

CODE 2.2.23**ANALISI SPERIMENTALE DI PANNELLI IN ADOBE E BAMBÙ:
UN ESEMPIO DI RECUPERO DI ANTICHE TECNICHE COSTRUTTIVE
LATINOAMERICANE****Paradiso, Michele¹; Bizzeti, Francesca²**

1: Departamento de Construcciones y Restauración, Universidad de los Estudios de Florencia, Italia
e-mail: michele.paradiso@unifi.it

2: Architetto
e-mail: frabizze@gmail.com

PAROLE CHIAVE: bambù, antisismica, unioni strutturali, tecniche costruttive tradizionali.

SOMMARIO

Il bambù e la terra sono materiali tradizionalmente utilizzati nelle costruzioni in America Latina. Presentano notevoli vantaggi dal punto di vista ambientale, tecnologico, strutturale, ma possiedono alcune criticità che oggi rischiano di limitarne l'utilizzo. Il primo problema tecnico analizzato ha riguardato il giunto strutturale tra elementi di bambù. Comunemente le unioni strutturali tra culmi di bambù vengono realizzate forando la canna con bulloni o chiodi. Questa procedura riduce la resistenza dell'elemento in bambù poiché vengono tagliate le fibre longitudinali che gli conferiscono la sua elevata resistenza a trazione.

Lo studio si propone di realizzare un'unione strutturale in grado di garantire un'opportuna resistenza senza perforare la canna di bambù, riprendendo una tecnica tipica della regione dell'Eje cafetero, Colombia, che consiste nel realizzare legature con corde di origine naturale. Per valutare il comportamento dell'unione strutturale è stata realizzata una struttura in bambù costituita da due piedritti e un traverso. Il traverso è stato caricato in mezzeria con un carico concentrato e durante la prova sono stati misurati gli spostamenti dei diversi elementi.

A questa fase sono seguite le indagini per determinare l'efficacia della soluzione tecnologica costituita da un pannello di adobe rinforzato esternamente con una griglia di bambù unita con legature di corde. In particolare la ricerca ha valutato la capacità del rinforzo esterno in bambù di contenere la muratura di adobe in caso di sollecitazioni fuori piano. La struttura è stata sollecitata con un carico linearmente distribuito nella mezzeria del pannello perpendicolare al piano del muro, stato di sollecitazione simile a quello che si può manifestare durante un evento sismico. Visto l'esito positivo delle prove, realizzate in laboratorio in scala 1:4, la soluzione tecnologica è stata applicata nella progettazione di un prototipo di abitazione a basso impatto ambientale e tecnologico, in grado di garantire un alto livello di sicurezza strutturale.

1. INTRODUZIONE

Nelle tecniche costruttive tradizionali l'uso dei materiali locali spesso subisce un interessante processo di ottimizzazione: le soluzioni che oggi si possono ammirare, oltre a costituire parte del patrimonio identitario di una comunità, mostrano capacità esemplari di adattamento alle caratteristiche del luogo ed evidenziano le potenzialità dei materiali impiegati.

Col processo di modernizzazione delle tecniche costruttive e con l'invasione di materiali definiti "moderni" si stanno perdendo i saperi legati alla tradizione costruttiva locale. I materiali tradizionali, come la terra e il bambù, hanno molte qualità (sono economici, facilmente reperibili sul territorio, presentano una buona resistenza, etc.) ma sono percepiti dalla popolazione comune come materiali poveri e degradanti.

Lo studio di tecniche e materiali tradizionali può essere utilizzato per migliorare la qualità di vita delle popolazioni che vivono in situazioni di marginalità, quali *favelas* o *barrios de invasion*, e costruiscono la propria casa inizialmente con materiali di recupero, in seguito con tecniche e materiali moderni senza saperli utilizzare correttamente, creando strutture potenzialmente ancora più insicure.

Le costruzioni in terra cruda hanno una storia millenaria e sono presenti in tutto il mondo, in aree con caratteristiche climatiche, topografiche, sismiche molto diversificate. Una delle caratteristiche fondamentali delle strutture di terra è l'elevata capacità di adattamento che hanno dimostrato nel tempo ai diversi contesti ambientali e sociali.

Esistono molteplici tecniche costruttive che si basano sull'utilizzo della terra cruda. Le più conosciute sono l'adobe ed il pisé (o tapial), ma sono molto diffuse anche la tecnica della terra-paglia, il trochis (o bahareque), il metodo della terra-legno, il bague (o massone). La tecnica dell'adobe consiste nel lavorare la terra cruda impastata con acqua e talvolta con fibre per realizzare dei mattoni. Le costruzioni in adobe sono molto diffuse in America Latina e nei paesi medio-orientali, ma si trovano anche nell'Europa mediterranea.

Una delle criticità più importanti delle costruzioni in adobe (ed in generale in terra cruda) riguarda il comportamento sismico delle strutture che, analogamente alla muratura non rinforzata, in caso di sollecitazioni orizzontali di una certa entità tendono a cedere senza preavviso causando ingenti perdite di vite umane. L'idea di un rinforzo esterno in bambù per le murature in adobe nasce dalla necessità di fornire un'adeguata protezione in caso di sisma, affinché l'apertura di lesioni nella struttura dovute al superamento delle tensioni di rottura non comprometta la sua stabilità.

Il bambù viene impiegato nelle costruzioni da secoli in varie parti del mondo. Le sue caratteristiche botaniche, anatomiche, fisiche e meccaniche ne fanno un materiale dalle molteplici potenzialità, se opportunamente trattato dopo la raccolta [1] [2].

Prima di procedere con la fase sperimentale è stata eseguita una ricerca sul campo per approfondire l'uso del bambù nelle costruzioni in America Latina. In particolare è stata scelta per la sua rilevanza culturale la regione dell'*Eje cafetero* in Colombia, dove la tradizione costruttiva, per rispondere alle peculiarità del luogo, si è basata per secoli sull'uso del bambù (*guadua*) [3] [4]. Sono state studiate le costruzioni tradizionali in guadua che fanno parte del paesaggio e del know-how dell'*Eje cafetero*, le architetture contemporanee in bambù, e le indicazioni presenti nella norma sismoresistente attualmente vigente in Colombia [5] [6].

La fase di sperimentazione si è basata sull'analisi dei vantaggi e delle criticità nell'uso del bambù nelle costruzioni al fine di realizzare strutture in adobe e bambù per territori a rischio sismico a basso impatto ambientale e tecnologico.

2. ANALISI SPERIMENTALE DI UNIONI STRUTTURALI TRA CULMI DI BAMBÙ

Una delle maggiori problematiche del bambù come materiale costruttivo riguarda la realizzazione delle unioni strutturali, che difficilmente riescono a trasmettere carichi consistenti, tali da sfruttare completamente l'elevata resistenza a trazione del materiale. Il tema delle unioni è stato ampiamente studiato e sono state proposte interessanti soluzioni [7] [8] [9].

Questa sperimentazione parte da un concetto semplice: l'idea che per non intaccare la resistenza dei culmi la parete del bambù non debba essere forata con barre o bulloni.

Il culmo di bambù è costituito da porzioni piene, denominate nodi, e porzioni internamente cave, denominate internodi. Questa particolare conformazione ottimizza il momento di inerzia resistente della sezione trasversale, ma rispetto agli elementi lignei rende più problematico perforare la parete della canna in quanto questo significa ridurre notevolmente la sezione resistente.

Perciò la ricerca ha testato un particolare metodo di giunzione ripreso da una tecnica tipica della regione dell'Eje cafetero, Colombia, impiegata nel XIX secolo che consiste nel realizzare legature con corde di origine naturale. Questo tipo di giunto evita di forare la fibra del bambù, in quanto è completamente esterno al culmo, è di semplice esecuzione e viene realizzato con materiali facilmente reperibili in loco.

Poiché la resistenza di questa tipologia di unioni è strettamente legata alle caratteristiche meccaniche del materiale usato per le legature, la prima parte della sperimentazione si è incentrata sullo studio della resistenza a trazione delle fibre naturali utilizzate.

2.1. La scelta della corda per la legatura

Durante lo studio e le testimonianze orali raccolte in Colombia sono state individuate due tipologie di corde utilizzate tradizionalmente nella regione dell'Eje cafetero per realizzare legature, vista la buona resistenza meccanica e l'ampia diffusione: la radice di *tripa de perro* (*Philodendron longirrhizum*) e la *cabuya* (prodotto lavorato estratto dalle fibre della pianta *Furcraea andina*) [10].

Entrambe le fibre sono state testate nel Laboratorio Prove Materiali del Dipartimento di Architettura dell'Università di Firenze, Italia, per misurarne la resistenza a trazione.

La caratterizzazione meccanica di massima è servita per valutare l'incidenza della resistenza della corda sulla resistenza del sistema costituito da elementi in bambù connessi con legature di corde.

Dalle prove effettuate si nota che la *cabuya* ha una resistenza nettamente superiore alle radici di *Philodendron*. Confrontando i valori della tensione media di rottura σ delle corde di *cabuya* (in media pari a 55 MPa) con i valori di σ delle radici (che si aggirano sui 15 MPa) si nota che l'incremento di resistenza è notevole (oltre il 300%). inoltre i risultati ottenuti si presentavano meno dispersi rispetto al caso precedente.

Tabella 1: Media dei valori sperimentali della tensione di rottura σ_r delle fibre testate.

Fibra	Tensione di rottura σ_r
Tripa de perro	15,911 MPa
Cabuya	54,683 MPa

Visti gli esiti delle prove è stata scelta la *cabuya* per eseguire il giunto di corda nei test successivi, considerando anche la maggiore diffusione di questa fibra rispetto al *Philodendron* sul mercato colombiano.

2.2. Prove di flessione sul portale simmetrico in bambù con giunti di corde

Allo scopo di testare il giunto sotto carico è stata predisposta una prova di carico su un portale simmetrico, costituito da tre elementi di bambù: due piedritti incastrati alla base ed un traverso ancorato ai piedritti con legature quadre. La prova è consistita nell'applicare un carico concentrato monotonicamente crescente nella mezzeria del traverso.

La prova è tesa a stabilire il comportamento del giunto realizzato con le corde, in particolare se la crisi della struttura è causata dal cedimento del vincolo (rottura delle corde che lo compongono) o dal superamento delle tensioni di rottura nel traverso di bambù.

Le canne di bambù usate per la sperimentazione sono di origine italiana, della specie *Phyllostachys viridiglaucescens* e provengono dalla cooperativa Bambusetto presso Camaiore (LU). Il trattamento preservativo viene effettuato col metodo di diffusione verticale per traspirazione del fogliame, utilizzando una soluzione di borace ed acido borico [11]. La caratterizzazione meccanica dei culmi di *Phyllostachys viridiglaucescens* del Bambusetto è stata svolta dall'ing. Marco Fabiani del Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Architettura dell'Università Politecnica delle Marche [12].

Tabella 2: Caratterizzazione meccanica dei culmi di *Phyllostachys viridiglaucescens*.

Grandezza	n. provini	Valore
Diametro min [mm]	0	46.0
Diametro max [mm]	0	67.0
Spessore min [mm]	0	4.1
Spessore max [mm]	0	7.2
Area min [mm ²]	0	578.2
Area max [mm ²]	0	1347.0
MC [%] (dev.st.)	12	24.9 (5.8)
σ_c [MPa] (dev.st.)	12	56.8 (7.6)
E_c [MPa] (dev.st.)	12	3100 (520)
σ_t [MPa] (dev.st.)	4	159.0 (13.0)
E_t [MPa] (dev.st.)	4	22500 (8000)

Le canne selezionate, prive di lesioni evidenti, sono state scelte per le dimensioni del diametro, compreso tra 2 e 3 cm, per mantenere la scala di 1:4 impiegata per le prove, poiché i culmi di guadua impiegati per usi strutturali in Colombia presentano diametri compresi tra gli 8 ed i 12 cm. Le unioni tra le canne sono state realizzate seguendo la tecnica tradizionale delle legature con corde (*uniones amarradas* indicate da Hidalgo López [13]), che non richiede una particolare lavorazione. Nello specifico il nodo impiegato è la legatura (o nodo) quadra, ottimale per unire due elementi perpendicolari. Poiché non è stato possibile ridurre in scala la corda utilizzata (*cabuya*), è stata diminuita proporzionalmente la sezione resistente totale dell'unione riducendo il numero di giri effettuati per realizzare la legatura quadra. In tal modo si è mantenuta la giusta proporzione tra tutti gli elementi e la resistenza dell'unione non risulta alterata.

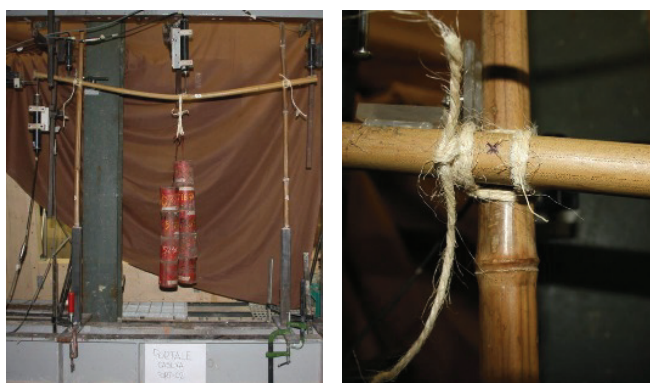


Figura 1: Esecuzione della prova sul portale simmetrico in bambù e particolare dell'unione con corde

Per realizzare la prova piedritti sono stati ancorati alla base dentro un supporto metallico riempito di gesso che a sua volta è stato fissato con morsetti al banco prova. Il traverso è stato collegato ai piedritti con legature quadre realizzate con corde di *cabuya*. Il carico è stato applicato manualmente con pesi disposti su apposite barre portapesi ancorate alla mezzzeria del trasverso di bambù con la medesima corda usata per le legature. L'apparato di prova era costituito da trasduttori di spostamento a pistone e trasduttori con corsa minore che registravano rispettivamente l'abbassamento del punto di applicazione del carico, gli spostamenti dei nodi e l'eventuale inflessione dei piedritti laterali. I trasduttori inviavano le misure ad una centralina di acquisizione dati TDS che trasmetteva i dati raccolti a un computer. Le varie prove di flessione sul portale sono state effettuate incrementando manualmente il carico con diverse velocità. La prima prova PORT-C1 ha fornito dei dati interessanti sul comportamento della struttura e ha consentito di migliorare ed affinare le misure delle prove successive. Nella prova PORT-C2 è stata aumentata la velocità di carico per avere una misura più precisa dello spostamento istantaneo del traverso all'applicazione del carico. La prova PORT-C3 è stata eseguita sottoponendo il portale a vari cicli di carico-scarico per testare l'elasticità del materiale e la sua capacità di riacquisire la configurazione iniziale una volta scaricato.

2.3. Considerazioni conclusive

Il materiale ha dimostrato un buon comportamento elastico. La prova PORT-C2 ha mostrato in particolare un andamento lineare del diagramma carico–spostamento interpolato, fino a livelli di carico accettabili per il materiale. Nei cicli di carico e scarico della prova PORT-C3, l'elevata deformazione in mezzeria in condizione di carico massimo non ha prodotto una significativa deformazione plastica sul traverso, in quanto la freccia residua misurata nella mezzeria della struttura scarica è nettamente inferiore ed in parte dovuta al cedimento del nodo. Il materiale tende a riacquisire quasi perfettamente la configurazione iniziale anche sottoposto a carichi relativamente prossimi al carico di rottura.

Il nodo realizzato con legature di corda (*cabuya*) presenta un comportamento statico assimilabile a quello di una cerniera. Sotto carico le corde tendono ad allungarsi, allentando la legatura e consentendo di conseguenza una rotazione del nodo. Allo scopo di verificare numericamente la rotazione del nodo sono state confrontate le frecce teoriche delle strutture con le misure reali dello spostamento del traverso in mezzeria. Solo se nel calcolo si considera sia la deformabilità del materiale che il contributo allo spostamento dovuto alla rotazione rigida del nodo, la freccia teorica risultante, calcolata con la seguente relazione

$$f = f_e + f_s = [F \cdot l^3/48(EJ)] + [\text{tg}\varphi \cdot l/2] \quad (1)$$

comprensiva degli spostamenti dovuti alla deformazione (freccia teorica elastica f_e) e alla rotazione rigida (f_s), risulta nella maggioranza dei casi superiore alla freccia reale massima misurata in mezzeria nelle diverse prove. In caso contrario, se si ipotizza il nodo non cedevole, il dato teorico risulta minore di quello reale, cadendo così in contraddizione. Il calcolo effettuato non è rigoroso né i risultati possono essere considerati quantitativamente attendibili ma dà un'indicazione precisa sulla presenza di rotazioni rigide nell'inflessione del traverso.

3. EFFICACIA DEL PRESIDIO IN BAMBÙ PER MURATURA IN ADOBE

Visti gli esiti delle prove precedenti la ricerca ha testato l'efficacia di un rinforzo in bambù esterno alla muratura in adobe, costituito da un graticcio in bambù, composto da canne ortogonali legate con corda vegetale (*cabuya*). Il rinforzo in bambù, che in normali condizioni di utilizzo non collabora con il pannello in adobe, entra in funzione in caso di sollecitazioni eccezionali come presidio per evitare il crollo della parete.

Simulare la sollecitazione sismica in laboratorio è alquanto complesso; per questo motivo generalmente si ricorre a prove statiche con particolari condizioni di carico che permettono di simulare le azioni che si verificano in caso di sisma. Le prove eseguite pertanto non intendono quantificare la possibile resistenza della struttura in caso di sisma ma unicamente valutare la capacità di collaborare dei due materiali in caso di rottura del pannello di adobe dovuta a sollecitazioni orizzontali fuori piano.

La medesima prova di flessione fuori piano è stata eseguita su modelli in scala 1:4 del solo pannello di adobe, del solo graticcio di bambù e del pannello di adobe rinforzato col graticcio.

3.1. Muratura in adobe

Per realizzare la parete di adobe è stata utilizzata terra proveniente da uno scavo di circa 4 m di profondità in un cantiere di Firenze. La terra è uno dei materiali più diffusi nel mondo ma allo stesso tempo è estremamente difficile da studiare. La sua consistenza, che può essere incoerente ed allo stesso tempo monolitica, rende necessario indagare aspetti inerenti sia alla meccanica dei terreni che alla resistenza dei materiali. Per studiare le principali caratteristiche della terra presa in esame ed ipotizzare il suo comportamento in fase di ritiro e in fase di prova, sono state svolte analisi di diversa natura. Lo studio della composizione mineralogica ha portato alla luce le sostanze contenute nel

campione di terra, le analisi di laboratorio sono servite per avere un quadro preciso delle proprietà fisiche del terreno mentre le prove meccaniche hanno permesso di testare la resistenza del materiale [14] [15].

Per effettuare le prove sui pannelli sono stati necessari 1200 mattoni di dimensioni $10 \times 10 \times 2,5$ cm (in scala 1:4 rispetto al modello reale), realizzati manualmente in laboratorio.

La terra è stata essiccata in forno a 60°C per circa 24 h per diminuire il grado di umidità e facilitare la macinazione. Quindi è stata macinata e setacciata per evitare la presenza di granuli fuori scala rispetto alle dimensioni del mattone (in particolare il diametro massimo dei granuli non supera $1/5$ della dimensione minima del lato minore del mattone). In seguito è stata impastata con acqua. Il contenuto d'acqua nell'impasto è stato misurato in fase di esecuzione dei mattoni per impasti che presentavano caratteristiche limite (maggiormente malleabile o particolarmente secco) e risulta variare tra il 19,6% e il 22,8%.

Tabella 3: Caratterizzazione fisica e meccanica della terra impiegata.

Grandezza	Simbolo	Valore
Peso specifico	Gs	2,4707 gr/cm ³
Contenuto d'acqua	w	15,65%
Limite Liquido	Ll	23,09%
Limite Plastico	Lp	19,57%
Ritiro Lineare percentuale	Rl	3,15%
Ritiro Lineare percentuale a freddo	Rl	2,02%
Rigidezza tangenziale	Kt	12500,47 N/mm
Modulo elastico	E	163,0964 MPa
Resistenza a compressione	σ	2,0664 MPa
Duttilità cinematica	μc	1,08
Duttilità cinematica disponibile	μcd	1,92

Per realizzare i mattoni l'impasto, prelevato a piccole dosi, è stato lanciato con forza negli stampi quadrati e schiacciato ripetutamente per evitare la formazione di vuoti e bolle d'aria. Dopo le prime 24-48 ore si procede al disarmo. In seguito i mattoni sono stati stoccati avendo cura di mantenerli areati e non sovrapposti per almeno 15 giorni. Il mattone di adobe risulta completamente essiccato dopo circa un mese di riposo e può essere impiegato per la costruzione.

Ultimata la stagionatura i mattoni sono stati assemblati in muri in scala ridotta (1:4) di dimensioni $60 \times 60 \times 10$ cm circa. Per controllare la verticalità del muro in fase di costruzione e facilitare la stagionatura è stata utilizzata una cassaforma di legno smontabile. I mattoni, disposti in filari di 6 elementi, sono stati murati con malta composta da terra passata al setaccio ASTM n.10 ($\phi=2,00$ mm), impastata con acqua in proporzione 2,5 l di acqua ogni 7 kg di terra. Ogni muro è composto da 22 filari e 132 mattoni (di cui 22 pezzi speciali e 111 mattoni). Dopo qualche giorno la cassaforma è stata smontata ed il muro adagiato sull'asse inferiore dove ha continuato la stagionatura per circa un mese.

3.2. Le prove di flessione fuori piano sul pannello di adobe rinforzato

Per realizzare la prova di flessione fuori piano il muro di adobe ed il graticcio di bambù sono stati disposti in orizzontale e adagiati su appoggi che simulavano il comportamento statico di una cerniera, costituiti da due strutture metalliche di supporto. Il carico è stato collocato lungo la linea di mezzeria del pannello equidistante dai due appoggi ed è stato applicato manualmente con pesi (disposti su barre porta pesi per facilitarne la sovrapposizione) appoggiati su una barra metallica di 4 cm di larghezza, posizionata lungo la mezzeria del pannello, con la funzione di ripartire lungo una linea il carico concentrato dei pesi. La superficie della barra metallica a contatto con il pannello è stata rivestita con polietilene per adattarsi alle irregolarità superficiali del muro di adobe.

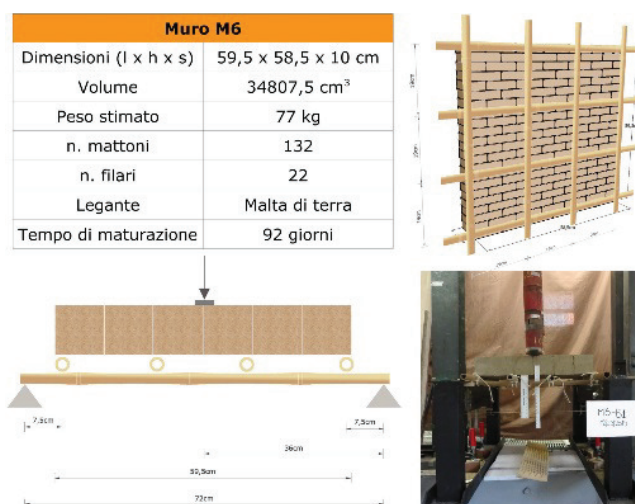


Figura 2: Proves di flessione fuori piano sul pannello di adobe rinforzato con graticcio in bambù.

L'apparato di misura è consistito in righelli graduati solidali al pannello ed al graticcio su cui si è potuto leggere lo spostamento verticale del punto di applicazione del carico rispetto ad una linea orizzontale fissa costituita da filo di nylon teso tra i due appoggi e tenuto in tensione da due pesi legati alle estremità.

Durante la prova è stato registrato lo spostamento, letto manualmente sui righelli graduati, in corrispondenza di ogni incremento di carico.

I muri di adobe sono stati caricati fino al collasso della struttura, avvenuto per valori vicini ai 220 kg. Il graticcio in bambù non è stato portato a rottura in quanto la strumentazione disponibile per la prova non è stata in grado di applicare il carico necessario. La prova è stata comunque interessante perché ha dimostrato la capacità del bambù di resistere senza danneggiarsi a carichi che nelle strutture in adobe determinano il collasso e, una volta scaricato, di ritornare quasi perfettamente nella configurazione iniziale.

3.3. Considerazioni conclusive

Il grafico in figura consente un confronto diretto tra i risultati delle diverse prove a flessione fuori piano. Il pannello di adobe ed il graticcio presentano un comportamento molto differente: mentre il muro di adobe non si deforma e giunge al collasso in maniera improvvisa (vedi provino M1), il bambù tende a deformarsi notevolmente sotto carico (vedi provino B1).

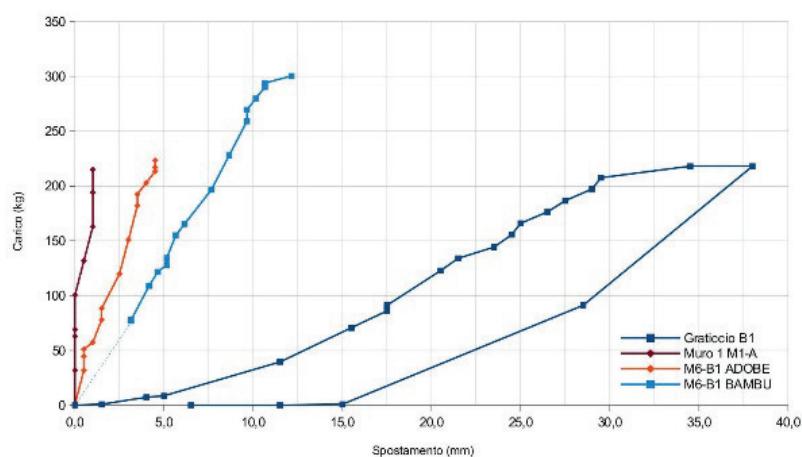


Figura 3: Confronto dei diagrammi carico-spostamento delle prove di carico con sollecitazione fuori piano.

Nonostante il diverso comportamento sotto sforzo, i due materiali hanno mostrato una buona capacità di collaborare. La prova sul muro di adobe rinforzato (M6-B1) ha dimostrato la capacità del graticcio di canne di sostenere il pannello quando questo giunge a rottura per l'azione di azioni concentrate fuori piano, impedendone il collasso. L'efficienza della soluzione proposta risulta evidente già dal confronto delle immagini della prova a flessione sul pannello con e senza rinforzo.



Figura 4: Confronto tra il collasso del muro non rinforzato (M1) e con rinforzo in bambù (M6-B1)

4. CONCLUSIONI

La ricerca ha testato un particolare metodo di giunzione per strutture in bambù realizzato con legature di corde di origine naturale. Questa tipologia di unioni non richiede di forare il culmo e non ne riduce l'esigua sezione resistente.

Per valutare la funzionalità delle legature di corde sono stati testati due diversi tipi di corde: la *cabuya* (fibre di *Fucreae Andina*) e la radice di *Philodendron*. Dalle prove è emerso che la *cabuya* presenta i migliori risultati di resistenza a trazione tra le corde testate, perciò è stata scelta per realizzare le legature quadre necessarie nei test successivi.

Nelle prove sul portale in bambù connesso con legature quadre si è osservato che le corde impiegate tendevano ad allungarsi quando il traverso veniva sollecitato. Di conseguenza il nodo tra le canne di bambù diventava parzialmente cedevole. Questa peculiare caratteristica ha dei risvolti interessanti se applicata a strutture che devono garantire un buon comportamento sismico, in quanto il nodo, cedendo, permette al traverso di bambù di ruotare, favorendo la dissipazione di energia che non avviene unicamente sfruttando le caratteristiche di resistenza del materiale ma anche per la possibilità che ha il sistema di assumere configurazioni diverse, ma prossime, a quella iniziale.

La legatura quadra è stata applicata in seguito per costruire un elemento di rinforzo per murature in terra cruda (realizzate con la tecnica dell'adobe), costituito da una griglia di culmi disposti perpendicolarmente e uniti con legature di corde. Per testare l'efficacia della soluzione costituita da muro di adobe e rinforzo esterno in bambù sono state eseguite prove di flessione fuori piano su pannelli in muratura di adobe in scala 1:4 rinforzati e non. Dal confronto dei risultati si è potuto constatare il ruolo determinante del presidio in bambù che, quando presente, riesce a contenere il muro di adobe dopo l'apertura di lesioni tali da determinarne il collasso strutturale del pannello. La resistenza a flessione degli elementi in bambù consente al graticcio, seppur deformandosi, di accogliere il peso del muro lesionato, impedendone il crollo.

Visto l'esito positivo delle prove è stato sviluppato il progetto di un modulo abitativo di vivanda a basso impatto tecnologico ed ambientale, costruito con materiali e tecniche tradizionali ed allo stesso tempo con interessanti caratteristiche antisismiche [16]. Il rinforzo in bambù testato può essere disposto esternamente alla muratura anche in caso di strutture esistenti ed è in grado contenere i paramenti murari in caso di eventi eccezionali (quali sismi) riducendo i danni che si generano nella parete di adobe (aumento della resistenza al ribaltamento e contenimento in caso di crollo). Deve essere disposto sui due lati della parete (esterno ed interno) e connesso trasversalmente in più punti per assicurare la sua funzione di contenimento. Terminata la sollecitazione la maglia di bambù può essere localmente smontata e la muratura in adobe può essere riparata risanando le lesioni con malta di terra.

La maglia unita con corde è un presidio facile da assemblare e se necessario smontare. Le strutture in terra cruda possono essere ripristinate integralmente se si interviene a ricucire le lesioni la stessa malta di terra utilizzata per la costruzione. La resistenza della malta di terra non si basa su una reazione chimica come nel caso della malta di calce. Se la struttura viene previamente inumidita, la terra presente nella malta si mescola con la terra della parete. La sua resistenza aumenta in funzione del tempo di maturazione, fino a ricostituire una struttura coerente priva di disomogeneità materiche, che lavora come un blocco unico. Il prototipo di vivienda progettato tutela la sicurezza degli utenti in caso di sisma e può essere riparato facilmente, riacquisendo completamente la sua resistenza originale [17].

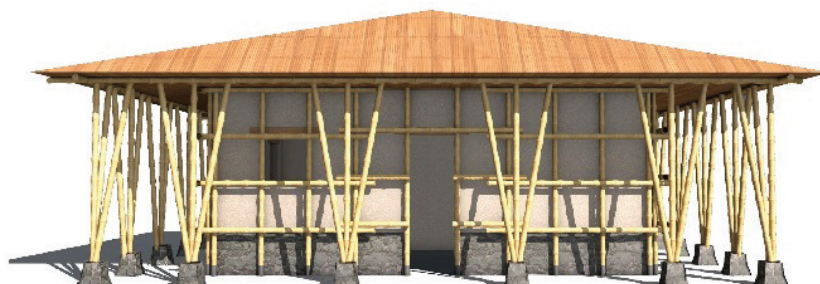


Figura 5: Prototipo di vivienda in adobe e bambù.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Londoño, X., *Distribución, morfología, taxonomía, anatomía, silvicultura y usos de los bambues del Nuevo Mundo*, Universidad Nacional de Colombia, Santafé de Bogotá, 2002.
- [2] Minke, G., *Building with bamboo: design and technology of a sustainable architecture*, Basel, 2012.
- [3] Arcila Losada, J.H., Florez, R. G., *Guadua y madera aplicada a nuevas tecnologías de vivienda popular en Caldas*, Universidad Nacional de Colombia seccional Manizales, Manizales, 1988.
- [4] Muñoz Robledo J.F., *Sistemas Constructivos - Arquitecturas de Baja Altura en Manizales.*, Manizales, 2007.
- [5] *Reglamento colombiano de construcción sismo resistente NSR-10, Capítulo G.12. Estructuras de guadua.*, Bogotá D.C., 2010.
- [6] Villegas, M., *Guadua: Arquitectura y Diseño*, Bogotá, 2003.
- [7] Dunkelberg, K., *Bambus Bamboo*, Stuttgart, 1985.
- [8] Janssen, J.J.A., *Designing and building with bamboo*, technical report n° 20, Technical University of Eindhoven, Eindhoven, 2000.
- [9] Garzón Caicedo, J.V., *Optimización de estructuras en Guadua*, Tesi di Laurea in Architettura, Universidad Nacional de Colombia, Santa Fe de Bogotá, 1996.
- [10] Jorge, L., *Botánica de los cultivos tropicales*, No 84 de Colección de libros y materiales educativos, Ed. Agroamerica, San José, Costa Rica, 2000.
- [11] *Il nostro bambusetto*, <http://www.bambusetto.it/il-nostro-bambusetto>, (29/01/15).
- [12] Fabiani, M., *Proprietà fisiche e meccaniche di bambù di origine italiana*, Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Architettura, Università Politecnica delle Marche, 2014.
- [13] Hidalgo López, O., *Manual de construcción con bambú*, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 1981.
- [14] Raviolo, P.L., *Il laboratorio geotecnico*, Editrice Controls, Milano, 1993.
- [15] Briccoli Bati, S., *Terra: caratteristiche costruttive e caratteristiche meccaniche del materiale e delle strutture*, in: *Costruzioni e uso della terra* a cura di Forlani M.C., Rimini, 2001.
- [16] Asociación Colombiana De Ingeniería Sísmica, Fondo para la Reconstrucción y Desarrollo social del Eje Cafetero – FOREC, *Manual para la rehabilitación de viviendas construidas en adobe y tapia pisada*, Manizales, 2005.
- [17] Bizzeti, F., "Analisi sperimentale di pannelli in adobe e bambù: un esempio di recupero di antiche tecniche costruttive latinoamericane.," Tesi di laurea magistrale in Architettura, relatori prof. Paradiso M., prof.ssa Briccoli Bati S., Università degli Studi di Firenze, Firenze, 2015.