



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Architettura per la sostenibilità

a.a 2024/2025

***Il bamboo come materiale sostenibile:
i suoi trattamenti e la progettazione di strutture d'emergenza
per contesti colpiti da eventi climatici estremi***

Relatori:
Paola Palmero
Angela Lacirignola

Candidato:
Marco Cancellu
s326471

Indice

Introduzione

01 L'aspetto ambientale

| | | |
|--------|--|---------|
| 1.1 | Il cambiamento climatico | pag. 12 |
| 1.1.I | L'aumento delle temperature globali | |
| 1.1.II | L'intensificazione degli eventi estremi | |
| 1.2 | L'impatto dei materiali sulle emissioni di CO ₂ | pag. 25 |

02 Il bamboo

| | | |
|---------|---|---------|
| 2.1 | La coltivazione e gli usi del bamboo nella storia | pag. 38 |
| 2.2 | La diffusione del bamboo | pag. 41 |
| 2.3 | La pianta | pag. 44 |
| 2.3.I | Il rizoma | |
| 2.3.II | Il culmo | |
| 2.3.III | La gemma | |
| 2.3.IV | I rami e il fogliame | |
| 2.3.V | La fioritura | |
| 2.3.VI | La crescita | |
| 2.3.VII | Le specie | |
| 2.4 | Le caratteristiche fisiche del bamboo | pag. 52 |
| 2.4.I | La struttura e la composizione | |
| 2.4.II | La densità e la massa volumica | |
| 2.4.III | Il contenuto di umidità | |
| 2.4.IV | La durabilità | |
| 2.4.V | Il comportamento al fuoco | |
| 2.4.VI | L'assorbimento di CO ₂ | |
| 2.4.VII | Le proprietà meccaniche | |
| 2.5 | Le connessioni | pag. 61 |
| 2.6 | Il bamboo in architettura | pag. 68 |
| 2.7 | I prodotti in bamboo | pag. 70 |
| 2.8 | I pro e i contro | pag. 75 |

03 I trattamenti del bamboo

| | | |
|---------|--|----------|
| 3.1 | I trattamenti | pag. 78 |
| 3.2 | I trattamenti tradizionali | pag. 78 |
| 3.2.I | La vaporizzazione | |
| 3.2.II | La lisciviazione | |
| 3.2.III | La delignificazione | |
| 3.2.IV | I trattamenti con oli | |
| 3.2.V | I trattamenti alcalini | |
| 3.3 | I trattamenti innovativi | pag. 89 |
| 3.3.I | L'acetilazione | |
| 3.3.II | I trattamenti con acido citrico e boro | |
| 3.3.III | I trattamenti al plasma | |
| 3.3.IV | La furfurilazione | |
| 3.3.V | I trattamenti con nano particelle | |
| 3.4 | Il confronto | pag. 102 |

04 Il caso studio: la Cina del Sud

| | | |
|-----|----------------------------------|----------|
| 4.1 | L'analisi del contesto emissivo | pag. 106 |
| 4.2 | L'analisi del contesto climatico | pag. 110 |

05 Il progetto di strutture d'emergenza in bamboo

| | | |
|-----|----------------------------|----------|
| 5.1 | Dal problema al progetto | pag. 116 |
| 5.2 | Le analisi dei casi studio | pag. 116 |
| 5.3 | Il progetto | pag. 119 |
| 5.4 | Gli elementi costruttivi | pag. 121 |

06 Conclusioni

Bibliografia

Introduzione

Il cambiamento climatico è una delle sfide ambientali più complesse che dobbiamo affrontare, in quanto i suoi effetti determinano profonde ripercussioni sulla biosfera terrestre. Le attività antropiche sono i responsabili principali di questo fenomeno, poiché si è constatato un aumento esponenziale in seguito alla rivoluzione industriale. Questo cambiamento sta alterando l'equilibrio del sistema climatico terrestre, generando un incremento dei gas a effetto serra, con un conseguente aumento della temperatura media globale che a sua volta incide sulla manifestazione di eventi estremi, quali ondate di calore e inondazioni.

Tra i principali responsabili di queste emissioni troviamo il settore delle costruzioni, il quale riveste un ruolo significativo sia attraverso l'operational carbon, derivante dal consumo energetico durante l'utilizzo e la gestione degli edifici, sia mediante l'embodied carbon, ovvero l'insieme delle emissioni generate durante l'intero ciclo di vita dei materiali. In particolare, la produzione di cemento e acciaio rappresenta la principale fonte emissiva, in quanto caratterizzata da processi energivori e da un impiego massiccio di risorse naturali non rinnovabili.

Alla luce di quanto esposto, la necessità di ridurre le emissioni climalteranti risulta imprescindibile, promuovendo un'evoluzione del settore edilizio verso modelli più sostenibili, fondati sull'impiego di materiali a basso impatto ambientale, provenienti da fonti rinnovabili. In questo contesto, il bamboo si manifesta come una risorsa fondamentale, sia grazie alla sua rapida crescita naturale senza richiedere processi di riforestazione artificiale, sia alla sua capacità di sequestrare elevate quantità di anidride carbonica durante il suo ciclo di vita.

Le peculiari proprietà fisico-chimiche del bamboo, unite al ridotto impatto ambientale dei processi di coltivazione e lavorazione, lo elevano ad essere un materiale altamente performante e compatibile con le esigenze di sostenibilità del settore edilizio contemporaneo. L'impiego del bamboo, in particolare nelle sue forme ingegnerizzate consente, senza perdere capacità meccaniche, la sostituzione parziale di materiali tradizionali come il cemento e l'acciaio e di conseguenza la riduzione delle emissioni di CO₂.

La presente tesi propone di analizzare la relazione tra cambiamento climatico, con un focus sull'impatto dei materiali da costruzione in termini di emissioni di CO₂eq e la possibilità di ridurle attraverso soluzioni ecocompatibili. Dopo una prima parte introduttiva, la quale si focalizza principalmente sulla descrizione del fenomeno climatico globale e delle sue cause principali, l'elaborato approfondisce l'analisi dei materiali da costruzione ad alto impatto emissivo, con particolare attenzione ai processi produttivi di cemento e acciaio. Successivamente, la ricerca si concentra sul bamboo, analizzandolo sia dal punto di vista botanico e storico-culturale, sia dal punto di vista delle sue potenzialità tecniche, strutturali e ambientali, come materiale da costruzione alternativo, in risposta agli eventi meteorologici estremi intensificati dal cambiamento climatico. Nella parte conclusiva, la tesi analizza un caso studio applicativo, "La Cina del Sud", attraverso il quale convergono i temi trattati nel lavoro di ricerca, tramite la progettazione di un sistema modulare di strutture d'emergenza finalizzato alla gestione degli impatti dovuti agli eventi climatici estremi.

01



L'aspetto ambientale

1.1 Il cambiamento climatico

1.1.1 L'aumento delle temperature globali

Il cambiamento climatico è attualmente una delle sfide più urgenti e complesse che l'umanità si trovi ad affrontare, sebbene il clima della Terra è sempre stato soggetto a variazioni naturali, in particolare quando si fa riferimento a vaste scale temporali. Sin dalla Rivoluzione Industriale si sono registrati cambiamenti senza precedenti per rapidità e portata delle trasformazioni climatiche, che hanno determinato una profonda trasformazione del sistema produttivo, del sistema sociale e di quello economico¹. A differenza delle variazioni climatiche causate da fattori astronomici, vulcanici o solari, il riscaldamento globale osservato negli ultimi decenni è principalmente riconducibile all'aumento delle attività antropiche, che hanno introdotto nel sistema climatico numerose forzanti artificiali².

Tra queste coloro che svolgono un ruolo centrale sono le emissioni di gas a effetto serra (Greenhouse Gases), quali: anidride carbonica (CO₂), metano (CH₄), protossido di azoto (N₂O) ed esafluoruro di zolfo (SF₆)³. Questi gas, accumulandosi nell'atmosfera, intrappolano la radiazione infrarossa emessa dalla superficie terrestre modificando profondamente e in modo irreversibile l'equilibrio radiativo del pianeta determinando un progressivo aumento della temperatura media globale. Le concentrazioni atmosferiche di anidride carbonica, metano e protossido di azoto sono a livelli senza precedenti considerando almeno gli ultimi 800.000 anni, secondo le evidenze paleoclimatiche⁶. Nel decennio 2011–2020, la temperatura superficiale media globale ha registrato un aumento pari a +1.1°C al di sopra dei livelli preindustriali (1850–1900), con una variazione maggiore sulle aree continentali +1.59°C rispetto agli oceani +0.88°C³.

Global mean temperature 1850-2024

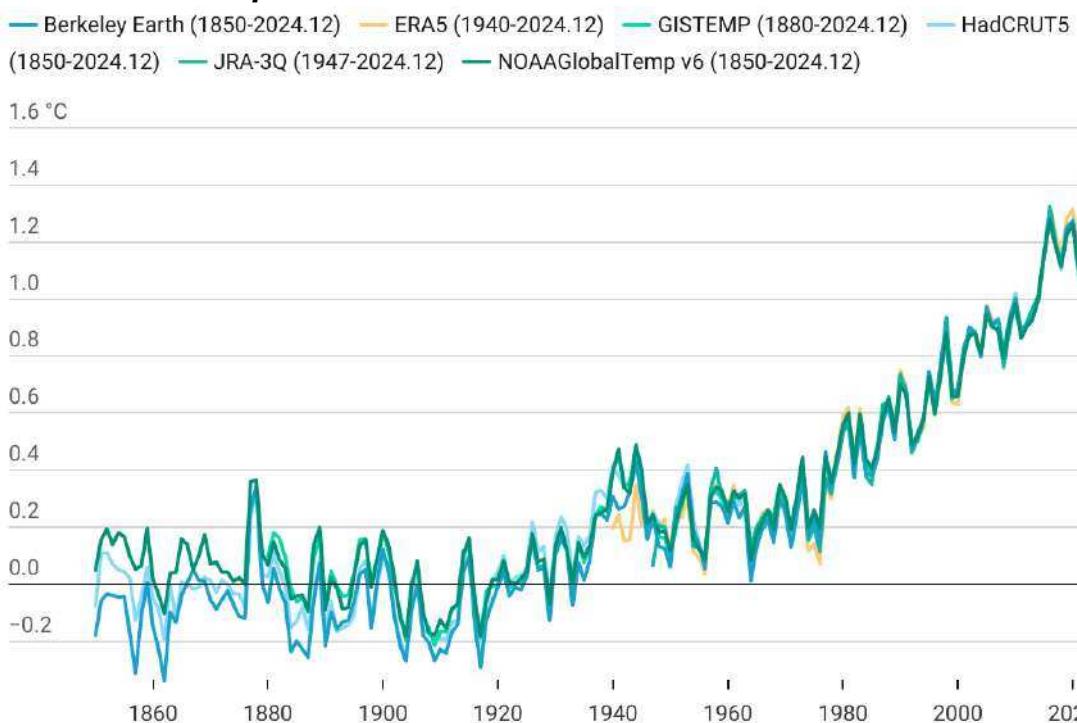


Immagine 1. Annual Global mean temperature anomalies relative to a preindustrial (1850–1900) baseline from 1850–2024. Data source: Berkeley Earth, ERA5, GISTEMP, HadCRUT5, JRA-3Q, NOAAGlobalTemp v6

Variazione della temperatura globale negli ultimi 2000 anni

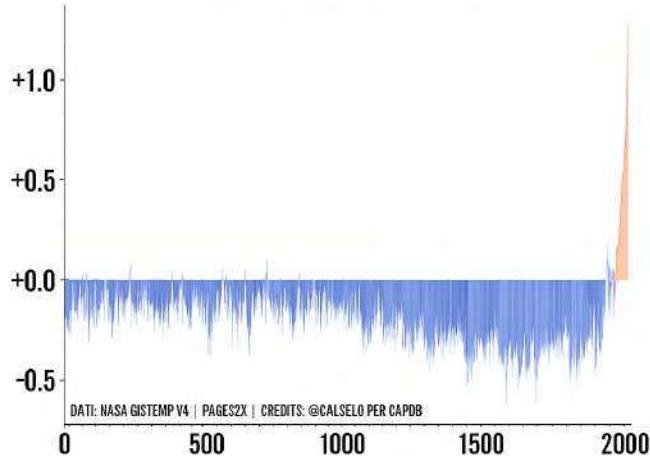


Immagine 2. Anomalia di temperatura media globale per gli ultimi 2000 anni rispetto al periodo 1951-1980. Dati Nasa Gistemp V4

Circa il 90% del calore in eccesso è stato assorbito dagli oceani, contribuendo al loro riscaldamento, con ripercussioni significative sugli ecosistemi marini, sulla circolazione atmosferica e sull'innalzamento del livello del mare. Inoltre, gli oceani assorbono annualmente circa il 25% della CO₂ antropica emessa, contribuendo a mitigare l'impatto climatico, sebbene a costo di un significativo danno ecologico, come l'acidificazione e la perdita di biodiversità marina⁴.

Le stime dell'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) indicano che, tra il 1850-1900e il periodo 2010-2019, l'aumento medio della temperatura riconducibile alle attività umane sia compreso tra 0.8°C e 1.3°C, con una stima centrale di +1.07°C¹. Tale tendenza è ulteriormente confermata da osservazioni satellitari e modelli climatici che evidenziano un riscaldamento alle alte latitudini, specialmente nelle regioni artiche, dove lo scioglimento di ghiacci marini e continentali procede a un ritmo allarmante.

Questi fenomeni hanno visto una progressiva intensificazione negli ultimi 35 anni, con cinque degli anni più caldi mai registrati dopo il 2010. Secondo gli ultimi dati dell'Organizzazione meteorologica mondiale (OMM) e del programma Copernicus sui cambiamenti climatici, il mese di luglio 2019 ha battuto il record come mese più caldo dall'inizio dell'analisi¹. Nel più recente rapporto "The State of the Global Climate 2023" dell'OMM si evidenzia che le concentrazioni atmosferiche medie annue globali di CO₂ e CH₄ hanno continuato ad aumentare, con la CO₂ che ha raggiunto i 419.3 ppm, denotando un aumento di 2.5 ± 0.4 ppm rispetto al 2022⁶. La temperatura media globale nel 2023 è risultata superiore di $+1.45 \pm 0.12^\circ\text{C}$ al di sopra del 1850-1900, rendendo il 2023 l'anno più caldo nei 174 anni di registrazioni osservative, con le temperature che sono state costantemente superiori alla media per l'arco dei 12 mesi. Questo dato assume un significato particolarmente rilevante, poiché si avvicina pericolosamente alla soglia critica di $+1.5^\circ\text{C}$ fissata dagli Accordi di Parigi del 2015, oltre la quale gli impatti negativi del riscaldamento globale diventerebbero più gravi, diffusi e difficilmente reversibili³.

Nel 2023 le concentrazioni atmosferiche hanno raggiunto livelli record:

- Anidride carbonica pari a $420.0 \text{ ppm} \pm 0.1$ corrispondenti al 151% dei livelli preindustriali;
- Metano pari a $1923 \pm 2 \text{ ppb}$ corrispondenti al 266% dei livelli preindustriali;
- Protossido di azoto pari a $335.8 \pm 0.1 \text{ ppb}$ corrispondenti al 124% dei livelli preindustriali.

Nel 2024, questa tendenza ha ulteriormente proseguito, rendendo l'anno in corso il più caldo mai registrato, con temperature globali superiori di circa $1.55 \pm 0.13^\circ\text{C}$ rispetto alla media preindustriale⁶.

Atmospheric greenhouse gas

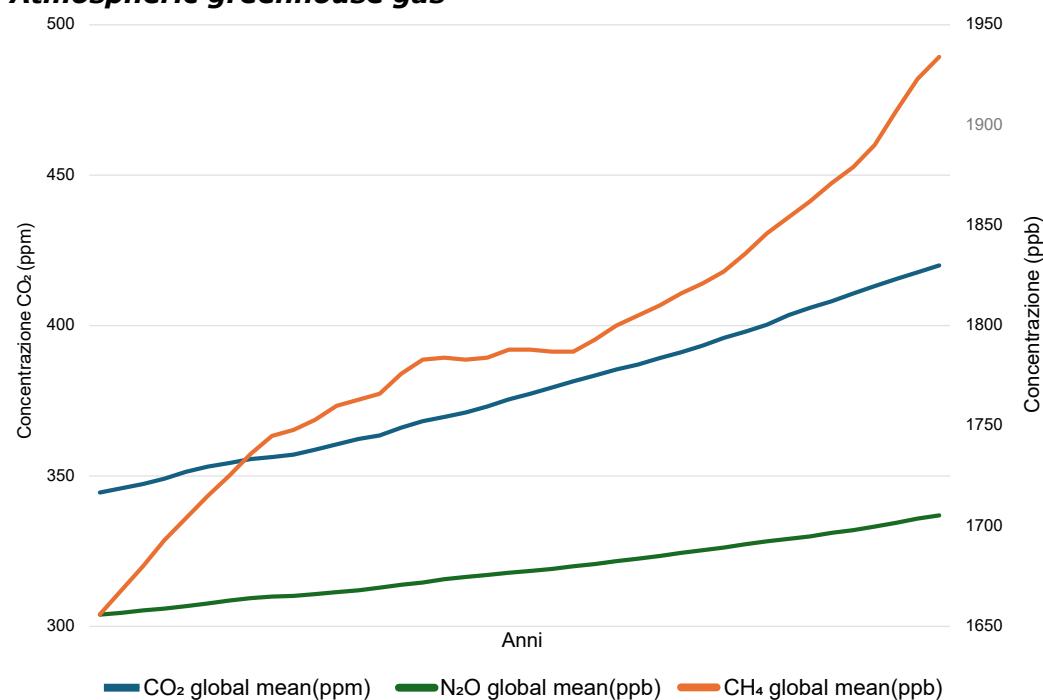


Immagine 3. Atmospheric greenhouse gas data, rielaborazione propria, Data source: World Data Centre for Greenhouse Gases (WDCGG) 2024

Il sesto rapporto di valutazione dell'IPCC presenta quattro principali scenari evolutivi (denominati SSP – Shared Socioeconomic Pathways), per illustrare le possibili traiettorie future del cambiamento climatico nel XXI secolo, in funzione dei futuri livelli di emissioni ad effetto serra prendendo in considerazione l'adozione o meno di strategie di riduzione delle emissioni, la transizione verso energie rinnovabili, la conservazione degli ecosistemi e l'innovazione tecnologica³.

Nell'immagine 4, vengono rappresentate le proiezioni delle emissioni annuali di CO₂ (in GtCO₂/anno) in base ai principali scenari SSP: SSP5-8.5, SSP3-7.0, SSP2-4.5, SSP1-2.6 e SSP1-1.9. Questi rappresentano, rispettivamente, una traiettoria ad alte emissioni (business-as-usual), una traiettoria intermedia, e due scenari a basse emissioni compatibili con gli obiettivi dell'Accordo di Parigi. Le curve evidenziano come, in assenza di politiche di mitigazione efficaci (SSP5-8.5), le emissioni continueranno ad aumentare fino a superare i 100 GtCO₂/anno, mentre solo negli scenari più virtuosi (SSP1-1.9 e SSP1-2.6) si osserva una netta inversione di tendenza, con una progressiva riduzione delle emissioni a partire da metà secolo. È interessante notare come il grafico includa anche una fascia di incertezza, rappresentata con aree sfumate, che mostra l'intervallo di emissioni corrispondente alle otto categorie di scenario climatico (C1-C8), le quali indicano crescenti livelli di riscaldamento globale associati a diverse combinazioni di emissioni cumulative³.

CO₂ emissions for SSP-based scenarios and C1-C8 categories

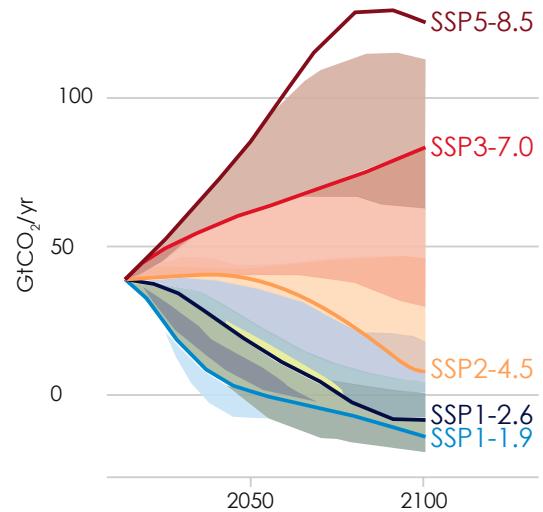


Immagine 4. The integrated framework encompasses socio-economic development and policy, emissions pathways responses to the five scenarios considered by WGI and eight global mean, Data source: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 2023

Nell'immagine 5, l'attenzione si sposta sulle proiezioni di aumento della temperatura media globale rispetto ai livelli preindustriali. Le curve, che corrispondono agli stessi scenari SSP del grafico precedente, evidenziano un chiaro nesso tra l'andamento delle emissioni e il grado di riscaldamento, con il riscaldamento globale che continuerà ad aumentare nel breve termine 2021–2040 in quasi tutti gli scenari e percorsi modellizzati analizzati. Infine, il grafico a barre sintetizza l'aumento della temperatura globale stimato per l'anno 2100 secondo le otto categorie climatiche C1–C8, utilizzate per classificare gli esiti dei modelli in base al livello di riscaldamento raggiunto. Le prime due categorie (C1 e C2) sono associate a un riscaldamento inferiore ai 2°C, coerente con un impegno climatico ambizioso e tempestivo; al contrario, le categorie superiori (C5–C8) riflettono un aumento superiore a 3°C e fino a oltre 5°C, con effetti climatici potenzialmente catastrofici. In tutti gli scenari, tuttavia, emerge con chiarezza la necessità di interventi urgenti, sistematici e coordinati a livello globale per limitare gli effetti più catastrofici del cambiamento climatico³.

Temperature for SSP-based scenarios over the 21 century and C1-C8 at 2100

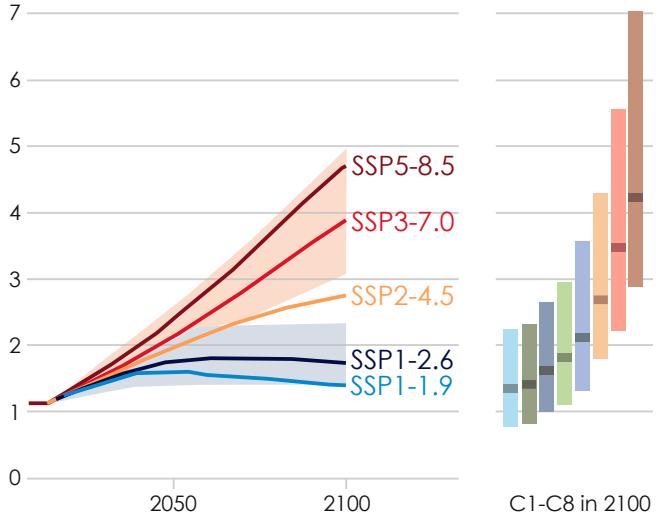


Immagine 5. The integrated framework encompasses socio-economic development and policy, global surface temperature responses to the five scenarios considered by WGI and eight global mean, Data source: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 2023

1.1.II L'intensificazione degli eventi estremi

Il riscaldamento globale, approfondito nel sottocapitolo precedente, non si limita esclusivamente ad un aumento progressivo delle temperature medie globali, ma si manifesta anche attraverso un'intensificazione e una maggiore frequenza di eventi meteorologici estremi³. Tali eventi rappresentano una delle manifestazioni più concrete e riconoscibili del cambiamento climatico, costituendo un importante indicatore del mutamento nei regimi atmosferici e idrologici su scala globale¹.

Global distribution of natural disaster



Immagine 6. Global distribution of natural disasters in 2024 by continent and major affected countries. Data source: CRED, EM-DAT – 2024 Disasters in Numbers

La comunità scientifica definisce un evento meteorologico estremo come un fenomeno la cui intensità o frequenza supera in modo significativo la normale variabilità climatica storica sulla base di dati statistici. Rientrano in questa categoria ondate di calore, siccità prolungate, precipitazioni eccezionali, uragani, cicloni tropicali, tempeste violente e incendi boschivi di grande intensità³.

Tra i principali rischi climatici a breve termine correlati con l'incremento delle temperature globali si evidenziano:

- L'aumento dell'intensità e della frequenza degli eventi estremi di caldo;
- L'amplificazione delle temperature calde estreme;
- La diminuzione della frequenza delle temperature fredde estreme;
- L'incremento della frequenza e dell'intensità delle precipitazioni estreme;
- L'innalzamento del livello medio dei mari.

Cumulative number of natural disaster

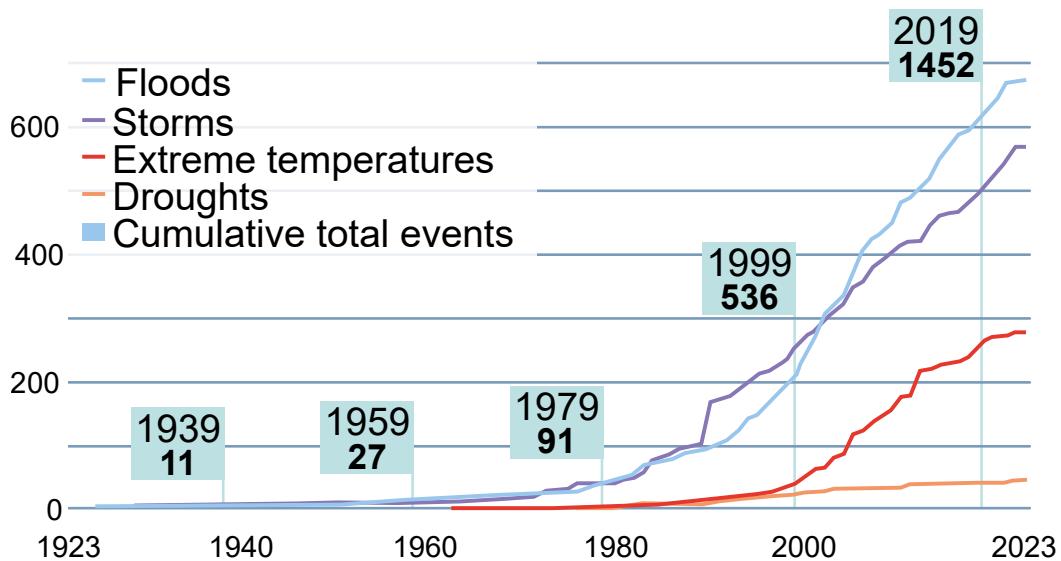


Immagine 7. Cumulative number of global extreme weather events (1923–2023), showing sharp increases in floods, storms, extreme temperatures, and droughts. Data source: World Meteorological Organization

Un aspetto cruciale è rappresentato dalla riconversione spaziale e temporale degli eventi meteorologici estremi, che non si limitano a intensificarsi, ma si verificano anche in regioni e in periodi dell'anno dove erano storicamente poco comuni⁴. Tra le principali tipologie di eventi estremi legati al riscaldamento globale si riscontrano quanto segue.

Onde di calore

Le ondate di calore rappresentano una tipologia di evento estremo sempre più ricorrente, duraturo e intenso, caratterizzato da un persistente superamento delle temperature medie stagionali per più giorni consecutivi³. Questi fenomeni, un tempo considerati anomalie occasionali, tendono oggi a presentarsi con regolarità annuale.

Disasters due to heat waves

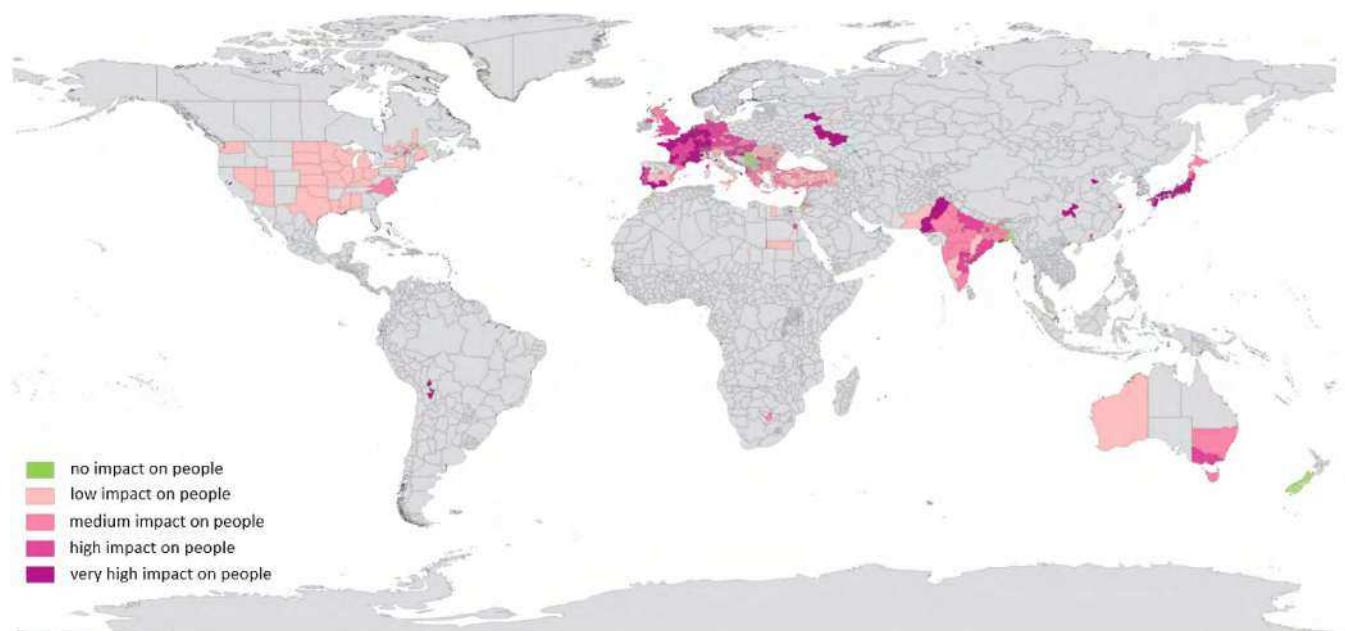


Immagine 8. Level of impact from climate-related disasters due to heat waves in administrative areas between 2000 and 2020, based on the number of people impacted per km². Areas in gray represent those with no entries in the EM-DAT database. Data source: The International Disaster Database

Nei contesti urbani, la presenza di superfici impermeabili, la scarsa ventilazione e l'elevata densità edilizia intensificano l'accumulo di calore, generando microclimi estremi che pongono gravi rischi per la salute pubblica e la stabilità degli ecosistemi urbani⁸.

Siccità

La siccità è rappresentata dall'innalzamento delle temperature globali favorisce processi evaporativi più intensi, riducendo l'umidità del suolo e aggravando gli impatti della scarsità di precipitazioni. La combinazione tra scarse precipitazioni, alte temperature e vento forte genera condizioni favorevoli all'inaridimento dei territori,

Disasters due to droughts

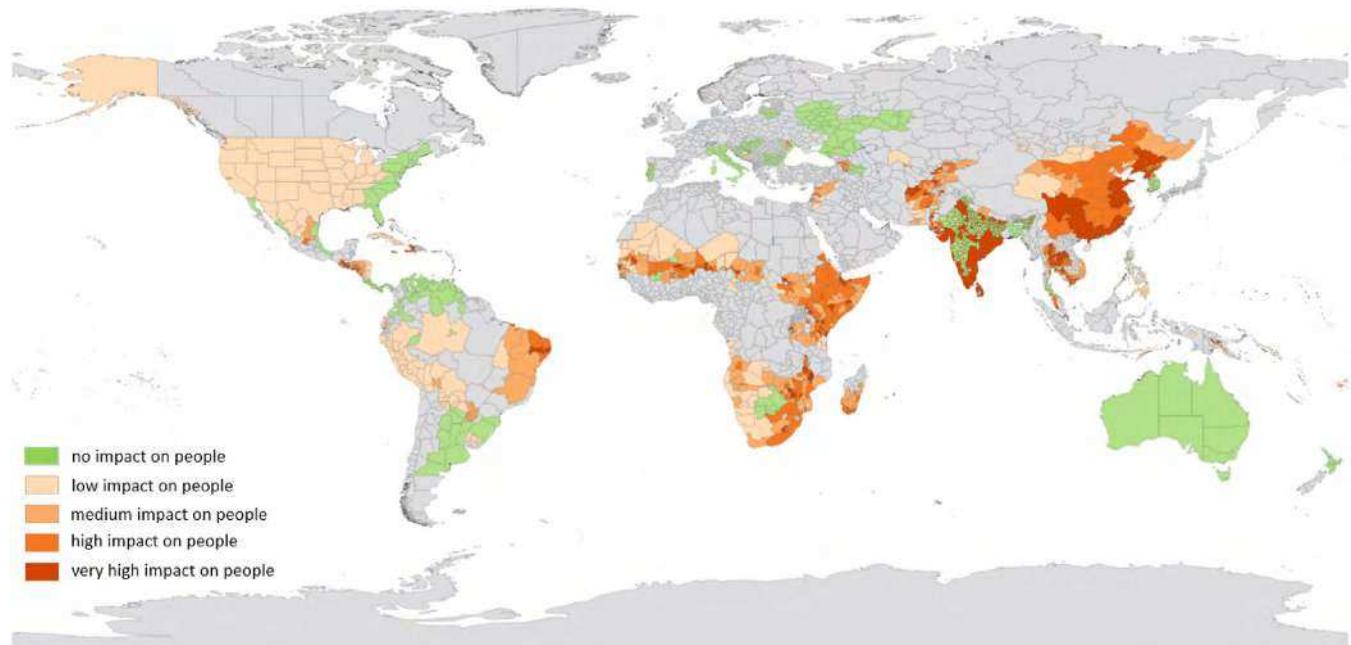


Immagine 9. Level of impact from climate-related disasters due to droughts in administrative areas between 2000 and 2020, based on the number of people impacted per km². Areas in gray represent those with no entries in the EM-DAT database. Data source: The International Disaster Database

compromettendo le risorse idriche, la produttività agricola e la stabilità degli ecosistemi vegetali. L'intensificazione delle condizioni di siccità comporta anche implicazioni significative per la gestione dei bacini idrici e la pianificazione delle risorse idropotabili³.

Incendi boschivi

L'aumento delle temperature, unito a periodi prolungati di siccità e alla riduzione dell'umidità atmosferica, crea le condizioni ideali per l'innesco e la propagazione rapida degli incendi, con

Disasters due to wildfires

gravi danni agli ecosistemi forestali e conseguenze significative in termini di emissioni di CO₂ in atmosfera³.

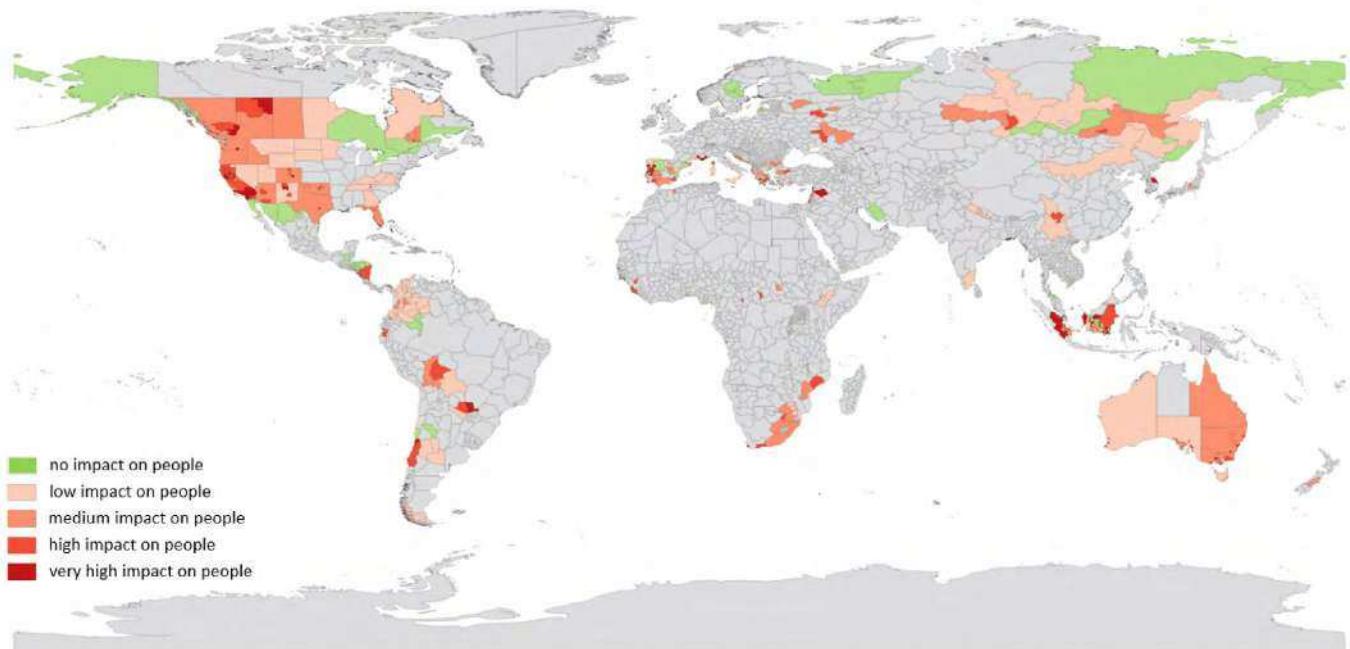


Immagine 10. Level of impact from climate-related disasters due to wildfires in administrative areas between 2000 and 2020, based on the number of people impacted per km². Areas in gray represent those with no entries in the EM-DAT database. Data source: The International Disaster Database

Precipitazioni estreme e inondazioni

L'aumento della temperatura atmosferica, in base alla relazione di Clausius-Clapeyron, che indica un incremento di circa il 6,8% di vapore per ogni grado Celsius di aumento della temperatura, implica una maggiore capacità dell'aria di trattenere vapore acqueo⁷. Questo surplus di umidità atmosferica si traduce in piogge più in-

Disasters due to flash flood

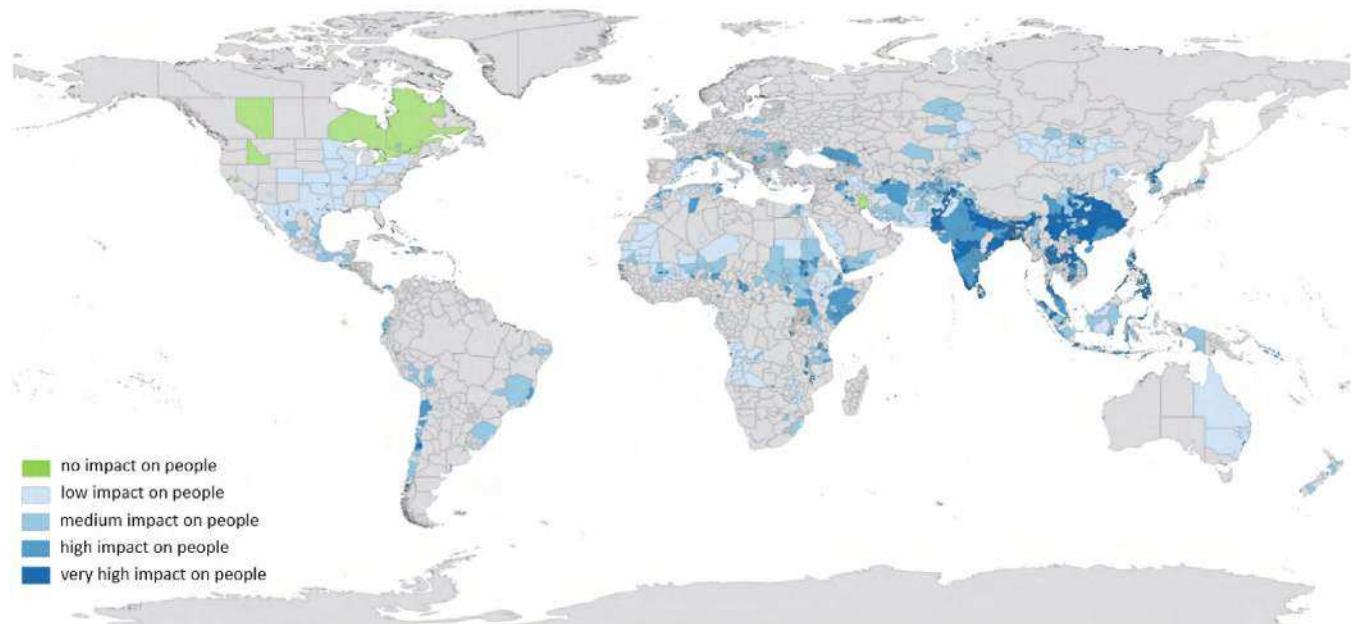


Immagine 11. Level of impact from climate-related disasters due to flash flood in administrative areas between 2000 and 2020, based on the number of people impacted per km². Areas in gray represent those with no entries in the EM-DAT database. Data source: The International Disaster Database

Disasters due to riverine flood

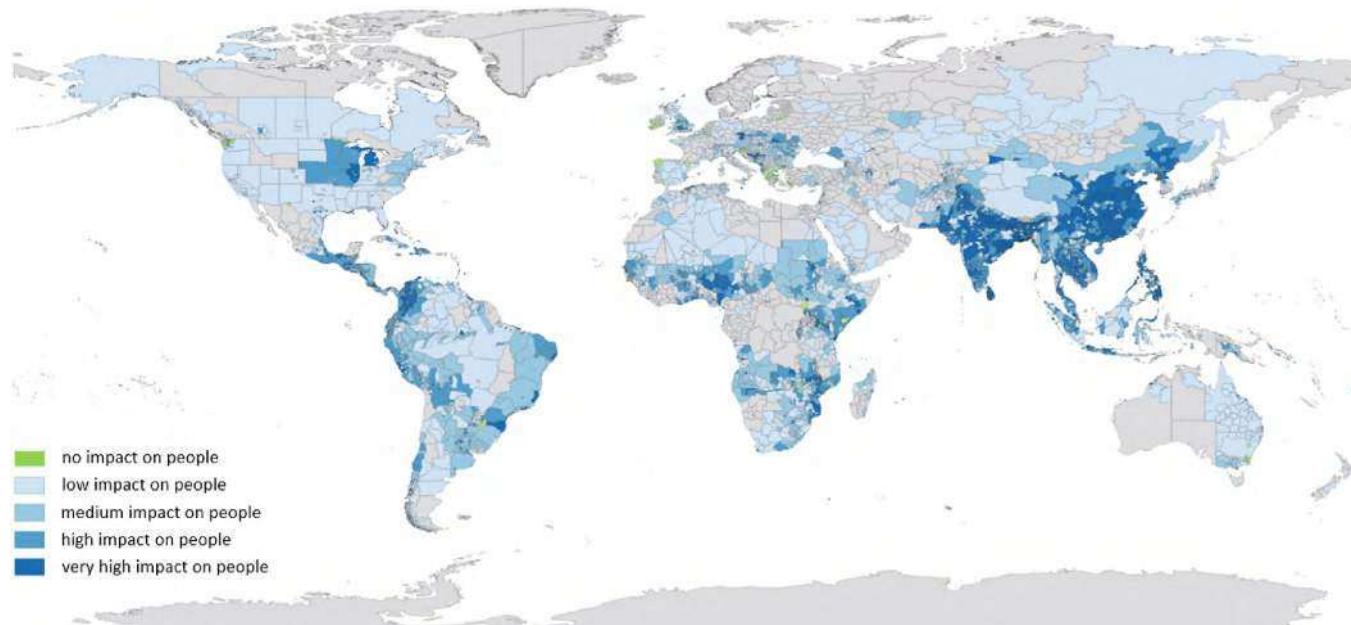


Immagine 12. Level of impact from climate-related disasters due to riverine flood in administrative areas between 2000 and 2020, based on the number of people impacted per km². Areas in gray represent those with no entries in the EM-DAT database. Data source: The International Disaster Database

tense, concentrate in periodi temporali ridotti, con un conseguente aumento del rischio di alluvioni urbane e rurali, frane e smottamenti⁸. Dati recenti evidenziano che, tra il 2011 e il 2020, la frequenza degli eventi di alluvione è stata quattro volte superiore rispetto al 1980, con un incremento del 50% rispetto al decennio precedente¹.

Cicloni tropicali e uragani

Cicloni tropicali e uragani risentono in modo diretto dell'aumento della temperatura superficiale degli oceani, che rappresentano una riserva di energia termica. Il riscaldamento delle acque marine fornisce energia latente necessaria alla formazione e intensificazione di questi sistemi, favorendo lo sviluppo di cicloni di categoria superiore, più distruttivi e con maggiore capacità di trasporto di umidità. Particolarmente preoccupante è il fenomeno della rapid intensification, ovvero l'incremento repentino della potenza di un ciclone in meno di 24 ore, che rende più difficile l'attuazione tempestiva di misure di evacuazione e gestione del rischio¹.

Disasters due to riverine flood

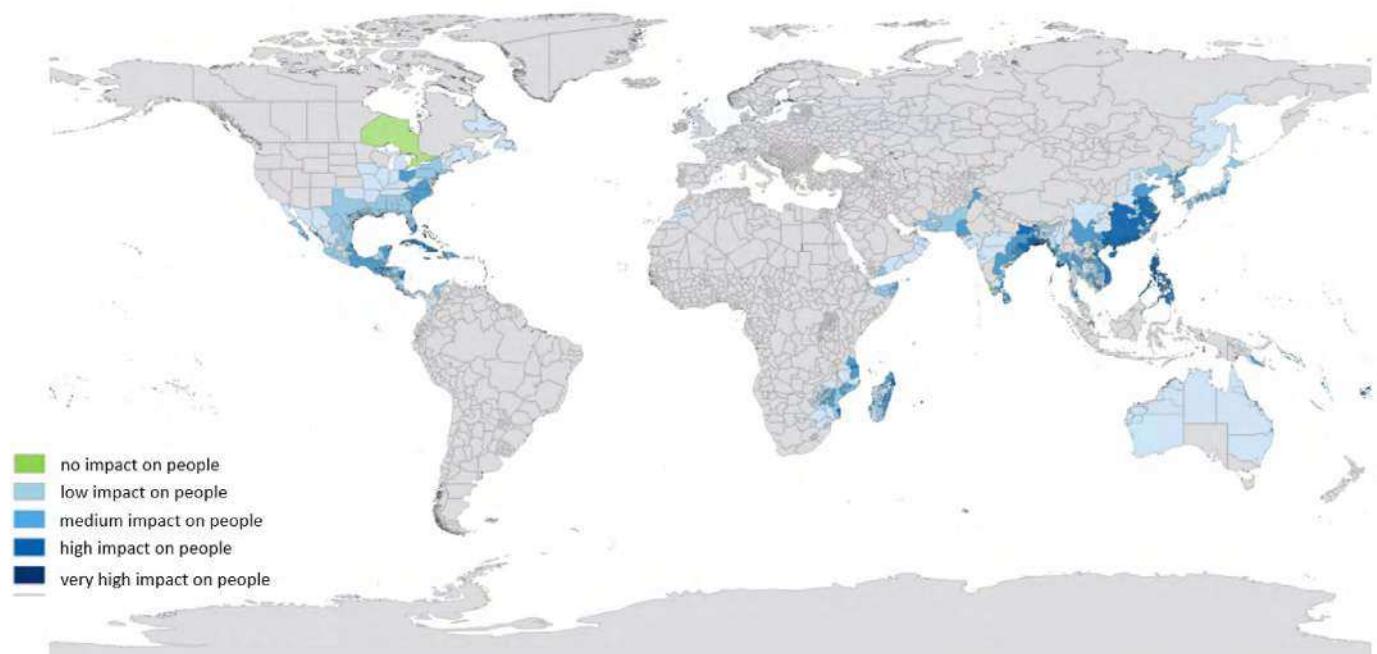


Immagine 13. Level of impact from climate-related disasters due to tropical cyclones in administrative areas between 2000 and 2020, based on the number of people impacted per km². Areas in gray represent those with no entries in the EM-DAT database. Data source: The International Disaster Database

Tempeste violente

Le tempeste mostrano anch'esse un trend crescente in termini di frequenza e intensità. L'aumento dell'energia disponibile nell'atmosfera e le modificazioni nella dinamica frontale e nella stabilità atmosferica ne amplificano la severità, aumentando il rischio associato a fenomeni come grandinate, trombe d'aria e fulmini¹.

Il riscaldamento globale interviene in modo diretto sul bilancio energetico terrestre, alterando i pattern della circolazione atmosferica e oceanica, intensificando il ciclo idrologico, della copertura nevosa e glaciale³. Inoltre, cresce la probabilità di eventi compound, ovvero situazioni in cui più eventi estremi si verificano simultaneamente o in rapida successione¹⁴. Questi eventi sinergici aumentano in modo esponenziale la difficoltà di risposta dei sistemi di protezione civile e delle infrastrutture critiche, aggravando i danni e complicando la pianificazione dell'adattamento⁴. Secondo l'Intergovernmental Panel on Climate Change l'intensificazione di eventi estremi è osservabile a livello globale a partire

dalla metà del XX secolo, in stretta correlazione con l'accelerazione del riscaldamento globale degli ultimi 150 anni dovuta ad effetti antropici come analizzato in precedenza. Le precipitazioni estreme sono aumentate di oltre il 50% nell'ultimo decennio, e la loro frequenza è quadruplicata rispetto agli anni '80¹. Analogamente, la frequenza delle tempeste intense è cresciuta del 35%, con un numero di eventi raddoppiato rispetto agli anni '80. L'analisi dei principali database climatici internazionali, come EM-DAT¹³, conferma che le curve di ritorno, strumenti statistici fondamentali per stimare la frequenza degli eventi estremi, si stanno spostando significativamente, mostrando che eventi considerati rari si verificano oggi con cadenza sempre più ravvicinata¹³.

Disequilibrio energetico terrestre

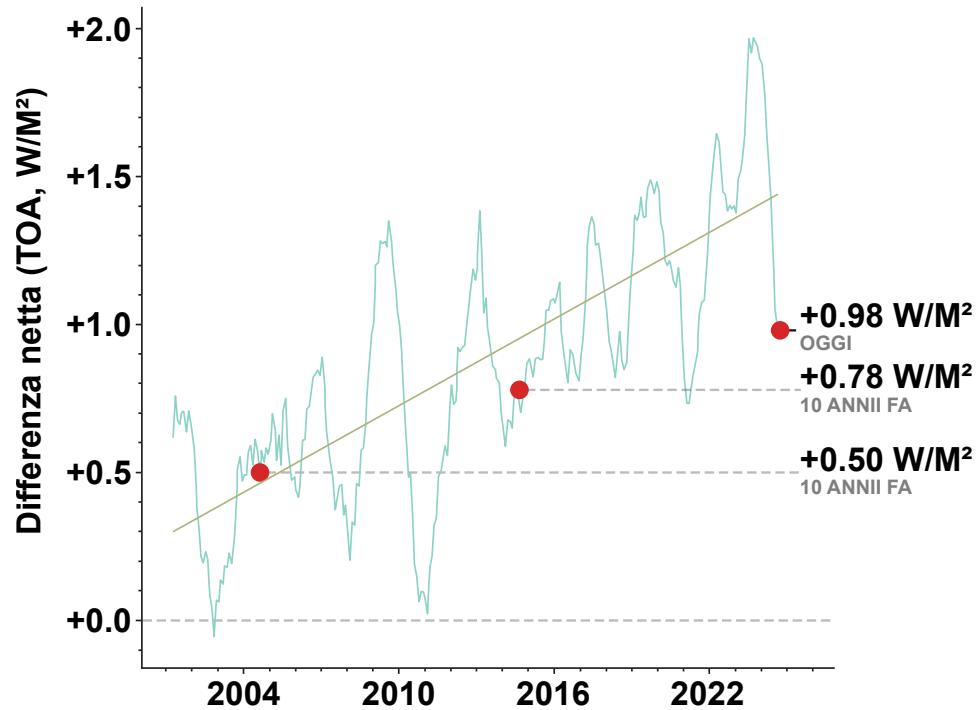


Immagine 14. Disequilibrio energetico terrestre. Data source: NASA

1.2 L'impatto dei materiali sulle emissioni di CO₂

Dopo aver analizzato l'innalzamento delle temperature globali e i rischi climatici associati è necessario approfondire le cause materiali del cambiamento climatico, ovvero quelle attività umane che contribuiscono in modo sostanziale all'emissione di gas serra². Tra queste, la produzione e l'impiego di materiali da costruzione rappresentano una delle fonti più rilevanti. A livello globale, i molteplici settori responsabili delle emissioni di gas serra sono quello legato alle costruzioni e all'edilizia, contribuendo in modo significativo all'aggravamento della crisi climatica. Secondo le stime questo settore è responsabile di circa il 39% delle emissioni globali di gas serra, considerando sia le emissioni operative generate durante la vita utile degli edifici sia quelle incorporate nei materiali da costruzione e nelle attività di cantiere.

In particolare, è utile distinguere tra due principali categorie di emissioni: da un lato, il carbonio operativo, che comprende le emissioni legate all'uso, alla gestione e alla manutenzione degli edifici, e che rappresenta circa il 28% delle emissioni globali¹⁶; dall'altro, il cosiddetto carbonio incorporato (embodied carbon), che include di tutte le emissioni di gas serra generate lungo l'intero ciclo di vita dei materiali da costruzione dall'estrazione delle materie prime fino allo smaltimento, al riciclo o al riuso dei materiali e che contribuisce per circa l'11% al totale delle emissioni globali¹⁶.

Global greenhouse gas emission by sector

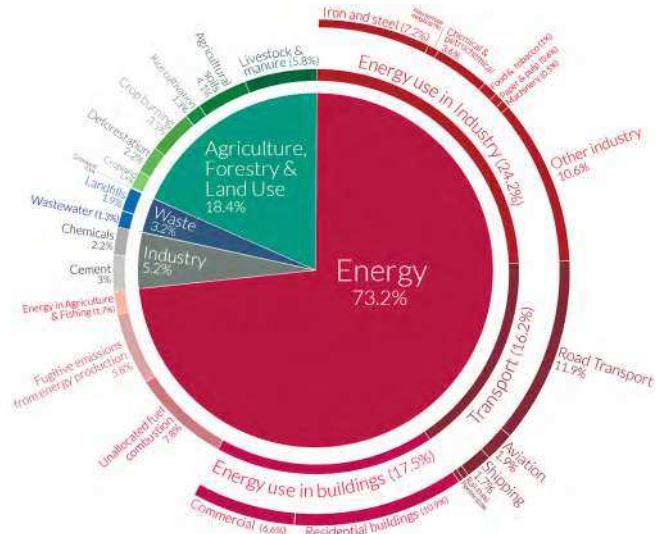


Immagine 15. Global greenhouse gas emission by sector. Data source: Climate watch, the World Resources Institute 2020

Il carbonio incorporato rappresenta una componente particolarmente complessa da quantificare e mitigare, poiché abbraccia numerose fasi produttive: l'estrazione delle risorse naturali, la lavorazione industriale, il trasporto dei materiali, le attività di cantiere, le operazioni di manutenzione e sostituzione, fino alle fasi finali di demolizione e trattamento dei rifiuti da costruzione¹⁵.

Embodied Energy and CO₂ footprint for the primary production of materials

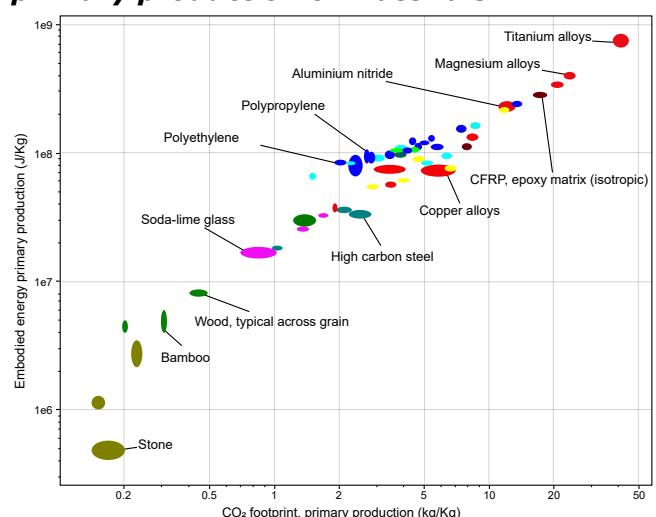


Immagine 16. Embodied Energy and CO₂ footprint for the primary production of materials, Data source: Selection of Materials for Sustainability in the Built Environment, Elsevier.

La quantificazione degli impatti ambientali dovuti a queste emissioni viene effettuata mediante metodologie standardizzate di analisi del ciclo di vita Life Cycle Assessment (LCA), che permettono di stimare con precisione le emissioni in termini di Global Warming Potential (GWP), espresso in chilogrammi di anidride carbonica equivalente (kgCO₂eq)³. Questo indicatore prende in considerazione non solo la CO₂, ma anche altri gas serra ad alto potere climaletrante, come metano (CH₄), protossido di azoto (N₂O) e gas fluorurati (HFCs, PFCs, SF₆, NF₃), attribuendo a ciascuno un valore in base al loro effetto relativo sul riscaldamento globale su un orizzonte temporale di 100 anni¹⁶.

Lifecycle stages



Immagine 17. Lifecycle stages, Data source: BS EN 15978:2011

Secondo le analisi LCA, le fasi di estrazione e produzione industriale sono di gran lunga le più impattanti, spesso responsabili dell'80–90% delle emissioni totali associate ai materiali. Il trasporto contribuisce in misura minore, ma non trascurabile, soprattutto nei casi di grandi distanze tra luogo di produzione e cantiere. Anche la fase di uso e manutenzione può incidere notevolmente soprattutto per i materiali che richiedono frequenti interventi di sostituzione o manutenzione¹⁶.

All'interno del più ampio settore industriale, che secondo il rapporto IPCC del 2022 contribuisce per circa il 25% alle emissioni globali di gas serra, spiccano due industrie fondamentali per l'edilizia: quella relativa alla produzione del cemento e dell'acciaio. Nel 2022, la produzione mondiale di cemento ha superato i 4,1 miliardi di tonnellate, con emissioni stimate attorno ai 2,6 miliardi di tonnellate di CO₂¹⁷, mentre la produzione di acciaio ha raggiunto circa 1,9 miliardi di tonnellate, con emissioni associate superiori ai 3 miliardi di tonnellate di CO₂¹⁸.

La produzione del cemento Portland tradizionale (OPC) è responsabile di circa il 7% delle emissioni globali di CO₂, principalmente a causa della produzione del clinker, il componente attivo del cemento Portland. Questo processo avviene attraverso la calcinazione del carbonato di calcio(CaCO₃) a temperature superiori ai 1450°C, liberando CO₂ sia per decomposizione termica che per combustione dei combustibili fossili necessari a mantenere tali condizioni termiche. Secondo i dati del database ecoinvent 3.8¹⁵, l'impronta carbonica media del cemento Portland si colloca tra 0.8 e 1KgCO₂eq per chilogrammo di prodotto.

Cement production flow and it's CO₂ emissions

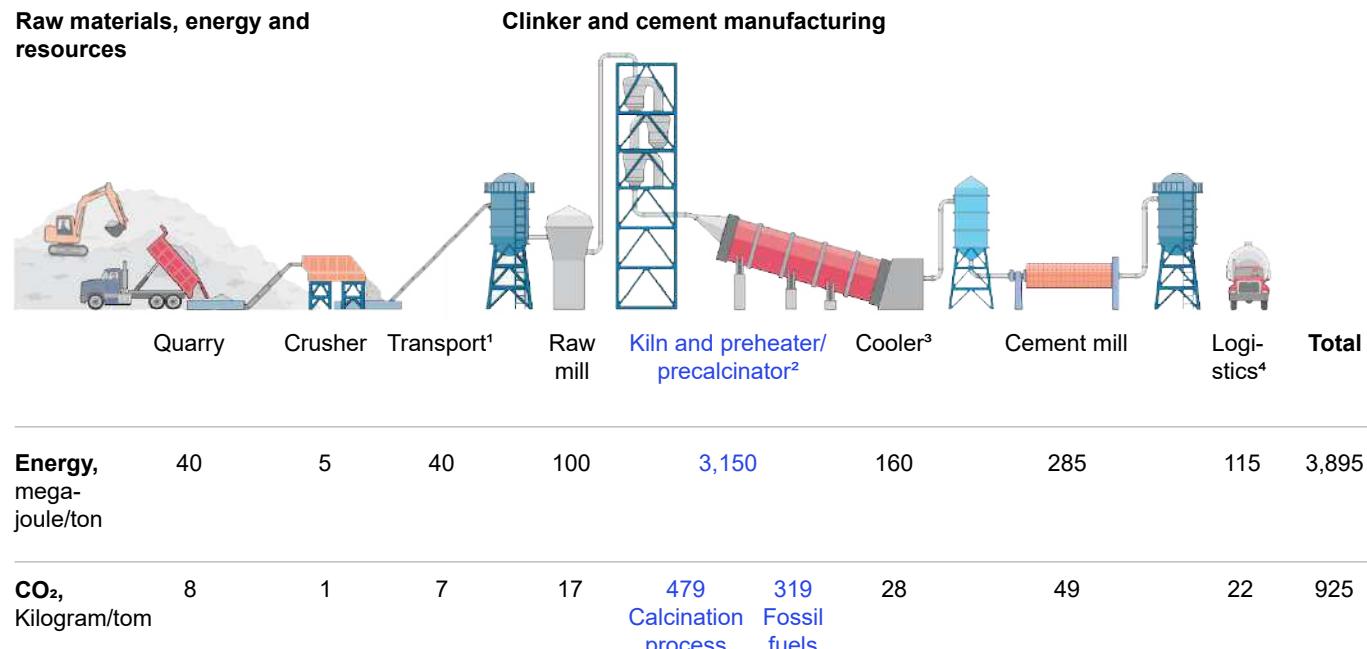


Immagine 18. Simplified process flow of cement production and it's CO₂. Data source: The Royal Institute of International Affairs

Ciò porta alla conclusione che la soluzione stia nella riduzione della produzione di clinker, che potrà essere compensata dall'utilizzo di aggiunte minerali, quali la loppa d'altoforno, fumo di silice, pozzolana e ceneri volanti e altri materiali. Le ceneri volanti conosciute anche come fly ash ("CFA") sono i residui minerali fini del particolato, estratto dai gas di combustione del carbone in attesa di essere utilizzato¹⁹. I cementi che incorporano la CFA si introducono come alternativa ecologica richiedendo meno acqua, consumando meno energia e riducendo la quantità di materie prime estratte essendo un sottoprodotto industriale²⁰. La CFA può parzialmente sostituire il cemento Portland nella produzione di calcestruzzo poiché la sua inclusione ne migliora la durabilità e la resistenza meccanica¹⁹. Poiché la CFA non richiede trattamento termico ulteriore si può ottenere un risparmio di 0.8 tCO₂ per ogni tonnellata di OPC sostituito¹⁹.

L'utilizzo della loppa granulata d'altoforno nel calcestruzzo è aumentato considerevolmente negli anni recenti. Questo poiché la loppa può sostituire il clinker Portland fino all'95%²¹ riducendo considerevolmente le emissioni di CO₂ in virtù della notevole percentuale di clinker sostituita²². La loppa è un materiale di riciclo venutosi a generare dagli altoforni di lavorazione del minerale feroso, contribuendo a conferire al nuovo calcestruzzo una resistenza agli ambienti moderatamente aggressivi²². Tuttavia, la sua produzione sta diminuendo poiché sempre più acciaio viene prodotto mediante forni elettrici, i quali non generano questo sottoprodotto. Invece il Limestone Calcined Clay Cement, non solo offre un'alternativa ecosostenibile al cemento tradizionale, ma garantisce anche maggiore resistenza, efficienza in termini di costi e durata prolungata²³.

L'acciaio, altro materiale strutturale essenziale nelle costruzioni, contribuisce per circa il 7–8% alle emissioni globali di CO₂⁴. L'impatto ambientale di questo materiale varia in funzione del metodo produttivo adottato; i due metodi principali sono il Basic Oxygen Furnace (BOF), basato sulla riduzione del minerale ferroso mediante carbone coke, che emette in media 2.3 tonnellate di CO₂ per ogni tonnellata di acciaio prodotto. Al contrario il processo Electric Arc Furnace (EAF), che si affida principalmente a rottami metallici comporta emissioni molto inferiori, pari a circa

Steel production flow and its GHG emissions

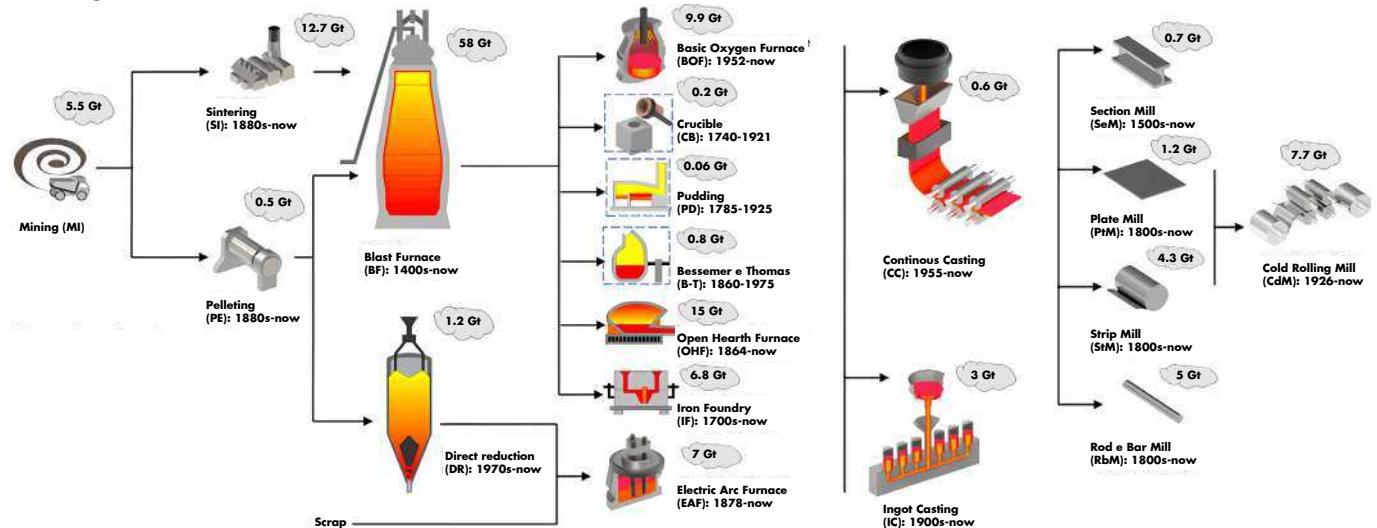


Immagine 19. Steel production technologies and their total GHG emissions, Data source: The Royal Institute of International Affairs

0.4 tonnellate di CO₂ per tonnellata, specialmente se alimentato con energia da fonti rinnovabili²⁴. Inoltre, la produzione primaria di acciaio richiede grandi quantità di energia, fino a 35 MJ per chilogrammo, e genera emissioni medie tra 1.7 e 2.0 kgCO₂eq per chilogrammo di acciaio¹⁶. Tuttavia, la produzione secondaria da riciclo può ridurre l'impatto emissivo di oltre il 70%, evidenziando il ruolo cruciale del riciclo per la decarbonizzazione del settore¹⁸.

Le emissioni dirette variano tra 0.1 e 0.3 tonnellate di CO₂ per tonnellata di acciaio prodotto²⁶, un ordine di grandezza inferiore rispetto alle circa 2 tCO₂/t nel caso della produzione da minerale feroso²⁷. Tuttavia, la disponibilità limitata di rottami e la minore versatilità del prodotto finale rispetto agli acciai ottenuti con processi primari, ne limitano la scalabilità e l'applicazione²⁴. Nonostante l'elevata richiesta di energia elettrica, la produzione da rottame si distingue per efficienza energetica e risparmio economico: consente una riduzione del 75% nel fabbisogno energetico e un taglio fino al 90% nei costi legati all'approvvigionamento di materie prime. Tali vantaggi spiegano il crescente interesse verso l'espansione di questo metodo come alternativa agli altiforni, in linea con gli obiettivi di decarbonizzazione del settore²⁷. Un'altra via efficace per la decarbonizzazione del settore siderurgico è rappresentata dall'acciaio green in cui le emissioni di CO₂ sono drasticamente ridotte grazie all'impiego di idrogeno o al riciclo dei rottami²⁵.

L'idrogeno rappresenta un elemento chiave nella transizione verso una produzione di acciaio a basse emissioni, in particolare attraverso il processo di riduzione diretta. In questo metodo, l'idrogeno gassoso interagisce con i minerali di ferro all'interno di un reattore dedicato, riducendoli in presenza di sufficiente energia termica²⁶. Rispetto agli altiforni convenzionali, il processo avviene a temperature inferiori e genera Hot Briquetted Iron (HBI), una forma solida di ferro preridotto, che viene successivamente fusa in forni elettrici ad arco o in impianti di fusione per ottenere acciaio²⁷. L'impiego dell'idrogeno consente di evitare le emissioni dirette di CO₂ derivanti dalla riduzione del minerale, ma la sua produzione è attualmente costosa e ad alta intensità energetica²⁸. In attesa di una disponibilità su larga scala di idrogeno verde, una soluzione intermedia prevede l'uso del gas naturale, in particolare metano, che offre comunque una riduzione significativa delle emissioni, fino a due terzi rispetto ai metodi tradizionali, grazie al suo elevato contenuto di idrogeno²⁵.

All'interno del settore industriale, oltre a cemento e acciaio, anche altri compatti industriali contribuiscono significativamente alle emissioni globali: la metallurgia (7.8%), la petrolchimica (6.3%) e la gestione dei rifiuti (3.9%) sono settori chiave per l'approvvigionamento di materiali e infrastrutture, e al contempo tra i più difficili da decarbonizzare per la loro complessità tecnologica e logistica¹⁵.

Il settore delle costruzioni, quindi, non solo incide fortemente in termini di emissioni dirette ed indirette di gas serra, ma anche in termini di consumo energetico e sfruttamento delle risorse naturali¹⁶. Studi di analisi del ciclo di vita dimostrano che tra i materiali da costruzione più impattanti, dal punto di vista delle emissioni di CO₂, si evidenziano maggiormente il calcestruzzo e l'acciaio, che da soli rappresentano la maggior parte delle emissioni associate ai materiali delle infrastrutture civili. In molti casi, l'acciaio può essere responsabile di oltre il 60% delle emissioni totali dei materiali, mentre il calcestruzzo contribuisce per una quota variabile tra il 23% e il 30%, a seconda della tipologia di opera¹⁶. Tali dati mettono in luce quanto sia cruciale concentrarsi su questi materiali per ridurre l'impatto climatico del settore edilizio, attraverso innovazioni tecnologiche, uso di materiali alternativi a basso impatto e strategie gestionali più efficienti.

Sino a questo punto sono state analizzate le due più grandi fonti di emissioni dalla produzione dei materiali. Ovviamente ci sono anche delle alternative tra queste mettiamo in evidenza il legno e in particolare il bamboo materiale che tratteremo approfonditamente in seguito quale elemento principale della tesi.

Il legno in particolare nelle sue forme ingegnerizzate rappresenta un materiale da costruzione a basso impatto ambientale e con un elevato potenziale per la decarbonizzazione del settore edilizio²⁹. È una risorsa rinnovabile che assorbe e immagazzina anidride carbonica durante la crescita dell'albero, svolgendo così un ruolo attivo nella mitigazione del cambiamento climatico³⁰. Dal punto di vista del ciclo di vita, il legno presenta valori di emissione significativamente inferiori rispetto ai materiali analizzati in precedenza. Un esempio ne è la produzione di 1 m³ di Cross Laminated Timber (CLT) la quale genera in media circa 155–158 kg di CO₂eq³¹, ma considerando il carbonio biogenico sequestrato nel materiale, il bilancio netto può risultare addirittura negativo, con stime comprese tra -318 e -947 kg CO₂eq/m³, a seconda delle condizioni di produzione e delle fonti energetiche impiegate³². Anche sotto il profilo dell'energia incorporata, il legno lamellare richiede mediamente 12 MJ/kg, mentre il legno massiccio si attesta intorno a 8.5 MJ/kg³³. Tali valori risultano nettamente inferiori rispetto all'acciaio e al cemento. In edifici in legno multipiano, la quantità incorporata di materiale strutturale può variare a un sequestro di carbonio biogenico dell'ordine di 220–293 kg CO₂eq per metro quadro di edificio, il che equivale, a parità di funzione strutturale, a una riduzione delle emissioni di circa il 40%–50% rispetto a sistemi basati su calcestruzzo armato o acciaio³⁴.

Ulteriore vantaggio del legno è la possibilità di prolungare lo stoccaggio di carbonio nel tempo grazie alla durabilità dei componenti strutturali, spesso superiori ai 50 anni. Inoltre, scenari di fine vita che prevedono il riuso o la valorizzazione energetica del materiale possono portare a una mitigazione complessiva delle emissioni tra il 74% e l'84% rispetto agli scenari convenzionali³⁵. In particolare, lo scenario di discarica contribuisce da solo a una mitigazione potenziale del 75%, grazie al carbonio biogenico trattenuto (38%) e alla riforestazione successiva (23%)³⁵. Va inoltre sottolineato che l'impiego del legno proveniente da gestione forestale sostenibile, in conformità con certificazioni come Forest Stewardship Council (FSC) o Programme for the Endorsement of Forest Certification schemes (PEFC), le quali garantiscono il mantenimento della funzione ecologica e del bilancio del carbonio delle foreste di origine, evitando fenomeni di deforestazione netta.

Il bamboo rappresenta una risorsa naturale rinnovabile di grande interesse per il settore delle costruzioni grazie alla sua rapida crescita e all'elevata capacità di sequestrare carbonio durante il ciclo di vita vegetativo. Dal punto di vista delle emissioni di gas serra, questo materiale si distingue per un bilancio netto straordinariamente favorevole rispetto ai materiali tradizionali, dovuto al significativo assorbimento di CO₂ durante la crescita, che può superare le 200 tonnellate di CO₂ per ettaro all'anno, a seconda della specie e delle condizioni climatiche³⁶. Tale valore risulta molto superiore anche comparato a un materiale quale il legno già di per sé con impatti climatici contenuti. Questa capacità di sequestro rende il bamboo un materiale a basso impatto ambientale, soprattutto se il ciclo di gestione forestale è sostenibile e rispettoso delle pratiche di riforestazione. Durante la fase di coltivazione, le emissioni di CO₂ derivano principalmente dall'uso di macchinari agricoli, fertilizzanti e gestione del suolo, ma tali impatti sono generalmente contenuti e rappresentano meno del 10% del bilancio totale del ciclo di vita del materiale³⁷. Nella fase di raccolta e prima lavorazione, le emissioni aumentano leggermente a causa delle operazioni meccaniche di taglio, trasporto e preparazione del materiale grezzo.

Studi LCA indicano che queste fasi contribuiscono mediamente con valori tra 5 e 15 kg CO₂eq/m³³⁸. L'utilizzo del bamboo come elemento strutturale comporta inoltre un'efficace immobilizzazione del carbonio biogenico, mantenuto nel materiale per tutta la durata di vita dell'opera, che può variare da decenni a oltre un secolo, a seconda delle condizioni di conservazione e trattamento. L'aspetto critico che influisce sulle emissioni nella filiera del bamboo riguarda però la trasformazione industriale e il trasporto. Le lavorazioni che includono essiccazione, trattamenti protettivi contro parassiti e funghi, e la produzione di elementi modulari possono incrementare l'impronta carbonica del prodotto fino a 50–150 kgCO₂eq per metro cubo, variando in funzione dell'efficienza degli impianti e del tipo di energia utilizzata³⁸. Nel complesso, studi comparativi evidenziano come il bamboo naturale mantenga un bilancio di emissioni nettamente inferiore rispetto a materiali da costruzione tradizionali, con un potenziale di riduzione delle emissioni legate alla produzione di almeno il 50–70%, soprattutto quando si adottano filiere corte e fonti di energia rinnovabile negli stabilimenti di lavorazione³⁶. Il bamboo ingegnerizzato invece è un materiale ottenuto dalla trasformazione della materia prima in prodotti compositi ad alte prestazioni. Tuttavia, il suo profilo emissivo risulta più complesso da analizzare a causa dell'energia intensiva richiesta nelle fasi di lavorazione e dell'uso di adesivi sintetici.

Le valutazioni LCA indicano che le emissioni associate alla produzione di prodotti in bamboo ingegnerizzato variabili tra 150 e 300 kgCO₂eq per metro cubo³⁷. Sebbene più elevate rispetto al materiale grezzo, tali emissioni rimangono comunque inferiori rispetto a quelle tipiche di materiali da costruzione convenzionali. Il bamboo ingegnerizzato conserva un vantaggio climatico rilevante grazie all'immagazzinamento del carbonio biogenico nel prodotto finito e alla sua maggiore durabilità, che consente di prolungare il sequestro di CO₂ per periodi superiori a 50 anni³⁸. Inoltre, la sua elevata resistenza meccanica consente la sostituzione di materiali ad alta intensità carbonica come acciaio e cemento, contribuendo così a ridurre significativamente le emissioni complessive degli edifici in cui viene impiegato³⁹. Un ulteriore aspetto rilevante è la possibilità di ottimizzare la sostenibilità della filiera attraverso l'adozione di fonti energetiche rinnovabili nei processi produttivi e la scelta di adesivi a base biologica o a basso impatto ambientale, strategie che riducono sensibilmente l'impronta carbonica del bamboo ingegnerizzato³⁸.

Nel contesto del settore industriale, accanto ai tradizionali comparti ad alto impatto come cemento e acciaio, materiali alternativi come il legno e il bamboo rappresentano risorse fondamentali per la decarbonizzazione grazie al loro ruolo nel sequestro del carbonio e al bilancio emissivo complessivamente ridotto. Tuttavia, è importante considerare che, pur presentando un profilo ambientale più favorevole, anche questi materiali comportano emissioni di gas serra nelle fasi di coltivazione, trasformazione e trasporto, che devono essere attentamente gestite per massimizzare i benefici climatici³⁰. Studi di analisi del ciclo di vita indicano che il legno e il bamboo, soprattutto se proveniente da filiere certificate e gestite in modo sostenibile, grazie alla sua rapida crescita e capacità di assorbire elevate quantità di CO₂, offrono un potenziale significativo per ridurre l'impronta carbonica degli edifici.

In particolare, l'impiego di bamboo ingegnerizzato consente di estendere ulteriormente questo potenziale, garantendo prestazioni meccaniche elevate e maggiore durabilità, pur mantenendo un profilo emissivo inferiore rispetto a materiali da costruzione convenzionali quali acciaio e calcestruzzo²⁹. L'integrazione di questi materiali a basso impatto all'interno delle filiere edilizie, supportata da innovazioni tecnologiche e dall'adozione di fonti energetiche rinnovabili nei processi produttivi, si configura quindi come una leva strategica imprescindibile per la riduzione complessiva delle emissioni nel settore delle costruzioni³². Questo approccio consente di coniugare la necessità di prestazioni strutturali elevate con l'obiettivo di sostenibilità ambientale, promuovendo una gestione più efficiente delle risorse naturali e contribuendo in modo significativo agli impegni globali di mitigazione del cambiamento climatico.

12

II bamboo

2.1 La coltivazione e gli usi del bamboo nella storia

Il bamboo incarna e riflette profondamente alcuni dei valori fondamentali dell'antica tradizione orientale⁴⁰. Esso è spesso considerato simbolo di umiltà, rappresentata poeticamente dalle sue foglie che si piegano verso il suolo, quasi a rendere omaggio alla terra. La sua integrità si manifesta attraverso i culmi, che, pur piegandosi sotto l'azione del vento o della pioggia, riescono sempre a raddrizzarsi, dimostrando una straordinaria capacità di resilienza. La perennità e la costanza, infine, sono evocate dal colore sempreverde delle foglie, che resistono al trascorrere delle stagioni⁴¹.

Tra le più antiche piante conosciute dall'uomo, il bamboo vanta una storia evolutiva che risale ad oltre 30 milioni di anni fa, come testimoniato dai numerosi reperti fossili⁴². Originario delle aree tropicali e subtropicali, in particolare di Asia Africa e Americhe⁴¹, ha saputo adattarsi a una vasta gamma di ambienti grazie alla sua straordinaria resilienza e rapidità di crescita⁴³. Fin dalla preistoria, durante l'era della pietra, l'essere umano ne ha riconosciuto e valorizzato la sua versatilità, utilizzandolo nei campi più disparati alla fabbricazione di utensili, armi, contenitori e strumenti quotidiani, già durante l'età della pietra⁴³.

Le prime testimonianze archeologiche del suo impiego risalgono al Neolitico cinese, dove il bamboo veniva impiegato per costruire palafitte, pavimenti, strumenti musicali e oggetti d'uso domestico⁴³. La sua presenza è anche celebrata nel Shijing il Libro dei Cantici, una delle più antiche raccolte poetiche cinesi, dove appare come elemento centrale delle prime espressioni culturali del Paese⁴⁴.



Immagine 20. *Shijing il Libro dei Cantici*, Data source: *Viaggio alla scoperta dell'origine della poesia in Cina*

Parallelamente, anche in Giappone il bamboo-otrovava impiego già nel tardo periodo Jōmon (ca. 2500-300 a.C.), come rivelano reperti di oggetti rituali intrecciati, secondo le narrazioni contenute nei testi shintoisti arcaici Kojiki e Nihon Shoki, risalenti all'VIII secolo⁴⁴. Durante il governo imperiale sotto la dinastia Han, intorno al 105 d.C., il funzionario cinese Cai Lun sviluppò un metodo rivoluzionario per la produzione della carta, impiegando fibre di bamboo⁴⁵. Questa innovazione segnò una svolta epocale nella storia della comunicazione scritta, facilitando la diffusione del sapere. Contemporaneamente il bamboo consolidava il proprio ruolo nell'architettura e nell'ingegneria tradizionale asiatica, grazie alle sue qualità di leggerezza, flessibilità e resistenza⁴³. Nella provincia del Sichuan, ad esempio, condutture in bamboo per l'irrigazione si estendevano per oltre 5.300 km² e lo stesso materiale veniva utilizzato per il trasporto del gas naturale dai giacimenti ai villaggi⁴¹. Anche Marco Polo, nel suo celebre scritto Il Milione, osservò l'impiego del bamboo nella Cina del XIII secolo, menzionando la sua funzione nella realizzazione di robuste funi navali e ponti sospesi⁴³. Uno di questi, costruito sul fiume Min⁴⁶, rimase in uso per oltre 1.700 anni, fino alla sua dismissione nel 2008⁴⁶.

Il bamboo fu introdotto in Europa nel XIX secolo, presentato al grande pubblico durante l'Esposizione Universale di Parigi del 1867, attraverso il padiglione giapponese. A partire da quel momento, iniziò a suscitare crescente interesse anche in Occidente⁴⁶.



Immagine 21. Expo 1867 Parigi - Édouard Manet, Guardando il mondo, Data source: Wikimedia Commons

Nel 1910, l'India avviò la produzione industriale di carta a partire da pasta di bamboo, segnando l'inizio della sua valorizzazione su scala globale⁴³. Nello stesso periodo, anche in Europa e negli Stati Uniti si iniziarono a riconoscere le straordinarie proprietà tecniche della pianta: celebre è l'esperimento di Thomas Edison, durante i suoi test per migliorare la durata delle lampadine a incandescenza, scoprì che una fibra di bamboo giapponese poteva bruciare fino a 2.450 ore, diventando così il materiale standard per la General Electric Company per oltre un decennio⁴³.

A partire dagli anni '90 del Novecento, l'accresciuta sensibilità ambientale e la crescente richiesta globale di legname sostenibile portarono a un vero e proprio "rinascimento industriale" del bamboo⁴⁷. Furono così sviluppati materiali ingegnerizzati, come il plybamboo (compensato), pannelli in fibra, laminati per pavimenti, mobili e infissi⁴⁷. Tali innovazioni, coniugando tradizione e tecnologia, hanno consolidato l'immagine del bamboo come "acciaio verde" o "oro verde", grazie alla sua resistenza meccanica e alla sua rapida rigenerabilità⁴⁸.

Parallelamente alla sua funzione materiale, il bamboo ha sempre rivestito un ruolo simbolico e filosofico di profonda rilevanza⁴⁰. In Cina, è uno dei "Quattro Gentiluomini" della pittura classica, insieme all'orchidea, al crisantemo e al fiore di prugno⁴¹. Compare anche nella triade dei "Tre Amici dell'Inverno", con pino e prugno, tutti simboli di resistenza alle avversità, spesso rappresentati nei contesti decorativi e nei rituali matrimoniali, a evocare auspici di longevità e armonia⁴².



Immagine 22. I tre amici dell'inverno, Shō Chiku Bai, Data source: Shakkei.it

Particolarmente nota è la vicenda dei "Sette Saggi del Bosco di Bamboo", intellettuali della dinastia Jin (III secolo d.C.) che si ritirarono nei boschi per praticare uno stile di vita ispirato al taoismo, in opposizione alla corruzione della società⁴⁹. Il loro esempio è diventato emblema di libertà intellettuale, ispirando artisti e pensatori fino all'età contemporanea. In Giappone, il bamboo è legato ai concetti di purezza e serenità, centrali nella cerimonia del tè⁴¹. Nelle arti visive, viene spesso rappresentato piegato sotto la neve o la pioggia, in simbolica evocazione della capacità di sopportare con umiltà⁴⁰. La simbologia del bamboo si estende anche al regno animale: l'accostamento con la tigre richiama l'equilibrio tra forza e flessibilità, mentre l'immagine dei passeri tra i rami si collega alla favola morale della Passera dalla lingua tagliata (Shita-kiri Suzume), in cui si contrappongono gentilezza e avidità⁴¹. Attualmente, nonostante la sua diffusione anche in Africa e in Oceania, il bamboo viene coltivato prevalentemente in Asia, con Cina, Thailandia e Indonesia come principali produttori⁵⁰. Qui continua a rappresentare un elemento centrale non solo per l'economia e la vita quotidiana, ma anche per le pratiche spirituali e culturali.

2.2 La diffusione del bamboo

Dopo aver analizzato le origini storiche del bamboo è opportuno soffermarsi sulla sua diffusione su scala globale, tenendo in considerazione le variabili climatiche, geografiche ed ecologiche che ne hanno favorito l'adattamento a contesti territoriali estremamente diversificati. Il bamboo ha origine nelle regioni tropicali e subtropicali⁴³, come confermato dalla letteratura scientifica, che individua le prime aree di insediamento della pianta nell'Asia meridionale, in particolare in India, Birmania e nelle isole dell'arcipelago asiatico⁵⁰.

Distribuzione del bamboo nel mondo

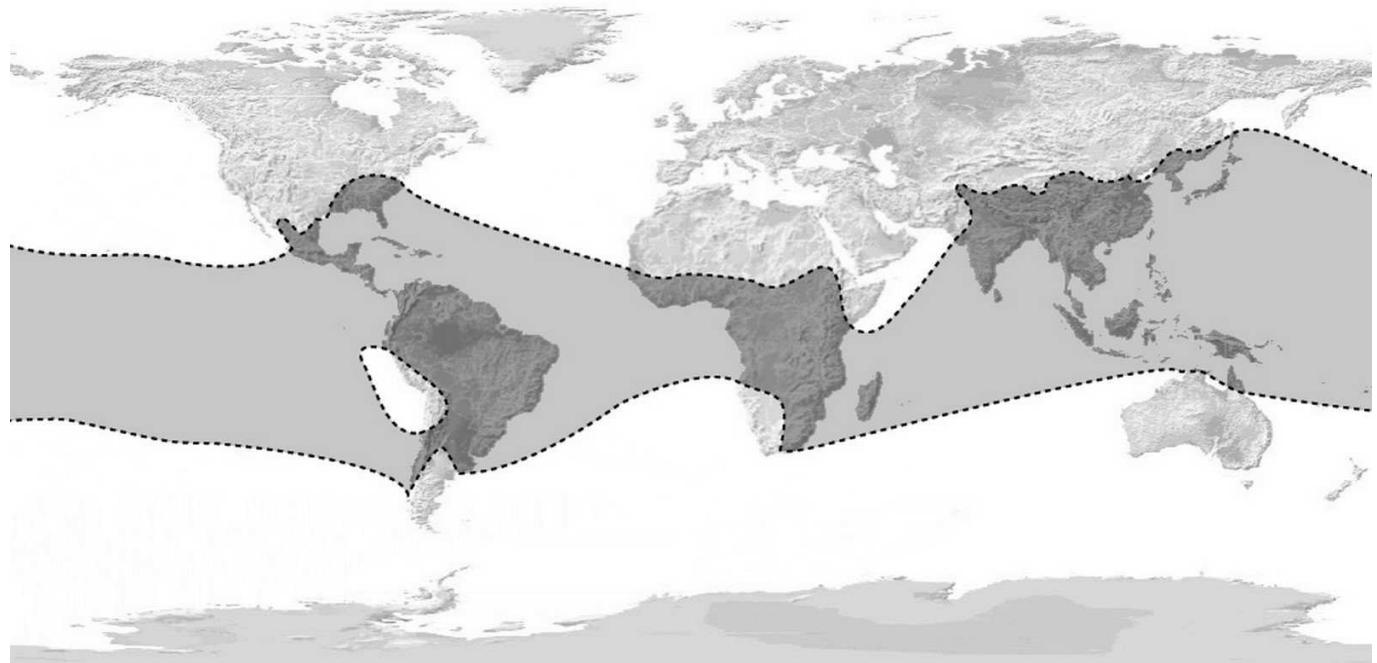


Immagine 23. Distribuição do bambu e do ratan, Data source: Centro Brasileiro Inovação e Sustentabilidade

Circa il 65% delle specie conosciute si sarebbe originato in questa macroregione. Al contrario, la biodiversità del bamboo è assai limitata in Nord America, dove è presente un'unica specie autoctona⁵¹, e del tutto assente in Europa e Antartide per quanto riguarda le varietà native⁴³. Le aree di maggiore concentrazione della pianta si trovano nella fascia tropicale e subtropicale dei continenti asiatico, africano e americano, comprese approssimativamente tra il 46° parallelo Nord e il 47° parallelo Sud⁵⁰.

Tuttavia, alcune specie si spingono ben oltre questi limiti latitudinali, arrivando fino al 51° parallelo Nord, dimostrando una straordinaria capacità di adattamento. Le condizioni climatiche ideali per lo sviluppo del bamboo si collocano tra temperature minime intorno agli 8.8°C e massime vicine ai 36°C⁵⁰. Non mancano tuttavia varietà in grado di sopportare climi molto più rigidi: ad esempio, il *Phyllostachys pubescens* (noto come Moso) resiste fino a -10°C⁴², mentre la *Sasa kurilensis* tollera temperature inferiori ai -20°C.



Immagine 24. Foresta di bamboo in Giappone in inverno, Data source: <https://www.amicideibambu.it/gallery.html>

Oltre alla temperatura, le specie di bamboo si distinguono anche per la capacità di adattarsi a un ampio range altitudinale, dal livello del mare fino a oltre 3.600 metri, come nel caso delle coltivazioni himalayane⁴³. A livello globale, le foreste di bamboo coprono una superficie superiore ai 36 milioni di ettari, pari a circa il 3.2% della copertura forestale mondiale, includendo anche le aree non formalmente classificate come foreste⁴³. L'Asia rappresenta il continente con la maggiore estensione e diversità, con oltre mille specie diffuse su un'area che equivale a circa la metà della superficie della Germania⁵⁰. In particolare, la Cina detiene il primato per varietà e densità di specie, con oltre trecento specie suddivise in quarantacinque generi, distribuite su una superficie stimata tra i 44.000 e i 70.000 km² ⁵⁰, mentre in India, pur contando un numero inferiore di specie (circa 130), il bamboo occupa circa il 13% della superficie forestale nazionale, valore quattro volte superiore alla media globale. In entrambi i Paesi, il bamboo riveste un ruolo di primo piano non solo dal punto di vista ecologico, ma anche socioeconomico, configurandosi come una risorsa strategica per le popolazioni rurali⁵².

A livello mondiale, si stima che il consumo annuale di bamboo ammonti a circa 20 milioni di tonnellate, di cui oltre la metà è destinata a usi locali in contesti poveri o periferici, dove rappresenta un'alternativa economica e versatile per numerosi impieghi. Nel Sud-Est asiatico, l'importanza ecologica delle foreste di bamboo è ulteriormente evidenziata da casi emblematici, come quello del panda gigante (*Ailuropoda melanoleuca*)⁵¹, la cui dieta è composta per il 99% da bamboo e la cui sopravvivenza dipende direttamente dalla presenza di tale vegetazione. Un'attenzione particolare merita il caso del Vietnam, dove il bamboo è profondamente radicato nel paesaggio naturale. La pianta è diffusa sia nelle pianure sia nelle aree montuose, ed è identificata con numerose denominazioni locali, legate ai suoi usi e alle sue parti⁴². Una specie rappresentativa è il *Pseudosasa amabilis*, noto come "Tonkin Cane", originario della Cina ma da oltre un secolo impiegato in costruzioni artigianali in Vietnam e in altri Paesi confinanti. In Giappone, invece, è il *Phyllostachys bambusoides*, conosciuto come Madake, il bamboo da costruzione più diffuso, oltre a possedere un rilevante valore culturale⁴⁴. In Africa, invece, la diffusione del bamboo è sensibilmente più contenuta: si contano soltanto cinque generi documentati, con la Tanzania che vanta la maggiore diversità. Tale limitata varietà è attribuibile principalmente a mutamenti climatici verificatisi nel corso dei millenni⁵¹.

In totale, nei cinque principali Stati africani in cui è presente il bamboo, si stimano circa 2.7 milioni di ettari coltivati, equivalenti al 4.1% delle loro superfici forestali complessive⁵³. Nel continente americano, pur essendo la biodiversità inferiore a quella asiatica, essa risulta superiore rispetto all'Africa⁵⁴. Si contano venti generi endemici, concentrati soprattutto in Sud America, lungo il versante atlantico del Brasile⁵⁵. In Paesi come Brasile, Colombia ed Ecuador, il bamboo sta assumendo un'importanza crescente per lo sviluppo economico locale. Il Brasile, in particolare, è uno dei Paesi più ricchi di risorse naturali, con oltre il 14% della biocapacità mondiale, ed è considerato uno dei principali creditori ecologici a livello globale⁵⁴. La specie Moso (*Phyllostachys pubescens*) è largamente impiegata anche in alcune aree del Paese, come Rio de Janeiro, mentre *Chusquea culeou*, dotata di un fusto solido, è diffusa nel sud del Cile e in diverse regioni dell'America centrale e meridionale⁴³. Nel contesto europeo, la diffusione del bamboo è ancora marginale⁵⁰. In Italia, ad esempio, la presenza maggiore si registra per il genere *Phyllostachys*, facilmente distinguibile dalla comune canna (*Arundo donax*). Sebbene non esistano ancora foreste adulte di bamboo, l'impiego della pianta in ambito paesaggistico è in costante espansione⁴⁰. Un esempio simbolico è rappresentato dal "Labirinto della Masone" a Parma, il più grande labirinto di bamboo al mondo. Iniziative promosse dall'INBAR (International Bamboo and Rattan Organization) puntano a incentivare la coltivazione e l'utilizzo del bamboo anche in aree temperate, al fine di promuovere modelli di sviluppo sostenibile. In tal senso, si stanno sperimentando soluzioni abitative ecocompatibili basate sul bamboo, adattate ai climi europei³⁶.

2.3 La pianta

Il bamboo è una pianta erbacea perenne appartenente al regno della Plantae⁴², più precisamente nella divisione delle Fanerogame, e in particolare alla sottodivisione delle Angiosperme⁵¹. La caratteristica principale di quest'ultima è la presenza di semi all'interno di un ovario. Tra le Angiosperme il bamboo è classificato come monocotiledone, in quanto il seme presenta un solo cotiledone, ovvero una sola fogliolina embrionale⁵⁶. Il cotiledone è fondamentale per la pianta poiché esercita un ruolo essenziale durante le fasi di sviluppo in quanto fornisce le sostanze nutritive all'embrione durante la germinazione⁵⁶.

Dal punto di vista tassonomico il bamboo appartiene alla famiglia delle Poaceae comunemente conosciuta come Graminacee⁴³, una delle famiglie di piante più estese e importanti al mondo che racchiude circa 4.000 specie diffuse in tutto il mondo, di cui fanno parte alcune delle varietà più importanti quali il riso, il mais e la canna da zucchero⁵⁷.

Regno: Plantae

Divisione: Fanerogame

Sottodivisione: Angiosperme

Classe: Monocotyledoneae

Famiglia: Poaceae

Sottofamiglia: Bambusoideae

All'interno delle sottofamiglie Bambusoideae vi sono più tribù le cui principali sono:

- Bambuseae caratteristica delle foreste tropicali, comprende 9 sottotribù e 91 generi;
- Arundinarieae presente nei boschi temperati, composta da una sottotribù e 30 generi;
- Olyreae raggruppa le specie erbacee, con 3 sottotribù e 21 generi.

Nel complesso si contano 3 tribù, 13 sottotribù, 142 generi e circa 1.400 specie, testimoniano la straordinaria varietà e adattabilità di questa pianta⁵⁶.

Con il termine bamboo si fa riferimento a tutte le specie arboree appartenenti alla famiglia delle graminacee, generalmente di grandi dimensioni, caratterizzate da rizomi strisciante e ramificati, fusti perenni e numerosi rami disposti in modo alternato⁵¹. Queste piante si sviluppano in altezza attraverso un processo noto come crescita primaria, poiché sprovviste di tessuti cambiali necessari per l'accrescimento secondario del fusto⁵⁶. Ne consegue che a differenza delle piante legnose il fusto rimane invariato durante la crescita⁵⁸.

2.3.1 Il rizoma

I rizomi costituiscono la struttura di sostegno sotterranea del bamboo, rivestendo un ruolo fondamentale sia nella propagazione sia nel trasferimento delle risorse nutritive alla pianta⁵⁶. Morfologicamente essi sono molto simili al fusto della canna di bamboo data la presenza di nodi e internodi dai quali si sviluppano germogli e radici avventizie⁴⁰. L'insieme dei rizomi forma un reticolo compatto e stabile formato da tre elementi: il collo, che connette il rizoma alla pianta madre; il rizoma vero e proprio che costituisce il segmento sotterraneo principale contenente gemme, brattee e radici; e infine le radici avventizie, sottili e fibrose, che assolvono alla dopplice funzione di ancoraggio al suolo e assorbimento delle sostanze nutritive⁵¹. Queste ultime rappresentano anche l'unico nucleo vegetativo segmentale del bamboo⁵¹. L'apice del rizoma è appuntito e particolarmente robusto perché deve essere in grado di penetrare nel suolo favorendo la propagazione orizzontale⁵⁴. Il sistema creato dai rizomi contribuisce a stabilizzare il suolo e proteggerlo riducendo l'erosione provocata da piogge e venti, rallentando il drenaggio e incrementando l'assorbimento dell'acqua piovana⁴³. Inoltre, tale sistema si dimostra efficace nel filtraggio delle acque superficiali inquinate, contribuendo alla decontaminazione ambientale in contesti agricoli e industriali⁵⁴.

In funzione della morfologia del rizoma e della conseguente distribuzione dei culmi, il bamboo viene classificato in due principali gruppi⁵⁴:

Leptomorfo monopodiale

Tipico delle aree temperate, il rizoma è sottile, allungato e cresce in senso orizzontale con estrema rapidità in cerca di umidità e luce solare, anche oltre i 5 metri all'anno⁵⁶. Ogni interno presenta una gemma dormiente che può dare origine, alternativamente, a un nuovo rizoma con conseguente crescita orizzontale o a un nuovo culmo con uno sviluppo verticale⁴⁰. Questo tipo di crescita consente al bamboo un'elevata capacità di espansione, risultando invasivo. I culmi generati da rizomi monopodiali risultano distanziati tra loro, creando una struttura forestale aperta⁴⁰.

Rizoma leptomorfo

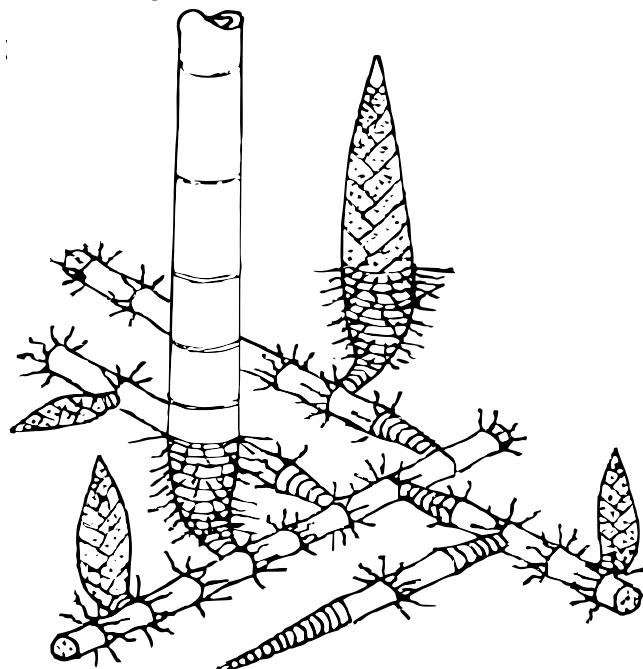


Immagine 25. Rizoma leptomorfo, adaptado de lopez, Data source: Bioengenharia utilizando bambus em faixas para o controle de processos erosivos: uma analise qualitativa

2.3.II Il culmo

Pachimorfo simpodiale

Tipici delle zone tropicali e subtropicali, i rizomi sono corti, tozzi e di forma subfusiforme, con un diametro superiore rispetto a quello del culmo⁴⁰. Presentano internodi larghi e asimmetrici, nodi poco evidenti e gemme laterali solitarie, da cui possono svilupparsi nuovi rizomi o supporti radicali. Le radici avventizie, localizzate nella porzione inferiore, si sviluppano da un nucleo dorso-ventralmente appiattito⁵⁴. Questo tipo di rizoma dà origine a un boschetto compatto e denso, con culmi ravvicinati che crescono in modo concentrico e non invasivo. La crescita è più lenta rispetto al tipo monopodiale, poiché ogni rizoma genera un solo culmo⁵⁶.

Rizoma pachimorfo

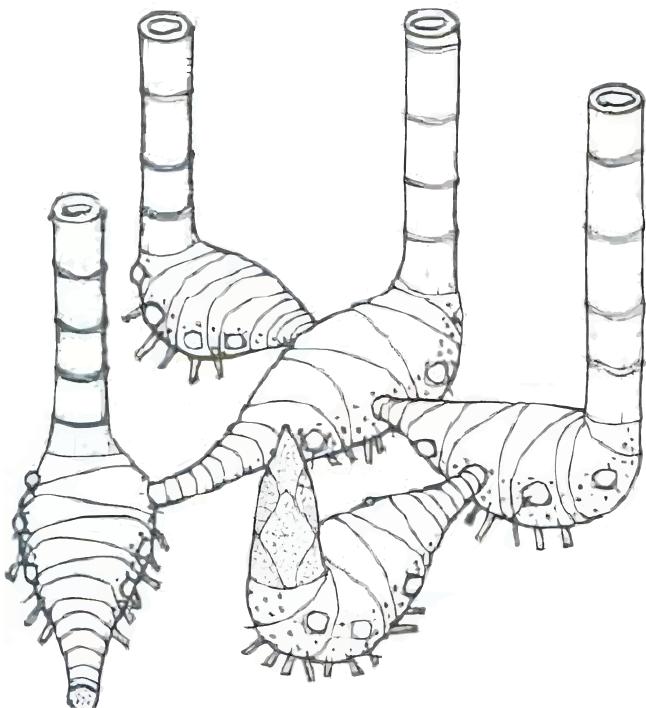


Immagine 26. Rizoma paquimorfo, adaptado de lopez, Data source: Bioengenharia utilizando bambus em faixas para o controle de processos erosivos: uma analise qualitativa

I bamboo come affermato in precedenza non aumentano di diametro, tuttavia, la struttura del culmo subisce modifiche nel tempo, aumentando progressivamente di densità⁵⁹. Questo fenomeno comporta un ispessimento delle pareti, conferendo maggiore resistenza alla pianta man mano che invecchia⁵⁹. Il culmo ovvero il fusto è costituito da tre elementi: il collo, che unisce il culmo al rizoma; i nodi, punti di inserzione di foglie e rami; e gli internodi ovvero le porzioni cave che separano un nodo dall'altro⁵⁴. I culmi possono presentare un'ampia varietà cromatica dal verde sino a tonalità rare come giallo, nero, rossastro, anche con striature o maculature⁵⁹. La superficie esterna è rivestita da tessuti specializzati, con una epidermide composta da cellule compatte che, grazie all'elevata densità delle fibre, svolgono un ruolo protettivo contro danni meccanici e limitano la perdita d'acqua⁵⁷.

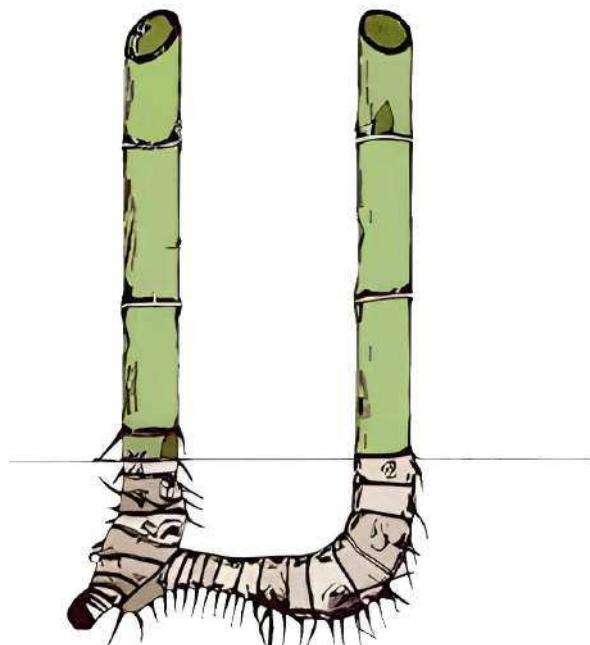


Immagine 27. Culmo di bamboo, Data source: Bambueco.com

Al suo interno si trovano i fasci vascolari che svolgono la funzione di trasporto idrico e delle sostanze nutritive⁵⁹. La loro quantità e distribuzione dipende dal genere e dalla specie ma in linea generale occupano circa il 6-8% del volume totale del culmo⁵⁸. Le fibre rappresentano invece fino al 40% della massa e seguono un orientamento definito, variando in lunghezza e spessore in base al diametro della pianta⁵⁹. Il culmo si presenta generalmente cavo, l'aspetto nodoso e la superficie esterna liscia e dura dovuta all'alto contenuto di silice e all'abbondanza delle fibre lignificate che costituiscono la parete cellulare⁵⁷. La lignificazione, ovvero la trasformazione dei tessuti vegetali in legnosi, conferisce al bamboo una resistenza meccanica paragonabile a quella dei legni più duri, pur mantenendo al contempo una leggerezza superiore⁴⁷. Queste caratteristiche insieme alla longevità del culmo e alla particolare ramificazione, rendono il bamboo una pianta unica nel contesto delle graminacee erbacee⁵⁷.

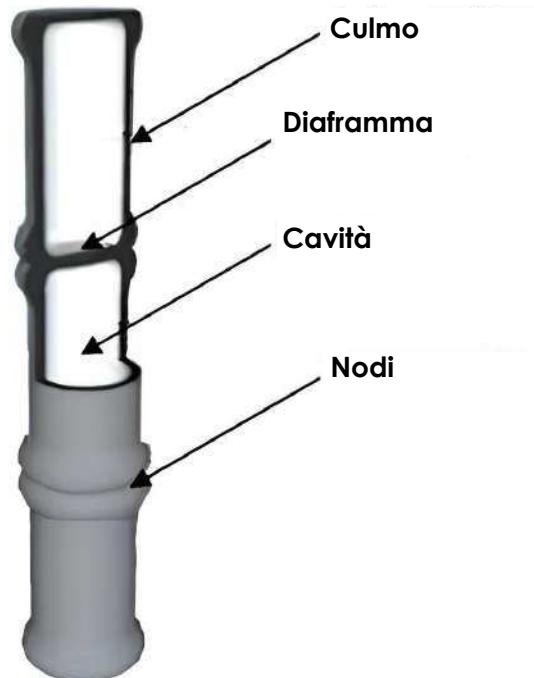


Immagine 28. Bamboo: struttura della pianta, Data source: Tuttobambu Blog

La sezione trasversale del culmo mette in evidenza la distribuzione irregolare delle fibre dei fasci vascolari maggiormente concentrati verso lo strato periferico⁴⁰. Questi fasci contengono fibre parallele che conferiscono alla pianta un'elevata resistenza a trazione superiore non solo a quella del legno, ma anche a quelli dell'acciaio⁵⁹. È interessante notare che le fibre interne si orientano longitudinalmente, permettendo al culmo di fendersi con facilità lungo il suo asse, un fenomeno noto come splitting⁵⁵. Tuttavia, in corrispondenza dei nodi le fibre si intrecciano in tutte le direzioni, conferendo al culmo maggior resistenza⁵⁷. Quest'ultima caratteristica è favorita anche dalla composizione chimica delle pareti cellulari, costituite principalmente da cellulosa, emicellulosa e lignina. La cellulosa contribuisce alla resistenza a trazione e flessione, mentre la lignina funge da legante naturale, migliorando la resistenza a compressione e alla degradazione biologica⁵⁴. Le fibre e i fasci fibrovascolari sono immersi in un tessuto parenchimatico significativo, che funge da connettivo tra gli elementi strutturali⁵⁹. La distribuzione di questi componenti non è omogenea: in senso verticale, la densità di fibre e vasi aumenta verso l'alto, mentre radialmente la loro concentrazione cresce verso l'esterno della parete, dove si trova circa il 50% delle fibre totali⁵⁴. A circa metà dell'altezza del culmo iniziano a svilupparsi rami e foglie, dando inizio alla parte aerea della pianta. Questo determina una maggiore presenza di parenchima nella parte più interna del culmo⁵⁹.

Struttura microscopica del bamboo

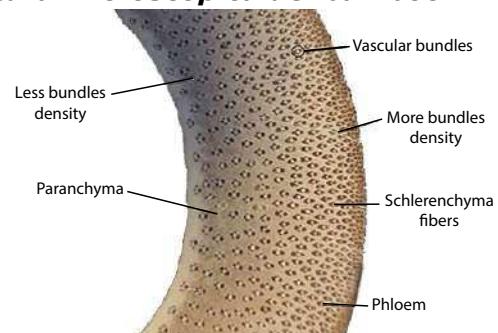


Immagine 29. Struttura microscopica del bamboo, Data source: Architettura Ecosostenibile

2.3.III La gemma

Le gemme rivestono un ruolo di primaria importanza negli studi tassonomici, in quanto rappresentano un elemento distintivo utile per la classificazione delle specie, sezioni, e generi⁵⁷. Inoltre, assumono particolare rilevanza in ambito biotecnologico, nei processi di propagazione del bamboo mediante tecniche di coltura in vitro, grazie alla loro capacità rigenerativa e alla possibilità di stimolare lo sviluppo di nuovi individui in condizioni controllate⁵⁷. Le gemme, protette da una brattea, sono presenti in ciascun nodo e si trovano in posizione distica, appena al di sopra della linea nodale. Dal punto di vista funzionale, possono essere classificate come attive o inattive, nonché vegetative o riproduttive⁵². In alcune specie le gemme possono rimanere dormienti per un periodo di tempo indefinito. In determinate varietà si osserva l'inattività costante delle gemme basali, mentre in altri casi risultano inattive principalmente quelle situate nella porzione media del culmo. In condizioni più rare si può registrare la totale assenza di gemme nel primo terzo o nei 3/4 inferiori del culmo⁵⁹. Generalmente, l'interruzione della dormienza avviene esclusivamente al completamento della crescita del culmo, momento in cui iniziano a svilupparsi prevalentemente le gemme localizzate nelle porzioni basale e apicale, mentre quelle mediane tendono a rimanere quiescenti⁵².



Immagine 30. Gemma del bamboo, Data source: 123RF

2.3.IV I rami e il fogliame

I rami rivestono un ruolo strutturale e fisiologico fondamentale all'interno della pianta, in quanto sostengono il fogliame, elemento essenziale per lo svolgimento dei processi fotosintetici e respiratori⁵⁹. Le foglie caulinari, in particolare, svolgono una duplice funzione: proteggono le gemme e contribuiscono alla stabilità meccanica del culmo, conferendogli maggiore rigidità⁵⁹. Durante lo sviluppo, tali foglie subiscono una progressiva variazione in termini di forma e dimensioni, adattandosi alle esigenze morfo-funzionali della pianta⁵¹.



Immagine 31. Fogliame del bamboo, Data source: Wikimedia Commons

2.3.V La fioritura

Nei bamboo la fioritura e la conseguente produzione di semi costituiscono eventi straordinari⁵⁹. La periodicità della fioritura varia considerevolmente tra le diverse specie: alcune fioriscono a intervalli brevi e regolari, mentre altre manifestano il fenomeno solo una volta in un arco temporale che può raggiungere gli 80-130 anni⁵¹. In questi casi estremi, si verifica la cosiddetta fioritura gregaria, un fenomeno spettacolare in cui tutti gli individui appartenenti a una stessa specie, anche se geograficamente distribuiti in aree molto distanti tra loro fioriscono⁵⁸. Questo comportamento sincrono implica che tutti i culmi di una data generazione, derivanti da un'origine genetica comune, fioriscono contemporaneamente. Una volta completata la fioritura e la produzione dei semi, segue il disseccamento dei culmi e la morte dell'intera pianta, inclusa la struttura rizomatica⁵⁸. Questo fenomeno può portare alla scomparsa temporanea di popolazioni estese di bamboo, generando significativi squilibri ecologici.

La fioritura gregaria è stata osservata con particolare frequenza in Asia, in specie come *Phyllostachys bambusoides* e *Melocanna baccifera*⁵⁹. Un esempio significativo si è verificato nel 1973, quando il bamboo Madake fiorì contemporaneamente in tutto il Giappone per la prima volta dopo il 1864⁵⁸. Eventi analoghi si sono verificati anche in Inghilterra, nelle Indie Occidentali e in altri Paesi, sottolineando la natura geneticamente programmata della fioritura⁴². Il processo si sviluppa nell'arco di 12-18 mesi e inizia con la caduta delle foglie, seguita dalla comparsa dei fiori e infine dalla senescenza del fusto, che dissecchia a partire dalla sommità⁵⁸. Un caso emblematico è quello di *Phyllostachys bambusoides*, che segue un ciclo di circa 120 anni. Le sue fioriture documentate comprendono quelle avvenute tra il 1716 e il 1735 in Cina e Giappone, tra il 1844 e il 1847, e nel 1960 in diversi Paesi occidentali, tra cui Inghilterra, Stati Uniti e Russia, dopo l'introduzione del bamboo in questi territori⁶⁰.

Oltre la fioritura gregaria vi è la fioritura sporadica, nella quale solo alcuni individui o porzioni della popolazione entrano nella fase riproduttiva in tempi diversi⁵⁸. In questo caso, la fioritura avviene in momenti differenti o in intervalli regolari, determinando la comparsa di fiori in alcune porzioni della popolazione o su singoli culmi isolati, senza comportare la morte generalizzata dell'intera pianta⁵⁸. Questa modalità è tipica della specie *Guadua angustifolia*, può presentarsi annualmente o a intervalli pluriennali, rendendo complessa la previsione dei cicli riproduttivi⁵⁸. La fioritura sporadica, invece, può verificarsi a seguito di stress ambientali, come estati particolarmente secche, o per cause fisiologiche⁵¹. Se i fiori rimpiazzano interamente le foglie, i culmi colpiti tendono a morire; tuttavia, in presenza di fioriture parziali e brevi, è possibile che la pianta sopravviva⁵⁸. In generale, la periodicità della fioritura è strettamente correlata alle dimensioni della specie. I bamboo di piccole dimensioni tendono a fiorire dopo 3-4 anni sopravvivendo al fenomeno e ripetendolo ciclicamente⁵⁸. Al contrario, le specie giganti mostrano cicli più lunghi, compresi tra 20 e 80 anni, con casi eccezionali che raggiungono i 120 anni⁵⁸. Alcuni esempi includono:

- *Melocanna bambusoides*: 10-15 anni;
- *Bambusa arundinacea*: 30-45 anni;
- *Dendrocalamus strictus*: 40 anni;
- *Phyllostachys nigra*: 60 anni;
- *Phyllostachys reticulata*: 60-100 anni.



Immagine 32. Fiore del bamboo, Data source: dbambu

2.3.VI La crescita

Una delle caratteristiche più sorprendenti del bamboo è la sua eccezionale velocità di crescita. Dopo un periodo sotterraneo che può durare fino a cinque anni, il germoglio emerge dal terreno e si trasforma in canna matura in soli 30 giorni, completando la sua crescita nei dieci giorni successivi⁴⁴. A seconda della specie l'altezza delle canne può variare dai 15 ai 20 metri ma in condizioni eccezionalmente favorevoli può raggiungere i 40 metri, con un diametro superiore ai 10 cm e pareti spesse fino a 10 mm⁴⁰. Solo gli stami dei fiori, i quali crescono 1,5 mm/min possono competere con questo ritmo nel mondo vegetale. Sono documentati casi eccezionali di crescita giornaliera, come:

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

Sebbene la crescita media giornaliera si attesta intorno ai 25 cm, alcune specie possono superare i 90 cm al giorno, ma sono considerati casi eccezionali⁵⁸. Ogni germoglio contiene già tutti i nodi del culmo e il diametro definitivo, motivo per cui non è possibile stimarne l'età dal diametro, ma piuttosto osservando il colore, il suono e la flessibilità della canna⁶⁰. La crescita in altezza è raggiunta attraverso allungamenti dei singoli internodi. Le specie più piccole presentano solitamente dai 15 ai 20 segmenti, mentre le specie più grandi possono arrivare sino a 55 segmenti. La lunghezza degli internodi cresce progressivamente dalla base del culmo fino alla metà dell'altezza, per poi decrescere verso l'apice. In media un internodo misura circa 35 cm⁶⁰, però sono presenti eccezioni come la *Teinostachyn dulloa* la quale può presentare internodi con lunghezza che varia dai 40 ai 100 cm, mentre la *Ochlandra Travancorica* presenta lunghezze dai 60 ai 150 centimetri, invece, la *Anthrostylidium Schromburgii* può sviluppare segmenti fino a 5 metri di lunghezza⁶⁰.

A partire dal terzo anno di età il culmo inizia il processo di lignificazione e accumulo di silicio, divenendo adatto all'uso come legname. I bamboo si distinguono gli uni dagli altri negli aspetti dimensionali, nelle forme e colore del culmo, con variazioni di nodi, segmenti e rami⁵¹. Il colore delle canne giovani è il verde, invecchiando le canne diventano giallastre, alcune volte marroni o nere, con colore uniforme o a macchia⁵¹. Nonostante la rapidità di crescita, lo sviluppo del bamboo è influenzato da molteplici fattori, quali la fertilità del terreno, le condizioni climatiche e l'età della pianta. Tuttavia, la specie si dimostra estremamente resiliente, adattandosi anche a suoli poveri e a contesti ambientali sfavorevoli⁵⁹.

2.3.VII Le specie

La classificazione del bamboo è in continua evoluzione e viene aggiornata annualmente dalla comunità scientifica. Tuttavia, alcuni generi si distinguono per la loro particolare rilevanza nel settore delle costruzioni. Di seguito vengono analizzate alcune tra le specie più significative per le applicazioni strutturali e edilizie.

Dalla tabella si evince che i generi *Bambusa*, *Dendrocalamus*, *Guadua* e *Phyllostachys edulis* siano i più rilevanti grazie alle loro caratteristiche meccaniche, fisiche e alla loro capacità di crescita e adattabilità.

| Generi | Diffusione | Dimensioni | Habitat | Caratteristiche | Ciclo di fioritura | Utilizzi | Immagini |
|----------------------------------|-----------------------------|---|--|--|--------------------|--|---|
| Bambusa | Asia e America | Altezze fino a 30 m e diametro di 15-18 cm | Climi temperati | I nodi sono sede di ramificazioni, nella parte superiore i rami si arcuano a ventaglio, presenza di una sola gemma ramificata per nodo | 30-60 anni | palizzate, tubazioni, mobili, impalcature, pannelli, recinzioni, utensili da cucina e rinforzo nel calcestruzzo |  |
| Bambusa vulgaris | Nigeria, Sud-est asiatico | Altezze fino a 20 m e diametro di 5-10 cm | Terreni umidi fino a 1200 m | culmi, di colore verde brillante diventano giallastri a maturità, resistenza al gelo | - | impalcature, recinzioni e arredi |  |
| Bambusa tulda | India e Bengala Occidentale | Altezze fino a 20 m e diametro di 8 cm | Suoli alluvionali umidi fino a 1500 m | Accrescimento rapido, internodi lunghi fino a 70 cm e una superficie liscia | 30-60 anni | Edilizia, pannelli, materiali compositi e rinforzo nel calcestruzzo |  |
| Bambusa balcooa | India nord-orientale | Altezze fino a 25 m e diametro di 15 cm | Suoli pesanti, ben drenati fino a 600 m | Culmi robusti | 35-45 anni | applicazioni strutturali, impalcature, puntelli per ponti e nelle industrie della carta |  |
| Dendrocalamus | Sud-Est Asiatico e India | Altezze fino a 30 m e diametro di 30 cm | Climi tropicali/subtropicali | legno molto duro e spesso, internodi 70 cm | 30-40 anni | strutture portanti, arredi, pali e produzion di carta |  |
| Dendrocalamus Giganteus | India e Malesia | Altezze superiori a 30 m e diametro di 15-25 cm | Clima tropicale e subtropicale | Culmi enormi e resistenti | - | Costruzioni, recinzioni, contenitori, oggetti decorativi e nella produzione di carta |  |
| Dendrocalamus Strictus | India e Sud-Est asiatico | Altezze fino a 20 m e diametro di 2.5-7.5 cm | Ambienti aridi/semi-aridi | resistente alla siccità, internodi lunghi dai 30 ai 45 cm | 25-45 anni | produzione di carta, costruzioni, strumenti musicali e utensili,recupero di terreni marginali, medicina asiatica |  |
| Guadua | Sud America | Altezze fino a 30 m e diametro di 12-15 cm | Foreste tropicali | rizomi corti e grossi, radici nella parte inferiore e gemme laterali | - | Costruzioni |  |
| Guadua angustifolia Kunth | Colombia | Altezze fino a 25 m e diametro di 10-12 cm | Clima umido fino a 1500 m | eccezionali proprietà fisico-meccaniche, assorbire una media di 21.41 tonnellate di carbonio per ettaro all'anno | - | Edilizia e raccolta di CO ₂ |  |
| Phyllostachys aurea | Cina | Altezze fino a 10 m e diametro di 5-8 cm | Climi subtropicali e terreni umidi fino a 2000 m | Buona resistenza al gelo | 7-29 anni | Arredo, decorazioni |  |
| Phyllostachys edulis | Cina | Altezze fino a 30 m e diametro di 15-20 cm | Climi subtropicali temperati | Crescita rapida oltre un metro al giorno, ottime proprietà fisico-meccaniche | 80-100 anni | Edilizia |  |

Tabella 1. Le specie del bamboo, rielaborazione propria, Data source: *Building with bamboo: Design and technology of a sustainable architecture, Handbook on Bamboo. Bamboo Technology Support Group for East & North Eastern States, Bamboo Properties and Suitability as Replacement for wood, La guadua (Guadua angustifolia Kunth): un bambù di grande importanza forestale per la Colombia*

2.4 Le caratteristiche fisiche del bamboo

2.4.I La struttura e la composizione

Il bamboo è un materiale composito naturale con una composizione chimica costituita principalmente da cellulosa (40-45%), pentosani (20-25%) e lignina (25-30%)⁵⁹. Quest'ultima, è un polimero organico complesso con funzione principale di legante, contribuisce alla resistenza alla compressione e presenta una struttura che evolve con l'età del culmo⁴⁷. Elevata è anche la concentrazione di silice (0.5-0.9%), principalmente negli strati esterni dell'epidermide, conferendo durezza e resistenza superficiale⁴⁷. Sono inoltre presenti, in minore quantità, cere, resine e tannini, insufficienti però a garantire una durata naturale significativa⁵⁹. A livello morfologico la pianta si distingue per una sezione trasversale irregolare sul perimetro, questa irregolarità è sempre presente ma cambia direzione in ogni internodo, girando su sé stessa andando a creare una spirale⁴³. Tale conformazione, favorisce lo sviluppo dei rami, svolge un'importante funzione strutturale, offrendo una resistenza torsionale che impedisce al culmo di avvitarsi su sé stessa e collassare⁶⁰.

La microstruttura del bamboo è composta da pareti cellulari stratificate in cerchi concentrici. La densità decresce dall'esterno verso l'interno del culmo, contribuendo a combinare leggerezza e resistenza⁵⁹. I fasci vascolari, noti anche come power fibres, svolgono il ruolo di trasporto idrico e occupano dal 6 al 8% del volume totale e aumentano in numero dalla base verso la sommità. Le fibre, disposte prevalentemente in senso longitudinale negli internodi, si intrecciano in diverse direzioni nei nodi, incrementando la resistenza e opponendosi positivamente al fenomeno della fenditura longitudinale⁴³. A livello microscopico, il bamboo possiede sei strati concentrici di fibre suddivisi in dodici sotto-strati con tre angolazioni differenti, a differenza del legno che ne presenta solo tre, tale configurazione conferisce al materiale una resistenza superiore⁵⁹.

2.4.II La densità e la massa volumica

La massa volumica varia considerevolmente tra i 500 e 900 kg/m³ a seconda della specie di bamboo, ed è strettamente connessa alla resistenza meccanica⁵⁹. La massa volumica del bamboo è influenzata da diversi fattori, tra cui l'età del culmo, la sua porzione anatomica, e la distribuzione delle fibre⁵⁹. Durante la crescita, essa tende ad aumentare fino al sesto anno di età, per poi decrescere gradualmente. Analizzando la distribuzione lungo il culmo, si osserva che la massa volumica aumenta dalla base verso la cima, in quanto le fibre diventano progressivamente più piccole ma più numerose, determinando una maggiore percentuale fibrosa e quindi un peso specifico più elevato⁵⁷. Anche in direzione radiale, ovvero dall'interno verso l'esterno della parete del culmo, si registra un incremento della massa volumica, legato alla crescente concentrazione di fibre. Le variazioni in questa direzione possono oscillare tra il 20% e il 25%, ma in alcuni rari casi arrivano fino al 50%⁵⁷. Di conseguenza, la resistenza meccanica del bamboo aumenta gradualmente dall'interno verso l'esterno, con la parte più esterna che risulta la più resistente. In termini di proprietà meccaniche, la parte alta del culmo è generalmente quella che offre le migliori prestazioni: risulta infatti più resistente sia a compressione che a flessione, e presenta i valori più elevati di modulo elastico, grazie alla maggiore densità e alla struttura fibrosa più compatta⁵⁵. Una sperimentazione condotta su scala geografica ha ulteriormente evidenziato la relazione tra massa volumica e età del culmo. In questa ricerca, una

determinata area è stata suddivisa in quattro distretti (Xiashu, Yixing, Shimen e Damaoshan), e per ciascuno di essi sono stati eseguiti 100 test, per un totale di 400 campioni. Il bamboo è stato classificato in cinque classi di età (da 0-1 fino a 9 anni), e per ciascun distretto è stata calcolata una regressione lineare che metteva in relazione la densità dei campioni con la classe di età⁵⁶. I risultati hanno permesso di ottenere i valori medi di densità per ciascuna classe, espressi in kg/m³.

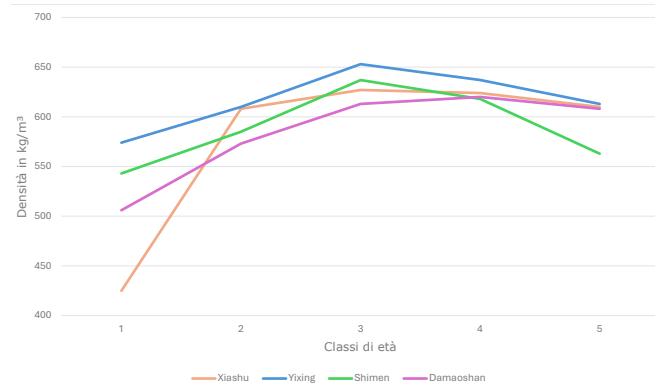


Grafico 1. Valori della densità in relazione alle classi d'età del culmo, rielaborazione propria, Data source: *Il bamboo come materiale da costruzione: Caratteristiche fisiche e meccaniche, tecnologie costruttive*

Questi dati confermano che, fino a una certa età (in genere intorno ai 7-9 anni), la massa volumica e quindi la qualità strutturale del bamboo tendono ad aumentare, raggiungendo valori ottimali per l'uso in costruzioni o altri impieghi tecnici.

2.4.III Il contenuto di umidità

Il contenuto di umidità viene espresso come rapporto tra la differenza del peso del culmo umido e del culmo secco, diviso per il peso secco, ed incide significativamente sulle proprietà fisiche e meccaniche del bamboo⁵⁶, determinando sia il trattamento da adottare per la conservazione del materiale, sia influenzando le possibili applicazioni del materiale. L'umidità nei culmi varia in base a diversi fattori:

- Specie, la percentuale di cellule di parenchima, differente tra le varie specie, è proporzionale alla capacità di assorbimento dell'acqua⁵⁷;
- Età del culmo, nelle piante giovani l'umidità si distribuisce uniformemente, mentre nei culmi maturi si registra una concentrazione quasi doppia alla base rispetto alla sommità. I culmi verdi, ovvero freschi di taglio, presentano un contenuto di umidità molto variabile da un minimo del 40% ad un massimo del 150% circa⁵⁷;
- Morfologia, gli internodi contengono circa il 25% in più di acqua rispetto ai nodi⁵⁷;
- Stagionalità e clima, in ambienti subtropicali, durante la stagione delle piogge, l'umidità può raddoppiare; invece, nei climi tropicali la quantità di umidità oscilla solo del 20% durante l'anno, in quanto non vi sono sensibili variazioni stagionali di umidità⁵⁷.

Se i culmi giovani presentano un contenuto di umidità abbastanza uniforme su tutto il culmo, i più maturi e verdi presentano un contenuto massimo di umidità fortemente decrescente dal basso verso l'alto, anche se in ogni caso il bamboo asciutto, fatto essiccare all'aria, non presenta comunque una grande variazione tra la parte più bassa e quella più alta del culmo⁵⁹.

Il bamboo, come il legno, è un materiale igroscopico, ovvero ha la capacità di assorbire e rilasciare umidità in base alle condizioni ambientali, l'acqua può legarsi ad esso o sotto forma di vapore che interagisce con la parete cellulare, oppure in forma liquida che scorre nei lumen cellulari⁵⁶. Soltanto la prima influenza significativamente le proprietà meccaniche del bamboo. L'eliminazione dal tessuto dell'acqua libera non crea nessuna modifica nel tessuto se non un evidente calo di peso, mentre l'eliminazione dell'acqua legata alle pareti cellulari (attraverso essiccazione o stagionatura) crea deformazioni e ritiri. Fino al punto di saturazione le variazioni dei parametri fisici, quali lunghezza, altezza e spessore, sono pressoché proporzionali al contenuto di acqua del bamboo⁵⁶. Un culmo maturo in condizione verde che stagiona fino ad un contenuto di umidità del 20% subisce un ritiro in direzione radiale dal 4 al 14% nello spessore della parete legnosa e dal 3 al 12% del diametro, mentre la variazione in direzione assiale è pressoché nulla⁵⁶. Il ritiro inizia simultaneamente al decrescere del contenuto di umidità ma non continua regolarmente: quando il contenuto di acqua diminuisce dal 40 al 70%, il ritiro si ferma⁴⁰. Il ritiro varia a seconda dell'età e della porzione di culmo presa in considerazione: i tessuti esterni del culmo si ritirano più di quelli interni ed il ritiro sembra essere governato dai tessuti più esterni del culmo che possiedono anche il maggior peso specifico. Questa proprietà, se da un lato facilita la lavorazione del materiale, dall'altro ne aumenta la vulnerabilità agli agenti biodeteriogeni, quali insetti e funghi⁵⁹.

2.4.IV La durabilità

La durabilità naturale del bamboo è generalmente inferiore rispetto a quella del legno, a causa dell'assenza di sostanze protettive e alla morfologia cava del culmo, che favorisce l'attacco di funghi e insetti. La resistenza della pianta in assenza di trattamenti può variare da 1 a 3 anni in ambienti esterni e umidi, fino a 10–15 anni invece se utilizzato in ambienti protetti. Per aumentarne la sua durata vengono impiegati trattamenti specifici, sia tradizionali che chimici, tra cui:

- Trattamento con acido citrico e boro;
- Acetilazione;
- Delignificazione;
- Trattamenti alcalini;
- Furfurilazione;
- Trattamenti con nano particelle;
- Trattamenti al plasma;
- Trattamenti con oli;
- Liscivazione;
- Vaporizzazione.

I trattamenti sopra elencati verranno poi trattati più nel dettaglio nel capitolo successivo.

2.4.V Il comportamento al fuoco

Il bamboo presenta un'ottima resistenza al fuoco grazie alla presenza di acido silicico negli strati esterni, che agisce come un ritardante della combustione⁵⁷. Inoltre, la sua maggiore densità, rispetto al legno, lo rende meno infiammabile. Tuttavia, la parte interna, meno ricca di silice, risulta più vulnerabile⁵⁷. Si può affermare, però, che attraverso il processo di carbonizzazione della superficie a contatto con le alte temperature, il bamboo riesce a mantenere le funzioni strutturali più a lungo rispetto a materiali come l'acciaio⁹³. Questo fenomeno produce, come dice il nome, uno strato di carbone il quale non possiede resistenza meccanica, ma limita la perdita delle funzioni strutturali⁹². In particolare, il bamboo sottoposto a temperature superiori ai 200°C riesce a mantenere circa il 42% della resistenza a trazione e il 79% del modulo elastico in tensione, proprietà che con l'aumentare delle temperature vanno man mano a diminuire⁹³. Diversi studi hanno dimostrato che, rispetto al legno, il bamboo possiede una resistenza maggiore al calore di propagazione della fiamma, andando ad indicare la necessità di temperature più elevate durante l'innesto degli incendi⁹². Confrontando il bamboo con l'abete rosso, si osserva infatti una conducibilità termica inferiore del 15% in direzione radiale e del 25% in direzione longitudinale risultando più efficace come isolante termico⁵⁹. Per migliorarne ulteriormente la resistenza al fuoco, si possono applicare ritardanti di fiamma, i quali rallentano il processo di combustione attraverso le reazioni chimiche⁹⁴. Sebbene siano efficaci nella riduzione del rilascio del calore generato dalla combustione, non contribuiscono al prolungamento del tempo di accensione⁹⁴.

2.4.VI L'assorbimento di CO₂

Le piante assimilano CO₂ per la fotosintesi, immagazzinandolo nella loro biomassa, offrendo un contributo importante al clima globale⁴³. Il bamboo si distingue nel regno vegetale per l'elevata capacità di assorbire anidride carbonica, grazie al rapido tasso di crescita e al meccanismo di rigenerazione spontanea⁴⁷. Secondo alcuni studi, la specie Guadua angustifolia Kunth è in grado di assorbire fino a 54 tonnellate di CO₂ per ettaro nei primi sei anni di crescita. In piantagioni gestite, l'assorbimento può raggiungere quasi le 150 tonnellate per ettaro in sette anni. Dopo il sesto anno, l'assorbimento si stabilizza, ma rimane costante grazie al ciclo vegetativo continuo della pianta⁵⁸. Ciò rende il bamboo una risorsa ecologica particolarmente efficiente nel contrastare il cambiamento climatico⁴⁰.

2.4.VII Le proprietà meccaniche

Il bamboo è naturalmente leggero, qualità che ne facilita l'impiego nelle costruzioni riducendo il carico complessivo⁴⁷. Al contempo, è estremamente flessibile, pur mantenendo una notevole resistenza, rendendolo adatto per strutture curve o soggette a sollecitazioni complesse. La sua anisotropia, dovuta alla disposizione longitudinale delle fibre, determina un comportamento meccanico variabile in funzione della direzione delle sollecitazioni⁵⁹.

La trazione parallela alle fibre del bamboo presenta caratteristiche meccaniche eccezionali rispetto ad altri materiali impiegati nelle costruzioni. Le forze in gioco sono uguali e contrarie, e si distribuiscono dal baricentro verso l'esterno⁴⁷. La resistenza a trazione può essere influenzata dalla massa volumica poiché materiali meno densi risultano meno resistenti, a causa della riduzione del numero di fibre⁵⁴. Anche l'età del culmo incide significativamente. Gli esperimenti condotti da Zohu Fangchun su culmi di età compresa tra 1 e 10 anni, provenienti da diverse regioni, hanno permesso di determinare i valori di resistenza ultima a trazione per ciascuna delle cinque fasce di età analizzate⁵⁴. Inoltre, per approfondire la relazione tra resistenza ultima a trazione (N/mm²) e massa volumica (Kg/m³), è stata realizzata una sperimentazione su un ampio numero di campioni provenienti da una vasta area geografica, i cui risultati sono riportati nel grafico seguente⁵⁶.

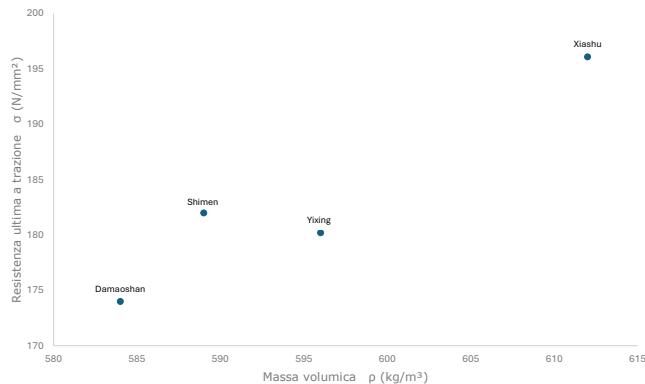


Grafico 2. Resistenza ultima a trazione in funzione della massa volumica, rielaborazione propria, Data source: *Il bamboo come materiale da costruzione: Caratteristiche fisiche e meccaniche, tecnologie costruttive*

L'analisi mostra una chiara correlazione tra la massa volumica e la resistenza a trazione: all'aumentare della densità del materiale si osserva un incremento della resistenza. Il bamboo proveniente da Xiashu, con la densità più elevata (612 kg/m³), presenta anche la maggiore resistenza a trazione (196.1 N/mm²), mentre quello di Damaoshan, con la densità più bassa (584 kg/m³), evidenzia la minore resistenza (174.0 N/mm²).

Dalla stessa sperimentazione citata nel precedente paragrafo, è stata desunta la relazione tra la resistenza ultima a trazione e l'età dei culmi. I culmi sono stati classificati in 5 classi di età e si sono valutate le variazioni dei valori della tensione ultima a trazione in N/mm²²⁵⁶ come mostrato nel grafico sottostante.

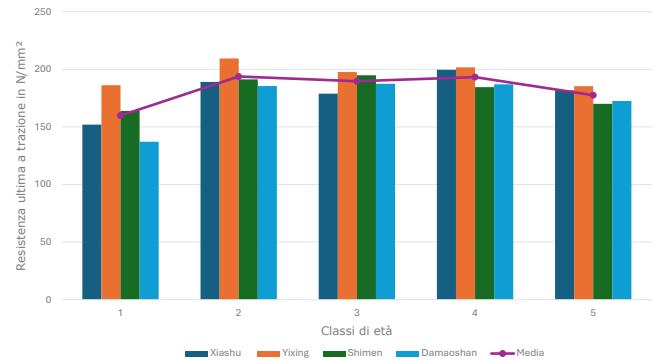


Grafico 3. Resistenza ultima a trazione in N/mm² in funzione delle classi di età del culmo, rielaborazione propria, Data source: *Il bamboo come materiale da costruzione: Caratteristiche fisiche e meccaniche, tecnologie costruttive*

Dall'analisi dei dati riportati nel grafico 3 si osserva che la resistenza a trazione tende ad aumentare nei primi anni di crescita, raggiungendo un picco intorno alla terza e quarta classe di età (tra i 5 e gli 8 anni), per poi manifestare una flessione nei culmi più maturi (tra i 9 e i 10 anni). Questo andamento evidenzia la presenza di una fase ottimale di maturazione durante la quale il materiale esprime le sue migliori prestazioni meccaniche a trazione.

Nel caso della compressione, le forze applicate convergono verso il baricentro. Anche in questo caso la resistenza è influenzata dall'età del culmo e dalla massa volumica, ma anche da altri fattori come il contenuto di umidità e la porzione di culmo presa in considerazione⁵⁹. L'aumento dell'età e della posizione lungo il culmo porta a un incremento della resistenza, con un picco massimo intorno al terzo anno di età. Dopo tale periodo, si osserva un calo della tensione ultima⁴⁷. Un test fondamentale è quello di buckling, che valuta la resistenza alla compressione di elementi snelli soggetti a carico assiale. La snellezza può compromettere significativamente la stabilità dell'asta, riducendone la capacità portante. Si è misurata l'umidità in percentuale e la tensione ultima a compressione σ , in N/mm² di campioni verdi e stagionati⁵⁶.

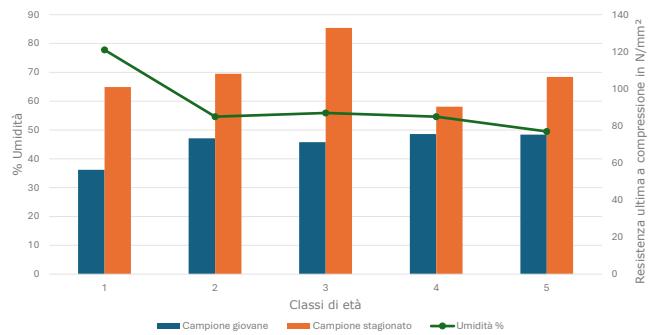


Grafico 4. Resistenza ultima a compressione nelle differenti posizioni del culmo, rielaborazione propria, Data source: *Il bamboo come materiale da costruzione: Caratteristiche fisiche e meccaniche, tecnologie costruttive*

I risultati del grafico 4 evidenziano un progressivo incremento della resistenza a compressione nei primi tre anni di età, con un picco massimo nella classe di età 3. Dopo il terzo anno, si assiste a una graduale riduzione della resistenza, seppur non drastica, nei campioni di 4 e 5 anni. Questo andamento suggerisce che, superato un certo grado di maturazione, il materiale tende a perdere progressivamente alcune delle sue caratteristiche meccaniche ottimali, probabilmente a causa dell'inizio di processi di invecchiamento strutturale⁵⁶. La differenza tra stato verde e stagionato è più marcata nei culmi giovani, dove l'elevato contenuto di umidità (fino al 125% nella terza classe) determina una riduzione significativa della resistenza⁵⁹. Ad esempio, nel primo anno, la resistenza media passa da 36.2 N/mm² nel campione verde a 64.9 N/mm² nel campione stagionato, segnando un incremento di quasi l'80%. Nei culmi più anziani (5 anni), la differenza tende invece ad attenuarsi (48.4 N/mm² contro 68.4 N/mm²), indicando che la stagionatura ha un effetto benefico maggiore nelle fasi iniziali di sviluppo, mentre nei culmi maturi il contenuto d'acqua è già naturalmente più limitato⁵⁶. Un ulteriore elemento emerso dallo studio è il ruolo della posizione lungo il culmo. I dati raccolti indicano che la parte inferiore dei culmi presenta sistematicamente i valori più alti di resistenza, seguita dalla parte mediana e infine da quella superiore⁶¹. Questa distribuzione è coerente con l'anatomia del bamboo, poiché la base del culmo è quella che sopporta il maggior carico durante la crescita e presenta quindi un tessuto più compatto, ricco di fibre strutturali⁵⁶.

I risultati a taglio mostrano valori relativamente bassi di resistenza. Una serie di sperimentazioni condotte da J.L. Atrops ha dimostrato come la resistenza decresce all'aumentare della lunghezza della superficie di taglio⁵⁶. La resistenza al taglio è circa l'8% di quella a trazione, e la rottura avviene per la mancanza di fibre disposte perpendicolarmente rispetto a quelle portanti per trazione e compressione. Di conseguenza, gli internodi sono meno resistenti al taglio rispetto ai nodi⁵⁶. Anche in questo caso l'età del culmo e il contenuto di umidità giocano un ruolo importante: la resistenza aumenta con l'età e diminuisce con l'aumento dell'umidità⁶¹.

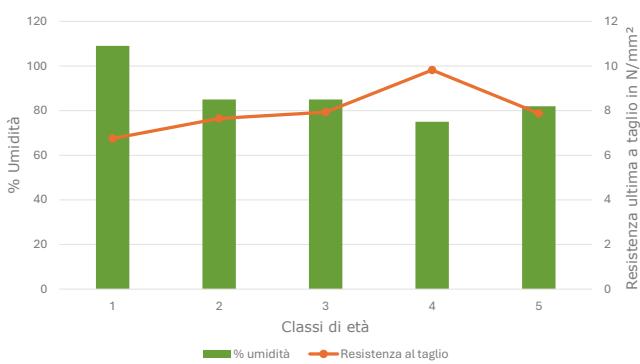


Grafico 5. Valori di taglio in funzione del contenuto di umidità, rielaborazione propria, Data source: *Il bamboo come materiale da costruzione: Caratteristiche fisiche e meccaniche, tecnologie costruttive*

I risultati ottenuti dalle prove di taglio mostrano valori relativamente bassi di resistenza meccanica. Questi valori confermano quanto osservato nella letteratura scientifica, secondo cui la resistenza al taglio nel bamboo è notevolmente inferiore rispetto a quella a trazione o compressione. Analizzando i dati in funzione dell'età, emerge un chiaro incremento della resistenza tra il primo e il quarto anno. Questo andamento suggerisce che con l'avanzare dell'età del culmo, e quindi con la maturazione del tessuto parenchimatico e l'aumento della densità fibrosa, il materiale acquisisce una migliore coesione interna, che contribuisce a rallentare la formazione e la propagazione delle linee di taglio. Sebbene nel quinto anno si noti una decrescita delle prestazioni probabilmente dovuta all'invecchiamento del tessuto.

I culmi di bamboo sottoposti a flessione presentano una notevole resistenza, paragonabile a quella di essenze legnose comunemente usate nelle costruzioni⁵⁹. Secondo i dati riportati da J.J. Janssen, che mettono in relazione la resistenza ultima a flessione con diametro e spessore del culmo, si è potuto osservare che all'aumentare del diametro, la resistenza a flessione diminuisce, nonostante l'aumento dello spessore⁶¹. Altri studi, invece, come quelli di V.D. Lymaye, hanno messo in relazione la correlazione tra la resistenza flessionale e variabili come massa volumica, età del culmo, contenuto di umidità e posizione lungo il culmo. In particolare, è stato dimostrato che la resistenza ultima a flessione può essere stimata empiricamente come 0.14 volte la massa volumica del materiale⁵⁶.



Grafico 6. Tensione ultima a flessione in N/mm² in funzione delle classi di età del culmo, rielaborazione propria, Data source: *Il bamboo come materiale da costruzione: Caratteristiche fisiche e meccaniche, tecnologie costruttive*

Dall'analisi dei valori medi emerge un andamento ben definito, la resistenza a flessione aumenta progressivamente dall'età 1-2 fino ai 7-8 anni, raggiungendo un massimo di 130.7 N/mm² nella quarta classe, per poi declinare leggermente nella fascia 9-10 anni. Questo andamento suggerisce l'esistenza di una fase ottimale di maturazione strutturale compresa tra il terzo e il quarto anno di età del culmo. Durante questa fase, il bamboo sviluppa la maggiore densità e lignificazione delle pareti cellulari, fattori determinanti per la performance meccanica. Dopo questo punto, la perdita progressiva di elasticità e l'eventuale degradazione naturale del materiale possono giustificare la lieve riduzione nella resistenza osservata.

Il modulo elastico è la proprietà intrinseca di ogni materiale, esprime il rapporto tra tensione e allungamento⁵⁶. Per i materiali anisotropi e naturali come il bamboo, tale parametro assume una valenza ancora più complessa, in quanto strettamente connesso alla disposizione interna delle fibre, alla composizione anatomica e al contenuto di umidità⁵⁸. Esistono tre moduli elastici principali, corrispondenti ai tre tipi di sollecitazione: compressione, trazione e taglio. Nel caso specifico del bamboo, i moduli di elasticità più rilevanti sono quelli a trazione e compressione, poiché riflettono direttamente il comportamento sotto i carichi principali nelle applicazioni strutturali.

| % umidità | E (N/mm ²) a trazione | σ (N/mm ²) a compressione | σ (N/mm ²) a trazione | σ (N/mm ²) a taglio |
|-----------|-----------------------------------|--|--|--|
| 0 | 22500 | 238 | 63.2 | 9.99 |
| 7,5 | 21500 | 201 | 54.8 | 9.30 |
| 38,2 | 15500 | 175 | 35.8 | 6.36 |
| 81,2 | 11760 | 150 | 43.3 | 6.98 |

Tabella 2. Relazione tra le varie caratteristiche meccaniche e l'umidità, rielaborazione propria, Data source: *Il bamboo come materiale da costruzione: Caratteristiche fisiche e meccaniche, tecnologie costruttive*

Come si può osservare, l'aumento dell'umidità comporta una riduzione significativa del modulo elastico a trazione, che passa da 22500 N/mm² a umidità 0% fino a 11760 N/mm² all'81.2% di umidità. Anche i valori di resistenza a compressione e trazione seguono un trend decrescente con l'aumento dell'umidità. In particolare, la resistenza a compressione cala da 238 N/mm² a 150 N/mm², mentre la resistenza a trazione mostra un calo più marcato, passando da 63.2 N/mm² a 43.3 N/mm², con un valore minimo intermedio a 35.8 N/mm² per un'umidità del 38.2%. Questo comportamento non lineare può essere attribuito alla diversa sensibilità delle fibre e della matrice parenchimatica all'assorbimento di acqua, con possibili microfessurazioni interne o riorganizzazione delle fibre sotto carichi di trazione⁵⁹. Nel complesso, i dati evidenziano la forte dipendenza delle proprietà meccaniche del bamboo dal contenuto idrico, confermando quanto sia importante tenere sotto controllo le condizioni ambientali nei processi di caratterizzazione, progettazione e impiego strutturale di questo materiale naturale.

Giunti a questo punto possiamo mettere in relazione tutte le caratteristiche analizzate e possiamo affermare che il bamboo distingue le sue caratteristiche meccaniche rendendolo un materiale versatile. Con questa affermazione si vuole descrivere l'anisotropia del materiale ovvero che in base alla sollecitazione a cui è sottoposto reagisce in modo diverso se flesso, compresso o tirato. In questa trattazione abbiamo anche potuto notare come queste caratteristiche variano non solo in base allo sforzo ma anche ai contenuti d'umidità, all'età del bamboo raggiungendo gli apici tra i cinque e gli otto anni. In sintesi, possiamo affermare che le qualità migliori sono senza ombra di dubbio la leggerezza, la resistenza a trazione e compressione e la flessione. Al contrario l'umidità interna e la resistenza al taglio hanno mostrato gravi limiti che dovranno essere colmati attraverso trattamenti e tecnologie costruttive.

2.5 Le connessioni

Il bamboo, pur essendo un materiale naturale dotato di eccezionali proprietà meccaniche e di una grande sostenibilità ambientale, economica e sociale, presenta alcune criticità quando viene impiegato come elemento strutturale. La sua conformazione cava, conica e nodosa, unitamente alla marcata anisotropia rende i giunti strutturali il vero punto critico nella progettazione e nell'impiego edilizio del materiale⁶¹. Per garantire affidabilità, sicurezza e durabilità alle strutture in bamboo, è fondamentale una profonda conoscenza del comportamento meccanico del materiale e un'attenta progettazione delle connessioni. Nel tempo, le tecniche di giunzione si sono evolute, passando da soluzioni tradizionali a sistemi più innovativi e tecnologicamente avanzati. Nonostante l'elevata resistenza a trazione, il bamboo tende naturalmente a fessurarsi lungo la direzione longitudinale, rendendo indispensabile l'impiego di culmi maturi (di età superiore ai quattro anni), adeguatamente stagionati e privi di danni biologici⁴⁷. Anche l'inserimento di elementi di collegamento come spine, bulloni o cunei richiede lavorazioni estremamente accurate, al fine di preservare l'integrità della sottile parete rispetto al diametro del culmo⁵⁹. Tali dispositivi, spesso associati a legature in corda, migliorano la trasmissione degli sforzi assiali e aumentano l'affidabilità delle connessioni⁵⁶. Le legature continuano a rivestire un ruolo

rilevante anche nell'ambito delle tecniche costruttive contemporanee. Un esempio emblematico è offerto dalle imbarcazioni cinesi che navigano le forti correnti del fiume Yangtze, dove corde di bamboo, lunghe centinaia di metri, sono in grado di sopportare carichi a trazione superiori alle 14 tonnellate⁴⁰. L'efficacia della legatura aumenta proporzionalmente al numero di spire applicate, motivo per cui si ricorre spesso a fasciature aggiuntive in corrispondenza dei nodi per incrementare la resistenza del giunto⁵⁴. In termini generali, uno degli aspetti più delicati nella progettazione delle strutture in bamboo è rappresentato dalla corretta configurazione dei sistemi di connessione. La difficoltà nella realizzazione dei giunti risulta complessa a causa dell'elevata variabilità del materiale, il cui profilo in termini di dimensioni, forma, spessore e microstruttura cambia da un culmo all'altro, ostacolando la definizione di soluzioni costruttive standard⁵¹. Tuttavia, per migliorare le prestazioni, il giunto viene realizzato quando le fibre sono ancora umide, sfruttando il successivo ritiro del materiale per generare una maggiore aderenza e tensione interna⁶¹. Le connessioni tra aste di bamboo possono essere distinte in due grandi categorie: quelle indirette, realizzate mediante interposizione di elementi metallici, e quelle dirette, basate sul contatto e l'incastro tra i culmi⁵⁶.

Le prime sono comunemente impiegate nelle fondazioni per isolare le colonne dal contatto con il suolo e si fondono sull'uso di un nucleo metallico centrale che consente l'aggregazione di più culmi in direzioni diverse. Sebbene semplici da realizzare e vantaggiose sul piano economico, queste soluzioni presentano una minore compatibilità ambientale⁵⁶. Le connessioni dirette, tra le più antiche e rapide da eseguire, possono avvenire attraverso foratura preferibilmente in prossimità dei nodi, dove l'intreccio delle fibre offre maggiore resistenza allo splitting oppure mediante avvolgimento esterno, senza perforazione. In questo ambito si colloca anche la tecnica sviluppata dall'architetto Simón Vélez, che prevede l'iniezione di cemento all'interno del culmo, in corrispondenza del nodo, con lo scopo di aumentare la rigidezza del giunto e proteggere il bamboo dal contatto diretto con l'umidità del terreno⁵⁹.

Le tecniche tradizionali si basano prevalentemente sull'uso di materiali naturali e su competenze manuali, spesso tramandate oralmente⁵⁹. Tra i metodi più antichi e diffusi vi sono le legature con corde, realizzate tradizionalmente con fibre naturali come canapa, vimini, fibra di cocco, juta, liane o con fibre tratte dallo stesso bamboo, le quali si sono dimostrate sorprendentemente resistenti, con valori di trazione comparabili a corde zincate (circa 70.6 MPa)⁵⁶. In tempi più recenti si è assistito all'introduzione di corde sintetiche quali nylon, poliestere e polipropilene che offrono una maggiore resistenza agli agenti atmosferici e all'invecchiamento, a discapito però del costo e dell'estetica⁶¹. Un'interessante alternativa è rappresentata dall'uso dell'Ijuk, una fibra ricavata dalla palma da zucchero, che ha dimostrato di avere un coefficiente di attrito addirittura superiore rispetto al nylon.

Le legature vengono eseguite quando il bamboo è ancora verde, in modo da ottenere un effetto di pretensione dovuto al successivo ritiro del materiale durante l'essiccazione⁵⁶. A seconda della configurazione strutturale, le corde possono essere avvolte esternamente attorno ai culmi oppure fatte passare attraverso fori praticati nel bamboo⁵⁹. La resistenza della connessione dipende anche dal numero di giri della corda attorno all'elemento, e spesso si utilizzano fasciature supplementari con nastri nelle vicinanze del nodo per aumentare la capacità di carico e prevenire fessurazioni longitudinali⁶¹. Le configurazioni più comuni includono la legatura quadrata, quella diagonale, il nodo parlato e le legature a treppiede o bipiede.

La legatura quadrata rappresenta una delle soluzioni più semplici ed efficaci per l'unione ortogonale di due elementi, largamente impiegata nelle costruzioni leggere, nelle architetture effimerne e nei sistemi modulari temporanei, dove il bamboo svolge un ruolo strutturale primario⁵⁶. Questa legatura viene realizzata disponendo due aste in bamboo perpendicolarmente tra loro, in modo da formare una configurazione a croce. Consente una distribuzione uniforme delle sollecitazioni, grazie alla superficie tondeggiante del bamboo, che riduce i punti di concentrazione delle tensioni. La resistenza meccanica della legatura dipende fortemente dalla qualità della corda, dalla precisione nell'esecuzione manuale e dalla pressione esercitata durante l'intreccio⁵².

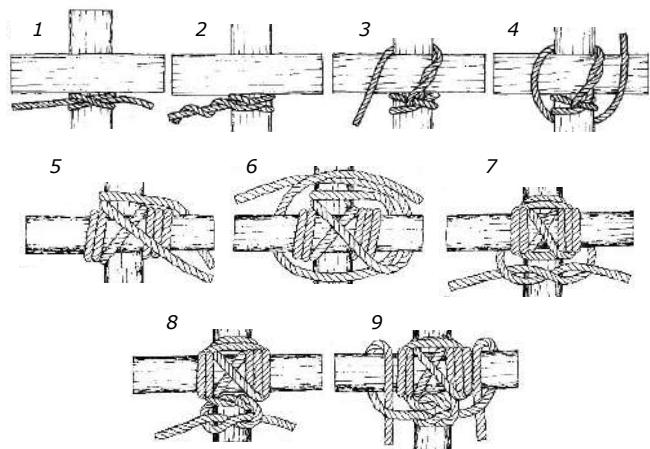


Immagine 33. Schema d'esecuzione legatura quadrata, Data source: www.scoutcaltagirone.it

La legatura diagonale è particolarmente indicata per connessioni con angoli compresi tra 45° e 90°, ed è stata efficacemente utilizzata in progetti significativi come il Bamboo Ark o l'Ujung Alang Community Center⁵¹. Le legature sono ideali per strutture leggere e trovano ancora oggi largo impiego nei ponteggi di molte città asiatiche, come Hong Kong. Il problema principale che possono riportare è il deterioramento degli elementi di raccordo dovuti al passare del tempo e agli effetti ambientali⁵⁶.

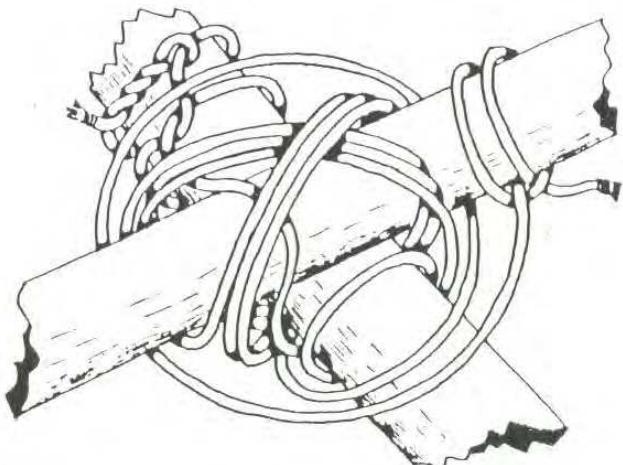


Immagine 34. Legatura diagonale, Data source: Pensiero Tonante

Il nodo parlato (o "clove hitch") è uno dei nodi più utilizzati per fissare rapidamente una corda a un elemento cilindrico. La sua peculiarità è quella di poter essere realizzato e sciolto con estrema rapidità, anche sotto tensione moderata⁴⁰. Dal punto di vista tecnico, il nodo si ottiene eseguendo due giri della corda attorno al palo, sovrapponendo il secondo giro al primo in maniera incrociata, così da bloccare la posizione. Può essere rinforzato con una mezza chiave finale per aumentarne la tenuta⁵⁶.

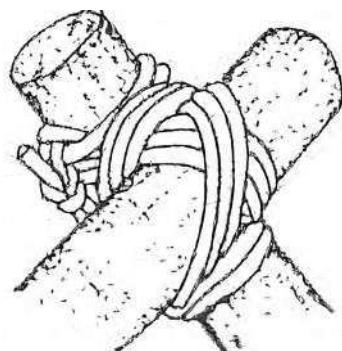


Immagine 35. Nodo parlato, Data source: spazio in wind

La legatura a treppiede è una tecnica tradizionale impiegata per unire tre aste o pali, disposti inizialmente in posizione parallela o leggermente divergente, al fine di realizzare una struttura autoportante a base triangolare⁴⁰. Tale configurazione è particolarmente diffusa nelle costruzioni leggere, nelle impalcature temporanee e nei supporti da campo, data la sua capacità di garantire una notevole stabilità anche su terreni irregolari⁴⁰. Dal punto di vista strutturale, questa tipologia di legatura consente di distribuire in modo equilibrato i carichi verticali e trasversali su ciascuna delle tre aste. Risulta particolarmente adatta per sostenere travature orizzontali, come nei casi di tettoie o coperture leggere⁵⁶.

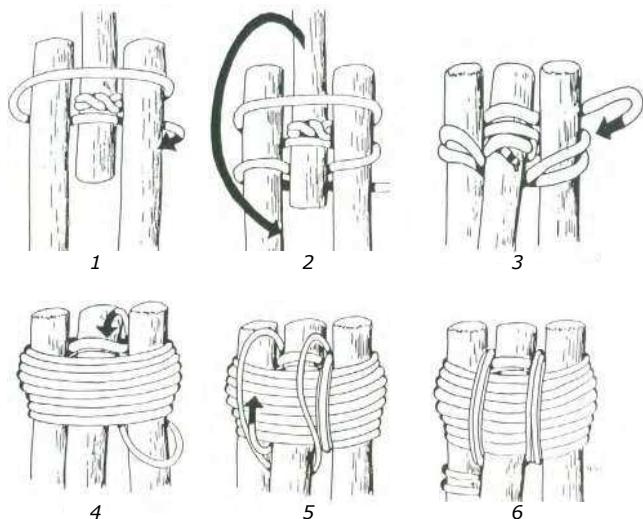


Immagine 36. Schema d'esecuzione della legatura a treppiede, Data source: Pensiero Tonante

La legatura a bipiede è una variante semplificata della legatura a treppiede, utilizzata per unire due aste al fine di formare una struttura a "V" rovesciata. Tale configurazione trova ampio impiego in contesti costruttivi che richiedono cavalletti, supporti inclinati o appoggi per coperture leggere e impalcature provvisorie⁵⁶.

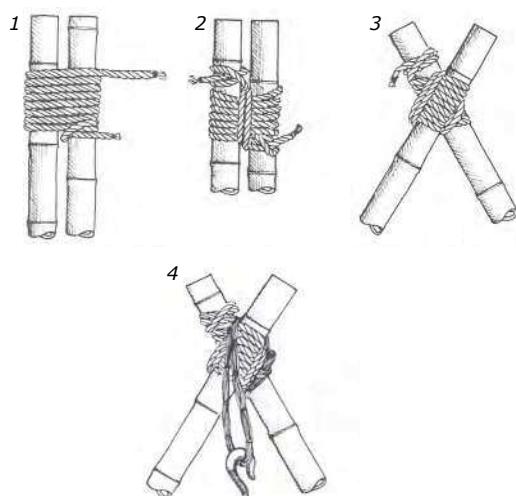


Immagine 37. Schema d'esecuzione della legatura a treppiede, Data source: Pensiero Tonante

Un'altra tecnica di giunzione tradizionale per la realizzazione di giunzioni nei sistemi in bamboo prevede l'impiego di perni o spine, generalmente in legno duro o bamboo stesso, inseriti in fori praticati in prossimità dei nodi del culmo⁶². Questa tecnica consente una connessione meccanica diretta tra gli elementi, ma comporta alcuni rischi strutturali. In particolare, la foratura può compromettere l'integrità della sezione trasversale e innescare spaccature longitudinali, soprattutto se eseguita in corrispondenza delle porzioni internodali, più vulnerabili alle sollecitazioni⁶². Per contrastare tali effetti, spesso si combina la presenza dei perni con legature esterne, in modo da garantire una migliore trasmissione degli sforzi assiali e ridurre la concentrazione delle tensioni nella zona forata⁶¹. In aggiunta, per evitare il collasso locale della parete del culmo, è possibile inserire materiali di riempimento all'interno degli internodi, come ad esempio malta o calcestruzzo, che svolgono una funzione di sostegno e distribuzione uniforme delle pressioni⁶².

Tra le soluzioni più raffinate si trovano anche quelle basate sulla sagomatura delle estremità dei culmi, come ad esempio il taglio a "bocca di pesce", che permette un accoppiamento più preciso tra gli elementi⁵⁶. In alternativa, si possono utilizzare incastri geometrici, come la mortasa e il tenone, sebbene questi ultimi siano raramente applicati al bamboo a causa della sua struttura fibrosa, che rende difficoltosa la lavorazione precisa e ne riduce la tenuta meccanica nel tempo⁶². Un'altra tecnica prevede l'inserimento di un culmo all'interno di un altro, bloccato con perni in legno o bulloni, realizzando così una giunzione per sovrapposizione. Tale configurazione viene solitamente bloccata mediante perni in legno o bulloni, al fine di impedire scorrimenti relativi e garantire maggiore stabilità⁶².

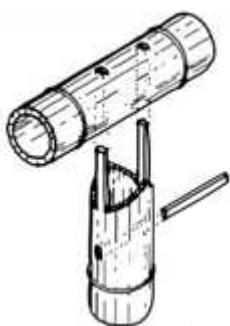


Immagine 38. Connessioni tramite perni, Data source: *Bamboo the gift of the gods*

Anche in questo caso, tuttavia, la foratura può generare criticità, come la riduzione della sezione resistente o la formazione di fessurazioni (splitting), che compromettono la durabilità del collegamento⁶². Per rispondere a queste problematiche, si è ricorso a connettori metallici rigidi, che permettono una maggiore precisione e durabilità delle connessioni⁵⁶. Sebbene ciò comporti un incremento dei costi, sia economici che ambientali, la possibilità di standardizzare questi elementi garantisce una maggiore sicurezza e l'opportunità di progettare nodi strutturalmente più complessi⁵⁶. Tuttavia, l'interazione tra metallo e bamboo comporta anch'essa delle criticità: ad esempio, la foratura per inserire elementi metallici può indebolire il culmo, mentre l'elevata conducibilità termica dell'acciaio potrebbe ridurre la resistenza al fuoco della struttura, accelerando la combustione del bamboo⁵⁶. Per ovviare a queste problematiche, i connettori vengono spesso progettati in modo da non alterare la geometria naturale del bamboo applicandoli esternamente e sagomandoli per adattarsi alla sua forma circolare. Il trasferimento degli sforzi avviene prevalentemente per attrito, motivo per cui è essenziale garantire una forte aderenza tra acciaio e bamboo, ottenuta mediante l'utilizzo di sistemi di serraggio come bulloni passanti, reggette o fascette metalliche⁶².



Immagine 39. Connessioni tramite fascette metalliche, Data source: *Bamboo joints with steel clamps capable of transmitting*

Le tecniche "high-tech" invece si basano principalmente sull'impiego di elementi metallici per superare i limiti intrinseci del materiale⁵⁶. È comune, in tal senso, l'uso di piastre, ganci, bulloni o altri elementi metallici, spesso inseriti all'interno dei culmi e fissati con iniezione di malta o tramite forature. Questa soluzione, tipica della scuola colombiana, offre notevoli vantaggi in termini di resistenza meccanica, ma introduce anche svantaggi legati a un maggiore peso, a una lavorazione più complessa e a costi più elevati, oltre a un impatto ambientale non trascurabile. Una delle prime variazioni alle tecniche tradizionali riguarda la sostituzione dei materiali naturali, come canapa, bamboo e legno, con elementi metallici, tra cui rientrano sia le connessioni con corde metalliche sia quelle con viti e bulloni, che risultano decisamente più frequenti⁵⁶. Un'alternativa alla foratura dei culmi per realizzare i giunti consiste nell'irrigidimento degli stessi mediante l'adozione di elementi che avvolgano le estremità. In questo modo si cerca

di evitare il rischio di fessurazione, uno dei principali problemi nella realizzazione delle connessioni, collegando gli elementi senza praticare fori, bensì attraverso l'inserimento di parti interne che si uniscono tra loro⁶². La prima applicazione significativa di questa tecnica prevedeva l'utilizzo combinato di bulloni e l'iniezione di malta cementizia all'interno del culmo, trasformando così l'estremità del bamboo da elemento cavo e fragile a componente pieno, resistente alle sollecitazioni di taglio⁶². Questa soluzione consentiva anche l'inserimento di un connettore, generalmente metallico, in una struttura nodale, migliorando la resistenza alla compressione e permettendo l'adozione di luci strutturali più ampie, altrimenti non sostenibili a causa della sezione cava⁶¹.

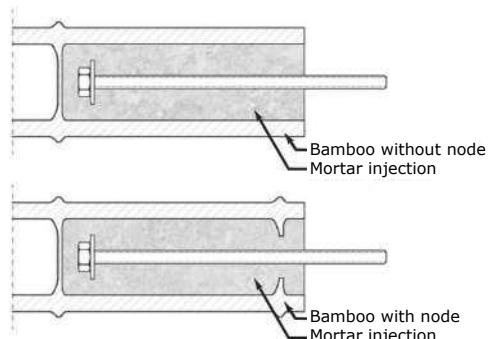


Immagine 40. Connessioni tramite connettore metallico e iniezione di malta, Data source: Comportamento em compressão de argamassas reforçadas com fibras natu-rais

Tuttavia, questo tipo di giunto presenta due criticità rilevanti: da una parte, un aumento significativo del peso (fino a 2.5 volte), dall'altra un contrasto nel comportamento igrometrico tra il bamboo e la malta cementizia. Infatti, in condizioni di normale variazione dell'umidità relativa dell'aria (dal 75 al 55%), il bamboo subisce una contrazione radiale di circa 0.0075, molto superiore rispetto allo 0.0004 della malta cementizia, con un rapporto di 15-20 volte che può facilmente causare fessurazioni del culmo⁵⁶. In alternativa a questo approccio, Oscar Arce Villalobos ha proposto un sistema di riempimento a secco che non soffre delle problematiche di ritiro. Tale sistema prevede l'inserimento all'interno del culmo di un elemento ligneo levigato, fissato con colla, che si estende verso l'esterno per permettere la connessione con altri elementi⁴³.

Questo metodo incrementa la regione interna di distribuzione delle forze di taglio e aumenta la sezione resistente, riducendo così le concentrazioni di sforzo che potrebbero generare fessurazioni. Per evitare che la differenza tra i diametri dell'elemento ligneo e del culmo provochi rottura durante l'inserimento, vengono praticati due tagli longitudinali sul bordo esterno del culmo, consentendo tolleranze fino a 10 mm⁶². Un altro sistema di riempimento, proposto da Inoue prevede l'utilizzo di bamboo spartito incollato all'interno della superficie cava mediante colle uretaniche, con un connettore centrale, anch'esso in bamboo, incollato allo stesso modo. Sebbene tale soluzione elimini i problemi legati alla diversa risposta all'umidità, la resistenza a trazione del giunto dipende interamente dall'adesivo utilizzato⁵⁶.

2.6 Il bamboo in architettura

Sino a questo momento abbiamo analizzato il bamboo come materiale attraverso le sue caratteristiche intrinseche e le sue proprietà meccaniche. Tuttavia, non abbiamo ancora specificato come è stato utilizzato sino ad oggi nel campo architettonico. Ora andremo ad analizzare in primis come è stato utilizzato in ambito strutturale per poi vedere come è stato sfruttato come ornamento degli edifici.

Il bamboo è sempre stato riconosciuto come una risorsa fondamentale in ambito strutturale, soprattutto dai popoli poveri che lo vedevano come un materiale a basso costo e molto presente nel territorio senza dimenticare le sue ottime prestazioni meccaniche. Il suo impiego poteva avvenire attraverso l'uso del culmo al naturale come pilastri e travi oltre alla possibilità di utilizzarlo nelle forme più disparate grazie alla sua flessibilità⁵⁶. Inoltre, può essere utilizzato per la creazione di travi reticolari, telai e coperture. Architetti come Simón Vélez e Vo Trong Nghia hanno fatto di questo materiale la loro fortuna attraverso l'utilizzo combinato di bamboo, acciaio e cemento facendo coesistere tradizione e innovazione⁴⁷. Esempi emblematici sono la Bamboo Sports Hall in Thailandia, che unisce leggerezza e monumentalità attraverso un sistema di archi e travi lamellari in bamboo, o il Bamboo Eye Pavilion in Cina, dove il materiale viene reinterpretato in chiave simbolica e sostenibile⁴⁴.



Immagine 41. Bamboo Eye Pavilion, Data source: Inhabitat

Storicamente, l'impiego del bamboo non si è limitato alle costruzioni edilizie: è stato utilizzato anche per realizzare ponti, impalcature e strutture temporanee grazie alla sua straordinaria capacità di resistere ai carichi e alla facilità di assemblaggio⁵¹. Un esempio significativo è il Millennium Bridge in Vietnam, interamente costruito in bamboo intrecciato⁴². Oppure in tempi più moderni attraverso l'ingegnerizzazione delle sue parti per superare i limiti intrinseci del fusto attraverso la sua trasformazione in un materiale composito come il Glued-laminated bamboo o il Parallel Strand Bamboo. Questi derivati ne consentono l'utilizzo anche in contesti urbani e in strutture permanenti, ampliando il campo d'applicazione del materiale ben oltre i confini tradizionali⁴⁷.



Immagine 42. Millennium Bridge, Data source: Atlas Obscura

Oltre al suo impiego strutturale, il bamboo si è pian piano andato ad affermare anche come materiale ornamentale e di finitura. La sua superficie naturalmente liscia e lucente, unita alla vasta varietà cromatica consente effetti materici e visivi di grande varietà. In molti progetti contemporanei viene utilizzato per definire facciate, schermature solari, ma anche rivestimenti interni ed elementi di arredo⁴⁴. La sua disposizione può generare giochi di luci e ombre in continua trasformazione, dalla mattina alla sera conferendo agli edifici un carattere dinamico e mutevole. Kengo Kuma e Shigeru Ban hanno sviluppato questi concetti interpretando il materiale come elemento di connessione tra elementi naturali e urbanizzati⁴⁰. Nelle opere di Kuma viene spesso utilizzato come pelle architettonica, capace di mediare la relazione tra interno ed esterno come nella Great Bamboo Wall in Cina, mentre nei progetti di Vo Trong Nghia diventa un'espressione di leggerezza e spiritualità. In questa prospettiva, l'uso ornamentale del bamboo rappresenta non solo una scelta estetica, ma un principio che punta sulla riscoperta del valore della materia naturale, attraverso un linguaggio costruttivo coerente con i principi di sostenibilità e rispetto dell'ambiente⁴⁴.



Immagine 43. Great Bamboo Wall, Data source: Inhabitat

2.7 I prodotti in bamboo

Il bamboo come visto in precedenza è un materiale che è stato impiegato sin dall'antichità nei campi più disparati dall'artigianato alla medicina, dalla gastronomia all'edilizia, dall'interior design alla musica, dimostrando una versatilità rara che unita alla rapida crescita e alla sostenibilità ambientale, lo rende oggi una risorsa preziosa in molte filiere produttive⁴⁰.

Dopo la raccolta, gli steli di bamboo vengono sottoposti a una prima fase di pulitura, che consiste nella rimozione degli elementi superflui. Il materiale, ancora allo stato grezzo, si presta fin da subito a una lavorazione piuttosto semplice, che può iniziare anche con attrezzi manuali come un machete⁵⁶. Per ottenere sezioni di lunghezza desiderata, utili per successive applicazioni, si ricorre invece a macchine dotate di sega circolare. Un passaggio fondamentale nella lavorazione è la splittatura, realizzata mediante uno stampo in acciaio conosciuto come bamboo splitter che suddivide longitudinalmente lo stelo in strisce sottili⁴⁷.



Immagine 44. Splitter bamboo in azione, Data source: Shutterstock

Queste, dopo la rimozione dei diaframmi interni tramite una lama rotante, vengono ulteriormente trattate per aumentarne la flessibilità⁵⁶. Le porzioni non regolari, soprattutto quelle della parte apicale dello stelo, vengono destinate ad altri usi, come la produzione di chip⁴⁷. Anche la pelle del bamboo, se non destinata ad altri impieghi, può essere parzialmente utilizzata come combustibile⁴⁷. Un aspetto rilevante del trattamento è la rimozione della lignina, una sostanza che, pur contribuendo alla rigidità della pianta, la rende vulnerabile all'attacco di parassiti come le termiti. Per prevenire il degrado biologico, è quindi necessario eliminare questa componente⁵⁹. L'asciugatura delle strisce avviene in due fasi: inizialmente all'aria aperta e successivamente all'interno di un tunnel a temperatura controllata. Una volta essiccate, le strisce vengono immerse in un adesivo a base di fenoloformaldeide e poi sottoposte a pressatura idraulica, al fine di ottenere un blocco compatto. Questo processo consente la realizzazione di materiali robusti e durevoli⁵⁹. Segue una fase di acclimatazione all'aperto, di circa due settimane, che permette di uniformare l'umidità all'interno del materiale. A seconda del trattamento applicato e della forma desiderata, dal bamboo si possono ottenere numerosi prodotti⁶². La parte più utilizzata è lo stelo, impiegato sia allo stato naturale che trasformato, per applicazioni in campo architettonico, strutturale e decorativo. Il ciclo produttivo può condurre, ad esempio, alla realizzazione di pannelli, doghe, arredi, elementi di design e componenti edili⁵⁷.

In ambito medico, il bamboo trova impiego in diverse forme, soprattutto nella medicina tradizionale asiatica. Le sue foglie e radici sono note per le proprietà antibatteriche, antinfiammatorie e diuretiche⁵¹. Gli estratti vegetali, ricchi di silice naturale, vengono utilizzati nella produzione di integratori per il rafforzamento di unghie, capelli e articolazioni⁵¹. Inoltre, la linfa e l'aceto di bamboo, ottenuti attraverso la distillazione dei germogli e del culmo, sono impiegati in cosmesi per la loro azione purificante e detossinante sulla pelle. In ambito biomedicale, recenti ricerche stanno esplorando l'uso del bamboo come materiale biocompatibile per impianti temporanei o come supporto naturale per la rigenerazione cellulare, grazie alla sua biodegradabilità controllata⁴⁷.

Dal punto di vista gastronomico, il bamboo è conosciuto soprattutto per i suoi germogli commestibili, ampiamente utilizzati nella cucina asiatica⁵⁹. Questi sono teneri, dal sapore delicato, e si distinguono per l'alto contenuto di fibre, vitamine e sali minerali, a fronte di un basso apporto calorico⁵⁰. I germogli possono essere consumati freschi, conservati in salamoia o essiccati, trovando impiego in molte preparazioni come zuppe, stufati e piatti saltati. In alcune tradizioni culinarie, il bamboo viene anche utilizzato come contenitore naturale per la cottura di alimenti, conferendo un aroma caratteristico alle pietanze. Talvolta, il liquido fermentato dei germogli è utilizzato per la produzione di bevande fermentate simili al vino di riso⁵⁰.

Anche nel settore dell'interior design il bamboo sta acquisendo crescente rilevanza. La sensibilità verso materiali ecocompatibili ha favorito l'adozione di questa risorsa per la produzione di pavimenti, rivestimenti, mobili e complementi d'arredo⁵¹. Le sue qualità meccaniche tra cui resistenza, leggerezza e flessibilità ne consentono l'utilizzo in ambienti soggetti a umidità, come cucine e bagni, grazie anche allo sviluppo di bamboo ingegnerizzato, più stabile e durevole. L'estetica calda e naturale del materiale permette inoltre un'integrazione armoniosa sia in spazi rustici che moderni⁴⁷.

Nel contesto musicale, il bamboo ha storicamente ricoperto un ruolo di rilievo, specialmente in culture tradizionali asiatiche e sudamericane⁴². La struttura cava degli steli lo rende ideale per la fabbricazione di strumenti a fiato come flauti, oboi e zampogne⁴¹. Strumenti tradizionali come il dizi cinese, la suling indonesiana, il quena andino o l'angklung, basato su tubi che emettono suoni quando agitati, testimoniano l'importanza culturale e sonora del bamboo. Anche strumenti a percussione e a corda possono incorporare elementi in bamboo, sfruttandone elasticità e leggerezza⁴².



Immagine 45. Dizi, Data source: Dabudart

Abbiamo osservato finora alcuni dei principali campi di utilizzo del bamboo a livello generale, ora è il momento di addentrarci più nello specifico in alcuni prodotti che vengono realizzati con questa pianta.

Stuoia

Uno dei prodotti più noti è senza dubbio la classica stuoia, emblema universale del bamboo. Per la realizzazione vengono usati culmi dell'età compresa tra 2 e 3 anni, tagliati in sezioni da 50 a 250 cm⁶³. Nelle specie dove la presenza dei nodi è limitata, questi vi vengono lasciati; se invece gli internodi hanno una lunghezza superiore a 80 cm, questi devono essere rimossi. Il culmo può essere spaccato longitudinalmente con molta facilità, questo avviene grazie all'allineamento assiale delle fibre, e per mezzo di una lama anulare che riduce il fusto in listelli larghi 10-15 mm, a seconda della specie e della qualità del bamboo. I listelli così ottenuti vengono fatti asciugare per eliminare l'umidità in eccesso. Le parti dei nodi rimasti vengono eliminate meccanicamente o manualmente⁴⁴. Con la procedura meccanizzata, assieme all'eliminazione dei nodi, avviene anche la piallatura dei listelli. La fase successiva prevede l'eliminazione della superficie esterna che viene impiegata nella produzione di altri manufatti. Si passa quindi alla riduzione dello spessore delle fascette (da 0.6 a 1 mm). Le fettucce così ottenute vengono intessute a mano per realizzare stuoie di varie misure e modelli. Le stuoie possono essere utilizzate come tappeti, schermature verticali, come rivestimenti, o per la realizzazione di suppellettili. Per la realizzazione di utensili, le stuoie vengono immerse in un bagno di resina, asciugate e sistemate negli appositi stampi, dove vengono sottoposte a temperature e pressioni elevate per ottenere la forma e la rigidezza desiderate⁵⁶.



Immagine 46. Stuoia in bamboo, Data source: Bambuseto

Pannelli rigidi

Per ottenere pannelli rigidi (BMB – Bamboo mat boards), le stuoie vengono impregnate con una resina fenolo-formaldeide miscelata a un prodotto preservante, quindi essiccate, sovrapposte in 2, 3 o 5 strati e pressate a caldo⁴⁷. Dopo la presa, i pannelli sono pronti per essere tagliati nelle dimensioni definite ed essere impiegati nella costruzione di porte, pareti divisorie, scatole etc. Per spessori superiori a 6 mm, assieme alle stuoie vengono intercalati fogli di compensato di legno, ottenendo così un laminato composito più rigido⁴³. È possibile ottenere anche pannelli ondulati BMB mediante una semplice sagomatura a caldo delle stuoie preimpregnate; questo prodotto viene utilizzato per il rifornimento di coperture, grazie infatti ai prodotti chimici questi pannelli sono resistenti anche agli agenti atmosferici⁵⁹.



Immagine 47. BMB, Data source: Guadua Bambù SAS

Pannelli laminati

Per i pannelli laminati (LBL – laminated bamboo lumber), i culmi devono avere un diametro non inferiore a 9 cm. Il culmo viene inciso in 6-12 sezioni lasciando i diaframmi intatti; si elimina la parte centrale più debole, conservando quella esterna più ricca di lignina⁴⁷. Le strisce così ottenute vengono piallate su quattro lati per favorire l'adesione durante l'incollaggio. Segue l'immersione in acqua bollente per eliminare amidi e zuccheri ancora presenti nei tessuti, con aggiunta di agenti chimici per migliorarne la resistenza. Queste fasi richiedono una successiva asciugatura dei culmi, affinché questi raggiungano un'umidità dell'8-10%. La selezione avviene anche in base alla tonalità, dopodiché le strisce vengono pressate alla temperatura di circa 150°C e carteggiate per il trattamento finale della superficie⁴⁸. Da questa lavorazione si ottengono i prodotti finali come assi e tavole per parquet, semilavorati per edilizia, utensili e arredi. Il risultato è un materiale laminato più leggero ed elastico del legno. In alcuni casi, soprattutto in Cina, si utilizzano culmi verdi lunghi 1.5 m, aperti longitudinalmente, essiccati, appiattiti e incollati per ottenere listelli adatti alla produzione di parquet⁴⁹.



Immagine 48. Laminated bamboo lumber, Data source: acbamboo.en

Bamboo lamellare

Negli ultimi anni l'utilizzo in ambito strutturale si è esteso al bamboo lamellare. Le lamelle da 5x15 mm possono essere incollate sia di piatto che di taglio. I pannelli standard misurano 2210x1210 mm, con spessori da 5 a 40 mm. Le caratteristiche tecniche sono degne di nota: durezza pari a 4.7 Kg/mm², stabilità dimensionale dello 0.14% per ogni 1% di variazione dell'umidità, umidità di equilibrio del 10% a 20°C e 65% di umidità relativa⁴⁷.



Immagine 49. Bamboo lamellare, Data source: Civico 5.0

Bamboo sezionato

In questa forma, il bamboo viene solo sottoposto a un processo di eliminazione delle parti in eccesso (quali i rami), mantenendo la sua struttura naturale. Successivamente, il culmo viene sottoposto a trattamenti specifici per garantire la durabilità nel tempo⁵⁰. L'impiego dello stelo di bamboo al naturale è molto adoperato nei principali paesi considerati i "primari coltivatori" di questa pianta, la cui presenza nel mondo dell'edilizia è radicata da secoli⁶⁴.



Immagine 50. Bamboo sezionato, Data source: Shutterstock

Bamboo curvato

Lo stelo mantenuto nella sua integrità può essere anche sottoposto a dei processi che ne modificano le caratteristiche estetiche. Esistono, per esempio, differenti tecniche per realizzare la curvatura dello stelo di bamboo: esse sono utilizzate per lo sviluppo di parti di mobili curvi, ringhiere e oggetti di arredo, ma anche per componenti strutturali⁴⁷. Una metodologia che lavora direttamente sul germoglio consiste nella disposizione di uno stampo sul germoglio stesso, che permette di forzare la crescita della pianta ottenendo, così forme e geometrie della sezione della canna stessa di qualsiasi genere⁶⁴.



Immagine 51. Bamboo curvato a caldo per la realizzazione di una sedia da design, Data source: *italian design for living*

Bamboo unito

Anziché procedere con la tessitura delle strisce, queste possono essere allineate una a fianco all'altra, creando un grande elemento unico simile ad una tenda⁵². I prodotti che si ottengono sono vari, e si distinguono per spessore e utilizzo: per esempio tramite spessori ridotti si possono ricavare delle stuoie, oppure aumentando lo spessore e abbinando il foglio di bamboo con del cartone ondulato o dritto è possibile ottenere dei pannelli sandwich⁶⁴.



Immagine 52. Pannello in bamboo unito, Data source: *shutterstock*

Bamboo intrecciato

Il bamboo intrecciato è ricavato incollando e pressando le fibre di bamboo fra di loro, fino a raggiungere una densità molto alta⁴⁷. Questa tecnica è stata sviluppata agli inizi degli anni 2000 e consiste nel radunare i fasci di fibre grezze, precedentemente pressati fra loro, immersi in una resina e dopo di che nuovamente pressati a freddo all'interno di appositi stampi, aumentando così la densità anche fino a raggiungere 1050 kg/m⁴⁷. Successivamente l'attivazione della colla avviene inserendo gli elementi all'interno di forni, che dopo la cottura permetteranno di avere materiali estremamente duri. Oltre alle buone prestazioni meccaniche, questa tecnica permette di sfruttare i fasci di fibre non adatti alla produzione di bamboo laminato. I differenti colori (naturale, caramello e cioccolato) si ottengono tramite processi di bollitura o carbonizzazione⁶⁴.

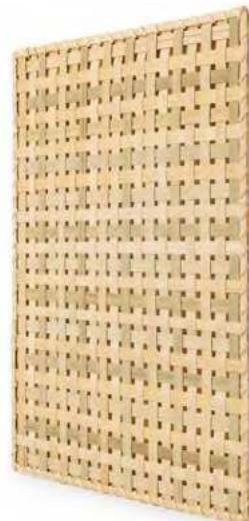


Immagine 53. Pannello in bamboo intrecciato, Data source: *shutterstock*

2.8 I pro e i contro

Dopo aver esplorato le peculiarità del bamboo, è lecito chiedersi perché scegliere proprio questo materiale rispetto ad alternative più consolidate come il legno e l'acciaio. Per rispondere in modo approfondito, analizziamo e mettiamo a confronto questi tre materiali prendendo in considerazione diversi aspetti fondamentali: sostenibilità ambientale, durabilità, caratteristiche meccaniche, disponibilità e lavorabilità.

| | Pro | Contro |
|----------------|--|---|
| Bamboo | Risorsa altamente rinnovabile e sostenibile; Crescita rapida e assorbimento CO ₂ elevato; Leggero e flessibile; Eccellente resistenza specifica; Buona resistenza al fuoco e bassa conducibilità termica; Adatto a costruzioni manuali e prefabbricate semplici; | Durabilità naturale limitata, richiede trattamenti protettivi; Debole alle sollecitazioni di taglio; Mancanza di normative internazionali standard; Diffusione limitata nel mercato occidentale; |
| Legno | Sostenibile se proveniente da foreste gestite responsabilmente; Biodegradabile e rinnovabile; Buon rapporto resistenza/peso; Comportamento favorevole in caso di incendio; Facilmente lavorabile e prefabbricabile; Possibilità di riciclare o riutilizzare scarti; | Lunghi tempi di maturazione; Sensibilità all'umidità; Durabilità naturale limitata, richiede trattamenti protettivi; Resistenza meccanica inferiore rispetto a bamboo e acciaio; |
| Acciaio | Elevata resistenza meccanica e precisione costruttiva; Prefabbricazione e montaggio rapido; Completamente riciclabile senza perdita di qualità; | Alto impatto ambientale e consumo energetico elevato; Non rinnovabile; Vulnerabilità alla corrosione in ambienti umidi o marini; Alta conducibilità termica; |

Tabella 3. Pro e contro dei diversi materiali analizzati

Dall'analisi comparativa svolta, risulta evidente come ogni materiale considerato presenti vantaggi e limiti specifici in funzione del contesto di utilizzo. Il bamboo emerge come un materiale dalle straordinarie potenzialità, soprattutto sotto il profilo della sostenibilità ambientale e dalla relazione resistenza-densità, risultando particolarmente indicato per architetture leggere, temporanee o in aree con risorse limitate. Tuttavia, la sua piena affermazione nel panorama dell'edilizia contemporanea è ancora ostacolata da fattori normativi, culturali e tecnici, come la mancanza di standard internazionali e la necessità di trattamenti protettivi. Il legno, pur con prestazioni meccaniche inferiori rispetto all'acciaio e al bamboo, si conferma una soluzione equilibrata e consolidata, soprattutto grazie alla sua versatilità, alla facilità di lavorazione e alla crescente diffusione di tecnologie ingegneristiche avanzate. Rappresenta una scelta sostenibile se proveniente da fonti gestite responsabilmente, ma richiede attenzione nella progettazione per garantire durabilità e stabilità. L'acciaio, infine, si distingue per la sua eccezionale resistenza meccanica e per la precisione esecutiva che ne permette l'utilizzo nei progetti complessi. Tuttavia, il suo elevato impatto ambientale, sia in fase di produzione che di lavorazione, lo rende meno indicato in una prospettiva di architettura sostenibile, nonostante le ottime performance strutturali e la completa riciclabilità.

3

I trattamenti del bamboo



3.1 I trattamenti

Il bamboo come abbiamo già analizzato nel capitolo precedente, rappresenta una risorsa sostenibile per applicazioni strutturali e tecnologiche grazie alla sua rapida crescita, abbondanza e alle ottime proprietà meccaniche. Tuttavia, i suoi punti critici quali la durabilità e stabilità dimensionale sono fortemente limitate dalla presenza di amido, emicellulosa e lignina, che lo rendono vulnerabile agli attacchi biologici e ne riducono la resistenza sui lunghi periodi. Per ovviare a queste problematiche sono stati sviluppati diversi trattamenti fisici e chimici. In questo capitolo andremo ad analizzarne alcuni tra i più conosciuti e altri innovativi degli ultimi anni che puntano ad ovviare alle debolezze della pianta. A differenza dei metodi tradizionali che puntano alla rimozione delle componenti organiche, i trattamenti innovativi si basano su reazioni di esterificazione, reticolazione o funzionalizzazione superficiale che puntano a rendere il bamboo più stabile e durevole senza compromettere la sua sostenibilità. Nel complesso, l'insieme degli studi dimostra come la scelta dei trattamenti da applicare influenzzi le proprietà specifiche valorizzandone alcune in determinati casi a discapito di altre.

3.2 I trattamenti tradizionali

3.2.I La vaporizzazione

Il trattamento termico è sempre stato presente sin dall'antichità con varie metodologie. In passato attraverso l'essiccazione naturale all'aria aperta, un processo lento e influenzato dalle condizioni climatiche, in tempi moderni invece grazie allo sviluppo tecnologico e a metodi controllati si è arrivati ad un miglioramento della qualità dell'essiccazione con la vaporizzazione. Questa attraverso l'utilizzo di vapore saturo ad alta temperatura e pressione va a ridurre la formazione di crepe e difetti strutturali nel bamboo dovuti ad un'essiccazione troppo rapida e non supervisionata.

Il processo di vaporizzazione analizzato è composto da diverse fasi. Inizialmente, i culmi di bamboo vengono sottoposti a un pretrattamento in un serbatoio a pressione attraverso l'utilizzo di vapore saturo, successivamente vengono essiccati in una camera di essiccazione⁶⁵. Il trattamento principale prevede il riscaldamento del bamboo a 85°C e un'umidità relativa del 90% mantenuti per diversi intervalli temporali: 4 ore, 8 ore e 12 ore⁶⁵. Al termine di questa fase la temperatura è stata gradualmente aumentata, in base al ciclo che si è voluto analizzare dai 140°C sino ai 180°C, e una volta raggiunta un'umidità pari al 35%, corrispondente al punto di saturazione della fibra, viene effettuato un trattamento per ridurre il gradiente di umidità tra lo strato esterno e quello interno del culmo di bamboo. Una volta che l'umidità all'interno dei campioni cala al di sotto del 10%, essi vengono equalizzati per 8 ore. Infine, i culmi vengono rimossi dall'incubatrice al termine del processo di essiccazione, una volta che la temperatura scende al di sotto dei 30°C⁶⁵.

Una volta compreso il processo di vaporizzazione si è passati alla valutazione del trattamento. Durante questa fase la prima analisi è stata la verifica della qualità dell'essiccazione classificando lo stato dei culmi in cinque diversi gradi:

- Grado I assenza di crepe;
- Grado II piccole crepe con una larghezza inferiore a 0.5 mm e una lunghezza minore ai 3 cm;
- Grado III fessurazioni con una larghezza minore ai 0.5 mm e una lunghezza compresa tra i 3 e gli 8 cm;
- Grado IV nessuna coalescenza per fessurazione;
- Grado V coalescenza e spaccatura dovuta alla fessurazione.

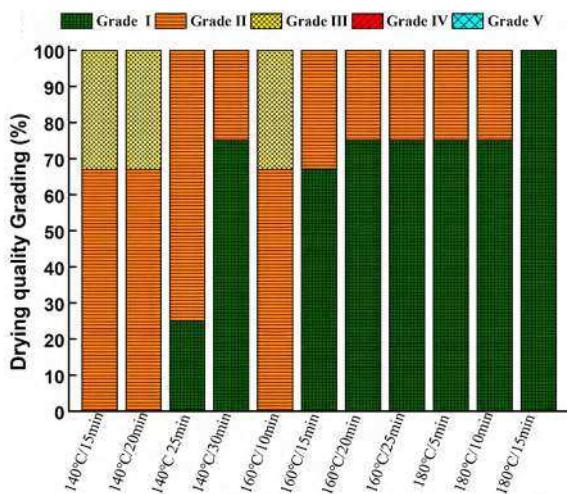


Immagine 54. Drying quality evaluation of the bamboo culms the control and pretreated samples, Data source: Effects of saturated steam pretreatment on the drying quality of moso bamboo culms (Li et al., Eur. J. Wood Prod. 77, 2020)

I culmi privi di trattamento al vapore mostrano fessurazioni frequenti e spaccature dovute alla rapidità dell'essiccazione, viceversa, i bamboo trattati attraverso vapore saturo hanno mostrato un efficace essiccazione del culmo con un grado di qualità sempre superiore al terzo. In particolare, tutti i culmi sottoposti al trattamento a vapore a 180°C per 15 minuti hanno raggiunto il Grado I, constatando così che la qualità dell'essiccazione diminuiva al diminuire della temperatura soprattutto al di sotto dei 160°C⁶⁵.

Le prove sulle caratteristiche meccaniche sono state focalizzate sulla resistenza a flessione mostrando, come da immagine 55, una tendenza alla diminuzione della resistenza del bamboo trattato a 180°C per 20 minuti del 12,7% rispetto al campione di controllo. Questa variazione è dovuta alla degradazione dell'emicellulosa e dei danni alla cellulosa cristallina intaccando le proprietà meccaniche del bamboo, elementi fondamentali per la resistenza del materiale⁶⁵.

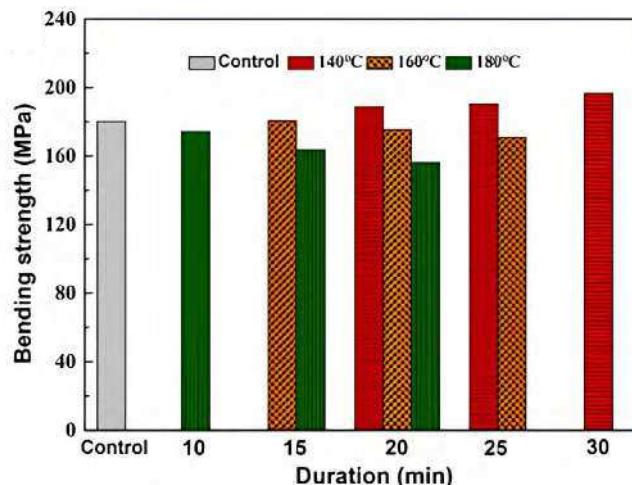


Immagine 55. Effect of saturated steam treatment on the physical and mechanical properties of bamboo culms: bending strength, Data source: Effects of saturated steam pretreatment on the drying quality of moso bamboo culms (Li et al., Eur. J. Wood Prod. 77, 2020)

In definitiva si può affermare che il trattamento termico attraverso vaporizzazione è una tecnica efficace per migliorare la qualità di essiccazione del bamboo, riducendo significativamente la formazione di fessurazione nel culmo. Dalla sperimentazione è risultato evidente che un controllo accurato di temperatura ed umidità si traduce in una migliore stabilità dimensionale. Viceversa, un trattamento intenso e non controllato può indurre alla degradazione delle proprietà meccaniche del bamboo.

3.2.II La lisciviazione

Il processo di lisciviazione rappresenta uno dei metodi tradizionali più antichi utilizzati nei villaggi rurali nella produzione di mobili, oggetti artigianali e strutture leggere. In passato tale pratica si basava sull'esperienza della popolazione locali, mentre oggi viene riprodotta in ambienti controllati. La tecnica si fonda sull'utilizzo dell'acqua corrente, che attraverso l'azione meccanica e batterica favorisce la dissoluzione e la rimozione delle sostanze idrosolubili contenute all'interno del bamboo, in particolare amidi e zuccheri, responsabili della sua maggiore vulnerabilità agli attacchi biologici.

Il processo di lisciviazione analizzato è stato applicato a bamboo coltivato e raccolto a tre anni d'età, sottoposto ad un trattamento tradizionale in acqua corrente per un periodo di trenta giorni senza alcun utilizzo di reagenti chimici o additivi. Durante l'immersione le sostanze idrosolubili presenti nel bamboo sono state rimosse. Al termine della prima fase, i culmi sono stati lasciati essiccare all'aria aperta fino al raggiungimento di un equilibrio igroscopico. In seguito per poterne valutare le proprietà fisiche i campioni hanno subito due differenti processi; i primi sono stati immersi in acqua di rubinetto a 23°C per una settimana prima di essere sottoposti ad essiccamiento in forno a 60°C per due mesi, il secondo gruppo è stato essiccato per una settimana nelle medesime condizioni e immersi in acqua di rubinetto per due mesi⁶⁶. Infine, dopo entrambe le procedure tutti i campioni sono stati essiccati a 103°C per ventiquattro ore, sino al raggiungimento della massa costante, secondo la norma ISO 22157:2019.

In seguito al trattamento di immersione il campione lisciviato ha assorbito una maggiore quantità d'acqua rispetto a quello non trattato, indicando che durante il trattamento amidi e zuccheri sono stati rimossi efficacemente attraverso dissoluzione determinando un nuovo percorso attraverso il floema e un numero maggiore di vuoti disponibili per l'acqua da occupare all'interno della struttura del bamboo, con conseguenti effetti sulle proprietà fisiche:

- Riduzione della densità di circa il 23%;
- Aumento dell'assorbimento d'acqua;
- Aumento del 16% dello spessore.

Dopo l'analisi appena enunciata è stata effettuata una spettroscopia FT-IR la quale è stata utilizzata per poter analizzare la composizione chimica studiando come il campione assorbe la luce infrarossa. Quando il bamboo è stato esposto alla radiazione le sue molecole, assorbendo l'energia a frequenze specifiche, mettono in evidenza le vibrazioni dei legami chimici presenti:

- A 3345 cm^{-1} dovuto alla presenza di numerosi legami idrogeno;
- A 2900 cm^{-1} dovuto alle catene idrocarburiche della cellulosa;
- A 1723 cm^{-1} dovuto alla presenza dell'emicellulosa;
- A 1603 e 1511 cm^{-1} dovuto alle vibrazioni degli anelli aromatici della lignina.

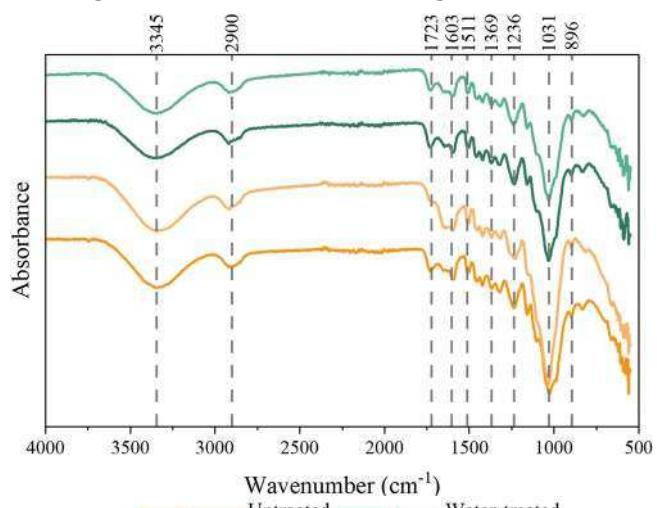


Immagine 56. Fourier transform infrared (FT-IR) results for untreated and water-treated bamboo, Data source: Physical, mechanical, chemical, and durability assessment of water leaching treatment of bamboo (L.M. do Amaral et al., *Advances in Bamboo Science* 5, 2023)

Tali segnali vanno ad indicare una variazione nella quantità relativa di cellulosa, emicellulosa, lignina, e dei numerosi legami idrogeno, fattori che contribuiscono a un miglior comportamento meccanico della matrice lignina-emicellulosa.

In seguito a questa analisi si è passati alla verifica delle proprietà e si è constatato che i campioni lisciati hanno portato ad una resistenza maggiore contro i funghi bianchi, ma al tempo hanno favorito l'attacco da parte delle ter-

miti. Per valutare la resistenza agli attacchi degli isotteri sono stati analizzate le perdite di massa e si è riscontrato che i campioni trattati con acqua hanno mostrato una perdita di massa maggiore rispetto a quelli non trattati⁶⁶. Questo è dovuto al fatto che la principale fonte di cibo delle termiti è la cellulosa; pertanto, la rimozione del contenuto di amido non ne ha migliorato la durabilità, bensì ha liberato lo spazio che ha portato a una degradazione più rapida, poiché le termiti hanno raggiunto più facilmente la loro fonte di cibo. Oltre le prove in laboratorio sono state effettuate anche prove sul campo condotte interrando i campioni, ma i risultati sono stati i medesimi, mostrando che i culmi di bamboo decadono entro l'anno confermando quindi che il trattamento di lisciviazione non era una protezione sufficiente contro l'attacco fungino per usi strutturali del bamboo.

Per quanto riguarda la resistenza meccanica analizzata è stata quella flessionale in cui sono stati osservati miglioramenti nel modulo di rotura (MOR) e nel modulo di elasticità (MOE) nei campioni trattati come mostra la tabella sottostante. MOR e MOE hanno mostrato aumenti rispettivamente di circa il 15% e il 20%. Ciò è correlato a un aumento dei legami idrogeno all'interno della struttura molecolare, poiché a questi è legato un migliore comportamento meccanico della matrice lignina-emicellulosa del bamboo.

Si può affermare a questo punto che il trattamento di lisciviazione in acqua corrente ha favorito la rimozione dell'amido incidendo sulla riduzione della densità, l'aumento dell'assorbimento d'acqua e l'aumento dello spessore dovuto alla maggiore quantità di spazio libero nella microstruttura rispetto al campione d'origine. Questi effetti, uniti alla riduzione della resistenza agli agenti biologici e al miglioramento delle proprietà meccaniche rendono questo trattamento utile anche per applicazioni strutturali anche se non sufficientemente efficiente sulla durabilità del materiale.

3.2.III La delignificazione

La delignificazione è un trattamento sviluppato negli anni Novanta con l'obiettivo di rimuovere la lignina attraverso processi chimici, per modificare la struttura microscopica e migliorarne alcune proprietà. Questo procedimento si basa sull'azione di reagenti ossidanti e alcalini che portano alla degradazione della lignina e dell'emicellulosa.

Nel trattamento analizzato il bamboo è stato sottoposto a tre metodologie differenti di delignificazione. Il primo, attraverso l'utilizzo dell'acido perossiformico, prevede la delignificazione del bamboo a 50°C per 12 ore con una soluzione di acido perossiformico. Successivamente i campioni sono stati neutralizzati con una soluzione di idrossido di sodio allo 0,5% in peso per 10 minuti, quindi il truciolo è stato lavato più volte in acqua deionizzata per rimuovere le sostanze chimiche residue. Il secondo metodo si basa sull'uso combinato di perossido di idrogeno e acido acetico, e prevede un processo per impregnare il truciolo in una soluzione dei due reagenti, seguito da un bagno d'acqua a 100°C per 6-8 ore e in seguito lavarlo con acqua deionizzata più volte per rimuovere le sostanze chimiche in eccesso. Il terzo metodo di tipo alcalino con solfato di sodio, prevede che il truciolo sia impregnato in una soluzione mista di idrossido di sodio e di solfato di sodio, a 80°C per 6-8 ore. In seguito alla rimozione della lignina tutti i campioni sono stati sbiancati con acqua ossigenata e lavati a più riprese con acqua deionizzata per rimuovere le sostanze chimiche residue⁶⁷. Successivamente i campioni sono poi stati sottoposti a tre diverse tecniche di essicazione al fine di confrontare l'influenza del metodo di asciugatura sulle proprietà del materiale. All'aria dove il bamboo è stato posto a temperatura ambiente per 24-48 ore; in stufa a 60°C per 6-8 ore; attraverso liofilizzazione dove i culmi sono stati congelati in frigorifero a -15°C per 24 ore, in seguito inseriti in un liofilizzatore per 24-48 ore.

Per valutare i cambiamenti chimici dei vari campioni è stata effettuata una spettroscopia FT-IR. I picchi più rilevanti sono:

- A 1602, 1511, 1459, 1423, 1243 cm⁻¹ dovuto alla degradazione della lignina;
- A 1737 e 1035 cm⁻¹ ci sono due comportamenti diversi per l'acido perossiformico e solfato di sodio alcalino vi è una degradazione parziale dell'emicellulosa, per l'acido acetico/perossido di idrogeno invece vi è un effetto molto più ridotto;
- A 1459 cm⁻¹ vi è un picco dovuto al movimento asimmetrico del gruppo CH₃;
- A 1243 cm⁻¹ vi è un picco dovuto ai legami C-O e anello aromatico del guaiacolo;
- A 1376, 1324, 1158, 895 cm⁻¹ subiscono leggere variazioni poiché la cellulosa rimane quasi completamente intatta;
- A 831 cm⁻¹ dovuto alla scomparsa dei legami C-H dei derivati del guaiacolo.

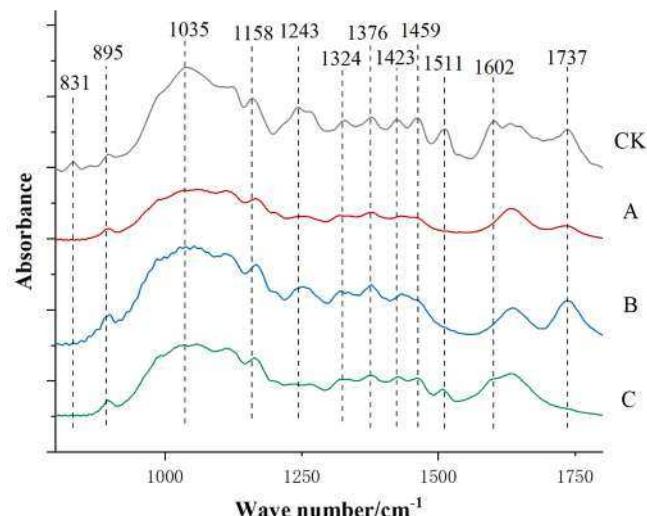


Immagine 57. FTIR diagram for bamboo fiber of natural bamboo (CK) and delignified bamboos (A, B, C), Data source: Effects of Different Delignification and Drying Methods on Fiber Properties of Moso Bamboo (Y. Bai et al., Eco-Friendly Supramolecular Polymeric Materials , 2022)

Tali segnali vanno ad indicare una diminuzione della lignina, e la degradazione dell'emicellulosa cosa che non avviene per la cellulosa che rimane quasi intaccata contribuendo a un miglior comportamento meccanico del bamboo.

Una volta completati i trattamenti e l'analisi chimica si è passati alla valutazione delle proprietà meccaniche. Sono state messe in relazione le varie casistiche rispetto al campione non trattato che possedeva una resistenza a trazione pari a 200 MPa⁶⁷. I campioni liofilizzati presentavano una pessima resistenza a trazione pari a 11-19 MPa, attribuibile alla rimozione della matrice che ha distrutto l'integrità della parete cellulare originale, determinando un gran numero di strutture interstiziali sulla superficie della fibra, riducendo così significativamente la resistenza alla trazione della fibra. I campioni trattati con essiccazione in stufa d'altro canto hanno mostrato un miglioramento in media del 21% nei loro valori di resistenza sino a 850-890 MPa⁶⁷. Per concludere i campioni con il trattamento all'aria anch'essi più prestazionali ma inferiori rispetto all'essiccazione questo perché presentano un contenuto di umidità più elevato il quale riduce la rigidità dell'emicellulosa e della lignina. Di conseguenza, la connessione tra le microfibrille e la matrice risultava allentata e, quando venivano applicate forze esterne sulla parete cellulare, si verificava un aumento della deformazione a trazione delle fibre, riducendo così la resistenza della parete cellulare.

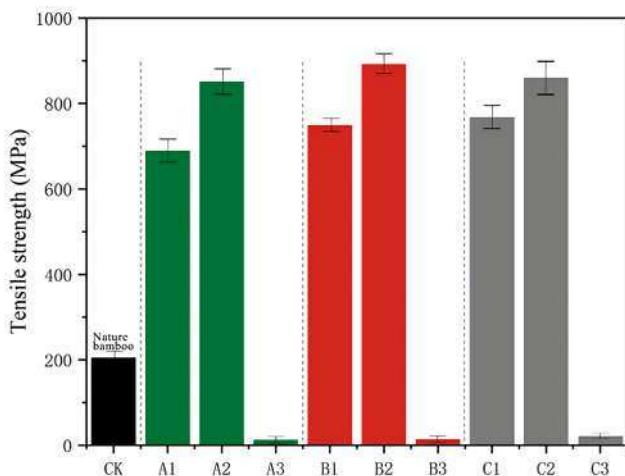


Immagine 58. Tensile strength of natural bamboo fibers (CK) and bamboo fibers treated with different delignification processes: peroxyformic acid (A), acetic acid/hydrogen peroxide (B), alkaline sodium sulfite (C) Numbers denote drying methods: 1) air drying, 2) in oven drying, 3) freeze drying, Data source: Effects of Different Delignification and Drying Methods on Fiber Properties of Moso Bamboo (Y. Bai et al., Eco-Friendly Supramolecular Polymeric Materials ,2022)

In seguito all'analisi comparativa degli effetti di tre processi di delignificazione e delle tre metodologie di essiccazione si può affermare che i diversi processi di delignificazione, ovvero acido perossiformico, acido acetico/perossido di idrogeno e solfato di sodio alcalino, hanno esercitato effetti evidenti sulla stabilità termica del bamboo, ma non si sono osservate differenze significative nelle proprietà meccaniche. In particolar modo il trattamento di liofilizzazione si è mostrato il meno efficace dal punto di vista della resistenza a trazione anche rispetto al campione non trattato, mentre l'essiccazione tramite stufa ha fornito i risultati migliori.

3.2.IV I trattamenti con oli

I trattamenti termici con l'impiego di oli rappresentano una tecnologia atta a migliorare le proprietà fisiche e biologiche del bamboo, combinando l'azione del calore con l'impregnazione di sostanze idrofobe. Questi metodi permettono la riduzione dell'assorbimento d'acqua, limitando il rigonfiamento dimensionale e aumentando la durabilità contro l'attacco di muffle e funghi⁶⁸.

Tra le diverse tipologie il trattamento con olio di metilsilicone analizzato prevede l'essiccazione dei campioni in forno a 105°C fino al raggiungimento di un peso costante. Successivamente i provini sono stati trasferiti e immersi in un bagno d'olio di metilsilicone riscaldato a diverse temperature 140°C, 160°C, 180°C e 200°C per vari tempi d'esposizione 2, 4 e 6 ore⁶⁹. Tale scelta ha permesso una comparazione tra i vari campioni in funzione delle modifiche fisiche e meccaniche del materiale.

Alla conclusione del trattamento, è stata analizzata la composizione chimica attraverso la spettroscopia FT-IR. I principali picchi sono stati:

- A 3420 cm^{-1} dovuto alla degradazione della cellulosa;
- A 2924 cm^{-1} dovuto all'alterazione dal gruppo metilico;
- A 1732 cm^{-1} dovuto alla degradazione sopra i 160°C del gruppo acetilico dell'emicellulosa;
- A 895 cm^{-1} dovuto alla riduzione del contenuto di cellulosa.

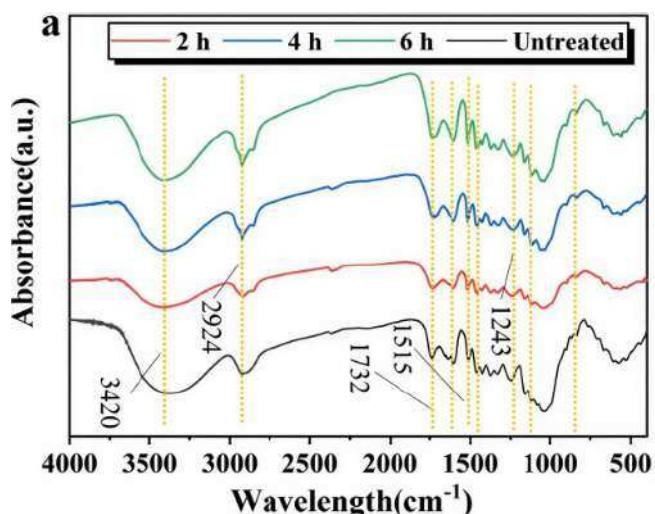


Immagine 59. FTIR spectra of untreated sample and the treated samples treated at 200 °C for varied time (2, 4 and 6 h). Data source: The effect of oil heat treatment on biological, mechanical and physical properties of bamboo (X. Hao et al., J Wood Sci 67, 2021)

Tali segnali vanno ad indicare una diminuzione della cellulosa, dell'emicellulosa e una riduzione dei legami idrogeno, con conseguente calo dell'igroscopicità e della capacità del materiale di trattenere umidità.

Per poter valutare l'efficacia dell'intervento sono state analizzate le caratteristiche meccaniche e si è constatato che in condizioni di trattamento termico a 160°C per 2 ore, la resistenza alla compressione parallela raggiungeva un massimo di 109.52 MPa, pari ad un incremento del 18,63% rispetto a quello dei campioni non trattati. Questo miglioramento è attribuibile alla parziale degradazione dell'emicellulosa, che comporta un maggiore contatto tra le microfibrille e un irrigidimento della matrice lignina-emicellulosa. Viceversa, a temperature superiori e tempi di esposizione prolungati, la degradazione della cellulosa e la riduzione del grado di polimerizzazione comportano un indebolimento graduale delle proprietà meccaniche⁶⁹. La resistenza flessionale e il modulo di elasticità quando la temperatura del trattamento termico con olio è inferiore ai 140°C diminuisce con l'aumentare del tempo di trattamento termico, contrariamente quando la temperatura è superiore la resistenza alla flessione aumenta. Si può quindi affermare che in base al tipo di sforzo che dovrà sostenere il bamboo si andrà ad applicare il trattamento con temperature diverse⁶⁹.

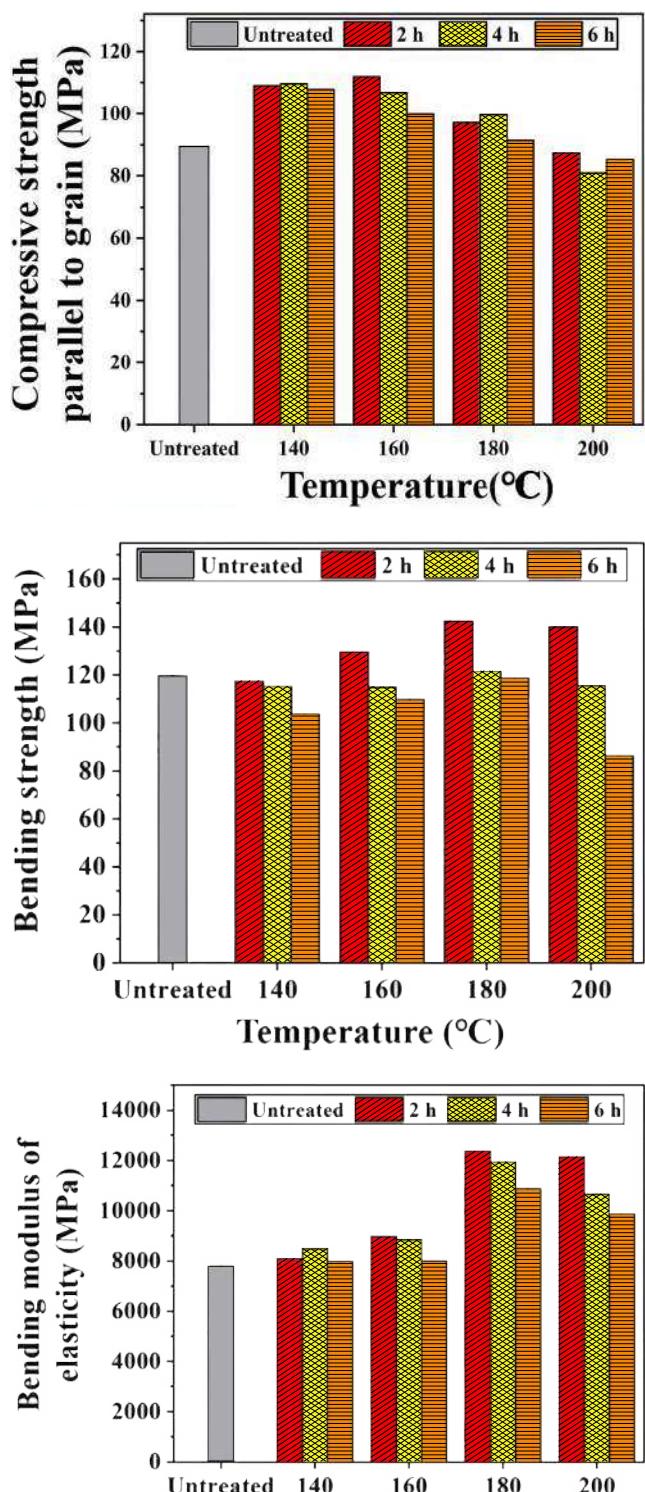


Immagine 60. The compressive strength parallel to grain of untreated sample and the treated samples at varied temperature (140, 160, 180 and 200 °C) for varied time (2, 4 and 6 h), The bending strength and the MOE of untreated sample and the treated samples at varied temperature (140, 160, 180 and 200 °C) for varied time (2, 4 and 6 h), Data source: The effect of oil heat treatment on biological, mechanical and physical properties of bamboo (X. Hao et al., J Wood Sci 67, 2021)

Infine, è stata valutata la resistenza ai funghi del marciume bruno quali *Aspergillus niger*, *Penicillium citrinum* e *Trichoderma viride*. I campioni non trattati hanno mostrato un'infezione totale entro sei giorni, mentre quelli trattati a 140°C presentavano solo un parziale effetto antimuffa, con infezione a partire dal quarto giorno. Quando la temperatura aumentava a 160°C, l'efficacia dell'intervento aumentava e diventa ottimale oltre i 180°C: dopo 30 giorni, i campioni trattati a 200°C per 6 ore mostravano un tasso d'infezione limitato al 29%, con un'efficienza di controllo pari al 92%. In tali condizioni, la superficie del bamboo risultava quasi completamente priva di ife fungine⁶⁹.

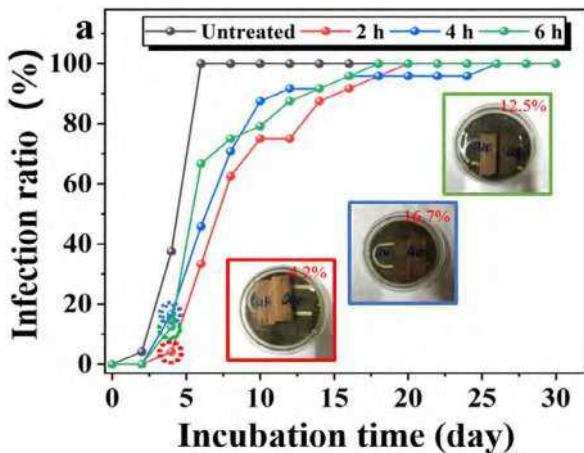


Immagine 61a. The infection ratio of untreated and oil heat treated samples with three mixed fungi 140 °C, Data source: The effect of oil heat treatment on biological, mechanical and physical properties of bamboo (X. Hao et al., J Wood Sci 67,2021)

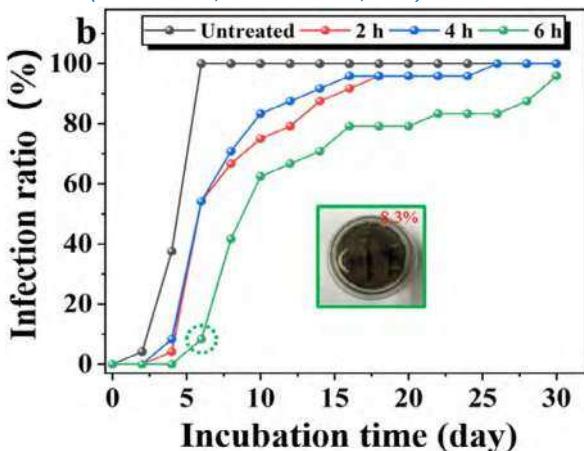


Immagine 61b. The infection ratio of untreated and oil heat treated samples with three mixed fungi 160 °C, Data source: The effect of oil heat treatment on biological, mechanical and physical properties of bamboo (X. Hao et al., J Wood Sci 67,2021)

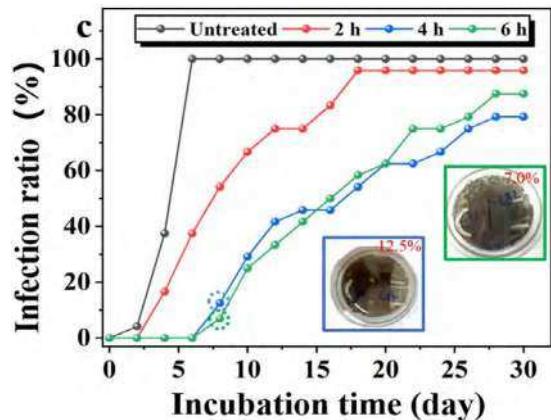


Immagine 61c. The infection ratio of untreated and oil heat treated samples with three mixed fungi 180 °C, Data source: The effect of oil heat treatment on biological, mechanical and physical properties of bamboo (X. Hao et al., J Wood Sci 67,2021)

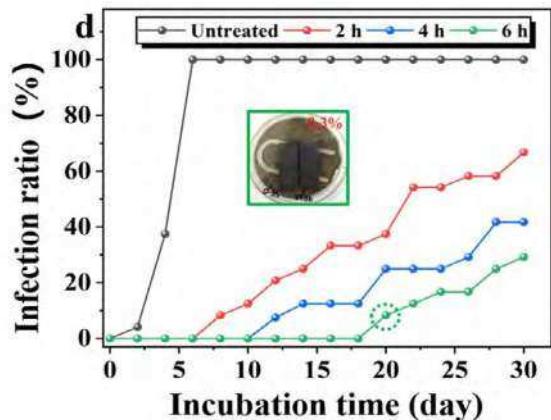


Immagine 61d. The infection ratio of untreated and oil heat treated samples with three mixed fungi 200 °C, Data source: The effect of oil heat treatment on biological, mechanical and physical properties of bamboo (X. Hao et al., J Wood Sci 67,2021)

In conclusione, il bamboo riscaldato con olio di metilsilicone ha mostrato una modifica chimica e fisica proporzionale alla temperatura e alla durata del processo. Un esempio ne è il trattamento termico a 200°C per 6 ore dove si osserva la scomparsa dei granuli di amido all'interno del lume cellulare parenchimale e il contenuto di cellulosa ed emicellulosa diminuisce gradualmente, mentre il contenuto relativo di lignina aumenta. Di conseguenza, la bagnabilità superficiale diminuisce a causa delle variazioni dei gruppi funzionali superficiali, e la resistenza alla decomposizione e le proprietà antimuffa aumentano notevolmente. Si può quindi affermare che il trattamento rappresenta una soluzione per migliorare la durabilità del materiale a patto di calibrare i parametri termici in funzione delle prestazioni desiderate.

3.2.V I trattamenti alcalini

I trattamenti alcalini rappresentano uno dei metodi più diffusi per modificare la struttura chimica e incrementare le proprietà del bamboo. L'azione a base di idrossido di sodio agisce principalmente sulla rimozione parziale di emicellulosa e lignina, semplificando la matrice della parete cellulare e modificandone la porosità. Tuttavia, l'efficacia del trattamento dipende fortemente dalla concentrazione della soluzione e dalla temperatura del processo, come vedremo successivamente.

Nel presente studio, i campioni, in seguito al taglio, sono stati lasciati essiccare all'aria aperta sino a quando il contenuto di umidità non sarà compreso tra l'8 e il 12%. I frammenti sono stati quindi immersi in una soluzione di idrossido di sodio al 5% a varie temperature (40°C, 60°C e 80°C) con un bagno d'acqua per una durata di 4 ore. Al termine del trattamento, i campioni sono stati accuratamente lavati con acqua fino al raggiungimento della neutralità e successivamente essiccati in forno a 50°C per 8 ore⁷⁰.

L'osservazione morfologica ha evidenziato che durante il trattamento le cellule parenchimatiche collassavano quando trattate con alcoli a diverse temperature formando una struttura molto più densa rispetto al materiale di riferimento. Le cellule parenchimatiche del bamboo non trattato presentavano un'ampia cavità cellulare, contenente numerose particelle di amido, ma collassavano dopo il trattamento alcalino, in maniera sempre più marcata all'aumentare della temperatura. Quando le temperature erano inferiori ai 60°C la struttura presentava ancora delle cavità tra cellule parenchimatiche adiacenti⁷⁰, cosa che non avveniva quando le temperature superavano la soglia dei 60°C generando non solo una struttura più densa, ma la larghezza, lo spessore e il peso delle scaglie diminuivano.

Le misurazioni dimensionali hanno confermato:

- La larghezza delle scaglie esterne e interne è diminuita rispettivamente del 30,7% e del 43,4% quando trattate con una soluzione di idrossido di sodio a 80°C;
- Lo spessore delle scaglie esterne e interne è diminuito maggiormente a 40°C e 60°C, rispettivamente del 20,0% e del 32,5%;
- La densità delle scaglie esterne e interne trattate a 40°C è aumentata rispettivamente del 45,6% e dell'88,3% rispetto a quelle non trattate.

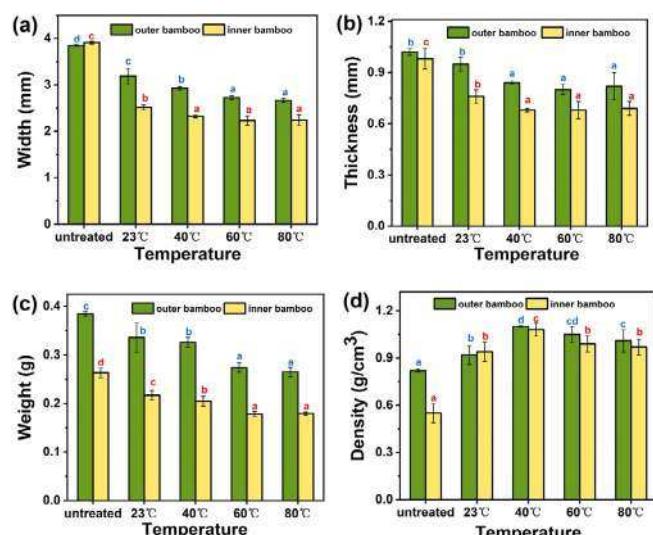


Immagine 62. Changes in dimension and morphology of bamboo slivers after alkali treatment at different temperatures. a Width; b thickness; c weight; d density, Data source: Bamboo slivers with high strength and toughness prepared by alkali treatment at a proper temperature (J. Wu et al., J Wood Sci 69,2023)

In seguito al trattamento si è analizzata la composizione chimica attraverso la spettroscopia FT-IR dove si evidenziano i picchi:

- A 1730 cm⁻¹ dovuti allo stiramento nei gruppi acetile e carbossilici di cellulosa e lignina;
- A 1593 cm⁻¹, 1509 cm⁻¹ e 1460 cm⁻¹ dovuti allo scheletro aromatico dell'anello benzenico;
- A 1238 cm⁻¹ dovuti alle vibrazioni di stiramento dei legami dell'emicellulosa.

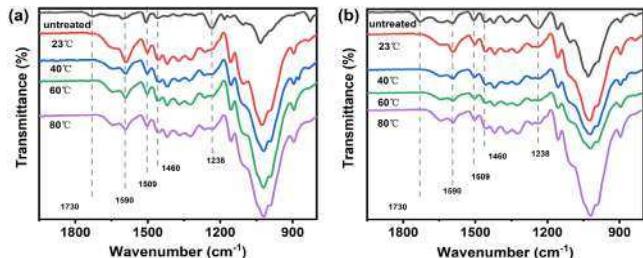


Immagine 63. FTIR spectra of alkali-treated bamboo slivers with different temperatures. a Outer bamboo slivers; b inner bamboo slivers. Data source: Bamboo slivers with high strength and toughness prepared by alkali treatment at a proper temperature (J. Wu et al., J Wood Sci 69, 2023)

Tali segnali vanno ad indicare una riduzione della lignina e dell'emicellulosa, che indebolisce i legami aromatici e favorisce la separazione delle fibre rendendo la struttura più porosa e compatta.

Le prove meccaniche hanno evidenziato il miglioramento generale delle proprietà grazie alla nuova struttura più compatta. La prova di trazione, eseguita secondo la norma cinese GB/T 15780-1995, ha mostrato un incremento della resistenza rispettivamente dell'86,6% per le scaglie esterne trattate a 60°C e del 132% per quelle interne trattate a 40°C. La prova di flessione, invece, è stata realizzata attraverso il bloccaggio di entrambe le estremità nel mandrino fino alla rottura del campione, ha confermato un aumento significativo del modulo elastico a 80°C delle scaglie esterne e interne rispettivamente del 75.1% e del 41.1% rispetto ai campioni non trattati⁷⁰.

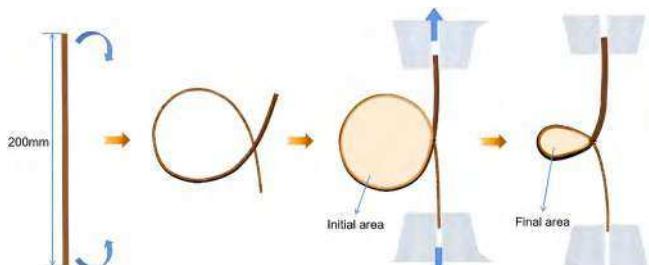


Immagine 64. Schematic diagram of bending test. Data source: Bamboo slivers with high strength and toughness prepared by alkali treatment at a proper temperature (J. Wu et al., J Wood Sci 69, 2023)

Il comportamento flessionale variava in funzione della temperatura: quando inferiori a 60°C le scaglie mantenevano buona flessibilità e potevano essere piegate senza rottura, cosa che non avveniva quando le temperature superavano questa soglia dove alcune fibre subivano uno strappo localizzato. Si è constatato che le schegge di bamboo esterne non trattate avevano una frattura duttile se allungate sino a frattura, mentre quelle interne avevano un comportamento fragile. Questo comportamento diverso è dovuto a un numero maggiore di fibre nelle schegge esterne rispetto a quelle interne. In seguito al trattamento le fratture esterne hanno mantenuto un comportamento duttile, al contrario di quelle interne che presentavano una frattura fragile più grave a causa dell'eccessiva rimozione di lignina ed emicellulosa indebolendo così le pareti cellulari delle fibre e degli strati intercellulari⁷⁰.

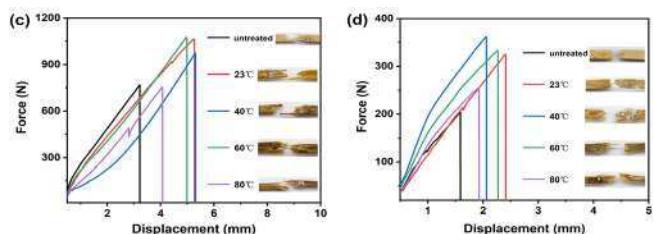


Immagine 65. Tensile properties of bamboo slivers treated with NaOH at different temperatures; c displacement-load curve and fracture form of outer bamboo slivers; d displacement load curve and fracture form of inner bamboo slivers. Data source: Bamboo slivers with high strength and toughness prepared by alkali treatment at a proper temperature (J. Wu et al., J Wood Sci 69, 2023)

In conclusione, il trattamento alcalino modifica la microstruttura del bamboo, densificando la matrice parenchimatica e migliorando significativamente le proprietà di trazione e flessione, con incrementi medi fino al 100% rispetto ai campioni di controllo. Tuttavia, temperature eccessive possono compromettere la tenacità del materiale, rendendo il processo più adatto per applicazioni strutturali rigide piuttosto che per elementi sottoposti a forti deformazioni. In funzione dei risultati, si può quindi affermare che questo trattamento potrebbe essere una valida soluzione per incrementare le prestazioni meccaniche del materiale destinato ad usi ingegneristici.

3.3 I trattamenti innovativi

3.3.1 L'acetilazione

L'acetilazione è uno dei trattamenti maggiormente approfonditi nella modifica del bamboo. I suoi processi consistono nell'introduzione di gruppi acetile per ridurre la disponibilità dei gruppi idrossilici liberi responsabili dell'assorbimento d'acqua, ottenendo una minore igeroscopicità, una riduzione del rigonfiamento e un incremento della resistenza agli agenti biologici, con possibili effetti migliorativi anche sulle proprietà meccaniche del materiale.

Nel primo studio analizzato, il bamboo è stato in primis essiccato all'ombra per quattro settimane, in seguito, immerso in soluzione al 5% di acido acetico e cloruro di zinco. Dopodiché i campioni sono stati sottoposti a un processo di lisciviazione di 10 giorni, in conformità alle istruzioni AWPA E10:16, e immersi in acqua distillata per misurare l'assorbimento d'acqua e il rigonfiamento in larghezza e spessore. L'impatto del trattamento è stato misurato confrontando le variazioni percentuali di peso e dimensioni rispetto ai valori iniziali⁷¹.

In seguito al trattamento si è analizzata la composizione chimica attraverso la spettroscopia FT-IR dove si evidenziano i picchi:

- A 3344 cm^{-1} dovuto alla formazione di acetato di zinco;
- A 2917 cm^{-1} e 1323 cm^{-1} dovuto allo stiramento -OH;
- A 1733 cm^{-1} dovuto alla presenza di nuovi legami esterei;
- A 1383 cm^{-1} dovuto allo stiramento del CH nella cellulosa e nell'emicellulosa.

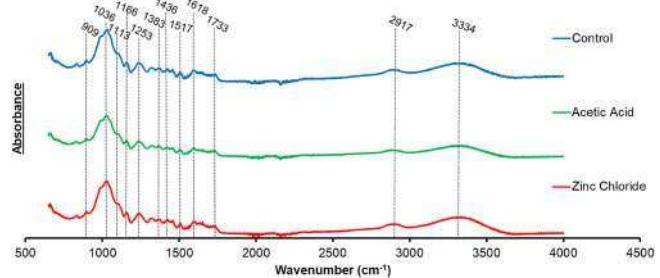


Immagine 66. FTIR Spectrum of Bamboo for all analyzed conditions, Data source: Evaluating the potential of chemically modified bamboo for sustainable and green construction (M. Tariq et al., J of Building Engineering 86, 2024)

Questi segnali vanno a confermare l'effettiva acetilazione delle fibre cellulose e la modifica chimica della parete cellulare, comportando un minor assorbimento d'acqua e una maggiore stabilità dimensionale del materiale.

Le prove di assorbimento d'acqua hanno mostrato, nelle prime 48 ore, un incremento rapido pari al 12,5%, 8,5% e 10,8% per le diverse condizioni di prova. Tuttavia, dopo le 240 ore di immersione, i campioni trattati con acido acetico hanno registrato una riduzione del 13% dell'assorbimento rispetto al campione di riferimento, mentre quelli trattati con cloruro di zinco hanno evidenziato una diminuzione più contenuta, solo il 3,5% rispetto al riferimento. I risultati indicano quindi che il trattamento acido migliora sensibilmente l'idrofobicità del bamboo, limitando la capacità di rigonfiamento⁷¹.

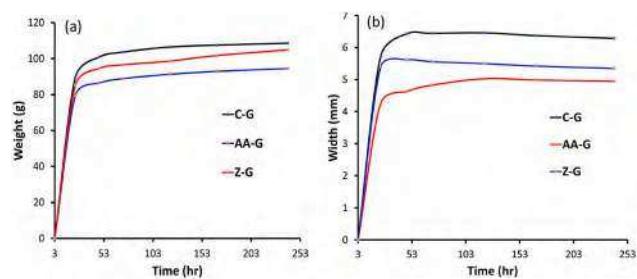


Immagine 67. Variations in (a) Water absorption and (b) Swelling potential of bamboo samples, Data source: Evaluating the potential of chemically modified bamboo for sustainable and green construction (M. Tariq et al., J of Building Engineering 86, 2024)

Per valutarne l'idoneità come materiale da costruzione sostenibile, sono state verificate le sue proprietà meccaniche, in particolare resistenza a flessione, trazione, compressione e taglio. I test sono stati condotti seguendo la normativa ISO 22157 e dividendo i campioni in tre sezioni del culmo (inferiore, centrale e superiore), in modo da comprendere le variazioni lungo tutta la pianta. In particolare, la resistenza a flessione è aumentata in modo significativo, soprattutto nella sezione superiore, dove si registra un incremento di oltre il 50% rispetto ai campioni di riferimento. Anche la resistenza a trazione trae beneficio dal trattamento acido, con valori più alti in tutte le sezioni del culmo e un miglioramento maggiormente marcato nella parte superiore⁷¹. Questo comportamento è attribuibile alla reazione chimica tra acido acetico e i gruppi funzionali della parete cellulare, che porta a una modifica strutturale capace di rafforzare le caratteristiche del materiale. Viceversa, per la resistenza a compressione dove i trattamenti non portano vantaggi uniformi, l'acido acetico riduce le prestazioni nelle sezioni inferiore e centrale, mentre nella sezione superiore si osserva un miglioramento. Il cloruro di zinco, al contrario, tende a ridurre la resistenza a compressione in quasi tutte le condizioni, risultando meno favorevole degli altri trattamenti. Il comportamento al taglio mette in primo piano ancora una volta l'efficacia dell'acido acetico, che aumenta sensibilmente la resistenza, mentre i campioni trattati con cloruro di zinco mostrano risultati variabili, con incrementi in alcune condizioni ma riduzioni in altre⁷¹.

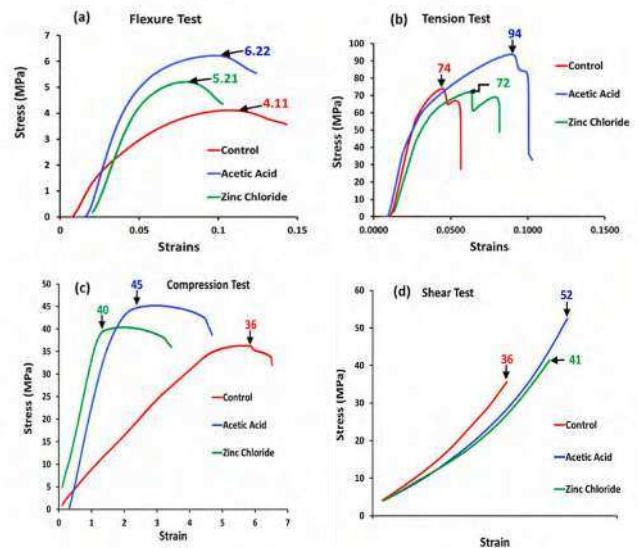


Immagine 68. Stress-strain response of all treated bamboo samples in flexure (a), tension (b), compression (c), and shear (d) from bottom section, Data source: *Evaluating the potential of chemically modified bamboo for sustainable and green construction (M. Tariq et al., J of Building Engineering 86, 2024)*

Oltre al trattamento appena descritto è stato analizzato anche l'acetilazione attraverso l'acetato di vinile (VA), seguito da una polimerizzazione in situ con metil metacrilato (MMA). I campioni sono stati posti in un reattore in acciaio inossidabile dotato di pompa a vuoto e a pressione, con soluzione di VA/dimetilformammide e 0,5% di carbonato di potassio come catalizzatore⁷². Dopo un pretrattamento in vuoto a 0,09 MPa per 12 ore, i campioni sono stati riscaldati a 110°C per 6 ore; quindi, immersi in acqua corrente per 48 ore per rimuovere reagenti e sottoprodoti. Successivamente è stata effettuata la polimerizzazione del composito MMA, iniettando nel reattore una soluzione di MMA, etanolo e acqua deionizzata, mantenuta sotto cicli di vuoto/pressione per 12 ore. I campioni sono stati poi avvolti in alluminio, conservati per 24 ore e infine essiccati a 80°C per 6 ore, seguiti da essiccamiento sottovuoto a 105°C fino a massa costante⁷².

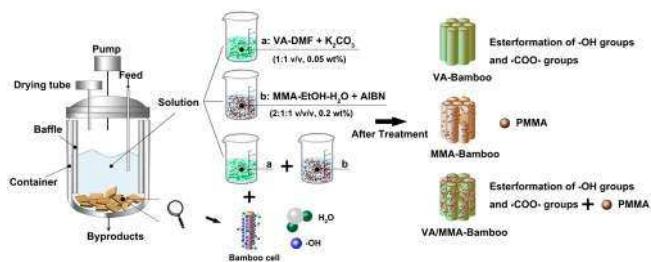


Immagine 69. Schematic flow chart of bamboo acetylation, in situ polymerization of MMA on bamboo, and combined treatment of acetylation and in situ polymerization, Data source: Combined Chemical Modification of Bamboo Material Prepared Using Vinyl Acetate and Methyl Methacrylate: Dimensional Stability, Chemical Structure, and Dynamic Mechanical Properties (S. Huang et al., Polymers 11, 2019)

L'analisi FT-IR dei campioni acetilati con VA e MMA ha mostrato picchi a:

- A 3405 cm⁻¹ dovuto all'esterificazione dei gruppi -OH;
- A 2955 cm⁻¹ dovuto alla presenza dei gruppi metilici;
- A 1745 cm⁻¹ dovuto alla presenza dei gruppi carbonilici;
- A 1242 cm⁻¹ dovuto alla presenza di gruppi estere.

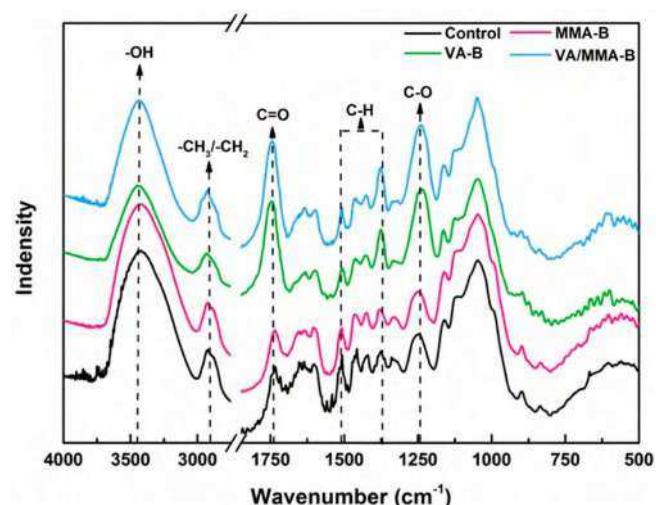


Immagine 70. FTIR analysis of raw and pretreated bamboo, Data source: Combined Chemical Modification of Bamboo Material Prepared Using Vinyl Acetate and Methyl Methacrylate: Dimensional Stability, Chemical Structure, and Dynamic Mechanical Properties (S. Huang et al., Polymers 11, 2019)

3.3.II I trattamenti con acido citrico e boro

Questi segnali vanno a confermare l'effettiva formazione di nuovi gruppi funzionali che confermano le reazioni di esterificazione e polimerizzazione avvenute durante il processo. Ciò va ad indicare un miglioramento dell'idrofobicità, della resistenza e della durabilità del materiale. In seguito alla valutazione chimica si sono analizzate le proprietà meccaniche attraverso il modulo di immagazzinamento dinamico utilizzato per comprendere esaminare la capacità portante di un materiale composito. Il valore del bamboo grezzo era pari a 15 MPa, mentre nei campioni VA/MMA è aumentato fino a 17 MPa, mostrando un miglioramento delle prestazioni meccaniche. Il risultato è dovuto all'aumento della concentrazione di gruppi acetile e metile, che riducono la polarità dei gruppi idrossilici, favorendo un maggiore avvicinamento delle catene cellulose e un incremento della rigidità strutturale⁷².

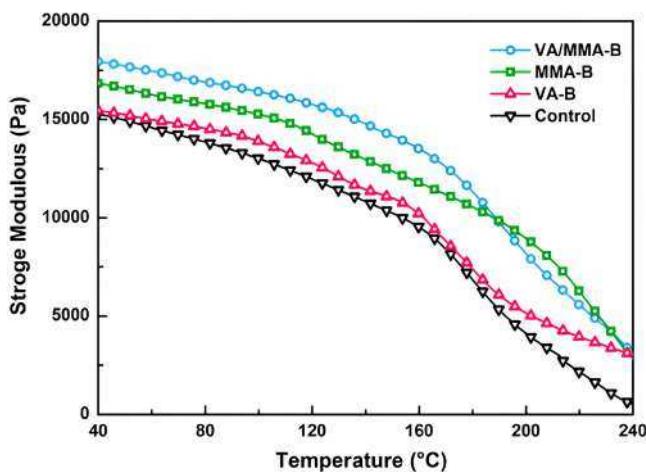


Immagine 71. Storage modulus, loss modulus, Data source: Combined Chemical Modification of Bamboo Material Prepared Using Vinyl Acetate and Methyl Methacrylate: Dimensional Stability, Chemical Structure, and Dynamic Mechanical Properties (S. Huang et al., Polymers 11, 2019)

Da questa ricerca si sono tratte le seguenti conclusioni: il trattamento con acido acetico e il trattamento combinato con VA e MMA migliorano significativamente la durabilità, le proprietà fisico chimiche e strutturali, rappresentando un approccio ecologico per migliorare le prestazioni del bamboo, rendendolo un'opzione valida per diverse applicazioni edilizie.

I trattamenti a base di acido citrico e boro rappresentano una novità recente e sostenibile per il miglioramento delle proprietà del bamboo. L'acido citrico, grazie alla presenza di gruppi carbossilici reattivi della parete cellulare, agisce come agente reticolante, riducendo l'assorbimento d'acqua e incrementando la durabilità del materiale. L'aggiunta di composti a base di boro, i quali svolgono il ruolo di biocidi naturali, contribuiscono al miglioramento della resistenza del bamboo contro funghi e insetti xilofagi.

Nel presente studio, i culmi sono stati inizialmente essiccati all'aria a 103°C fino al raggiungimento di un peso costante, successivamente spostati in una camera climatica a 25°C e 70% di umidità relativa per 240 ore⁷³. Questo pretrattamento ha permesso di stabilizzare il contenuto d'umidità e di monitorare la variazione di peso. In seguito, i campioni di bamboo presentavano un contenuto di umidità di circa il 10%, quindi sono stati trattati in un recipiente a pressione controllata secondo il seguente programma:

- Vuoto iniziale senza soluzione per 15 minuti;
- Vuoto con la soluzione per 60 min;
- Pressione di 14.1 kgf/cm² per 180 min;
- Vuoto finale per 15 min.

Terminata la fase di impregnazione i campioni sono stati essiccati a temperatura ambiente per 48 ore, in forno a 60°C per 24 ore e infine polimerizzati a 120°C per 48 ore per favorire la reazione tra acido citrico e bamboo. Il riscaldamento dei culmi è stato previsto per permettere la disidratazione dell'acido citrico, generando anidride citrica, i cui gruppi carbossilici reagendo con gli idrossili della matrice formano legami esterei. In parallelo al trattamento con acido citrico si è analizzata una casistica con una combinazione di acido borico e borato disodico decaidrato che andavano a combinarsi formando disodio ottaborato tetraidrato (DOT Na₂B₈O₁₃·4H₂O).

Anche questo campione è stato sottoposto agli stessi protocolli di condizionamento e stagionatura descritti in precedenza, ma non sono stati sottoposti ai cicli di trattamento sottovuoto/pressione⁷³. In seguito al trattamento si è analizzata la composizione chimica attraverso la spettroscopia FT-IR dove si evidenziano i picchi:

- A 2900 cm^{-1} e 1317 cm^{-1} dovuti all'esterificazione;
- A 1723 cm^{-1} dovuti allo stiramento dell'acido acetilico dell'emicellulosa;
- A 1603 cm^{-1} dovuti alla vibrazione degli anelli aromatici della lignina;
- A 1369 cm^{-1} dovuti allo stiramento dei legami C-H della cellulosa ed emicellulosa;
- A 896 cm^{-1} dovuti alle vibrazioni di deformazione della cellulosa.

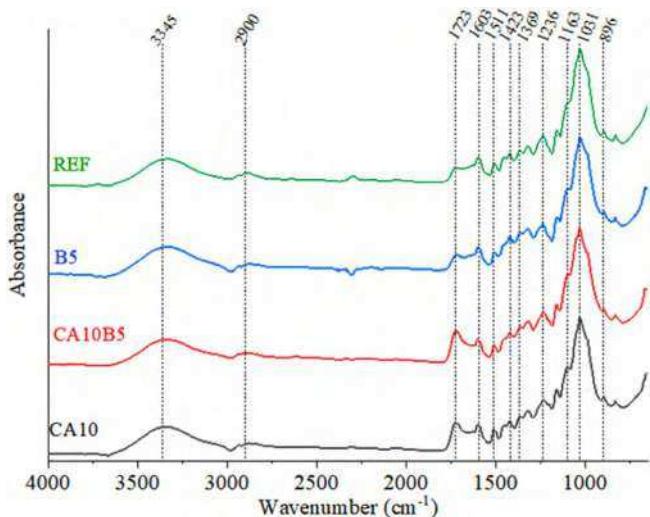


Immagine 72. FTIR spectra of all the analysed conditions. The main functional groups' wavenumbers are identified, Data source: Chemical modification of *Dendrocalamus asper* bamboo with citric acid and boron compounds: Effects on the physical-chemical, mechanical and thermal properties (C. Gauss et al., J. of Cleaner Production 279, 2021)

Questi segnali vanno a confermare le reazioni di esterificazione che modificano selettivamente l'emicellulosa e i gruppi ossidrilici superficiali della cellulosa, migliorando l'impermeabilità, la stabilità e la durabilità del bamboo.

La modifica chimica con acido citrico ha confermato la riduzione dei siti attivi per l'assorbimento d'umidità, comportando una diminuzione del contenuto di umidità all'equilibrio dei materiali lignocellulosici. Effetto che si nota nell'immagine⁷³, in cui sono presentate le curve di assorbimento di tutti i campioni. Anche dopo oltre 500 ore di condizionamento, il contenuto di umidità di equilibrio non è stato raggiunto per tutte le condizioni analizzate, suggerendo un collasso dei micropori cellulari dovuto ai cicli di essicramento e alla reticolazione chimica, portando inoltre a una riduzione del tasso di assorbimento dell'umidità⁷³.

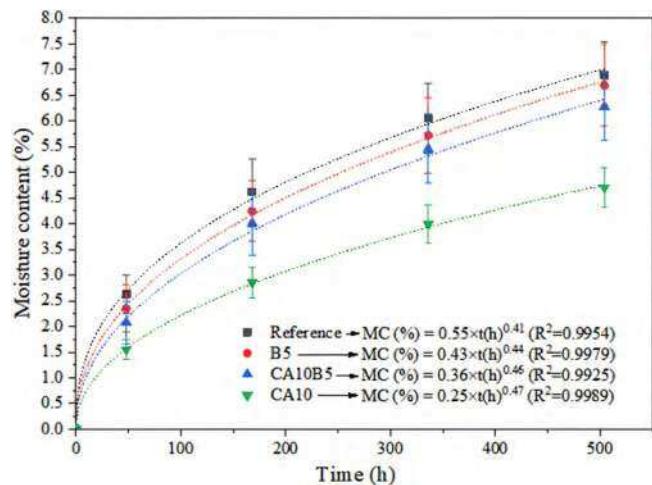


Immagine 73. Moisture content change in relation to time in a climatic chamber at $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ and 70% RH. In this plot, the error bars are the standard deviations, Data source: Chemical modification of *Dendrocalamus asper* bamboo with citric acid and boron compounds: Effects on the physical-chemical, mechanical and thermal properties (C. Gauss et al., J. of Cleaner Production 279, 2021)

3.3.III I trattamenti al plasma

Per valutare le proprietà meccaniche del bamboo in seguito al trattamento sono state eseguite prove a trazione, compressione, taglio e flessione a tre punti. Esse hanno evidenziato un aumento del 18% della resistenza a compressione e del modulo di elasticità, mentre, ha avuto un effetto deleterio sugli sforzi a taglio del 19% ma soprattutto una diminuzione del 29% a trazione rispetto ai campioni di riferimento. Viceversa, i campioni trattati con il composto DOT hanno evidenziato un aumento generale di tutte le proprietà analizzate, rispettivamente del 14% nel modulo di rottura, 10% nel modulo elastico, 22% nel limite di proporzionalità e 16% nell'energia specifica⁷³.

Nel complesso, la modifica chimica attraverso l'acido citrico delle proprietà fisico-meccaniche e della composizione chimica ha portato a un notevole miglioramento dell'assorbimento d'acqua, dell'assorbimento di umidità e delle proprietà di rigonfiamento rispetto ai campioni di riferimento. Tuttavia, sebbene siano state osservate maggiori resistenze a flessione e a compressione, il trattamento risulta meno adatto per applicazioni soggette a trazione e taglio, dove si registra una decrescita. L'aggiunta dei composti borici offre una migliore soluzione, rendendo questo un approccio ecocompatibile per la conservazione e il potenziamento del materiale in applicazioni edilizie.

I trattamenti al plasma a basse temperature hanno guadagnato un interesse sempre maggiore poiché permettono l'attivazione delle reazioni chimiche in condizioni ambientali relativamente miti⁷⁴. L'esposizione al plasma genera specie altamente reattive, come ioni, radicali e fotoni, che interagiscono con la superficie del materiale modificandone la composizione chimica. Gli effetti principali di questa tecnologia applicata al bamboo includono:

- L'irruvidimento superficiale, che aumenta l'area specifica e la bagnabilità controllata;
- Utilizzo di gas diversi quali ossigeno, azoto, argon e idrogeno che introducono gruppi funzionali sulla superficie del culmo quali l'idrossile (- OH), l'ammino (- NH₂), il carbosilile (- COOH) e la ftalimmide (- CONH);
- La creazione di una struttura reticolata attraverso il bombardamento della superficie del materiale con particelle ad alta energia la quale determina un miglioramento delle proprietà meccaniche;
- La rimozione parziale di impurità a basso peso molecolare attraverso l'azione ossidante degli ioni attivi⁷⁴.

In questo studio sono state selezionate sezioni di bamboo essiccate e in seguito sottoposte a un trattamento al plasma utilizzando, come gas di lavoro, l'ossigeno e l'azoto a potenze di 800, 1000 e 1200 W per tempi rispettivamente di 5, 10 e 15 s, con una portata di gas di 1,5 l/min. Successivamente, è stata preparata una soluzione di polidimetilsilossano ed etanolo anidro in cui sono stati immersi i campioni trattati al plasma, con concentrazioni all'1%, 3%, 5% e 10% con tempi di macerazione di 10, 20, 40 e 60 minuti. Al termine dell'immersione le sezioni sono state essiccate in forno sino a completa asciugatura⁷⁵.



Immagine 74. Test flow chart of cold-temperature plasma and PDMS solution treatments performed on the Moso bamboo surface, Data source: Research on the Hydrophobic Performance of Bamboo Surface Treated via Coordinated Plasma and PDMS Solution Treatments (Z. Ma et al., J. of Renewable Materials 13, 2025)

In particolare, i trattamenti al plasma sono stati eseguiti con:

- Una portata di O_2 di 1,5 l/min per 10 secondi con una concentrazione di soluzione del 3% per 10 minuti;
- Una portata di N_2 di 1,5 l/min per 10 secondi con una concentrazione di soluzione del 5% per 10 minuti.

Le prove di bagnabilità superficiale hanno evidenziato che l'angolo di contatto aumenta progressivamente con il tempo di macerazione, raggiungendo valori massimi di $122,35^\circ$ e $42,36^\circ$ per l'ossigeno e $123,66^\circ$ e $52,91^\circ$ per l'azoto dopo 60 minuti di trattamento⁷⁵. Ciò conferma che il plasma, combinato con l'applicazione del PDMS, conferisce alla superficie del bamboo una marcata idrofobicità.

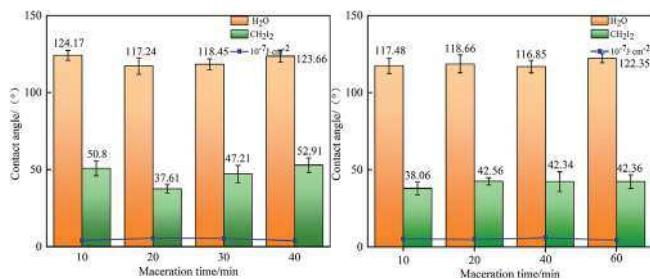


Immagine 75. Impact of different maceration times of PDMS solution on the contact angle and surface energy of the O_2 and N_2 plasma-treated Moso bamboo surface, Data source: Research on the Hydrophobic Performance of Bamboo Surface Treated via Coordinated Plasma and PDMS Solution Treatments (Z. Ma et al., J. of Renewable Materials 13, 2025)

Per comprendere le modifiche chimiche è stata effettuata una spettroscopia FT-IR per capire come è cambiata la struttura chimica del bamboo dopo i trattamenti, mostrando dei picchi:

- A 1738 cm^{-1} dovuto alla vibrazione del gruppo del gruppo C=O legato alla lignina;
- A 1249 cm^{-1} dovuto alla vibrazione del gruppo acetile per la presenza dell'emicellulosa;
- A 1160 cm^{-1} e 1033 cm^{-1} dovute alle vibrazioni dei legami C-O e C-O-C della cellulosa;
- A 2911 cm^{-1} dovuto alla vibrazione del legame C-H dovuto alla presenza del PDMS;
- A 1738 cm^{-1} dovuto all'aumento dei gruppi carbonilici;
- A $795\text{--}793\text{ cm}^{-1}$ dovuto alla formazione dei legami Si-O-Si.

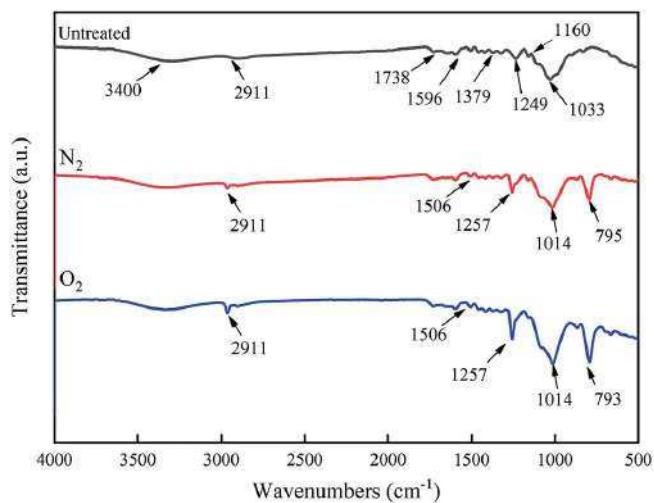


Immagine 76. FTIR spectra of Moso bamboo surface before and after plasma and PDMS solution treatments, Data source: Research on the Hydrophobic Performance of Bamboo Surface Treated via Coordinated Plasma and PDMS Solution Treatments (Z. Ma et al., J. of Renewable Materials 13, 2025)

Queste variazioni confermano che il trattamento al plasma ha modificato la superficie del bamboo introducendo nuovi gruppi funzionali e favorendo l'adesione del rivestimento a base di PDMS.

3.3.IV La furfurilazione

Gli effetti principali dei trattamenti appena descritti portano quindi ad un miglioramento dell'idrofobicità superficiale e alla formazione di un reticolo stabile sulla parete esterna. Questo metodo oltre alla semplicità e alla sua non tossicità consente di migliorare le proprietà del materiale rendendolo più resistente all'umidità e potenzialmente più durevole. Tali caratteristiche lo rendono adatto ad applicazioni future anche in ambiti industriali per lo sviluppo di superfici funzionalizzate e a bassa bagnabilità.

La furfurilazione è un trattamento di modifica chimica basato sull'impregnazione del materiale con una soluzione che include monomeri FA (alcol furfurilico), acqua, catalizzatori e stabilizzanti, che penetrano la parete cellulare del bamboo. Durante la successiva fase di polimerizzazione i monomeri generano una resina termoindurente a temperature elevate, che, legandosi ai componenti lignocellulosici, aumenta la stabilità dimensionale, la resistenza biologica del materiale e riduce l'assorbimento d'acqua. Questo processo conferisce al materiale una maggiore durabilità nei confronti di funghi e insetti xilofagi, rendendolo più adatto ad applicazioni in ambienti umidi o esterni⁷⁶.

Nel presente studio, il bamboo è stato in primis essiccato in forno a 103°C e immesso in un ambiente di controllo dell'umidità a 23°C e 65% umidità relativa per un periodo non inferiore a trenta giorni prima del trattamento. In contemporanea sono state preparate miscele di alcol furfurilico FA a varie concentrazioni 15%, 30%, 50% o 70%, aggiungendo borato di sodio al 2%, un catalizzatore di acido organico misto all'1,75% e acqua deionizzata⁷⁶. Il bamboo è stato impregnato tramite due processi distinti:

- Ciclo sottovuoto per 15 minuti seguito da impregnazione a pressione di 1,5 MPa per 1 ora e 40 ore di immersione nella miscela di FA e acqua deionizzata a pressione atmosferica;
- Immersione diretta nella miscela di FA e acqua deionizzata per 42 ore a temperatura ambiente.

Entrambi i campioni sono stati poi essiccati avvolgendoli in un foglio di alluminio a 105°C per 3 ore, per poter ridurre al minimo l'evaporazione di FA durante la successiva fase di polimerizzazione. Il tasso di assorbimento della miscela variava tra l'87% (per immersione) e il 55% (per sottovuoto), mostrando un andamento crescente fino al 30% di concentrazione e poi decrescente fino al 70%, a causa della maggiore viscosità e minore permeabilità della soluzione concentrata. Durante le fasi di stagionatura ed essiccamiento, le cellule del parenchima hanno subito un parziale collasso, dovuto alla rimozione di emicellulosa da parte del catalizzatore acido e alla successiva contrazione termica, che ha contribuito a densificare la microstruttura del materiale⁷⁶.

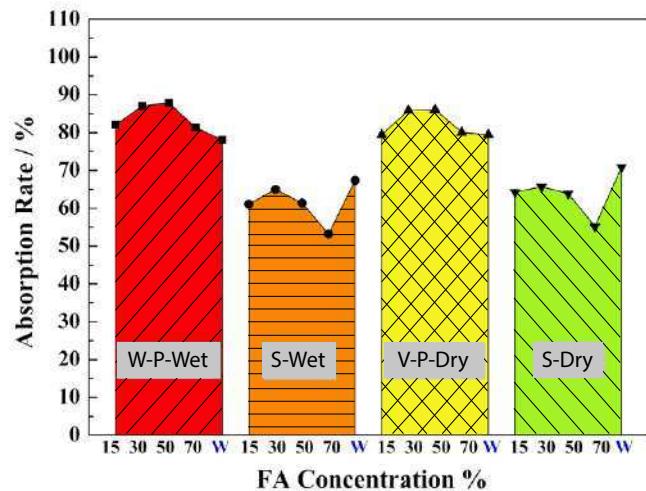
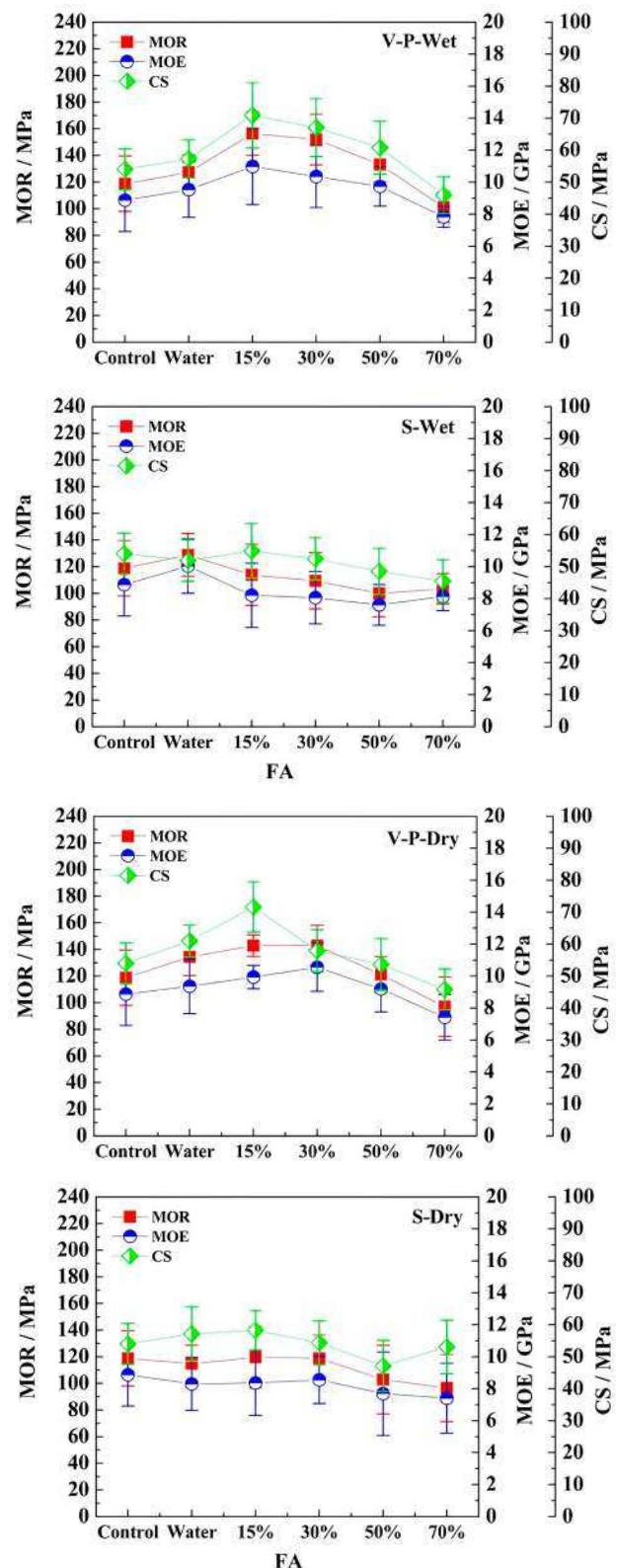


Immagine 77. Absorption rate of bamboo furfurylated by different processes. V-P-Wet: samples furfurylated through vacuum pressure impregnation followed by wet-curing; S-Wet: samples furfurylated through soaking impregnation followed by wet-curing; V-P-Dry: samples furfurylated through vacuum pressure impregnation followed by dry-curing; S-Dry: samples furfurylated through soaking impregnation followed by dry-curing, Data source: *The Influence of Impregnation Methods and Curing Conditions on the Physical and Multiscale Mechanical Properties of Furfurylated Bamboo* (L. Wanju et al., *Forests* 14, 2023)

Le proprietà meccaniche sono state testate secondo gli standard nazionali cinesi, GB/T 15780-1995. I risultati hanno mostrato che nelle impregnazioni sottovuoto trattati con il 15% di FA si ha avuto un incremento del 32%, 24% e 31% per il modulo di rottura, il modulo di elasticità e della resistenza a compressione parallela, rispetto al bamboo non trattato. Quando la concentrazione di FA è aumentata al 30%, gli stessi parametri sono aumentati rispettivamente del 28%, 17% e 24%, mentre al 50% di concentrazione i valori sono aumentati rispettivamente del 12%, 10% e 13% rispetto al controllo. In sintesi, si è constatato che, all'aumentare della concentrazione di FA la resistenza meccanica è inversamente proporzionale, infatti quando la concentrazione ha raggiunto il 70%, è stata osservata una diminuzione del 15%, del 12% e del 15% rispetto al controllo⁷⁶.



Imagine 78. The MOR, MOE, and CS of the control and bamboo furfurylated by different processes, Data source: The Influence of Impregnation Methods and Curing Conditions on the Physical and Multiscale Mechanical Properties of Furfurylated Bamboo (L. Wanju et al., Forests 14, 2023)

Oltre le prove meccaniche, è stata valutata la resistenza biologica, seguendo il metodo descritto nello Standard Nazionale Cinese GB/T 18261-2013 utilizzando *Aspergillus niger* V.Tiegh, *Penicillium citrinum* Thom, *Trichoderma viride* Pers.ex Fr e *Botryodiplodia theobromae* Pat. I campioni di bamboo sono stati posizionati e coltivati in un'incubatrice a 25°C e 85% di umidità relativa per 4 settimane. La crescita della muffa su ciascun campione è stata valutata visivamente: minore è il valore di infezione, maggiore è l'efficacia della prevenzione. I culmi non trattati hanno mostrato scarsa resistenza a tutte e quattro le muffe dopo un mese di infezione, sebbene siano state notate diverse velocità di infezione⁷⁷. Viceversa, il bamboo furfurilato ha mostrato eccellenti proprietà antimuffa, i funghi *P. citrinum*, *T. viride* e *B. theobromae* non sono stati in grado di infettare affatto i campioni furfurilati, mentre *A. niger* è riuscito a infettare solo leggermente le superfici terminali. Il significativo miglioramento della resistenza alla muffa è attribuito a una combinazione di fattori, tra cui il blocco del canale di ingresso della muffa, la rimozione di sostanze nutritive durante fase di impregnazione, la riduzione del contenuto di umidità e la superficie acida correlata al catalizzatore applicato⁷⁷.

In sintesi, la furfurilazione ha determinato un miglioramento significativo della stabilità dimensionale e un'eccellente resistenza biologica, pur non modificando in modo sostanziale le proprietà meccaniche rispetto al materiale di riferimento. Le prestazioni ottimali si osservano a concentrazioni moderate (15-30% di FA), dove sono state bilanciate con un efficace impregnazione e una limitata degradazione della parete cellulare. Si tratta dunque di una tecnologia promettente per incrementare la durabilità naturale del bamboo laddove la resistenza meccanica non rappresenta il requisito principale.

3.3.V I trattamenti con nano particelle

L'ultimo trattamento che si è andato ad analizzare è il trattamento con nanoparticelle metalliche, il quale attraverso la modifica della superficie e della microstruttura del bamboo punta a migliorarne le proprietà fisico-mecccaniche e biologiche. Le nanoparticelle di ossidi metallici sono in grado di interagire con la parete cellulare lignocellulosa, aumentando l'idrofobicità e conferendo una marcata resistenza antimicrobica⁷⁸. L'efficacia del trattamento dipende dalla concentrazione delle nanoparticelle e dalle condizioni di impregnazione, come vedremo di seguito nel caso studio analizzato. In particolare, in questo studio sono state utilizzate nanoparticelle d'argento, note per le loro proprietà che agiscono contro insetti, batteri e funghi influenzandone il metabolismo. Questo trattamento utilizza un metodo di impregnazione per l'autoassemblaggio di Cur-AgrGONS (nanocomposito composto da nanofogli di ossido di grafene ridotto carichi con argento e funzionalizzati con curcumina) sulla superficie del bamboo, attraverso un processo idrotermale a secco per immersione⁷⁸.

L'ossido di grafene GO è stato sintetizzato mediante il metodo Hummer, che prevede l'ossidazione della grafite in ambiente acido. Nello specifico, le scaglie di grafite sono state continuamente mescolate in acido solforico concentrato per due ore mantenendo la temperatura al di sotto di 20°C; successivamente è stato aggiunto permanganato di potassio (KMnO₄) e la reazione è proseguita per un'ora a 35°C⁷⁸. In seguito, è stata aggiunta acqua distillata e perossido di idrogeno al 30%. La sospensione bruno scuro ottenuta è stata centrifugata a 10.000 rpm per 15 minuti, lavata ripetutamente con acido cloridrico al 5% e infine con acqua distillata fino al raggiungimento di un pH neutro. Una volta preparato il GO, i blocchi di bamboo sono stati immersi in 50 mL di soluzione colloidale di Cur-AgrGONS e sottoposti a cinque cicli di impregnazione attraverso il processo idrotermale a secco per immersione. I prodotti finali sono stati

risciacquati con acqua deionizzata per rimuovere i nanofogli non legati. I campioni sono stati quindi asciugati a 50°C per 12 ore, in modo da eliminare completamente l'umidità residua⁷⁸.

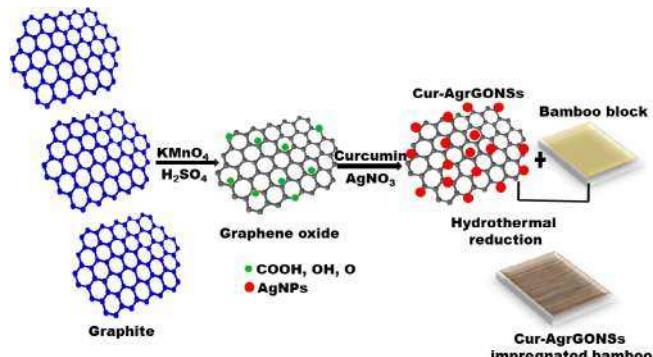


Immagine 79. Graphic abstract of chemical processes, Data source: Surface Functionalization of Bamboo with Silver-Reduced Graphene Oxide Nanosheets to Improve Hydrophobicity and Mold Resistance (D. Balakrishnan et al., Coatings 12, 2022)

In seguito al trattamento si è analizzata la composizione chimica attraverso la spettroscopia FT-IR, dove si sono evidenziati i picchi:

- A 3125 e 1589 cm⁻¹ dovuti a stiramenti dei legami C-C;
- A 1514 cm⁻¹ dovuti ai gruppi funzionali osidrilici;
- A 1024 cm⁻¹ dovuti agli stiramenti C-O-C e C-O.

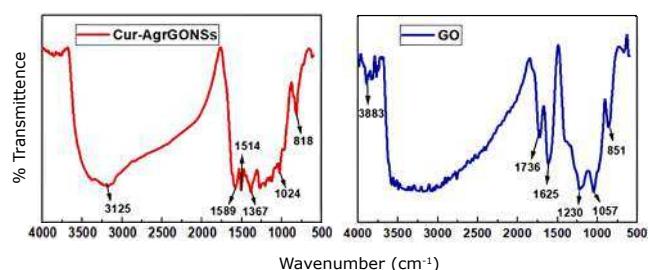


Immagine 80. FTIR spectroscopy of GO and Cur-AgGO nanosheets, Data source: Surface Functionalization of Bamboo with Silver-Reduced Graphene Oxide Nanosheets to Improve Hydrophobicity and Mold Resistance (D. Balakrishnan et al., Coatings 12, 2022)

Questi segnali confermano la presenza di gruppi funzionali ossidati e la formazione di legami tra GO, argento e la matrice lignocellulosa, che testimoniano l'efficace integrazione del nanocomposito all'interno della struttura del bamboo.

L'efficienza antifungina del materiale modificato è stata valutata attraverso l'inibizione della crescita del micelio, mediante l'infusione diretta di CurAgrGONS in terreno di agardestrosio di patata. *Penicillium funiculosum* e *Trichoderma afroharzianum* sono stati coltivati in terreno per 5 giorni a 28°C. Dopo 5 giorni di incubazione, le spore ottenute sono state raccolte e mantenute sotto luce per 5 giorni con agitazione moderata per ottenere la sospensione dei micro-conidi, in seguito, le piastre sono state incubate per 7 giorni a 25°C. I risultati hanno mostrato una notevole inibizione della crescita miceliale nei campioni contenenti CurAgrGONS rispetto ai campioni non trattati⁷⁸.

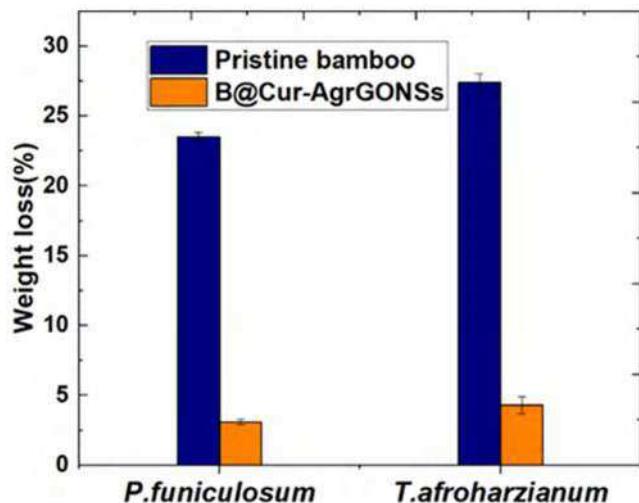


Immagine 81. Average weight loss of pristine bamboo and B@Cur AgrGONs, Data source: Surface Functionalization of Bamboo with Silver-Reduced Graphene Oxide Nanosheets to Improve Hydrophobicity and Mold Resistance (D. Balakrishnan et al., Coatings 12, 2022)

Oltre il test antifungino, è stato eseguito un test di resistenza alla muffa della durata di 30 giorni, confrontando campioni trattati e non trattati. Il tempo di incubazione consente alle muffe di maturare e produrre le spore, facilitandone così l'identificazione. La Figura 82 mostra le proprietà di resistenza alla muffa dei materiali prima e dopo l'incorporazione del Cur-AgrGONS. Il bamboo privo di trattamenti non ha mostrato alcun tipo di resistenza ai fitopatogeni e le muffe sono cresciute e hanno ricoperto l'intera superficie a causa dell'elevato contenuto di zuccheri e amido. Al contrario, i campioni che hanno subito il trattamento mostrano una resistenza parziale e una crescita della muffa ridotta con un'infezione inferiore del 20% dopo un mese di esposizione, mentre nelle prime due settimane non hanno mostrato alcuna crescita del micelio, indicando un'elevata efficacia preventiva⁷⁸.

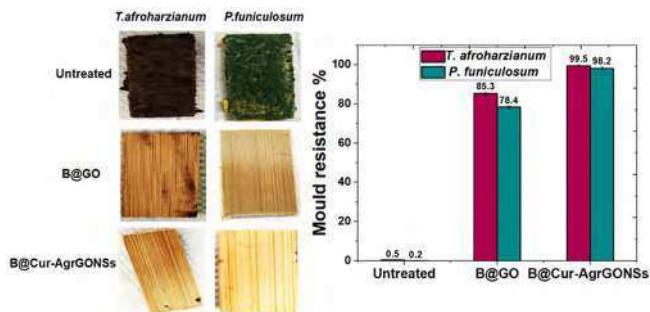


Immagine 82. Mold resistance performance of pristine bamboo and bamboo impregnated with Cur-AgrGO nanosheets, Data source: Surface Functionalization of Bamboo with Silver-Reduced Graphene Oxide Nanosheets to Improve Hydrophobicity and Mold Resistance (D. Balakrishnan et al., Coatings 12, 2022)

In conclusione, l'ultima ricerca sull'applicazione di nanoparticelle di argento e ossido di grafene funzionalizzate con curcumina ha dimostrato di migliorare significativamente la resistenza alle muffe e durabilità. La sinergia tra GO e AgNPs favorisce la formazione di una barriera fisico-chimica in grado di limitare la penetrazione dei microrganismi e di prolungare la vita utile del materiale. L'utilizzo delle nanoparticelle rappresenta una promettente innovazione, favorevole per applicazioni sostenibili in campo edilizio e per la protezione a lungo termine del bamboo da degradazione biologica e ambientale.

3.4 Il confronto

Dall'analisi dei vari trattamenti eseguiti sul bamboo emergono approcci differenti, ciascuno con i propri vantaggi e limiti, che ne influenzano le possibili applicazioni in base al contesto. In generale, tutti i processi hanno l'obiettivo comune di migliorare la durabilità, la stabilità dimensionale e le proprietà meccaniche del materiale.

In conclusione, nessun trattamento risulta superiore all'altro, la scelta ottimale è influenzata dallo scopo applicativo. I trattamenti idrofobici e termici si adattano meglio a impieghi esterni; quelli chimici e alcalini puntano a migliorare la resistenza meccanica; mentre le tecniche nanotecnologiche e al plasma rappresentano un'evoluzione futura verso soluzioni sostenibili, mirate e a basso impatto ambientale. L'approccio più promettente potrebbe consistere nella combinazione di diversi trattamenti, integrando le loro proprietà per ottenere un bamboo strutturalmente stabile, durevole e compatibile con i criteri della bioedilizia moderna.

| Trattamento | Vantaggi | Svantaggi |
|------------------------------------|---|--|
| Lisciviazione | Metodo naturale e sostenibile; Miglior resistenza ai funghi; Aumento della flessibilità e della coesione delle fibre; | Riduzione della densità; Aumento della porosità; Vulnerabilità alle termiti; Durabilità limitata in ambienti esterni; |
| Delignificazione | Maggiore uniformità e reattività della matrice; Rimozione controllata della lignina; | Rimozione eccessiva di lignina porta a fragilità; Riduzione delle resistenze meccaniche; Impatto ambientale dovuto all'uso di reagenti aggressivi; |
| Trattamento termico in olio | Elevata idrofobicità; Riduzione dell'assorbimento d'acqua e del rigonfiamento; Resistenza a muffe e funghi; | A temperature elevate degrado della cellulosa; Perdita di resistenza meccanica; Effetto variabile con la durata del trattamento; |
| Trattamento al plasma | Tecnologia non tossica; Introduce gruppi funzionali idrofobici; Migliora l'adesione di rivestimenti e resine; Non altera la struttura interna; | Effetto limitato agli strati superficiali; Ridotta durabilità nel tempo; |
| Acetilazione | Riduce l'igroscopicità; Migliora resistenza a flessione e trazione; Aumenta la stabilità dimensionale; Migliora durabilità biologica; | Uso di reagenti chimici; Riduzione parziale della duttilità; Difficile applicazione su larga scala; |
| Acido citrico e boro | Trattamento ecologico e a basso impatto; Buona resistenza a compressione e flessione; Effetto biocida naturale; Ridotto assorbimento d'acqua; | Riduzione della resistenza a trazione e taglio; Fragilità in applicazioni strutturali; |
| Trattamento alcalino | Incremento della densità e coesione delle fibre; Miglioramento resistenze di trazione e flessione; | Rimozione eccessiva di lignina porta a fragilità interna; Perdita di duttilità; |
| Furfurilazione | Eccellente stabilità dimensionale; Elevata resistenza biologica a muffe e funghi; Durabilità prolungata; | Incrementi meccanici modesti; Eccessiva concentrazione di FA riduce la penetrazione e indebolisce la struttura; |
| Nanoparticelle | Elevata idrofobicità; Alta resistenza antimicrobica e antimuffa; Barriera protettiva superficiale; Sostenibilità; | Effetto prevalentemente superficiale; |

Tabella 4. Vantaggi e svantaggi dei diversi trattamenti analizzati

04



Il caso studio: la Cina del Sud

4.1 L'analisi del contesto emissivo

Tra le regioni maggiormente esposte all'escalation dei rischi climatici analizzati durante il primo capitolo, l'Asia occupa un ruolo di primo piano, a causa di una combinazione di fattori strutturali, ambientali, demografici ed economici che concorrono ad amplificarne la vulnerabilità. Negli ultimi decenni, la Repubblica Popolare Cinese si è affermata come il principale emettitore globale di gas serra⁷⁹, giocando un ruolo determinante nell'incremento delle concentrazioni atmosferiche di anidride carbonica e di altri inquinanti climalteranti⁴.

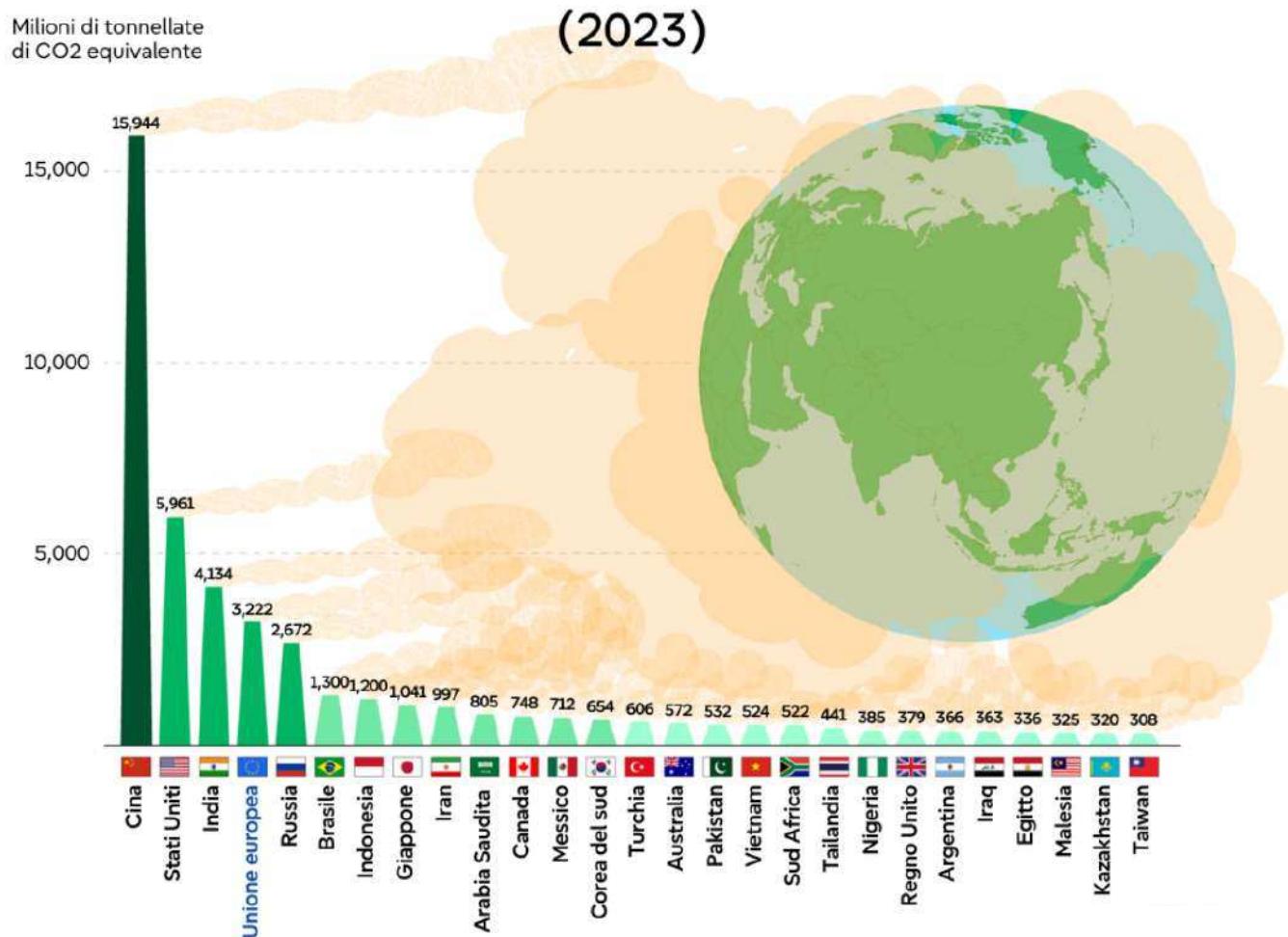


Immagine 83. Emissioni totali di gas serra per paese dell'UE nel 2023, Data source: Parlamento europeo, su dati EDGAR

Tale primato è il risultato di un modello di sviluppo economico fondato su un'elevata intensità energetica e sull'impiego predominante di combustibili fossili, in particolare il carbone, che ancora nel 2023 ha coperto oltre il 55% del fabbisogno energetico primario nazionale¹⁴, con l'approvazione di oltre 100 GW di nuova capacità installata da centrali termoelettriche a carbone³. Questo incremento, senza precedenti a livello internazionale, si colloca in netto contrasto con gli impegni climatici assunti dalla Cina sul piano globale, come il raggiungimento del picco delle emissioni di CO₂ entro il 2030 e la neutralità carbonica entro il 2060⁷⁹. La Cina è oggi responsabile di oltre il 30% delle emissioni globali di CO₂, una quota che supera quella di qualunque altra Nazione e la rende centrale per il successo degli sforzi internazionali di mitigazione climatica. Nonostante la progressiva diffusione delle fonti rinnovabili, la struttura energetica cinese mantiene tuttora una dipendenza strutturale dal carbone, che incide in maniera sostanziale sul profilo emissivo del Paese¹⁴.

-  Operating
-  Construction

Immagine 84. Global Coal Plant Tracker in China, Data source: Global Energy Monitor

Parallelamente lo Stato cinese ha consolidato la propria posizione di leadership nella produzione di tecnologie energetiche a basse emissioni, tra cui pannelli solari, turbine eoliche, batterie agli ioni di litio e veicoli elettrici. Le politiche industriali mirate e gli ingenti investimenti strategici hanno consentito un'espansione senza precedenti delle capacità installate di energie rinnovabili, raggiungendo numeri senza precedenti, con oltre 600 GW di solare fotovoltaico e circa 400 GW di eolico¹⁴. Tuttavia, l'effettiva integrazione di queste fonti nella matrice energetica nazionale è ostacolata da vincoli infrastrutturali rilevanti³. Le principali aree di generazione rinnovabile, infatti sono localizzate nelle regioni orientali e settentrionali, distanti dai principali centri di consumo della fascia costiera orientale, causando ricorrenti fenomeni di curtailment, ovvero la riduzione o la perdita di energia elettrica prodotta, che non può essere immessa nella rete, principalmente a causa dell'insufficiente capacità della rete di trasmissione ad alta tensione.

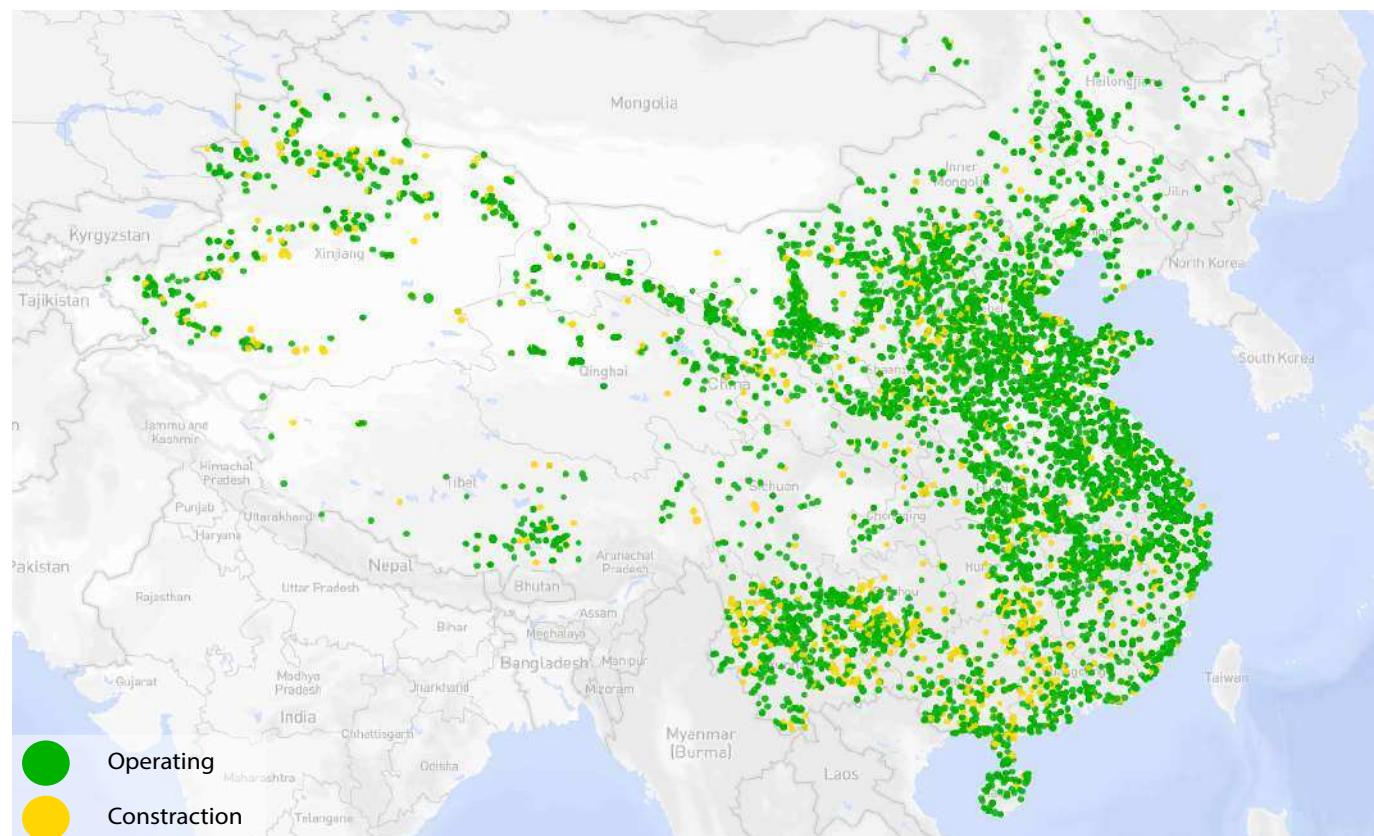


Immagine 85. Global Solar Power Tracker in China, Data source: Global Energy Monitor

Tale inefficienza limita l'impatto ambientale delle rinnovabili e rallenta la sostituzione delle fonti fossili¹⁴. A monte di questi squilibri, vi è l'organizzazione territoriale e industriale cinese, che ha favorito la concentrazione di distretti produttivi in aree dotate di abbondanti giacimenti fossili e infrastrutture logistiche avanzate. In tali contesti, l'intensità produttiva si traduce con livelli elevati di emissioni, alimentati dalla coesistenza di impianti moderni e tecnologie obsolete¹⁴. Dal punto di vista ambientale, nonostante negli ultimi anni siano stati compiuti progressi nella riduzione dell'intensità carbonica, ovvero la quantità di emissioni per unità di prodotto interno lordo, ciò non è stato sufficiente a invertire la tendenza assoluta all'aumento delle emissioni, perché l'espansione dei settori energivori ha continuato a dominare il mix energetico nazionale⁷⁹. Dopo la pandemia di COVID19, le politiche di autosufficienza energetica hanno guadagnato centralità, traducendosi in una prosecuzione dell'utilizzo delle fonti fossili domestiche¹⁴. In varie provincie cinesi, anche quelle precedentemente orientate alla transizione, si è assistito a una ripresa della costruzione di centrali a carbone, aggravando ulteriormente le emissioni complessive, iniziative motivate dall'obiettivo di preservare occupazione e crescita economica¹⁴. Il 2023 ha segnato un record storico di emissioni per la Cina: eventi climatici estremi, tra cui la siccità e la carenza idrica in diverse aree del Paese, hanno ridotto la disponibilità di energia idroelettrica, costringendo le autorità a incrementare ulteriormente il ricorso al carbone per soddisfare la domanda elettrica. Ciò ha temporaneamente invertito la tendenza al declino delle emissioni fossili e messo in luce la vulnerabilità del sistema energetico agli shock climatici¹⁴.

4.2 L'analisi del contesto climatico

L'elevato livello di rischio che caratterizza questa vasta area geografica è strettamente connesso alla sua notevole densità demografica: una porzione considerevole della popolazione cinese risiede infatti in aree costiere o in grandi agglomerati urbani, entrambi fortemente esposti a eventi climatici estremi³. Tra questi si evidenziano, in particolare, i cicloni tropicali, l'innalzamento del livello del mare, le alluvioni ricorrenti e le ondate di calore, tutti fenomeni che stanno aumentando in frequenza, intensità e durata².

L'Asia si configura come una delle regioni più colpite dai cambiamenti climatici e più sensibile alle loro ripercussioni. Tra le manifestazioni più gravi si annoverano le ondate di calore estremo, i lunghi periodi di siccità e le frequenti inondazioni¹¹. All'interno di questo quadro generale, la Cina si pone come caso rappresentativo per comprendere in profondità la portata dei rischi climatici nel continente asiatico. In quanto seconda economia mondiale e Paese più popoloso del pianeta, la Cina occupa una posizione strategica nel contesto globale, sia per la vulnerabilità di ampie porzioni del suo territorio sia per l'impatto potenziale delle sue politiche climatiche sul piano internazionale, come analizzato in pre-

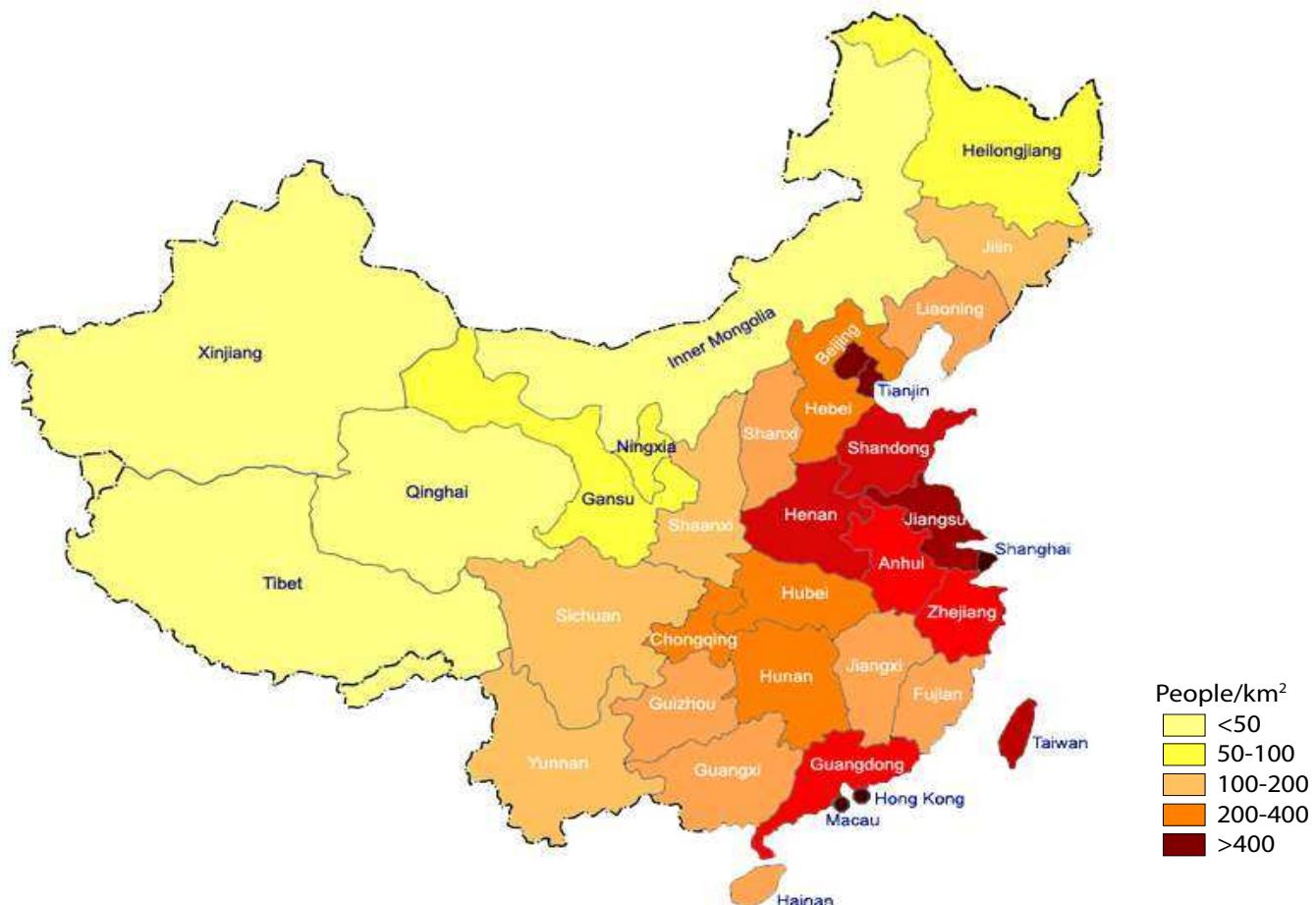


Immagine 86. Population density of China by first-level administrative regions, Data source: Wikimedia Commons

cedenza¹⁴. Il territorio cinese è contraddistinto da un clima prevalentemente monsonico, caratterizzato da un'elevata variabilità interannuale, frequenti disastri meteorologici e una complessa interazione di rischi climatici interconnessi, rendendo il Paese particolarmente esposto alle perturbazioni indotte dal riscaldamento globale⁸⁰. Oltre agli effetti idrologici, l'alterazione del clima sta portando a un incremento della frequenza di eventi meteorologici estremi come ondate di calore e precipitazioni eccezionali. Le proiezioni a lungo termine indicano un significativo aumento della probabilità di ondate di calore estreme e un aggravarsi del rischio di precipitazioni intense in Cina entro la fine del secolo, con implicazioni dirette sulla sicurezza alimentare, sull'approvvigionamento idrico e sulla tenuta delle infrastrutture⁸¹.

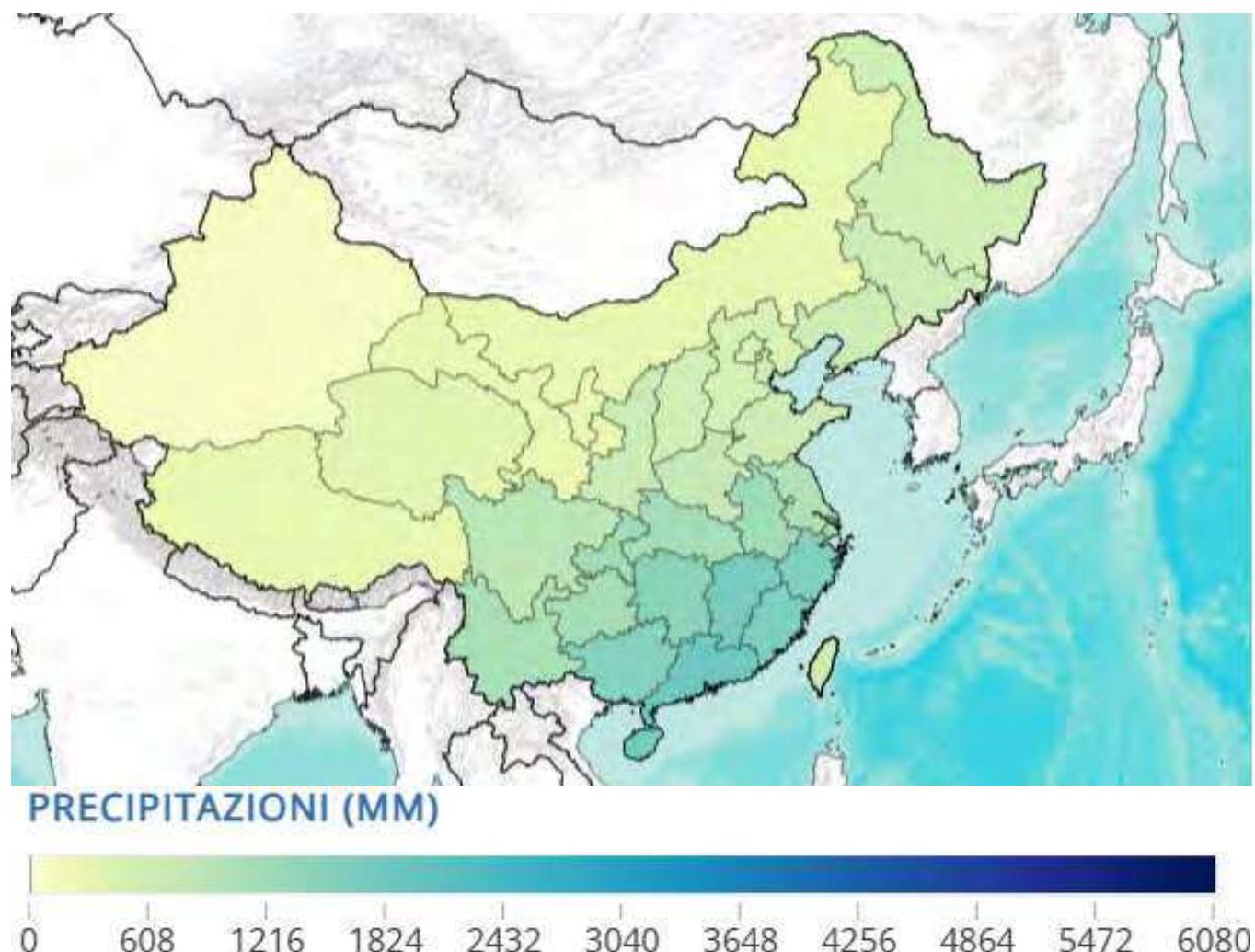


Immagine 87. Mappa delle precipitazioni annuali medie osservate in Cina nel periodo 1991–2020, Data source: CMCC

Gli anni 2021/22 hanno rappresentato due anni particolarmente critici per la Cina sotto il profilo climatico. La regione meridionale ha subito una delle siccità più estreme della storia recente. Al contempo, le province centrali e nordorientali, tra cui Hunan, Henan e Liaoning, sono state colpite da precipitazioni torrenziali che hanno provocato gravi inondazioni¹⁴. Tra tutti, l'evento alluvionale più drammatico è avvenuto nell'estate del 2021 nella città di Zhengzhou, capoluogo della provincia dell'Henan, dove in sole 24 ore sono stati registrati oltre 600 mm di pioggia. Questo evento estremo ha provocato la morte di più di 300 persone, mettendo in luce la vulnerabilità sistematica delle infrastrutture urbane di fronte a fenomeni di questa portata¹⁴. L'aumento della temperatura media superficiale costituisce un ulteriore indicatore della trasformazione climatica in corso: nel 2022, la temperatura media in Cina è stata superiore di 0.92°C rispetto alla media storica, posizionando quell'anno tra i tre più caldi dal XX secolo³. Parallelamente, l'innalzamento del livello del mare lungo le coste cinesi ha raggiunto i 140 mm sopra la media del periodo 1975-1996, il valore più elevato registrato dal 1980⁸². Questi dati testimoniano il rapido impatto del cambiamento climatico sul territorio costiero, esacerbando i rischi per le popolazioni e le infrastrutture marittime⁴.

Il Sesto Rapporto di Valutazione dell'Intergovernmental Panel on Climate Change fornisce una cornice interpretativa utile per comprendere tali dinamiche. Il documento sottolinea come i cambiamenti climatici stiano già generando eventi meteorologici e climatici estremi di intensità e portata inedite nella storia recente. La trasformazione di tali eventi in disastri è determinata, in larga parte, da due variabili interconnesse: la vulnerabilità e l'esposizione⁸². L'esposizione si riferisce alla presenza geografica di individui, attività economiche, infrastrutture, beni e risorse che possono essere colpiti negativamente da un evento estremo; la vulnerabilità, invece, è la propensione di tali elementi a subire danni, in funzione della loro resilienza e capacità di adattamento⁸². Sebbene il rischio di disastri naturali non possa essere eliminato in modo assoluto, le politiche di adattamento e gestione del rischio climatico mirano a ridurre sensibilmente la vulnerabilità e l'esposizione, rafforzando la resilienza delle comunità e degli ecosistemi⁶. Tali politiche sono fondamentali per mitigare gli effetti negativi degli eventi estremi e per favorire uno sviluppo sostenibile a lungo termine dove la scala degli impatti può avere conseguenze significative a livello globale.

Particolare attenzione deve essere rivolta al fenomeno delle inondazioni, che rappresentano una delle minacce ambientali più gravi e frequenti nel contesto cinese¹⁴. Secondo i dati della Emergency Events Database (EM-DAT), la Cina è tra i Paesi che ha registrato il maggior numero di eventi alluvionali tra il 1900 e il 2022. Le inondazioni fluviali hanno raggiunto un picco nel 2006, con 175 eventi segnalati, mentre le inondazioni lampo³, spesso più difficili da prevedere e gestire, mostrano una tendenza in crescita con 47 eventi solo nel 2021. L'aumento della frequenza e dell'intensità di tali eventi è attribuibile all'interazione tra cause naturali e fattori antropici, quali la rapida urbanizzazione, la perdita di copertura vegetale, la cementificazione diffusa e il generale incremento delle precipitazioni intense dovute al riscaldamento globale, come discusso nei capitoli precedenti.

Nel solo 2022, la metà dei dieci disastri naturali più devastanti registrati in Cina è stata costituita da inondazioni, che si sono rivelate le principali responsabili della perdita di vite umane e della distruzione di beni¹³. Le proiezioni idrologiche più recenti suggeriscono che l'intensità e la distribuzione annuale delle precipitazioni continueranno a mutare in relazione all'innalzamento delle temperature, in quanto un'atmosfera più calda ha una maggiore capacità di trattenere umidità, determinando un aumento dell'evaporazione e, di conseguenza, delle piogge intense⁸². La vulnerabilità della Cina a questi fenomeni è ulteriormente aggravata dalla sua conformazione geografica. Le grandi pianure fluviali del nord e del centro del Paese, densamente abitate e altamente urbanizzate, sono attraversate da complessi sistemi idrografici storicamente soggetti a piene. I cambiamenti climatici hanno già alterato in maniera significativa i regimi di deflusso dei principali corsi d'acqua, modificando la stagionalità delle portate e incrementando il rischio di piene improvvise e persistenti².

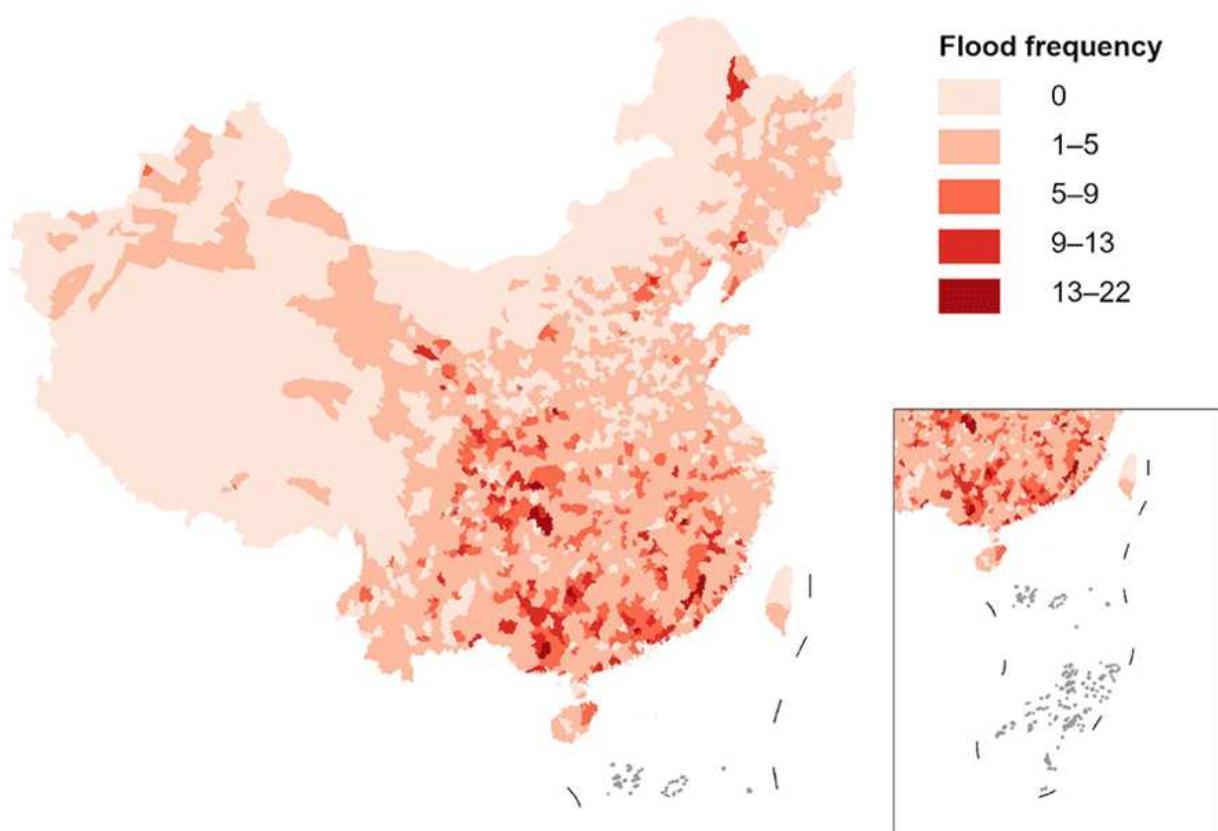


Immagine 88. Spatial distribution of flood occurrences and trends in China (2000–2022), Data source: Copernicus Publications

15



Progetto di Struttura d'emergenza in bamboo

5.1 Dal problema al progetto

Come abbiamo potuto constatare nell'arco del quarto capitolo, la Repubblica Popolare Cinese ricopre un ruolo di fondamentale importanza nella valutazione delle emissioni dovute all'uso estensivo di materiali fossili che incidono sul cambiamento climatico a livello globale. L'elevata produzione di questi inquinanti determina una condizione di vulnerabilità, in cui processi economici e territoriali sono strettamente interconnessi con i rischi climatici. Le manifestazioni di questi eventi estremi, quali inondazioni, ondate di calore, siccità e tempeste tropicali, evidenziano il rischio di un territorio densamente popolato come quello cinese. L'innalzamento del livello del mare e l'intensificazione delle precipitazioni hanno dimostrato la fragilità del sistema urbano, in particolare nelle estese pianure fluviali e nelle aree costiere, dove l'urbanizzazione ha ridotto la capacità naturale di drenaggio del suolo aggravando gli effetti dovuti alle alluvioni. Alla luce di ciò, il contesto climatico necessita quindi di una visione della gestione del rischio attraverso politiche di mitigazione e di risposta agli eventi climatici estremi. In questa prospettiva, la progettazione di strutture d'emergenza diventa uno strumento fondamentale per garantire assistenza alle popolazioni colpite e assicurare la continuità dei servizi essenziali durante le crisi. La crescente frequenza di eventi distruttivi richiede soluzioni capaci di coniugare rapidità di intervento, flessibilità d'uso e sostenibilità ambientale. In risposta a queste esigenze si inseriscono le strutture temporanee di emergenza in bamboo, le quali, attraverso un'attenta progettazione mirano a delineare una metodologia d'intervento replicabile, capace di coniugare efficienza tecnica, rapidità di realizzazione, disponibilità della materia prima e compatibilità ambientale, in linea con le politiche globali di adattamento ai cambiamenti climatici.

5.2 Le analisi dei casi studio

Al fine di elaborare e progettare in modo efficiente con le esigenze imposte dai contesti post-disastro, è stato necessario analizzare una serie di progetti di riferimento che hanno rappresentato un importante punto di partenza per la definizione delle scelte progettuali. Lo studio di tali reference ha reso possibile individuare strategie e soluzioni costruttive capaci di rispondere alle necessità di rapido montaggio, impiego di materiali locali, sostenibilità economica e ambientale. In contesti soggetti a calamità naturali la progettazione di un sistema costruttivo d'emergenza deve rispondere alle esigenze appena enunciate, i progetti contemporanei analizzati hanno aiutato a definire il sistema proposto in questa tesi.

Housing NOW

Realizzato in Myanmar progettato dallo studio Blue Temple⁸³, in risposta alla necessità di alloggi di emergenza a basso costo in seguito al colpo di stato militare del 2021⁸⁴. Il sistema utilizza dei moduli prefabbricati in bamboo, specie a piccolo diametro, presenti nel territorio, ritenute tradizionalmente utili solo a fini ornamentali ma in questo contesto utilizzate in ambito strutturale. Gli elementi impilati e legati attraverso cinghie in acciaio in strutture che possono essere assemblate rapidamente *in situ*⁸³. Il progetto ha dimostrato la sua grande resistenza in prima persona durante un terremoto di magnitudo 7.7 avvenuto nel 2025, dove le ventisei unità abitative realizzate nei pressi dell'epicentro non hanno riportato danni⁸⁴. Housing NOW rappresenta un esempio emblematico di come una buona progettazione modulare in bamboo può far coesistere velocità, sostenibilità, costi ridotti e resistenza strutturale anche confrontandosi con eventi estremi.



Immagine 89. Modulo abitativo in bamboo progettato da Housing Now progetto per la crisi abitativa in Myanmar, Data source: Público (2022)

Cortex Shelter

Ideato dallo studio Cutwork propone una soluzione basata su un'intelaiatura metallica pieghevole⁸⁵. La struttura funge da scheletro portante, su cui vengono agganciate membrane isolanti interne, e l'involucro esterno realizzato con un tessuto di calcestruzzo arrotolabile (Cortex Composite)⁸⁶. Quest'ultimo una volta idratato, indurisce nell'arco delle ventiquattr'ore, garantendo resistenza meccanica e durabilità superiori rispetto al calcestruzzo tradizionale. Il materiale innovativo di Cortex Composite consente inoltre un risparmio del 90% delle emissioni di carbonio durante la produzione e non richiede alcuna competenza tecnica durante l'assemblaggio⁸⁶.



Immagine 90. Cortex Shelter, Data source: Arketipo

Blooming Bamboo Home

Un progetto realizzato da H&P Architects in Vietnam, un paese periodicamente soggetto a forti inondazioni⁸⁷. In tali circostanze climatiche la struttura è stata progettata per poter resistere ad allagamenti fino a tre metri, grazie a un sistema costruttivo modulare interamente basato sul bamboo locale⁸⁸. L'abitazione è assemblata mediante incastri a scatto e giunzioni con viti, rendendo il montaggio semplice e veloce⁸⁷. Le pareti, inoltre, possono ripiegarsi verso l'esterno, favorendo la ventilazione naturale e il comfort interno. La versatilità del modulo di base consente diverse configurazioni funzionali passando dall'uso come abitazione, a scuola temporanea fino a centro sanitario, dimostrando come un sistema modulare ben progettato possa rispondere non solo a esigenze abitative, ma anche sociali e comunitarie⁸⁸.



Immagine 91. Blooming Bamboo Home, Data source: Architettura Ecosostenibile

Cubo

Ideato da Earl Patrick Forlales a Manila, con l'obiettivo di contrastare la diffusione delle barchopoli e migliorare le condizioni di vita delle popolazioni più vulnerabili, fornendo moduli abitativi prefabbricati in bamboo realizzabili in tempi estremamente ridotti e a costi contenuti⁸⁹. Tutti i componenti prefabbricati possono essere realizzati nell'arco di una settimana, mentre il montaggio del singolo modulo richiede appena quattro ore, con un costo stimato di circa 55 euro al metro quadrato⁹⁰. L'alloggio modulare progettato con l'utilizzo di elementi di design intelligente come un tetto inclinato che cattura l'acqua piovana e l'utilizzo del bamboo come materiale locale trattato per aumentare la durabilità⁹¹. L'intervento di Forlales rappresenta un modello di architettura sociale e sostenibile, capace di rispondere in modo concreto al problema della densità urbana e dell'emergenza abitativa nelle aree più fragili.



Immagine 92. *Cubo, la soluzione abitativa modulare progettata per Manila, Data source: Designboom*

Dall'analisi dei casi studio emerge un insieme di principi progettuali utili alla definizione di un sistema modulare per l'emergenza post-inondazione, che costituisce la base concettuale del progetto di tesi. Gli elementi comuni individuati includono:

- L'utilizzo di moduli prefabbricati leggeri;
- La sopraelevazione della struttura rispetto al suolo;
- La predisposizione di sistemi di drenaggio e deflusso delle acque meteoriche;
- L'adozione di strategie passive di ventilazione naturale;
- L'impiego di materiali locali e rinnovabili.

L'integrazione di tali principi ha consentito di concepire un modulo abitativo d'emergenza che non si limita a rispondere alle necessità immediate del post-disastro, ma si configura come una soluzione intermedia capace di garantire salubrità e sicurezza fino alla ricostruzione definitiva. Inoltre, la modularità del sistema permette di adattarlo a differenti funzioni temporanee, come spazi per servizi comunitari o centri medici. In questa prospettiva, l'architettura d'emergenza non si riduce a un mero esercizio tecnico, ma diventa strumento di resilienza e rigenerazione.

5.3 Il progetto

Giunti a questo punto della trattazione, e dopo aver affrontato nel primo capitolo l'analisi delle condizioni ambientali e climatiche a livello globale, nel secondo e terzo aver studiato il bamboo come materiale e come svilupparne le sue proprietà attraverso dei trattamenti specifici, nel quarto inquadrando il caso studio siamo arrivati alla fase conclusiva incentrata alla progettazione di una struttura d'emergenza in seguito a situazioni di disastri ambientali. L'intervento si colloca all'interno di un'ampia riflessione nei contesti di crisi ponendosi l'obiettivo di realizzare un sistema temporaneo, flessibile, sostenibile e riutilizzabile in più circostanze con le dovute sostituzioni in funzione di elementi danneggiati durante il loro utilizzo, capace inoltre di fornire una risposta immediata alle esigenze primarie della popolazione colpita da eventi estremi. L'impiego del bamboo come materiale strutturale principale si è dimostrato particolarmente efficace, soprattutto grazie alla sua leggerezza, resistenza meccanica, sostenibilità ambientale e alla sua ampia disponibilità nel territorio cinese, come analizzato nei capitoli precedenti.

Il progetto nasce con l'intento di sviluppare una struttura ad assemblaggio rapido, basata sull'impiego di kit prefabbricati pronti all'uso, facilmente trasportabili e immediatamente installabili in situ. Tali caratteristiche rispondono a precise necessità operative quali:

- Rapidità d'esecuzione;
- Semplicità di assemblaggio;
- Flessibilità spaziale;
- Modularità delle componenti;
- Facilità di trasporto.

Parallelamente, la progettazione ha tenuto in considerazione le esigenze degli utenti finali ponendo un attento sguardo a:

- Sicurezza;
- Illuminazione naturale;
- Ventilazione incrociata efficace;
- Comfort ambientale.

Il rapido intervento alle situazioni d'emergenza in seguito a catastrofi ambientali è essenziale poiché può andare a determinare una risposta efficace alla gestione delle crisi. Per tale motivo la struttura è stata progettata in modo da poter realizzare l'intera costruzione nell'arco del minor tempo possibile, in assenza di personale specializzato in quanto non sempre disponibile in situazioni d'emergenza. A tale scopo, si è proceduto all'analisi del sistema costruttivo, con l'obiettivo di preassemblare il maggior numero di componenti e alla semplificazione delle connessioni da effettuare in situ riducendo al minimo i rischi di errori durante la messa in opera. Un elemento fondamentale nella progettazione è stato la flessibilità spaziale. Il sistema, infatti, si basa su un modulo di base concepito come spazio minimo al quale si possono combinare più moduli per rispondere a determinate esigenze. Questa strategia compositiva consente di adattare il sistema alle diverse necessità funzionali garantendo la scalabilità e la versatilità dell'intervento architettonico. Durante lo sviluppo progettuale degli elementi strutturali è stato essenziale studiare gli aspetti logistici e di accessibilità alle aree d'intervento colpite dai disastri. In tali contesti è indispensabile provare a limitare pesi e ingombri dei kit previsti poiché le aree potrebbero essere soggette a infrastrutture danneggiate o terreni sconnessi. Di conseguenza il kit è stato pensato per contenerne le dimensioni volumetriche e poter essere facilmente movimentato attraverso mezzi leggeri, o ove ve ne sia la necessità, attraverso piccoli elicotteri in aree non raggiungibili attraverso mezzi di trasporto su ruote.

Una volta definiti i punti appena enunciati si è andati a definire le caratteristiche dal punto di vista tecnico-costruttivo. Il progetto integra soluzioni in grado di adattarsi ai diversi fenomeni ambientali che si possono verificare nello scenario di riferimento. In particolare, come visto nel capitolo precedente, l'area di studio è incline a frequenti eventi alluvionali intensi e per tale motivo si è resa necessaria la realizzazione di una copertura inclinata essenziale a favorire un rapido deflusso delle acque piovane e a prevenire ristagni che potrebbero compromettere la stabilità strutturale. Inoltre, l'analisi delle condizioni riguardanti forti venti ha evidenziato la necessità di contenere le sporgenze della copertura al fine di ridurre le sollecitazioni dinamiche, inoltre è stato introdotto un sistema di controventatura che ne incrementa la stabilità e la rigidezza complessiva, configurando un'efficace struttura a telaio, la quale ne garantisce una stabilità complessiva maggiore.

La ventilazione naturale è stata parte integrante del progetto per garantire un adeguato ricambio d'aria e favorire il comfort interno anche in assenza di sistemi meccanici. Tale risultato è stato ottenuto mediante la disposizione di aperture su pareti verticali adiacenti, che hanno permesso la ventilazione incrociata e la circolazione dell'aria attraverso moti convettivi naturali, favorendo così un efficace raffrescamento passivo.

Per quanto riguarda la protezione dall'umidità di risalita, si è optato per una sopraelevazione mediante un sistema che isola il piano di calpestio dal terreno umido. Questa scelta progettuale consente di evitare il contatto diretto con il suolo impregnato d'acqua prevenendo la formazione di muffe e degrado dei materiali, ma consente anche la fruibilità degli spazi interni immediatamente dopo le pesanti alluvioni ma anche nei giorni successivi quando il terreno potrebbe essere ancora saturo d'umidità.

In tale contesto, la scelta del bamboo Moso come materiale strutturale principale è risultata coerente con i principi di sostenibilità ambientale, di efficienza costruttiva e di disponibilità nel territorio cinese. Infatti, unisce leggerezza, resistenza e rinnovabilità, risultando ideale per contesti nei quali la disponibilità di materiali e risorse logistiche è limitata. In virtù delle peculiarità del materiale e dell'uniformità dell'intervento, si è optato di applicare un trattamento unico ai componenti del progetto. Il trattamento alcalino utilizzato favorisce l'incremento delle resistenze meccaniche del materiale, migliorandone l'igroscopicità e migliorando inoltre la resistenza a funghi e muffe fondamentale in contesti post inondazioni caratterizzati da un'elevata umidità ed un elevato rischio di proliferazione fungina.

Infine, sono state elaborate alcune linee guida progettuali preventive nella disposizione delle aree in cui andrà ad insinuarsi l'intervento quali:

- La collocazione delle strutture al di fuori delle aree di rischio evitando terreni instabili o soggetti a sedimenti, nonché in presenza di avvallamenti che potrebbero favorire l'accumulo di pozze d'acqua;
- La predisposizione di sistemi di drenaggio in grado di facilitare il deflusso delle acque meteoriche prevenendo l'allagamento del sito.

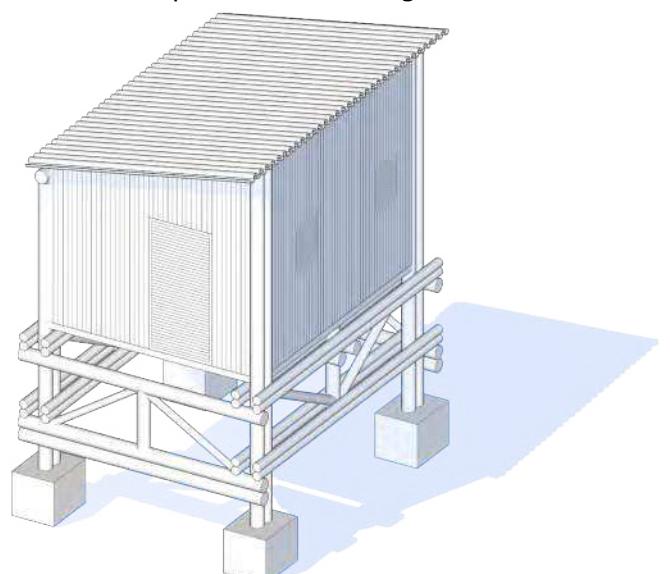


Immagine 93. Assonometria progettuale

5.4 Gli elementi costruttivi

La struttura portante

La struttura portante del modulo è un sistema puntiforme costituito da travi e doppi pilastri di bamboo trattati attraverso processi alcalini, organizzati secondo una maglia regolare a telaio impiegando culmi di diversa sezione in base alle funzioni statiche e al contributo di ciascun elemento alla stabilità complessiva. I pilastri sono collegati a plinti prefabbricati in calcestruzzo leggero, di dimensioni pari a 50x50 cm, attraverso una piastra immersa nel plinto e collegata tramite perni passanti per entrambi i fusti. Il diametro dei culmi varia da 8 a 15 cm, con uno spessore medio della parete di circa 1 cm, dimensioni selezionate per garantire un equilibrio ottimale tra resistenza meccanica e leggerezza complessiva del sistema. Per ovviare alle problematiche delle resistenze a taglio si è adottato un sistema di controventature di diametro pari a 10 cm realizzate sempre attraverso culmi di bamboo. Queste connessioni trasversali incrementano la rigidezza del telaio nelle due direzioni principali, migliorando la risposta della struttura alle azioni orizzontali, come il vento. In aggiunta, la presenza di una struttura a telaio permette di sfruttare la collaborazione tra travi e pilastri, conferendo ulteriore resistenza e stabilità attraverso l'efficace trasmissione degli sforzi nei nodi di connessione.

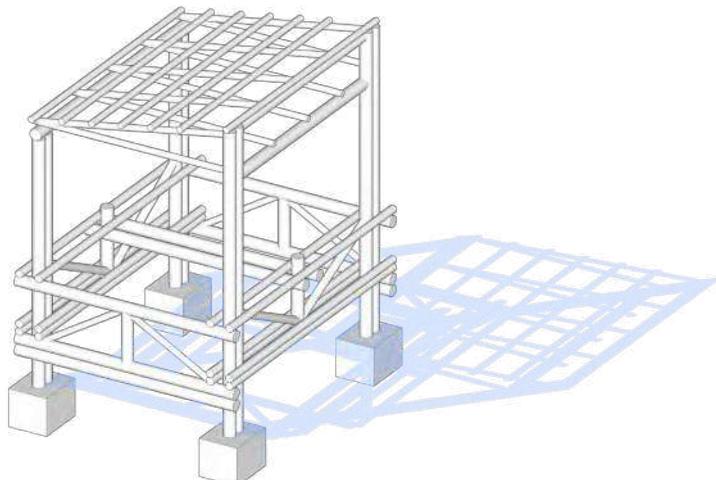


Immagine 94. Schema strutturale

I Giunti

Le connessioni tra i vari elementi sono realizzate mediante giunti in acciaio concepiti per garantire rapidità di montaggio, sicurezza statica e durabilità nel tempo. In particolare, sono state previste fascette metalliche per collegare tra loro i diversi culmi paralleli in quanto evitano lo schiacciamento locale, piastre di connessione per unire gli elementi in prossimità dei nodi sfruttando la maggiore resistenza del bamboo in corrispondenza dei diaframmi interni, giunti bullonati ottenuti tramite foratura passante dei culmi, utilizzati solo dove strettamente necessario, in quanto la foratura riduce la resistenza a trazione perpendicolare alla fibra.

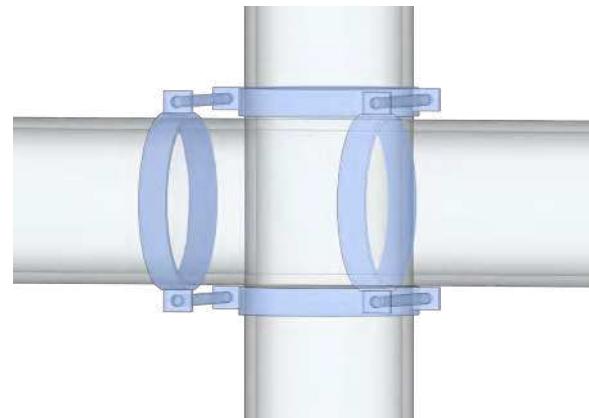


Immagine 95. Schema giunti attraverso collari metallici e perni di due culmi di bamboo perpendicolari

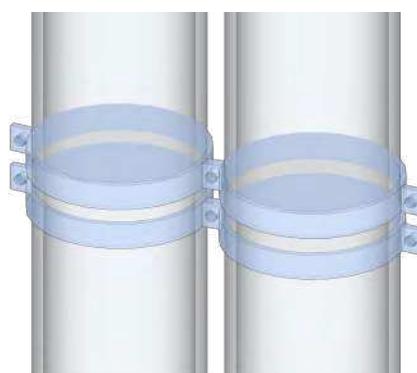


Immagine 96. Schema giunti attraverso collari metallici di due culmi di bamboo affiancati

L'Area di base

Il modulo principale presenta una superficie pari a 9 m² e un'altezza minima di 3 m. Questa dimensione compatta è stata scelta per contenere il volume e il peso complessivo del kit, garantendo allo stesso tempo comfort abitativo e funzionalità spaziale. Esso è concepito per ospitare fino a un massimo di tre persone, offrendo gli spazi minimi necessari per la vita quotidiana in situazioni di emergenza. Tuttavia, la struttura modulare consente l'ampliamento mediante l'aggregazione di più unità, così da rispondere in modo flessibile a diverse esigenze, sia individuali che collettive, e adattarsi a configurazioni residenziali più ampie e a funzioni comunitarie temporanee.

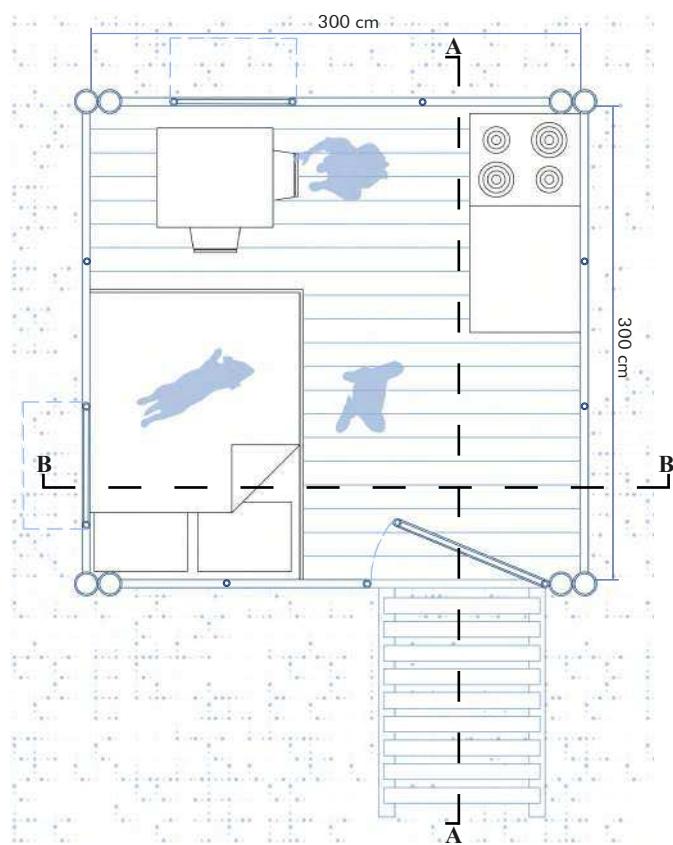


Immagine 97. Schema planimetria tipo

Le Chiusure Verticali

Le pareti di tamponamento sono costituite da pannelli modulari in bamboo formati da listelli affiancati tra loro e collegati mediante giunti trasversali. I pannelli di dimensioni pari a 150x100x5 cm sono sostenuti attraverso un sistema di montanti e traversi che ne garantisce la stabilità e la compattezza strutturale. Questi pannelli svolgono una duplice funzione: da un lato costituiscono l'involucro esterno dell'edificio, dall'altro sostengono le aperture finestrate, integrandole direttamente nella maglia strutturale. Le aperture sono anch'esse interamente in bamboo e preassemblate in precedenza, la porta di dimensioni pari a 210x100x5 cm, mentre i varchi finestrati gestiti attraverso un'apertura rudimentale sostenuta da un culmo di bamboo durante l'apertura come si nota dall'immagine 98 di dimensioni pari a 100x80x5 cm. I pannelli utilizzati per il tamponamento presentano generalmente un diametro di circa 5 cm, ma possono essere ridotti a 3 cm qualora le condizioni di disponibilità lo rendano opportuno.

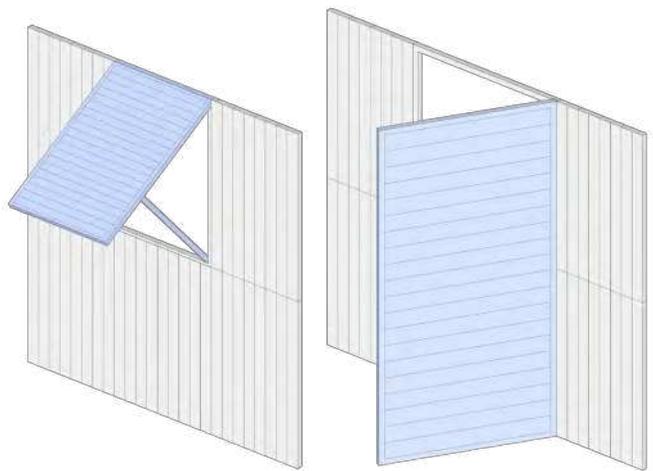


Immagine 98. Schema chiusure verticali e aperture in bamboo

Le Partizioni Verticali

Le divisioni interne sono realizzate mediante un telaio secondario leggero composto da culmi di 6 cm di diametro, a cui vengono fissati pannelli scorrevoli in lamelle di bamboo di spessore pari a 2 cm. Poiché tali pareti non sono soggette a carichi strutturali, esse svolgono esclusivamente una funzione distributiva e di separazione degli spazi, contribuendo alla percezione della privacy all'interno dell'ambiente.

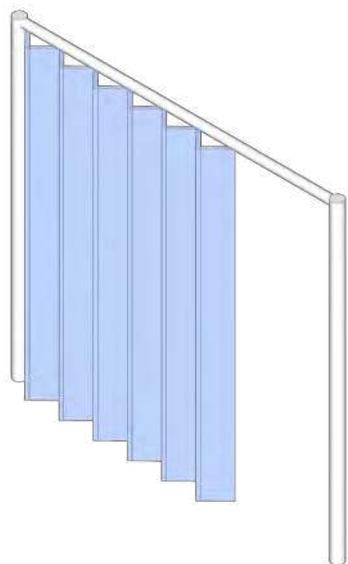


Immagine 99. Schema partizioni verticali in bamboo

Le Chiusure Orizzontali

Il solaio di calpestio è realizzato su una struttura a telaio controventata composta da travi principali in bamboo di 15 cm di diametro e da travetti secondari di sezione ridotta, che aiutano nella ripartizione dei carichi. Il rivestimento superficiale è composto da lamelle in bamboo spesse 2 cm fissate attraverso l'utilizzo di chiodi. La copertura è concepita come una struttura intelaiata preassemblata, sulla quale poggia un pannello di supporto dello spessore di 2 cm, permettendo così la posa della guaina impermeabilizzante in fabbrica. Lo strato di finitura è costituito da culmi di bamboo trattati sezionati a metà collegati attraverso un elemento passante in acciaio e disposti in modo da favorire il deflusso delle acque meteoriche.

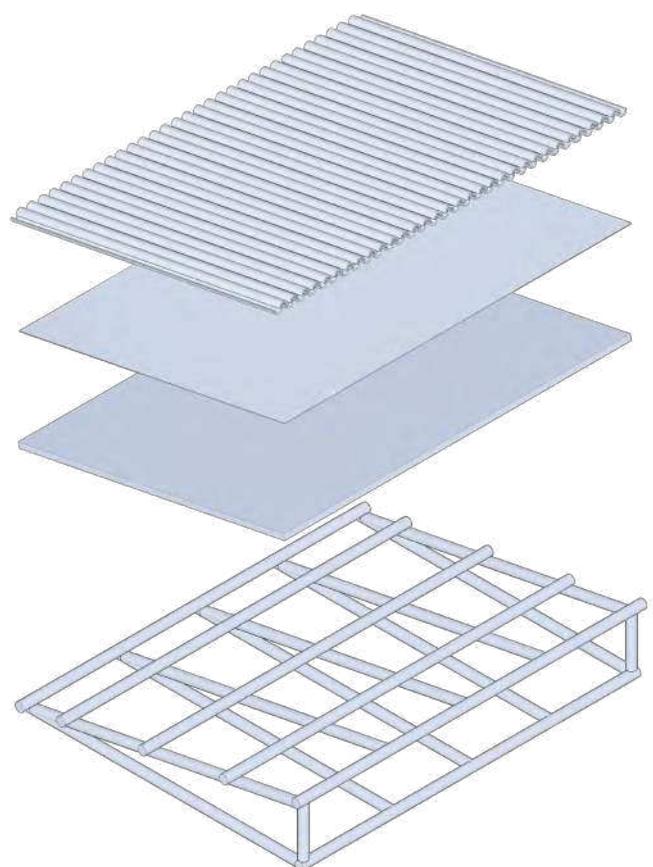


Immagine 100. Schema copertura in bamboo

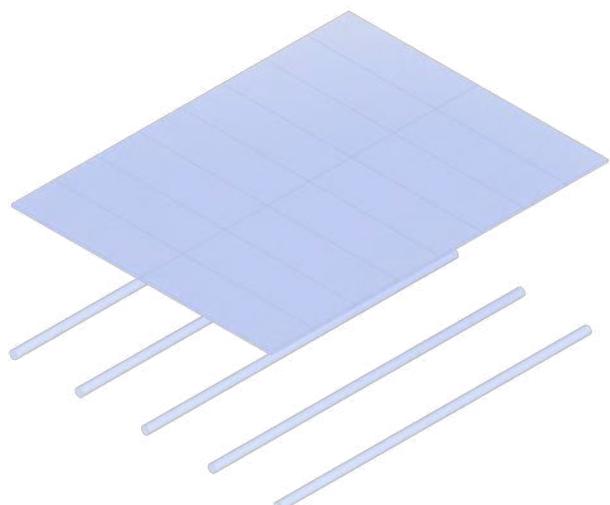


Immagine 101. Schema pavimentazione in bamboo

Il Kit

Una volta completata la prefabbricazione dei componenti essi verranno assemblati in un kit di montaggio, insieme agli attrezzi necessari per le operazioni di posa in opera in situ. L'involucro del kit è stato progettato in modo tale da integrare gli elementi che verranno poi utilizzati durante l'assemblaggio finale. I due coperchi del kit sono costituiti dai moduli della copertura preassemblati, mentre le chiusure verticali dell'imballaggio sono realizzate tramite i pannelli di bamboo preassemblati in fabbrica. All'interno

della scatola troviamo i moduli di calpestio piani, i doppi pilastri preassemblati, le travi non ancora assemblate e le varie aperture. Le dimensioni complessive dell'imballaggio così configurato saranno pari a 300x150x80 cm con un peso complessivo pari a circa 250 Kg complessivi permettendo così il trasporto del materiale senza l'utilizzo di mezzi pesanti. I plinti di fondazione invece verranno spediti separatamente, all'interno di un secondo imballaggio, per evitare un eccessivo incremento del peso nel kit contenente il bamboo.

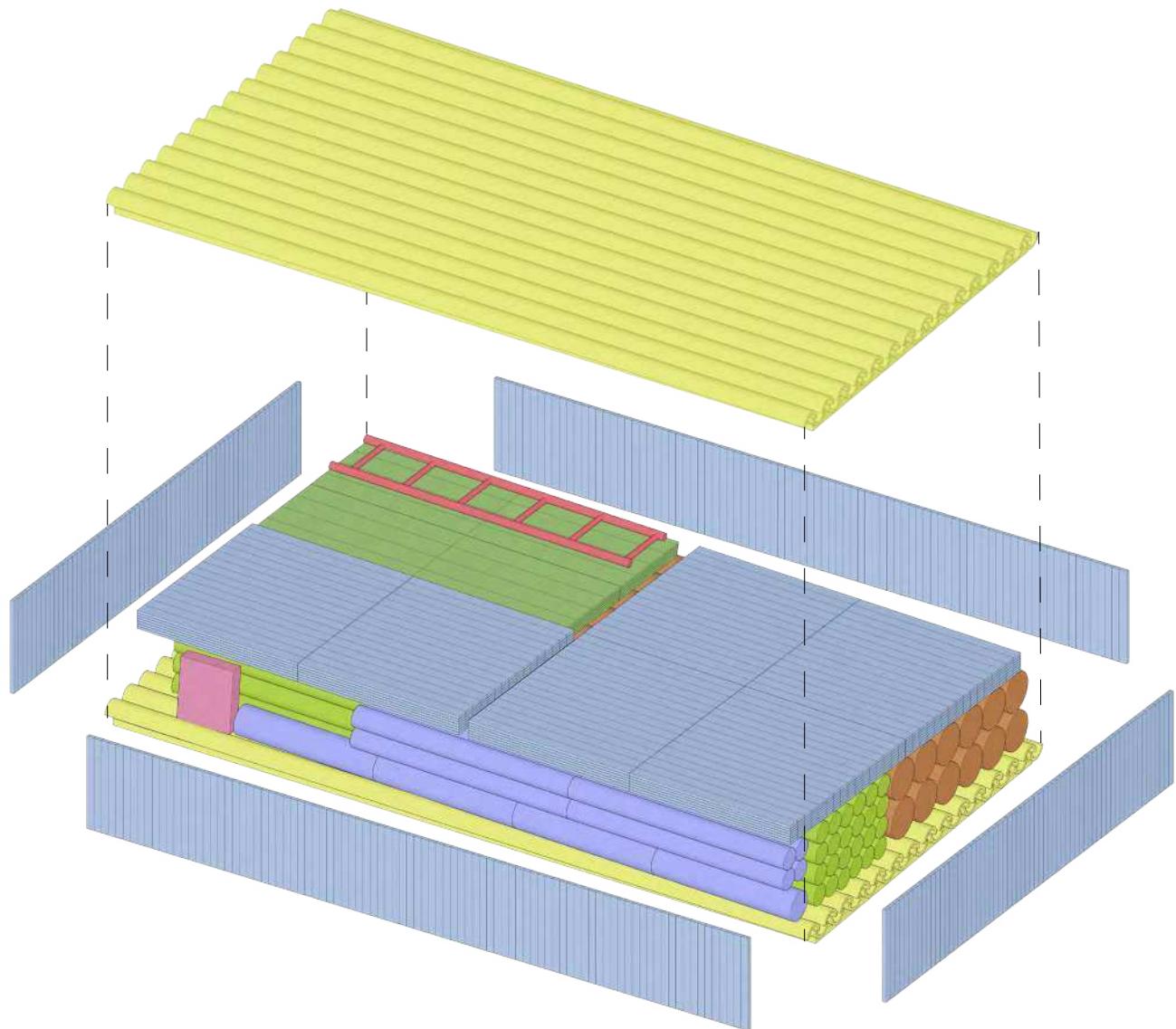
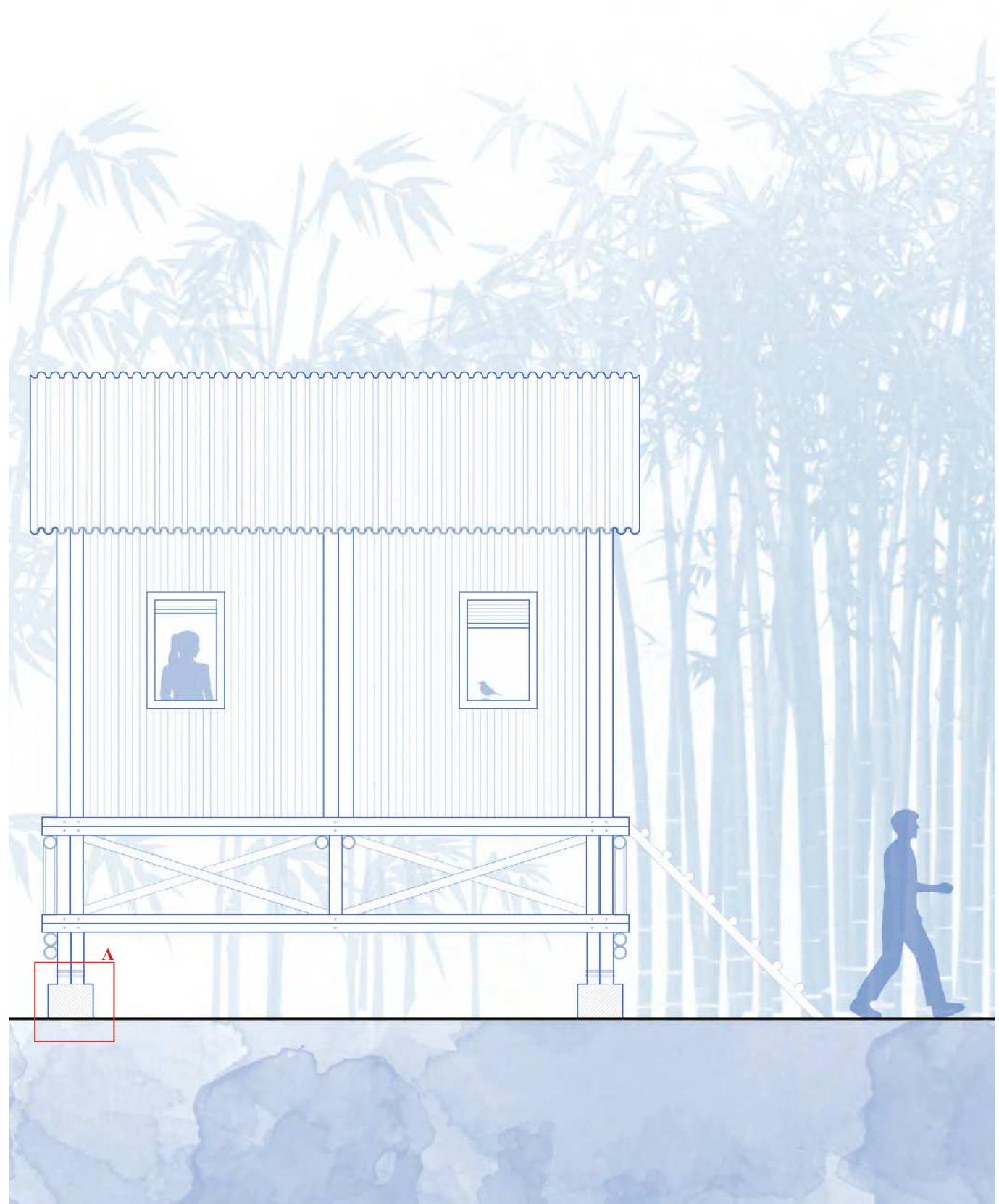


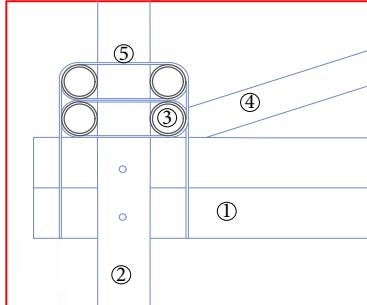
Immagine 102. Assonometria del Kit

Prospetto



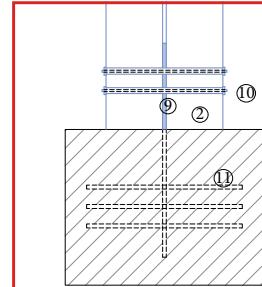
Sezione AA

Nodo Tecnologico A



1. Trave in bamboo Ø 15 cm
2. Pilastro in bamboo Ø 15 cm
3. Trave in bamboo Ø 10 cm
4. Controvento in bamboo Ø 10 cm
5. Giunto di connessione in acciaio

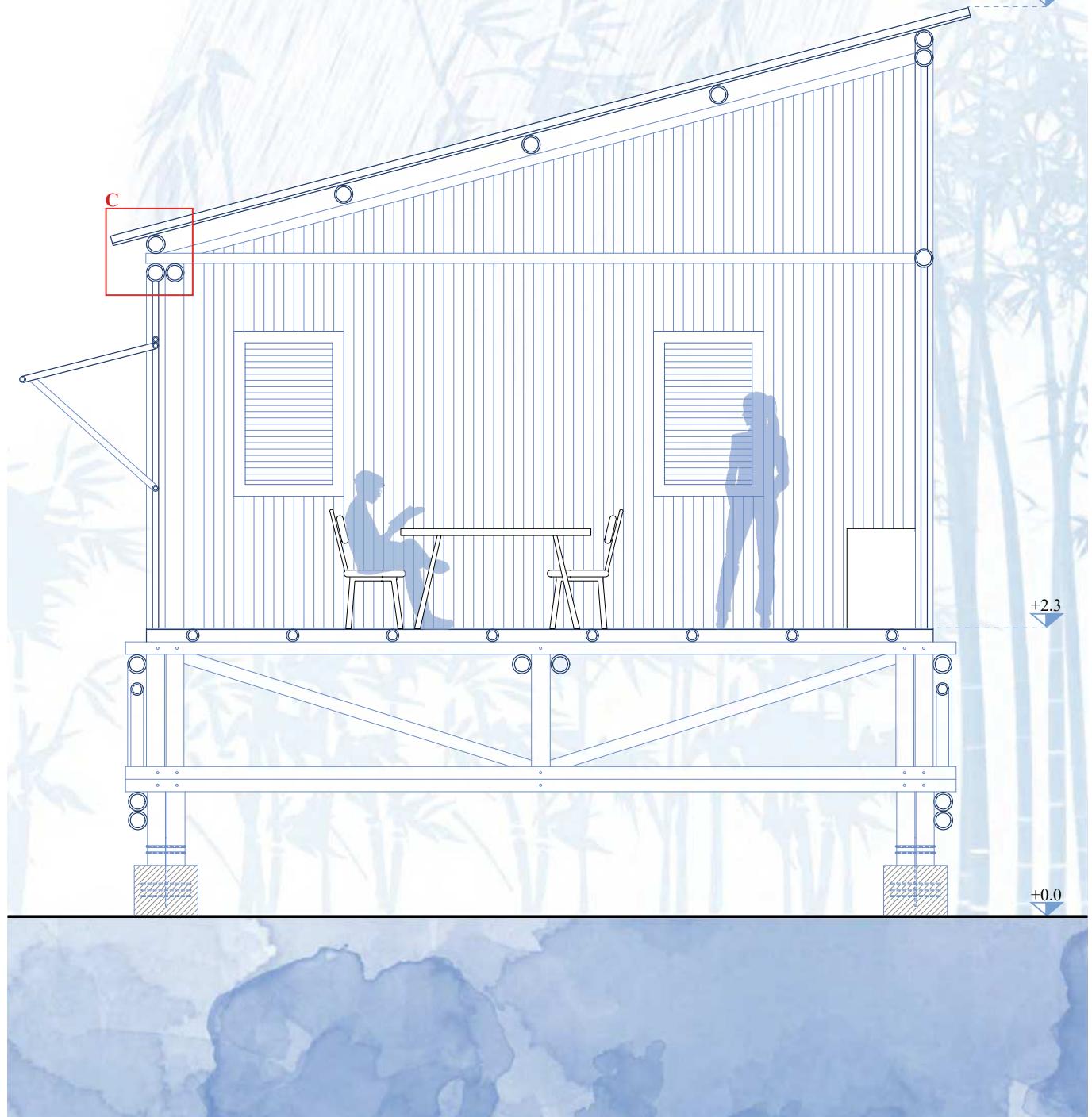
Nodo Tecnologico B



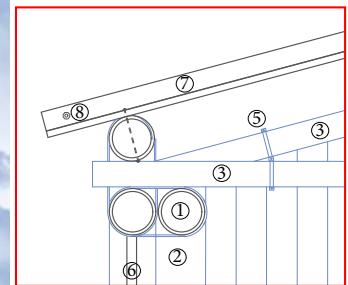
2. Pilastro in bamboo Ø 15 cm
9. Piastra di ancoraggio in acciaio prefissata nel plinto
10. Perni in acciaio di ancoraggio tra piastra e pilastri
11. Ferri di ancoraggio immersi nel plinto



Sezione BB



Nodo Tecnologico C



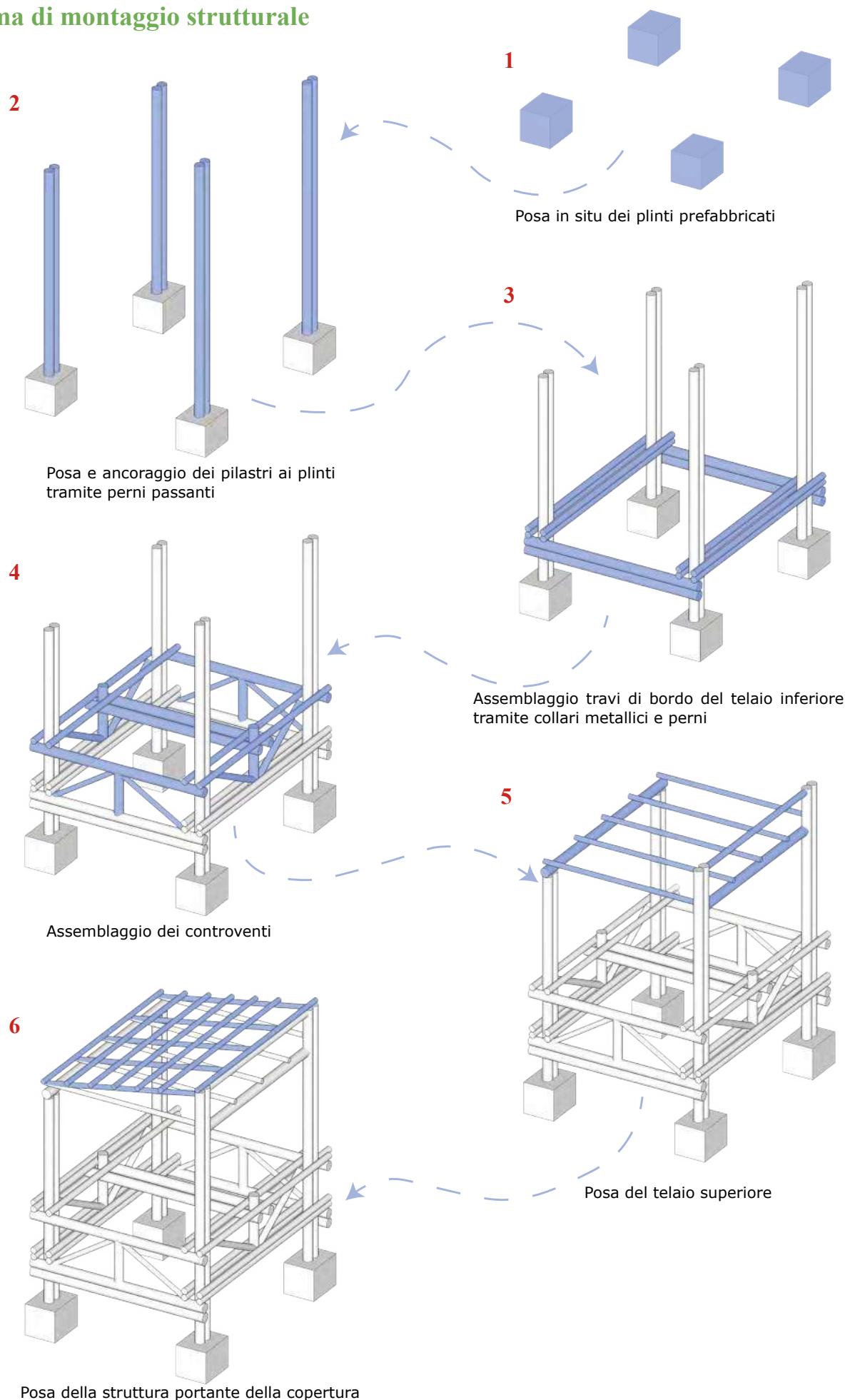
1. Trave in bamboo Ø 15 cm
2. Pilastro in bamboo Ø 15 cm
3. Trave in bamboo Ø 10 cm
5. Giunto di connessione in acciaio
6. Pannello in bamboo sp. 5 cm
7. Copertura in culmi di bamboo
8. Elemento di connessione della copertura

+6.5

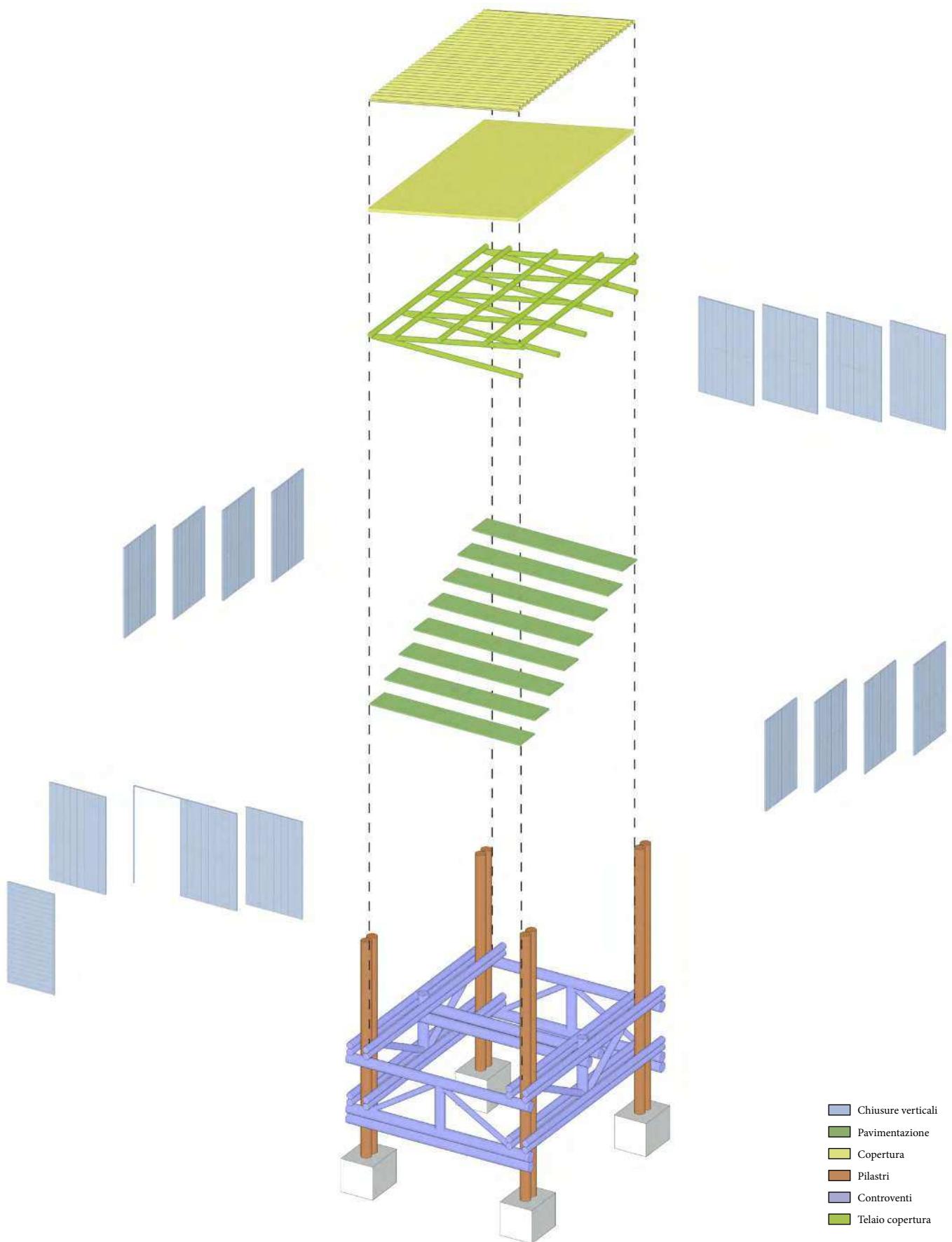
+2.3

+0.0

Schema di montaggio strutturale



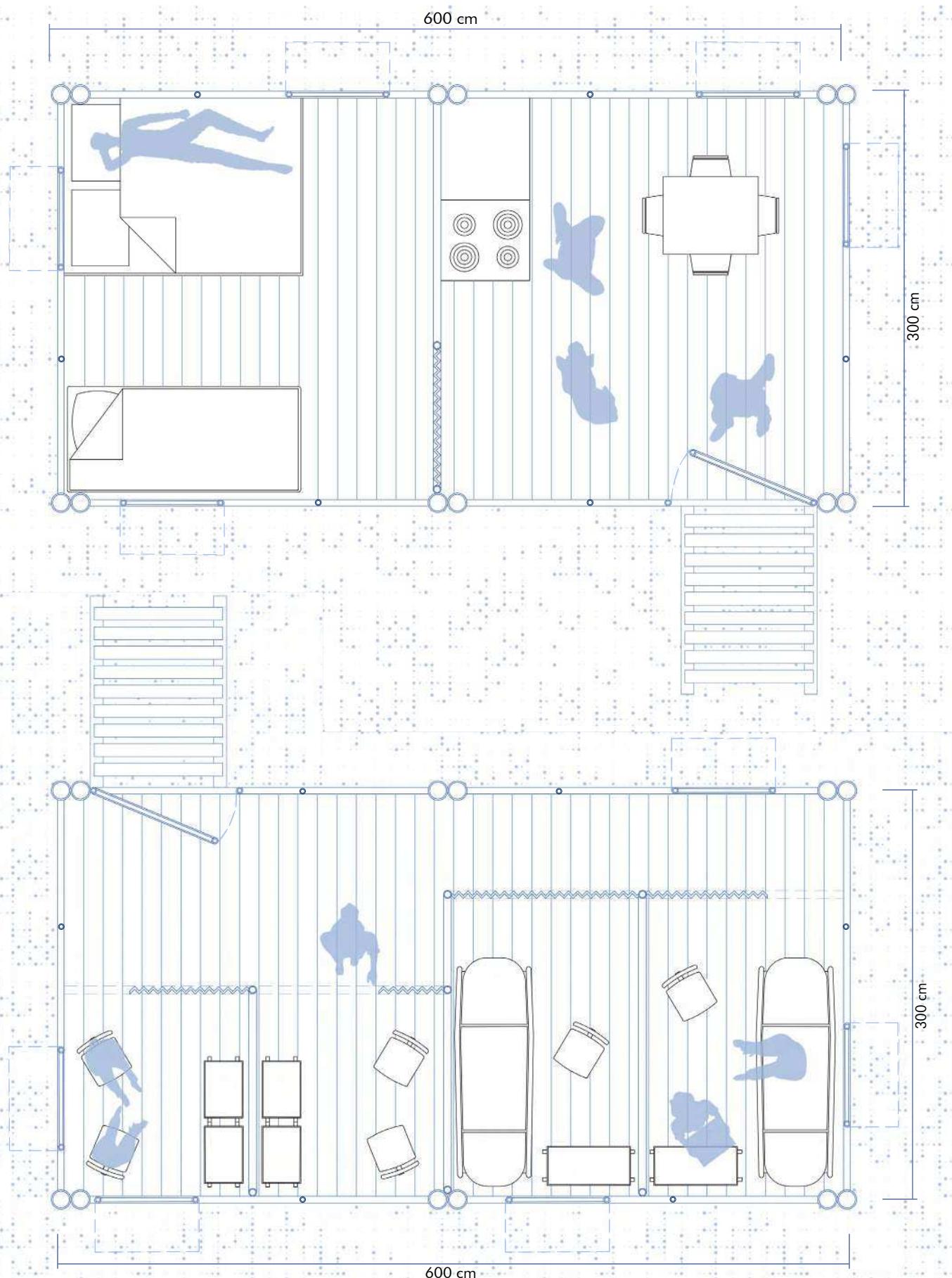
Espenso assonometrico



■ Chiusure verticali
■ Pavimentazione
■ Copertura
■ Pilastri
■ Controventi
■ Telaio copertura

Piante tipologiche

Planimetrie rappresentanti abitazione tipo e ambulatorio d'emergenza su una struttura composta da un doppio modulo di dimensioni pari a 600x300 cm



66

Conclusioni

Durante l'analisi di questo lavoro è stata adottata una prospettiva multidisciplinare, dal rapporto tra cambiamento climatico e impatto dei materiali sino a potenzialità del bamboo, non solo in ambito strutturale ma come materiale sostenibile a livello globale.

L'indagine svolta, a partire dal quadro di riferimento ambientale e tramite l'analisi dei dati climatici, ha evidenziato l'impatto che le attività antropiche stanno producendo, incidendo significativamente sulle emissioni di gas serra e sul consumo di risorse naturali. Ciò sta portando ad un'accelerazione del riscaldamento globale con conseguenze sull'incremento degli eventi metereologici estremi quali: ondate di calore, siccità, incendi boschivi, precipitazioni estreme e inondazioni. In tale circostanze, come abbiamo constatato nell'arco del primo capitolo, il settore delle costruzioni è uno degli ambiti su cui l'uomo può e deve intervenire nella mitigazione di questi fenomeni. La comprensione di questi effetti sul nostro pianeta rende necessario lo sviluppo di nuove tecnologie e l'utilizzo di materiali alternativi a quelli tradizionali maggiormente utilizzati sin ora, per poter così ridurre le emissioni.

A fronte di ciò, la ricerca ha posto l'attenzione sui materiali sostenibili, individuando nel bamboo una delle risorse naturali per eccellenza sotto il profilo ecologico, tecnologico e sociale. Nell'arco del proseguimento della trattazione si è andati ad evidenziare le qualità intrinseche della graminacea tra cui: la rapida capacità di crescita, l'elevata resistenza meccanica paragonandola all'acciaio, senza dimenticare l'elevato potenziale di sequestro del carbonio. Il bamboo si colloca in una posizione tale da contrastare i problemi enunciati in precedenza, limitando e aiutando a smaltire le emissioni prodotte sino ad oggi, trovando una valida alternativa ai materiali convenzionali ad alta intensità carbonica.

L'approfondimento eseguito sul bamboo ha consentito una comprensione delle peculiarità anatomiche che determinano la sua leggerezza, flessibilità e resistenza. Tuttavia, non sono presenti solo lati favorevoli, ma come ogni materiale possiede anche dei limiti, soprattutto relativi alla durabilità. Per ovviare a queste problematiche sono stati studiati alcuni dei trattamenti sia tradizionali che innovativi, mettendo in luce l'evoluzione tecnologica del materiale e le strategie volte a migliorarne la durabilità e la stabilità nel tempo.

Si è poi andata ad analizzare un'area di studio circoscritta, quale la Cina del Sud, offrendo un esempio concreto dell'utilizzo del materiale in un contesto di gestione delle emergenze ambientali e in particolare delle inondazioni. Attraverso un'analisi climatica specifica, il bamboo non rappresenta soltanto una risorsa costruttiva, ma anche un elemento strategico per lo sviluppo di strutture temporanee capaci di rispondere alle sfide climatiche in modo rapido. Il progetto è andato a identificare le esigenze alle quali si potrebbe incorrere, andando a sviluppare varie soluzioni attraverso un modulo prefabbricato assemblabile in base alle necessità dei casi specifici. La rapidità d'intervento è stato l'elemento principale da soddisfare, poiché in situazioni emergenziali è proprio questo il fattore che sempre scarseggia. Attraverso la prefabbricazione, il pre-assemblaggio degli elementi all'interno del kit e il riutilizzo di tutti gli elementi presenti in esso si garantisce uno spreco minimo di risorse e un lavoro ridotto *in situ*. Per quanto riguarda l'esportabilità della proposta, deve necessariamente essere tenuto presente, che il progetto si basa sulle specificità del contesto cinese considerato; va comunque tenuto altresì conto che, con le opportune modifiche, il progetto potrebbe essere adattato a vari contesti diversi da quello preso in esame.

In conclusione, si può affermare che il bamboo rappresenta un'opportunità che promuove una visione più consapevole e responsabile del costruire, in linea con gli obiettivi globali di mitigazione del cambiamento climatico e di tutela delle risorse del pianeta. La ricerca punta quindi, non solo a un'analisi tecnica-scientifica del materiale che porta alla realizzazione del progetto, ma intende offrire uno spunto sul ruolo dell'architettura come strumento di resilienza contro i disastri ambientali a cui inevitabilmente incorreremo in futuro.

Bibliografia

1. Timmerman, J., Buytaert, W., Mishra, A., Zandaryaa, S., Connor, R., Stewart, B., Uhlenbrook, S., Koncagül, E., Webley, N., & Amani, A. (2020). Cambiamenti climatici, acqua e sviluppo sostenibile. UNESCO
2. Bilgili, M., & Tokmakci, M. (2025). Climate change and trends in Europe and globally over the period 1970–2023. *Physics and Chemistry of the Earth*, 139
3. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). Climate Change 2023: Longer Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland.
4. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2019). Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate (SROCC). Geneva, Switzerland.
5. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2018). Global warming of 1.5 °C: An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways. Geneva, Switzerland.
6. World Meteorological Organization (WMO). (2024). State of the Global Climate 2023 (WMO-No. 1347). Geneva, Switzerland
7. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2015). Glossario minimo dell'IPCC per il Quinto Rapporto di Valutazione sui Cambiamenti Climatici (AR5) (Trad. L. Caciagli). IPCC Focal Point.
8. Shailendra, K. S. (2024). Evaluation of indoor climate and energy storage in buildings. CRC Press.
9. Kang, S., Yin, J., Gu, L., Yang, Y., Liu, D., & Slater, L. (2023). Observation-constrained projection of flood risks and socioeconomic exposure in China. *Earth's Future*, 11(3)
10. Chen, J., Shi, X., Gu, L., Wu, G., Su, T., Wang, H.-M., Kim, J.-S., Zhang, L., & Xiong, L. (2023). Impacts of climate warming on global floods and their implication to current flood defense standards. *Journal of Hydrology*, 617
11. Kirat, Y., Prodromou, T., & Suardi, S. (2024). Unveiling the nexus: Climate change, green innovation, and the pendulum of energy consumption and carbon emissions. *Energy Economics*, 138
12. Il Bo Live – Università di Padova. (2024, 27 febbraio). Uragani sempre più intensi: l'attuale classificazione potrebbe non bastare più. <https://ilbolive.unipd.it/>
13. Madhab, R., Pingping, L., Binaya, K. M., Meimei, Z., & Xiaohui, W. (2024). Global systematical and comprehensive overview of mountainous flood risk under climate change and human activities. *Science of the Total Environment*, 941
14. CCai, W., et al. (2024). The 2024 China report of the Lancet Countdown on health and climate change: Launching a new low-carbon, healthy journey. *The Lancet Public Health*, 9(1)
15. Consiglio Nazionale degli Ingegneri (CNI). (2023). La carbon footprint di prodotto e organizzazione: Guida pratica per gli ingegneri. CNI
16. Legambiente. (2022). Settore edilizio verso una nuova sfida: la decarbonizzazione delle costruzioni. Legambiente
17. Andrew, R. M. (2018). Global CO₂ emissions from cement production. *Earth System Science Data*, 10(1)
18. ECCO Climate. (2024). Politiche per la trasformazione industriale: il caso dell'acciaio. ECCO Climate
19. Masili, A., Carpenter, A. M., & Reid, A. (2020, 18 maggio). Le ceneri volanti: un problema diventato risorsa. Sotacarbo

20. Malhotra, V. M., Collepardi, M., Borsoi, A., & Olagot, J. J. (2003). Ruolo dei materiali supplementari cementizi e dei superfluidificanti nel ridurre l'emissione dei gas serra verso l'ambiente. *Enco Journal*, 10(2)
21. Buzzi Unicem S.p.A. (2022). I nostri cementi CGreen alla loppa. Buzzi Unicem S.p.A.
22. Heidelberg Materials Italia Cementi S.p.A. (2023). Environmental Product Declaration: CEM III/A. Heidelberg Materials Italia Cementi S.p.A.
23. Mañosa, J., Calderón, A., Salgado-Pizarro, R., Maldonado-Alameda, A., & Chimenos, J. M. (2024). Research evolution of limestone calcined clay cement (LC3), a promising low-carbon binder: A comprehensive overview. *Heliyon*, 10(3)
24. International Renewable Energy Agency (IRENA). (2024). Decarbonising hard-to-abate sectors with renewables: Perspectives for the G7. Abu Dhabi: IRENA.
25. Devlin, A., Kossen, J., Goldie-Jones, H., & Yang, A. (2023). Global green hydrogen-based steel opportunities surrounding high-quality renewable energy and iron ore deposits. *Nature Communications*, 14
26. SteelWatch. (2025). Why smart use of green hydrogen is critical for steel decarbonisation. SteelWatch
27. Institute for Energy Economics and Financial Analysis (IEEFA). (2022). The facts about steelmaking: Steelmakers seeking green steel. IEEFA
28. The Energy and Resources Institute (TERI). (2021). Green steel through hydrogen direct reduction. TERI
29. Churkina, G., Organschi, A., Reyer, C. P. O., Ruff, A., Vinke, K., Liu, Z., Reck, B. K., Graedel, T. E., & Schellnhuber, H. J. (2020). Buildings as a global carbon sink. *Nature Sustainability*, 3(4)
30. United Nations Environment Programme (UNEP), & Yale Center for Ecosystems + Architecture (Yale CEA). (2023). Building materials and the climate: Constructing a new future. UNEP
31. Puettmann, M. (2022). Cradle-to-gate life cycle assessment of cross laminated timber. Oregon State University
32. Röck, M., Saade, M. R. M., Baloukti, M., Rasmussen, F. N., Birgisdottir, H., Frischknecht, R., Habert, G., Lützkendorf, T., & Passer, A. (2020). Embodied GHG emissions of buildings: The hidden challenge for effective climate change mitigation. *Applied Energy*, 258
33. Buchanan, A. H., & Levine, S. B. (1999). Wood-based building materials and atmospheric carbon emissions. *Environmental Science & Policy*, 2(6)
34. Sathre, R., & O'Connor, J. (2010). Meta-analysis of greenhouse gas displacement factors of wood product substitution. *Environmental Science & Policy*, 13(2)
35. Himes, A., & Busby, G. (2020). Wood buildings as a climate solution. *Developments in the Built Environment*, 4
36. Yiping, L., Yanxia, L., Buckingham, K., Henley, G., & Guomo, Z. (2021). Bamboo and climate change mitigation: A comparative analysis of carbon sequestration. The International Network for Bamboo and Rattan (INBAR)
37. Sharma, B., Gatóo, A., Bock, M., & Ramage, M. (2015). Engineered bamboo for structural applications. *Construction and Building Materials*, 81
38. Van der Ligt, P., Vogtländer, J., Van der Vegte, J. H., & Brezet, H. (2015). Environmental assessment of industrial bamboo products: Life cycle assessment and carbon sequestration. World Bamboo Organization

39. Kumar, P., Gautam, P., Kaur, S., Chaudhary, M., Afreen, A., & Mehta, T. (2021). Bamboo as reinforcement in structural concrete. *Materials Today: Proceedings*, 45(2)
40. Sánchez, À. V. (2011). *Bambus*. Loft Publications
41. Farrelly, D. G. (1984). *The book of bamboo: A comprehensive guide to this remarkable plant, its uses, and its history*. Sierra Club Books
42. Đinh, T. H., & Poisson, E. (2024). *Bamboo in Vietnam: An anthropological and historical approach*. Routledge
43. Minke, G. (2016). *Building with bamboo: Design and technology of a sustainable architecture* (2nd rev. ed.). Walter de Gruyter GmbH
44. Bincsik, M., & Masanori, M. (2017). *Japanese bamboo art: The Abbey Collection*. The Metropolitan Museum of Art Bulletin, 74(4)
45. Needham, J. (1985). *Science and civilisation in China* (Vol. 5). Cambridge University Press
46. Polo, M. (2024). *Il Milione*. Mondadori
47. Asniza, M. (2024). *Bamboo: Recent development and application*. IntechOpen
48. Kumar, S. S. (2025). *Thermal evaluation of indoor climate and energy storage in buildings*. CRC Press
49. Baccini, G. (2016). *I sette savi del bosco di bamboo: Personalità eccentriche nella Cina medievale*. Marsilio
50. Uprarawanna, U., Kaewsritong, J., & Srikaeo, K. (2025). *Bamboo: Global occurrence and its significance as food and related products*. *Crops*, 45(2)
51. Arnoldi, A. (2024, giugno). Cenni generali sul bambù, su alcune sue caratteristiche e sui suoi strani misteri. *Bamboo Journal*, 27
52. Cane & Bamboo Technology Centre. (2008). *Handbook on bamboo*. Bamboo Technology Support Group for East & North Eastern States, Ministry of Agriculture, Government of India.
53. Amhara Bureau of Trade and Industry. (2007). *Study on establishment of bamboo processing plants in Amhara Regional State*. Amhara Bureau of Trade and Industry
54. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2005). *World bamboo resources: A thematic study prepared in the framework of the Global Forest Resources Assessment 2005*. FAO
55. Londoño, X. (2001). *Evaluation of bamboo resources in Latin America*. International Network for Bamboo and Rattan (INBAR)
56. Cárdenas, L. M. (2011). *Il bamboo come materiale da costruzione: Caratteristiche fisiche e meccaniche, tecnologie costruttive*. Sistemi Editoriali
57. Fiorani, D. (2024). Resine epossidiche per la finitura delle legature. *Bamboo Journal*, 27
58. Hidalgo López, O. (1993). *La guadua (Guadua angustifolia Kunth): Un bambù di grande importanza forestale per la Colombia* (Trad. e note a cura di D. Coslop)
59. Anokye, B. R. A. (2016). *Bamboo properties and suitability as replacement for wood*. *Pertanika Journal of Scholarly Research Reviews*, 2(1)
60. R. L. B. (1995). *A manual for vegetative propagation of bamboos*. Scenario Publications
61. Chen, K., & Suhaily, S. S. (2024). *Study on mechanical properties of Moso bamboo in Jian'ou City, Fujian Province, China*. *International Journal of Religion*, 10(3)

62. Hu, C., Cheng, R., Cheng, Q., & Liu, J. (2021). Study on behavior of steel hoop connections for raw bamboo members. *Materials*, 14(21)
63. Moore Bess, N. (2001). *Bamboo in Japan*. Kodansha International
64. Roslan, S., Tedjosaputro, M., & Maurina, A. (2025). From theory to practice: A discussion of bamboo and tectonic thinking in architectural education. *Journal of Architectural Education Studies*, 15(2)
65. Wang, X., Song, L., Cheng, D., et al. (2019). Effects of saturated steam pretreatment on the drying quality of moso bamboo culms. *European Journal of Wood and Wood Products*, 77(6)
66. Amaral, L. M., Kadivar, M., Paes, J. B., Batista, D. C., de Souza Reis, M., Tarverdi, A., Pereira de Godoy Jr, A., & Savastano Jr, H. (2023). Physical, mechanical, chemical, and durability assessment of water leaching treatment of bamboo. *Advances in Bamboo Science*, 5
67. Bai, Y., Wang, W., Zhang, Y., Wang, X., Wang, X., & Shi, J. (2022). Effects of different delignification and drying methods on fiber properties of moso bamboo. *Polymers*, 14(24)
68. Moy, C. K. S., & Wang, Y. (2025). Effect of tung oil and zirconia powder surface treatment on the heat resistance of bamboo. *Advances in Bamboo Science*, 6
69. Hao, X., Wang, Q., & Wang, Y. (2021). The effect of oil heat treatment on biological, mechanical and physical properties of bamboo. *Journal of Wood Science*, 67
70. Wu, J., Yixiu, Z., & Zhong, T. (2023). Bamboo slivers with high strength and toughness prepared by alkali treatment at a proper temperature. *Journal of Wood Science*, 69
71. Tariq, M., Khushnood, R. A., Babar, Z. B., & Basit, M. A. (2024). Evaluating the potential of chemically modified bamboo for sustainable and green construction. *Journal of Building Engineering*, 86
72. Huang, S., Jiang, Q., Yu, B., Nie, Y., Ma, Z., & Ma, L. (2019). Combined chemical modification of bamboo material prepared using vinyl acetate and methyl methacrylate: Dimensional stability, chemical structure, and dynamic mechanical properties. *Polymers*, 11(12)
73. Gauss, C., Kadivar, M., Harries, K. A., & Savastano Jr, H. (2021). Chemical modification of *Dendrocalamus asper* bamboo with citric acid and boron compounds: Effects on the physical-chemical, mechanical and thermal properties. *Journal of Cleaner Production*, 279
74. Du, J., Yang, K.-L., Yuan, Z.-Q., Liu, Z.-M., Li, X.-Y., Liu, S.-J., Li, C.-C., Meng, S.-T., & Wu, R. M. (2024). Effect of physical treatment methods on the properties of natural bamboo materials. *Advances in Bamboo Science*, 6
75. Ma, Z., Wu, Y., Wang, H., & Yuan, S., Zhang, J. (2025). Research on the hydrophobic performance of bamboo surface treated via coordinated plasma and PDMS solution treatments. *Journal of Renewable Materials*, 13(5)
76. Li, W., Bai, Q., Xie, G., Cao, Y., & Gao, J. (2023). The influence of impregnation methods and curing conditions on the physical and multiscale mechanical properties of furfurylated bamboo. *Forests*, 14(7)
77. Li, W., Liu, M., Zhai, H., Wang, H., & Yu, Y. (2024). Preparing highly durable bamboo materials via bulk furfurylation. *Journal of Sustainable Materials Science*, 18(2)
78. Balakrishnan, D., & Lee, C.-I. (2022). Surface functionalization of bamboo with silver-reduced graphene oxide nanosheets to improve hydrophobicity and mold resistance. *Applied Surface Science Advances*, 12
79. Tianpeng, W., Xin, S., Yichuan, M., & Wei, X. (2025). Climate change intensifies low-carbon transition pressure in China's power system. *Environmental Impact Assessment Review*, 114

80. Zhifang, Z., Zhuoxuan, Y., Huijia, L., & Jinhao, L. (2025). Regional climate change action and corporate ESG performance: Evidence from China. *International Review of Economics & Finance*, 100
81. Hao, W., Yifeng, Q., Dobri, D., Shengquan, C., & Boryana, I. (2025). Urban climate risk assessment under climate and land use changes impact: A multi-dimensional approach. *Urban Climate*, 61
82. Yang, S., Xiu, Y., Huimin, L., & Mingyu, L. (2025). Developing an indicator system and assessing China's progress on climate change adaptation in 2010–2022 from a dual-dimension perspective. *Environmental and Sustainability Indicators*, 26
83. Design Diffusion. (2025, 1 ottobre). Bambù e resilienza sismica: nuove frontiere dell'abitare. Design Diffusion
84. Archello. (2023, 12 giugno). Housing Now responds to Myanmar's housing crisis with prefabricated bamboo homes. Archello
85. Design Diffusion. (2019, 25 settembre). Cortex Shelter: Case di emergenza sostenibili. Design Diffusion
86. Cutwork. (2019, 20 settembre). Cutwork develops innovative "just add water" concrete refugee shelters. Designboom
87. H&P Architects. (2013). Bb Home. ArchDaily
88. H&P Architects. (2013, 25 settembre). Blooming Bamboo House. Dezeen
89. LifeGate. (n.d.). Cubo, la casa modulare in bambù che trasformerà le metropoli. LifeGate
90. Tag43. (2021, 18 novembre). Bambù, così le case diventano sostenibili. Tag43
91. Casa Naturale. (2019, 4 novembre). Case in bambù: spazi sicuri e intelligenti. Casa Naturale
92. Mena, J., González-Quintero, L., & Cuéllar, A. (2012). Assessment of fire reaction and fire resistance of *Guadua angustifolia* Kunth (a.k.a. bamboo). *Construction and Building Materials*, 28
93. Gutierrez, M. (2020). Mechanical behaviour of bamboo at elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 255
94. Wang, Y.Y., Li, Y.Q., Zhu, W.B., Fu, S.Y., (2024). Strong and fire-resistant bamboo enabled by densification and boron nitride/graphene oxide nanocoating. *Industrial Crops and Products*, 212

