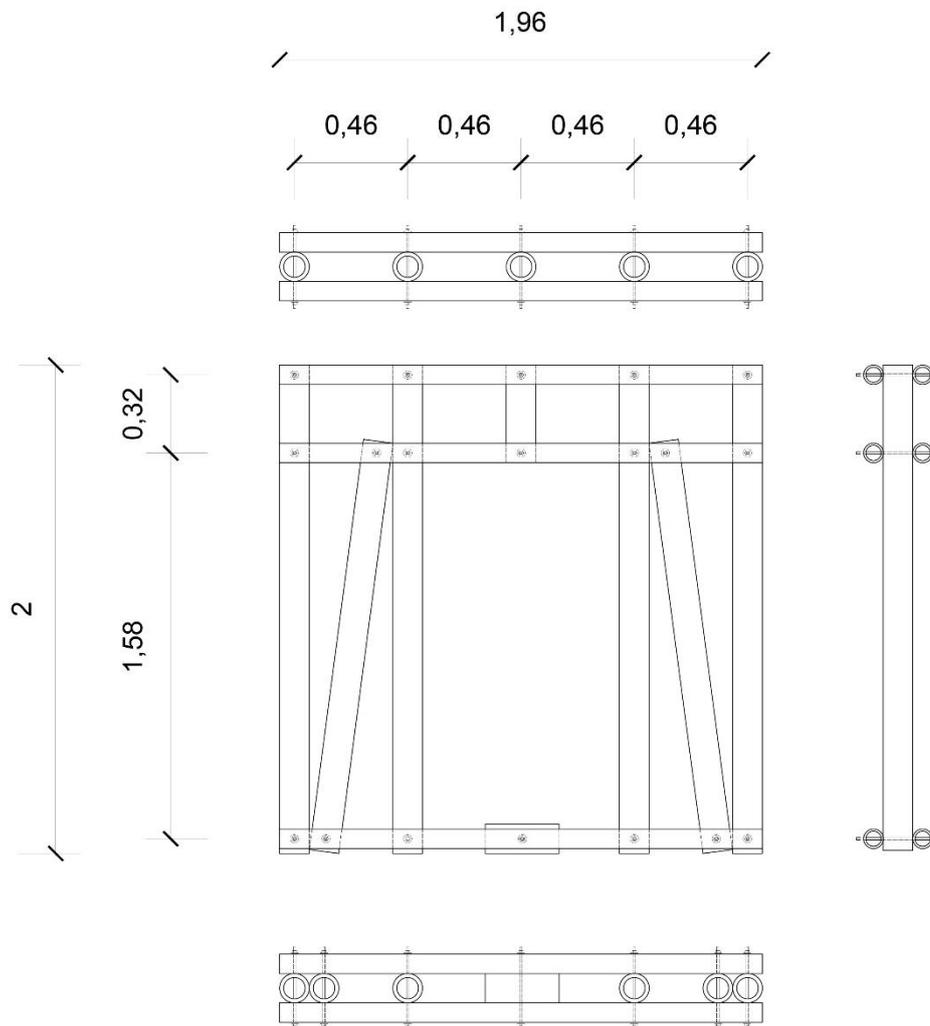


Figura 49: Pannello di tipo C, con controventi eccentrici. Quote in metri.

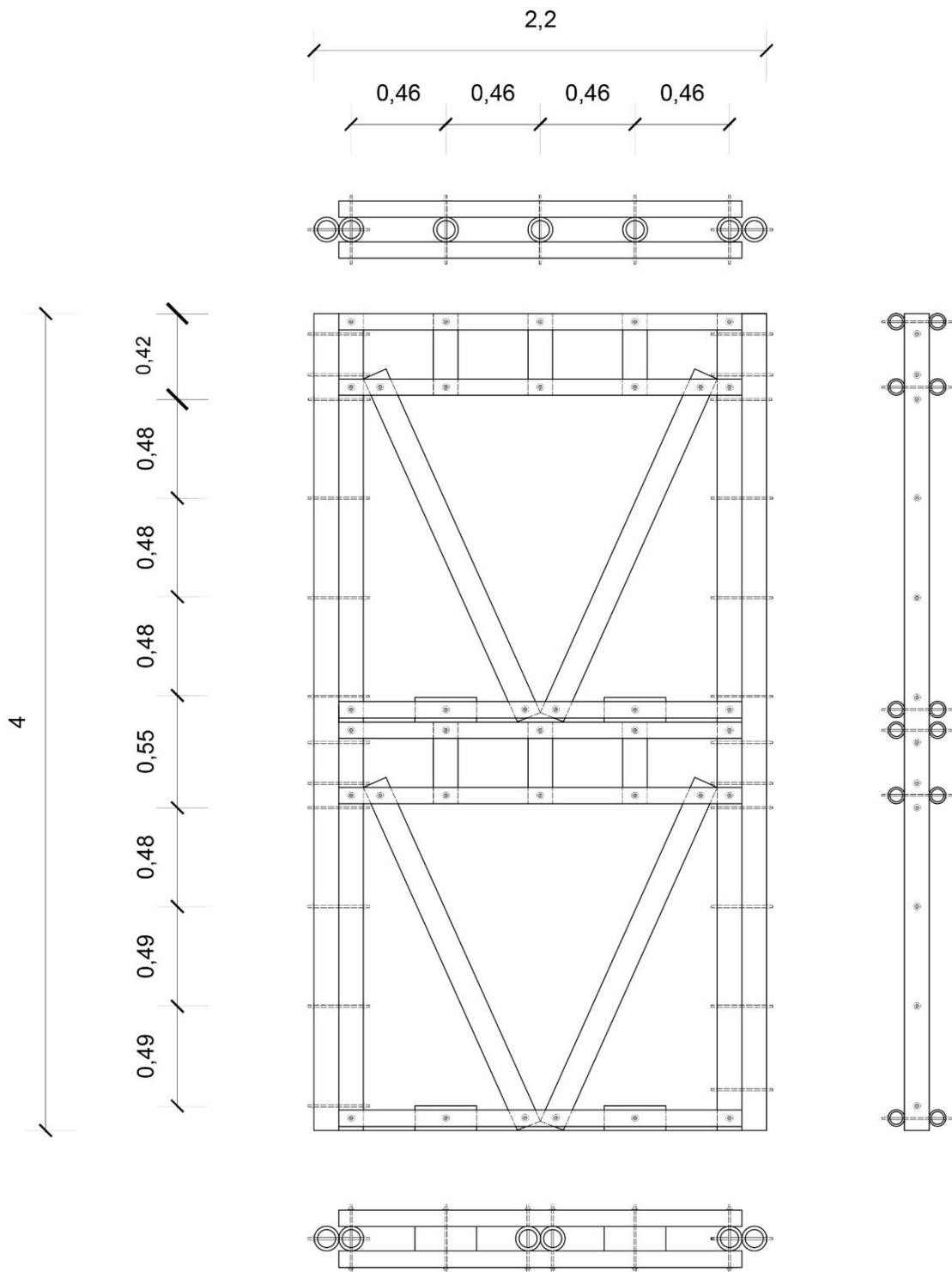


Figura 51: Telaio con pannelli prefabbricati tipo B, con controventi concentrici. Quote in metri.

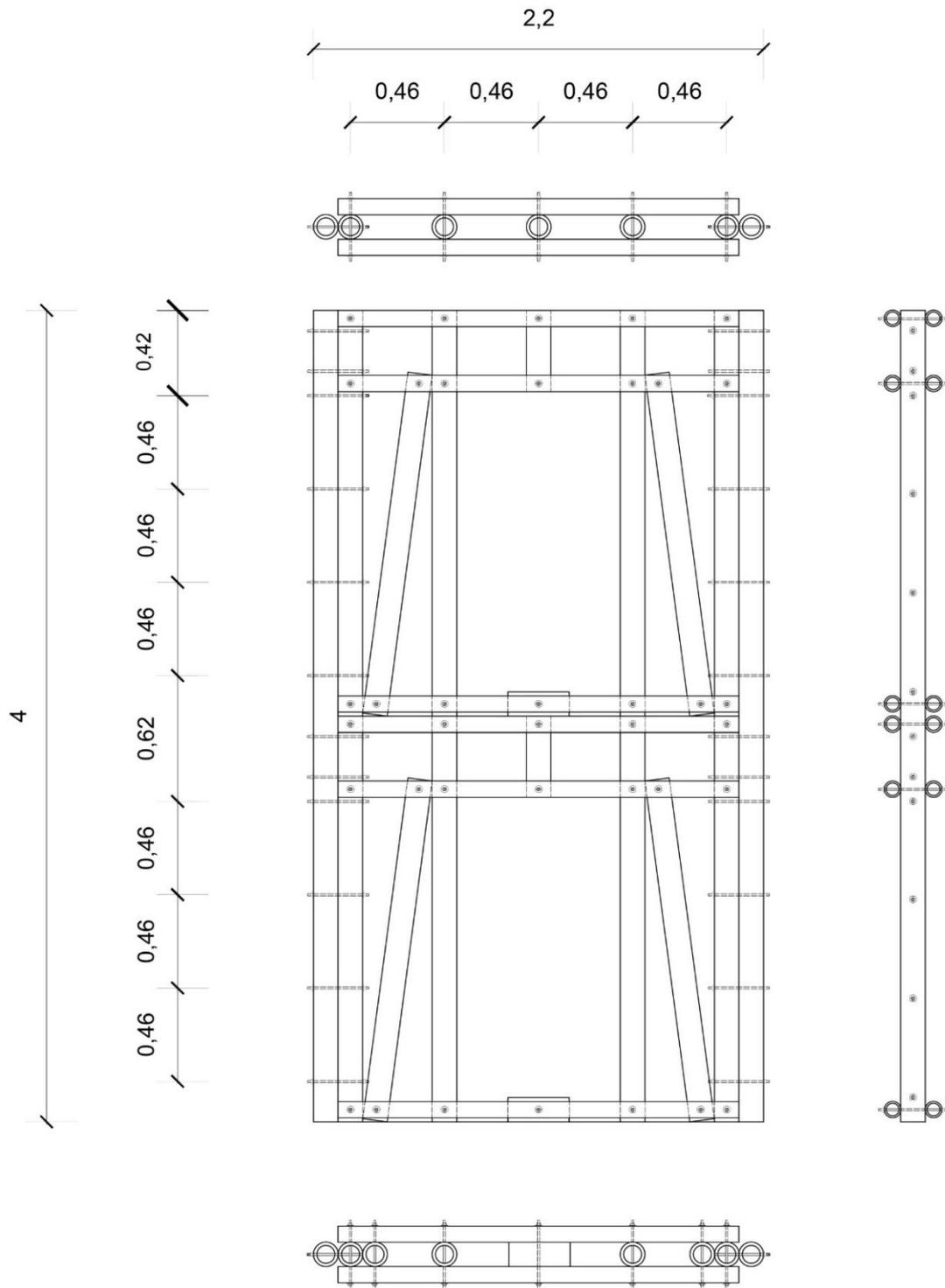


Figura 52: Telaio con pannelli di tipo C, con controventi eccentrici. Quote in metri.

A seguire vengono mostrate due connessioni tipo del sistema strutturale oggetto di studio.

La connessione 1 (CON 1 in *Figura 53*) unisce l'elemento colonna di 12 cm circa di diametro con i due elementi trave orizzontali di 8 cm circa di diametro. Questo tipo di connessione si ha nella direzione della profondità. *Figura 54*

LA connessione 2 (CON 2 in *Figura 53*) unisce la colonna del pannello alla colonna portante a doppia altezza. Questo tipo di connessione si ha nella direzione del piano del pannello. *Figura 55*

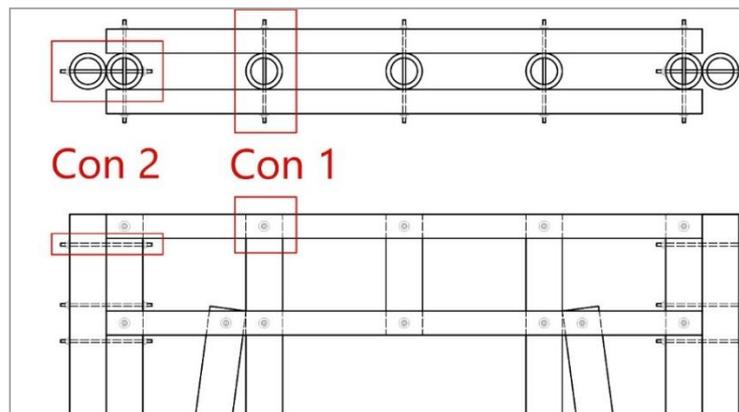


Figura 53: Riferimento ai Dettagli, CON 1, CON2.

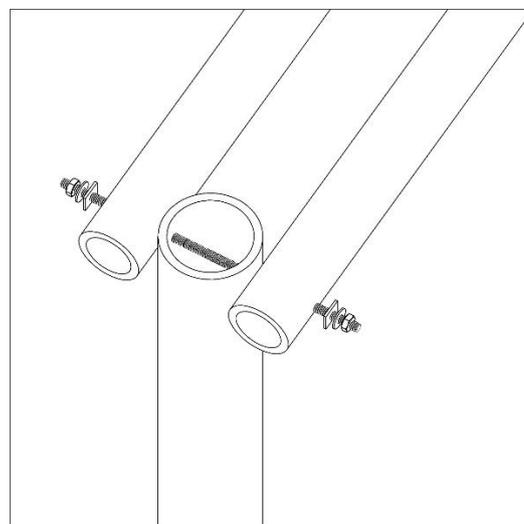


Figura 54: Schema connessione trasversale a taglio retto tipo CON 1.

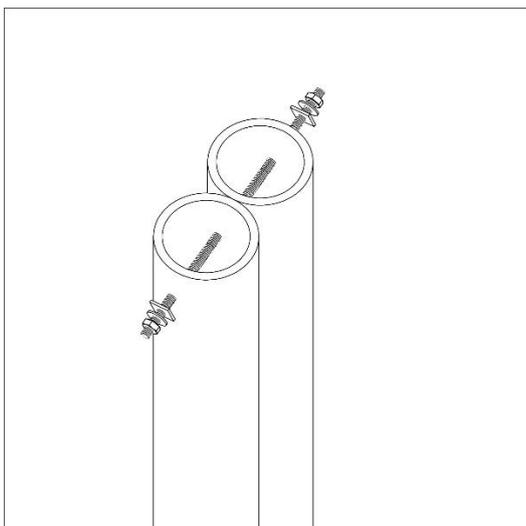


Figura 55: Schema connessione trasversale a taglio retto tipo CON 2.

4.2 IL SISTEMA COSTRUTTIVO NELL'OTTICA GENERALE DELL'EDIFICIO



Figura 56: Esempio di una costruzione ad elementi prefabbricati. Fonte Arme de Ideas en Guadua

Il sistema costruttivo proposto in questa tesi è un modello di struttura facilmente replicabile e aggregabile, che mira ad una maggiore industrializzazione del processo edilizio.

Si tratta, infatti, di un sistema costruttivo in cui la maggior parte delle lavorazioni avvengono in officina, al fine di ridurre e velocizzare al massimo le operazioni in cantiere: qui arrivano i pannelli prefabbricati e i culmi colonna portanti già tagliati e immunizzati, pronti per essere assemblati in maniera semplice e rapida direttamente in situ.

Con i Telai a pannelli prefabbricati proposti in questa tesi è possibile realizzare edifici residenziali dai più semplici ai più articolati, adattabili nel tempo alle diverse esigenze dei futuri utenti.

In questo paragrafo verranno descritte delle ipotesi preliminari del loro assemblaggio, del loro attacco a terra, e dei loro possibili tamponamenti.

4.2.1 Assemblaggio

In *Figura 57*, la pianta della struttura assemblata: il modulo base è costituito da due colonne portanti a doppia altezza e dai due pannelli prefabbricati. La metodologia di assemblaggio risulta essere semplice e intuitiva: i moduli si connettono tra loro tramite l'ancoraggio delle colonne portanti a doppia altezza. Nel Dettaglio 1 in *Figura 58* è visibile l'incontro di 4 moduli: nella parte centrale ci sono i quattro culmi portanti ancorati tra di loro, e ai lati i rispettivi pannelli prefabbricati ad essi agganciati.

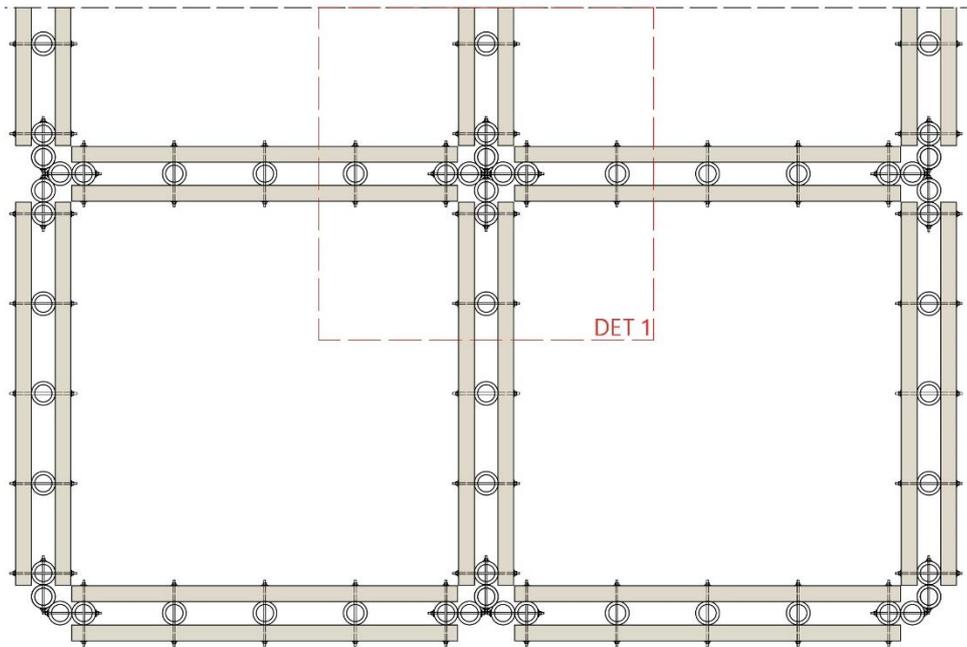
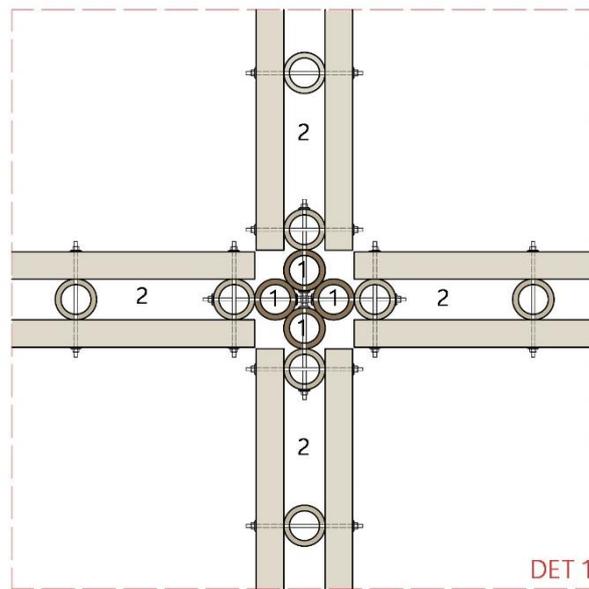


Figura 57: Pianta della struttura costituita da più moduli assemblati tra loro



1: COLONNA PORTANTE A DOPPIA ALTEZZA 2: PANNELLO PREFABRICATO

Figura 58: Dettaglio incontro di 4 modulo: riferimento in pianta

A seguire, in *Figura 59* il prospetto della struttura assemblata; è importante notare che il piano terra è appoggiato su una trave "Vierendeel" ancorata ai culmi colonna portanti, i quali vengono a loro volta attaccati a terra per mezzo di una fondazione a plinti puntuali.

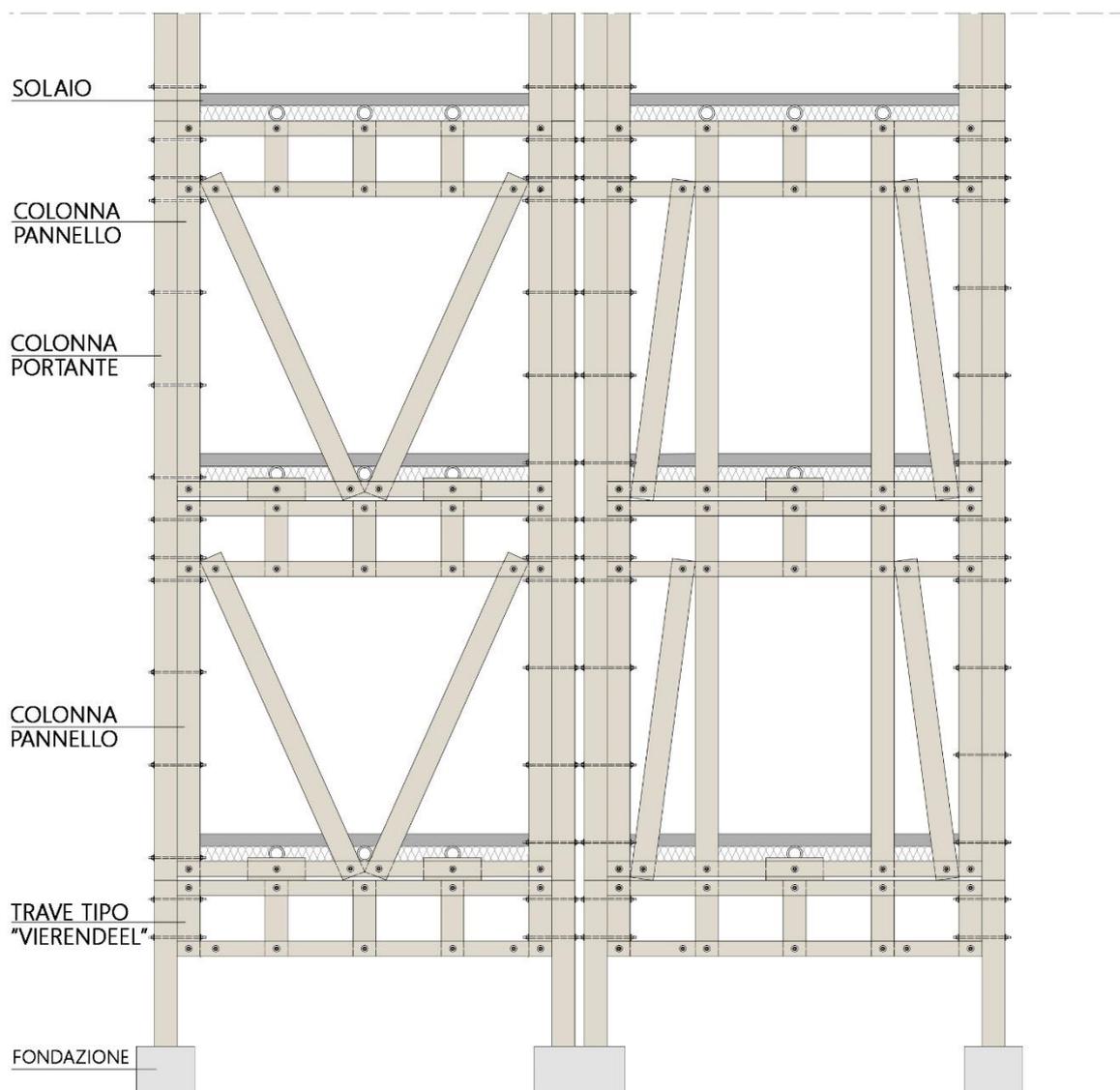


Figura 59: Prospetto di due moduli assemblati tra loro

4.2.2 Attacco a terra

La *Guadua angustifolia* Kunth è un materiale poroso e igroscopico: un accumulo di umidità al suo interno porta non solo ad una diminuzione delle proprietà fisico meccaniche ma anche all'attacco di funghi e alla conseguente putrefazione della struttura. Per questo motivo, nel caso dell'attacco a terra è importante proteggere la struttura dall'umidità, ed è necessario quindi evitare il contatto diretto del culmo con il terreno.

La colonna portante deve, quindi, essere appoggiata su un piedistallo, debitamente impermeabilizzato sulla la superficie a contatto con il culmo. La colonna inoltre, non può essere interrata o immersa nelle fondazioni o in qualsiasi altro componente di calcestruzzo. (22)

In *Figura 60* è mostrato il dettaglio costruttivo relativo all' attacco a terra puntuale di una colonna portante.

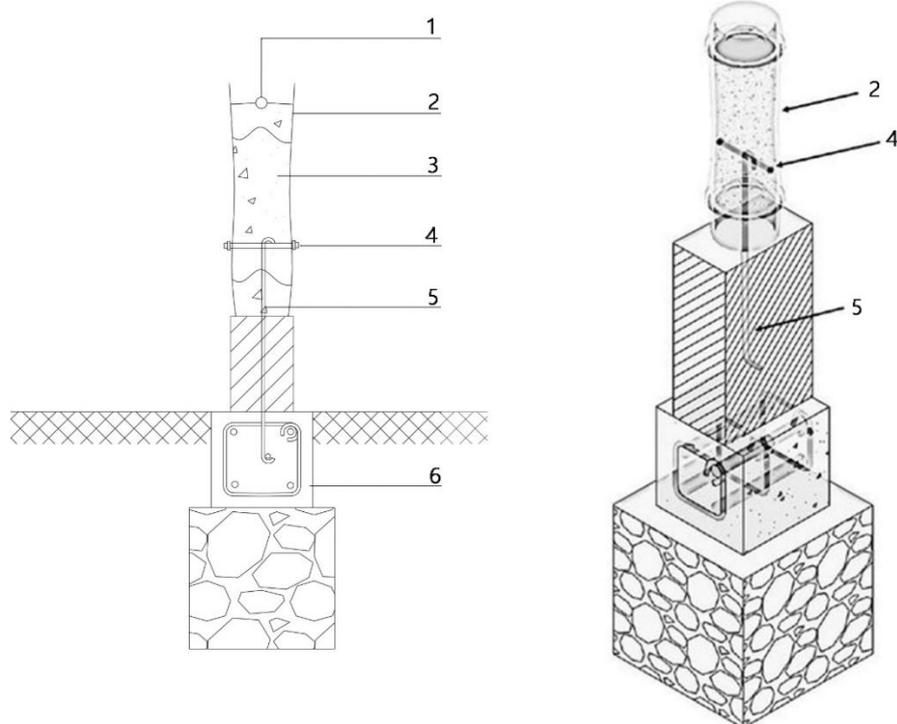


Figura 60: Dettaglio costruttivo dell'attacco a terra di una colonna portante del Telaio oggetto di studio: 1: foro per il riempimento in cemento all'interno del culmo; 2: culmo di *Guadua Angustifolia Kunth*; 3: riempimento in cemento armato; 4: Perforazione con una barra filettata; 5: ancoraggio con barra filettata con gancio, tra la perforazione della guadua e la fondazione in cemento armato. 6: fondazione in cemento armato. (4)

4.2.3 Chiusure perimetrali

Per le chiusure perimetrali è stata ipotizzata una tecnica molto utilizzata in Colombia, ossia il tradizionale "*bahareque encemendato*", costituita da uno strato in canniccio in guadua splittata, su cui viene appoggiata prima la rete elettrosaldata e successivamente uno strato di finitura in calce idrata. Internamente la struttura viene lasciata a vista.

In *Figura 61* viene illustrata la stratigrafia della finitura esterna.

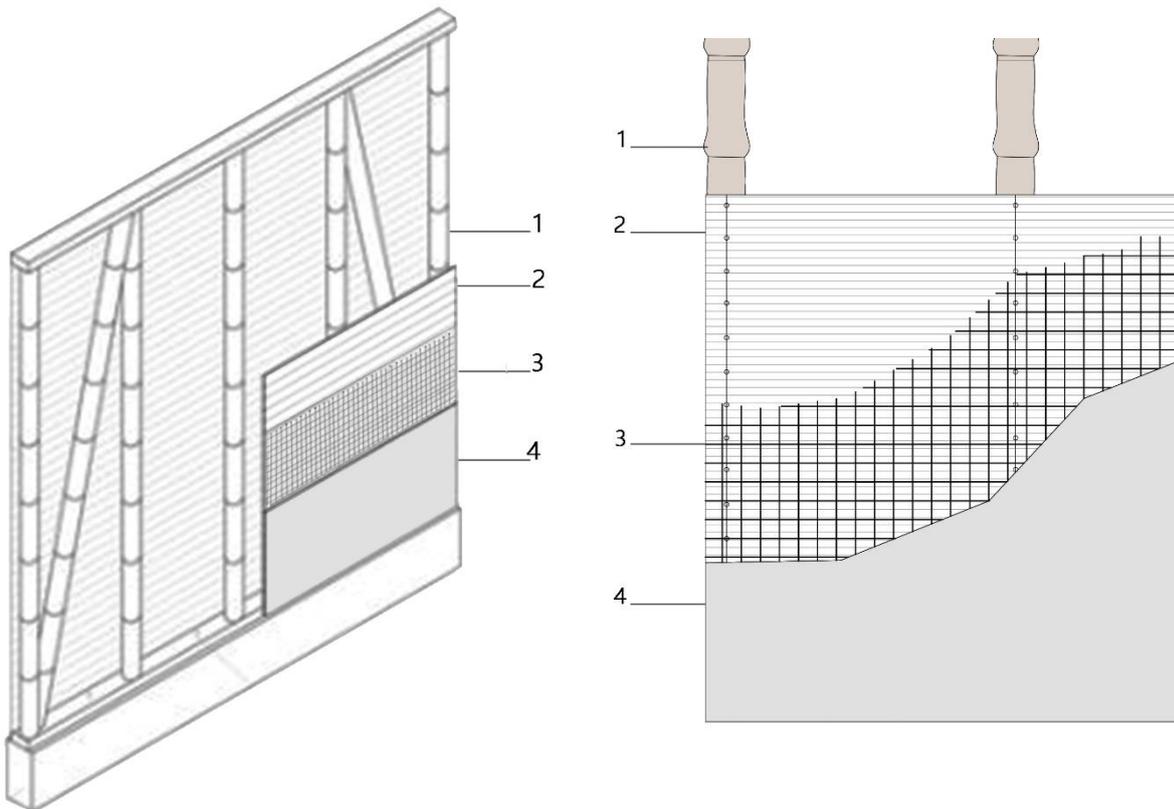


Figura 61: Schema Finitura esterna. 1: culmi della struttura; 2: Canniccio in guadua splittata, essa viene fissata ai culmi con dei chiodi e filo; 3: maglia di rete elettrosaldata; 4: intonaco in calce idrata.



Figura 62: Posa del canniccio in guadua splittata sul prototipo costruito in questa tesi. Fonte propria

4.2.4 Partizioni interne dei solai

La parte superiore dei pannelli, la quale geometria è stata descritta nel paragrafo precedente (*Configurazione geometrica*), è costituita dalla trave "Vierendeel" composta da quattro culmi orizzontali ancorati ai culmi colonna laterali, tramite delle connessioni a "taglio retto". La trave *Vierendeel* ha il compito di reggere le travi del solaio, appoggiate ogni 0,46 m, in corrispondenza dei due culmi colonna portanti laterali e dei distanziatori.

Per quanto riguarda la partizione interna del solaio, essa è costituita dallo strato di canniccio in guadua splittata fissato alle travi con chiodi e filo, su cui si appoggiano i listelli di legno e, ancora sopra, il piano di calpestio costituito da un tavolato in guadua.

In *Figura 63* è mostrato il dettaglio relativo alla partizione interna del solaio, (la legenda si legge in didascalia). In *Figura 64* un esempio di partizione interna del solaio dai progetti di Arme de Ideas en Guadua.

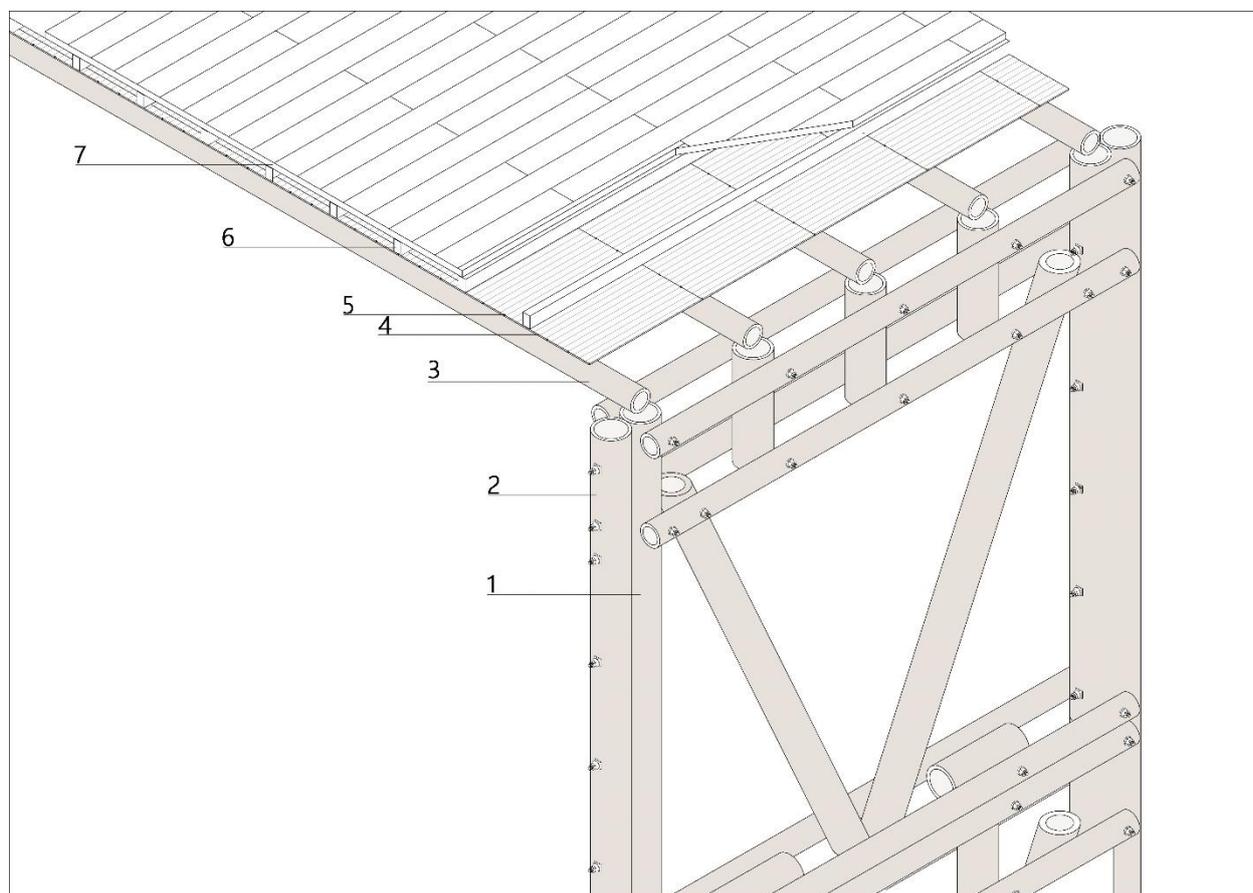


Figura 63: dettaglio costruttivo partizione interna del solaio. 1: Colonna del pannello prefabbricato; 2: colonna portante a doppia altezza; 3: Trave del solaio; 4: strato di canniccio in guadua splittata; 5: chiodi e filo per il fissaggio del canniccio. 6: Travetti in legno o guadua lamellare; 7: Tavolato o parquet in bambù.



Figura 64: Esempio partizione interna del solaio. Fonte Arme de ideas en Guadua

5 COSTRUZIONE DEI PROTOTIPI

In questo capitolo verranno descritte le fasi per la costruzione dei due prototipi oggetto di studio: il telaio con pannelli prefabbricabili di TIPO B, con controventi concentrici, e il Telaio con pannelli di TIPO C, con controventi eccentrici. Essi verranno successivamente testati a carico orizzontale.

Come si è detto nel capitolo precedente, per questioni di spazio in laboratorio i due Telai sono stati costruiti in scala ridotta, ossia le loro dimensioni sono circa il 66% rispetto a quelle reali di progetto.

5.1 SELEZIONE DEL MATERIALE

Il materiale scelto per il progetto è la guadua angustifolia Kunth, classificata dal gruppo di ricerca dell'università Nazionale della Colombia come la migliore specie di guadua presente nel paese per scopi strutturali per la sua qualità di resistenza meccanica.

Il materiale è stato reperito presso l'azienda "*Arme Ideas en Guadua*", che opera in un deposito a sud di Bogotá, nel comune di Soacha, facente parte del dipartimento di Cundinamarca. La guadua è stata raccolta nel Dipartimento di Quindío.

Prima di essere commercializzato il materiale viene selezionato nel campo, pulito, pre-seccato, sottoposto ad un trattamento e infine tagliato. (24)

Nell'azienda in questione sono commercializzati, come materiale per costruzione di edifici, diverse parti della pianta: la base, la parte superiore della base e il ceppo; l'azienda si occupa inoltre della commercializzazione di guada per artigiani e fabbricanti di mobili, destinata alla produzione di prodotti artigianali, strumenti e pavimenti. La guadua in vendita nell'azienda è organizzata in ordine di altezza e di diametri dei culmi. (I diametri variano dai 7-9, fino al 16-20cm, mentre le altezze variano da 1,80 fino a 6 metri).

In *Figura 65* il deposito dei culmi di guadua presso la sede dell'azienda Arme de Ideas en Guadua.



Figura 65: Foto del deposito di guadua dell'azienda "Arme de Ideas en Guadua"

Nella sede di "Arme de ideas de Guadua" si è proceduto ad una selezione visiva del materiale, escludendo, per quanto possibile, tutti i culmi che presentavano qualsiasi tipo di irregolarità o imperfezione che avrebbe potuto comportare una diminuzione dell'efficienza strutturale del materiale, e dunque una diminuzione delle caratteristiche meccaniche e fisiche dello stesso.

In generale il controllo deve essere rivolto sia ai difetti che all'età e allo sviluppo longitudinale dei culmi. In *Figura 66* la foto del calibro per la sezione dimensionale dei culmi, che ha permesso di individuare in maniera rapida i culmi con i diametri che ci interessavano per il progetto.



Figura 66: Calibro per la sezione dimensionale dei culmi

In APPENDICE B, vengono descritti i casi dei difetti più comuni che si trovano nei culmi, e alcuni accorgimenti da considerare durante la selezione del materiale.

Durante la selezione del materiale, oltre al controllo dei difetti dei culmi, è importante controllare la loro età.

Infatti, nella selezione vengono scartati i culmi troppo giovani e quelli troppo maturi: la guadua giovane si riconosce in quanto ha un color verde molto intenso, la sua superficie è pulita da muschi ed ha fasce nodali bianche, dove si possono trovare anche le gemme. In questa fase il culmo non ha completato il processo di lignificazione (Figura 67). I culmi appartenenti a questa fase vengono utilizzati per cestini, tessuti o pavimenti.

La guadua ideale per le costruzioni è quella di età tra i 3 e i 6 anni, in cui raggiunge la massima resistenza e durezza. Esteticamente è caratterizzata da un colore più tendente al giallo opaco, con l'apparizione di macchie color grigio; il colore verde intenso e lucido è scomparso.

Un altro controllo molto importante è quello rispetto al suo sviluppo longitudinale. Il culmo infatti, per essere selezionato deve avere lo stesso diametro per l'intera lunghezza e non deve presentare curvature. (Figura 68)

La selezione del materiale è una fase molto lunga, e richiede molta attenzione, in quanto la qualità del materiale incide in maniera determinante sulle sue caratteristiche meccaniche e fisiche.

Per quanto si sia cercato di reperire il materiale secondo i requisiti appena elencati, abbiamo trovato delle difficoltà dovute sia alla mancanza di tempo che alla limitata disponibilità di culmi per la ricerca scientifica.

Per questi motivi alcuni dei culmi selezionati presentano dei difetti anatomici o di età.



Figura 67: Culmi di guadua giovane



Figura 68: Sviluppo longitudinale dei culmi

5.2 TAGLIO DEL MATERIALE

Per il taglio dei culmi nelle dimensioni richieste dal progetto, è stata utilizzata una sega circolare manuale: *la Model 7208 TYPE 2 PRO-TECH COMPOUND MITER SAW.* (Figura 69)

Il taglio ideale deve essere fatto il più possibile vicino ai nodi, in modo tale che le perforazioni si trovino in prossimità della zona privilegiata, quella nodale, la parte più resistente del culmo, diminuendo di gran lunga il rischio di fessurazioni in prossimità della perforazione (Figura 70).

Questa regola però non può essere sempre applicata a causa dell'evidente irregolarità dei nodi nei culmi e per le diverse lunghezze richieste. È molto importante quindi prima di tagliare il materiale, organizzare tutti i tagli che dovranno essere effettuati, in modo tale da ottimizzare al massimo sia la quantità che la qualità degli elementi costruttivi utilizzati.



Figura 69: Sega circolare manuale PRO-TECH

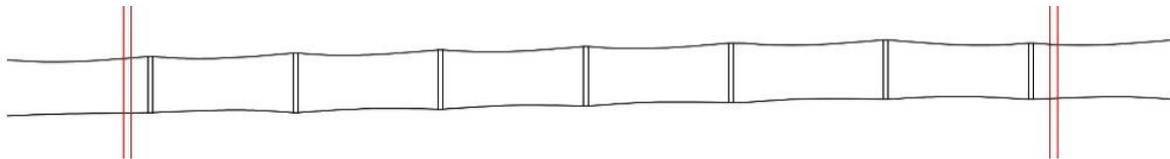


Figura 70: Taglio ideale in un culmo di guadua



Figura 71: Taglio in prossimità dei nodi



Figura 72: Taglio degli elementi costruttivi per la costruzione del primo pannello

5.3 PERFORAZIONE E ASSEMBLAGGIO

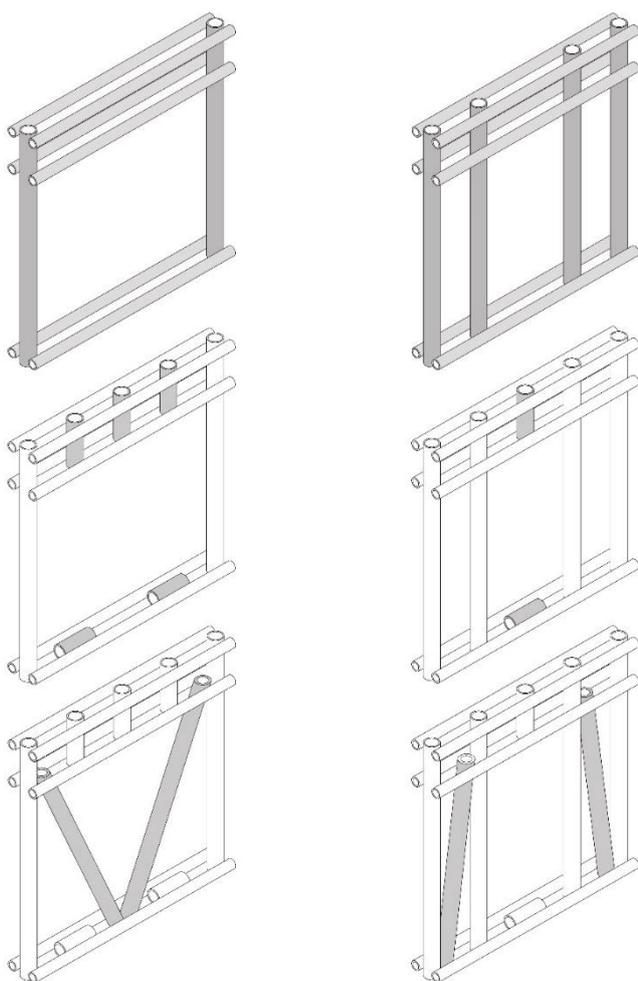
La costruzione delle due tipologie di pannelli modulari (di tipo B e di TIPO C) è stata realizzata nel laboratorio dell'*Instituto de Extensión e Investigación – IEI dell'Universidad Nacional*.

Anche in questa fase si è dovuto fare i conti con l'eterogeneità del materiale: i diametri dei culmi non sempre corrispondevano alle dimensioni del progetto, bensì avevano un margine di errore di circa uno o due cm. Durante l'assemblaggio del telaio, si è tentato quindi di distribuire gli elementi costruttivi in maniera più simmetrica possibile in modo tale da ottenere una distribuzione degli sforzi maggiormente omogenea.

La sequenza costruttiva dei pannelli modulari è identica per entrambe le tipologie, rapida e semplice, e non ha bisogno di manodopera qualificata. Si è proceduto prima alla costruzione di pannelli e, successivamente, i pannelli sono stati fissati a telai.

5.3.1 Sequenza costruttiva dei pannelli modulari

Nella costruzione dei pannelli si è seguito il seguente processo costruttivo:



1. Posizionamento, perforazione e assemblaggio della struttura principale costituita dagli elementi colonna verticale (12 cm di diametro) e dagli elementi trave orizzontale del solaio (8 cm di diametro).

2. Posizionamento e ancoraggio dei distanziatori (12 cm di diametro).

3. Posizionamento e ancoraggio delle diagonali di controventamento. (12 cm di diametro)

Figura 73

5.3.2 Connessione tra i culmi

Le connessioni trasversali a "taglio retto", sono state fissate con barre filettate di diametro 3/8 pollici, serrate con dadi alle estremità. Per la perforazione è stato utilizzato un trapano, mentre tra il dado e la guadua è stata posta una guarnizione.

In alcuni casi, quando i culmi non erano perfettamente retti, sono stati forzatamente raddrizzati per mezzo di una corda: la guadua ha il vantaggio di essere molto flessibile. Grazie a questa caratteristica anche in presenza di irregolarità è stato possibile chiudere tutte

le connessioni con relativa facilità (*Figura 75*). Infine, sono state aggiunte delle fasce in gomma sulle estremità dei culmi maggiormente sollecitati. (*Figura 76*)



Figura 74



Figura 75



Figura 76

Una volta costruiti due pannelli per ogni tipologia (TIPO B e TIPO C) vengono sovrapposti l'uno all'altro ed ancorati alle colonne portanti a doppia altezza, ottenendo due prototipi di telai, ognuno caratterizzato da una diversa tipologia di pannello. (Figura 77 e Figura 78)

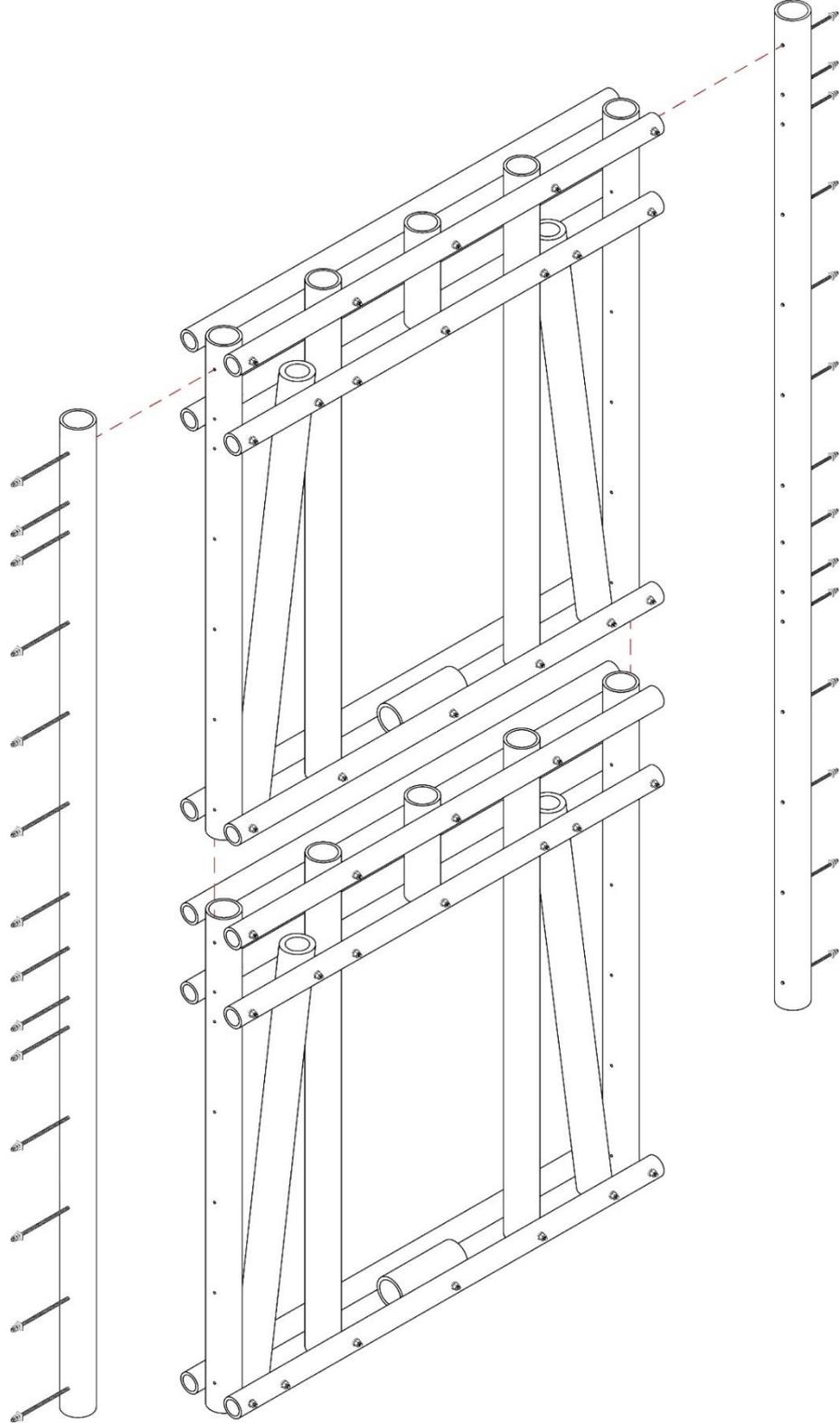


Figura 77: Spaccato assometrico dell'assemblaggio del prototipo con pannello di "tipo C "

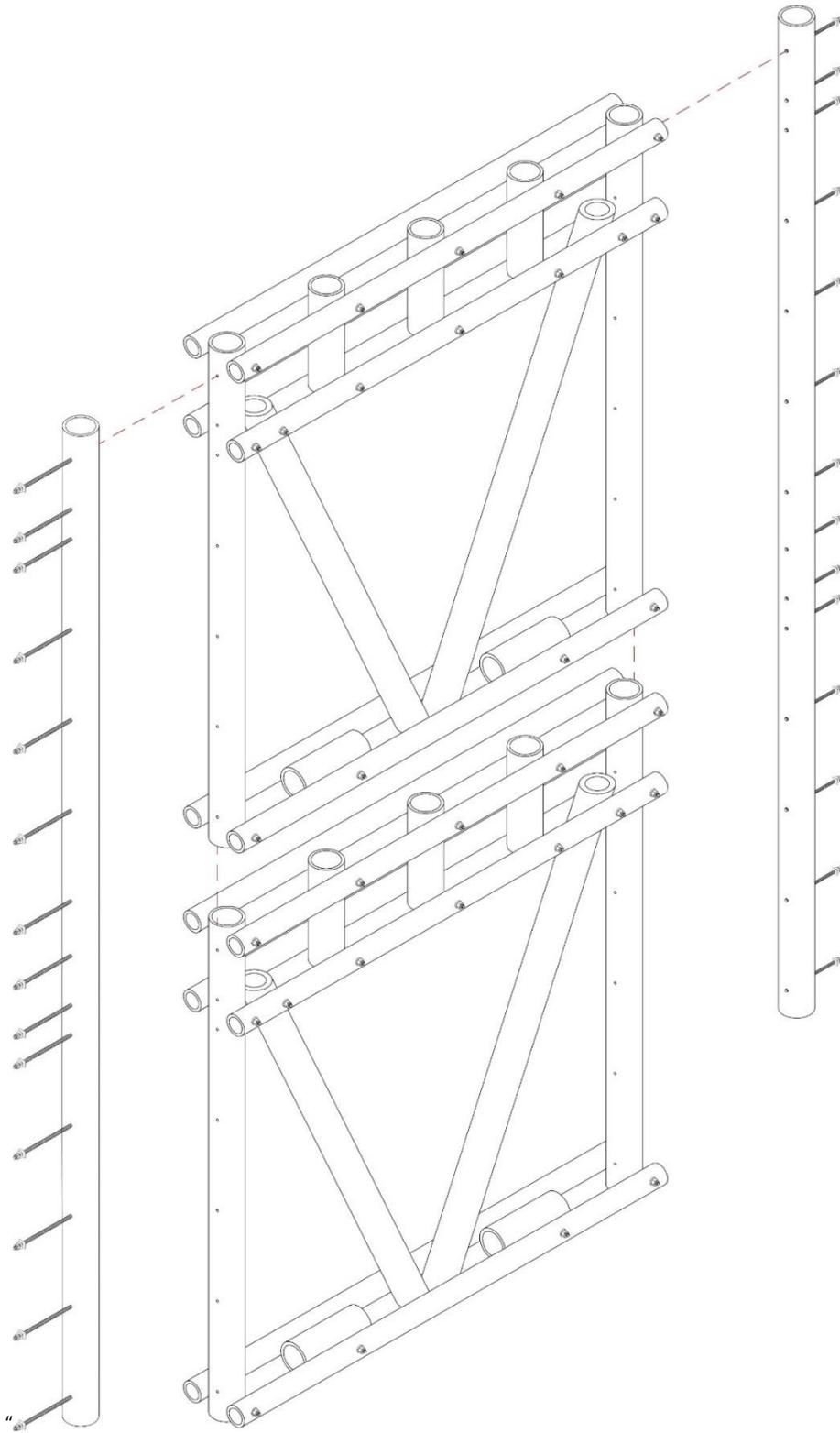


Figura 78: Spaccato assometrico dell'assemblaggio del prototipo con pannello di "tipo B"



Figura 79: Foto prima dell'ancoraggio dei pannelli alle colonne portanti a doppia altezza



Figura 80: Foto del Telaio completo. I pannelli sono ancorati alle colonne portanti.

A seguire, vengono mostrati 3 dettagli (Riferimenti in *Figura 81*)

1. nel Dettaglio 1 (DET 1) viene mostrato un tipo di connessione trasversale a taglio retto che unisce due culmi trave orizzontale con un culmo colonna (*Figura 82*);
2. nel Dettaglio 2 (DET 2) viene mostrato un altro tipo di connessione trasversale, utilizzato per unire il culmo colonna del pannello con il culmo colonna portante a doppia altezza (*Figura 83*);
3. nel terzo dettaglio viene presentato l'incontro tra il controvento diagonale, il culmo colonna del pannello e il culmo colonna a doppia altezza (*Figura 84 e Figura 85*).

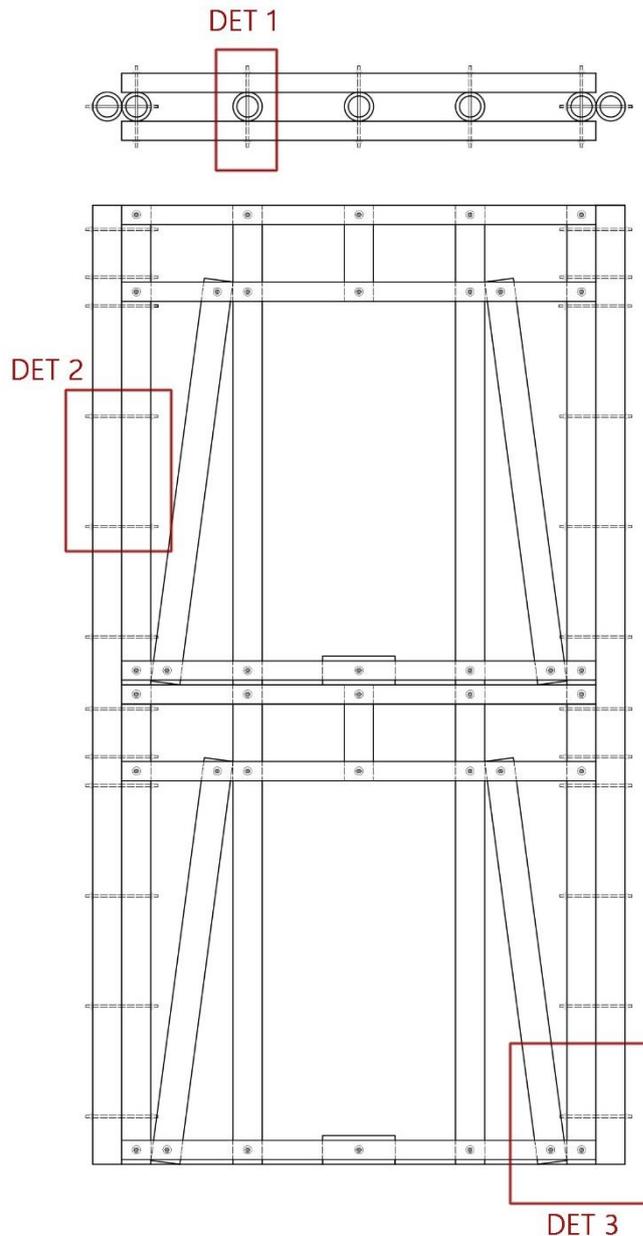


Figura 81: Riferimento ai Dettagli, DET1, DET2, DET3.



Figura 82: DET 1: Foto di una connessione trasversale tra un culmo colonna e due culmi- travi orizzontali



Figura 83: DET 2: Foto di una connessione tra la colonna del pannello e la colonna portante a doppia altezza.



Figura 84: DET 3, Foto vista dal basso.



Figura 85: DET 3, Foto vista frontale

6 ANALISI SPERIMENTALE

Una volta costruiti, i due prototipi sono stati testati a carico orizzontale. Sono stati effettuati degli spostamenti orizzontali man mano crescenti nella direzione fuori piano, e poi riportati al punto iniziale. Il portico infatti ancorato al pistone e seguiva gli spostamenti impostati dalla macchina. L'intento era verificare la perdita di rigidità del portico dopo ogni prova, e cercare di simulare una situazione che si avvicinasse alle sollecitazioni imposte da un evento sismico.

6.1 STRUMENTAZIONE DI PROVA

La prova è stata eseguita nel laboratorio del IEl (Instituto de Extensión e Investigación) dell'Universidad Nacional de Colombia dove era disponibile la strumentazione per la prova di carico orizzontale. Attraverso una carrucola elettrica, i telai sono stati sistemati in posizione verticale, su una struttura in acciaio, in corrispondenza della posizione del cilindro con pistone attraverso il quale si sarebbe stato applicato il carico.

Per evitare spostamenti in direzione ortogonale al carico, ma anche e soprattutto per mettere in sicurezza il telaio durante la prova, si è ritenuto necessario agganciare il telaio ad un ponteggio in acciaio a doppia altezza (*Figura 86*).



Figura 86

Per quanto riguarda le condizioni di vincolo, si è cercato di simulare un incastro. Sarebbe stato più corretto incastrare i due culmi portanti in due zavorre in cemento armato, come si era ipotizzato in sede di progetto in Figura 60 ma per mancanza di tempo e di spazio si è preferito optare per la soluzione di seguito descritta.

I culmi colonna a doppia altezza e i culmi colonna del pannello inferiore sono agganciati alle travi in acciaio della struttura a disposizione per la prova di carico, per mezzo di 4 ganci con barre filettate di 3/8 pollici, come si vede in *Figura 89*. Per una migliore comprensione si riporta il

dettaglio costruttivo A-A (Figura 89), il cui riferimento si trova in Figura 88 e le rispettive foto dell'ancoraggio della struttura.

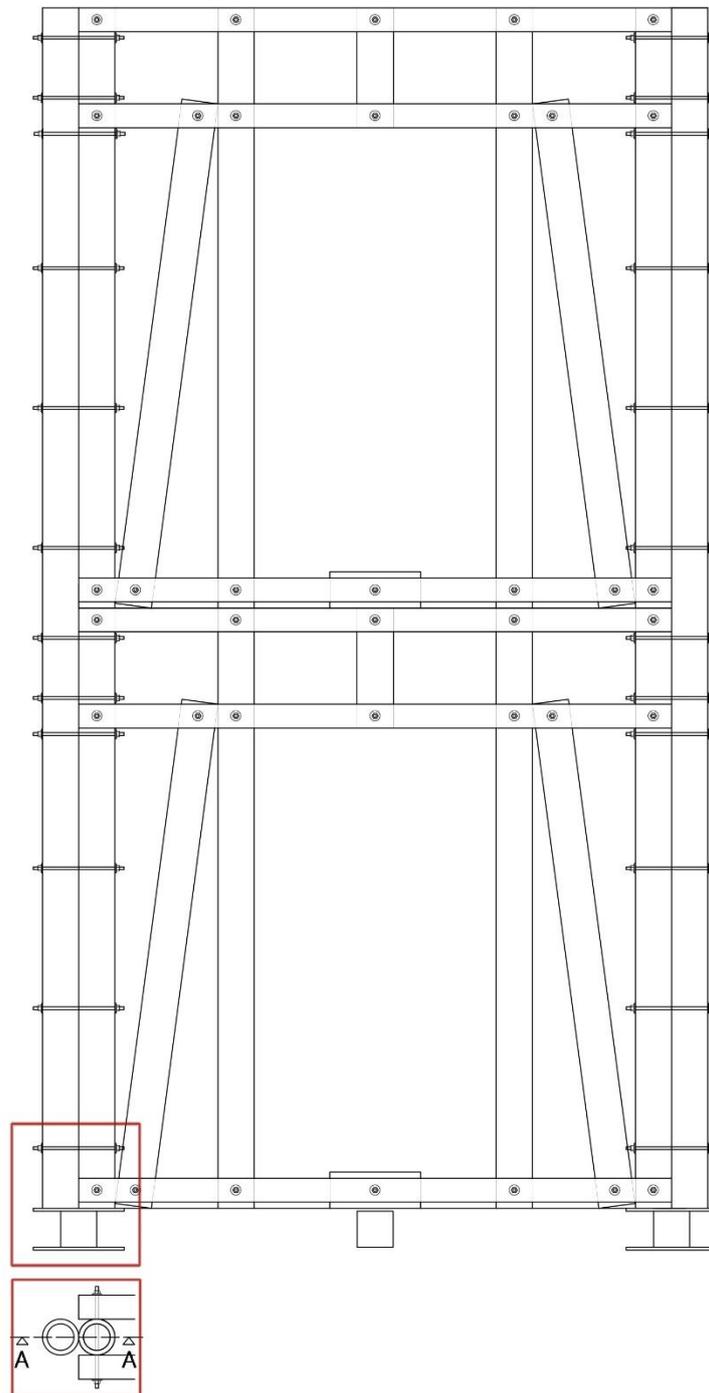


Figura 88: Localizzazione del Dettaglio A-A

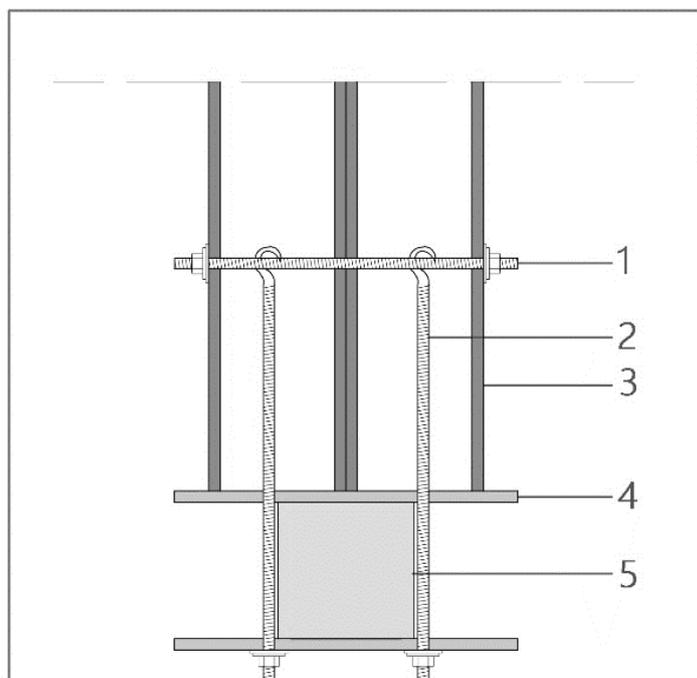


Figura 89: Dettaglio A-A. Dettaglio simulazione incastro. Legenda: 1: connessione trasversale tra i due culmi colonna; 2: Gancio con barra filettata 3/8; 3: culmo colonna verticale; 4: Piastra Forata; 5: Trave della struttura disponibile per la prova di carico

Le piastre di ancoraggio sono state disegnate e realizzate ad hoc per la prova: *Figura 90*.

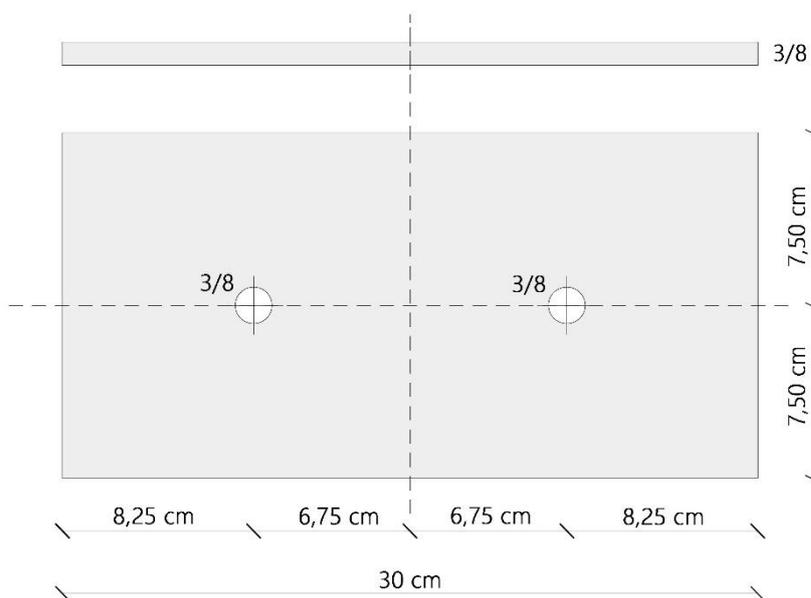


Figura 90: Piastra forata



Figura 91: Foto simulazione dell'incastro: ancoraggio



Figura 92: Simulazione incastro: ancoraggio.

Per quanto riguarda l'applicazione del carico, si è deciso di ancorare il cilindro con il pistone ad una piastra a sua volta resa solidale al telaio nella parte superiore dello stesso come si vede nella *Figura 93*. In questo modo il telaio subisce uno spostamento uguale allo spostamento del pistone, quindi oltre ad avanzare quando viene applicato un carico positivo, si ritira quando il pistone torna al punto di partenza.



Figura 93: Cilindro e piastra utilizzata per l'applicazione di carico

6.2 PROVA DI CARICO ORIZZONTALE

Entrambi i telai, quello con i controventi concentrici (TELAIO tipo B) e quello con i controventi eccentrici (TELAIO tipo C) sono stati sottoposti a prove con carico orizzontale. Durante la prova di ciascun Telaio si sono effettuati diversi caricamenti: di ogni prova conosciamo solo il carico ultimo e lo spostamento ultimo, prima di essere riportato al punto di partenza.

6.2.1 Telaio di tipo B con pannelli con controventi concentrici

In *Tabella 9* vengono riportati i dati di forza impressa dal cilindro e relativo spostamento orizzontale del cilindro stesso delle prove del Telaio di tipo B. A seguire nel *Grafico 6*, la relazione Forza-Spostamento Orizzontale relativo alle prove di carico orizzontale del telaio tipo B: la traiettoria dei valori della prova sperimentale viene rappresentata con una linea tratteggiata in

quanto non si conosce l'andamento dei valori precedenti a quello finale. In ogni prova il cilindro raggiunge un dato spostamento, e si ritira fino al punto iniziale.

	Forza (N)	Spostam. Orizzontale Sperimentale (m)
0	0	0
1	5452,497	0,047
2	6374,322	0,086
3	6237,029	0,241
4	5629,017	0,302
5	5213,999	0,347
6	4877,631	0,430
7	4256,086	0,503
8	4715,625	0,339
9	0	0

Tabella 9: Tabella Forza-Spostamento per i Cicli di carico-scarico del Telaio TIPO B.



Grafico 6: Grafico Forza-Spostamento orizzontale relativo alle prove del Telaio tipo B

In *Figura 94* e in *Figura 95*, sono riportate le foto della struttura deformata con uno spostamento nel punto del cilindro pari a 86 mm e a 503mm.



Figura 94: Spostamento del cilindro a 86 mm



Figura 95: Spostamento del cilindro a 503mm

6.2.2 Telaio tipo C con pannelli con controventi eccentrici

In *Tabella 10* vengono riportati i dati di forza impressa dal cilindro e relativo spostamento orizzontale del cilindro stesso delle prove del Telaio di tipo C. A seguire nel *Grafico 7*, la relazione Forza-Spostamento Orizzontale relativo alle prove di carico orizzontale del telaio tipo C.

	Forza (N)	Spostam. Orizzontale Sperimentale (m)
0	0	0
1	5815,344	0,100
2	6194,665	0,200
3	6433,162	0,300
4	6838,569	0,400
5	5895,856	0,300
6	5787,591	0,200
7	4043,576	0,100
8	700,097	0,050
9	0	0

Tabella 10: Tabella Forza-Spostamento per i Cicli di carico-scarico del telaio di tipo C.

TELAIO TIPO C CON PANNELLI CON
CONTROVENTI ECCENTRICI

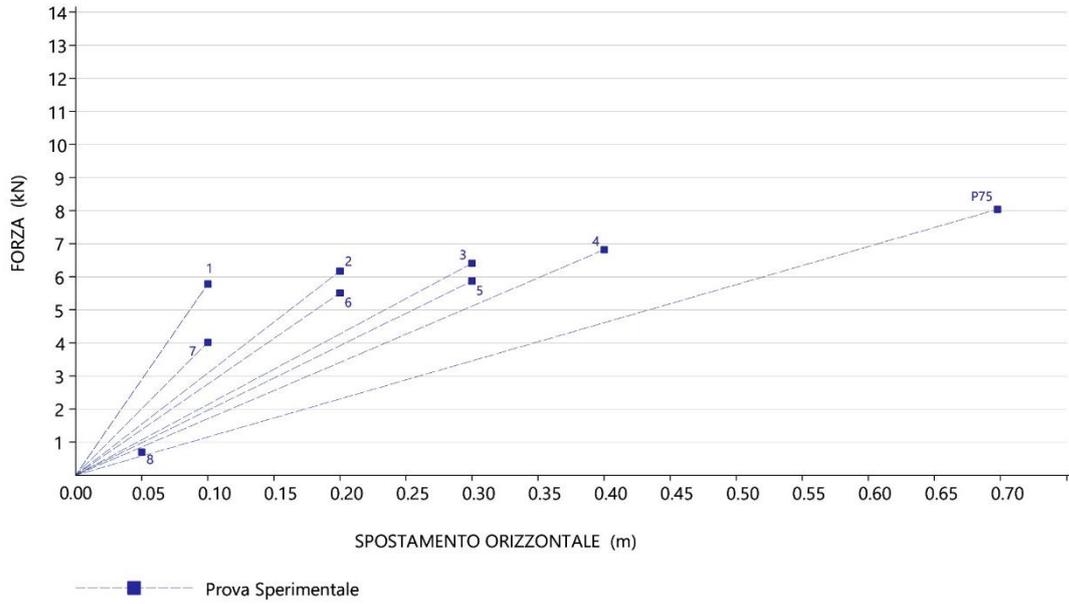


Grafico 7: Grafico Forza-Spostamento orizzontale relativo alle prove del Telaio tipo C

In *Figura 96* e in *Figura 97* sono riportate le foto della struttura deformata con uno spostamento nel punto del cilindro pari a 400 mm e a 700mm. La prova relativa allo spostamento di 700 mm (spostamento massimo della macchina), indicato come P75 nel *Grafico 7* è stata effettuata per vedere se la struttura arrivava al collasso: in realtà, a parte qualche lesione locale, non ha riportato segni di cedimento.



Figura 96: Spostamento a 430 mm



Figura 97: Spostamento a 700 mm

Volendo commentare il comportamento strutturale di entrambi i telai, già il primo caricamento ha lasciato danneggiamenti importanti: infatti dai *Grafici 6 e 7* si può notare come sia nel caso del telaio di tipo B che quello di tipo C, già dalla seconda prova di carico, si ha una netta diminuzione di rigidezza, questo perché con le prime fessure, il telaio diventa molto più deformabile.

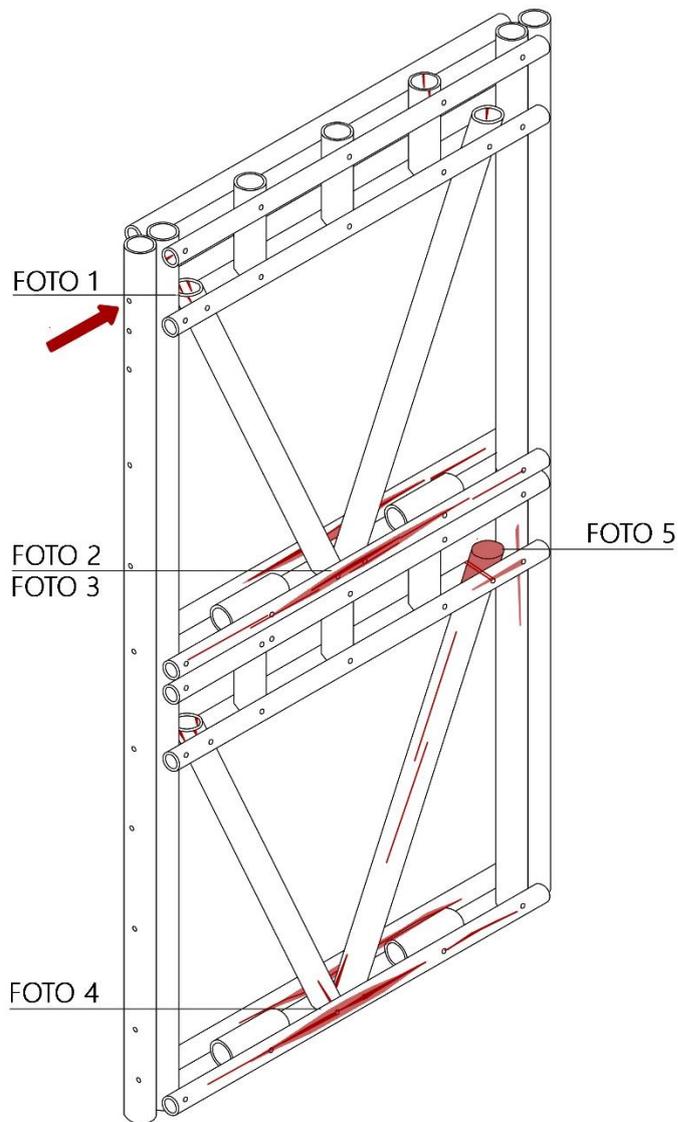
In particolare nel telaio di tipo B durante la prova numero 2, al raggiungimento di 200 mm di spostamento, si è sganciato un controvento diagonale, e questo ha comportato una rilevante perdita di rigidezza in tutto il sistema strutturale. Infine tra la prova numero 2 e quella numero 3, il telaio subisce il maggior numero di lesioni con una conseguente diminuzione di resistenza.

Nel Telaio di tipo C, decisamente meno rigido e più duttile rispetto al Telaio di tipo B, non ci sono state delle lesioni molto evidenti, anche se anche in questo caso le fessure nei punti maggiormente sollecitati hanno comportato una diminuzione della rigidezza.

6.3 QUADRO FESSURATIVO

E' stato rilevato il quadro fessurativo al termine delle prove per tutti e due i telai.

6.3.1 Telaio Tipo B

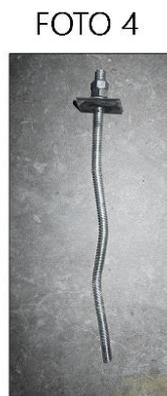
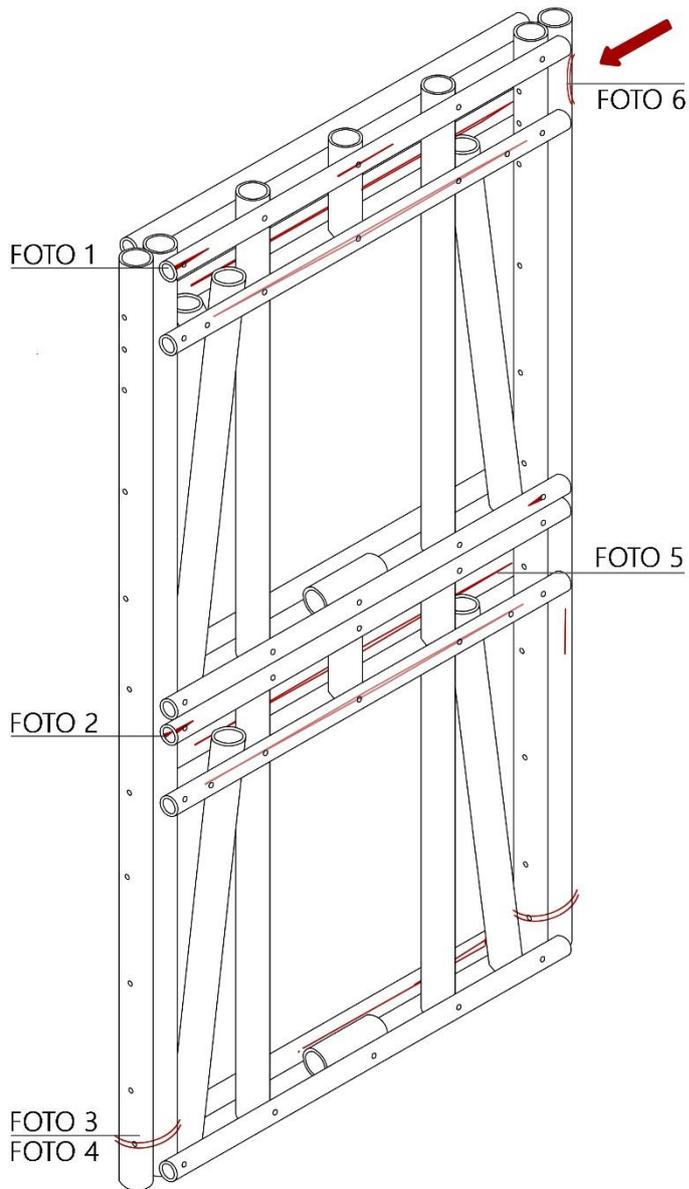


Si nota come i punti di debolezza siano le connessioni: le fessure si dipartono dal punto dove è stata posta la spina passante di acciaio. Si nota altresì un quadro fessurativo importante sui correnti dove si congiungono le due diagonali del pannello. (FOTO 3 E FOTO 4)

Un altro punto molto danneggiato è quello relativo alla FOTO 5: in questo caso la spina in acciaio spacca il culmo, provocando lo sganciamento della diagonale.

Le criticità appena evidenziate saranno oggetto di studio nell'analisi tensionale del prossimo capitolo.

6.3.2 Telaio tipo C



A differenza del telaio di tipo B, quello di tipo C presenta un minor numero di lesioni e questo potrebbe essere dovuto ad una minor rigidità di questa tipologia di pannello, dovuto ai controventi eccentrici. Le lesioni più preoccupanti sono in corrispondenza dei correnti della trave "Vierendeel", all'incontro con le diagonali. (FOTO 5)

Un'altra lesione da notare è nel punto di ancoraggio alla struttura: in questo punto la rotazione del culmo dovuto al carico impresso dal cilindro ha deformato la connessione trasversale. (FOTO 4 - FOTO 3).

7 ANALISI NUMERICA

Si è ritenuto utile sia prima che dopo l'analisi sperimentale, simulare il comportamento dei due telai oggetto di studio con un programma di calcolo strutturale: SAP2000 V 19.0.0.

In particolare l'analisi numerica condotta prima di sottoporre i due prototipi alle prove sperimentali descritte nel capitolo precedente sono state fondamentali per avere un ordine di grandezza sulle forze e gli spostamenti.

L'analisi numerica è stata poi completata e usata a valle delle prove per capire e studiare la deformazione del sistema una volta caricato.

La modellazione numerica è stata effettuata considerando il materiale elastico lineare omogeneo isotropo. Pur nella grande semplificazione che questo comporta è stato comunque possibile ritrovare i punti più sollecitati e vedere come essi fossero coerenti con quanto visto sperimentalmente.

7.1 DESCRIZIONE DEL MODELLO

In questo capitolo sono riportati i dettagli del modello: i vincoli imposti, le proprietà meccaniche del materiale, le tipologie dei modelli simulati. Successivamente sono riportati i risultati ottenuti e un confronto fra risultati analitici e sperimentali.

7.1.1 Materiali

Per definire i materiali dei modelli si sono considerati i risultati ottenuti dalla caratterizzazione del materiale di questa tesi, e qualora fosse necessario, sono stati consultati anche i dati di letteratura.

Agli elementi corrispondenti ai culmi di guadua, è stato assegnato un materiale isotropo, dovuto al fatto che il modulo circonferenziale e radiale del materiale non è rilevante nei risultati dello spostamento orizzontale dei modelli.

Si è considerato quindi sufficiente simulare tutti gli elementi solo con il valore del modulo elastico a compressione parallela alla fibra, in quanto la maggior parte degli elementi della struttura è principalmente sottoposta a carico assiale. (5)

Il coefficiente di Poisson adottato è stato tratto dalla tesi di Patricia Luna (2014), dove si stabilisce un valore medio di ν pari a 0,35 dopo aver testato un totale di 22 provette di guadua.

Il peso specifico adottato è di 800 kg/m^3 ($7,85 \text{ kN/m}^3$) secondo l'articolo G.12.3.4.1, Titolo G del regolamento NSR-10. (4)

Per quanto riguarda il Modulo elastico a compressione longitudinale alla fibra, ci si è riferiti al valore utilizzato nella tesi di Camilo Andrés Castillo Cardona (5), ossia 14.183 Mpa. Questo perché, anche se in questa tesi sono state effettuate le prove necessarie per l'individuazione del modulo elastico, purtroppo i risultati ottenuti sono stati considerati anomali rispetto ai valori delle altre tesi che studiano questo materiale, la *Guadua angustifolia* Kunth.

Il modulo di elasticità tangenziale (G) si determina a partire dal coefficiente di Poisson e dal modulo di elasticità longitudinale E con la relazione

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

Nella Figura 98 si presentano le proprietà del materiale introdotte nel programma.

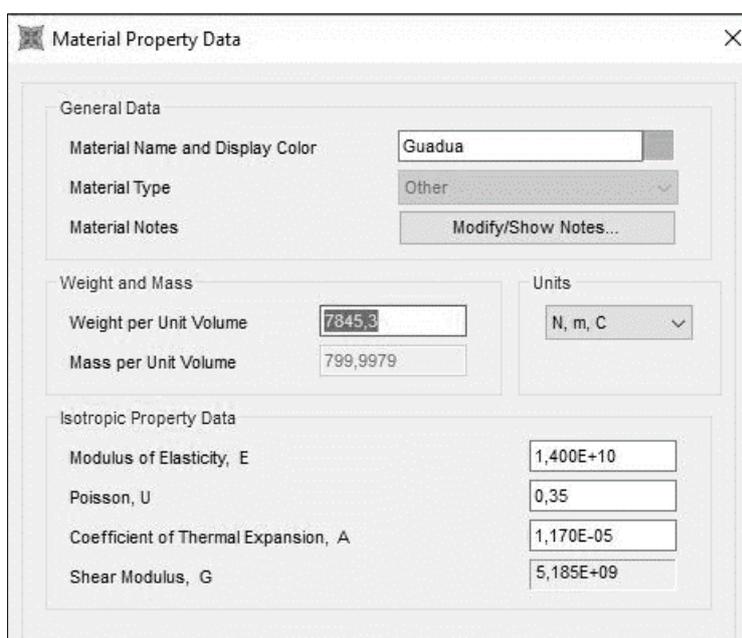


Figura 98: Proprietà del materiale guadua degli elementi modellati nel programma SAP2000

L'altro materiale utilizzato per le connessioni trasversali tra i culmi è l'acciaio. In questo caso sono stati considerati validi i valori di default del programma per l'acciaio, che corrispondono ai valori dell'acciaio convenzionale presi da letteratura (Figura 99).

Material Property Data	
General Data	
Material Name and Display Color	Steel
Material Type	Steel
Material Notes	Modify/Show Notes...
Weight and Mass	
Weight per Unit Volume	76972,86
Mass per Unit Volume	7849,0474
Units	
	N, m, C
Isotropic Property Data	
Modulus of Elasticity, E	1,999E+11
Poisson, U	0,3
Coefficient of Thermal Expansion, A	1,170E-05
Shear Modulus, G	7,690E+10
Other Properties for Steel Materials	
Minimum Yield Stress, Fy	3,447E+08
Minimum Tensile Stress, Fu	4,482E+08
Expected Yield Stress, Fye	3,792E+08
Expected Tensile Stress, Fue	4,930E+08

Figura 99: Proprietà del materiale acciaio inserite nel programma SAP2000

7.1.2 Geometria ed Elementi utilizzati

La geometria di ogni modello simulato in SAP2000, riproduce, quanto più fedele possibile, i due telai costruiti per la prova sperimentale, sia per anatomia che per dimensioni.

Per la modellazione delle colonne, delle travi e dei perni, si utilizzano degli elementi tipo "Frame", elementi beam retti e unidimensionali capaci di sopportare momento flettente biassiale, torsione, taglio biassiale e carico assiale. È importante specificare che sia le colonne che le travi si sono modellate come elementi continui senza introdurre alcun nodo lungo il loro sviluppo.

7.1.3 Sezioni trasversali

Tra gli elementi beam del modello si distinguono tre tipologie che differiscono tra loro per materiale e sezione: gli elementi colonna, diagonale e trave di materiale "guadua", e gli elementi-perni in materiale acciaio convenzionale.

In particolare per dimensionare gli elementi di materiale "guadua" si è ritenuto necessario approssimare i culmi a dei cilindri cavi le cui dimensioni caratteristiche sono il diametro esterno e lo spessore: il valore del diametro inserito nel programma è lo stesso deciso al momento del progetto, mentre gli spessori sono quelli medi calcolati durante la caratterizzazione del materiale in questa tesi. Inoltre ci sono due tipologie di elementi guadua: quelli verticali chiamati in questa

tesi elementi-colonna, che insieme agli elementi diagonali all'interno dei pannelli, hanno un diametro pari a 120 mm; mentre gli elementi-trave orizzontali che sono quelli che formano la trave "Vierendeel", di cui abbiamo parlato nel capitolo 6, hanno un diametro pari a 80mm.

Per quanto riguarda i perni invece, essi sono considerati come dei cilindri a sezione circolare, con diametro di 3/8 pollici, ossia 9,525 mm. In *Tabella 11* i materiali e le sezioni degli elementi beam del Modello.

Elementi	Materiale	Tipo sezione	Diametro mm	Spessore mm
Colonna	guadua	Pipe	120	16
Diagonali	guadua	Pipe	120	16
Trave	guadua	Pipe	80	9
Perni	acciaio	Circular	9,525	--

Tabella 11: materiali e sezioni degli elementi beam del Modello

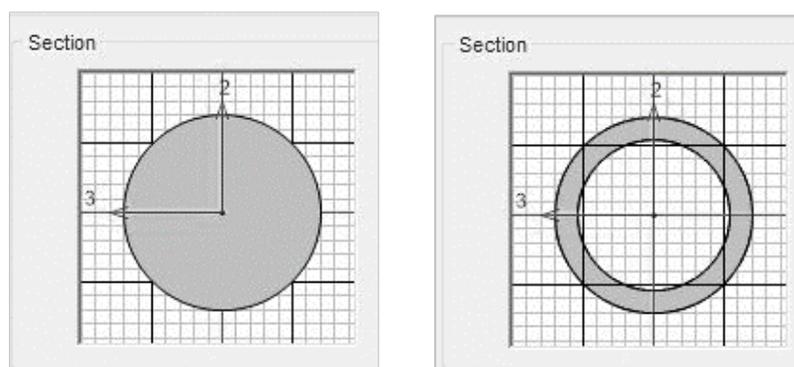


Figura 100: A sinistra: "Circular section" per l'elemento perno. A destra: "Pipe section" per l'elemento culmo di guadua.

7.1.4 Tipologie di vincolo

Gli elementi colonna, diagonale e trave orizzontale (in grigio nella *Figura 101*) sono uniti tra loro per mezzo degli elementi "perno" (in rosso in *Figura 101*); ai nodi che derivano dall'incontro degli elementi non si assegna alcun tipo di vincolo, in quanto applicando un carico orizzontale il modello è portato a spostarsi solo nel piano contenente il vettore del carico. Infatti, anche se durante la prova sperimentale si era vincolato il portico ad un ponteggio per impedire che si muovesse in direzione ortogonale al piano di carico, si è notato che non si apportava alcuna modifica ai risultati della simulazione numerica se si aggiungevano dei carrelli in corrispondenza del punto in cui il telaio era vincolato al ponteggio.

Gli unici vincoli imposti per ognuno dei due modelli di simulazione numerica sono i 4 incastrati e un appoggio all'incontro con il suolo, come è mostrato in *Figura 101*. La struttura risulta quindi iperstatica.

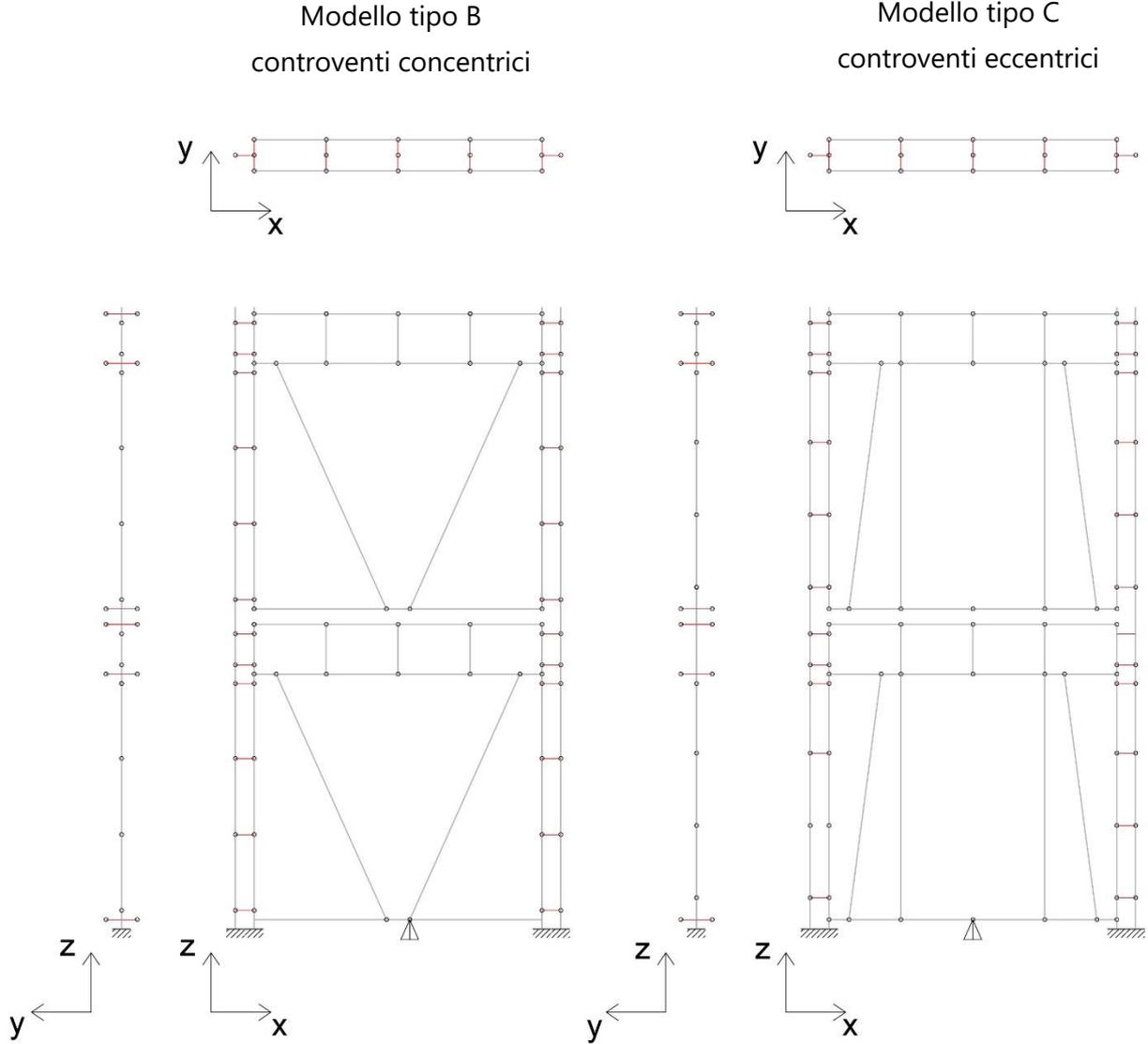


Figura 101: Modelli tipo B e tipo C.

7.1.5 Applicazione del carico

Per la simulazione numerica si è deciso di applicare il carico in modo tale da avvicinarsi il più possibile alla metodologia utilizzata durante la prova sperimentale: una forza orizzontale e puntuale in corrispondenza del nodo su cui insisteva il cilindro nella prova sperimentale, come si vede nella *Figura 93* del capitolo precedente. Inoltre i carichi impostati ad ogni modello nella simulazione numerica corrispondono a quelli applicati nella prova sperimentale. Nella *Figura 102* si può vedere la posizione in cui si è applicato il carico in tutte le simulazioni numeriche, mentre nelle *Tabella 12* e si possono confrontare gli spostamenti della prova sperimentale con quelli dell'analisi numerica relativi allo stesso carico. Inoltre è importante chiarire che il peso proprio della struttura non è stato inserito come carico durante la simulazione numerica in quanto risultava irrilevante rispetto al carico orizzontale.

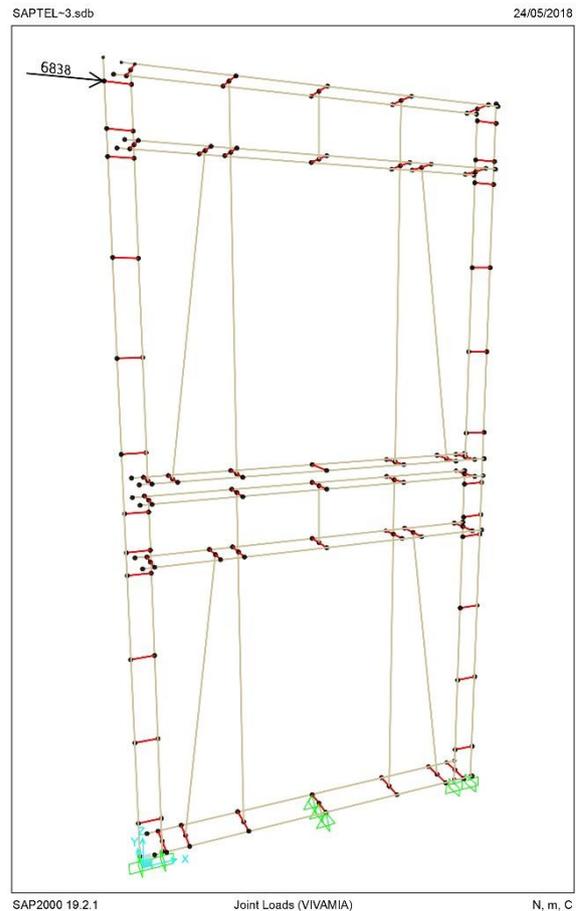


Figura 102: Applicazione di carico sul modello di tipo C con controventi eccentrici.

7.2 RISULTATI

In questo paragrafo vengono mostrati in primo luogo i dati ed i grafici dei risultati della simulazione numerica, nonché il confronto degli stessi con le prove sperimentali; successivamente inizia uno studio teorico sulle sollecitazioni a cui sono sottoposti gli elementi dei modelli simulati in SAP2000 ed infine si indagano le parti maggiormente sollecitate.

Nei Grafici 8 e 9 è rappresentata la relazione Forza-Spostamento Orizzontale delle prove dei due prototipi testati, confrontando la parte sperimentale con quella numerica. Nella prova sperimentale si erano effettuati diversi caricamenti: di ogni prova conosciamo solo il carico ultimo e lo spostamento ultimo, prima di essere riportato al punto di partenza.

Inoltre, sempre nei Grafici 8 e 9 si è evidenziata con una linea continua la traiettoria dei valori della prova sperimentale che più si avvicina ai risultati della simulazione numerica nel modello corrispondente elastico lineare (la stessa prova viene evidenziata in rosso nelle Tabelle 12 e 13): si ipotizza, quindi che il telaio durante la prova sperimentale in questione si comporti come un modello elastico lineare; mentre per le altre prove che si allontanano di molto rispetto all'andamento della simulazione eseguita con il programma di calcolo strutturale, non conoscendo

l'andamento dei valori precedenti a quello finale, si è deciso di rappresentarle con una linea tratteggiata.

Sia nel caso del Telaio B che in quello del telaio C, la simulazione numerica riesce a descrivere la rigidità del telaio nel primo caricamento. Si nota come nel grafico sperimentale (*Grafico 8 e 9*) fra il primo e il secondo caricamento si abbia già una perdita di rigidità notevole che mostra un quadro fessurativo importante. Quindi a valle della prima analisi numerica sembrano già innescarsi, come poi vedremo, i meccanismi di rottura.

TELAIO TIPO B

In *Tabella 12* vengono riportati i dati di forza spostamento relativi all'analisi sperimentale e numerica del Telaio tipo B, e viene evidenziata in rosso la prima prova che viene approssimata ad elastico lineare.

	Forza (N)	Spostam. Orizzontale Sperimentale (m)	Spostam. Orizzontale Analisi Numerica (m)	Differenza %
0	0	0	0	0
1	5452,497	0,047	0,041	12
2	6374,322	0,086	0,061	29
3	6237,029	0,241	0,060	75
4	5629,017	0,302	0,054	82
5	5213,999	0,347	0,049	85
6	4877,631	0,430	0,047	89
7	4256,086	0,503	0,041	92
8	4715,625	0,339	0,045	87
9	0	0	0	0

Tabella 12: Confronto tra lo Spostamento Orizzontale dell'Analisi sperimentale e quella Numerica. Telaio tipo B.

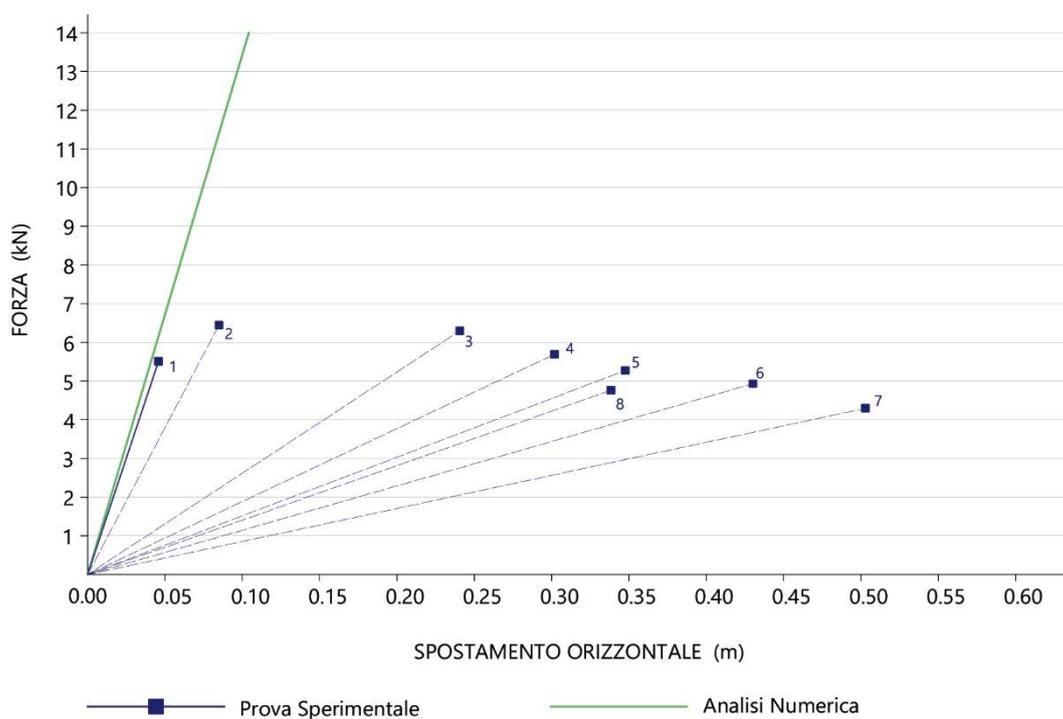


Grafico 8: Forza- Spostamento Orizzontale risultati della prova sul Telaio di tipo B. Confronto tra le prove sperimentali e la simulazione numerica.

TELAIO TIPO C

In *Tabella 13* vengono riportati i dati di forza spostamento relativi all'analisi sperimentale e numerica del Telaio tipo B, e viene evidenziata in rosso la prova che viene approssimata ad elastico lineare.

	Forza (N)	Spostam. Orizzontale Sperimentale (m)	Spostam. Orizzontale Analisi Numerica (m)	Differenza %
0	0	0	0	0
1	5815,344	0,100	0,169	69
2	6194,665	0,200	0,177	11,5
3	6433,162	0,300	0,186	38
4	6838,569	0,400	0,198	50,5
5	5895,856	0,300	0,172	43
6	5787,591	0,200	0,168	16
7	4043,576	0,100	0,116	16
8	700,097	0,050	0,020	60
9	0	0	0	0

Tabella 13: Dati di confronto tra lo Spostamento Orizzontale dell'Analisi sperimentale e quella Numerica. Telaio tipo C.

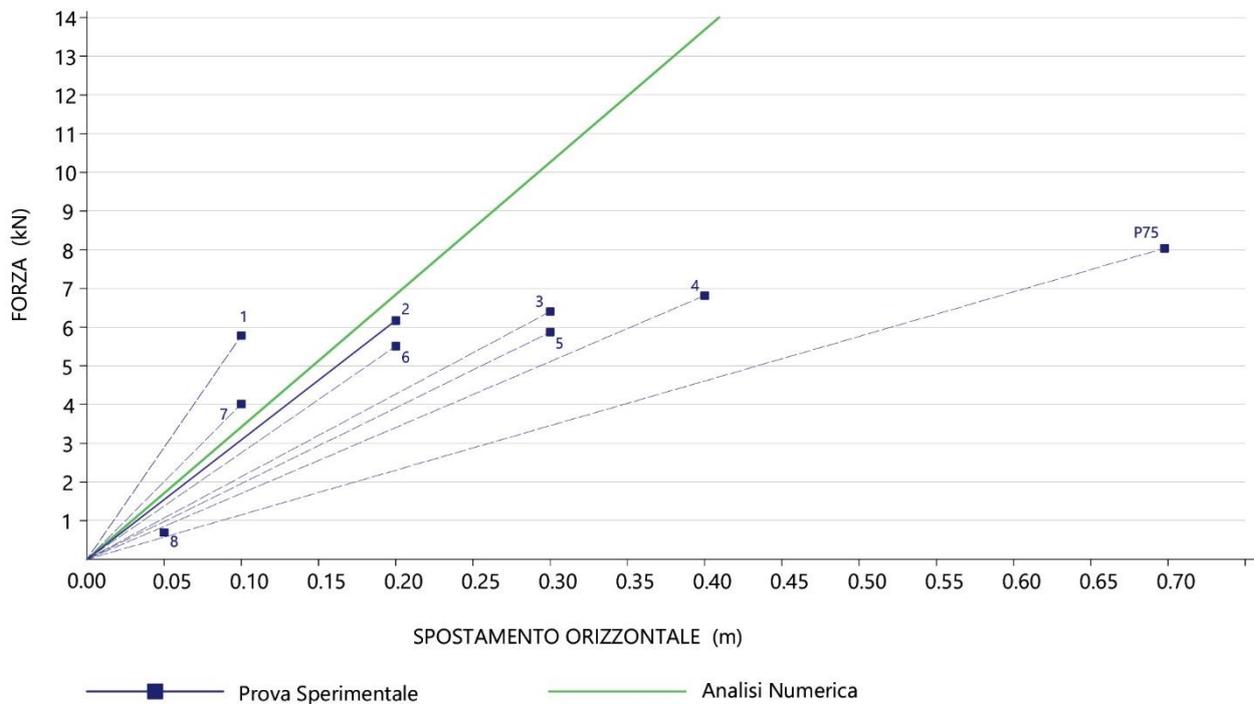


Grafico 9: Forza- Spostamento Orizzontale risultati della prova sul Telaio di tipo C. Confronto prova sperimentale e simulazioni numeriche

CONFRONTO TELAIO TIPO B E C

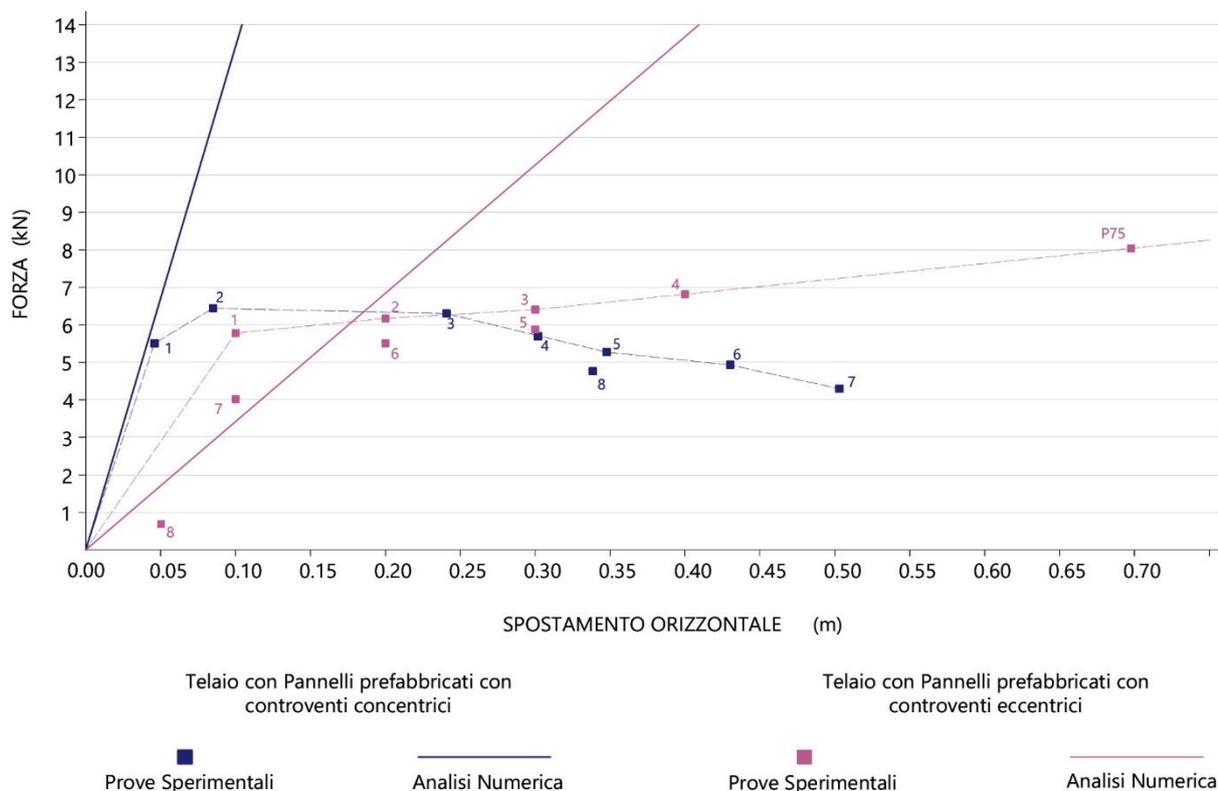


Grafico 10: Forza- Spostamento Orizzontale. Confronto tra i telai di tipo B e di tipo C, tra le prove sperimentali e le simulazioni numeriche.

Dall'osservazione dei dati e dei grafici appena mostrati, si possono evidenziare le analogie e le differenze riscontrate nelle due tipologie di telaio:

- Sia nel diagramma del modello tipo B che in quello di tipo C si nota che il telaio nel primo caricamento si avvicina molto ai risultati della simulazione numerica elastico lineare. Nei risultati successivi, invece, si ha una perdita di rigidezza da parte del telai testati sperimentalmente. Questo è sicuramente dovuto alla rottura di alcuni dei culmi nelle parti maggiormente sollecitate.
- Il telaio di tipo B risulta notevolmente più rigido rispetto al telaio di tipo C, sia nella simulazione numerica che in quella sperimentale; questo è dovuto alla maggiore inclinazione dei controventi diagonali.

La linea tratteggiata nel Grafico 10, mostra l'andamento dei risultati consecutivi delle prove sperimentali di ogni Telaio. Si nota come il telaio di tipo B oltre a diminuire di prova in prova la sua rigidezza, ha anche una perdita di resistenza; al contrario nel telaio di tipo C, dopo aver perso

gran parte della sua rigidità in seguito alla plasticizzazione, si nota che all'aumentare del carico continua ad aumentare lo spostamento relativo del telaio fino ad un massimo di 700 mm.

La *Figura 103* mostra le deformate ottenute con la simulazione numerica dopo aver applicato il carico orizzontale e evidenzia come le deformate reali ricalchino i risultati numerici.



Figura 103: Deformate caratteristiche dopo aver applicato il carico orizzontale (Sopra in analisi numerica; sotto durante la prova sperimentale)

7.2.1 Diagrammi delle caratteristiche di sollecitazione

In questo paragrafo si mostrano i diagrammi delle caratteristiche di sollecitazione riferiti alla simulazione numerica dell'analisi elastica lineare utilizzando il modello precedentemente descritto. È stato importante eseguire quest'analisi in quanto ci permette di individuare le parti maggiormente sollecitate per poi studiarle indagando le cause che hanno provocato la rottura dei culmi corrispondenti durante la prova sperimentale.

I segni e il tracciamento dei diagrammi seguono le convenzioni rappresentate sul concio elementare in *Figura 104*:

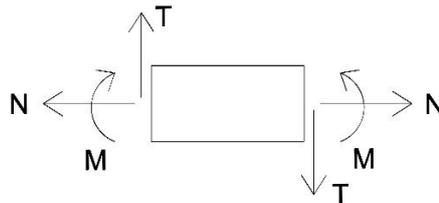


Figura 104

Riferendosi alle caratteristiche positive indicate sul concio elementare di *Figura 104*, si vuole dire che: lo sforzo assiale N è positivo se genera trazione; il taglio T è positivo se tende a far ruotare il concio in senso orario; il Momento Flettente M è positivo se tende ad allungare il lembo inferiore. (25)

Nelle pagine successive si presentano rispettivamente i diagrammi di sforzo normale, sforzo di taglio, e momento flettente secondo y , del telaio tipo B e di quello di tipo C. Per una lettura chiara dei diagrammi è utile specificare alcuni dettagli:

- In ogni disegno i diagrammi sono proporzionati tra loro e servono solo a dare una visione qualitativa dello sforzo, mentre la visione quantitativa è esplicitata dal valore in numerico, posto subito al lato del diagramma corrispondente. Le unità di misura sono in Newton (N) nel caso di sforzo normale o a taglio, e in Newton metro (N·m) nel caso del momento flettente.
- Per una migliore comprensione dei diagrammi è stato necessario dividere ogni tipologia di sforzo in due disegni, in modo da poter mostrare tutte le azioni interne nella maniera più leggibile possibile.

SFORZO ASSIALE- MODELLO TIPO B

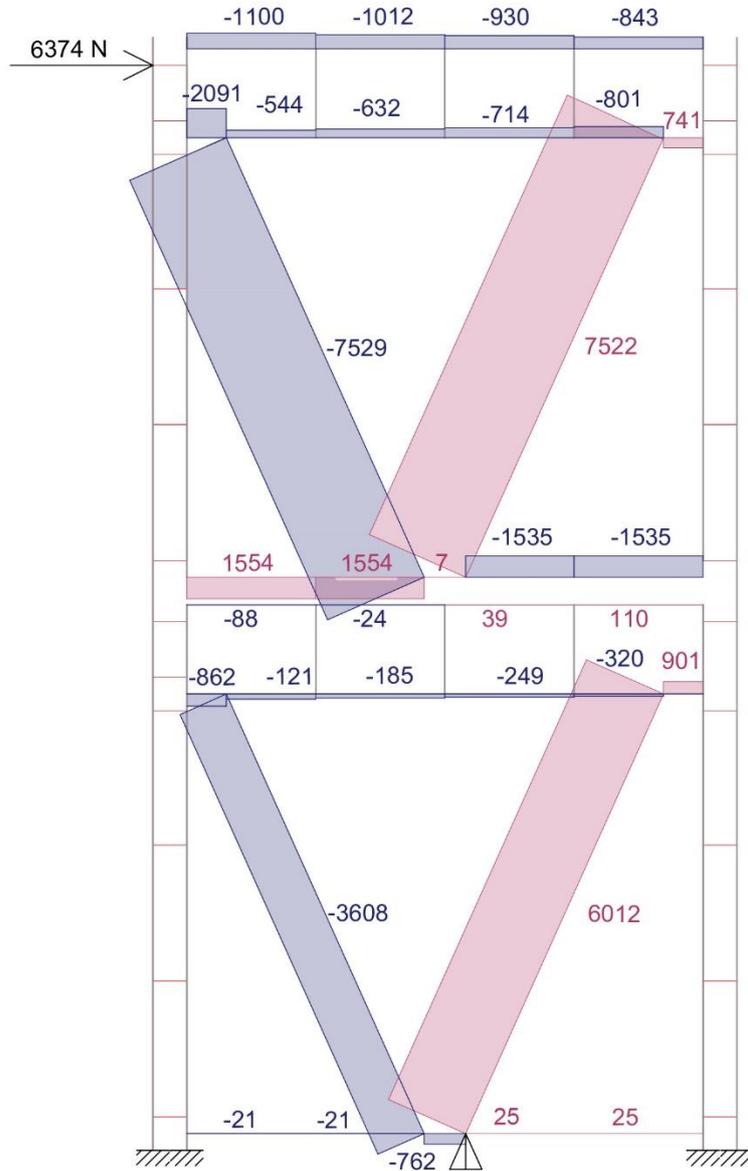


Figura 105: Modello tipo B, controventi concentrici. SFORZO ASSIALE

SFORZO ASSIALE- MODELLO TIPO B

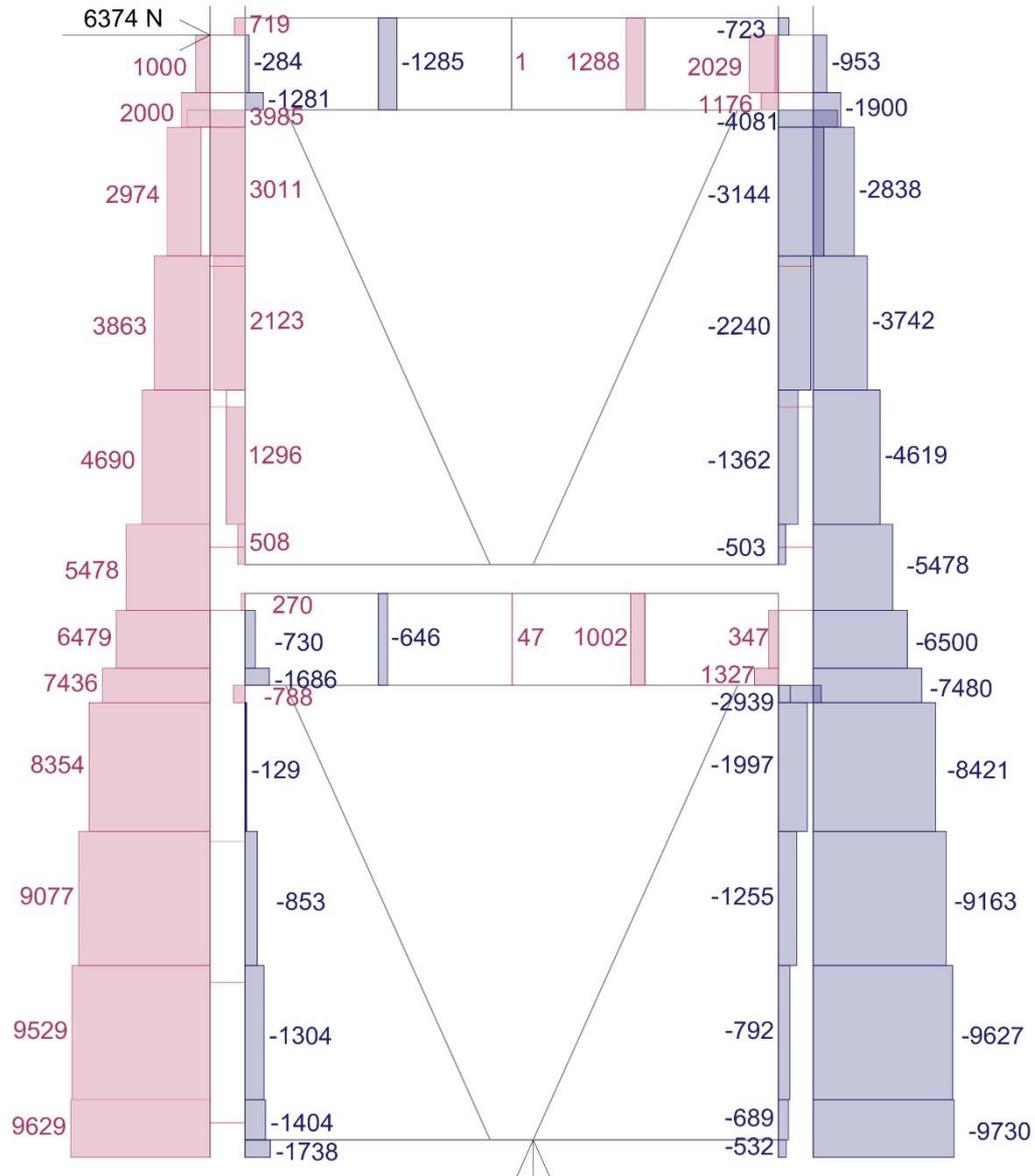


Figura 106: Modello tipo B, Controventi concentrici. SFORZO ASSIALE

SFORZO DI TAGLIO - MODELLO TIPO B

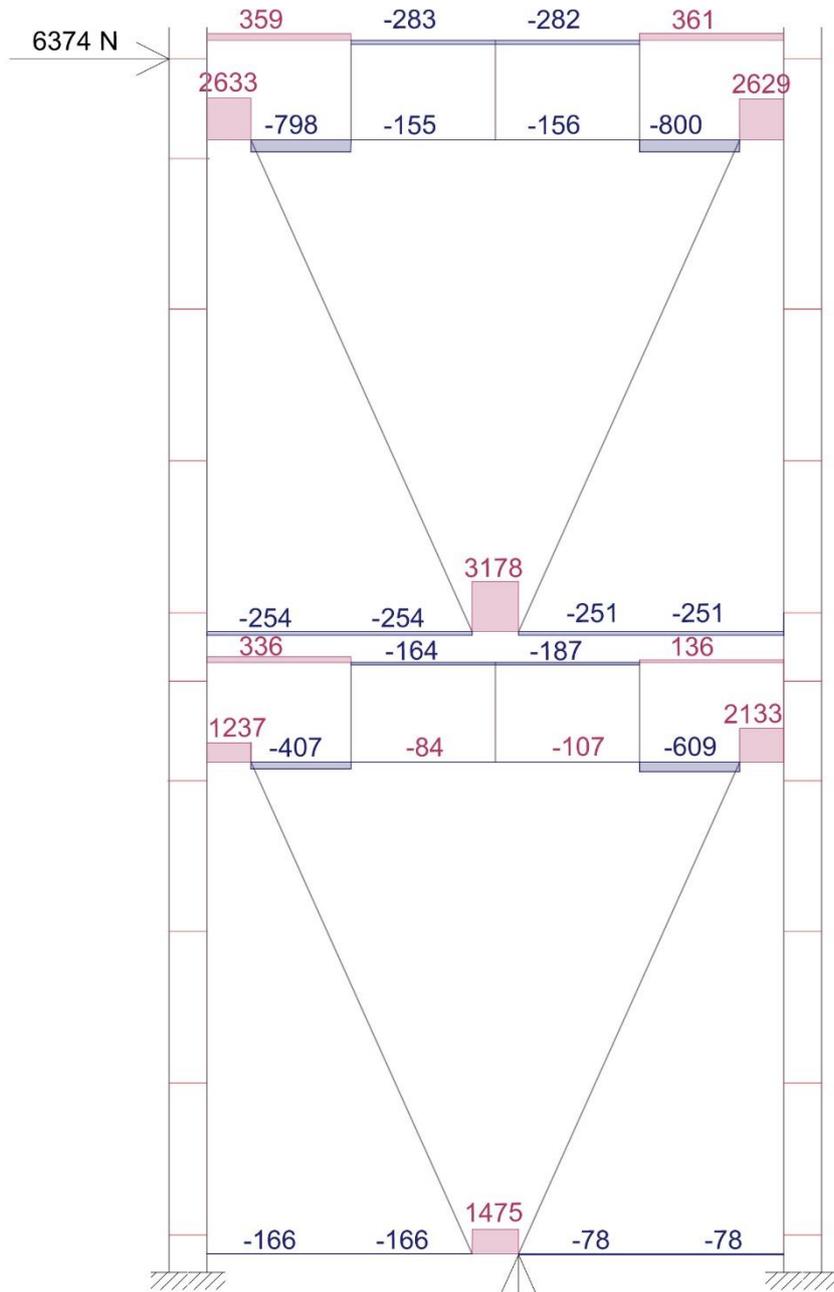


Figura 107: Modello tipo B, Controventi concentrici. SFORZO DI TAGLIO

SFORZO DI TAGLIO - MODELLO TIPO B

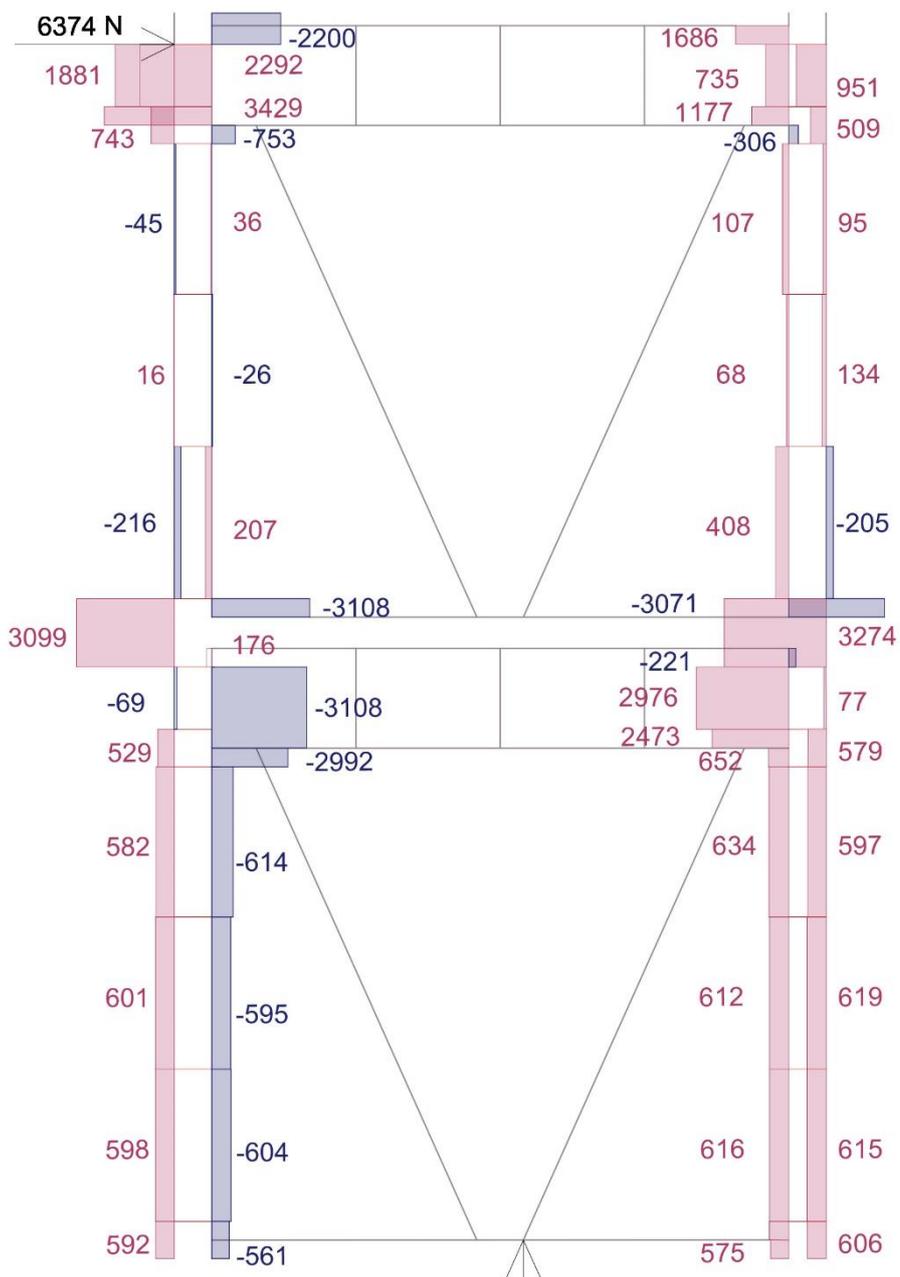


Figura 108: Modello tipo B, Controventi concentrici. SFORZO DI TAGLIO

MOMENTO FLETTENTE RISPETTO Y- MODELLO TIPO B

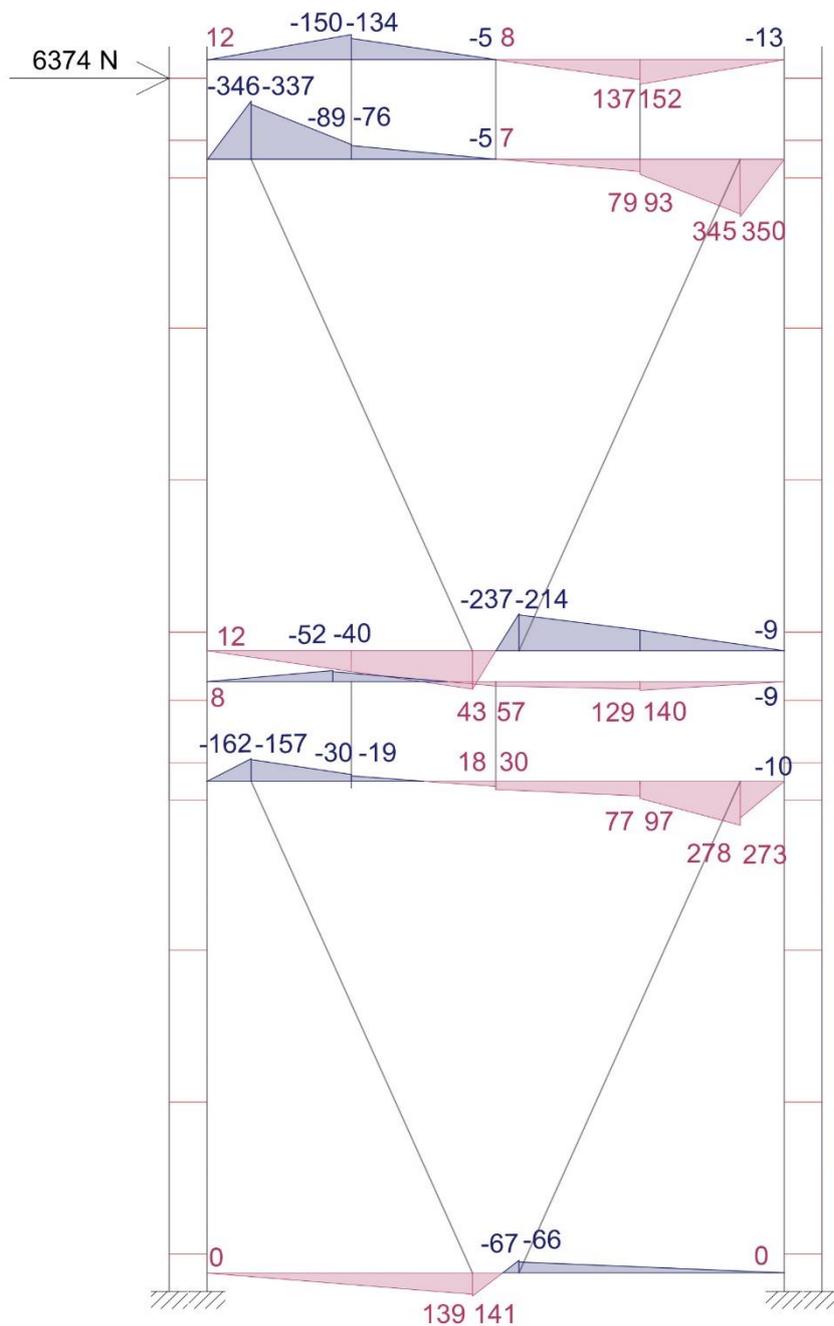


Figura 109: Modello tipo B, Controventi concentrici. MOMENTO RISPETTO ALL'ASSE Y.

MOMENTO FLETTENTE RISPETTO Y- MODELLO TIPO B

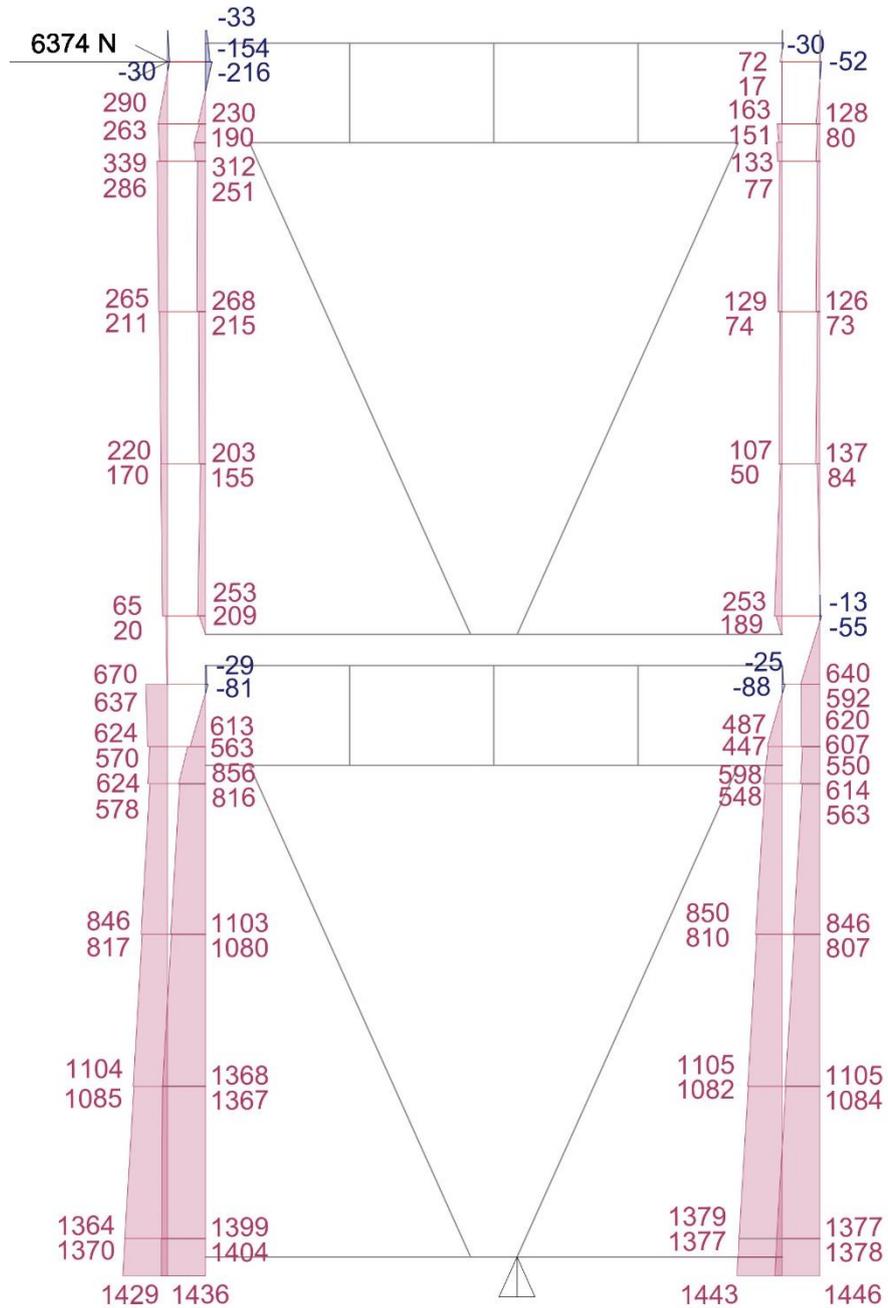


Figura 110: Modello tipo B, Controventi concentrici. MOMENTO RISPETTO ALL'ASSE Y

SFORZO ASSIALE- MODELLO TIPO C

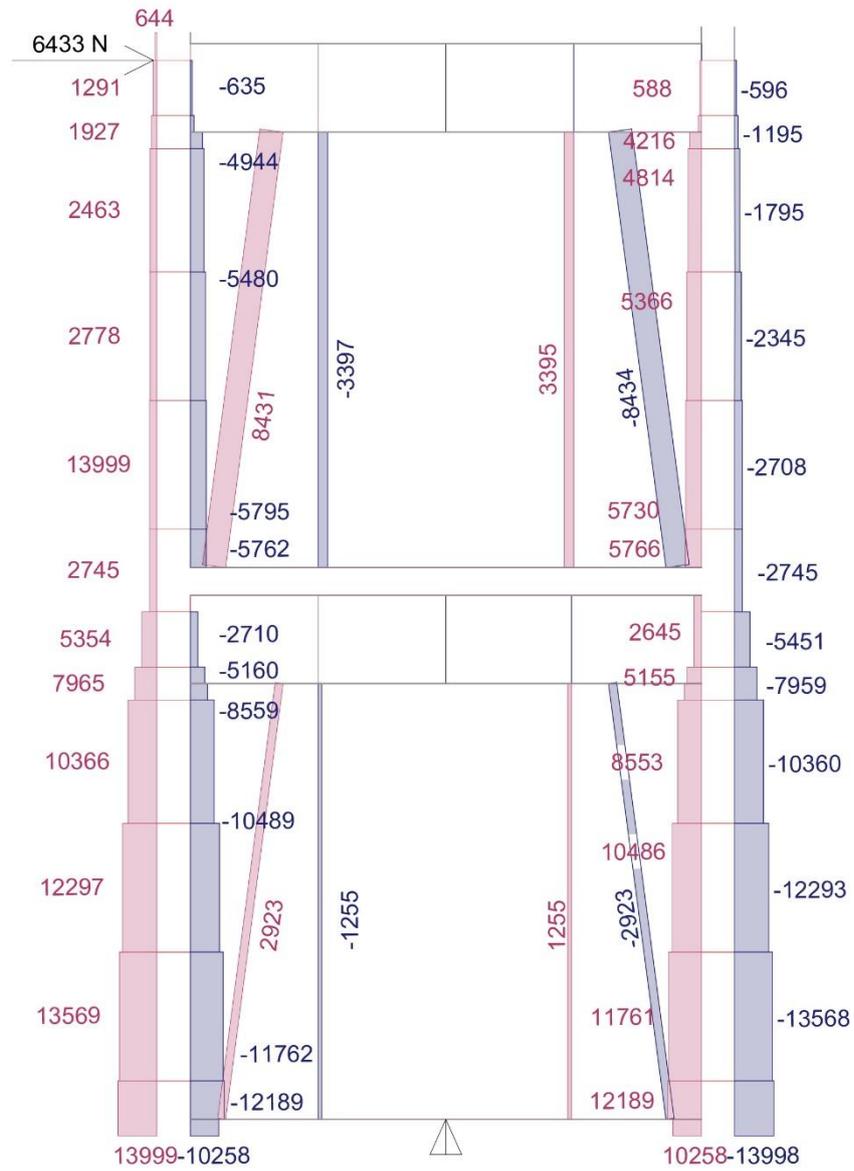


Figura 111: Modello tipo C, Controventi eccentrici. SFORZO ASSIALE

SFORZO ASSIALE- MODELLO TIPO C

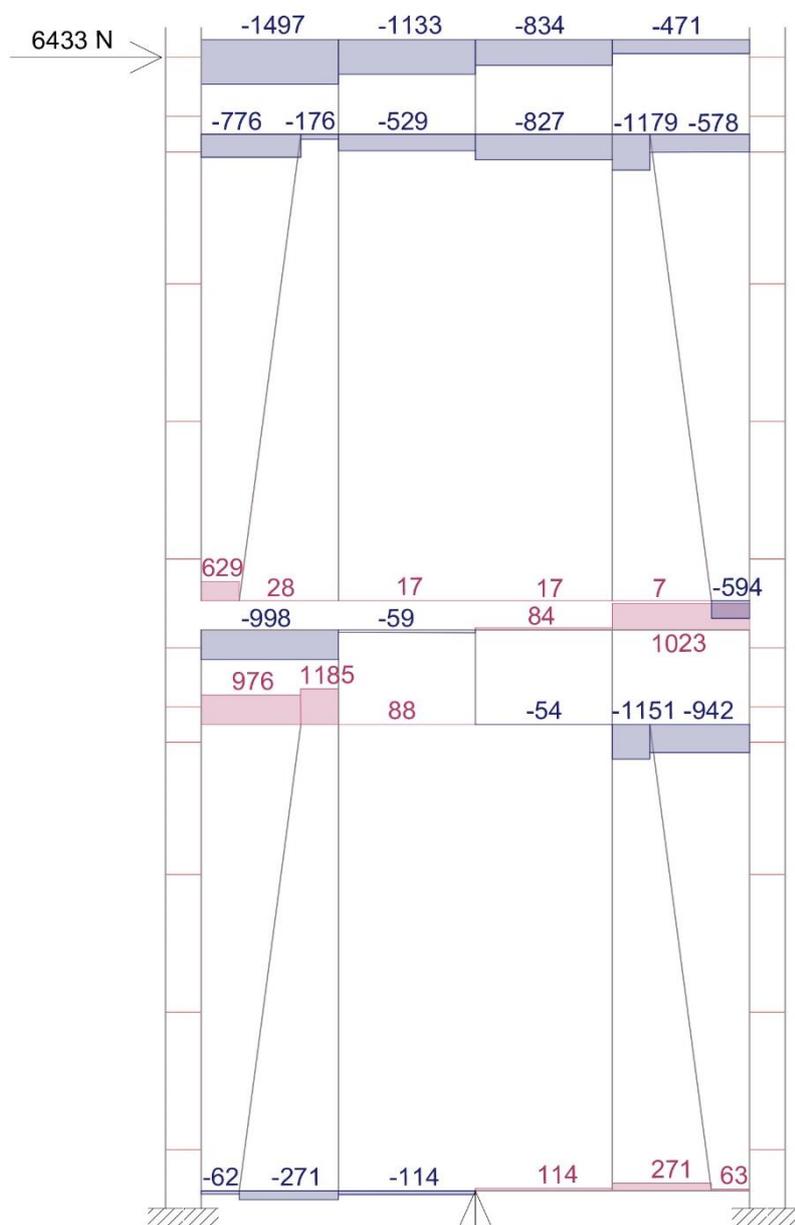


Figura 112: Modello tipo C, Controventi eccentrici. SFORZO ASSIALE

SFORZO DI TAGLIO- MODELLO TIPO C

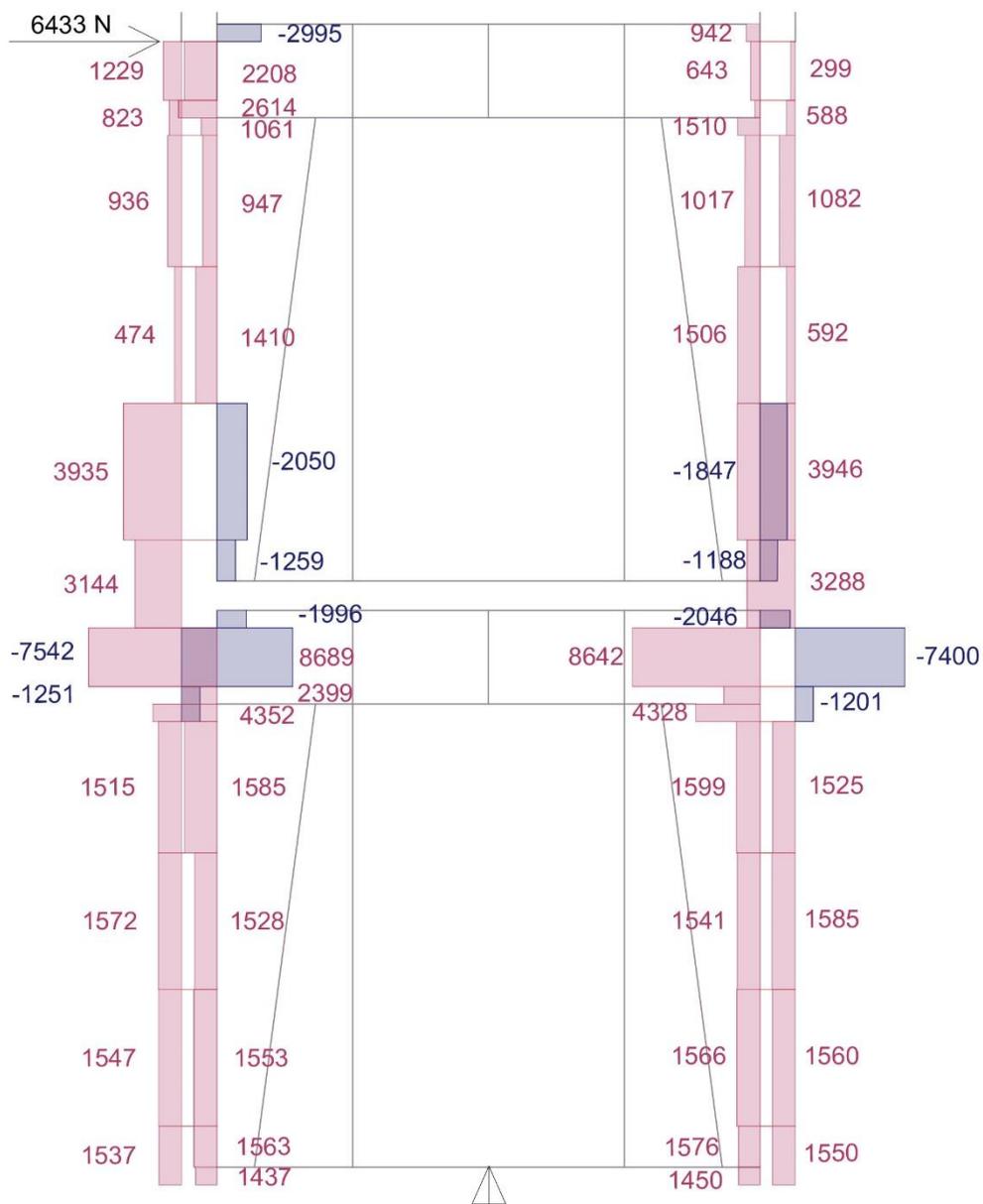


Figura 113: Modello tipo C, Controventi eccentrici. SFORZO DI TAGLIO

SFORZO DI TAGLIO- MODELLO TIPO C

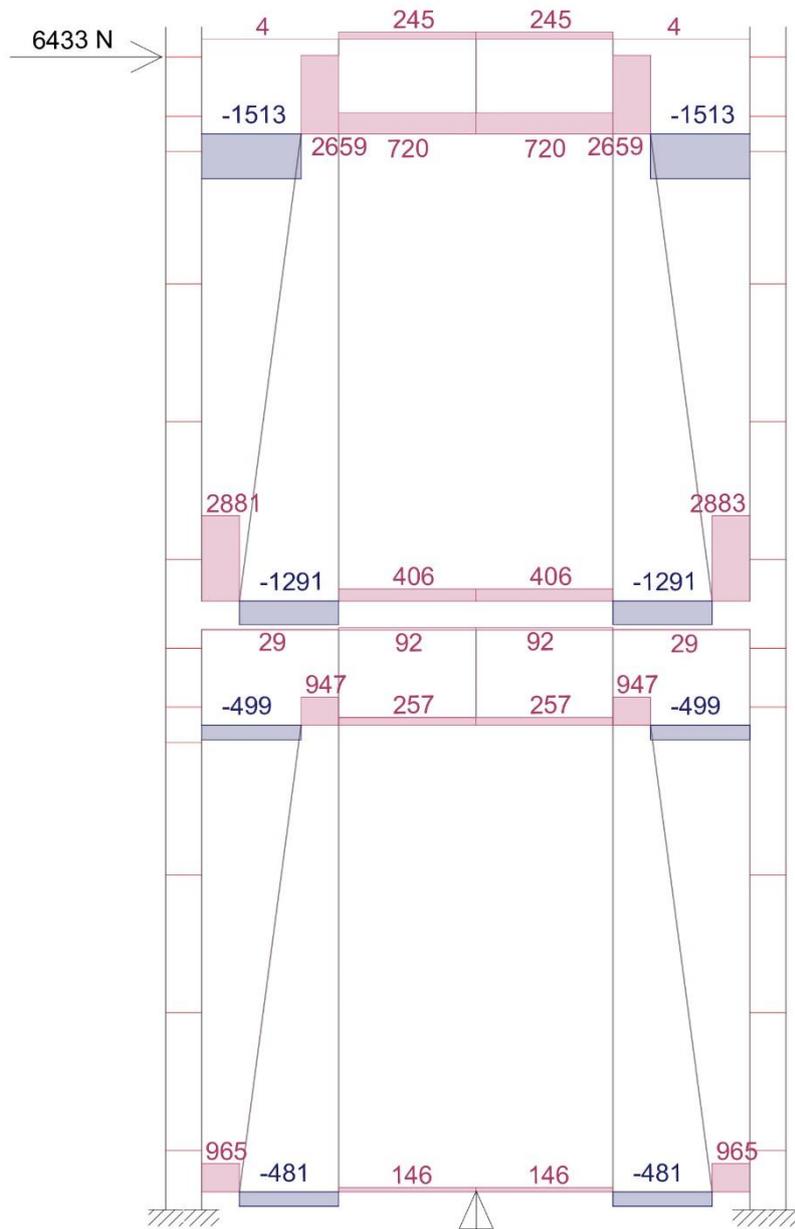


Figura 114: Modello tipo C, Controventi eccentrici. SFORZO DI TAGLIO

MOMENTO FLETTENTE RISPETTO Y- MODELLO TIPO C

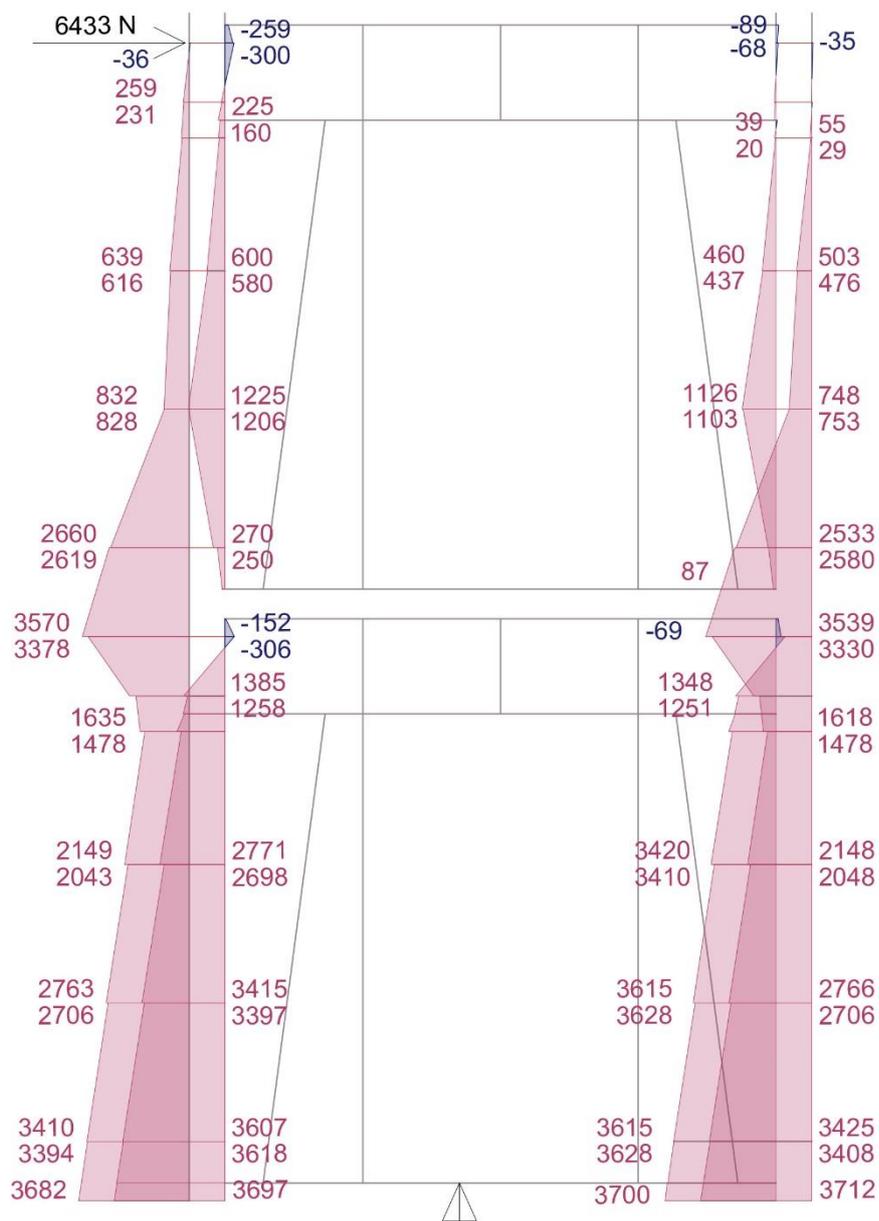


Figura 115: Modello tipo C, Controventi eccentrici. MOMENTO RISPETTO ALL'ASSE Y

MOMENTO FLETTENTE RISPETTO Y- MODELLO TIPO C

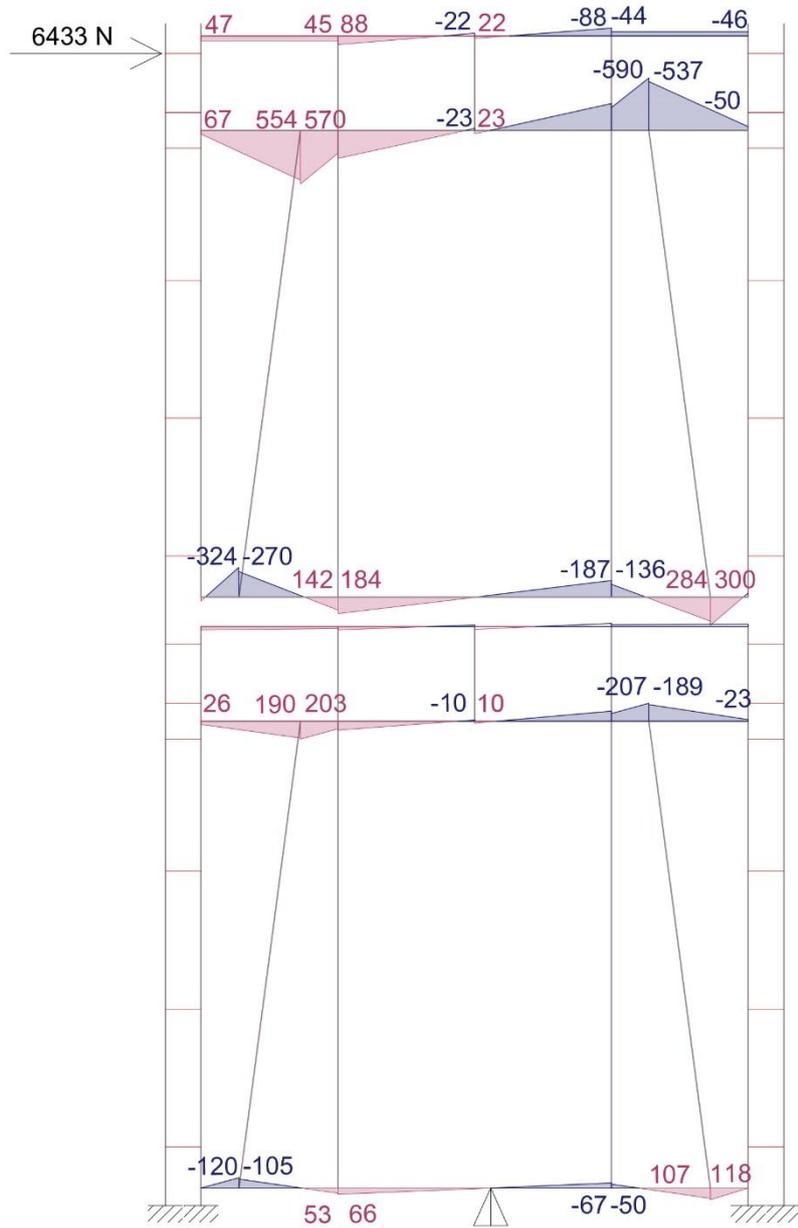


Figura 116: Modello tipo C, Controventi eccentrici. MOMENTO RISPETTO ALL'ASSE Y.

I disegni appena mostrati forniscono una percezione della risposta strutturale e del modo in cui le sollecitazioni si distribuiscono lungo gli elementi strutturali.

A partire dai diagrammi che risultano dalla simulazione numerica, è possibile proseguire con uno studio più approfondito sulle parti maggiormente sollecitate, per poi indagare le cause che hanno provocato fessure o meccanismi di rottura in alcuni punti localizzati dei culmi durante la prova sperimentale.

Sia gli elementi del modello B che quelli del modello C, sono prevalentemente sollecitati a sforzo assiale; inoltre in entrambi i modelli in corrispondenza degli incastri, sia il valore del taglio che quello del momento flettente sono particolarmente alti.

In particolare nel Modello di tipo B, come si vede in *Figura 117*, le parti più sollecitate sono:

- Per quanto riguarda gli sforzi assiali, gli elementi maggiormente sollecitati sono i controventi diagonali, specialmente quelli del pannello superiore, nonché la parte degli elementi colonna in corrispondenza dell'incastro dove raggiungono i 9700 N.
- Gli sforzi di taglio maggiori si trovano nei tratti dei culmi orizzontali, in corrispondenza dell'incontro con i controventi diagonali;
- Il momento flettente maggiore si trova in corrispondenza degli incastri, e all'incontro delle travi orizzontali con i controventi diagonali.

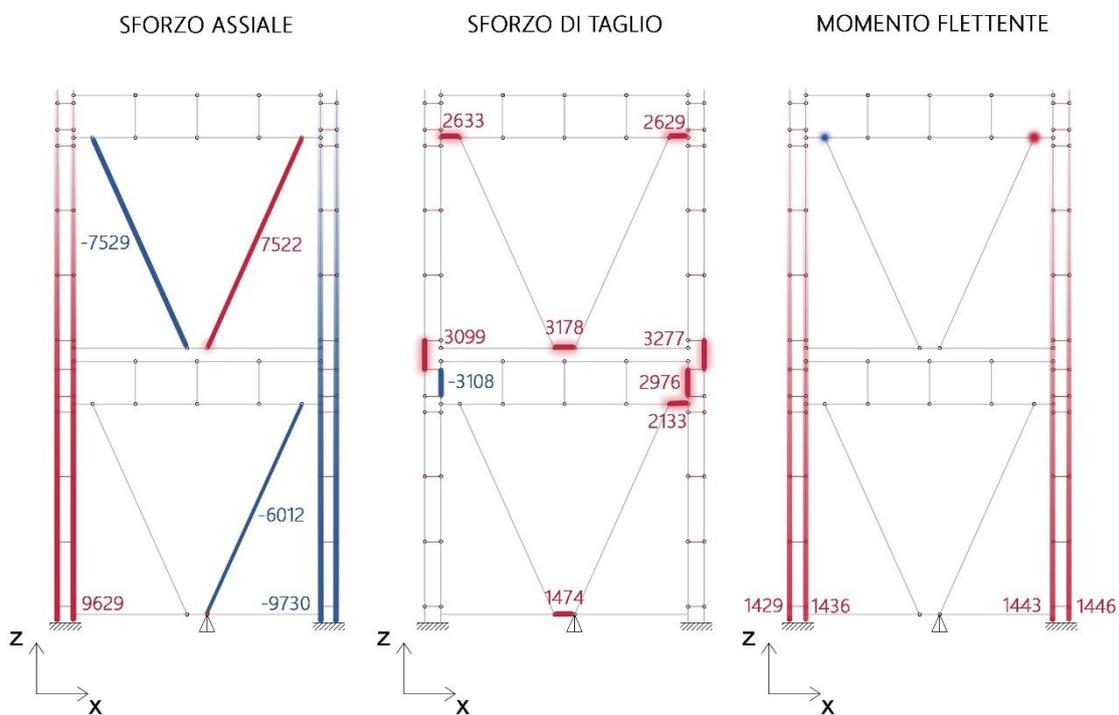


Figura 117: Modello tipo B. Elementi maggiormente sollecitati

Nel modello C *Figura 118*, si hanno le stesse criticità del Modello B appena descritte: si hanno infatti dei valori piuttosto alti di sforzo assiale nei controventi diagonali e negli elementi colonna in corrispondenza degli incastri; si hanno dei valori di sforzo di taglio abbastanza alti nei tratti di

elementi orizzontali connessi con i controventi diagonali, ed ovviamente dei valori di momento flettente maggiori in corrispondenza degli incastri. L'unica differenza del modello C rispetto a quello B è una concentrazione degli sforzi sui due elementi colonna a doppia altezza in corrispondenza della parte inferiore del pannello superiore: in questo punto i due controventi diagonali scaricano il carico verso l'esterno, e spingendo le colonne a doppia altezza si hanno dei valori di taglio e di momento abbastanza elevati.

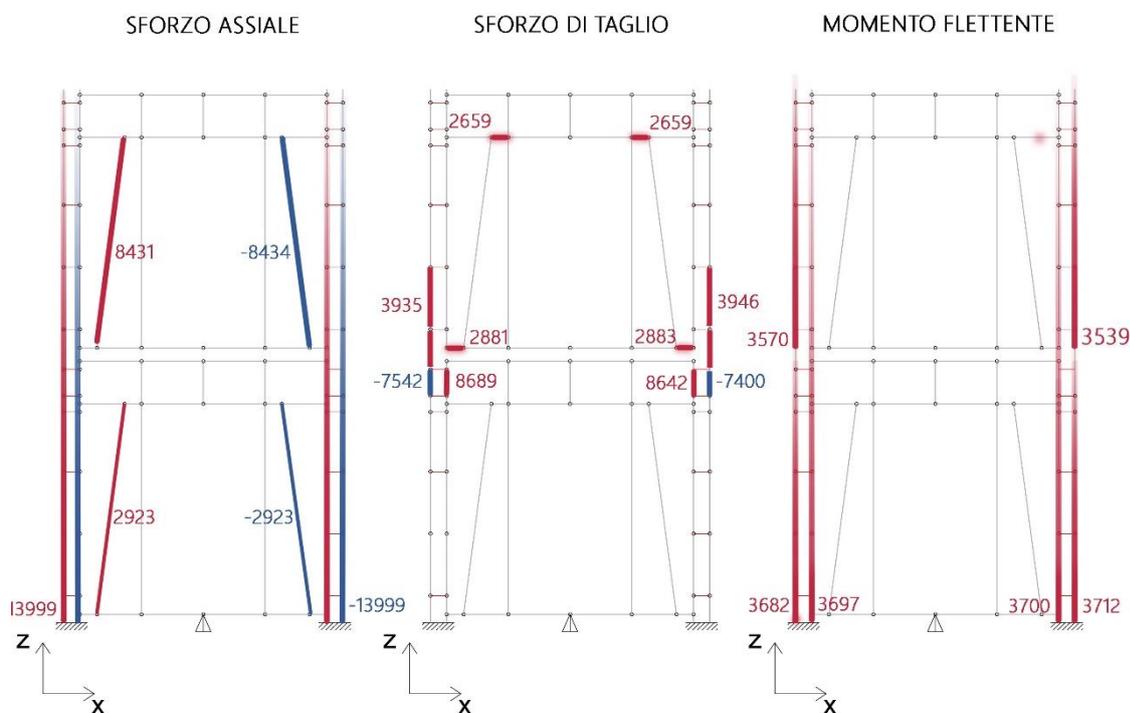


Figura 118: Modello tipo C. Elementi maggiormente sollecitati

A questo punto è necessario verificare se e dove gli sforzi distribuiti sugli elementi dei modelli superano quelli di rottura.

Per quanto riguarda le Aree, si sono considerate:

- a) Per i culmi trave orizzontali, il valor pari alla media aritmetica delle aree dei culmi di diametro 8 cm circa: 2250mm^2 .
- b) Per i culmi colonna e diagonale, il valore pari alla media aritmetica tra le aree dei culmi di diametro di circa 12 cm: 4874mm^2 .

Le tensioni ultime prese in considerazione sono:

- a) Le tensioni ultime a compressione e a taglio parallele alla fibra sono state considerate quelle individuate nella caratterizzazione del materiale di questa tesi. I valori sono rispettivamente di 49,96 Mpa e di 8,46 Mpa.
- b) Come valore della tensione ultima a trazione parallela alla fibra, dato che non si era svolta questa prova sul materiale, è stato preso in considerazione il valore ricavato nella tesi di Diego Malaver (20) pari a 146,3 Mpa.

I dati e i rispettivi carichi di rottura sono riassunti nella *Tabella 14* che segue:

TIPO di SFORZO Parallelo alle fibre	TENSIONE ULTIMA associata (Mpa)	CARICO DI ROTURA (N)	
		Culmi Diam 12 cm $A_{D12}=4874\text{mm}^2$	Culmi Diam 8 cm $A_{D8}=2250\text{mm}^2$
COMPRESSIONE	49,96	243 505,04	112 410
TRAZIONE	146,3	713 066,2	329 175
TAGLIO	8,46	41 234,04	19 035

Tabella 14: Carichi di rottura per i culmi di progetto

Come emerge dalla *Tabella 14*, i valori di carico di rottura necessari a fessurare i culmi dei modelli sono di un ordine di grandezza superiore rispetto agli sforzi risultanti dalle simulazioni numeriche.

Questo risultato ci fa dedurre che le fessure che risultano dalle prove sperimentali non siano dovute alla bassa resistenza del materiale che costituisce il telaio, bensì alla concentrazione in corrispondenza dei nodi delle sezioni maggiormente sollecitate.

Nelle sezioni delle giunzioni si hanno infatti delle concentrazioni di sforzo dovute in parte al restringimento della sezione ma soprattutto alla presenza della spina caricata nel foro.

Sulla concentrazione di sforzo dovuta al restringimento della sezione sono state fatte alcune indagini sulla guadua da due studenti dell'Universidad Nacional de Colombia con l'ingegner Takeuchi Tam nel 2013 che nella loro tesi (27), indagano la concentrazione degli sforzi in corrispondenza dei fori nei culmi di *Guadua angustifolia* Kunth.

Per osservare la concentrazione degli sforzi causati dalla presenza del foro sulla parete del culmo i due studenti hanno utilizzato il programma di simulazione numerica Cosmos DesignStar 3.0.

Nella *Figura 119* si può osservare la concentrazione di sforzi di compressione (segno negativo) sui bordi laterali del foro, il color rosso scuro in questi punti rappresenta i valori massimi di compressione (metti di quanto si incrementa). Inoltre nascono sforzi di trazione (valori positivi) che si trovano nel modello in corrispondenza della "chiusura" dei nodi ($13,54\text{kg/cm}^2$).

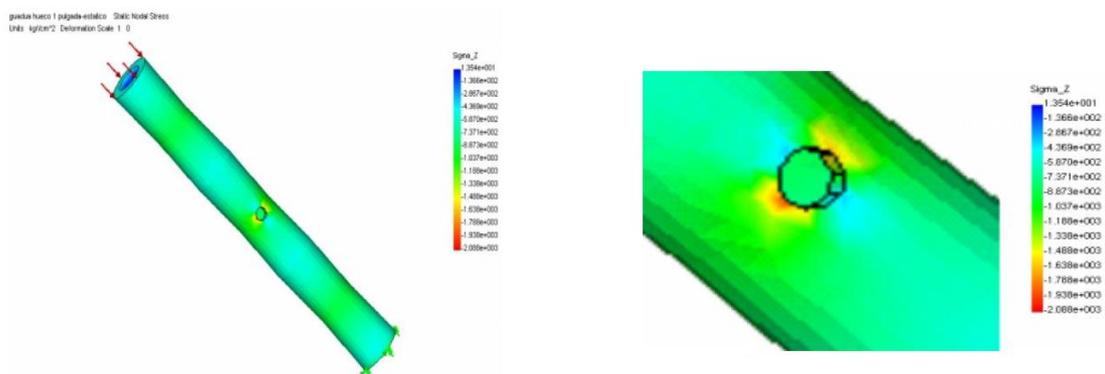


Figura 119: Variazione degli sforzi in direzione z; Modello 2 con perforazione. Destra concentrazione degli sforzi attorno alla perforazione. Fonte (27)

7.3 STUDIO TEORICO DELLE SEZIONI MAGGIORMENTE SOLLECITATE

In questo paragrafo verranno approfondite sia le sezioni particolarmente sollecitate secondo i risultati di simulazione numerica che quelle sezioni che sono risultate più vulnerabili durante la prova sperimentale. Questo ci permette di indagare le cause che hanno provocato le fessure durante la prova sperimentale, per porre le basi per una proposta migliorativa sui prototipi oggetto di studio.

7.3.1 Analisi del Nodo 1: Diagonale Sganciata

In *Figura 120* la localizzazione del Nodo 1 e del Nodo 2 (il quale verrà analizzato nel prossimo paragrafo). Mentre in *Figura 121* la foto del Nodo 1 durante la fase sperimentale.

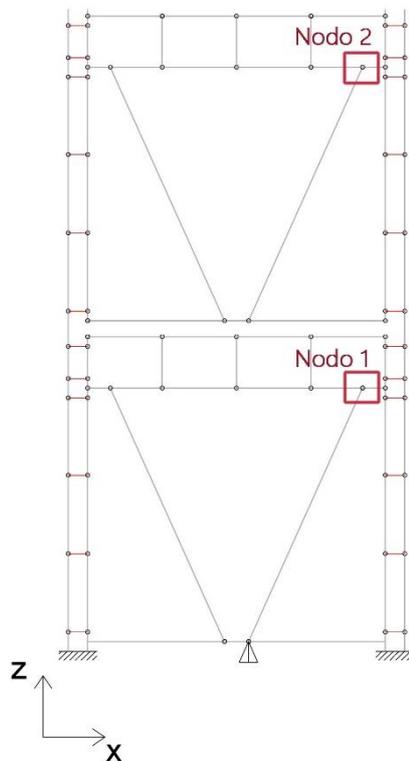


Figura 120: localizzazione Nodo 1 e Nodo 2



Figura 121: Foto della diagonale sganciata in corrispondenza del Nodo 1 oggetto di studio

Il meccanismo di rottura del nodo 1 può essere associato al caso teorico descritto nel libro Costruzioni di Macchine di F. Caboni (28) schematizzato in Figura 122.

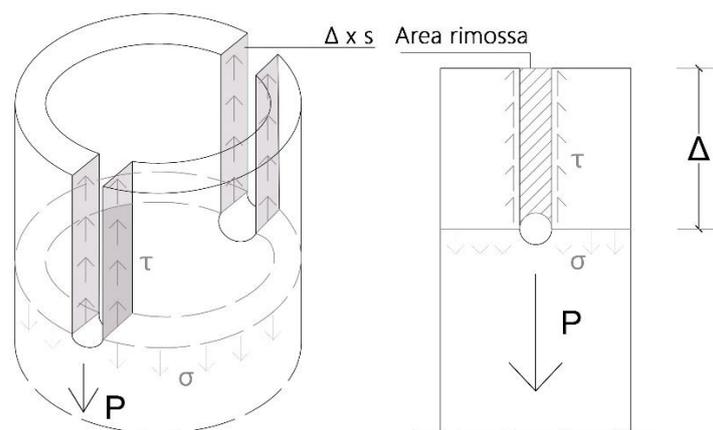


Figura 122: Schema teorico Nodo 1

Per trovare il calcolo delle tensioni tangenziali τ si utilizza la seguente equazione:

$$\bullet \quad \tau = \frac{P}{\Delta \times s \times 4} \left(\frac{3}{2} \right) \quad \tau \leq \tau_{ult}$$

Essendo:

Δ la distanza indicata in *Figura 122*, in questo caso pari a 30mm;

s lo spessore del culmo nella sezione in esame, pari a 12,3mm;

P è lo sforzo assiale che risulta dalla simulazione numerica, pari a 6012 N;

Inoltre sappiamo dalla caratterizzazione del materiale, che $\tau_{ult\ MEDIA}$ è pari a 8,46 MPa, mentre la τ_{ult} del culmo in esame è di 6,06 Mpa;

In definitiva si ha che la tensione tangenziale nella sezione in esame supera la tensione tangenziale ultima parallela alla fibra calcolata per i culmi di questo progetto:

$$\bullet \quad \tau = \frac{6012 \text{ N}}{30\text{mm} \times 12,3\text{mm} \times 4} \left(\frac{3}{2}\right);$$
$$\tau = 6,11 \text{ Mpa} \quad \geq \quad \tau_{ult}$$

Nella realtà infatti si generano due sezioni di scorrimento per ogni spina, a causa dell'ortotropia del materiale.

7.3.2 Analisi del Nodo 2

Il Nodo 2 è stato preso in considerazione per questa analisi in quanto costituisce un termine di confronto per il Nodo 1. In questo caso infatti, anche se dai dati della simulazione numerica la sezione in esame risulta maggiormente sollecitata rispetto alla sezione del Nodo 1, in questo caso la diagonale non si sgancia. Questo avviene poiché sia il valore di Δ che il valore dello spessore s sono maggiori rispetto a quelli del Nodo 1, e questo porta ad avere un valore di τ minore, che non supera τ_{ult} .

Si riportano i dati della sezione del nodo 2:

Δ la distanza indicata in *Figura 122*, in questo caso pari a 50 mm;

s lo spessore del culmo nella sezione in esame, pari a 17 mm;

P è lo sforzo assiale che risulta dalla simulazione numerica, pari a 7522 N;

Inoltre sappiamo dalla caratterizzazione del materiale, che $\tau_{ult\ MEDIA}$ è pari a 8,46 MPa;

In questo caso la tensione tangenziale massima è inferiore a quella ammissibile:

$$\bullet \quad \tau = \frac{7522 \text{ N}}{50\text{mm} \times 17\text{mm} \times 4} \left(\frac{3}{2}\right);$$
$$\checkmark \quad \tau = 3,31 \text{ Mpa} \quad \leq \quad \tau_{ult}$$

In corrispondenza di questo nodo infatti, la diagonale non si apre, e non si hanno fessure preoccupanti.

In ultima analisi, per conoscere lo sforzo assiale del culmo diagonale per il quale si ha il meccanismo di rottura appena esaminato sulla sezione maggiormente sollecitata nel modello di tipo B, possiamo utilizzare la seguente equazione:

$$\tau_{ult} = \frac{\text{Carico di rottura (N)}}{50\text{mm} \times 17\text{mm} \times 4 \left(\frac{3}{2}\right)};$$

$$\text{Carico di rottura (N)} = 8,46 \text{ Mpa} \times 50\text{mm} \times 17\text{mm} \times 8/3 = 19\,176 \text{ N}$$

7.3.3 Analisi Nodo 3

Si è ritenuto necessario studiare il nodo 3 evidenziato in Figura 123, in quanto oltre ad essere uno dei punti più sollecitati a taglio, rappresenta anche una delle parti più lesionate durante la prova sperimentale. In Figura 124, la foto del Nodo 3 in fase sperimentale.

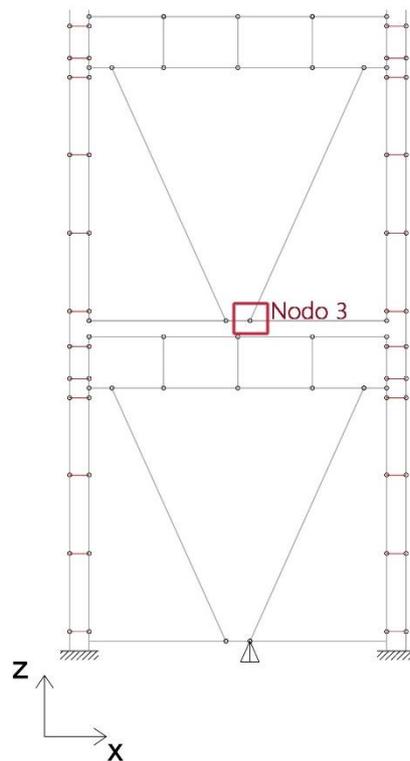


Figura 123: localizzazione Nodo 3



Figura 124: Foto Nodo 3

Per l'analisi di questo nodo si è proceduto all'analisi delle tensioni sulla sezione in esame, valutando le caratteristiche della sollecitazione interna. Nel nostro caso avremo lo sforzo di taglio secondo z T_z , Lo sforzo assiale o normale N , e il momento flettente secondo y M_y .

Riferendoci al principio di Saint-Venant, (25) :“ La sostituzione di un dato sistema di forze, su una porzione limitata di un solido, con un altro sistema ad esso equivalente, non altera lo stato tensionale a sufficiente distanza dalla zona caricata”, disegniamo le caratteristiche di sollecitazioni interna sulla porzione limitata di solido adiacente alla sezione in esame.

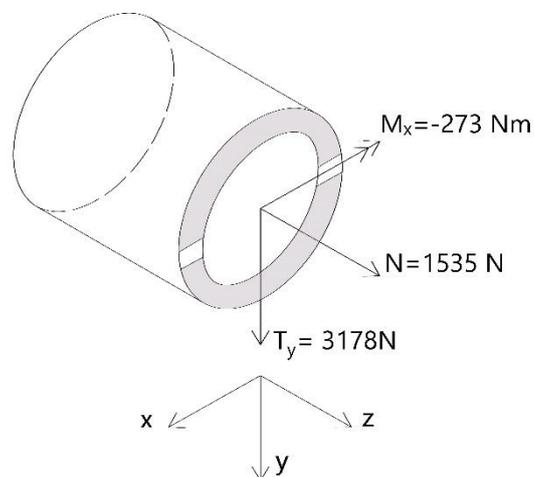


Figura 125: Nodo 3. Caratteristiche di sollecitazione interna.

SFORZO ASSIALE Nodo 3

Lo stato tensionale monoassiale dato dallo Sforzo assiale, è descritto dalla *Figura 126*. La tensione è costante su tutti i punti della sezione (25):

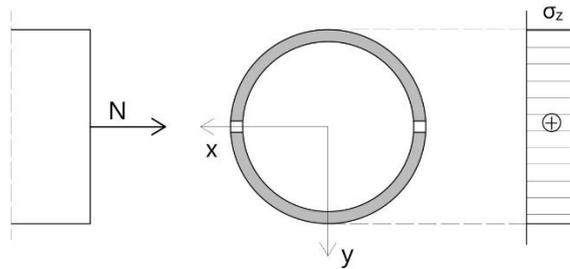


Figura 126: Diagramma delle tensioni. SFORZO ASSIALE

Il valore della tensione normale è dato dalla formula:

$$\sigma_z = \frac{N}{A_{tot}}$$

dove,

N è lo sforzo assiale associato alla sezione in esame, che risulta dalla simulazione numerica del Modello di tipo B, pari a 1535 N.

A_{tot} è data dal valore medio delle aree dei culmi con diametro di 8cm pari a 2251mm^2 , a cui viene sottratta l'Area della parte forata occupata dalla barra filettata di acciaio pari allo spessore del culmo (9 mm) per il diametro della barra filettata (9,525 mm).

$$A_{tot} = A - A_{foro} = 2251\text{mm}^2 - 2 \times (9 \times 9,525) \text{mm}^2 = 2079,55 \text{mm}^2$$

Dunque

$$\sigma_z = \frac{1535}{2079,55} = 0,738 \text{ Mpa}$$

FLESSIONE RETTA Nodo 3

Il Momento flettente M_x nel Nodo 3 è negativo, risulterà quindi che le fibre superiori all'asse baricentrico si allungheranno in quanto tese (σ_z positiva), mentre le fibre al di sotto dell'asse baricentrico saranno compresse (σ_z negativa), al contrario l'asse geometrico non subisce alcuna variazione di lunghezza, come si vede nella *Figura 127*.

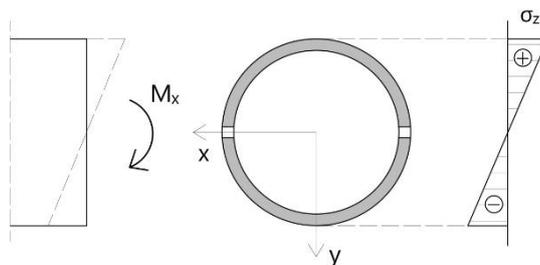


Figura 127: Diagramma delle tensioni. FLESSIONE RETTA

Il valore della tensione σ_z è dato dalla formula

$$\sigma_z = \frac{Mx}{Ix} \times y$$

dove,

M_x è il momento flettente applicato sulla sezione in esame, pari a -273 Nm;

I_x è il momento d'inerzia della sezione rispetto all'asse neutro x. In questo caso il momento d'inerzia è dato dal momento d'inerzia di una sezione tubolare a cui viene sottratto il momento d'inerzia della parte forata. Per quanto riguarda il momento d'inerzia della sezione tubolare è $I_x = \frac{\pi}{4} \times (Re^4 - Ri^4)$, dove Re è il raggio esterno della sezione, mentre Ri è il raggio interno; mentre il momento d'inerzia della parte forata viene calcolata approssimando le sezioni forate come se fossero due rettangoli di base pari allo spessore e l'altezza pari al diametro del foro. In definitiva il Momento d'inerzia tot è pari a

$$I_{xtot} = I_{xsez\ tubolare} - I_{xforo} = 16.382.219,19 - 1157 = 16.381.062,19 \text{ mm}^2$$

y è la distanza di qualsiasi punto dall'asse x, che nel caso del punto più lontano è 43,9 mm

Ovviamente la tensione maggiore si avrà nel punto più lontano dall'asse neutro:

$$\sigma_{z\ max} = \frac{273 \times 10^3}{16.381.062,19} \times 43,9 = 0,731 \text{ Mpa}$$

TAGLIO

La tensione tangenziale τ_{zy} , agente in direzione ortogonale alla corda generica, varia da punto a punto (25). In questa analisi, però, affronteremo il problema del taglio secondo la "trattazione approssimata del taglio", ipotizzando cioè che la tensione tangenziale τ_{zy} agente in direzione ortogonale alla corda generica sia costante su tutta la lunghezza della corda, e quindi il valore τ_{zy} a cui ci riferiamo è il valore medio lungo la corda generica. La distribuzione degli sforzi di taglio è mostrata in Figura 128.

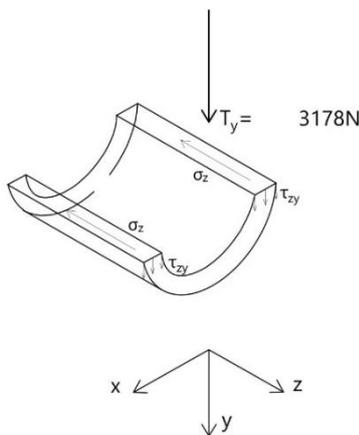


Figura 129: Schema teorico della trattazione approssimata del taglio

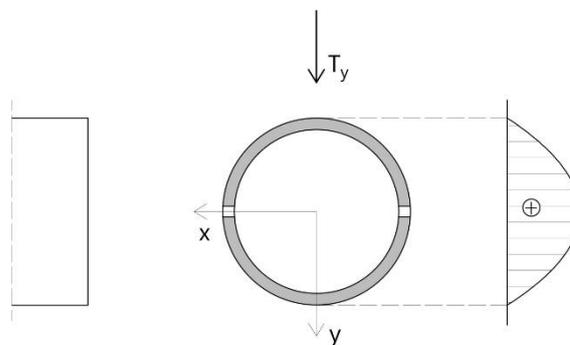


Figura 128: Diagramma delle tensioni. TAGLIO

In questo caso, abbiamo una sezione tubolare, soggetta a carico tagliante con l'asse di sollecitazione che coincide con l'asse di simmetria, quindi le tensioni di taglio τ_{zy} si trovano con l'espressione, nota come la Formula di Jourawsky :

$$\tau_{zy} = \frac{T_y \times S_x^*}{I_x \times b}$$

dove la τ_{zy} è positiva se è entrante nell'area A^* di cui si valuta il momento statico. (25)

dove T_y è lo sforzo di taglio pari a 3178 N;

S_x^* è il momento statico, che nel caso di questa sezione tubolare è pari a $S_x^* = \frac{2}{3} \times (Re^3 - Ri^3)$ (29);

b è la corda generica, pari a $b = 2 (Re^2 - Ri^2)$ (29)

I_x è il momento d'inerzia della sezione rispetto all'asse neutro x . Come abbiamo specificato per il caso di flessione retta, in questo caso il momento d'inerzia è dato da:

$$I_{xtot} = I_{xsez\ tubolare} - I_{xforo} = 16.382.219,19 - 1157 = 16.381.062,19 \text{ mm}^2$$

Come si legge nell'esercizio svolto n. 148 del Libro di Odone Belluzzi di Scienze delle Costruzioni (30), il calcolo della tensione tangenziale massima di una sezione cava, partendo dalla formula di Jourawsky e dopo avere eseguito ad alcune semplificazioni, si riduce alla formula:

$$\tau_{max} = \frac{2T_y}{A_{tot}}$$

dove

A_{tot} è la stessa trovata per lo Sforzo Assiale, pari a $A_{tot} = A - A_{foro}$;

$$A_{tot} = 2251 \text{ mm}^2 - 2 \times (9 \times 9,525) \text{ mm}^2 = 2079,55 \text{ mm}^2$$

$$\tau_{max} = 3,05 \text{ Mpa}$$

Riassumendo per la sezione del Nodo 3 si ha:

Per quanto riguarda le componenti di tensione normale, associate alla flessione retta e allo sforzo assiale, esse vengono sommate algebricamente in tutti i punti della sezione in esame. La distribuzione dei valori della tensione normale è visibile nel diagramma delle tensioni della *Figura 130*: è un caso di tensoflessione.

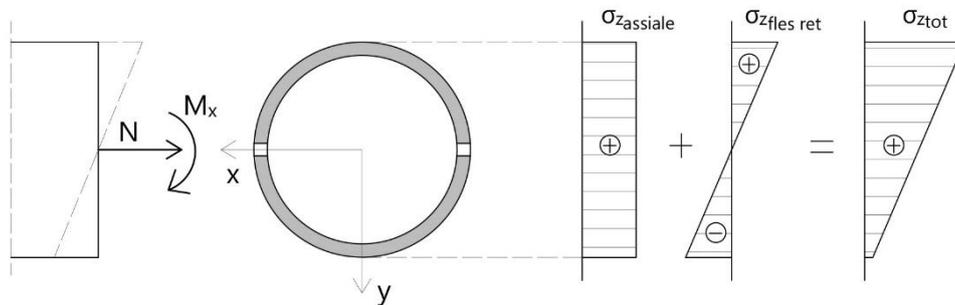


Figura 130

La tensione normale massima in corrispondenza del punto più alto della sezione in esame è

$$\sigma_{\max \text{ tot}} = \sigma_{\text{z assiale}} + \sigma_{\text{z fles retta}} = 0,738 \text{ Mpa} + 0,731 \text{ Mpa} = 1,47 \text{ Mpa}$$

Mentre la tensione tangenziale è

$$\tau_{\max} = 3,05 \text{ Mpa}$$

In questa sezione, è la tensione tangenziale ad essere determinante. Per la verifica delle tensioni si è ritenuto conveniente non considerare la tensione normale, ed utilizzare il metodo delle tensioni ammissibili per la verifica della tensione tangenziale massima.

$$\tau_{\max} = 3,05 \text{ Mpa} \leq \tau_{\text{ult}} (8,46 \text{ Mpa})$$

Anche se la τ_{\max} risulta verificata, essa si avvicina di molto al termine ultimo calcolato durante la caratterizzazione del materiale: le alte tensioni taglianti infatti portano ad uno scorrimento fra le fibre. A questo si aggiunge un effetto locale dovuto alle concentrazioni di sforzo causato dalla spina: questo tema meriterebbe una analisi specifica ma che per ragioni di tempo non è stato indagato.

7.3.4 Analisi Nodo 4

Si analizza il Nodo 4, del Telaio di tipo C. Dal punto di vista della simulazione numerica esso risulta essere il nodo maggiormente sollecitato in quanto a Taglio e Momento flettente. Inoltre, durante la fase sperimentale, in corrispondenza di questo nodo si è sviluppata una delle fessure più preoccupanti del telaio tipo C, come si vede in Figura 133.

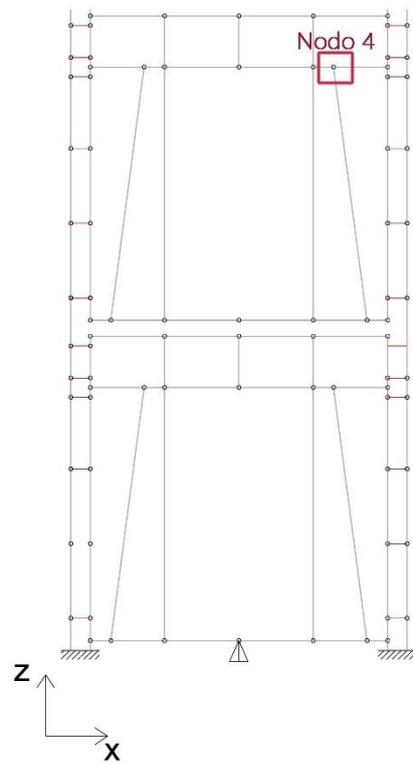


Figura 132: Localizzazione Nodo 4, telaio tipo C.



Figura 133: Foto lesione in corrispondenza del Nodo 4

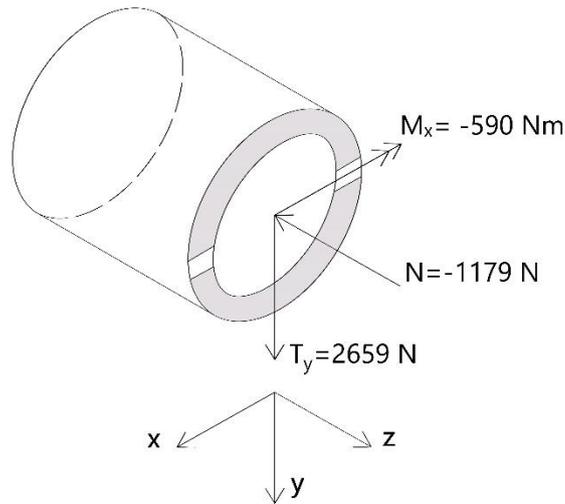


Figura 134: Nodo 4. Caratteristiche di sollecitazione interna.

Si effettua la stessa metodologia utilizzata per il Nodo 3:

SFORZO ASSIALE Nodo 4

Lo stato tensionale monoassiale dato dallo Sforzo assiale di compressione del Nodo 4, è descritto dalla *Figura 135*. La tensione è costante su tutti i punti della sezione (25):

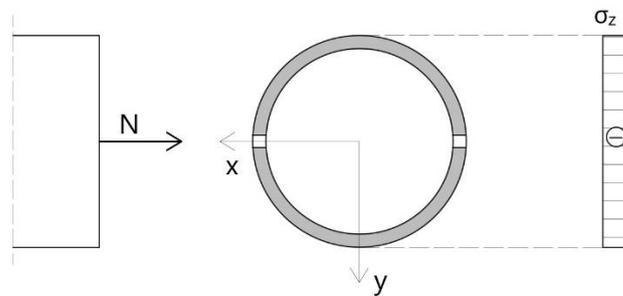


Figura 135: Diagramma delle tensioni. SFORZO ASSIALE

Il valore della tensione normale è dato dalla formula:

$$\sigma_z = \frac{N}{A_{tot}}$$

dove,

N è lo sforzo assiale associato alla sezione in esame, che risulta dalla Simulazione Numerica del Modello di tipo B, pari a -1179 N.

A_{tot} è data dal valore medio delle aree dei culmi con diametro di 8cm pari a 2251mm^2 , a cui viene sottratta l'Area della parte forata occupata dalla barra filettata di acciaio pari allo spessore del culmo (9 mm) per il diametro della barra filettata (9,525 mm).

$$A_{tot} = A - A_{foro} = 2251\text{mm}^2 - 2 \times (9 \times 9,525) \text{mm}^2 = 2079,55 \text{mm}^2$$

Dunque

$$\sigma_z = \frac{-1179}{2079,55} = 0,57 \text{ Mpa}$$

FLESSIONE RETTA Nodo 4

Il Momento flettente M_x nel Nodo 3 è negativo, risulterà quindi che le fibre superiori all'asse baricentrico si allungheranno in quanto tese (σ_z positiva), mentre le fibre al di sotto dell'asse baricentrico saranno compresse (σ_z negativa), al contrario l'asse geometrico non subisce alcuna variazione di lunghezza, come si vede nella Figura 136.

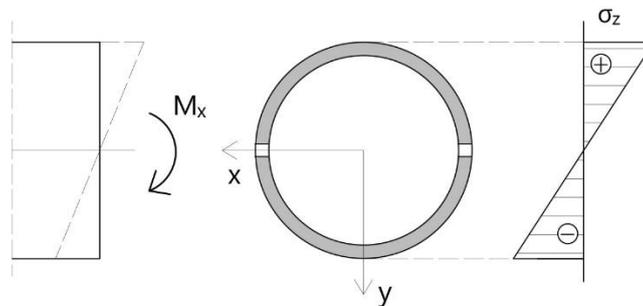


Figura 136: Diagramma delle tensioni. FLESSIONE RETTA

Il valore della tensione σ_z è dato dalla formula

$$\sigma_z = \frac{Mx}{I_x} \times y$$

dove,

M_x è il momento flettente applicato sulla sezione in esame, pari a -590 Nm ;

I_x è il momento d'inerzia della sezione rispetto all'asse neutro x . Come abbiamo descritto nel paragrafo precedente è pari a:

$$I_{xtot} = I_{xsez\ tubolare} - I_{xforo} = 16382219,19 - 1157 = 16381062,19 \text{ mm}^2$$

y è la distanza di qualsiasi punto dall'asse x , che nel caso del punto più lontano è $43,9 \text{ mm}$

La tensione maggiore si avrà nel punto più lontano dall'asse neutro:

$$\sigma_{z\ max} = \frac{590 \times 10^3}{16381062,19} \times 43,9 = 1,58 \text{ Mpa}$$

TAGLIO

Anche in questo paragrafo affronteremo il problema del taglio secondo la "trattazione approssimata del taglio", ipotizzando cioè che la tensione tangenziale τ_{zy} agente in direzione ortogonale alla corda generica sia costante su tutta la lunghezza della corda, e quindi il valore τ_{zy} a cui ci riferiamo è il valore medio lungo la corda generica. (25) .

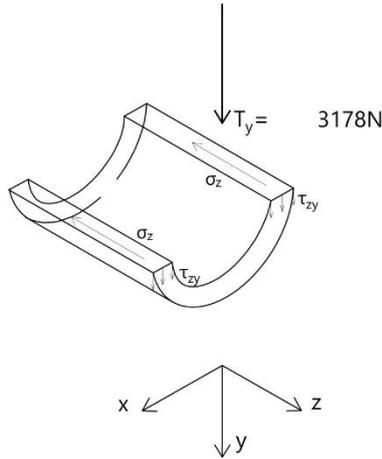


Figura 138: Schema teorico della trattazione approssimata del taglio

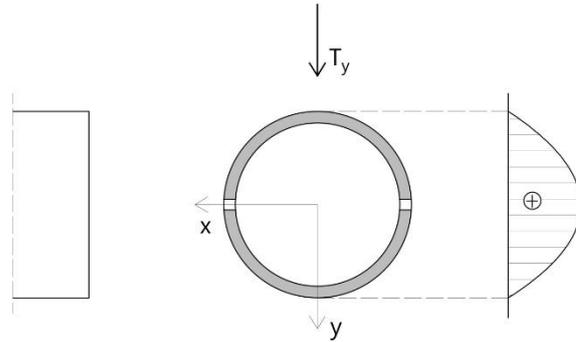


Figura 137: Diagramma delle tensioni. TAGLIO

Procediamo con il calcolo della tensione tangenziale massima con la Formula di Jourawsky :

$$\tau_{zy} = \frac{T_y \times Sx^*}{I_x \times b}$$

Ma come abbiamo spiegato precedentemente, secondo l'esercizio svolto n. 148 del Libro di Odone Belluzzi di Scienze delle Costruzioni (30), il calcolo della tensione tangenziale massima di una sezione cava, partendo dalla formula di Jourawsky e dopo avere eseguito ad alcune semplificazioni, si riduce alla formula:

$$\tau_{\max} = \frac{2T_y}{A_{\text{tot}}}$$

dove

dove T_y è lo sforzo di taglio pari a 2659 N;

A_{tot} è la stessa trovata per lo Sforzo Assiale, pari a $A_{\text{tot}} = A - A_{\text{foro}}$;

$$A_{\text{tot}} = 2251 \text{ mm}^2 - 2 \times (9 \times 9,525) \text{ mm}^2 = 2079,55 \text{ mm}^2$$

$$\tau_{\max} = 2,55 \text{ Mpa}$$

Riassumendo per la sezione del Nodo 4 si ha, la distribuzione di tensione normale come in *Figura 139*:

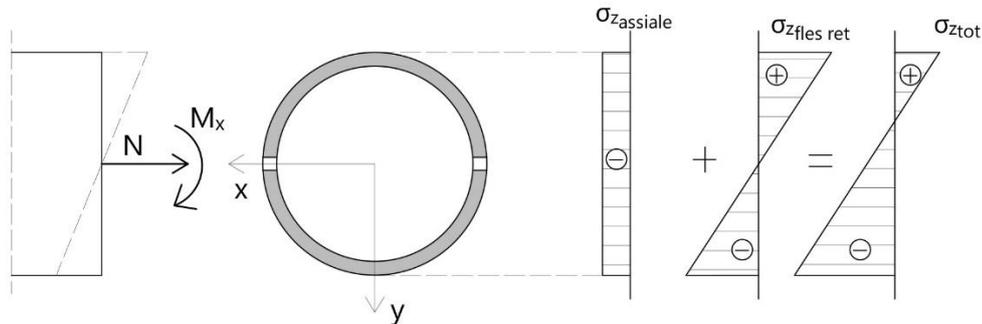


Figura 139

Le componenti di tensione normale, associate alla flessione retta e allo sforzo assiale, esse vengono sommate algebricamente in tutti i punti della la sezione in esame. La distribuzione dei valori della tensione normale totale è visibile nel diagramma delle tensioni della *Figura 139*. In questo caso le tensioni normali massime sono di compressione:

$$\sigma_{\max \text{ tot (negativa)}} = \sigma_{\text{z assiale}} + \sigma_{\text{z fles retta}} = - 0,57 \text{ Mpa} + (- 1,57) \text{ Mpa} = | -2,136 | \text{ Mpa}$$

Mentre la tensione tangenziale massima sull'asse baricentrico è:

$$\tau_{\max} = 2,55 \text{ Mpa}$$

Anche in questo caso come il Nodo 3, la tensione normale è molto bassa e non viene considerata nella verifica. Mentre l'unica tensione determinante è quella tangenziale che si avvicina molto a quella ultima. Come si vede dalla seguente verifica secondo il metodo delle tensioni ammissibili.

$$\tau_{\max} = 2,55 \text{ Mpa} \leq \tau_{\text{ult}} (8,46 \text{ Mpa})$$

Anche in questo caso, come nel Nodo 3, anche se la τ_{\max} risulta verificata, essa si avvicina di molto al termine ultimo calcolato durante la caratterizzazione del materiale, e in più deve essere considerato l'effetto locale dovuto alle concentrazioni di sforzo causato dalla spina.

8 CONCLUSIONI

Il lavoro presentato in questa tesi rappresenta un ulteriore sviluppo alla più ampia ricerca sulla Guadua angustifolia Kunth che l'Ingegnere Takeuchi Tam Caori Patricia sta portando avanti con il contributo degli studenti del Dipartimento di Ingegneria Civile ed Agricola dell'Università Nazionale della Colombia, a Bogotá. Qui da più di quindici anni si stanno indagando le caratteristiche meccaniche e fisiche della guadua e le sue applicazioni in ambito strutturale, e recentemente la ricerca si è focalizzata sullo sviluppo di un sistema costruttivo che si presti all'industrializzazione.

In particolare, l'obiettivo di questa tesi è ottimizzare il sistema costruttivo che vede come modulo un Telaio con pannelli prefabbricati. Questo argomento è stato oggetto di studio nell'ultimo anno nelle tesi di Edwin Alejandro Ayala Tovar (2017) (23) e di Camilo Andrés Castillo Cordona (2017) (5), che hanno utilizzato nel loro sistema costruttivo delle connessioni molto comuni nella pratica edile colombiana: quelle di tipo "bocca di pesce" e "becco di flauto". Nel mio lavoro lo stesso sistema costruttivo è stato adattato utilizzando delle connessioni a "taglio retto", che potrebbero portare a dei miglioramenti sia dal punto di vista strutturale che dal punto di vista del processo costruttivo.

Le tipologie di connessione utilizzate nelle tesi precedenti, infatti, richiedono una mano d'opera qualificata per la loro costruzione ed una realizzazione su misura in base alla conformazione degli elementi di guadua da connettere, portando a tempi di realizzazione elevati. Le connessioni a taglio retto invece permettono di ridurre i tempi di fabbricazione, in quanto i culmi possono essere tagliati in officina con una sega circolare elettrica e assemblati in situ tramite connessioni trasversali con barre filettate e dadi. Nel lavoro di tesi si è provveduto prima alla progettazione e poi alla costruzione di due moduli, ognuno costituito da due colonne portanti a doppia altezza e due pannelli prefabbricabili agganciati ad esse. La realizzazione di questi prototipi si è rivelata particolarmente semplice e rapida sia al momento del taglio che dell'assemblaggio per merito delle tipologia delle connessioni utilizzate.

I prototipi realizzati sono stati sottoposti a prove di carico orizzontale. Con i dati raccolti sono stati elaborati i grafici Forza-Spostamento Orizzontale e l'analisi fessurativa dei due telai. Dal confronto di questi due strumenti si è riscontrato che fin dal primo caricamento (5452 N per il Telaio tipo B e 5815 N per il Telaio C) la struttura ha restituito delle fessure locali che hanno comportato una netta diminuzione di rigidità. Inoltre dall'analisi fessurativa è emerso che i punti di debolezza sono le connessioni: le fessure si dipartono dal punto dove è stata posta la spina passante di acciaio. Si nota altresì un quadro fessurativo importante sui correnti dove si congiungono le due diagonali del pannello. Queste due criticità sono state approfondite con un'analisi tensionale. In definitiva, a parte le lesioni locali, la struttura non ha mostrato segni di cedimento.

Per verificare se la connessione a taglio retto porta ad un miglioramento strutturale in termini di resistenza rispetto alle connessioni a bocca di pesce sarebbe stato utile un confronto diretto tra i prototipi costruiti in questa tesi e in quella di Castillo (2017). Tuttavia, questo non è stato possibile in quanto le prove sperimentali delle due tesi presentano alcune incongruenze in termini di applicazione del carico, del tipo di attacco a terra utilizzato, e di conformazione generale del prototipo (Castillo aveva assemblato più moduli). Si rimanda ad una futura ricerca scientifica la costruzione di un prototipo che si avvicini maggiormente alla conformazione della prova sperimentale di Castillo (2017) per poter fare un confronto diretto tra le prove sperimentali.

Nella fase di analisi numerica è stato elaborato un modello con un programma di calcolo strutturale che ha reso possibile la simulazione numerica dei prototipi, permettendoci la comprensione dei meccanismi di rottura riscontrati in sede sperimentale. In particolare, dall'analisi tensionale è emerso come la rottura di alcune parti localizzate delle sezioni maggiormente sollecitate sia derivata dalla concentrazione di tensione in corrispondenza delle giunzioni.

Proprio sul miglioramento dei meccanismi di collegamento si dovrà concentrare la ricerca per migliorare il comportamento strutturale dei telai. In particolare, si propone un approfondimento delle connessioni trasversali, ponendo attenzione alla spina nelle perforazioni delle giunzioni e all'effetto locale di concentrazione di carico che queste comportano.

Questa tesi mette in luce come, superando il carattere empirico e artigianale che tradizionalmente hanno contraddistinto le costruzioni in passato, in favore di un approccio più tecnologico e sofisticato, sia possibile considerare il bambù come valida alternativa ai materiali convenzionali come il calcestruzzo e l'acciaio. Infatti, oltre a garantire delle ottime prestazioni a livello meccanico e strutturale, il bambù presenta, rispetto ai materiali convenzionali, notevoli vantaggi in termini di sostenibilità ambientale, economica e sociale. L'industrializzazione del processo costruttivo, che è stato oggetto di questa tesi, è un aspetto fondamentale per favorire il suo sviluppo nel mercato edilizio.

L'attività di ricerca e di sviluppo in questa direzione rappresenta il modo concreto con cui è possibile costruire un'edilizia sostenibile, risolvendo i conflitti tra i tempi storici di sviluppo delle città e dei territori ed i tempi biologici di rigenerazione delle risorse naturali (3), e rispettando così, secondo Hans Jonas (39), il principio di responsabilità che bisogna avere nei confronti delle generazioni future.

APPENDICE A

Nella presente appendice si riportano i grafici Tensione-Deformazione relativi ad ogni provino relativo al calcolo del Modulo Elastico e le foto dello stato deformativo dello stesso alla fine della prova.

ME1

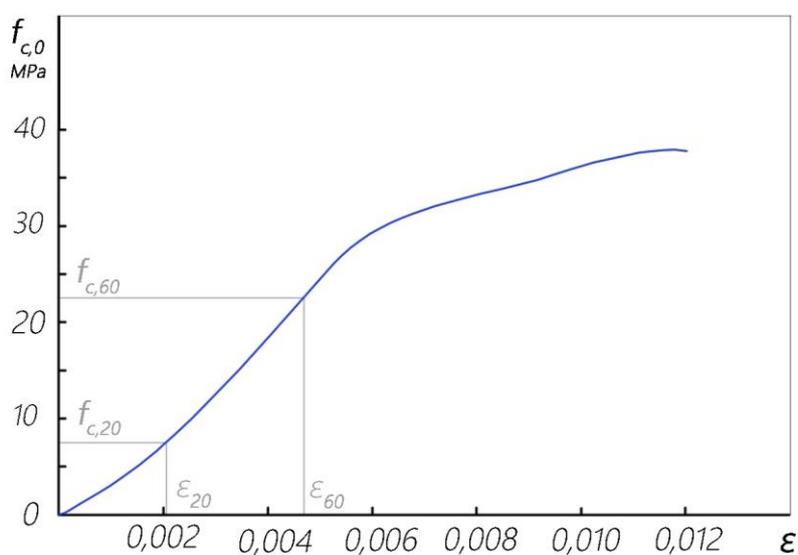


Grafico 11: Grafico tensione-deformazione in direzione di applicazione di carico, provino ME1



Figura 140: Provino ME1 dopo la Prova del calcolo del Modulo Elastico in direzione longitudinale alle fibre

ME2

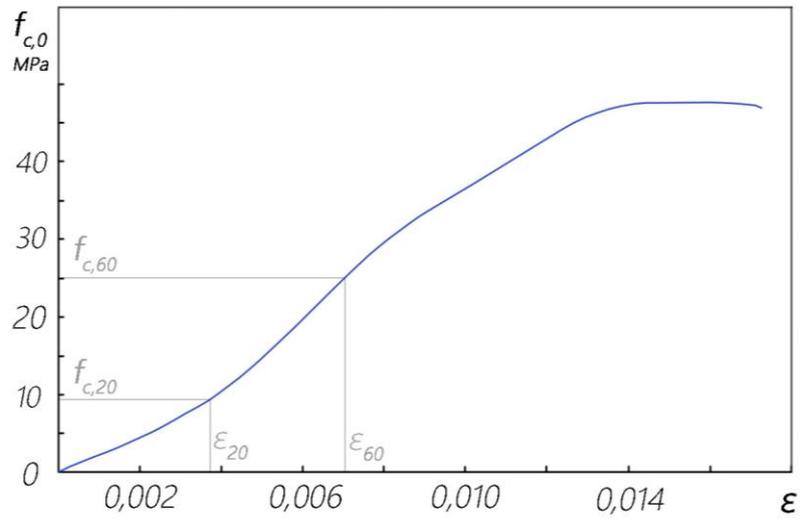


Figura 141: Grafico tensione-deformazione in direzione dell'applicazione di carico, provino ME2



Figura 142: Provino ME2 dopo la Prova del calcolo del Modulo Elastico in direzione longitudinale alle fibre

ME3

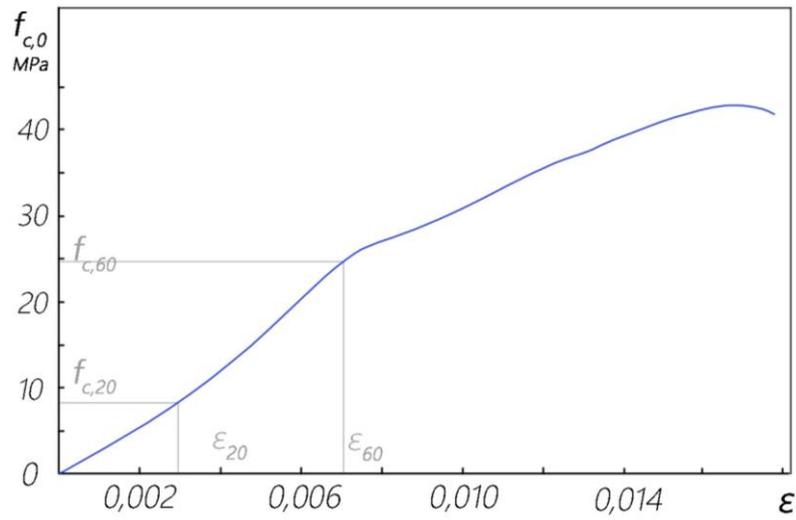


Grafico 12: Grafico tensione-deformazione in direzione dell'applicazione di carico, provino ME3



Figura 143: Provino ME3 dopo la Prova del calcolo del Modulo Elastico in direzione longitudinale alle fibre

ME4

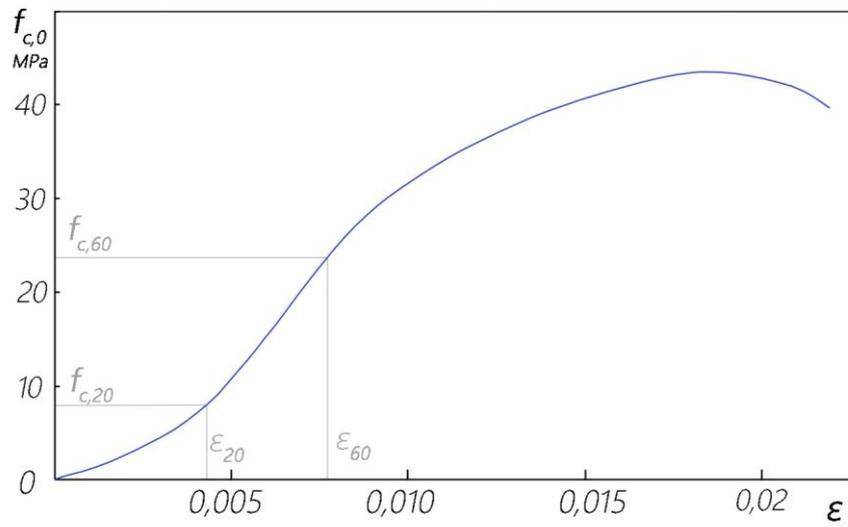


Grafico 13: Grafico tensione-deformazione in direzione dell'applicazione di carico, provino ME4



Figura 144: Provino ME4 dopo la Prova del calcolo del Modulo Elastico in direzione longitudinale alle fibr

ME5

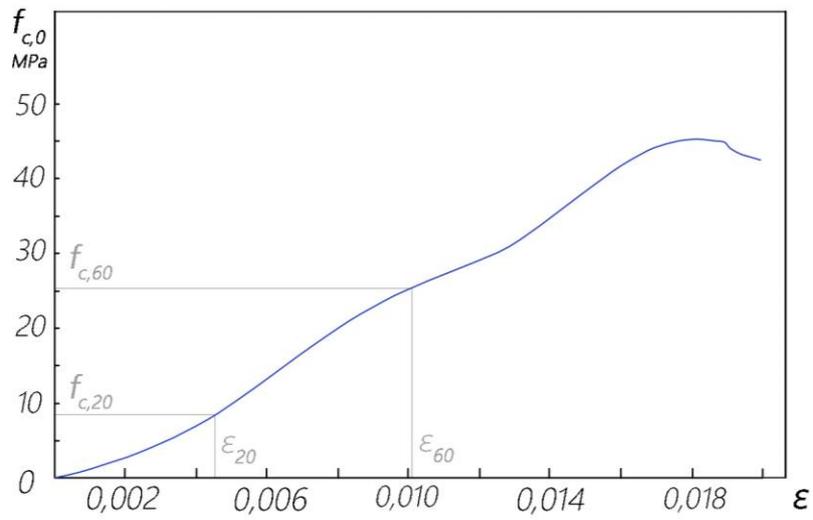


Grafico 14: Grafico tensione-deformazione in direzione dell'applicazione di carico, provino ME5



Figura 145: Provino ME5 dopo la Prova del calcolo del Modulo Elastico in direzione longitudinale alle fibre

ME6

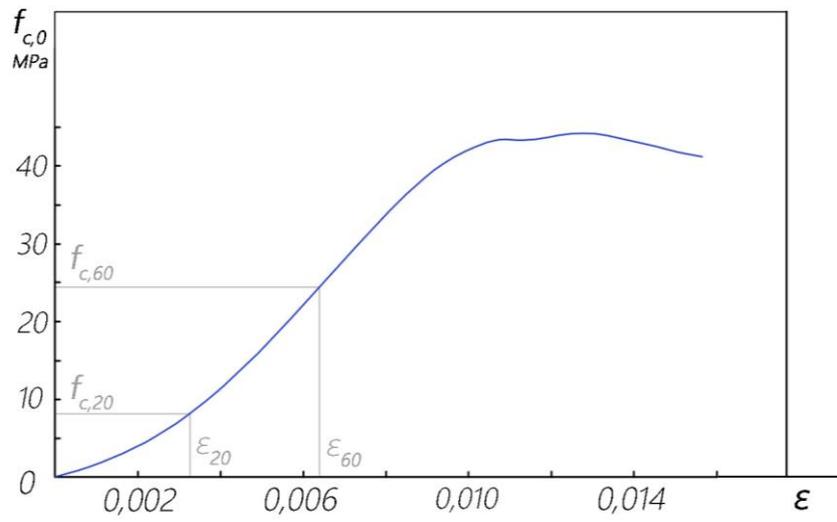


Grafico 15: Grafico tensione-deformazione in direzione dell'applicazione di carico, provino ME6



Figura 146: Provino ME6 dopo la Prova del calcolo del Modulo Elastico in direzione longitudinale alle fibre

Osservando le curve tensione-deformazione ottenute dalle prove realizzate si osservano tre zone:

4. nella prima zona, si osserva un comportamento non lineare, nel quale si presentano grandi deformazioni su piccoli aumenti di carico; questo comportamento non è dovuto alla deformazione della guada bensì all'assestamento dei dispositivi di carico e degli appoggi con il provino;
5. nella seconda zona si presenta un comportamento tendenzialmente elastico lineare; in questa fase le deformazioni sono reversibili e una volta tolto il carico sul provino il materiale torna nella sua situazione originale;
6. nella terza zona, che va dal limite della parte lineare fino al momento di rottura del materiale, si arriva in zona plastica: in questa fase man mano che il carico aumenta si iniziano a formare lesioni e deformazioni permanenti; nella maggior parte dei casi la prova si interrompe senza che il provino collassi.

L'analisi delle curve tensione-deformazione, è molto importante per studiare il comportamento di un materiale, in quanto è caratteristica dello stesso e permette di stabilire i parametri per un progetto.

APPENDICE B

8.1.1 Difetti

I difetti possono essere classificati per la loro costituzione anatomica o per la causa che li ha provocati e si possono dividere in:

-Difetti originati durante la seccatura:

Durante la seccatura si ha una deformazione del culmo dovuta alla perdita dell'acqua interna al suo interno. Questo tipo di deformazione può provocare sia il collasso (ciò accade durante il processo di seccatura nel momento di saturazione della fibra dovuto ad un appiattimento delle sue cavità cellulari, in questo caso si nota un corrugamento sulla superficie della corteccia), sia la torsione di una parte del culmo, in direzione longitudinale o trasversale.

Generalmente i difetti originati durante la seccatura sono causati da carenze nel sistema di impilaggio e deposito del materiale, o da una errata metodologia di seccatura in forno. Si controllano mediante una buona ventilazione durante la seccatura

-Difetti relativi ad attacchi biologici dovute a funghi o insetti:

In questo caso vi può essere la presenza di macchie con un cambio di colore della guadua dovuta all'attacco dei funghi che decompongono la struttura legnosa fino a portarla a una putrefazione.

Oppure vi sono vere e proprie perforazioni prodotte da insetti o da larve perforatrici che vengono classificate come grandi se maggiori di 0,003m, o piccole se minori di 0,003m. *Figura 147*



Figura 147: Foto attacchi biologici

I difetti relativi all'attacco biologico sono controllabili al tempo dovuto con l'aiuto di trattamenti idrosolubili o oliosolubili facilmente reperibili in commercio.

-Difetti originati dal trasporto e dal deposito della guadua:
la maggior parte delle volte si creano delle fessure che si estendono in direzione dell'asse longitudinale del culmo. Le fessure possono essere passanti come si vede nella *Figura 148*.

Questi difetti sono occasionali, in generale dovuti a deficienze manuali o meccaniche durante le operazioni. Si controllano facilmente, con una manodopera qualificata e il buon mantenimento delle macchine.



Figura 148: Foto guadua fessurata

Bibliografia

- (1) Bianchi, Duccio. A cura di Ambiente Italia. *100 indicatori sullo stato del Paese il mondo tra clima che cambia e povertà*. Edizione Ambiente, Milano, 2003.
- (2) Domenico Asprone, Andrea Prota, Gaetano Manfredi, DIS - Università di Napoli "Federico II". *La valutazione della sostenibilità in Edilizia*, Ingegno, Informazione Tecnica Progettuale, Web, 2012.
- (3) Tiezzi, E. , *Tempi storici, tempi biologici*. Garzanti, 1984.
- (4) NSR-10-*Reglamento Colombiano del Construcción Sismo Resistente, Titulo G-Estructuras de Madera y Estructura de Guadua*. Comision Asesora Permanente para el Regimen de Construcciones Sismo Resistentes, Bogotá.
- (5) Castillo Cordona, Camilo Andrés. *Comportamiento del sistema estructural de pórticos de columnas y paneles prefabricados (PCPP) en guadua angustifolia ante gargas horizontales*, Tesi Magistrale, Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá, 2017.
- (6) HIDALGO LÓPEZ, Oscar. *Bambú, su cultivo y aplicaciones en fabricación de papel, construcción* . CIBAM, Centro de Investigación de Bambú y Madera, Universidad Estudios Técnicos Colombianos Ltda.-Editores. Cali, Colombia : 1974. pp. 318.
- (7) AZUOLA GUERRA, Ramón. *La Guadua. Vol. 1*, Revista Anales de Ingeniería, Ottobre, 1887.
- (8) VILLEGAS, Marcel. *BAMBÚ*. Bogotá : Editorial Villegas, 2002.
- (9) BUITRAGO, Jaime. *Hombres Transplantados*. pp 68-69, Manizales , 1943.
- (10) ROBLEDO CASTILLO, Jorge Enrique. *Un Siglo de Bahareque en el antiguo Caldas*, Pereira, 1992.
- (11) BUITRAGO, Jaime .*Hombres Transplantados*. pp. 40-41, Manizales, 1943.
- (12) Edgar GIRALDO Aureliano SABOGAL. *La Guadua angustifolia Kunth en Colombia*, Centro Nacional para el Estudio del Bambù-Guadua. Corporación Autónoma del Quindío, 1999.
- (13) Anokye, B. R. A. *Bamboo Properties and Suitability as Replacement for wood*, Pertanika Journal of Scholarly Research Reviews Vol.2, pp.64-80, 2016.

- (14) "LA GUADUA ANGUSTIFOLIA : El Bambú Colombiano ", pdf, Web.
- (15) MARTINEZ CÁCERES, Dixon Emmanuel. Puentes en do mayor. Congreso Mundial de Bambú / Guadua. Pereira, 1992.
- (16) NTC 5525, Norma Técnica Colombiana 55 25. MÉTODOS DE ENSAYO PARA DETERMINAR LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LA GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNTH, 2007.
- (17) ISO/DIS 22157-1. Bamboo structures- Determination of physical and mechanical properties, part 1: test method, 2017.
- (18) Guitérrez Gonzalez, Mateo. Factor de corrección por contenido de humedad para la resistencia a tensión paralela a la fibra de la guadua Angustifolia Kunth, Bogotá, 2011.
- (19) Herrera Martinez, Juan Carlos. Comportamiento Estructural de Pórticos en Guadua Angustifolia Kunth, rigidizados mediante paneles prefabricados de bareque encementado y de tiras de guadua, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2008.
- (20) Malaver zapata, Diego. Estabilidad de pórticos de guadua angustifolia arriostrados con cables. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2007.
- (21) Rivera Rojas, Jhon Fredy. Comportamiento estructural de pórticos en guadua, arriostrados por medio de diagonales en guadua. Universidad Nacioale de Colombia, Bogotá, 2008.
- (22) NEC-SE-GUADUA- Normativa Ecuatoriana de la Construcción- Estructuras de Guadua (GaK). Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2016.
- (23) Ayala Tovar, Edwin Alejandro. Comportamiento estructural vivienda de dos pisos elaborada con pórticos rigidizados con paneles prefabricados en guadua. Bogotá D.C., Colombia, 2017.
- (24) <http://armeideasenguadua.com/>. Arme de Ideas en Guadua. Web.
- (25) Viola, Erasmo. Esercitazioni di Scienza delle costruzioni 1 e 2, Pitagora Editrice, Bologna.
- (26) Maurizio Piazza, Roberto Tommasi, Roberto Modena. Strutture in Legno- Materiale calcolo e progetto secondo le nuove normative europee, Hoepli, 2005.
- (27) Juliàn Andrés Prada Guevara , Jairo Zambrano Ordoñ. Estudio de elementos en Guadua solecitados à compresión, con perforación para el relleno de mortero. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2013.
- (28) Caboni, Fausto. Costruzioni di macchine. Pitagora, 1974.

- (29) Bicego, Federico. ANALISI TRIDIMENSIONALE AGLI ELEMENTI FINITI DELLE TENSIONI DI TAGLIO IN TRAVI CON SEZIONE CIRCOLARE PIENA E CAVA CON DIVERSI SPESSORI, Padova, 2013-2014.
- (30) Belluzzi, Odone. Scienze delle Costruzioni Vol.1, Bologna: Zannichelli, 1982.
- (31) O. H. Lopez, Manual de construcción con bambù, Estudios Tecnicos Colombianos, Ltda Editores.
- (32) <https://dirimpex.com/productos/detalle/marco-de-1500-kg-0f6>. Web.
- (33) Sanchez, Prieto. Comportamiento de la guadua angustifolia kunth a flexión. pp.13,72-73, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2001.
- (34) Maritza Uribe Vallejo, Alejandro Duran Contreras. Estudio de elementos solicitados a compresión, armados por tres guaduas pp 109-116, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2002.
- (35) Jackson Hernández Martínez, Antonio Santos Mantilla. Estudio sobre el comportamiento de paneles en guadua para la conformación de vivienda.pp 23, Universidad Industrial de Santander, Colombia, 2004.
- (36) Jansson, AM. Integration of Economy and Ecology. An outlook for the eighties. Proc. Wallenberg Symposia. Askö Laboratory, Univ. pp. 240, Stoccolma, 1984.
- (37) Greco, Silvia. Tesi di laurea magistrale: Il Bambù Italiano: prove meccaniche e connessioni assiali. Bologna, 2017.
- (38) Walter Liese, Michael Köhl. Bamboo, the plant and its uses, Springer Verlag, 2015.
- (39) H. Jonas, Il principio di responsabilità. Un'etica per la civiltà tecnologica. Frankfurt, 1979.

Ringraziamenti

Alla professoressa Luisa Molari, che per prima ha creduto nel progetto di questa tesi, e che grazie alle sue competenze ha saputo guidarmi e supportarmi per tutte le fasi del lavoro, trasmettendomi tutto il suo entusiasmo per questa materia.

All'ing Takeuchi Tam Caori, che ha reso possibile la mia esperienza in Colombia: fin dal primo incontro mi ha fatto sentire accolta e stimata. Inoltre, grazie alla sua grande esperienza nel campo delle costruzioni in guadua ho avuto l'opportunità di imparare molto su questo tema, sia dal punto di vista pratico che teorico.

Ad Ernesto Rodríguez, che con la sua generosità ed esperienza, mi ha saputo accompagnare nella fabbricazione dei prototipi, dandomi saggi consigli su come organizzare un lavoro in un cantiere di una costruzione in guadua. Grazie per essere stato Maestro e Amico, insostituibile braccio destro durante l'esperienza oltreoceano.

Ai miei genitori, che mi hanno trasmesso l'amore per la cultura e che mi hanno dato il privilegio di studiare e formarmi dal punto di vista professionale ed umano.

A mia nonna Lina, che è stata per me esempio di forza ed emancipazione e che mi ha saputo trasmettere l'amore per le materie scientifiche.

Ad Andre, per essere stato l'Amore.

Alle mie compagne di viaggio: Caterè, Elsina, Laurin di fiori, Enzuccia e Silvietta. Senza di voi questi anni non sarebbero stati così colorati.

E poi a me, che non perdo il vizio di sognare.