# Politecnico di Torino

Corso di laurea magistrale in Architettura per il progetto sostenibile A.a. 2021/2022 Luglio 2022

# Progettazione di un padiglione con ballette di paglia portanti

Relatore | Andrea Bocco

Candidata | Anna Barbato



# SOMMARIO

Abstract	-
Capitolo 1 - L'impatto dell'uomo sul clima	_
L'evoluzione dell'interesse globale verso il cambiamento climatico	
La situazione climatica attuale	
Le cause dei cambiamenti climatici	
Il settore dell'edilizia	_ 1
Capitolo 2 - Il progetto di ricerca	_ 1
Il progetto nel suo complesso	_ 1
Il padiglione con struttura portante in paglia	_ 1
Capitolo 3 - La paglia in architettura	_ 2
La storia di questa tecnica costruttiva	_ 2
Perché impiegare la paglia in architettura	_ 2
Analisi degli impatti ambientali della paglia	_ 2
L'acqua e le balle di paglia	_ 2
Soluzioni offerte dal mercato attuale	_ 3
Capitolo 4 - Intonaci	_ 3
La preparazione del fondo	_ 4
La rete porta-intonaco	_ 4
La preparazione degli impasti	_ 4
Intonaci a base di calce	_ 4
La stesura e il tempo di asciugatura degli intonaci a base di calce	_ 4
Latte di calce	_ 4
Intonaci a base di argilla	_ 4
Esempi di intonaci di fondo e di finitura	
Capitolo 5 - La progettazione del padiglione	_ 5
Scelta iniziale: paglia portante o di tamponamento?	_ 5
Seconda scelta: ballette o balle jumbo?	_ 5
Terza scelta: la morfologia della pianta	_ 5
Quarta scelta: la morfologia e il sistema costruttivo della copertura	_ 5
Il modulo di base	_ 6
Progetto per il miglioramento della risposta sismica	_ 6
Capitolo 6 - Flaborati grafici di progetto	7

Capitolo / - Dimensionamento degli elementi strutturali di legno	89
La normativa italiana e le procedure di calcolo	91
Definizione dei carichi $G_2$ e delle azioni variabili $Q$	102
Tavolato della copertura a verde pensile	107
Travetti di ventilazione	114
Trave primaria di copertura	119
Tavolato inferiore della copertura prefabbricata	126
Trave primaria di solaio	131
Tavolato inferiore del solaio inferiore	139
Quantità impiegata di paglia e legno	144
Capitolo 8 - Soluzioni progettuali e dettagli esecutivi	145
Le fondazioni	147
Il solaio ventilato inferiore	148
Le pareti in ballette di paglia portanti	152
La copertura ventilata con verde pensile estensivo	156
Capitolo 9 - Simulazioni termoigrometriche	159
Considerazioni iniziali	
Simulazioni termoigrometriche degli elementi disperdenti	164
Studio dei ponti termici	168
Coefficiente globale di scambio termico per trasmissione	173
Misurazioni sul campo e in laboratorio	175
Capitolo 10 - Studio della luce naturale	180
Fattore di luce diurna FLD	182
Illuminamento naturale	183
Capitolo 11 - Organizzazione del cantiere	184
Cronoprogramma	186
Lista delle attrezzature	187
Richieste di preventivo per gli elementi di legno	187
Schede per la costruzione e per le misurazioni sul campo	189
Capitolo 12 - Abaco dei materiali	208
Conclusioni	213
Bibliografia	214

Questo elaborato utilizza il font ad alta leggibilità EasyReading

# **ABSTRACT**

L'attuale modello di consumo è insostenibile a lungo termine. Utilizziamo più risorse di quante ne abbiamo a disposizione, emettiamo gas clima alteranti senza riuscire a smaltirli, produciamo rifiuti che non riusciamo ad assorbire.

Il cambiamento climatico impone un cambio di abitudini nella vita di ogni singolo cittadino. Tutto è interconnesso: ogni uomo, ogni governo, ogni essere vivente, ogni ecosistema. Tutto era in equilibrio e noi, una singola specie tra tutte quelle esistenti, abbiamo rotto quell'armonia.

Per mantenere le condizioni che permettono la vita come la conosciamo ora bisogna agire urgentemente. Il settore delle costruzioni impatta in modo importante sull'ambiente, quindi un cambiamento di rotta nell'edilizia può significare molto.

Questa tesi di laurea magistrale si inserisce in un'iniziativa DIST Dipartimento di Eccellenza 2018-2022, finanziata dal Ministero dell'Università e della Ricerca, che prevede la progettazione e la costruzione di tre padiglioni con tecniche costruttive rispettivamente in calce-canapa, balle di paglia e terra alleggerita. Questi tre prototipi verranno realizzati rispettando, per quanto possibile, i principi dell'architettura vegetariana e verranno messi a confronto in termini di prestazioni termoigrometriche, resistenza strutturale, gestione del cantiere, reperibilità dei materiali, costi e impatto ambientale. Nello specifico, il mio proqetto di tesi tratta il padiglione con balle di paglia portanti.

La prima parte dell'elaborato esplora la situazione climatica globale attuale e lo stato dell'arte dell'uso della paglia in architettura.

Successivamente, viene presentato il processo di progettazione che ha portato alla definizione del progetto esecutivo del padiglione. A seguire vengono esposti i calcoli per il dimensionamento strutturale degli elementi portanti in legno, le simulazioni termoigrometriche e lo studio dell'illuminamento naturale. L'ultima sezione riguarda l'organizzazione del workshop didattico che porterà alla realizzazione del padiglione nel comune di Grugliasco (TO), auspicabilmente entro la fine dell'anno corrente.



### L'EVOLUZIONE DELL'INTERESSE GLOBALE VERSO IL CAMBIAMENTO CLIMATICO

Il chimico e fisico svedese Svante Arrhenius nell'articolo *On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground*, pubblicato nel 1896, fu il primo a dimostrare la correlazione che esiste tra l'incremento di concentrazione di anidride carbonica in atmosfera e l'aumento della temperatura del suolo.

Nel primo decennio del '900 pubblicò delle previsioni in cui sottolineava il ruolo centrale che l'intensificarsi dell'attività industriale avrebbe avuto nell'aumento dell'effetto serra e quindi sul riscaldamento globale: secondo i suoi calcoli, però, le crescenti emissioni di CO<sub>2</sub> avrebbero dovuto modificare sensibilmente la situazione climatica globale nell'arco di alcuni secoli.

Fu l'ingegnere e inventore inglese Guy Stewart Callendar che per primo stimò l'aumento di anidride carbonica e temperatura in una scala temporale di decenni. Nell'articolo *The artificial production of carbon dioxide and its influence on temperature* del 1938 studiò gli effetti che le emissioni dovute all'uso di combustibili fossili avrebbero avuto sulle condizioni climatiche globali.<sup>1</sup>

Nonostante il ruolo dell'anidride carbonica nell'effetto serra fosse studiato in ambito accademico fin dalla seconda metà del XIX secolo, soltanto un secolo dopo il tema del riscaldamento globale iniziò ad essere trattato più diffusamente.

Queste attenzioni, comunque, sono da considerarsi una conseguenza del periodo di crisi petrolifera che negli anni '70 colpì i paesi industrializzati, piuttosto che una vera e propria presa di coscienza.

Nel 1985 veniva aperto alla firma uno dei primi accordi volontari internazionali per la tutela delle condizioni climatiche: il *Protocollo di Helsinki*. Le disposizioni di base del protocollo, descritte all'articolo 2, venivano così enunciate: "Le Parti ridurranno di almeno il 30% le loro emissioni nazionali annue di zolfo o i loro flussi attraverso le frontiere, il più presto possibile ed al più tardi entro il 1993, adottando i livelli del 1980 come base per il calcolo delle riduzioni."<sup>2</sup>. Dopo 15 anni questo documento era stato firmato da sole 22 nazioni.

Pochi anni dopo, nel 1987, veniva rilasciato dalla Commissione mondiale sull'ambiente e lo sviluppo (WCED) un documento conosciuto anche come *Our Common Future*, nel quale viene introdotto il concetto di 'sviluppo sostenibile'.

A questi sono succeduti molti altri accordi, le nazioni firmatarie sono aumentate sempre più e il livello di dettaglio e di precisione - anche dal punto di vista scientifico - degli obiettivi cresceva.

A partire dal 1992, si tiene annualmente la Conferenza delle Parti (indicata con la sigla COP): un summit internazionale per discutere riguardo le azioni da intraprendere a livello globale per affrontare in modo coordinato il cambiamento climatico.

Fondamentale è stata la COP21 tenutasi nel 2015 a Parigi. Il trattato redatto in quell'occasione, legalmente vincolante<sup>3</sup> e firmato da 195 nazioni, ha fissato degli importanti obiettivi da raggiungere entro il 2050 ed il 2100 che riguardano la riduzione delle emissioni di gas a effetto serra e la lotta per

<sup>2</sup> Senato della Repubblica, *Disegno di legge (Ratifica ed esecuzione del Protocollo alla Convenzione del 1979 sull'inquinamento atmosferico [...])*, n. 607. X Legislatura, 10 novembre 1987. https://www.senato.it/service/PDF/PDFServer/DF/268696.pdf

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Lentini, G., Messori, G., & Caserini, S. (2020). Il futuro visto dal passato: Guy Callendar e il riscaldamento globale. *Climalteranti*. <a href="https://www.climalteranti.it/2020/06/10/il-futuro-visto-dal-passato-guy-callendar-e-il-riscaldamento-globale/">https://www.climalteranti.it/2020/06/10/il-futuro-visto-dal-passato-guy-callendar-e-il-riscaldamento-globale/</a>

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Gli stati firmatari sono obbligati ad adottare delle strategie volte al raggiungimento degli obiettivi fissati e a presentare periodicamente i risultati ottenuti, però non esistono dei limiti legalmente vincolanti da raggiungere.

contrastare l'aumento della temperatura media globale. L'accordo, inoltre, prevede lo stanziamento di fondi a favore dei paesi in via di sviluppo, da investire in azioni per opporsi al cambiamento climatico.

Nello stesso anno della COP21, l'Assemblea Generale delle Nazioni Unite ha stilato un elenco di 17 obiettivi di sviluppo sostenibile (SDGs, Sustainable Development Goals) che riguardano diverse dimensioni della vita umana e del pianeta stesso, in un'ottica di sostenibilità in senso olistico. Il concetto di 'sostenibilità', infatti, si è evoluto negli anni fino a integrare ambiti diversi quali l'ambiente, l'economia, la società e le istituzioni, per comprendere anche aspetti come l'accessibilità alle cure sanitarie e all'istruzione, la lotta contro la fame nel mondo e il bisogno di pace tra e nelle nazioni. Le nazioni dovranno attuare delle strategie specifiche, dettate dalle caratteristiche e dal diverso livello di sviluppo di ciascuna, ma l'universalità degli obiettivi sottolinea l'interdipendenza tra gli stati del mondo: le azioni di uno si ripercuotono sugli altri.

Scansionando il QR-code a lato, è possibile entrare nel dettaglio per ciascuno dei 17 SDGs e scoprire tutti i 169 sotto-obiettivi, le pubblicazioni correlate e molto altro. Si potrà apprezzare anche quanto questi goals siano interconnessi tra loro, il che rappresenta un aspetto estremamente qualificante dell'Agenda 2030.



Attualmente l'interesse mediatico per la lotta al cambiamento climatico è abbastanza diffuso e la 'sostenibilità' è un aspetto che può influenzare l'appetibilità di un prodotto o un servizio sul mercato, qualsiasi essi siano.

Il marketing pubblicitario sta sfruttando questa crescente attenzione e su di essa si stanno costruendo nuove strategie di vendita.

Nella maggior parte dei casi le caratteristiche di sostenibilità di un prodotto o un servizio sono solo apparenti o comunque si fermano a un livello superficiale e ingenuo. Inoltre, per gran parte della popolazione la 'sostenibilità' è un argomento poco conosciuto, che non si è ancora compreso appieno. C'è molta confusione anche nei concetti di base e in alcuni casi non si comprendono ancora i motivi per cui è necessario e urgente un cambiamento.

Un esempio è che il termine 'sostenibilità' viene utilizzato come sinonimo di 'sostenibilità ambientale' ed 'ecocompatibilità', quando invece abbraccia molti più ambiti della vita dell'uomo - come si è scritto in precedenza.

È anche doveroso ammettere che andando verso una perdita del potere di acquisto del consumatore finale medio, se questo deve fare una scelta tra un brand sostenibile o uno economico, l'ecocompatibilità di un prodotto non è affatto la priorità.

Nonostante questo, personalmente credo che la direzione verso cui ci si sta dirigendo sia buona, se non altro perché il concetto di sostenibilità - per quanto ingenuo, utilizzato in modo non totalmente corretto e non compreso appieno - comincia a entrare nel vocabolario comune. I singoli consumatori e i singoli cittadini si stanno educando alla sostenibilità ambientale e nonostante questo processo sia estremamente lungo e lento, almeno è in corso.

Le azioni che si stanno compiendo, comunque, non sono sufficienti, soprattutto a livello di aziende e governi. Si è ancora molto distanti dalla decarbonizzazione, dalla riduzione delle emissioni di gas clima-alteranti e forse ancora di più dagli aspetti sociali e culturali di uno sviluppo sostenibile.

Gli aspetti qui sopra esposti sono la miccia che ha dato origine a tutto ciò che seguirà in questo elaborato di tesi.

# LA SITUAZIONE CLIMATICA ATTUALE

L'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) è un gruppo intergovernativo costituito dalle Nazioni Unite nel 1988 per gli studi sul cambiamento climatico ed è il principale organismo internazionale per la valutazione della crisi climatica.

Al punto A.1 del rapporto AR6 - WG1 Summary for Policymakers pubblicato nel 2021 si legge: "It is unequivocal that human influence has warmed the atmosphere, ocean and land. Widespread and rapid changes in the atmosphere, ocean, cryosphere and biosphere have occurred"<sup>4</sup>.

Nella prima sezione del succitato rapporto viene trattato il tema dello stato del clima attuale e, come si può osservare nel Grafico 1, vengono riportati alcuni dati riquardanti la temperatura superficiale globale.

L'elaborazione grafica (a) presenta dati ricostruiti da archivi paleoclimatici e da osservazioni dirette riguardo la temperatura superficiale globale degli ultimi 2020 anni. A tal proposito, nel rapporto si afferma che "ciascuno degli ultimi quattro decenni è stato più caldo di qualsiasi altro decennio che lo ha preceduto fino al 1850. La temperatura superficiale globale nei primi due decenni del XXI° secolo (2001–2020) è stata di 0,99 °C superiore a quella media calcolata per il periodo 1850-1900. Mentre la temperatura nel periodo 2011-2020 è stata di 1,09 °C più alta rispetto a quella media del periodo 1850-1900, con aumenti sulla terraferma maggiori rispetto a quelli oceanici".

Nel grafico (b), invece, viene presentata la variazione della temperatura superficiale globale rispetto alla media annuale del 1850. In questo modello vengono riportate anche delle simulazioni che stimano l'aumento delle temperature in risposta alle attività umane combinate a quelle naturali e l'aumento causato dalle sole azioni naturali, quali attività solare e vulcanica.

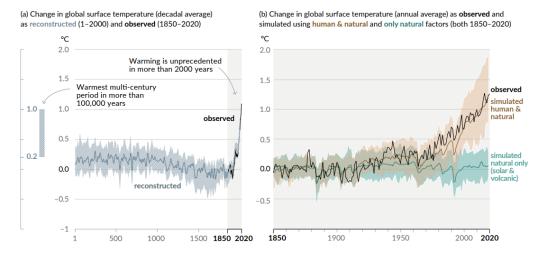


Grafico 1 La variazione della temperatura superficiale globale
Fonte: IPCC (2021). Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis.
Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on
Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\_AR6\_WGI\_SPM.pdf

<sup>4</sup> Traducendo: "Il riscaldamento dell'atmosfera, dell'oceano e della superficie terrestre sono causati in modo inequivocabile dall'attività umana. Si sono verificati cambiamenti estesi e rapidi nell'atmosfera, nell'oceano, nella criosfera e nella biosfera."

Un'altra rappresentazione grafica che trasmette in modo molto efficace e immediato l'aumento impressionante e anomalo che stanno avendo le temperature globali negli ultimi decenni è l'immagine intitolata *Climate stripes*, creata nel 2018 dal professor Ed Hawkins, scienziato esperto del clima dell'Università di Reading (Inghilterra). Di seguito si riporta un grafico a barre che è un'elaborazione di questa rappresentazione, aggiornata al 2020 (Grafico 2).

Sul sito dell'Università di Reading vengono presentate le *Climate stripes* e si può leggere che "ogni striscia rappresenta la temperatura media di un singolo anno, relativa alla temperatura media dell'intero periodo. Le sfumature di blu indicano anni più freddi della media, mentre il rosso mostra anni più caldi della media".

Scansionando il QR-code riportato a fianco si potrà visionare una pagina del sito dall'Università di Reading dalla quale è possibile selezionare l'area geografica di cui si desidera visualizzare i dati e generare tre diverse rappresentazioni grafiche.



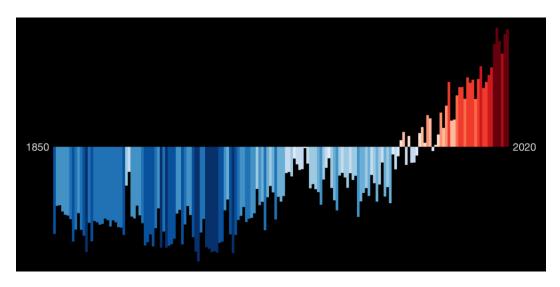


Grafico 2 Grafico a barre delle Climate stripes in riferimento alle temperature medie globali rilevate nel periodo 1850-2020.

Fonte: https://showyourstripes.info/b/globe

Sul sito <a href="https://climate.nasa.gov/">https://climate.nasa.gov/</a> si può osservare un quadro delle condizioni climatiche globali completo, sempre aggiornato e basato su dati forniti da fonti qualificate.

A fianco viene riportato il QR-code da scansionare per raggiungere velocemente il sito, dove si potrà trovare materiale di approfondimento.



Su questo sito è stato pubblicato il Grafico 3, che riporta i livelli di concentrazione di CO<sub>2</sub> nell'atmosfera durante gli ultimi tre cicli glaciali. Si noti che dall'inizio dell'era industriale, fissato convenzionalmente nel 1850, le attività umane hanno causato l'aumento delle concentrazioni atmosferiche di CO<sub>2</sub> di quasi il 49%. Infatti, se a metà del XIX secolo i livelli di CO<sub>2</sub> nell'atmosfera erano di 280 ppm, nel novembre 2021 hanno raggiunto le 417 ppm.

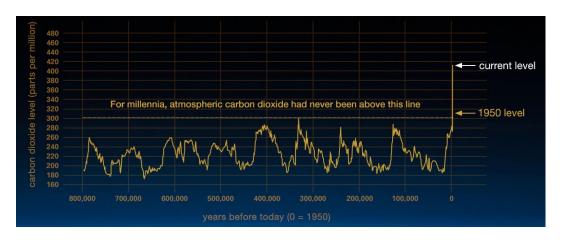


Grafico 3 Concentrazione atmosferica di CO₂ durante gli ultimi tre cicli glaciali. Fonte: <a href="https://climate.nasa.gov/evidence/">https://climate.nasa.gov/evidence/</a>

Il Grafico 4, basandosi sui dati ricavati al Mauna Loa Observatory di Hawaii, mostra l'aumento pressoché costante dei livelli di concentrazione di CO<sub>2</sub> atmosferica dal 2005 al 2022. Per rendere l'elaborazione dei dati più leggibile, non sono state tenute in considerazione le variazioni della concentrazione atmosferica di CO<sub>2</sub> dovute al normale ciclo stagionale.

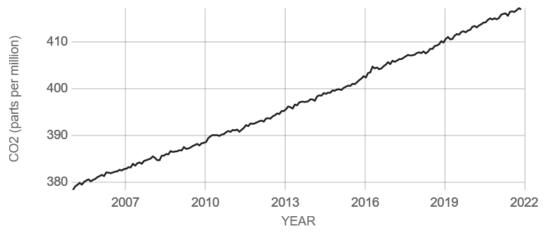


Grafico 4 Concentrazione atmosferica di CO<sub>2</sub> dal 2005 al 2022. Fonte: <a href="https://climate.nasa.gov/vital-signs/carbon-dioxide/">https://climate.nasa.gov/vital-signs/carbon-dioxide/</a>

Per approfondire il tema delle variazioni della concentrazione atmosferica di CO<sub>2</sub> durante il normale ciclo stagionale e per visionare un'animazione a riguardo, si può scansionare il QR-code a fianco, che rimanda all'articolo Watching Earth Breathe: The Seasonal Vegetation Cycle and Atmospheric Carbon Dioxide pubblicato dalla NASA nel novembre 2019.



Dal sito della NASA dedicato ai cambiamenti climatici, si possono reperire molti altri approfondimenti: grafici sull'aumento della temperatura superficiale globale, animazioni che mostrano il susseguirsi di riprese satellitari grazie alle quali si può osservare la rapida fusione del ghiaccio artico; grafici rappresentativi della variazione dei ghiacci della Groenlandia e dell'Antartico; dati sulle variazioni del livello del mare e sull'aumento della temperatura degli oceani.

Altri effetti che i cambiamenti climatici e l'impatto dell'uomo stanno provocando al nostro ecosistema sono: l'alterazione del ciclo delle precipitazioni, la riduzione della biodiversità, lo sfasamento degli equilibri tra la flora e la fauna; tutto questo è accompagnato dalla riduzione delle risorse naturali (energetiche e non).

# LE CAUSE DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI

Le principali cause di questi cambiamenti climatici globali sono l'emissione in atmosfera di gas climaalteranti a seguito di attività umane, la deforestazione, l'impermeabilizzazione del suolo, l'inquinamento delle acque e del suolo, il sovrappopolamento. Questo elenco potrebbe però essere riassunto in un'unica causa: l'insostenibilità a lungo termine dell'attuale modello di consumo.

Il Global Footprint Network definisce come impronta ecologica (EF, ecological footprint) la "misura di quanta area di terra e acqua biologicamente produttive richiede un individuo, una popolazione o un'attività per produrre tutte le risorse che consuma e per assorbire i rifiuti che genera, utilizzando la tecnologia e le pratiche di gestione delle risorse prevalenti. L'impronta ecologica è solitamente misurata in ettari globali (gha)"<sup>5</sup>.

Si possono trovare dati più approfonditi sull'EF scansionando il QR-code a lato.

Nel Grafico 5 sottostante vengono confrontate l'impronta ecologica e la biocapacità globali.

Nel 2017 l'impronta ecologica globale annuale era tale che per sostenere l'attività umana sarebbero serviti 1.73 pianeti Terra.



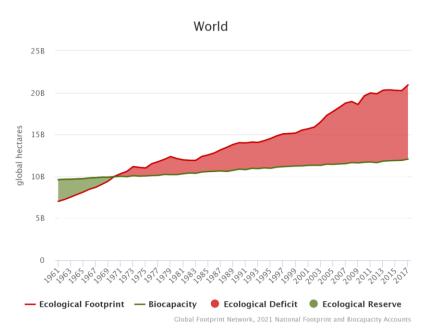


Grafico 5 Evoluzione dell'impronta ecologica e della biocapacità globali, espresse in miliardi di ettari globali (gha), nel periodo 1961-2017
Fonte: https://data.footprintnetwork.org/#/countryTrends?cn=5001&type=BCtot,EFCtot

<sup>5</sup> About the data - Ecological Footprint, https://data.footprintnetwork.org/#/abouttheData

.

L'articolo Global human-made mass exceeds all living biomass, pubblicato in Nature nel dicembre 2020, fornisce una visuale sull'Antropocene, l'epoca geologica attuale, attraverso un confronto tra la biomassa vivente globale e la massa degli oggetti inanimati prodotti dall'uomo, detta massa antropogenica.

Vengono poi messi a confronto i 'rifiuti di massa antropogenici', costituiti dagli *oggetti* che sono stati demoliti o messi fuori servizio (tra questi non viene considerata la massa mineraria estratta, ma inutilizzata).

Lo studio ha stimato i dati a partire dal 1900 e sono presentati in teratonnellate (equivalenti a 10<sup>18</sup> grammi) di peso secco o umido, a seconda che nella stima sia compresa o meno l'acqua inglobata (è bene tenere a mente che la massa degli esseri umani è circa lo 0,01% della biomassa globale).

Come si può osservare dal Grafico 6, se all'inizio del XX secolo la massa antropogenica era pari a solo il 3% della biomassa globale, nel 2020 - dopo circa 120 anni - queste due masse sono approssimativamente uguali. È importante notare che le categorie con massa antropogenica maggiore, 'concrete' e 'aggregates', riguardano proprio il settore dell'edilizia.

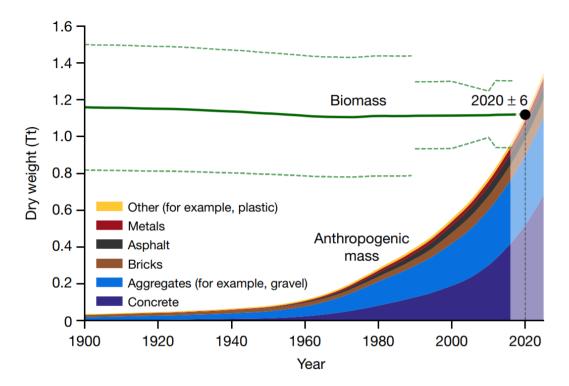


Grafico 6 Stime di biomassa e massa antropogenica dall'inizio del XX secolo su base secca Fonte: Elhacham, E., Ben-Uri, L., Grozovski, J., Bar-On, Y. M., & Milo, R. (2020). Global human-made mass exceeds all living biomass. Nature, 442–444. https://doi.org/10.1038/s41586-020-3010-5

La linea verde continua mostra il peso totale della biomassa e le linee verdi tratteggiate indicano l'intervallo di incertezza. Il peso della massa antropogenica viene tracciato come un grafico ad area, dove le altezze delle aree colorate rappresentano la massa della categoria corrispondente, accumulata fino a quell'anno. Secondo queste stime nell'anno 2020  $\pm$  6 la biomassa viene superata dalla massa antropogenica.

Nel Grafico 7, invece, si può osservare qualitativamente la percentuale della massa di rifiuti antropogenici rispetto alla massa antropogenica complessiva.

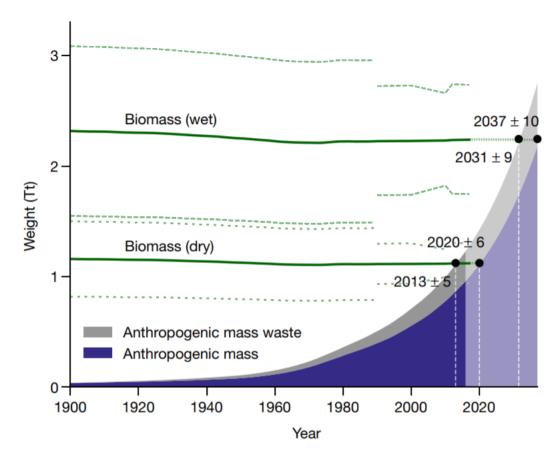


Grafico 7 Stime di biomassa (secca e umida), massa antropogenica e rifiuti di massa antropogenica dall'inizio del XX secolo

Fonte: Elhacham, E., Ben-Uri, L., Grozovski, J., Bar-On, Y. M., & Milo, R. (2020). Global human-made mass exceeds all living biomass. Nature, 442–444. https://doi.org/10.1038/s41586-020-3010-5

Le linee verdi continue mostrano il peso totale della biomassa e le linee verdi tratteggiate indicano l'intervallo di incertezza. Il peso della massa antropogenica viene tracciato come un grafico ad area. La stima del peso umido si basa sui risultati presentati in Grafico 6 e sul rispettivo contenuto di acqua dei componenti principali. Sono stati evidenziati gli anni (correlati alle loro rispettive incertezze) in cui la biomassa, secca e umida, viene superata dalla massa antropogenica, compresi o meno i rifiuti a seconda del caso.

Comunque, come afferma la meteorologa e climatologa Serena Giacomin nel documentario Infodemic: il virus siamo noi, "non servono ulteriori dati per aumentare la percezione del rischio nei confronti del cambiamento climatico". I dati a supporto della tesi secondo cui è l'uomo il responsabile dello squilibrio climatico globale sono abbondanti, le strategie di adattamento e mitigazione da intraprendere per risolvere la crisi si conoscono e le tecnologie necessarie già esistono. Si può anche affermare, però, che alcune di queste azioni intraprese con l'intento dichiarato di combattere i cambiamenti climatici potrebbero causare, al contrario, un peggioramento della situazione (si pensi per esempio ai recenti incentivi statali per le ristrutturazioni e alle ripercussioni negative che hanno avuto su diversi ambiti).

Il processo fondamentale che non si è ancora compiuto e che è l'unico vero motore per un miglioramento concreto è un cambio di abitudini nel genere umano.

Ci sono però degli ostacoli che impediscono alle persone di impegnarsi. A tal proposito lo psicologo norvegese Espen Stoknes sostiene che "la più grande barriera per risolvere i cambiamenti climatici ha uno spessore di circa 6 pollici: è lo spazio tra le nostre orecchie".

Nell'uomo le notizie sugli effetti del cambiamento climatico e sulle azioni da intraprendere possono scatenare un senso di impotenza e l'incombenza di questa minaccia può creare immobilismo e processi psicologici di negazione e deresponsabilizzazione.

È necessaria una corretta campagna di informazione, a partire dalle scuole, globalmente e a tutti i livelli, che suggerisca azioni concrete e attuabili dal singolo cittadino per contribuire al cambiamento di rotta. Queste azioni dal basso, comunque, sebbene indispensabili, non saranno mai sufficienti se non verranno combinate ad azioni strutturate su larga scala da parte di tutti i governi, come raccomandato anche dall'Agenda 2030.

Il cambiamento climatico ci impone un cambio di abitudini, ma nella concezione comune questo equivale a rinunce, arretramento tecnologico e diminuzione della qualità della vita. Vanno corrette queste false credenze, perché l'azione dal basso del singolo resta un mezzo fondamentale. Va anche preso in considerazione che il singolo consumatore è indubbiamente influenzato dal mercato, ma anche la direzione verso cui lo stesso mercato tende a svilupparsi è influenzata dalle scelte degli acquirenti. A tal proposito ritengo importante sottolineare che questa riluttanza nel modificare il proprio stile di vita è sostenuta da propaganda di chi preferisce coltivare i propri interessi economici, che verrebbero danneggiati da un effettivo cambiamento nel sistema economico-politico attuale.

Si torna così al punto di partenza: la situazione climatica è frutto dell'insostenibilità a lungo termine dell'attuale modello di consumo, quindi, la soluzione sta proprio nel cambiare il mercato. O i governi dall'alto agiscono per decarbonizzare i processi produttivi o dal basso il singolo consumatore cambia la domanda e quindi condiziona l'offerta. Sicuramente se queste due azioni lavorassero in sinergia, il processo potrebbe essere più rapido.

#### IL SETTORE DELL'EDILIZIA

Attualmente il settore dell'edilizia è molto impattante sotto diversi punti di vista, tra i quali: il consumo di suolo; il consumo enorme, non ottimizzato e spesso proveniente da fonti non rinnovabili, di risorse energetiche e non; la produzione di rifiuti; l'inquinamento di acqua e suolo; l'impermeabilizzazione del terreno. Inoltre, le città emettono una quantità di gas clima-alteranti e producono scarti di materia che non riescono più ad assorbire o gestire adequatamente.

È necessario intervenire su ognuno di questi fronti, perché agire correttamente nel settore delle costruzioni può influire notevolmente nella lotta al cambiamento climatico.

Nel libro Werner Schmidt architekt. Ecology craft invention (2013) si legge che l'aumento recente dell'interesse verso il cambiamento climatico viene sfruttato per dei ritorni economici. Per esempio, viene fatto notare come si stia investendo molto nella produzione di energia da fonti rinnovabili, ma che quest'azione non è accompagnata - come dovrebbe - da un impegno per ridurre i consumi e gli sprechi di energia.

Come sempre accade, la soluzione non è unica, le direzioni tra cui scegliere sono varie e la scelta dipende dalle specificità del caso in questione.

Una delle strade che si può intraprendere per un'architettura ecosostenibile è quella dell'applicazione dei principi esposti da Bocco nella pubblicazione *Vegetarian architecture* (2020), dei quali si riporta un estratto di seguito.

- lavorare in armonia con la natura assecondando la sua complessità, la sua variabilità e rassegnandosi all'impossibilità di controllare ogni evento e le consequenze di ogni azione;
- preferire il lavoro manuale dove possibile; perché, come afferma David Eisenberg, con la rivoluzione industriale l'intensità del lavoro svolto dall'uomo e le sue competenze specifiche sono state sostituite con la tecnologia e con un maggior impiego di risorse energetiche e non<sup>6</sup>;
- arrivare a conoscere profondamente i materiali che si pensa di impiegare, per sceglierli correttamente e sfruttarli al meglio delle loro possibilità a seconda del caso specifico che si sta trattando. Per sviluppare un buon progetto è fondamentale guardare, conoscere e comprendere ciò che ci circonda, per sfruttare al meglio le risorse che si hanno a disposizione e per prenderci cura del luogo su cui si sta intervenendo. Perché, come si dice, non esiste un materiale pessimo, ma solo un modo scorretto di utilizzarlo;
- impiegare il più possibile materiali vegetali, locali, non trasformati e rinnovabili; riducendo al minimo quelli importati o derivanti da processi industriali impattanti sull'ambiente ed evitando quelli ad alta intensità energetica.
- nello scegliere il materiale da impiegare è importante tenere in considerazione anche il fine vita del materiale stesso. Sarebbe bene preferire quelli compostabili o che possono diventare una materia prima seconda e che non sono destinati a diventare rifiuti speciali da conferire in discarica;
- preservare le competenze e i posti di lavoro della zona, tutelando imprese ed economie locali e riducendo al minimo la dipendenza da entità remote.

Questo principio va applicato ogni qual volta sia possibile, ma bisogna ricordare che per alcuni elementi la scelta migliore resta quella di avvalersi di aziende specializzate, anche se lontane dal sito di costruzione, o di utilizzare materiali energivori perché più performanti. Per esempio, dei serramenti tecnologicamente avanzati consentono di raggiungere elevate prestazioni termiche e questo permette un risparmio energetico considerevole durante la fase di utilizzo dell'edificio.

L'architettura vegetariana non bandisce i prodotti industriali a priori, ma appoggia delle scelte di progettazione sagge. Ogni elemento dovrebbe avere una tecnologia appropriata: dove necessario è bene investire energie e risorse, ma dove non lo è, le opzioni vegetali sono preferibili.

Come si potrà vedere nei prossimi capitoli, questo progetto di tesi si basa su questi principi e ogni scelta progettuale nasce da un attento processo di valutazione.

In generale, sarebbe bene: fare delle scelte che portino al raggiungimento di un basso impatto ambientale durante ogni fase del ciclo di vita dell'edificio (in termini di risorse impiegate, energetiche e non, emissioni di gas a effetto serra, produzione di rifiuti e inquinamento di suolo e acque); creare manufatti che siano in armonia con il luogo dove sorgono, che si prendano cura di esso e che abbiano una buona autonomia energetica; fare dell'architettura che sia durevole, flessibile e facilmente manutenibile e che, come viene spiegato in Vegetarian architecture, sia costituita da materiali buoni, puliti e qiusti.

Leggendo Werner Schmidt architekt. Ecology craft invention (2013) si comprende come "l'uomo con le sue azioni deve concorrere nella sostenibilità dell'edificio": l'architetto deve fare scelte progettuali corrette e il residente deve comportarsi in modo responsabile perché, con una manutenzione costante, per esempio, può allungare la vita utile del suo edificio.

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> David Eisenberg (dicembre 2009). *Beyond Green Building & Codes: Seeing a Bigger Picture*. CAZREN & YCCA, Hassayampa Inn, Prescott, Az. Una presentazione riassuntiva della conferenza è consultabile al link <a href="https://www.dcat.net/about\_dcat/David\_Eisenberg\_CAZREN\_talk\_Dec\_5\_2009.pdf">https://www.dcat.net/about\_dcat/David\_Eisenberg\_CAZREN\_talk\_Dec\_5\_2009.pdf</a>



# IL PROGETTO NEL SUO COMPLESSO

Avendo preso atto della situazione climatica globale, della necessità di ridurre il consumo di risorse non rinnovabili e consapevoli che la riduzione dell'impatto dell'uomo sull'equilibrio dell'ecosistema globale è urgente; all'interno del Politecnico di Torino un gruppo di ricerca piuttosto ampio e diversificato sta portando avanti il progetto di seguito presentato.

La ricerca si svolge nell'ambito di un'iniziativa DIST Dipartimento di Eccellenza 2018-2022, finanziata dal Ministero dell'Università e della Ricerca e prevede la costruzione di tre padiglioni da circa 20 m² ciascuno. L'obiettivo è di sperimentare l'impiego di materiali naturali e di sistemi costruttivi low-tech, evitando - se non strettamente necessari - materiali sintetici o comunque derivanti da processi industriali molto impattanti sull'ambiente.

In particolare, le tre strutture portanti dei prototipi in scala reale saranno costituite da calce-canapa, balle di paglia e da un telaio in legno tamponato con terra alleggerita.

Il progetto di ricerca comprende l'ideazione dei dettagli costruttivi, l'esecuzione di diverse simulazioni fisico-tecniche, l'analisi degli impatti ambientali, l'analisi dei costi, la ricerca dei fornitori, l'organizzazione delle fasi di cantiere e la realizzazione dei padiglioni durante dei workshop didattici. Lo scopo è quello di raggiungere elevate prestazioni termoigrometriche, acustiche e illuminotecniche, oltre che raggiungere gli standard normativi in termini di sicurezza strutturale - statica e dinamica - e di resistenza al fuoco.

L'obiettivo è dimostrare che costruire con materiali naturali e sistemi costruttivi low-tech permette di ridurre al minimo l'impatto che l'edilizia ha sull'ambiente e contemporaneamente migliorare la qualità abitativa.

Per verificare tali livelli prestazionali, la progettazione e la realizzazione dei tre padiglioni saranno accompagnate da un monitoraggio a medio termine (3-5 anni) degli stessi. Questo monitoraggio avverrà durante e dopo la costruzione, sia in modo continuativo tramite dei sensori embedded, sia attraverso delle campagne di misurazione spot che si serviranno di strumenti di misura esterni.

Tutti i dati raccolti e analizzati permetteranno, inoltre, un'analisi comparativa dei tre edifici e delle tre tecniche costruttive.

#### IL PADIGLIONE CON STRUTTURA PORTANTE IN PAGLIA

Personalmente mi sono occupata del progetto riguardante il sistema costruttivo con balle di paglia portanti.

Ho cominciato studiando alcuni volumi che trattavano l'argomento nella sua globalità. Di fondamentale importanza è stata la lettura del libro Werner Schmidt architekt. Ecology craft invention (2013), che mi ha consentito di scoprire l'architetto svizzero Werner Schmidt, sia in termini di approccio alla progettazione e al cantiere, sia per quanto riguarda le sue teorie sull'architettura. Ho approfondito anche la mia conoscenza riguardo gli esperti Gernot Minke e Barbara Jones.

In un secondo momento mi sono approcciata alla consultazione di articoli scientifici disponibili su vari portali, quali: Research Gate, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), University of Bath, Elsevier, Canada Mortgage and Housing Corporation (CMHC), Swarthmore College of Pennsylvania e Université catholique de Louvain. In bibliografia si potranno trovare gli articoli che, tra quelli letti, ho ritenuto essere maggiormente in linea rispetto ai temi proqettuali di questa tesi di laurea.

Dalla letteratura scientifica ho potuto reperire diversi tipi di informazioni, da quelle a carattere prettamente teorico, a testi che esponevano i risultati di prove di laboratorio e che descrivevano gli strumenti utilizzati per le rilevazioni, fino a presentazioni riquardanti prototipi in scala reale.

In seguito, ha avuto inizio il progetto per il padiglione e sono arrivata a sviluppare diverse ipotesi per la morfologia della pianta e per la tecnica costruttiva di solaio, pareti e copertura.

Nei capitoli successivi verranno presentate queste diverse opzioni e verranno messe a confronto in termini di quantità di materie prime impiegate, prestazioni termoigrometriche, qualità dell'illuminazione naturale, facilità di costruzione e organizzazione di cantiere.

A febbraio dell'anno in corso, in compagnia dei dottorandi Redina Mazelli e Arthur Bohn, ho avuto il privilegio di fare visita all'architetto Werner Schmidt nel suo studio di architettura a Trun, in Svizzera. L'architetto ha revisionato il progetto del padiglione in paglia, fornendo consigli preziosi sia per migliorare le soluzioni progettuali, sia per ottimizzare il processo costruttivo in cantiere.

Abbiamo anche potuto consultare gli album che Schmidt crea per ogni progetto a cui lavora. In questi fascicoli - che sono stati una fonte di conoscenza inestimabile - sono contenuti schizzi di progetto, disegni esecutivi e foto di cantiere.

Il viaggio in Svizzera è stata anche un'occasione per visitare alcune opere di Schmidt. In particolare, abbiamo potuto studiare dal vero: il complesso residenziale Bombasei (Nänikon, 2019), la residenza Wegmann-Gasser (Glarus, 2006), l'edificio Gartist GmbH (Bubikon, 2016), la residenza Braun-Dubuis (Disentis, 2001) e la ristrutturazione dell'atelier Simon Jacomet (Sumvitg, 1992). Queste visite hanno acquistato valore anche grazie alla gentilezza e all'ospitalità di alcuni proprietari, che ci hanno accolto in casa loro, raccontandoci di come fossero nati quei progetti, di come hanno preso parte alla costruzione e rispondendo alle nostre numerose domande.

Abbiamo visitato anche alcune opere degli architetti svizzeri Peter Zumthor e Gion Caminada. I collaboratori di quest'ultimo ci hanno anche consentito di visitare il loro studio, hanno condiviso con noi il loro metodo di progettazione e ci hanno illustrato alcuni lavori realizzati e altri in corso. Questa esperienza ci ha consentito, in seguito, di confrontare i due diversi approcci all'architettura di Schmidt e Caminada e di ricavare interessanti spunti di riflessione.



Figura 1 Fotografia scattata all'interno della residenza Wegmann-Gasser con il proprietario e la sua compagna.

Fonte: Anna Barbato (febbraio 2022). Glarus, Svizzera.

Successivamente il progetto di tesi è proseguito. Ho sviluppato i disegni fino al raggiungimento di un livello di dettaglio esecutivo e ho svolto i calcoli per il dimensionamento strutturale definitivo di tutti gli elementi portanti in legno<sup>7</sup>.

In seguito, ho eseguito simulazioni fisico-tecniche riguardo la trasmittanza termica delle varie stratigrafie di cui è composto l'involucro, la dispersione attraverso i ponti termici, il coefficiente medio globale di scambio termico e il fattore medio di luce diurna.

La parte finale di questo progetto di tesi riquarda aspetti legati all'organizzazione del cantiere.

In primo luogo, per agevolare la realizzazione del padiglione, ho redatto un cronoprogramma, una lista delle attrezzature necessarie e ho preparato alcune schede che dovrebbero essere utili per raccogliere alcuni risultati di monitoraggio e per la costruzione durante i workshop didattici.

Un'ultima mansione che ho svolto riguarda la ricerca dei fornitori e la gestione dei preventivi per le ballette di paglia e per gli elementi in legno.

Per quanto riguarda la fornitura della paglia ho svolto in prima persona la ricerca di aziende agricole interessate a partecipare al nostro progetto di ricerca e, successivamente, ho curato le comunicazioni - sia telefonicamente sia via e-mail - con i due fornitori scelti.

Per l'acquisto del legno ho collaborato alla ricerca delle aziende e alla gestione delle comunicazioni, ho preso parte durante i meeting online di chiarimento con i fornitori, ho redatto personalmente le tabelle per le richieste di preventivo e ho partecipato all'analisi e alla valutazione dei preventivi ricevuti raccogliendo i dati in una tabella atta al confronto degli stessi.

In entrambi i casi la mia partecipazione nella fase di acquisto è da considerarsi al netto delle mansioni amministrative.

L'impiego della paglia in edilizia sta finalmente prendendo piede anche in Italia; questo materiale, però, non rientra nella normativa<sup>8</sup> come materiale da costruzione impiegabile per le strutture portanti e sono poche le aziende e i progettisti che lo utilizzano come isolante termico.

Questa tesi di laurea si propone come obiettivo quello di contribuire nell'acquisizione di ulteriori dati, che possano agevolare l'inserimento di questo materiale nella normativa. Inoltre, spero che possa favorire la diffusione della conoscenza e l'accettazione di questa tecnica costruttiva non convenzionale ed ecocompatibile.

-

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> Dai dimensionamenti strutturali sono escluse unicamente le travi d'appoggio delle fondazioni, che fanno parte di un lavoro di tesi di dottorato svolto parallelamente dall'ingegnere Arthur Bohn.

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> In riferimento al più recente aggiornamento delle Norme Tecniche per le costruzioni, pubblicato dalla Gazzetta ufficiale della Repubblica italiana nel 2018.



#### LA STORIA DI QUESTA TECNICA COSTRUTTIVA

La paglia come materiale da costruzione impiegato per la realizzazione di strutture portanti ha una storia di oltre 130 anni. Il principio dello sviluppo di questa tecnica coincide con l'invenzione della macchina imballatrice, nella seconda metà del 1800.

Nel 1886 in Nebraska fu costruito il primo edificio, senza telaio in legno, con pareti in balle di paglia portanti. Questo consisteva in un'unica stanza adibita a scopi didattici. La tecnica originale è definita proprio tecnica Nebraska.

Nella traduzione del manuale di Barbara Jones Costruire con le balle di paglia si legge che, in attesa che arrivassero materiali da costruzione - come pietra e legno - tramite la prima ferrovia, gli europei insediatisi in questa zona eressero dei rifugi provvisori con "quello che per loro era un materiale di rifiuto: la paglia imballata, sottoprodotto del grano". Presto notarono che queste costruzioni reagivano bene sia termicamente in tutte le stagioni, sia dal punto di vista dell'isolamento acustico, infatti smorzavano il rumore del vento.

Jones afferma che la paglia come materiale impiegato nell'edilizia - come struttura portante, ma anche per altri scopi, come per esempio la realizzazione di intonaci o di coperture - venne utilizzata diffusamente fino agli anni '40 del Novecento.

Successivamente, diversi fattori, tra cui la fine della Seconda Guerra Mondiale, il conseguente boom economico, l'incremento della popolazione e la diffusione dell'uso del cemento, fecero diminuire notevolmente l'impiego della paglia - e più in generale dei materiali dell'architettura vernacolare - nel settore delle costruzioni.

L'architettura in paglia viene riscoperta solo alla fine degli anni '70, con la crisi energetica e il diffondersi degli articoli scientifici che esprimevano l'insostenibilità a lungo termine dello stile di vita che andava delineandosi tra le popolazioni degli stati cosiddetti sviluppati. Inizia quindi alla fine di questo decennio il perfezionamento della tecnica Nebraska.

#### PERCHÉ IMPIEGARE LA PAGLIA IN ARCHITETTURA

Come vedremo più dettagliatamente in seguito, la paglia è un materiale che impiegato nelle costruzioni presenta numerosi punti di forza, ma è anche una risposta concreta a due dei problemi attuali più importanti: la carenza di materie prime, dato l'eccessivo sfruttamento delle riserve naturali, e lo smaltimento di enormi quantità di rifiuti.

La paglia, infatti, è una risorsa rinnovabile annualmente e globalmente abbondante. Essendo uno scarto, o meglio un sottoprodotto, derivante dalla coltivazione dei cereali (si ottiene alla fine della maturazione delle piante quali grano, riso, orzo, avena o segale), non deve essere estratta, non va a intaccare bacini di risorse non rinnovabili e non è responsabile in modo diretto o indiretto della deforestazione. Inoltre, come si potrà leggere in seguito, l'impatto del fine vita di questo materiale è minimo.

24

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup> Steen et al. (1994). The straw bale house. Chelsea Green Publishing, Vermont/Totnes. Fonte indiretta: Minke, G., & Mahlke, F. (2005). *Building with straw. Design and Technology of a Sustainable Architecture*. Birkhäuser.

La paglia ha un impatto ambientale inferiore a quello del legno.

Un albero, infatti, impiega diverse decine d'anni per raggiungere le dimensioni adeguate a fornire legno per le costruzioni e per essere trasformato necessita di più energia rispetto alla paglia, soprattutto se ci si riferisce a prodotti industrializzati come quelli derivanti dall'incollaggio di squadrati, tavole o lamelle; i piallacci; i truciolari o i pannelli in fibra di legno.

L'impatto ecologico della paglia è minimo anche per quanto riguarda lo sfruttamento del suolo. Essendo uno scarto dell'agricoltura, non necessita di ulteriore terreno per la sua produzione rispetto a quello già dedicato alla coltivazione dei cereali. Inoltre, l'impatto del processo di trasformazione che deve subire per diventare materiale da costruzione è minimo non solo in termini di EE ed EC, ma anche perché non richiede ulteriori macchinari o nuovi spazi per impianti di lavorazione (le tecnologie attuali consentono di mietere e trebbiare i cereali e di imballare la paglia con un unico macchinario - la mietitrebbia - e di farlo sui campi stessi).

Vengono ora riportate le numerose caratteristiche che permettono di definire la paglia, compressa in balle, un ottimo materiale da costruzione:

- ha una buona **resistenza meccanica** a compressione, anche se è difficilmente standardizzabile o riassumibile in un coefficiente globalmente valido. Come afferma Bocco (2013), l'architetto Werner Schmidt, utilizzando balle jumbo con una densità lorda di 140 kg/m³ circa, considera una capacità di carico pari a 30 kN/m², ma il valore sembra essere ancora cautelativo;
- l'indice di **conduttività termica**  $\lambda$  di una balla rientra nell'intervallo 0.045-0.07 W/mK, garantendo così un ottimo isolamento termico e quindi una bassa quantità di energia operativa richiesta per il riscaldamento dell'edificio.

L'intervallo di valori qui fornito è valido indipendentemente dal posizionamento delle fibre di paglia rispetto il flusso di calore; infatti, il comportamento termico non varia molto tra le ballette posizionate di piatto o di coltello;

- alcuni studi e test sperimentali come quelli svolti dall'associazione PAKSBAB (Pakistan Straw Bale and Appropriate Building) nel 2009 nell'Università del Nevada dimostrano che le pareti in balle intonacate hanno una buona **risposta sismica**;
- l'alternarsi degli steli (elementi massivi), dei vuoti che si vengono a creare tra loro e, a livello microscopico, la presenza di cavità e micropori nella struttura interna degli steli stessi, garantiscono delle buone prestazioni di **isolamento acustico**;
- ha una buona **resistenza al fuoco**. Se la paglia sfusa ha un grado di infiammabilità molto alto, la paglia compressa reagisce meglio agli incendi. La classe di resistenza per una parete in balle di paglia intonacate su entrambi i lati è F90 (in caso di incendio viene garantita la capacità portante della parete per 90 minuti).

Queste prestazioni sono determinate in parte dalle caratteristiche di resistenza al fuoco degli intonaci e in secondo luogo da una bassa percentuale di aria, e quindi di ossigeno, all'interno delle balle compresse. Inoltre, se l'intonaco dovesse fessurare e quindi le fiamme dovessero raggiungere più velocemente la paglia, lo strato superficiale delle balle carbonizzerebbe, creando così uno strato protettivo che ostacola ulteriormente il dilagare delle fiamme;

- è **traspirante** al vapore acqueo: il fattore di resistenza al vapore μ è stato calcolato pari a 2<sup>10</sup>.

-

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup> Minke, G., & Mahlke, F. (2005). *Building with straw. Design and Technology of a Sustainable Architecture*. Birkhäuser.

- se le piante da cui deriva non sono state trattate con pesticidi è **atossica**. Grazie a questa peculiarità, al basso fattore di resistenza al vapore e all'applicazione di adeguati intonaci altrettanto traspiranti, l'architetto Werner Schmidt afferma che in questi edifici non è necessario installare la ventilazione meccanica controllata. Infatti, non ci sono sostanze nocive da espellere, la regolazione dei livelli di umidità ambientale avviene naturalmente ed è, quindi, sufficiente aprire saltuariamente le finestre per cambiare l'aria viziata dalla normale occupazione degli ambienti.

Schmidt sostiene che nei locali di servizio come bagni e cucine, se si ritiene necessario, si potrebbero utilizzare dei filtri al carbone attivo<sup>11</sup>;

Spesso, conoscere i materiali e di conseguenza impiegarli sapientemente consente di evitare l'installazione di impianti superflui, che porterebbero a sprechi sia in termini di costi che di energia per il loro funzionamento, oltre che a un maggior inquinamento elettromagnetico degli ambienti.

- le balle di paglia di una parete finita si possono rimuovere e **sostituire**. <sup>12</sup> Inoltre, possono essere **riusate** per la realizzazione di un altro edificio, **riutilizzate** per altri scopi oppure possono essere **compostate** o **bruciate**, il che se, come scritto in precedenza, le piante dei cereali da cui deriva non sono state trattate con pesticidi non provocherebbe conseguenze dannose per l'ambiente, se non il rilascio della CO<sub>2</sub> presente nella struttura molecolare degli steli;
- permette una rapidità di realizzazione eccezionale;
- conviene dal **punto di vista economico**. Il costo della paglia, soprattutto se reperita localmente, è irrisorio rispetto agli altri materiali da costruzione (considerando anche che può fungere sia da struttura portante, che da isolamento termico). In secondo luogo, vista la sua ottima conduttività termica, permette di abbattere considerevolmente i costi per il riscaldamento degli ambienti (in molti edifici è stata installata solamente una stufa a legna e, talvolta, anche questa è risultata superflua).

Werner Schmidt sostiene che impiegare tecniche semplici ed efficaci per l'involucro permette di concentrare gli sforzi economici e tecnici in quegli elementi che realmente necessitano di essere precisi, come per esempio le scale, gli impianti o gli elementi della cucina.<sup>13</sup>

Altri fattori che vanno presi in considerazione nel trattare la costruzione in balle di paglia sono:

- l'alta densità della paglia, gli strati di intonaco su entrambe le facce delle pareti e l'eventuale rete porta-intonaco (di origine non vegetale) impediscono la nidificazione di roditori o altri animali;
- la paglia non è fieno (si consulti la voce specifica al capitolo 12 *Abaco dei materiali*), quindi non ci sono rischi per chi soffre di allergia. Al massimo potrebbe causare qualche fastidio durante il cantiere, ma a edificio completato non ci saranno più polveri sottili disperse in ambiente;

<sup>&</sup>lt;sup>11</sup> Questi filtri contengono del carbone, in blocco o granulare, che viene trattato per diventare estremamente poroso, così da riuscire ad adsorbire le sostanze organiche presenti nell'aria. Essi possono poi essere puliti utilizzando il vapore o l'azoto.

<sup>&</sup>lt;sup>12</sup> Un esempio di questi processi viene esposto in modo molto dettagliato nell'articolo *The Strawbale House Project at Swarthmore College (1994-1998)* disponibile al link: <a href="https://www.swarthmore.edu/sites/default/files/assets/documents/environmental-studies/strawbale\_house\_project.pdf">https://www.swarthmore.edu/sites/default/files/assets/documents/environmental-studies/strawbale\_house\_project.pdf</a>

<sup>&</sup>lt;sup>13</sup> Bocco Guarneri, A. (2013). Werner Schmidt architekt. Ecology craft invention. Ambra/V.

- la paglia di riso, grazie al suo alto contenuto di silicio rispetto a quella degli altri cereali, è ancora meno sensibile alla marcescenza ed è più durevole; inoltre, non è impiegabile in ambito zootecnico ed è poco richiesta come combustibile nelle centrali a biomassa;
- l'impiego di ballette di paglia favorisce l'autocostruzione e quindi anche la realizzazione degli edifici durante workshop didattici. Questi ultimi favoriscono la divulgazione del sapere insieme al saper fare, sono occasioni di condivisione, crescita personale e professionale e possono contribuire a diffondere la conoscenza di questo metodo di costruzione alternativo.

Approfondendo le esperienze di lavoro degli architetti Schmidt, Jones e Minke, si arriva a comprendere che l'approccio all'architettura in paglia è completamente diverso rispetto ad altri sistemi costruttivi.

Cambia in primo luogo il processo di progettazione, perché diventa la balla di paglia l'unità di misura per definire uno spazio e questa ha delle dimensioni notevoli. Ovviamente le balle si possono tagliare e modellare, ma anche queste operazioni hanno delle limitazioni. L'architettura in paglia, quindi, porta con sé una certa rigidità distributiva, caratteristica che accomuna tutte le costruzioni modulari.

C'è poi l'ineluttabile imperfezione dovuta principalmente all'irregolarità delle balle stesse: un edificio con pareti in balle portanti avrà difficilmente dei muri perfettamente lisci e a piombo o degli spigoli retti. Gli intonaci a base di calce e di argilla, inoltre, portano con loro i segni del lavoro dell'artigiano. È pressoché impossibile ottenere delle superfici perfettamente omogenee.

A tal proposito, Barbara Jones in *Costruire con le balle di paglia* scrive che "si può buttare il metro millimetrato" quando si costruisce con questo materiale.

Un'altra caratteristica dell'architettura in paglia, che inizialmente potrebbe essere difficile da accettare, è che l'edificio si muove nel tempo, reagisce all'ambiente che lo circonda e non si può prevedere come lo farà. In *Vegetarian architecture* (2020) Bocco afferma che i dettagli costruttivi degli edifici costruiti con materiali vegetali dovrebbero riuscire ad adattarsi al cambiamento delle prestazioni dei materiali stessi e al loro decadimento nel tempo.

Molti progettisti sono riluttanti a fare affidamento sui materiali naturali in generale proprio perché ciò richiederebbe l'accettazione di un certo grado di imprecisione e imprevedibilità. Anna Heringer ha osservato che non sono "le tecnologie mancanti che ci impediscono di costruire in modo sostenibile. Né è la mancanza di consapevolezza. In realtà è la paura... della vulnerabilità e della caducità" 14.

Jones nel suo manuale afferma che la paglia può essere disarmante, perché è semplice, imprecisa, flessibile e pura. Si deve imparare ad assecondarla.

Comunque, se si riesce ad accettare e interiorizzare tutto questo, il progettista e il costruttore si possono liberare dall'ossessione per la precisione e il controllo, anche quando non necessari.

\_

<sup>&</sup>lt;sup>14</sup> Pilz A. (2015). Soziale Asthetik. Interview mit Anna Heringer. Wohnung + Gesundheit. (pp. 5-8). Fonte indiretta: Bocco Guarneri, A. (2020) *Vegetarian Architecture: Case Studies on Building and Nature*, Berlin, Jovis. (p. 17)

# Analisi degli impatti ambientali della paglia

Diversi enti e ricercatori hanno calcolato i valori di embodied energy e carbon relativi alla paglia pressata in balle, ma i risultati sono in disaccordo tra loro.

Secondo il database ICE versione 2, sviluppato dall'Università di Bath nel 2011, la paglia ha un'embodied energy EE pari a 0.24 MJ/kg e un'emissione netta di anidride carbonica EC pari a 0.01 kgCO<sub>2</sub>/kg.

Nel database Ökobaudat, sviluppato nel 2021, la paglia ha un'embodied energy EE di 1.712,80 MJ/m³ e un'emissione netta di carbonio EC negativa pari a - 127,00 kgCO<sub>2</sub>/m³.

I quattro valori appena riportati si riferiscono alle fasi del ciclo di vita da A1 a A3, quindi dalla culla al cancello.

Secondo le ricerche riportate da Bocco in Werner Schmidt architekt. Ecology Craft Invention, la paglia ha un valore di EE compreso nell'intervallo 0.18 - 0.35 MJ/kg<sup>15</sup> e un valore di EC di - 2.12 kgCO<sub>2</sub>/kg<sup>16</sup>.

Se si riportano questi dati alle ballette utilizzate per il padiglione oggetto del progetto di ricerca <sup>17</sup> si ottiene:

	1 balletta di TVTb			1 balletta di Riso di Nori				
	Peso	Volume	EE	EC	Peso	Volume	EE	EC
	kg	$m^3$	MJ	kgCO <sub>2</sub>	kg	$m^3$	MJ	kgCO₂
ICE v2	11,8		2,832	0,118	22,0		5,28	0,220
Ökobaudat		0,15	256,278	-19,002		0,2	342,560	-25,400
Minke, G., Krick, B. (2009) (min)	11,8		2,124		22,0		3,960	
Minke, G., Krick, B. (2009) (max)	11,8		4,130		22,0		7,700	
Wilhelm (2010)	11,8			-25,016	22,0			-46,64

Evrard (2015) afferma che per compilare un'analisi LCA di una balla di paglia ci sono più strade percorribili.

La prima considera la paglia come un vero e proprio co-prodotto della coltivazione dei cereali; quindi, nel calcolare gli impatti ambientali considera anche una percentuale della lavorazione della terra, della semina dei cereali e dell'eventuale irrogazione dei prodotti fitosanitari.

La seconda vede la paglia come uno scarto di produzione; quindi, tutti i flussi di energia e di carbonio in entrata sono azzerati. Si conteggiano solamente gli impatti ambientali dovuti all'imballatrice.

L'ultima opzione proposta da Evrard è una via intermedia tra le prime due. Questa tiene in considerazione che, se non impiegata come materiale da costruzione, la paglia verrebbe in parte rimescolata alla terra dei campi per contribuire a preservare la struttura del suolo e il suo contenuto organico originale. In questo caso viene considerato che alla semina successiva si dovrà spargere più fertilizzante per sopperire a questa mancanza.

Nel valutare gli impatti ambientali specifici del padiglione si potrebbero considerare diversamente i due tipi di ballette impiegate.

L'azienda Terra Viva del Tibi ha prodotto le ballette appositamente per la costruzione del padiglione, noleggiando una macchina imballatrice; inoltre sarebbe interessante capire se per la coltivazione dell'anno successivo (del 2022) abbiano dovuto spargere più fertilizzante del normale, a causa della mancanza di apporti organici derivanti dalla paglia rigirata nel terreno.

L'azienda Riso di Nori, invece, quando è stata contattata aveva già pressato la paglia in ballette e le aveva già stoccate al riparo sotto una tettoia.

-

<sup>&</sup>lt;sup>15</sup> Fonte primaria: Minke, G., Krick, B. (2009). *Handbuch Strohballenbau. Grundlagen Konstruktion Beispiele*. Straufen bei Freiburg. Okobuch.

<sup>&</sup>lt;sup>16</sup> Fonte primaria: Wilhelm (2010). Big-Bale-Solution. Berrien. BBS (letteratura grigia)

<sup>&</sup>lt;sup>17</sup> Si faccia riferimento a quanto riportato al paragrafo *Il modulo di base* del capitolo 5, *La progettazione* del padiglione

# L'ACQUA E LE BALLE DI PAGLIA

In un edificio che impiega le balle di paglia come materiale da costruzione, l'aspetto più delicato da tenere costantemente sotto controllo è l'interazione tra la paglia e l'acqua. Va prestata attenzione in tutte le fasi - durante lo stoccaggio, per tutta la fase di costruzione e durante il suo utilizzo -, sia che l'acqua si trovi allo stato liquido che di vapore.

Le principali fonti di rischio sono: acqua piovana che cade sulle balle mentre sono ancora senza intonaco; acqua allo stato liquido assorbita dall'intonaco; schizzi di pioggia che rimbalzano da terra; umidità di risalita proveniente dal terreno; condensa interstiziale che viene a crearsi per il blocco del flusso di vapore tra ambiente interno ed esterno - o viceversa - a causa di uno strato non sufficientemente traspirante.

Di seguito verranno elencate le soluzioni che esistono per cercare di evitare ciascuno dei rischi appena esposti.

Nel suo manuale, Barbara Jones scrive che non sarebbe un grande problema se durante la fase di costruzione o durante il periodo d'assestamento le facce delle balle di paglia si dovessero bagnare sotto la pioggia. Se la paglia è al riparo sotto una tettoia, un telo impermeabile o soluzioni simili, e se è rialzata dal terreno, si bagnerà solamente fino a dove il vento riuscirà a spingere l'acqua piovana e si asciugherà facilmente grazie all'azione combinata di sole e aria nei giorni successivi. 18

Nella pubblicazione *Moisture equilibrium in straw bale walls*, Arnaud Evrard e i suoi co-autori dimostrano che per evitare che l'intonaco assorba acqua proveniente dall'ambiente esterno il suo valore di assorbimento può raggiungere al massimo gli 0,005 kg/m²s².

Inoltre, per proteggere le pareti dalla pioggia anche durante la fase di esercizio, sarebbe opportuno che gli edifici avessero una copertura con ampi sporti. Jones consiglia una sporgenza di almeno 45 cm. <sup>19</sup>

Per proteggere le pareti dagli schizzi di pioggia, invece, la soluzione ottimale sarebbe rialzare di almeno 30 cm il primo corso di balle dalla quota del terreno.

Per quanto riguarda l'umidità proveniente dal terreno, la sua risalita va bloccata con la tecnica più adeguata al progetto e al sistema costruttivo specifici. Degli esempi potrebbero essere un vespaio aerato o una barriera al vapore tra il terreno e le fondazioni, tra le fondazioni e il solaio controterra o tra solaio e le pareti.

L'ultimo punto riportato dal succitato elenco di possibili rischi è sicuramente il più studiato, infatti, gli articoli scientifici che trattano l'argomento sono numerosi.

Per i materiali che costituiscono gli elementi di chiusura di un edificio in paglia, è indispensabile essere altamente traspiranti e consentire al flusso di vapore acqueo di diffondersi attraverso essi.

Infatti, se un elemento poco traspirante – ovvero una barriera al vapore - all'interno delle ballette o tra la paglia e l'ambiente esterno bloccasse il flusso di aria calda e se la temperatura fosse sufficientemente bassa, verrebbe a crearsi della condensa interstiziale che ristagnerebbe all'interno dell'elemento di chiusura.

È da ricordare che il differenziale di pressione di saturazione tra interno ed esterno è dovuto alle diverse temperature dei due ambienti, perché più l'aria è calda, più vapore acqueo riesce a trattenere. Il differenziale quindi dipende anche dall'uso e dall'occupazione dell'ambiente interno.

<sup>18</sup> Jones, B. (2011). Costruire con le balle di paglia. Manuale pratico per la progettazione e la costruzione. (III edizione). Terra Nuova Edizioni. (pp. 29-30)

<sup>19</sup> Jones, B. (2011). *Costruire con le balle di paglia. Manuale pratico per la progettazione e la costruzione.* (III edizione). Terra Nuova Edizioni. (p. 28)

In certe condizioni ambientali, come vedremo dopo nel dettaglio, alla formazione di condensa interstiziale seguirebbe la proliferazione della muffa nella paglia, che causerebbe in primo luogo il formarsi di un ambiente poco salubre per l'uomo e inoltre provocherebbe l'arrivo di insetti che, cibandosi della muffa, ridurrebbero la resistenza strutturale dell'edificio. La presenza di insetti attirerebbe a sua volta i ragni.

Nella pubblicazione Condition monitoring and durability assessment of straw bale construction (2013) Andrew Thomson e Pete Walker riportano quelli che secondo le ricerche di King e Summers sono i fattori ambientali che consentono l'attività microbica associata alla crescita della muffa: la disponibilità di sostanze nutritive; la disponibilità di ossigeno; condizioni termoigrometriche adeguate; periodi di esposizione a condizioni ambientali favorevoli sufficientemente lunghi. Tra questi fattori, quelli che si possono monitorare e quindi studiare più facilmente sono le condizioni termoigrometriche e il periodo di esposizione della paglia a tali condizioni.

Questa pubblicazione, in accordo con molte altre, afferma che il grado di rischio di germinazione e crescita di spore di muffe nella paglia dipende dalla percentuale di umidità relativa e dalla temperatura ad essa associata. Infatti, alte percentuali di umidità a basse temperature, come per esempio RH = 90% a 5 °C, non rappresentano un problema, ma la stessa umidità relativa a 20 °C costituirebbe un grosso rischio.

La ricerca concorda nel sostenere che il contenuto di umidità delle balle di paglia non dovrebbe mai superare il 15%, nemmeno durante lo stoccaggio prima del cantiere. Questo significa che il peso dell'acqua contenuta nella balla non dovrebbe essere maggiore del 15% del peso della balla stessa se fosse completamente asciutta. In altri termini, sarebbe bene che l'umidità relativa non superasse il 70% e che quindi la paglia non trattenesse più del 70% della quantità massima di vapore acqueo che l'aria può trattenere prima che condensi in acqua liquida (Jones (2011), Minke e Mahlke (2005), Thomson e Walker (2013)).



Figura 2 Prototipo per il monitoraggio di condizioni termoigrometriche di una parete in balle di paglia con intonaco interno ed esterno a base di calce.

Fonte: Thomson, A., & Walker, P. J. (2013). Condition monitoring and durability assessment of straw bale construction. In L. Braganca, M. Pinheiro, & R. Mateus (Eds.), Portugal SB13: Contribution of Sustainable Building to Meet EU 20-20-20 Targets (pp. 791-798)

Thomson e Walker, nella pubblicazione precedentemente citata, presentano un progetto di ricerca riguardo il monitoraggio delle condizioni termoigrometriche delle pareti di un piccolo edificio nel Sud-Ovest dell'Inghilterra (Figura 2).

Riportano le loro rilevazioni in un grafico sviluppato dagli esperti del Fraunhofer Institute of Building Physics di Stoccarda<sup>20</sup>: il Grafico 8 è una sua rielaborazione.

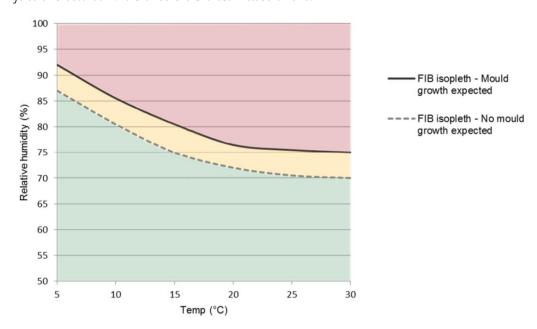


Grafico 8 Rielaborazione del grafico pubblicato da Thomson e Walker nell'articolo Condition monitoring and durability assessment of straw bale (2013)

Questo sistema grafico fornisce una *guida a semaforo* per valutare le condizioni termoigrometriche in cui la paglia si trova.

L'area verde indica le condizioni termoigrometriche nelle quali non c'è alcun rischio che la muffa si formi; l'area gialla racchiude delle situazioni di possibile rischio, in cui è necessario prestare attenzione; la zona rossa infine indica condizioni in cui è altamente probabile che cresca la muffa.

Molte misurazioni rilevate nel prototipo di Thomson e Walker si collocavano all'interno dell'area rossa; quindi, mente veniva misurato un contenuto di umidità del 28,4%, è stata effettuata un'ispezione visiva rimuovendo una porzione di intonaco.

La situazione che hanno potuto osservare era diversa da quanto si aspettassero: non era presente della muffa, sebbene la paglia scolorita ne indicasse la presenza in passato; l'intonaco era ancora ben aderente alla paglia sottostante; c'era solamente della leggera condensa sulla superficie interna dello strato di intonaco.

La situazione osservata, ben distante da quanto previsto dal grafico sviluppato a Stoccarda, conferma che la proliferazione della muffa non è legata solo al perdurare di determinate condizioni termoigrometriche, ma anche a un apporto sufficiente di nutrienti e ossigeno.

Grazie a questa ricerca sono stati confermati empiricamente i risultati precedentemente esposti delle ricerche di King e Summers riguardo le condizioni ambientali che devono verificarsi contemporaneamente e per un periodo di tempo sufficientemente lungo per consentire la proliferazione della muffa.

Lo studio di Thomson e Walker evidenzia quindi la necessità di distinguere tra la formazione di condensa interstiziale, il rischio di proliferazione di muffa e quello - molto più basso - di decomposizione della paglia e conseguente riduzione della sua capacità portante. Come si è visto, infatti, solo in determinate

31

<sup>&</sup>lt;sup>20</sup> Sedlbauer, K.; Hofbauer, W.; Krueger, N.; Mayer, F.; Breuer, K. (2011) Material specific isopleth-systems as valuable tools for the assessment of the durability of building materials against mould infestation—The "isopleth-traffic light". In Proceedings of the International Conference on Building Materials and Components, Porto, Portugal.

condizioni la muffa intacca l'integrità degli steli di paglia causando il decadimento della cellulosa e della lignina che la compongono, provocando problemi di stabilità strutturale.

Nella pubblicazione *Moisture equilibrium in straw bale walls* (2012), sulla base di una revisione della letteratura, Arnaud Evrard et al. riportano gli intervalli limite del contenuto di umidità delle balle di paglia.

Il contenuto d'acqua sotto il quale non si verifica alcuna decomposizione è considerato pari al 25% in massa (basato sul peso secco della paglia). Tra il 25% e il 39% - corrispondente a un'umidità relativa tra il 91,5% e il 95% - il tasso di decomposizione della paglia è dello 0,009% al giorno. Nell'intorno del contenuto d'acqua di compensazione libera, il tasso di decomposizione della paglia sale all'1,8% al giorno e, avvicinandosi al massimo contenuto d'acqua, il tasso sale al 2,5% al giorno.

Questi valori sono da considerarsi come indicatori generici, perché sono strettamente correlati alla temperatura: in generale il rischio è trascurabile sotto i 5 °C e altamente probabile intorno ai 30 °C.

Per mantenere un grado di umidità accettabile che concorra nell'evitare la formazione di marcescenza nella paglia, è indispensabile progettare stratigrafie che siano in grado di garantire un'adeguata permeabilità al vapore in tutto il loro spessore. Per questo motivo nel nostro progetto di ricerca - in accordo con la maggior parte degli edifici realizzati fino ad oggi - per le pareti si è scelto di associare alla paglia intonaci a base di calce per gli esterni e a base di argilla per l'interno; solaio e copertura, invece, hanno strati di chiusura costituiti da tavolati in legno massiccio avvitato e sono ben ventilati.

Nel libro Building with straw. Design and Technology of a Sustainable Architecture di Minke e Mahlke si può osservare il Grafico 9, che confronta i coefficienti di diffusione al vapore di diversi impasti per intonaco. Come si può facilmente notare, gli intonaci più permeabili sono quelli in terra molto grassi e quelli a base di calce completamente idraulica.

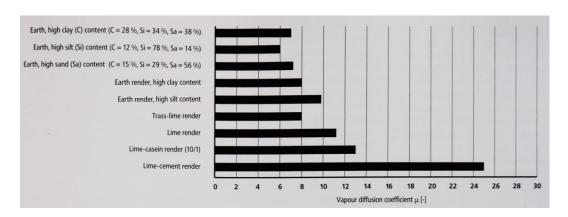


Grafico 9 Confronto tra i coefficienti di diffusione al vapore di diversi intonaci.

Fonte: Minke, G. (2000). Earth construction handbook - The building material earth in modern architecture. Southampton.

Fonte indiretta: Minke, G. & Mahlke, F. (2005). Building with straw: design and technology of a sustainable architecture. Basel: Birkhäuser. (p. 49)

Un altro vantaggio nel progettare una stratigrafia di parete altamente traspirante si ha durante la fase di asciugatura degli intonaci. Questo argomento verrà trattato nel dettaglio al capitolo 4, comunque è bene anticipare che gli alti fattori di permeabilità al vapore della paglia ( $\mu=2^{21}$ ) e degli intonaci

\_

<sup>&</sup>lt;sup>21</sup> Evrard, A., Louis, A., Biot, B., Dubois, S. (2012). Moisture equilibrium in straw bale walls. *Opportunities, Limits & Needs Towards an environmentally responsible architecture*. Conference paper, Lima, Perù.

consentono agli impasti appena stesi di asciugare anche dalla superficie interna a contatto diretto con la paglia.

Un freno al vapore, comunque, non è l'unico motivo per cui le balle si potrebbero bagnare al loro interno. Inserire elementi metallici a contatto diretto con la paglia potrebbe rappresentare un problema: quando questi vengono raggiunti dal flusso di aria calda e umida che transita attraverso gli elementi di chiusura dell'edificio, c'è un'alta probabilità che sulla superficie del metallo venga a crearsi dell'acqua di condensa

Il grado di rischio comunque dipende sempre dal clima del sito di costruzione, per esempio per Barbara Jones - che costruisce in Inghilterra - questo è un grosso problema, mentre l'architetto svizzero Werner Schmidt ha utilizzato spesso reti porta-intonaco in acciaio e chiodi a contatto diretto con le balle, ma non ha mai riscontrato problemi di questa natura.

Arnaud Evrard, nell'articolo *Thermal inertia and moisture regulation of straw bale buildings with earth plaster* (2013), evidenzia come l'aumento dell'umidità relativa della paglia, oltre che causare potenziali problemi di marcescenza e di diminuzione della capacità portante, determina anche un aumento della sua conduttività termica.

Ha dimostrato, infatti, che con un'umidità relativa pari al 65%, la conduttività della paglia arriva a misurare  $\lambda = 0.0725$  W/mK, che è del 12% superiore rispetto a quanto misurato durante i test allo stato secco.

Sulla base di queste ricerche Evrard propone di utilizzare un coefficiente di conduttività termica cautelativo pari a  $\lambda = 0.064$  W/mK, in accordo con gli studi del ricercatore Andy Shea dell'Università di Bath e con la normativa belga. Questo valore permetterebbe di tenere in considerazione l'effetto dell'umidità sulla paglia e il carattere dinamico della sua conduttività termica, tipico di tutti i materiali vegetali.

#### SOLUZIONI OFFERTE DAL MERCATO ATTUALE

Attualmente il mercato offre diversi tipi di balle di paglia, le cui dimensioni e densità dipendono dall'imballatrice con cui vengono prodotte. È comunque possibile racchiudere i molti formati offerti in quattro diverse categorie:

- le ballette di piccole dimensioni con un'altezza di 32-35 cm, una profondità di 50 cm e una lunghezza di 50-120 cm. Queste ballette genericamente hanno una densità compresa tra 80 e 120 kg/m³;
- le ballette di medie dimensioni con un'altezza di 50 cm, una profondità di 80 cm e una lunghezza di 70-240 cm. Queste ballette hanno una densità compresa tra 140 e 200 kg/m³;
- le balle jumbo con un'altezza indicativa di 70 cm, una profondità di 120 cm e una lunghezza di 100-300 cm. Solitamente queste balle hanno una densità compresa tra 140 e 200 kg/m³. Una particolare tipologia di balle jumbo sono i balloni quadri, che hanno la lunghezza pari alla profondità;
- le rotoballe, che non sono utili nel settore delle costruzioni a meno che non vengano rilavorate e non venga data loro una nuova forma. Hanno un diametro di 120-180 cm, una lunghezza di circa 120-150 cm e una densità di 200-450 kg/m $^3$ .

Oggi esistono sostanzialmente quattro modi per impiegare la paglia in edilizia. Le balle possono costituire la struttura portante, il materiale di tamponamento di una struttura costituita da travi e pilastri, possono essere fissate a una struttura esistente e fungere da cappotto termico oppure possono essere impiegate assieme al legno per la realizzazione di moduli prefabbricati.

Questo progetto di tesi riguarda un padiglione di nuova costruzione, quindi l'impiego di balle di paglia negli interventi di retrofit energetico non verrà trattato nelle pagine sequenti.

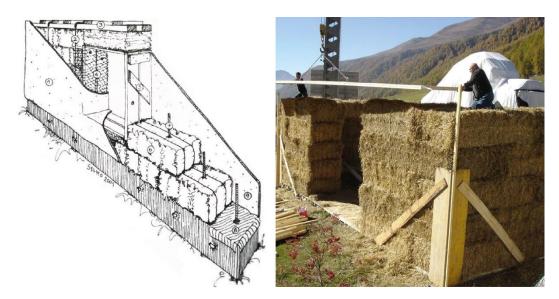


Figura 3 Schema raffigurante una versione della tecnica costruttiva in ballette di paglia portanti Fonte: Minke, G. & Mahlke, F. (2005). Building with straw: design and technology of a sustainable architecture. Basel: Birkhäuser. (p. 21)

Figura 4 Foto di cantiere durante la costruzione di una parete portante in balle jumbo di casa Fliri Fonte: Aufbau lastragende strohballenbauweise. Scaricata il 26 marzo 2021 da https://www.atelierschmidt.ch/haus-f-reschenpass

Nella Figura 3 viene riportato uno schema dell'architetto Gernot Minke, raffigurante un esempio di sistema costruttivo per una parete in ballette di paglia portanti. In questo caso sono le balle di paglia, lavorando in sinergia con i due strati di intonaco, a sostenere i carchi permanenti e variabili dell'edificio e a trasferirli alla struttura di fondazione.

Tra i vari elementi caratterizzanti questo sistema costruttivo, in figura si può notare la tecnica del pinning, ovvero un modo per fissare le ballette ai cordoli inferiore e superiore e per renderle solidali tra loro. Nel caso rappresentato in figura vengono usate a tale scopo delle barre filettate in acciaio, ma spesso si impiegano invece picchetti di legno o pali in bambù, per evitare possibili problemi di condensa causati dal contatto diretto di acciaio e paglia. Il pinning, comunque, è indispensabile solo se si impiegano ballette di piccole dimensioni, perché se si utilizzano balle jumbo il loro peso elevato e l'ampia base d'appoggio bastano per conferire alla parete la stabilità necessaria.

L'elemento identificato con il numero 2 nella Figura 3 è una cinghia, impiegata per precomprimere la parete di ballette prima della stesura degli intonaci. Durante i primi lavori anche l'architetto Werner Schmidt era solito utilizzare questa tecnica, ma è poi arrivato a capire che è uno spreco di materiale (e quindi di risorse energetiche e non) e di denaro; inoltre le cinghie possono facilmente portare alla fessurazione dell'intonaco. Schmidt ha potuto osservare che è sufficiente attendere che le pareti si comprimano naturalmente sotto il peso proprio della copertura che le sovrasta.

Osservando la Figura 3 si possono notare altri caratteri fondamentali di questa tecnica, come: il cordono superiore, o ring beam, (3) che distribuisce il carico della copertura omogeneamente su tutta la profondità della parete; la rete porta-intonaco (4) che consente l'aggrappo tra l'intonaco e gli elementi

lignei; il corretto posizionamento di piatto delle balle (6) per garantire una capacità portante maggiore e favorire una maggior penetrazione dell'intonaco tra gli steli di paglia; la necessità di proteggere la paglia da elementi che trattengono l'umidità (in questo caso una membrana (8) separa il primo corso di ballette dal cordolo di fondazione in calcestruzzo e lo protegge dall'umidità di risalita).

Attualmente le balle con funzione portante - sia di grandi sia di piccole dimensioni - vengono usate quasi esclusivamente per costruire le pareti perimetrali degli edifici; l'architetto Schmidt però nel progetto per un'azienda di giardinaggio svizzera, la Gartist GmbH, ha impiegato balle jumbo anche per realizzare la copertura.





Figura 5 Fotografia di cantiere durante la costruzione della copertura del Gartist GmbH Fonte: Lasttragende strohballenbauweise mit Kraggewolbe - Dach. Scaricata il 26 marzo 2021 da https://www.atelierschmidt.ch/qartist-bubikon

Figura 6 Fotografia di cantiere durante la costruzione della copertura del Gartist GmbH

Fonte: Album fotografico personale dell'architetto Werner Schmidt riguardo la progettazione e la realizzazione del Gartist GmbH

Come si può notare in Figura 5, per la copertura di questo edificio Schimdt ha fatto sporgere ogni corso di balle jumbo verso l'interno di circa 30 cm rispetto quello sottostante. In questo modo ha dimostrato che impiegare balle di paglia portanti anche per la copertura è possibile, nonostante questa tecnica comporti dei limiti: l'altezza totale raggiunta dall'edificio è notevole; il volume interno da mantenere alla temperatura di comfort desiderata aumenta molto e non è sfruttabile appieno; la quantità di legno che si deve impiegare è comunque importante.

Scansionando il QR-code a lato si può visitare la pagina del sito dell'architetto Werner Schmidt dedicata al progetto *Gartist GmbH*. Si potrà visionare anche un video della costruzione dell'edificio.



In Figura 4 si riporta un altro lavoro di Schmidt: casa Fliri, in provincia di Bolzano. Quest'immagine testimonia la disarmante semplicità con cui si possono erigere delle pareti portanti di un edificio. Le balle jumbo sono posate le une sulle altre, senza elementi in legno e senza connessioni in metallo: si è impiegato semplicemente un sottoprodotto agricolo pressato e legato. Buono, pulito e giusto.

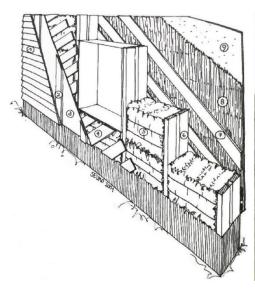




Figura 7 Schema raffigurante una versione della tecnica costruttiva con struttura portante in legno e ballette di paglia di tamponamento

Fonte: Minke, G. & Mahlke, F. (2005). Building with straw: design and technology of a sustainable architecture. Basel: Birkhäuser. (p. 22)

Figura 8 Foto di cantiere durante la costruzione di un orfanotrofio a Kaliningrad (Russia) su progetto di Gernot Minke

Fonte: Scaricata il 26 marzo 2021 da http://gernotminke.gernotminke.de/projects/

Per quanto riguarda la seconda modalità di impiego delle balle di paglia in architettura - cioè il tamponamento di una struttura di travi e pilastri - in Figura 7 si può osservare uno schema esemplificativo e in Figura 8 una fotografia della costruzione di un edificio su progetto di Gernot Minke con telaio portante in legno e tamponamento in ballette di paglia.

Per realizzare la struttura portante, il materiale che meglio si combina con la paglia, grazie alla sua buona traspirabilità, è il legno; ma ci sono esempi che vedono impiegati sia il calcestruzzo armato, sia l'acciaio. Queste alternative, tuttavia, risultano incoerenti con le motivazioni di sostenibilità ambientale che solitamente spingono progettisti e clienti a scegliere di impiegare la paglia come materiale da costruzione. Inoltre, come descritto nel paragrafo L'acqua e le balle di paglia, il contatto tra l'acciaio e la paglia causa seri rischi di formazione di condensa interstiziale.

Un ulteriore sistema costruttivo prevede l'utilizzo di moduli prefabbricati per la realizzazione di pareti, solai e coperture. Questi solitamente hanno una struttura in legno lamellare o in pannelli Cross-Lam e un tamponamento in paglia (degli esempi vengono mostrati nelle Figure 9 e 10).





Figura 9 Foto di cantiere di una casa unifamiliare costruita impiegando moduli prefabbricati di parete con struttura portante in legno lamellare e tamponamento in ballette di paglia Fonte: Anna Barbato (2022). Progetto e direzione lavori dello studio Arch-ES di Alice Biasia e Sara Caliaro. Camisano Vicentino (VI).

Figura 10 Esempio di modulo prefabbricato di parete progettato da Werner Schmidt con struttura in legno Cross-Lam e tamponamento in balle di paglia, per uno spessore totale di 80 cm Fonte: Bocco, A. (2014). Architect Werner Schmidt's Straw-Bale Construction.



La caratteristica indispensabile che devono avere gli intonaci di un edificio che impiega la paglia come materiale da costruzione – come è già stato scritto nel paragrafo *L'acqua e le balle di paglia* - è la permeabilità al vapore acqueo. Per questo motivo al padiglione verranno applicati intonaci a base di calce idraulica per l'esterno e di argilla per l'interno.

Un ulteriore compito che devono espletare è garantire la tenuta all'aria dell'involucro, nonostante il raggiungimento di questo obiettivo dipenda anche da una corretta gestione dei giunti quali infissi e scatole di derivazione elettrica.<sup>22</sup>

Di seguito verranno esposti consigli pratici per preparare dei buoni impasti e stendere correttamente gli intonaci. Le nozioni esposte derivano dalla letteratura scientifica di settore e da consigli di architetti e artigiani esperti in materia, conosciuti personalmente.

#### LA PREPARAZIONE DEL FONDO

Nel libro Werner Schmidt architekt. Ecology Craft Invention si legge che, prima di iniziare a stendere l'intonaco, sarebbe opportuno attendere dalle 2 alle 8 settimane dopo l'assestamento delle balle. Questo lungo periodo di attesa garantirebbe il completo scorrimento degli steli di paglia gli uni sugli altri e quindi contribuirebbe a ridurre il rischio di fessurazione dell'intonaco a causa del movimento della paglia durante i primi mesi di vita dell'edificio.

Un'altra considerazione è legata alla scelta del materiale: l'architetto Schmidt, come si riporta nel libro precedentemente citato, ipotizza<sup>23</sup> che le ballette costituite da frammenti di steli di paglia - tipicamente usate per le lettiere degli animali - diano risultati migliori dal punto di vista dell'isolamento termico, ma da queste l'intonaco potrebbe staccarsi con più probabilità; al contrario, le ballette formate da steli di paglia interi potrebbero offrire prestazioni termiche inferiori, ma dovrebbero garantire un aggrappo migliore per l'intonaco.

Prima di iniziare a stendere l'intonaco è preferibile rasare le balle utilizzando, per esempio, una sega a nastro o un decespugliatore. Questo, come riporta Barbara Jones nel suo manuale, comporta tre vantaggi:

- in caso di incendio, eliminando gli steli sporgenti, si riduce la velocità di propagazione delle fiamme;
- diminuendo la superficie di paqlia esposta si riduce la quantità di impasto necessaria per intonacare;
- si può approfittare di questa operazione per correggere eventuali irregolarità della parete, come fuori piombo o spanciature.<sup>24</sup>

Dopo aver rasato le pareti, l'architetto Alice Biasia - esperta di costruzioni in paglia che opera prevalentemente nella pianura padana veneta - consiglia di stendere una membrana impermeabilizzante liquida sugli eventuali elementi metallici, così da evitare che la ferramenta sia a contatto diretto con gli intonaci e ridurre quindi il rischio di formazione di condensa interstiziale.

22

<sup>&</sup>lt;sup>22</sup> Bocco Guarneri, A. (2013). Werner Schmidt architekt. Ecology craft invention. Ambra/V.

L'ipotesi avanzata dall'architetto Werner Schmidt è stata confermata da studi sperimentali inediti di Craig White, come ha affermato Pete Walker durante la conferenza NOCMAT 2022: The International Conference on Non-conventional Materials and Technologies (giugno 2022).

Maggiori dettagli riguardo l'evento sul sito https://nocmat.lasaweb.org/

<sup>&</sup>lt;sup>24</sup> Jones, B. (2011). *Costruire con le balle di paglia. Manuale pratico per la progettazione e la costruzione*. (III edizione). Terra Nuova Edizioni. (p.75)

Di seguito si riporta una foto esemplificativa riguardante un cantiere per la realizzazione di una casa unifamiliare (Figura 11). Si possono osservare i controventi di acciaio e le piastre di collegamento tra i moduli prefabbricati di parete e la trave di cordolo coperti da suddetta pittura.





Figura 11 Foto di un cantiere edile per una nuova costruzione nel comune di Camisano Vicentino (VI). Dettaglio della membrana impermeabilizzante liquida sugli elementi metallici.

Figura 12 Foto di un cantiere edile per una nuova costruzione nel comune di Camisano Vicentino (VI). Dettaglio delle arelle fissate sul cordolo inferiore di legno del modulo prefabbricato di parete e sulla trave rovescia di fondazione.

Un'ulteriore operazione che precede l'intonacatura è la posa di un elemento che possa favorire l'aggrappo dell'intonaco.

Una possibile soluzione potrebbe essere quella di impiegare stuoie di canna palustre monostrato, dette anche arelle o incannucciato (in Figura 12 se ne riporta un esempio). Queste vanno fissate su tutti gli elementi lignei che andranno ricoperti dall'intonaco e, preferibilmente, sulle facce delle balle che presentano gli steli di paglia paralleli alla superficie della parete, come accade negli angoli. Le arelle vengono fissate con una semplice spara-graffette manuale.

Al contrario, le teste degli steli di paglia garantiscono di per sé stesse un aggrappo ottimale; infatti, molti esperti, tra cui Barbara Jones, concordano nel definire superflua l'aggiunta di reti porta-intonaco sulle pareti costituite da balle di paglia poste di piatto.

L'architetto Werner Schmidt, durante la revisione del progetto per il padiglione, ha consigliato di separare il legno dall'intonaco posando del TNT (tessuto non tessuto) prima delle arelle. Il legno massiccio, essiccando, con il passare del tempo tende a muoversi e a ritirarsi, provocando quasi certamente la fessurazione dell'intonaco. Il TNT aiuta a ridurre tale rischio, che è molto elevato soprattutto per i lati del padiglione rivolti a Sud e a Ovest.

#### LA RETE PORTA-INTONACO

È consigliabile posare la rete porta intonaco tra la prima e la seconda mano per ridurre il rischio di formazione di crepe a seguito del ritiro dell'impasto durante l'asciugatura e per migliorare la resistenza a trazione e a flessione dell'intonaco. La rete assume un ruolo importante soprattutto quando l'intonaco ha uno spessore importante e la paglia ha una funzione strutturale.

Un punto delicato in tutti gli edifici è quello in prossimità dei vertici dei fori-finestra. In queste zone, infatti, viste le difformità sia morfologiche che di materiale, il rischio che l'intonaco crepi è ancora maggiore. È opportuno quindi fissare la rete porta-intonaco anche a 45°.



A fianco si riporta una fotografia di una parete con tamponamento in ballette, intonaco di fondo in calce-canapa, rete porta-intonaco in fibra di vetro (posata solo verticalmente) e intonaco di finitura a base di cocciopesto.

Sono ben evidenti la crepa e i problemi di eccessivo assorbimento di acqua meteorica che ne conseguono.

Figura 13 Anna Barbato, Fattoria didattica, Camisano Vicentino (VI) 25 maggio 2022

Esistono diversi tipi di rete porta-intonaco, con prestazioni, costi e reperibilità specifiche. Le più diffuse ed economiche sono le reti in plastica, in fibra di vetro e quelle in acciaio zincato<sup>25</sup>; alternative più ecosostenibili sono le reti composte da fibre di origine vegetale come, per esempio, le reti di juta.

Se si sceglie di impiegare reti porta-intonaco di juta, però, la maglia deve essere sufficientemente larga - 1x1 cm almeno - così da consentire la penetrazione dell'impasto e una buona coesione con lo strato sottostante la rete.

L'architetto Werner Schmidt, durante la revisione del progetto per il padiglione, ha suggerito di impiegare reti di juta solamente sul lato caldo delle ballette (cioè verso l'interno). L'eventuale formazione di condensa interstiziale andrebbe a danneggiare la rete di fibre vegetali provocando problemi di marcescenza.

Anche l'architetto Alice Biasia consiglia di proteggere la rete di juta dall'umidità impermeabilizzandola con caglio animale. La tecnica prevede di intingere la rete nel caglio, stenderla su una superficie orizzontale pulita (come, per esempio, un telo di plastica a terra) e farla asciugare parzialmente. Nel momento in cui non gocciola più, la rete va appesa al sole e mantenuta tesa finché non sarà completamente asciutta. Alla fine del processo la juta risulterà semirigida e sarà pronta per essere posata.

È probabile che il caglio emani odore per i primi tempi, quindi sarebbe consigliabile che lo strato di intonaco che ricopre la rete fosse abbastanza spesso.

Benefici simili a quelli che si ottengono inserendo una rete porta-intonaco si hanno miscelando agli impasti della paglia sminuzzata (solitamente questa tecnica viene impiegata negli intonaci a base di argilla). Distribuendo omogeneamente le fibre, queste vanno a sovrapporsi le une alle altre, creando una maglia resistente alle forze di trazione, di flessione e di ritiro.

Secondo Minke però non va aggiunta paglia nella prima mano di intonaco, perché gli aggregati organici ne rallenterebbero l'asciugatura e di conseguenza la superficie delle ballette a contatto diretto con l'impasto resterebbe bagnata troppo a lungo. In questo caso si asseconderebbe la formazione di condensa e quindi di muffa.<sup>26</sup>

-

<sup>&</sup>lt;sup>25</sup> Si vedano le considerazioni nel paragrafo *L'acqua e le balle di paglia* riguardo le reti porta-intonaco metalliche e i rischi di formazione di condensa interstiziale.

<sup>&</sup>lt;sup>26</sup> Minke, G., & Mahlke, F. (2005). Building with straw. Design and Technology of a Sustainable Architecture. Birkhäuser.

#### LA PREPARAZIONE DEGLI IMPASTI

Per facilitare la presa dell'intonaco sulle balle di paglia, la prima mano dovrebbe essere più grassa. Per gli intonaci in calce, quindi, il primo strato dovrebbe contenere una percentuale maggiore di grassello; mentre gli intonaci in terra dovrebbero avere una percentuale di argilla più alta.

Jones nel libro *Costruire con le balle di paglia* afferma che il primo strato di intonaco esterno può comunque essere a base di argilla. Questo consentirebbe di correggere alcune irregolarità delle pareti impiegando una quantità inferiore di calce, il che sarebbe un risparmio sia economico sia di impatto ambientale<sup>27</sup>.

Nello stesso libro, Jones afferma che gli inerti degli intonaci interni possono avere una granulometria più fina rispetto a quelli esterni, che invece possono raggiungere anche 10 mm di diametro. Questo perché gli intonaci più grossolani resistono meglio agli agenti atmosferici.

Nel creare le miscele a base di calce è utile ricordare che l'acqua in eccesso evaporerà durante la fase di asciugatura, causando il ritiro e quindi la fessurazione dell'intonaco; per questo motivo bisogna aggiungerne con cautela poco per volta e solamente la quantità indispensabile. Al contrario, l'aggiunta di grassello conferisce la plasticità necessaria per assorbire le vibrazioni e ridurre il rischio di fessurazione. Le prestazioni dell'intonaco miglioreranno ulteriormente se il grassello contiene una percentuale di magnesio.

Jones scrive anche che gli impasti vanno lavorati e battuti fino a ottenere un composto che resti attaccato a una cazzuola capovolta; la battitura, infatti, aumenta la plasticità del composto, che è una qualità fondamentale per l'intonaco.

#### INTONACI A BASE DI CALCE

Gli intonaci a base di calce vengono solitamente impiegati per gli esterni, in quanto - rispetto agli intonaci a base di argilla - resistono meglio agli agenti atmosferici, sono più impermeabili all'acqua e hanno una migliore resistenza meccanica.

Questo però rappresenta un compromesso, perché utilizzare intonaci a base di calce per gli esterni e a base di argilla per gli interni va contro uno dei principi basilari per una corretta progettazione. Infatti, solitamente nelle stratigrafie dei componenti d'involucro, procedendo progressivamente dall'interno verso l'esterno, si impiegano materiali aventi una resistenza al vapore acqueo sempre minore.

Nell'articolo "Moisture properties of plaster and stucco for straw bale buildings" (John Straube, 2000) vengono riportati degli studi che testano diverse miscele di intonaco e confrontano i risultati di permeabilità e permeanza al vapore acqueo e assorbimento per capillarità di acqua allo stato liquido.

I diversi impasti studiati - riportati in Tabella 1 - sono a base di cemento, calce-cemento, calce aerea e argilla. Altre varianti comprendono l'applicazione di pitture idrorepellenti, rivestimenti elastomerici a base acrilica, pitture silossaniche e olio di lino a doppia cottura.

La ricerca - come si può notare dai risultati mostrati in Tabella 2 - dimostra che:

- più la percentuale di calce aumenta rispetto a quella di cemento, più gli intonaci sono permeabili al vapore acqueo e più l'assorbimento capillare di acqua aumenta;
- la calce viva ha prestazioni peggiori rispetto alla calce spenta, sia per quanto riguarda la permeabilità al vapore, sia per l'assorbimento di acqua;
- l'olio di lino (nonostante sia stato testato solamente su impasti contenenti anche cemento) riduce leggermente l'assorbimento d'acqua, ma abbassa anche la permeabilità al vapore.

2-

<sup>&</sup>lt;sup>27</sup> La calce, infatti, deriva comunque da un processo di cottura ad alte temperature.

Test Label	Description			
Α	1:3 Cement: Sand			
В	1:1:6 Cement: Lime: Sand			
С	1:2:9 Cement: Lime: Sand			
D	1:3 Type S slaked Lime: Sand			
E	Clay: Sand "earth plaster"			
	Variations			
Al	As A with an elastomeric paint			
A2	As A with siloxane treatment			
ВІ	As B with linseed oil treatment			
B2	As B with an elastomeric paint			
В3	As B with a siloxane penetrating repellent treatment			
B4	As B with calcium stearate (2% by weight of cementitous components			
B6	As B with alkyd (oil) primer and paint			
B5	As B with latex primer and paint			
B6	As B with oil paint and primer			
CI	As C with linseed oil treatment treatment			
DI	As D but with slaked Type S quicklime			

Tabella 1 Miscele di intonaci testate

Fonte: Straube, J. (2000). Moisture properties of plaster and stucco for straw bale buildings. CMHC Canada Mortgage and Housing Corporation. Research Division.

https://eppdscrmssa01.blob.core.windows.net/cmhcprodcontainer/sf/project/archive/publications/rht-penrt/62631.pdf

Sample	t [mm]	Vapour Permeance [ng/Pa•s•m²]	Permeability [ng/Pa•s•m]	Water Absorption [kg/m² •s 1/2]
Cement:Sand				
A - I:3 datum	43.5	39	1.7	0.038
A1 - 1:3 elastomeric	39.5	40		0.0085
A2 - 1:3 siloxane	41.0	40		0.0004
Cement:Lime:Sand				
B – 1:1:6 datum	35.0	295	10.3	0.092
BI - I:I:6 linseed	36.0	223	8.0	0.067
B2 - I:I:6 elastomeric	32.5	244	_	0.015
B3 - I:I:6 siloxane	41.0	203	8.3	0.0006
B4 - 1:1:6 calcium stearate	53.5	81	4.3	0.101
B4 – 1:1:6 calcium stearate	44.0	142	6.2	0.083
B4 - 1:1:6 calcium stearate	53.5	41	2.2	0.093
B5 - I:I:6 latex paint	36.5	203	_	0.020
B6 – 1:1:6 oil paint	40.0	41	_	0.014
Cement:Lime:Sand				
C - 1:2:9 datum	50.5	295	14.9	0.110
C1 - 1:2:9 linseed	50.5	259	13.1	0.105
Lime:Sand				
D - I:3 Datum	33.5	565	18.9	0.127
D - I:3 Datum	35.5	529	18.8	0.173
DI – I:3 Quicklime	32.0	459	14.7	0.161

Tabella 2 Risultati riguardanti permeabilità e permeanza al vapore acqueo e assorbimento per capillarità di acqua allo stato liquido di diversi campioni di miscele di intonaci, in riferimento alla tabella precedente

Fonte: Straube, J. (2000).

## LA STESURA E IL TEMPO DI ASCIUGATURA DEGLI INTONACI A BASE DI CALCE

Gestire correttamente i tempi di stesura e di asciugatura delle diverse mani è una questione molto delicata. Il tempo di asciugatura deve essere sufficientemente lungo perché l'impasto carbonati<sup>28</sup> correttamente dall'interno all'esterno, ma anche relativamente breve perché la superficie delle balle a contatto diretto con l'impasto non rimanga bagnata troppo a lungo.

Per far sì che questi processi avvengano regolarmente, Minke suggerisce che la prima mano di intonaco non contenga aggregati organici e sia abbastanza sottile. In questo modo la diffusione del vapore dovrebbe essere facilitata e i composti dovrebbero asciugarsi velocemente.

Per facilitare una corretta carbonatazione, Jones scrive che durante l'asciugatura di ciascuna mano si dovrebbe mantenere umida la superficie esterna utilizzando un vaporizzatore. Così facendo, la CO<sub>2</sub> in soluzione nell'acqua stessa viene trasportata in profondità, permettendo anche agli strati più interni di indurire.

Visto il ridotto coefficiente di diffusione al vapore della paglia ( $\mu = 2$ ) <sup>29</sup>, questa permette il transito dell'aria e quindi di CO<sub>2</sub>, concorrendo a una corretta asciugatura dell'intonaco, dall'interno verso l'esterno.

Le mani di intonaco successive alla prima vanno stese dopo che quella precedente è completamente indurita e dopo aver nuovamente inumidito la superficie con il vaporizzatore, come si è motivato nella nota a piè di pagina 28.

Per quanto riguarda l'ultima mano di intonaco, Minke in *Building with straw* sconsiglia l'aggiunta di fibre vegetali, o comunque raccomanda di mantenere delle percentuali molto basse. Secondo l'esperienza di Jones, inoltre, gli inerti presenti nelle miscele per gli strati di finitura dovrebbero essere più fini. L'ultima mano va pressata e lavorata con un frattazzo per comprimere l'impasto, rendere liscia e più omogenea la superficie ed eliminare le bolle d'aria rimaste intrappolate in profondità. Jones scrive che è importante che il frattazzo sia di legno e non di acciaio, così da lasciare l'intonaco traspirante all'aria. Il metallo sigillerebbe la superficie esterna, impedendo al vapore acqueo - e di conseguenza alla CO<sub>2</sub> - di penetrare per completare il processo di carbonatazione della calce.

Dopo aver terminato la stesura di tutte le mani, l'intonaco deve essere protetto per alcuni giorni dalla luce diretta del sole, da forti piogge e dal vento; in questo modo si eviterà un'essiccazione prematura della faccia esterna. Inoltre, per circa tre mesi, sarebbe auspicabile protegge le pareti anche dal gelo. Una soluzione per favorire delle condizioni termoigrometriche adeguate potrebbe essere quella di appendere all'impalcatura o alla copertura dei teli di plastica o reti di juta. Se le condizioni meteorologiche lo rendessero necessario, la juta si potrebbe bagnare, in modo da creare un ambiente sufficientemente umido.

<sup>&</sup>lt;sup>28</sup> La carbonatazione è il processo chimico che avviene durante l'asciugatura e quindi l'indurimento della calce aerea in pasta, detta anche grassello. Come riportato dalla Calchèra di San Giorgio in *Prontuario di cantiere* (2012):

<sup>&</sup>quot;La calce bagnata e spenta (idrato di calcio Ca(OH)<sub>2</sub>), asciugando, perde acqua ed assume anidride carbonica (CO<sub>2</sub>) dall'aria, mutando la sua struttura in carbonato di calcio (CaCO<sub>3</sub>). La calce, carbonatando, lapidifica in un minerale uguale alla pietra originaria messa nei forni prima della cottura. Nota: è risaputo che la calce in grassello abbisogna della giusta quantità d'acqua per dar inizio al processo di carbonatazione (indurimento). Malte di calce troppo secche o sottoposte al repentino assorbimento della propria acqua d'impasto su fondi troppo asciutti, sono destinate a "bruciarsi" inibendo l'innesco del processo di indurimento. Il consiglio: si bagnino i fondi prima dell'applicazione delle malte."

<sup>&</sup>lt;sup>29</sup> Minke, G., & Mahlke, F. (2005).

## LATTE DI CALCE

Il latte di calce è un composto molto liquido formato da grassello di calce in soluzione con acqua.

Jones sostiene che è molto importante stendere cinque mani molto sottili di latte di calce dopo che l'intonaco esterno in calce è completamente asciutto. Grazie alle reazioni chimiche che avvengono durante la carbonatazione della calce contenuta nel grassello, le crepe superficiali verranno riempite. Infatti, quando l'idrossido di calcio (Ca(OH)<sub>2</sub>) reagisce con l'anidride carbonica si trasforma in carbonato di calce (CaCO<sub>3</sub>), una molecola molto più grande che riesce a colmare le piccole fessure dell'intonaco.

Il latte di calce può essere applicato periodicamente per manutenere l'edificio durante la fase di esercizio. Per le pareti meno esposte Jones consiglia di stenderlo - con l'aggiunta opzionale di pigmenti naturali - ogni cinque anni, mentre per le altre, come per esempio quelle orientate verso sud, andrebbe fatto più spesso.

Per la durabilità di tutti gli edifici il contributo dell'azione dell'uomo è determinante.

#### INTONACI A BASE DI ARGILLA

Gli intonaci a base di argilla vengono impiegati quasi esclusivamente per gli ambienti interni. Si potrebbero stendere all'esterno solo se la parete fosse ben protetta dagli agenti atmosferici, ma l'impiego esterno viene solitamente sconsigliato.

Il metodo di stesura dell'intonaco è molto simile a quello dell'intonaco in calce. Ogni mano deve essere stesa quando la precedente è completamente asciutta e lo spessore di ciascuna deve essere sufficientemente sottile per permettere all'impasto in profondità di asciugare correttamente.

La miscela per l'ultima mano solitamente contiene inerti più fini, così da ottenere una superficie più liscia. Per un fattore puramente estetico l'ultimo strato può incorporare basse percentuali di diversi tipi di inerti, di piccoli fiori o altro - alcuni esempi vengono riportati nel paragrafo successivo - oppure possono essere aggiunti ossidi naturali per ottenere diverse sfumature di colore.

Se trattato con oli naturali, l'intonaco può essere usato anche in ambienti umidi come per esempio bagni e cucine.

Evrard nell'articolo "Thermal inertia and moisture regulation of straw bale buildings with earth plasters" (2013) studia gli effetti dell'intonaco a base di argilla - steso su pareti in paglia - sulle condizioni termoigrometriche degli ambienti interni e li confronta con i risultati ottenuti da pareti aventi stratigrafie composte da materiali usati più diffusamente, come XPS, calcestruzzo e cartongesso.

L'intonaco a base di argilla garantisce un'elevata inerzia termica e aumentandone lo spessore - fino a raggiungere anche 15 cm - le prestazioni migliorano. Questa caratteristica oltre a permettere un risparmio energetico per l'eventuale riscaldamento continuo degli ambienti, riduce gli effetti dei picchi di temperatura, aumentando così il comfort termico in regime sia invernale, sia estivo.

Un ulteriore pregio degli intonaci a base di terra è che contribuiscono a regolare l'umidità interna degli ambienti.

L'architetto Werner Schmidt, revisionando il progetto di ricerca, ha consigliato uno stato di intonaco interno da 6 cm totali di spessore.

L'architetto Alice Biasia opera in Pianura padana e ha molta esperienza sulle costruzioni in paglia. Dopo anni di lavoro è arrivata alla conclusione che se, per svariati contrattempi, si dovessero stendere gli intonaci interni a base di argilla in autunno inoltrato sarebbe bene prendere delle precauzioni particolari. Visti il clima particolarmente umido dove opera - che allunga notevolmente i tempi di asciugatura dell'intonaco - e la vicinanza dei cantieri ai campi coltivati a frumento, il rischio che insetti fitofagi dei cereali da paqlia depongano le uova nelle pareti è abbastanza elevato.

Una volta che tutte le mani di intonaco sono state stese, Biasia ritiene opportuno procedere con un trattamento "anti-larve della paglia". Questa operazione consiste nel sigillare l'edificio e liberare nell'aria interna attraverso un fumogeno un trattamento insetticida a base di piretro<sup>30</sup>. L'edificio deve restare chiuso per qualche giorno, così da concedere il tempo necessario al trattamento per agire. Se non si dovesse intervenire preliminarmente, con l'arrivo della primavera le conseguenze sarebbero spiacevoli: le larve, trasformatesi in insetti adulti, uscirebbero dalle pareti forando l'intonaco e infestando l'abitazione.

## ESEMPI DI INTONACI DI FONDO E DI FINITURA



Composizione: intonaco a base di argilla, miscelato con paglia sminuzzata.

Realizzazione: impasto dosato in situ utilizzando terra scavata in cantiere. Steso a mano.

Impiego: intonaco di fondo interno, su pareti con paglia di tamponamento.

Figura 14 Anna Barbato, Cantiere per la realizzazione di tre case a schiera, Ecovillaggio Panta Rei, Passignano sul Trasimeno (PG). 30 settembre 2016



Composizione: intonaco a base di calce, miscelato con canapulo.

Realizzazione: impasto dosato in situ. Steso utilizzando cazzuole durante un cantiere didattico con il team studentesco FoRTI del Politecnico di Torino.

Impiego: termointonaco di fondo interno, su pareti in pietra.





Composizione: intonaco a base di argilla.

Realizzazione: impasto predosato in azienda. Spruzzato utilizzando un'intonacatrice e steso con un frattazzo metallico.

Impiego: intonaco di fondo interno, su pareti con paglia di tamponamento.

Figura 16 Anna Barbato, Cantiere per la realizzazione di una casa unifamiliare, Camisano Vicentino (VI)
11 novembre 2021

<sup>&</sup>lt;sup>30</sup> Il piretro è un insetticida di origine vegetale, comunemente usato nell'agricoltura biologica.



Composizione: intonaco a base di calce.

Realizzazione: impasto predosato in azienda. Spruzzato utilizzando un'intonacatrice e steso con un frattazzo metallico.

Impiego: intonaco di fondo esterno, su pareti con paglia di tamponamento.

Figura 17 Anna Barbato, Cantiere per la realizzazione di una casa unifamiliare, Camisano Vicentino (VI) 24 febbraio 2022



Composizione: intonaco a base di argilla.

Realizzazione: impasto dosato in situ utilizzando argilla locale di cava lavorata con la molazza. Spruzzato con un'intonacatrice e frattazzato con una spugna rotante.

Impiego: intonaco di finitura interno, su pareti con paglia di tamponamento e impianto di riscaldamento radiante verticale.

Figura 18 Anna Barbato, Residenza privata, Camisano (VI) 25 maggio 2022



Composizione: intonaco a base di calce.

Realizzazione: impasto predosato in azienda. Steso a mano utilizzando una spatola e lavorato con un frattazzo metallico.

Impiego: intonaco di finitura interno, su pareti con paglia di tamponamento

Figura 19 Anna Barbato, Residenza privata, Camisano (VI) 25 maggio 2022



Composizione: Intonaco di finitura a base di cocciopesto, su un intonaco di fondo a base di calce e canapulo.

Realizzazione: impasti dosati in situ. Spruzzati utilizzando un'intonacatrice.

Impiego: steso su pareti con tamponamento in paglia e pilastri in calcestruzzo armato rivestiti con celenit e fibra di legno.

Figura 20 Anna Barbato, Fattoria didattica, Camisano (VI) 25 maggio 2022



Composizione: intonaco a base di argilla con frammenti di vermiculite e paglia sminuzzata.

Realizzazione: impasto dosato in situ utilizzando argilla locale di cava, resa cremosa lavorandola con la molazza. Spruzzato utilizzando un'intonacatrice e steso a spatola.

Impiego: intonaco di finitura interno, su pareti con paglia di tamponamento.

Figura 21 Anna Barbato, Residenza privata, Camisano (VI) 25 maggio 2022



Composizione: intonaco a base di caolino con paglia sminuzzata e petali di lavanda, rosa canina e calendula.

Realizzazione: impasto dosato in situ. Spruzzato utilizzando un'intonacatrice e steso con una cazzuola americana.

Impiego: intonaco di finitura interno, su pareti con paglia di tamponamento.

Figura 22 Anna Barbato, Residenza privata, Camisano (VI) 25 maggio 2022



## SCELTA INIZIALE: PAGLIA PORTANTE O DI TAMPONAMENTO?

Nel seguente paragrafo verranno comparate due diverse tecniche costruttive per la realizzazione delle pareti tra quelle esposte brevemente nel capitolo precedente: le balle portanti - sia ballette di piccole dimensioni, sia balle jumbo - e i moduli prefabbricati con la struttura portante in legno lamellare incollato.

Nel libro Werner Schmidt architekt. Ecology Craft Invention, Andrea Bocco Guarneri evidenzia i vantaggi che possono portare a scegliere di impiegare, per le pareti, la paglia come struttura portante e non di semplice tamponamento.

Impiegare le balle come elemento portante è sicuramente il metodo più economico e quello che ha i valori di embodied energy EE ed embodied carbon EC minori. Questi aspetti positivi derivano dal fatto che in questa tecnica, per erigere le pareti, non vengono usati né elementi in legno lamellare incollato, né viti o piastre di connessione in acciaio o altri componenti di produzione industriale. Componenti di questo tipo potrebbero venire impiegati per i cordoli superiore e inferiore o comunque in altre parti dell'edificio.

Un ulteriore risparmio di energia e carbonio incorporati si ha impiegando ballette di piccole dimensioni, perché così non sarebbe necessario nessun mezzo motorizzato per le movimentazioni in cantiere, al contrario di quanto accadrebbe se si dovessero sollevare le balle jumbo o i moduli prefabbricati.

La soluzione con la paglia portante è anche quella più sicura dal punto di vista termico, in quanto se la paglia di tamponamento dei moduli non venisse precompressa adeguatamente, potrebbe assestarsi nel tempo andando a creare ponti termici alle sommità delle pareti.

Per quanto riguarda la rapidità di costruzione, invece, i ragionamenti da fare sono un po' più complessi. Le balle di paglia portanti si posano molto velocemente. Infatti, secondo l'esperienza dell'architetto Werner Schmidt, si riescono a collocare 7/8 balle in un'ora, indipendentemente dalle loro dimensioni<sup>31</sup>. L'edificio però necessita poi di un periodo di assestamento di 4/8 settimane prima di poter essere intonacato.

I moduli prefabbricati, invece, vengono costruiti in laboratori specializzati, dove la paglia viene compressa meccanicamente; la loro posa in cantiere è forse ancora più rapida di quella delle balle portanti; in certi casi vengono intonacati in laboratorio, o comunque sono già pronti per la stesura degli impasti in cantiere.

Bisogna anche tenere in considerazione che se per realizzare delle pareti in loco occorre necessariamente lavorare durante la bella stagione e si è molto influenzati dalle condizioni metereologiche, la prefabbricazione dei moduli non è influenzata dal meteo.

Altri aspetti da valutare sono la capacità portante che l'edificio deve garantire e i requisiti morfologici che la parete deve rispettare. Riguardo quest'ultimo punto, Minke sostiene che il rapporto tra l'altezza di un muro e il suo spessore non dovrebbe mai superare 5:1. Secondo l'architetto, le ballette si possono impiegare come elemento strutturale solamente per edifici a un piano, per edifici fino a due piani si possono utilizzare ancora le balle jumbo, ma oltre è bene impiegare la paglia solo come tamponamento.<sup>32</sup>

Entrambe queste tecniche hanno dei vantaggi e spetta al progettista valutarli per arrivare a una scelta coerente.

Per quanto riguarda il padiglione di questo progetto di ricerca, non ci sono stati dubbi: considerato che l'obiettivo è proprio quello di studiare il comportamento di una struttura in paglia portante nel tempo, nelle pareti saranno le balle a portare i carichi.

-

<sup>&</sup>lt;sup>31</sup> Bocco Guarneri, A. (2013). Werner Schmidt architekt. Ecology craft invention. Ambra/V.

<sup>&</sup>lt;sup>32</sup> Minke, G. & Mahlke, F. (2005). Building with straw: design and technology of a sustainable architecture. Basel: Birkhäuser. (pp. 22 e 36)

Per quanto riquarda gli orizzontamenti invece i ragionamenti sono stati differenti.

Per il solaio inferiore non esistono alternative efficaci che prevedono le balle come struttura portante, quindi si è prevista una doppia orditura di travi in legno, con tamponamento in ballette e le chiusure inferiore e superiore con tavole di legno massiccio.

Nel progettare la copertura, invece, si sono valutate entrambe le opzioni, ma l'ipotesi di impiegare balle jumbo per la creazione di una piramide (Figura 23) è stata scartata rapidamente: la quantità di paglia necessaria sarebbe stata notevole; l'altezza che il prototipo avrebbe raggiunto avrebbe impattato molto sul contesto in cui deve inserirsi; l'ombra proiettata dalla copertura avrebbe oscurato i padiglioni vicini; le superfici interne ed esterne da intonacare sarebbero state esageratamente vaste<sup>33</sup>; il volume interno da mantenere alla temperatura di comfort sarebbe stato molto più ampio del necessario e difficilmente sfruttabile. Si è convenuto, quindi, che impiegare balle jumbo portanti per la copertura non fosse la scelta più adeguata e si è deciso di utilizzare la paglia come tamponamento, analogamente al solaio inferiore.

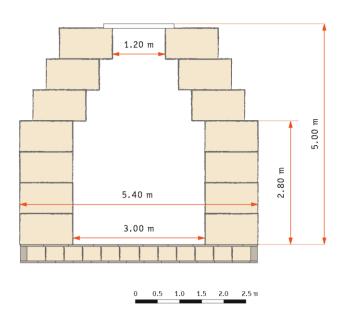


Figura 23 Schema raffigurante l'ipotesi di copertura a piramide in balle jumbo portanti

#### SECONDA SCELTA: BALLETTE O BALLE JUMBO?

Dopo aver definito il ruolo delle balle di paglia per pareti, solaio e copertura, si è dovuto scegliere se impiegare le ballette di piccole dimensioni o le balle jumbo, valutando le prestazioni strutturali, quelle termotecniche, l'embodied energy e aspetti riguardanti l'organizzazione di cantiere e l'offerta formativa dei workshop didattici.

Per quanto riguarda il tamponamento degli orizzontamenti, sono state scelte le ballette di piccole dimensioni, perché uno spessore di 35 cm circa - combinato con una densità media inferiore rispetto le balle jumbo - si è dimostrato sufficiente per raggiungere un'ottima trasmittanza termica pari a 0.174 W/m²K per il solaio inferiore e 0.177 W/m²K per la copertura (il valore si riferisce all'opzione scelta per la versione definitiva del padiglione).

<sup>&</sup>lt;sup>33</sup> L'architetto Werner Schmidt nel progetto del Gartist GmbH, prima di fissare la lamiera grecata della copertura a piramide, ha previsto un'intonacatura sul lato esterno delle balle, come si può notare in Figura 6.

Inoltre, impiegando una quantità minore di paglia, il carico permanente della copertura è inferiore e questo comporta sia una minore resistenza meccanica richiesta alle pareti sia un migliore comportamento sismico delle stesse.

Le considerazioni fatte per prendere questa decisione per le pareti, invece, sono state più complesse e verranno elencate di seguito, in conclusione comunque sono state scelte le ballette.

- Le balle jumbo, come si è già detto, hanno in media una densità maggiore e questo determina una capacità portante della parete maggiore. Viste le dimensioni ridotte del padiglione, però, non è necessaria una resistenza strutturale tanto elevata.
- Le notevoli dimensioni delle balle jumbo garantiscono una rapidità di costruzione eccezionale, una trasmittanza termica della parete estremamente bassa (U = 0.053 W/m²K) e forniscono una base di appoggio molto ampia che giova alla resistenza sismica della struttura. Nello stesso tempo, però, obbligano all'impiego di mezzi motorizzati che agevolano notevolmente le fasi di trasporto, ma limitano l'azione degli studenti che durante i workshop didattici partecipano al processo costruttivo. Inoltre, sebbene non molto significativo, l'impiego di macchinari causa un maggiore impatto ambientale.
- Bisogna anche considerare che la trasmittanza termica che una parete in paglia portante raggiunge è molto minore rispetto a quella ottenuta dagli altri due padiglioni previsti dal progetto di ricerca. Impiegare le balle jumbo, quindi, significherebbe rendere i tre prototipi ancor meno confrontabili per quanto riguarda le prestazioni termiche.
- Un ulteriore aspetto da valutare è che il volume occupato dalle balle jumbo in confronto al volume vuoto abitabile che racchiude è estremamente grande, quindi il loro rapporto risulta sfavorevole.
- Viste le dimensioni ridotte del padiglione, delle pareti profonde circa 120 cm rappresenterebbero uno spreco di risorse (non solo di paglia, ma anche di intonaci e di legno), uno spreco di energia e uno spreco di suolo (per ottenere la stessa superficie utile di pavimento l'impronta a terra dovrebbe essere maggiore e questo determinerebbe anche più scavi per le fondazioni); e tutto questo determinerebbe anche un impegno economico maggiore.

Le ballette, quindi, hanno una portata di carico inferiore e comportano una trasmittanza termica degli elementi di chiusura maggiore, ma in entrambi i casi le prestazioni raggiunte sono adeguate alle necessità di questo progetto di ricerca.

Inoltre, impiegare le ballette offre l'occasione di ampliare l'offerta formativa per gli studenti che parteciperanno ai workshop didattici, perché - come verrà approfondito di seguito - permette loro di sperimentare un sistema ipotizzato dall'architetto Werner Schmidt per migliorare le prestazioni sismiche delle pareti in paglia portante.

Non è stata una scelta semplice e per prenderla sono state studiate a fondo entrambe le soluzioni. Nel paragrafo successivo verranno messe a confronto quattro diverse opzioni per la morfologia della pianta del padiglione: due impiegano i balloni quadri – una particolare tipo di balle jumbo - e due le ballette.

## TERZA SCELTA: LA MORFOLOGIA DELLA PIANTA

Per la morfologia della pianta del padiglione sono state formulate diverse ipotesi, ma di seguito vengono riportate e discusse le quattro più significative, presentate da Figura 24 a Figura 27.

Questa scelta è stata fatta sulla base di più dati a supporto, che sono stati raccolti nella Tabella 3 riportata di seguito.

Innanzitutto, sono state confrontate le quantità necessarie per i diversi materiali.

È stata comparata la quantità di paglia e il numero di ballette o di balle jumbo necessarie per erigere le pareti e di consequenza è stato stimato il tempo di posa.

Per quanto riguarda le opzioni P3 e P4 è stato tenuto in considerazione il numero di picchetti indispensabili per rendere solidali tra loro le ballette e in particolare il numero di quelli che collegano il primo corso al solaio - pari ai picchetti che collegano l'ultimo corso al cordolo superiore. Questa puntualizzazione è utile perché a causa dei fori che devono essere praticati sul tavolato e sui pannelli (si allega una scheda a riguardo nel capitolo *Organizzazione del cantiere*), i collegamenti della parete al solaio e al cordolo superiore richiedono un tempo di lavorazione maggiore rispetto alla posa dei picchetti tra un corso e il successivo. È stato poi conteggiato il numero di pali che, secondo un'ipotesi dell'architetto Werner Schmidt, miglioreranno la resistenza sismica del padiglione.

Basandosi poi sui predimensionamenti dei diversi architravi, è stato calcolato il volume di legno lamellare necessario per realizzare il cordolo superiore<sup>34</sup>.

Infine, sono state misurate le estensioni delle superfici interna ed esterna da intonacare, perché, proporzionalmente a questi valori, variano sia l'importo da pagare per acquistare le materie prime, sia il tempo necessario per la stesura degli impasti.

L'elemento che impatta maggiormente sulla spesa sono le superfici vetrate. Gli infissi, infatti, che dovranno avere elevate prestazioni termiche, hanno un costo considerevole: il prezzo medio di mercato è aumentato molto negli ultimi mesi a causa degli incentivi economici statali per l'efficientamento energetico degli edifici, della carenza di materie prime nel mercato globale e dell'aumento del costo dell'energia. Inoltre, al costo degli infissi è necessario aggiungere il compenso dovuto all'artigiano specializzato che si occuperà dell'installazione. È anche da valutare che per la porta finestra scorrevole delle opzioni P2 e P4 probabilmente servirebbero due serramentisti.

Altri fattori importanti che hanno influito in questa decisione sono stati: il rapporto tra il volume interno abitabile e la quantità di paglia impiegata per realizzarlo; il valore di trasmittanza termica calcolato per le pareti; il rapporto aeroilluminante e il fattore medio di luce diurna (al capitolo *Studio della luce naturale* verranno presentati dati più approfonditi a riguardo).

del legno lamellare.

<sup>&</sup>lt;sup>34</sup> La funzione del cordolo superiore è quella di distribuire omogeneamente i carichi alle pareti; quindi, deve coprire l'intero spessore delle ballette. Considerando che le ballette che verranno impiegate – fornite dall'azienda Riso di Nori - hanno una larghezza media di 50 cm e ipotizzando che dopo la rasatura perderanno circa 2,5 cm di spessore per lato, la larghezza del cordolo deve essere di 45 cm. Tale dimensione è difficilmente ottenibile con del legno massiccio, quindi per questo elemento verrà usato

		P1	P2	Р3	P4
	Unità di misura				
Superficie pavimento	m²	23.05	23.02	21.96	21.47
Altezza prima del periodo di assestamento	m	3.60 (4 corsi)	3.60 (4 corsi)	3.08 (8 corsi)	3.08 (8 corsi)
Altezza finale ipotizzata	m	3.40	3.40	2.88	2.88
Superficie interna da intonacare	m²	53.18	46.10	50.43	44.47
Superficie esterna da intonacare	m²	95.34	92.78	78.16	70.63
Volume lordo di paglia	m³	72.80	72.80	29.41	26.14
Numero di balle per le pareti	-	56	56	144	128
Tempo stimato per la posa delle balle	ore	8	8	28	25
Numero di picchetti tra le ballette	-	0	0	160	150
Numero di picchetti per il primo corso	-	0	0	32	30
Numero di pali per il rinforzo antisismico	-	0	0	64	60
Superficie infissi	m²	19.70	23.60	9.05	12.90
Rapporto tra il volume di paglia e il volume interno netto ipotizzato	-	0.93	0.93	0.52	0.50
Trasmittanza termica della parete	W/m²K	0.053	0.053	0.137	0.137
Fattore medio di luce diurna	%	5,74	5,30	2,85	4,22
Rapporto aeroilluminante	-	0.85	1.06	0.41	0.60
Volume di legno lamellare stimato per il cordolo superiore	m³	0.99	2.15	0.40	1.01

Tabella 3 Dati a supporto della scelta tra quattro diverse morfologie di pianta

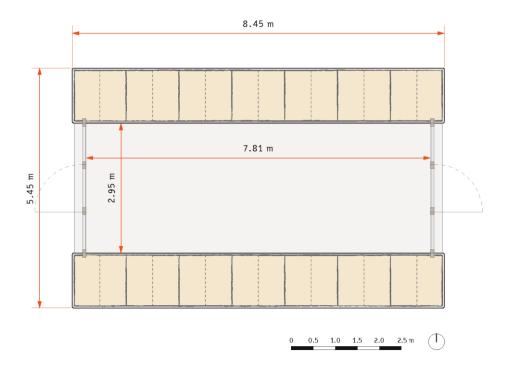


Figura 24 Opzione P1

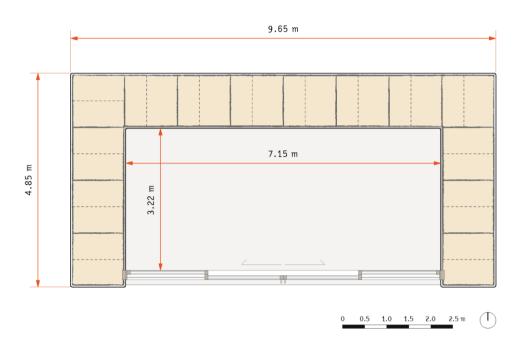


Figura 25 Opzione P2

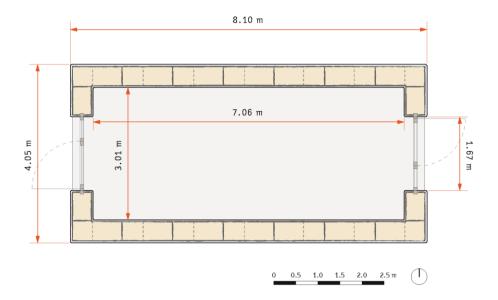


Figura 26 Opzione P3

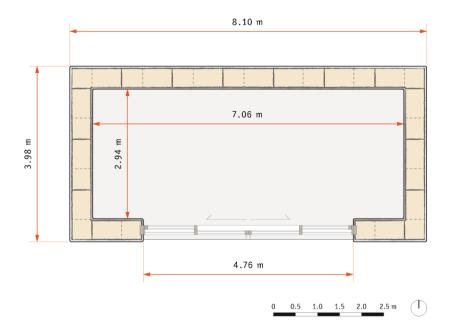


Figura 27 Opzione P4

Dopo aver vagliato le diverse opzioni e confrontato tutti i dati raccolti, la scelta è ricaduta sull'opzione P3. Dato che le ragioni che hanno portato ad escludere le opzioni P1 e P2, che impiegano le balle jumbo, sono state esposte nel paragrafo precedente, di seguito ci si focalizzerà sull'esporre le considerazioni fatte sulle opzioni P3 e P4, che prevedono l'utilizzo delle ballette di dimensioni ridotte.

Nell'opzione P3, vista la lunghezza nettamente inferiore degli architravi, il volume di legno lamellare necessario per realizzare il cordolo superiore è inferiore. Una luce minore in corrispondenza dell'infisso consente di utilizzare sezioni con dimensioni minori anche per le travi primarie della copertura.

Un altro aspetto da considerare riguarda l'illuminamento naturale. Il fattore medio di luce diurna ottimale dipenderebbe dalla destinazione d'uso del locale, ma il padiglione - essendo un edificio sperimentale - non ne ha una. Quindi, visto che lo scopo principale di questo progetto di ricerca è testare e monitorare a medio termine la tecnica costruttiva impiegata, si è ritenuto poco opportuno spendere più fondi del minimo necessario per le componenti vetrate, invece che, per esempio, investirli nell'acquisto di sonde e attrezzature per rilevare le condizioni termoigrometriche. Dato che anche l'opzione P3 raggiunge un valore superiore al 2% per il fattore medio di luce diurna, si è ritenuto comunque sufficiente.

Va sottolineato che una vetrata molto ampia, come quella dell'opzione P4, potrebbe causare un fenomeno di abbagliamento in alcuni momenti dell'anno. Se l'edificio fosse normalmente occupato una soluzione per ridurre tale rischio potrebbe essere variare l'orientamento dell'infisso o schermarlo, per esempio piantando della vegetazione o installando degli oscuranti.

Nell'operare questa scelta ha influito anche l'esigenza di confrontare i tre diversi padiglioni del progetto di ricerca. A tal proposito si è tenuto in considerazione che il padiglione in calce-canapa, a causa di limiti costruttivi-strutturali della tecnica costruttiva, avrà necessariamente una pianta rettangolare con aperture sui due lati corti. L'orientamento e la morfologia delle componenti vetrate influiscono notevolmente sul comportamento termico di un edificio, quindi è preferibile adottare disposizioni similari per tutti i padiglioni.

# QUARTA SCELTA: LA MORFOLOGIA E IL SISTEMA COSTRUTTIVO DELLA COPERTURA

Le prime ipotesi formulate per la copertura del padiglione prevedevano un sistema costruttivo a falde inclinate.

Di seguito si riportano due schemi tridimensionali rappresentanti le strutture portanti in legno delle opzioni C1 e C2. La prima è una copertura a padiglione con quattro falde, mentre la seconda una copertura a due falde con la trave di colmo che poqqia direttamente sul cordolo.

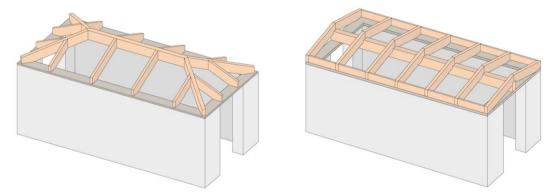


Figura 28 Copertura a padiglione, opzione C1 (sinistra) Figura 29 Copertura a due falde inclinate, opzione C2 (destra)

Entrambe le opzioni prevedono un tamponamento in paglia e due tavolati di chiusura, uno interno e uno esterno.

Per riempire gli spazi di forma complessa che risultano tra le travi portanti della soluzione C1, si ipotizzava di impiegare della paglia sfusa. Questo però ha delle conseguenze negative:

- la paglia sfusa è più difficile da gestire sia durante la costruzione, sia durante un'eventuale demolizione o ristrutturazione;
- gli steli di paglia non pressati in ballette garantiscono una conducibilità termica peggiore;
- il grado di infiammabilità risulterebbe maggiore.

Un ulteriore aspetto che ha portato a scartare l'opzione C1 è la complessità di realizzazione in autocostruzione della struttura portante a padiglione.

Gli aspetti qualificanti dell'opzione C2, che risolvono i problemi dell'ipotesi precedente sono:

- le campate regolari permettono di utilizzare le ballette di paglia invece che gli steli sfusi;
- il sistema di travi portanti è meno complesso, quindi è realizzabile più facilmente durante i workshop didattici

A differenza della copertura a padiglione, però, quella a due falde inclinate - come accadrebbe anche se la falda fosse unica - carica le pareti in modo non omogeneo. Inoltre, i vuoti che vengono a crearsi tra le travi di bordo inclinate e il cordolo sono difficili da tamponare.

Per entrambe le soluzioni si era prevista la costruzione di una sottostruttura in travetti di legno massiccio in appoggio sul tavolato superiore. Questa poteva svolgere contemporaneamente tre funzioni:

- sostenere lo strato protettivo esterno;
- creare lo sporto indispensabile per proteggere le pareti dalla pioggia;
- garantire un'adequata ventilazione alla paglia di tamponamento.

Per la struttura a padiglione, avente una pendenza maggiore, si sarebbero potuti impiegare come strato protettivo dei coppi o delle tegole (possibilmente di recupero), mentre la pendenza inferiore della copertura C2 permetteva la creazione di una copertura verde o l'impiego di una lamiera grecata.

Si era anche ipotizzato di sostituire il tavolato di chiusura esterno con uno strato di intonaco a base di calce. Per garantire buone condizioni termoigrometriche sarebbe stato necessario massimizzare l'efficienza dello strato di ventilazione e quindi l'intercapedine avrebbe dovuto avere un'altezza sufficientemente ampia e una pendenza adeguata. In ogni caso, però, l'intonaco non sarebbe stato né ispezionabile né facilmente manutenibile.

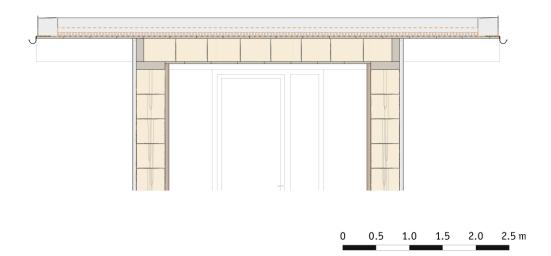
Per risolvere tutte le problematiche appena esposte, è stato deciso di realizzare una copertura piana. In particolare, la soluzione tecnologica doveva consentire:

- una distribuzione uniforme del carico sulle pareti;
- una facilità di costruzione adeguata a dei workshop didattici di autocostruzione;
- l'utilizzo di ballette di paglia per il tamponamento, sia per facilitare la gestione del cantiere, sia per aumentare le prestazioni termiche della copertura.

Si è scelto anche di adottare una copertura a verde pensile, perché i vantaggi che derivano da questa soluzione sono numerosi:

- garantisce l'accumulo dell'acqua piovana, collaborando a diminuire il carico di punta sugli impianti pubblici di raccolta;
- costituisce un primo filtro per depurare le acque meteoriche da sostanze estranee;
- mantiene pressoché inalterata la capacità di assorbimento delle precipitazioni dell'area rispetto allo stato di fatto;
- ha un impatto ambientale minore rispetto a una copertura in coppi, in tegole o in lamiera.

Di seguito si riportano le sezioni delle diverse opzioni di copertura verde piana studiate e gli schemi tridimensionali delle relative strutture portanti. Gli elaborati grafici saranno accompagnati da alcune note che sono state utili per valutare e risolvere le problematiche delle diverse tecniche costruttive ipotizzate, permettendo di ottenere una soluzione progettuale finale adequata ed efficiente.



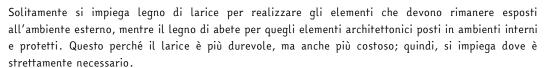
Gli aspetti positivi di questa soluzione sono la facilità di realizzazione e le ridotte quantità di legno e paglia necessarie rispetto le opzioni che verranno presentate a seguire.

Le problematiche riscontrate invece riguardano in primo luogo la durabilità del padiglione.

Le estremità delle travi primarie che rimangono esposte alle intemperie si degradano più velocemente rispetto alla parte centrale che rimane all'interno.

Un degrado eccessivo del legno esposto

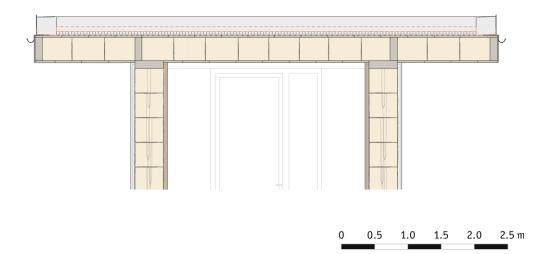
obbligherebbe alla sostituzione dell'intera copertura, compresi anche gli elementi ancora in buono stato.



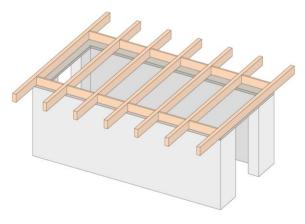
In questa opzione - analogamente all'ipotesi C6 - si sarebbe obbligati a impiegare legno di larice per le travi primarie e questo farebbe aumentare considerevolmente il costo. Nelle opzioni dove le travi primarie sono completamente protette e lo sporto ha una struttura portante distinta, invece, si possono impiegare legno di larice e legno di abete a seconda della destinazione d'uso, riducendo così la spesa.

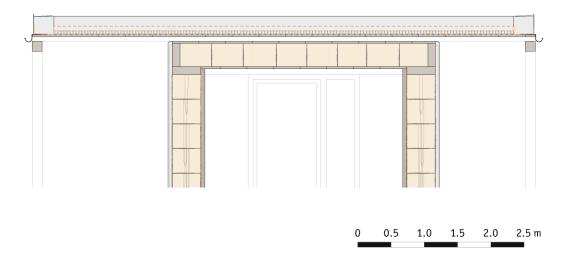
Anche dal punto di vista termico ci sarebbero delle migliorie da apportare, infatti le travi primarie passanti causano un ponte termico puntuale.

L'ultimo aspetto negativo riscontrato riguarda ancora la durabilità del padiglione. Gli sporti che coprono le due facciate corte sarebbero poco profondi, quindi le pareti sottostanti resterebbero esposte eccessivamente alle intemperie.



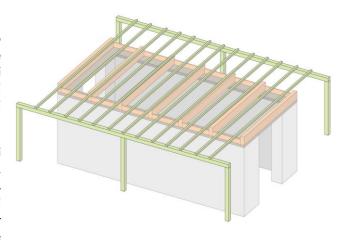
In questa tecnica costruttiva, rispetto all'opzione C3, le travi primarie sono completamente protette e il ponte termico è meno disperdente; ma aumentano considerevolmente le quantità di legno e paglia impiegate e i lati corti non sono comunque protetti adeguatamente dalle intemperie.





Nell'opzione C5 si ipotizzava di costruire una seconda copertura dopo il periodo di assestamento delle ballette di paglia portanti: dei pilastri avrebbero sostenuto delle travi principali, su cui sarebbero stati appoggiati dei travetti secondari.

A differenza dell'opzione C3, le travi primarie sono totalmente protette e il ponte termico è risolto. Inoltre, rispetto l'opzione C4 la quantità di legno e paglia impiegati è minore (per quanto riguarda la sola parte prefabbricata).

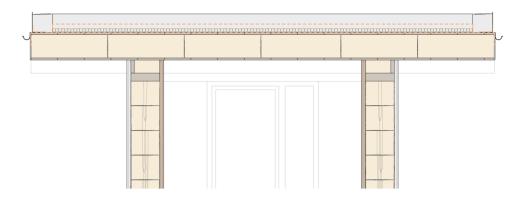


La terrazza coperta attorno al padiglione avrebbe protetto adeguatamente dalle intemperie tutte le facciate e avrebbe garantito una buona ventilazione alla paglia di tamponamento.

Inoltre, questo ulteriore spazio esterno coperto avrebbe qualificato ancor più il progetto.

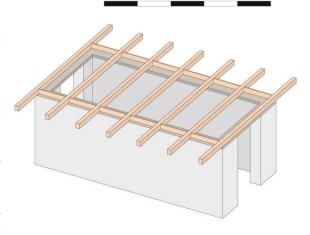
Le problematiche riscontrate per questa soluzione sono che:

- la quantità totale di legno sarebbe stata maggiore rispetto le ipotesi esposte precedentemente;
- uno sporto adeguatamente profondo per poter essere usufruibile appieno, avrebbe ridotto l'apporto solare gratuito sia in termini di riscaldamento che di illuminazione naturale (questa opzione probabilmente sarebbe maggiormente compatibile con la morfologia di pianta P4).



Questa è l'unica soluzione che prevede la posa delle ballette di paglia non come tamponamento delle travi, ma sopra un tavolato. In questo modo l'altezza delle travi avrebbe potuto essere minore e l'interasse delle stesse non sarebbe stato vincolato dalle dimensioni delle ballette.

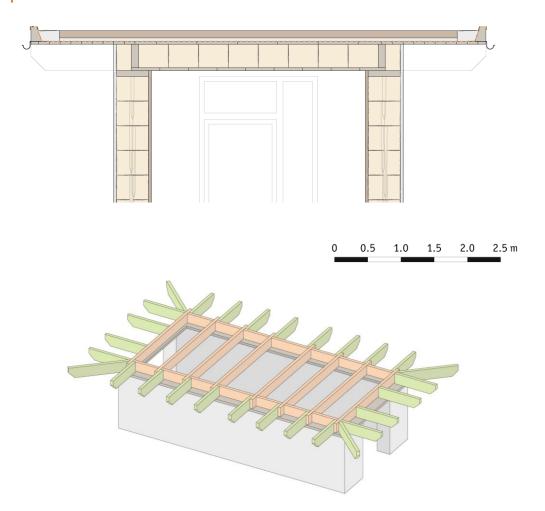
Così facendo la quantità di legno impiegato sarebbe stata inferiore e le sezioni delle travi avrebbero potuto avere dimensioni reperibili più facilmente. Le travi a vista, inoltre, avrebbero aumentato il valore estetico del locale.



1.0

2.5 m

Questa opzione però porta con sé le stesse problematiche riscontrate precedentemente legate alla continuità delle travi tra interno ed esterno, in termini di durabilità, di dispersioni termiche e di costo degli elementi in legno di larice.



Quest'ultima opzione presentata prevede una scatola prefabbricata con struttura portante in travi di legno massiccio di abete e tamponamento in ballette di paglia. Per creare lo sporto sono stati ipotizzati dei passafuori, fissati alle travi primarie della parte prefabbricata.

Questa tecnica costruttiva permette la soluzione del ponte termico puntuale delle teste delle travi primarie, l'ottimizzazione dell'impiego del legno di larice e consentirebbe di sostituire i passafuori in caso di degrado eccessivo senza intaccare la parte prefabbricata della copertura e rimuovendo solamente la parte perimetrale del tavolato di sostegno e del pacchetto verde.

La problematica principale in questo caso era che il momento sollecitante la connessione tra i passafuori e le travi è molto elevato e obbligherebbe a utilizzare squadrette e bulloni con resistenze molto elevate. Una considerazione importante, valida anche per le opzioni precedentemente esposte, è che sarebbe meglio se la paglia di tamponamento della copertura fosse ventilata. Quindi, sarebbe preferibile che un'intercapedine d'aria dividesse la parte prefabbricata dal pacchetto verde, anche se questo comporta necessariamente un volume di legno impiegato maggiore.

Si è arrivati così a definire il sistema costruttivo presentato nel capitolo successivo: una scatola prefabbricata di travi in legno massiccio di abete che carica omogeneamente le pareti attraverso il cordolo superiore, garantendo ottime prestazioni di isolamento termico; un'intercapedine di ventilazione costituito da travetti in legno massiccio di larice che sostengono il carico dello sporto della copertura (costante per tutte le facciate del padiglione); una copertura a verde pensile estensivo.

## IL MODULO DI BASE

Il modulo di base da cui sono sempre nate tutte le soluzioni progettuali esposte finora è proprio la balletta di paglia.

Dalle sue dimensioni e dalla sua densità dipendono l'interasse delle travi di solaio e copertura, l'altezza delle stesse, l'altezza interna lorda e netta del padiglione, lo spessore delle pareti, la trasmittanza termica dei diversi componenti d'involucro e altro ancora. Tutto è collegato, ogni elemento è consequenza di quello precedente e origine di quello successivo, tutto è organico.

Il fornitore delle ballette per il tamponamento di solaio e copertura è l'azienda agricola *TvTb*, acronimo di *Terra Viva del Tibi*, di Borgo d'Ale in provincia di Vercelli (61 km dal sito di costruzione).

Per realizzare le pareti, invece, si useranno le ballette di *Riso di Nori*, un'altra azienda del vercellese con sede operativa nel comune di Collobiano (il sito di stoccaggio dista 88 km da quello di costruzione).

#### Terra Viva del Tibi



Quest'azienda agricola ha come obiettivo, non solo offrire prodotti di qualità ai propri clienti, ma anche prendersi cura della terra e coltivarla in modo sostenibile.

Come spiegano negli articoli pubblicati sul loro sito aziendale (raggiungibile scansionando il QR-code a lato o tramite il link <a href="https://www.terravivatb.it">https://www.terravivatb.it</a>), hanno scelto di utilizzare solo antiche varietà di grano, perché queste hanno migliori proprietà nutritive, un grado di digeribilità maggiore e sono più

resistenti delle varietà moderne, infatti le loro coltivazioni hanno un basso impatto ambientale perché non necessitano di fitofarmaci o di concimi di sintesi.

La resa delle varietà antiche di grano è inferiore rispetto alle colture moderne, quindi la percentuale di paglia rispetto al cereale è maggiore. Generalmente per le aziende questo è un problema, ma se la paglia si affermasse come materiale da costruzione, le colture non avrebbero più scarti e tutto ciò che la terra produce potrebbe diventare un prodotto vendibile.

Il loro raccolto del 2021 ha prodotto circa 200 ballette di paglia di grano e sono state tutte acquistate per questo progetto di ricerca. Queste ballette hanno delle dimensioni medie di 45 x 95 cm, sono alte circa 35 cm e il loro peso medio è di 11,8 kg. La densità media lorda è pari a 78,9 kg/m $^3$ .

#### Riso di Nori

Sul sito <a href="http://www.risodinori.it/">http://www.risodinori.it/</a> - raggiungibile agevolmente anche attraverso il QR-code riportato a lato - si legge che l'azienda risicola Riso di Nori è attenta a mantenere vive le tradizioni e le tecniche di coltivazione tramandate dai loro avi, allo stesso tempo però per loro l'innovazione è un punto di fondamentale importanza. Impiegano macchinari efficienti per ridurre al minino l'impatto ambientale durante il processo di lavorazione dei chicchi e - come scrivono sul sito aziendale - sono molto interessati a prendere parte ad "attività di ricerca sperimentale" [e] a progetti di formazione dei giovani".



È stato questo particolare interesse verso la ricerca che mi ha spinto a proporre loro di collaborare al nostro progetto. *Riso di Nori* ha accolto prontamente la nostra proposta e ci ha donato 250 ballette di paglia di riso, ricavate dalla raccolta del riso Violet Nori del 2021.<sup>35</sup>

Questa particolare varietà deriva da un seme prodotto dall'azienda stessa e grazie alla naturale presenza di pigmenti vegetali sia i chicchi che la paglia sono di colore viola scuro.

Le ballette offerte dall'azienda risicola hanno delle dimensioni medie di 50 x 100 cm, un'altezza di 40 cm e il peso medio è di circa 22 kg. La densità media lorda è pari a 110 kg/ $m^3$ .

Un vantaggio che deriva dall'impiego della paglia di riso in architettura è legato all'alta concentrazione di silice, rispetto alla composizione chimica della paglia di altri cereali. I suoi steli marciscono più difficilmente e di conseguenza la durabilità teorica degli edifici aumenta.

#### Il ruolo delle ballette

Mettendo a confronto le due tipologie di ballette a disposizione per la realizzazione del padiglione si è arrivati alla conclusione che quelle fornite dall'azienda *Terra Viva del Tibi* sarebbero state più adeguate come tamponamento degli orizzontamenti, mentre le ballette donate da *Riso di Nori* avrebbero potuto fungere da elemento portante.

Le ballette di *TvTb*, avendo gli steli di paglia meno compressi, dovrebbero avere una capacità di carico inferiore e una conducibilità termica migliore. Infatti, intrappolando al loro interno più aria dovrebbero garantire una trasmittanza termica minore.

L'azienda agricola Riso di Nori, invece, ha offerto ballette più dense e quindi più adatte a sostenere i carichi gravanti sulle pareti. Inoltre, le loro dimensioni leggermente maggiori avrebbero imposto altezze e interassi maggiori alle travi. Considerando l'aumento della luce e del carico, probabilmente, anche lo spessore minimo del tavolato inferiore di solaio e copertura sarebbe stato maggiore. Questa catena di conseguenze avrebbe avuto come risultato finale un aumento della quantità di legno necessaria e un costo maggiore.

È fondamentale conoscere il materiale che si vuole impiegare, le sue caratteristiche, il suo comportamento, le trasformazioni che ha subito, perché solo in questo modo si possono operare scelte adeguate e si può applicare la tecnologia migliore per la specifica situazione.

<sup>&</sup>lt;sup>35</sup> A differenza dell'azienda *Terra Viva del Tibi* che ha pressato la paglia in ballette appositamente per questo progetto di ricerca, *Riso di Nori* aveva già prodotto e stoccato ballette. Se in un futuro si dovesse calcolare l'impatto ambientale del padiglione in termini di EE e di EC, potrebbe essere interessante prendere in considerazione questo dettaglio.

#### PROGETTO PER IL MIGLIORAMENTO DELLA RISPOSTA SISMICA

## Comportamento strutturale di una parete in ballette di paglia portanti

Uno degli ostacoli alla diffusione dei materiali da costruzione naturali è l'assenza di procedure standardizzate per i calcoli strutturali, infatti non compaiono nelle normative e nei software di calcolo, oppure se sono presenti le loro caratteristiche sono sottovalutate o solo parzialmente riconosciute.<sup>36</sup> È difficile migliorare questa situazione perché questi materiali non hanno grandi industrie che possano supportare le ricerche e i test necessari, come accade invece per il cemento o l'acciaio per esempio.<sup>37</sup>

Nel 2009 l'associazione PAKSBAB (Pakistan Straw Bale and Appropriate Building) ha approfondito gli studi sulla resistenza sismica di pareti in ballette di paglia portanti e ha svolto dei test sperimentali su tavola vibrante presso l'Università del Nevada.<sup>38</sup>



Scansionando il QR-code a lato si può osservare il video dei test eseguiti pubblicato dall'associazione stessa.

Nella pubblicazione "Strawbale construction: an appropriate technology for developing countries with high seismic risk" Ozeryansky e Hammer (2010) espongono dettagliatamente il comportamento dal punto di vista strutturale di una parete in balle di paglia intonacata.

Il primo aspetto da sottolineare è che il sistema strutturale primario è costituito dall'intonaco, infatti le ballette portano i carichi solamente nel momento in cui questo arriva al collasso.

Le funzioni dell'intonaco quindi sono:

- rispondere alle forze di compressione e taglio (la resistenza al taglio migliora con l'aggiunta all'impasto di fibre o con la posa di reti porta-intonaco);
- trasmettere i carichi gravitazionali (la sua rigidità è maggiore rispetto a quella della paglia);
- resistere alle forze orizzontali come quella del vento e dei sismi.

Il contributo strutturale delle balle di paglia, invece, consiste principalmente nell'impedire all'intonaco di deformarsi per instabilità sotto carico.

Di fondamentale importanza sono i centimetri in cui la prima mano d'intonaco è fortemente connessa agli steli di paglia, perché - se l'impasto è stato steso correttamente - la paglia delle ballette funge da rete e collabora alla resistenza a trazione della parete.

Per quanto riguarda nello specifico la resistenza all'azione sismica, un contributo importante è dato dalla larga base d'appoggio delle balle. Questa, infatti, limita l'eccentricità delle forze agenti e di consequenza contribuisce a ridurre le sollecitazioni di flessione interne.

Un'altra caratteristica positiva delle pareti in ballette di paglia è l'elevata duttilità, perché permette alla struttura di trasferire i carichi anche durante la fase di comportamento elastico.

<sup>&</sup>lt;sup>36</sup> Bocco Guarneri, A. (2020) *Vegetarian Architecture: Case Studies on Building and Nature*, Berlin, Jovis.

<sup>&</sup>lt;sup>37</sup> Eisenberg, D. (dicembre 2009). *Beyond Green Building & Codes: Seeing a Bigger Picture*. CAZREN & YCCA, Hassayampa Inn, Prescott, Az. Una presentazione riassuntiva della conferenza è consultabile al link <a href="https://www.dcat.net/about\_dcat/David\_Eisenberg\_CAZREN\_talk\_Dec\_5\_2009.pdf">https://www.dcat.net/about\_dcat/David\_Eisenberg\_CAZREN\_talk\_Dec\_5\_2009.pdf</a>

<sup>&</sup>lt;sup>38</sup> Bocco Guarneri, A. (2013). Werner Schmidt architekt. Ecology craft invention. Ambra/V.

Questo significa che la parete può deformarsi molto prima di perdere capacità portante. Inoltre, grazie all'attrito tra le balle e tra gli steli stessi, deformandosi la parete dissipa l'energia cinetica trasmessa dal sisma.

I punti che arrivano a rottura più velocemente in questo sistema costruttivo, come si può notare anche nel video precedentemente citato, sono le connessioni tra le pareti e gli orizzontamenti.

## Il progetto di Werner Schmidt<sup>39</sup>

Come spiega Bocco in Werner Schmidt architekt. Ecology craft invention, a seguito del terremoto avvenuto in Pakistan nel 2005, l'architetto Werner Schmidt è stato contattato da Aga Khan Foundation, un'organizzazione privata che opera a livello internazionale con l'obiettivo di "migliorare le prospettive di vita delle persone nei paesi in via di sviluppo, in particolare in Asia e Africa"40.

Per la fondazione, Schmidt ha sviluppato un progetto per la realizzazione di edifici antisismici per l'area montana Azad Kashmir.

Il progetto prevedeva di impiegare ballette portanti di paglia di riso, che sarebbero state formate con presse manuali sul posto. La scelta di questo materiale è stata dettata dal fatto che queste coltivazioni erano molto diffuse nella zona e la paglia non era impiegata per altri scopi, ma veniva prevalentemente bruciata.

Per migliorare ulteriormente la risposta sismica delle pareti e aumentare la duttilità della parete, Schmidt prevedeva di comprimere verticalmente le pareti legando coppie di pali di bambù sulle superfici interna ed esterna delle pareti (Figura 30). In questo modo, la parete dovrebbe comportarsi come una molla e dissipare ancora più efficacemente l'energia cinetica trasmessa dal sisma. L'intonaco a base di calce o di argilla dovrebbe poi coprire completamente i pali.

Per il progetto di ricerca del padiglione in paglia portante si è ipotizzato di testare l'impiego di questa tecnica costruttiva per poterne verificare la fattibilità e l'efficacia.

L'obiettivo primario sarebbe quello di esaminare la realizzazione in cantiere e annotare eventuali problematiche anche a lungo termine. Un ulteriore proposito è quello di svolgere una serie di test su tavola vibrante per confrontare la resistenza sismica di un modulo di parete così costruito (possibilmente sperimentando diverse disposizioni dei pali) e quella di un modulo senza il sistema aggiuntivo progettato da Schmidt.

Le difficoltà riscontrate iniziando a organizzare questi test riguardano principalmente le tempistiche. I test durerebbero diverse settimane, perché le ballette di ogni modulo di parete che si desidera testare devono avere il tempo di assestarsi completamente, inoltre anche gli intonaci hanno dei tempi di asciugatura abbastanza lunghi. Questo richiederebbe di occupare la tavola vibrante e il laboratorio stesso in cui si trova per diversi mesi.

-

<sup>&</sup>lt;sup>39</sup> Bocco Guarneri, A. (2013). Werner Schmidt architekt. Ecology craft invention. Ambra/V. (pp. 230-232)

<sup>&</sup>lt;sup>40</sup> La strategia dell'Aga Khan Trust for Culture. (ottobre 2018). Il Giornale delle Fondazioni. <a href="http://www.ilgiornaledellefondazioni.com/content/la-strategia-dell%E2%80%99aga-khan-trust-culture">http://www.ilgiornaledellefondazioni.com/content/la-strategia-dell%E2%80%99aga-khan-trust-culture</a>

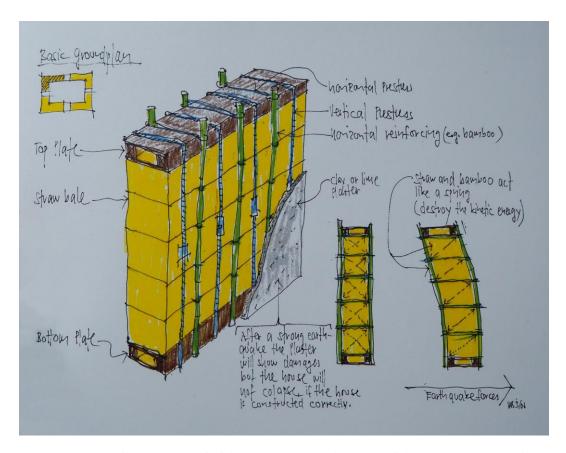
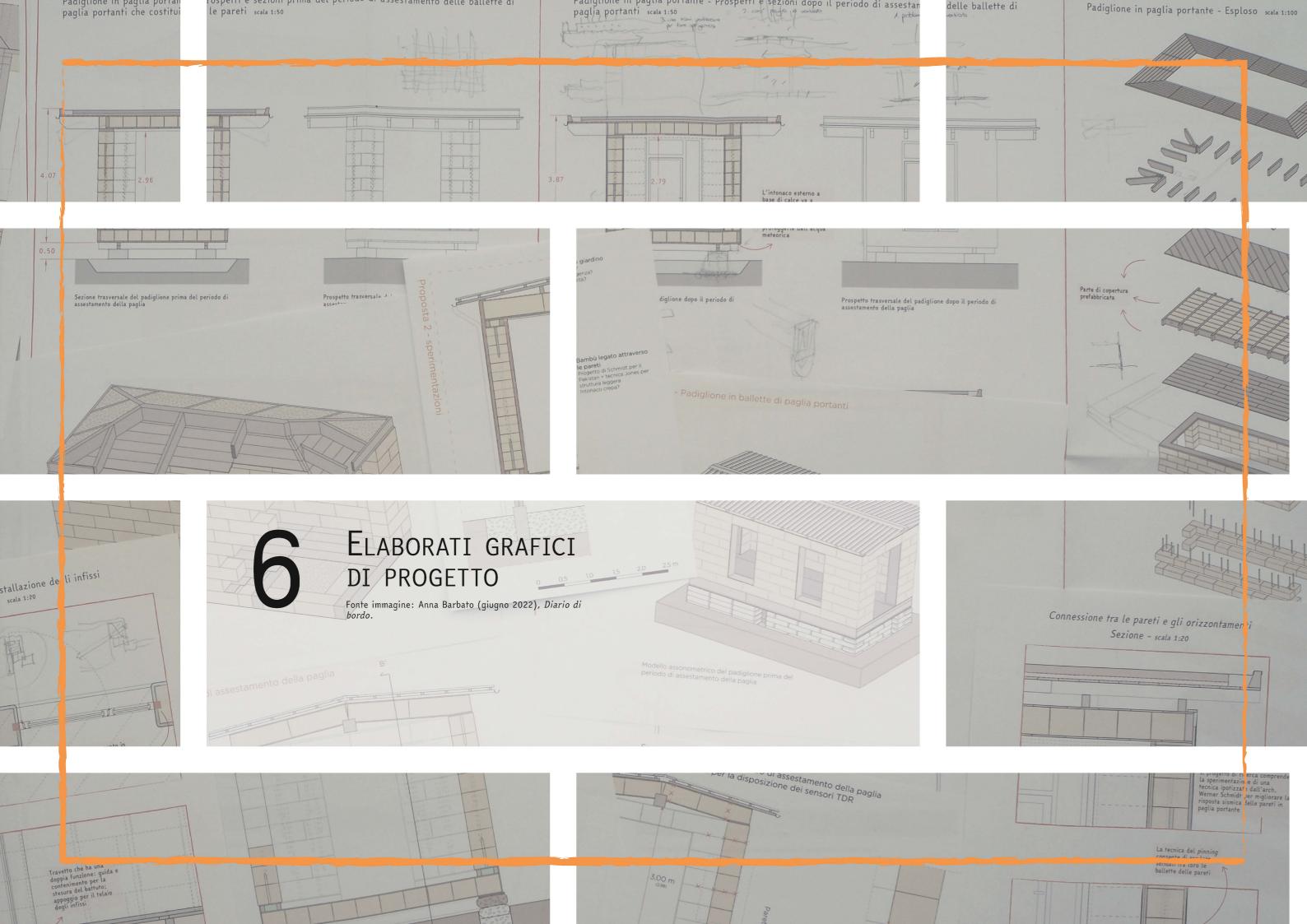


Figura 30 Disegno di Werner Schmidt del progetto per il miglioramento della resistenza sismica di una parete in ballette di paglia portanti

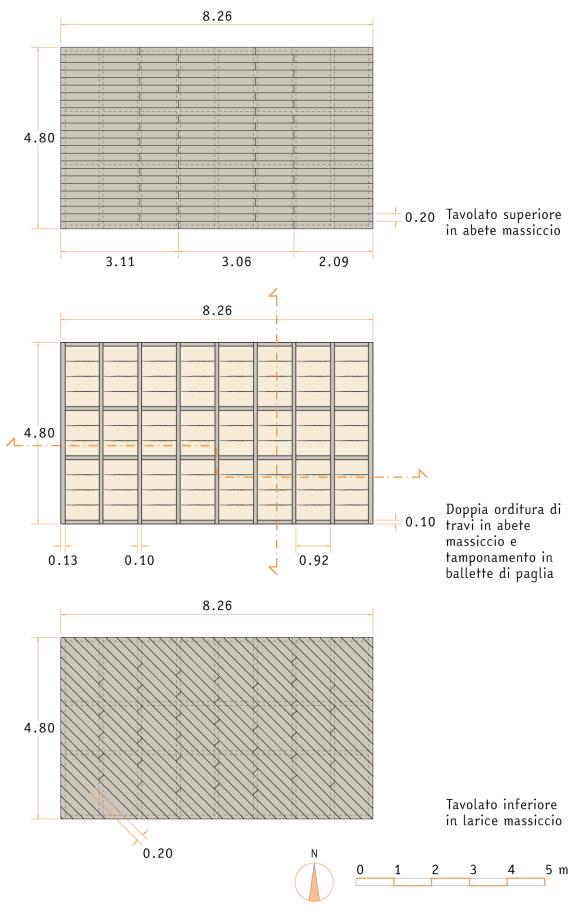
Fonte: Bocco Guarneri, A. (2013). Werner Schmidt architekt. Ecology craft invention. Ambra/V.



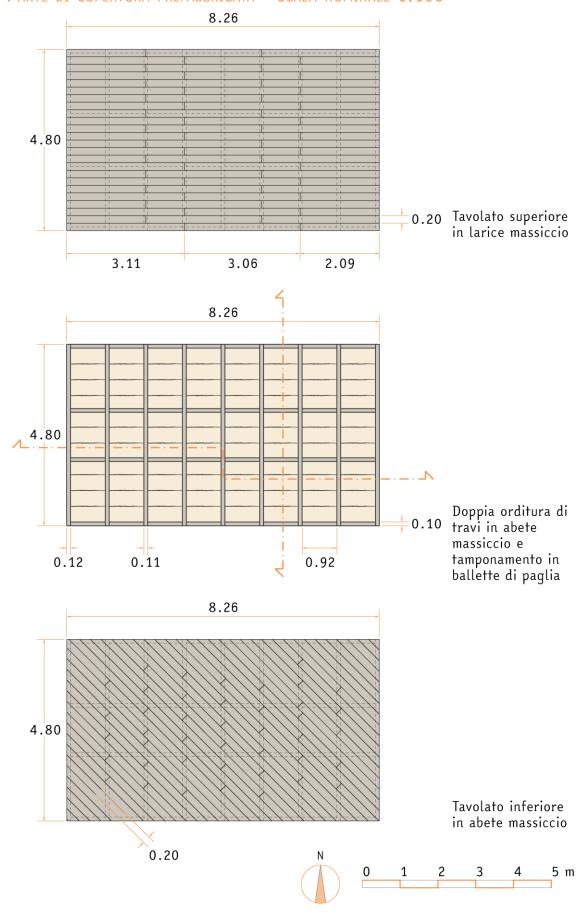
Nel presente capitolo vengono esposti gli elaborati grafici di progetto, che rappresentano il padiglione sia prima del periodo di assestamento delle ballette di paglia portanti delle pareti, sia dopo l'applicazione degli intonaci, l'installazione degli infissi e la stesura del pavimento - che si ipotizza in battuto di cocciopesto.

L'unità di misura di tutte le quote lineari riportate è il metro. Le scale nominali, come specificato per ciascun elaborato, sono 1:100 o 1:50 a seconda del livello di dettaglio richiesto dalla rappresentazione.

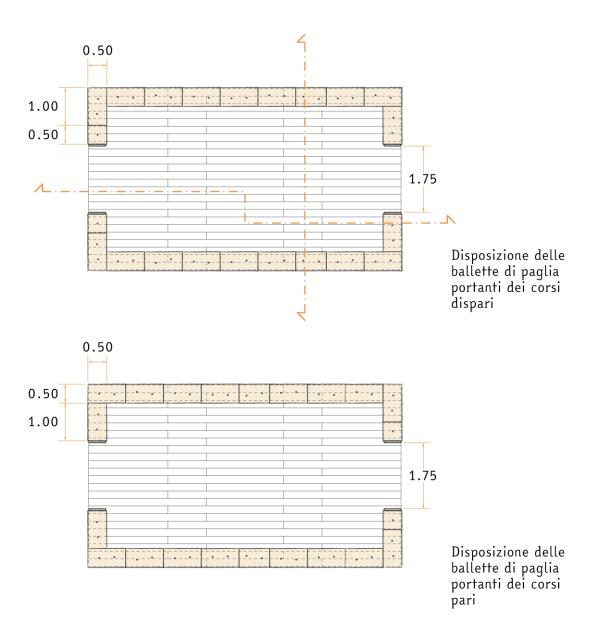
## SOLAIO INFERIORE PREFABBRICATO - SCALA NOMINALE 1:100

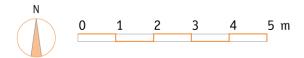


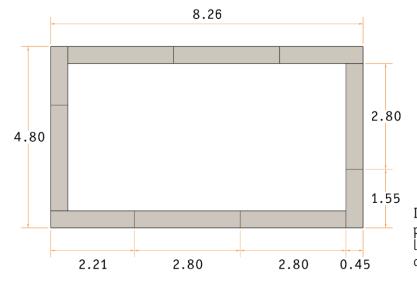
## PARTE DI COPERTURA PREFABBRICATA - SCALA NOMINALE 1:100



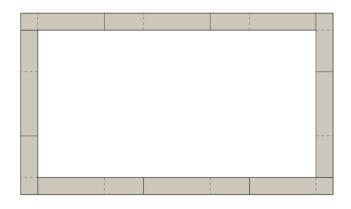
## Pianta prima del periodo di assestamento delle ballette scala nominale 1:100



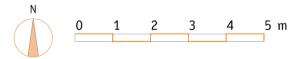


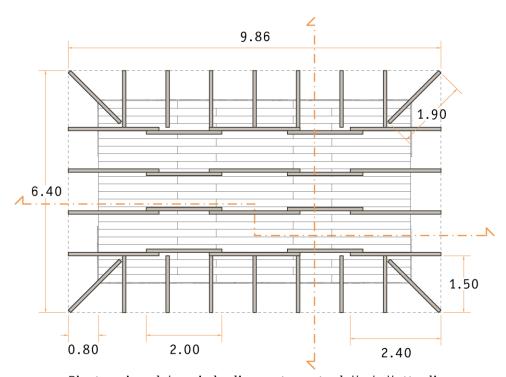


Disposizione dei pannelli di abete lamellare del primo corso

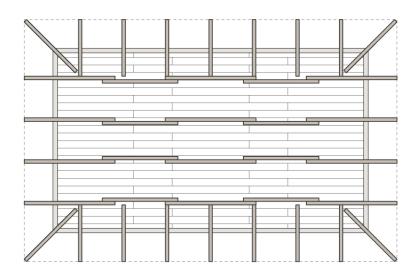


Disposizione dei pannelli di abete lamellare del secondo corso, da avvitare a quello sottostante

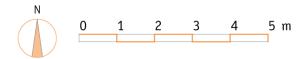


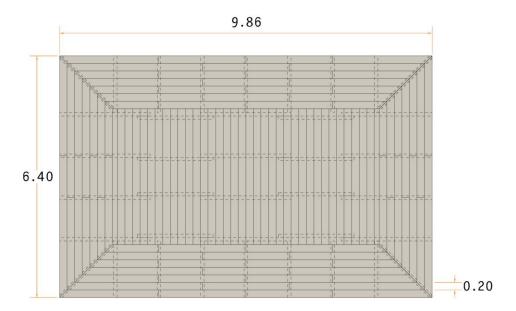


Pianta prima del periodo di assestamento delle ballette di paglia portanti

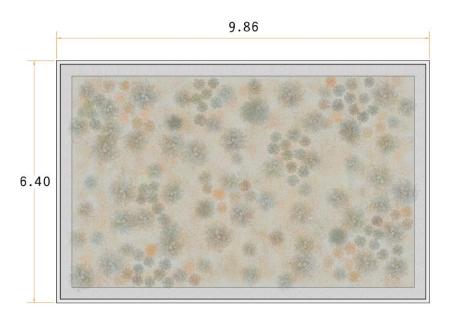


Pianta dopo la posa delle tavole di larice massiccio, elementi su cui l'intonaco esterno andrà in battuta



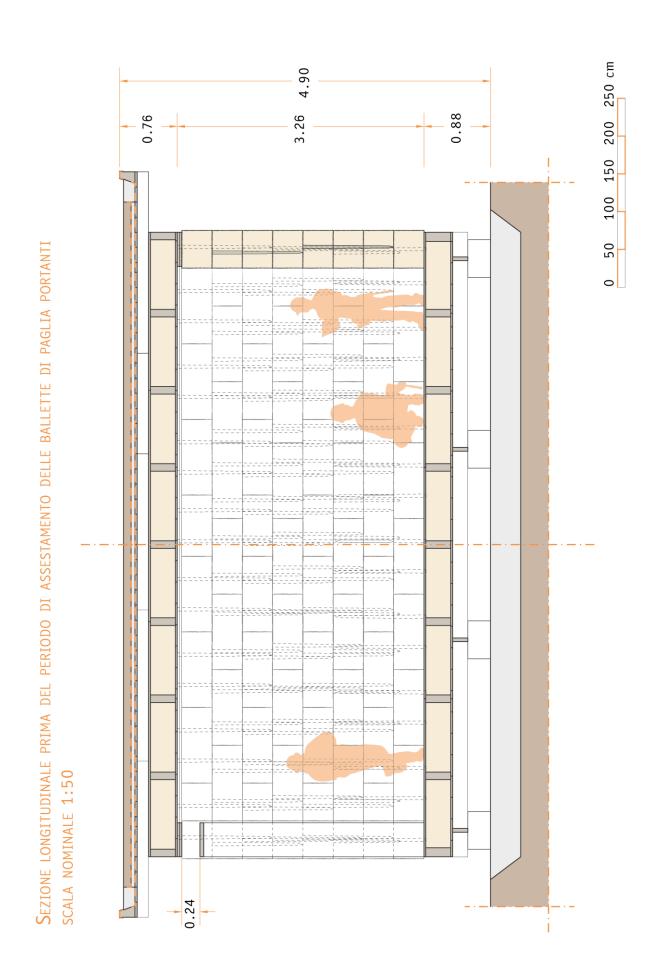


Pianta del tavolato che sostiene la copertura a verde pensile



Pianta della copertura completa





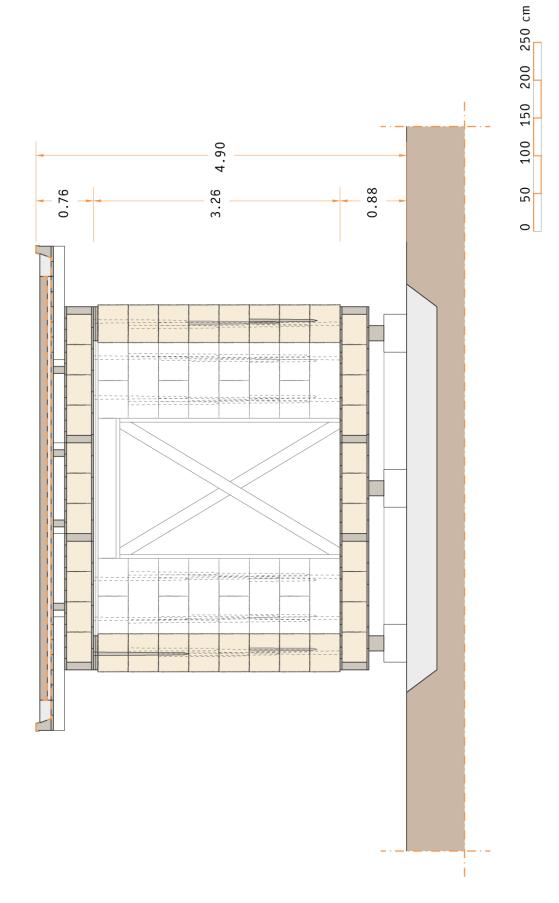
100 150 200 250 cm 4.90 0.88 0.76 3.26 ----SCALA NOMINALE 1:50 \*\*\*\*\* 

20

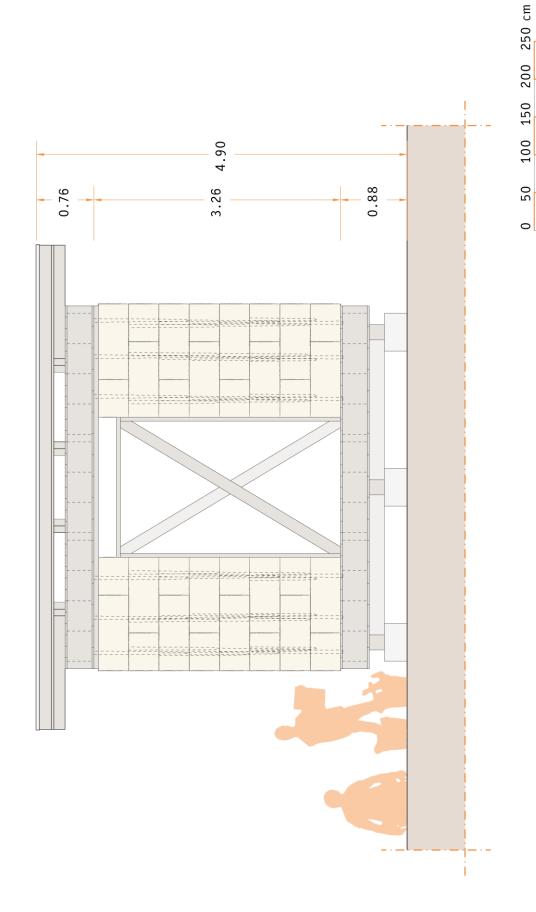
0

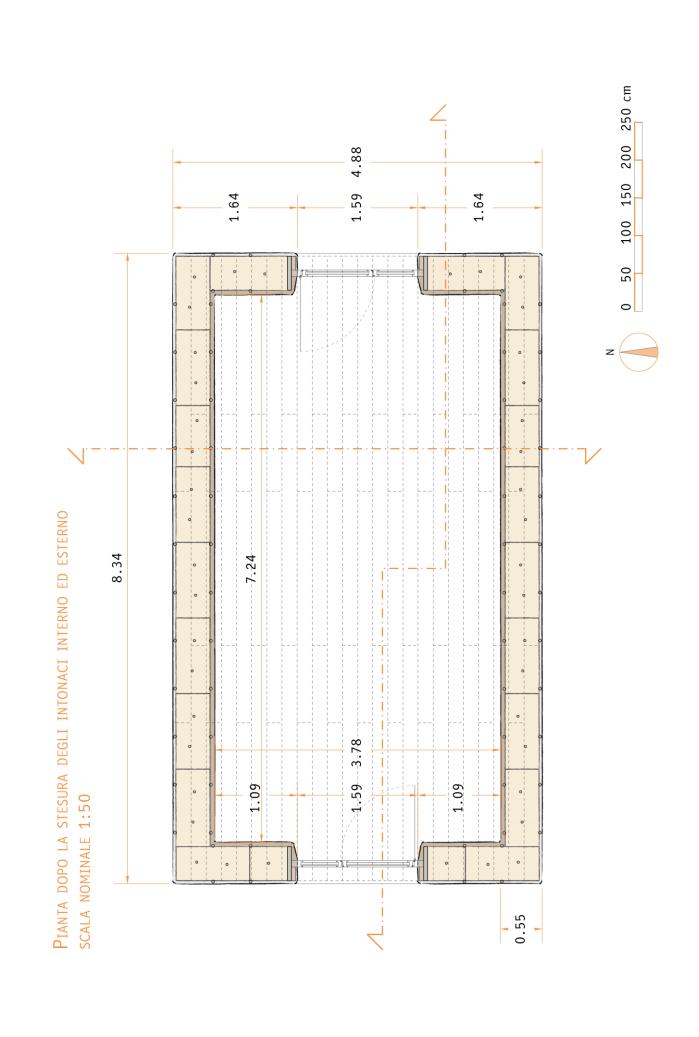
Prospetto longitudinale prima del periodo di assestamento delle ballette di paglia portanti

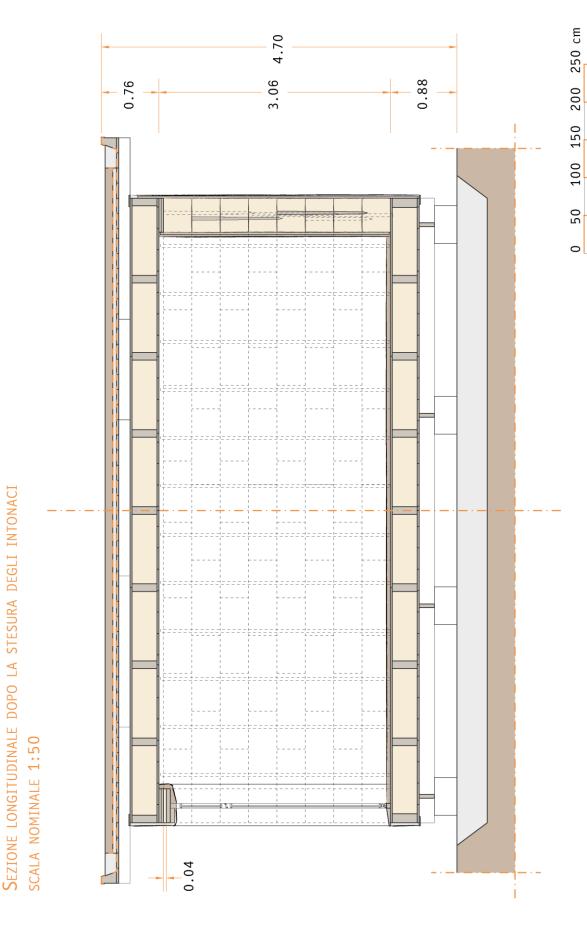
Sezione trasversale prima del periodo di assestamento delle ballette di paglia portanti SCALA NOMINALE 1:50



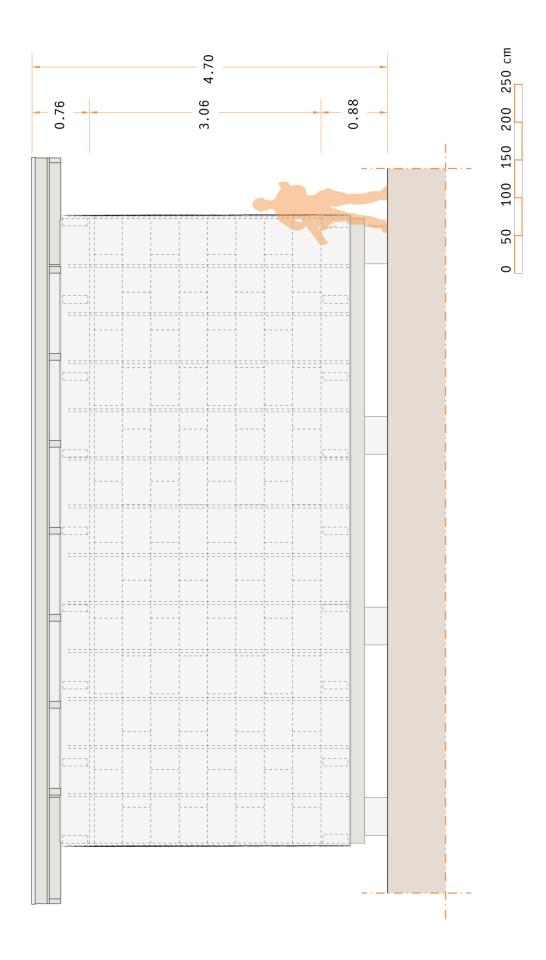
Prospetto trasversale prima del periodo di assestamento delle ballette di paglia portanti SCALA NOMINALE 1:50







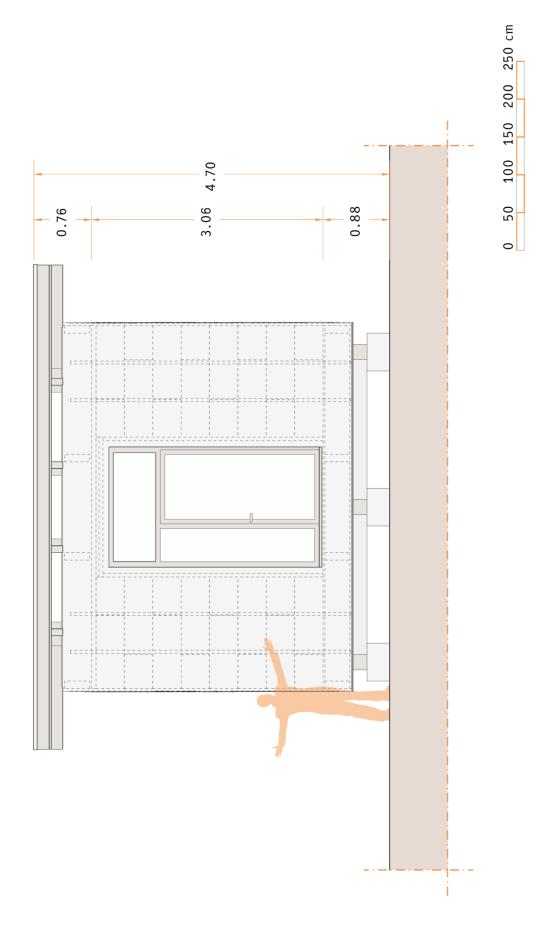
Prospetto Longitudinale dopo la stesura degli intonaci scala nominale 1:50



4.70 3.06 0.88 0.76 SCALA NOMINALE 1:50

Sezione trasversale dopo la stesura degli intonaci

Prospetto trasversale dopo la stesura degli intonaci scala nominale 1:50





Nel presente capitolo si esporranno i procedimenti di calcolo e i relativi fondamenti normativi che hanno permesso di dimensionare tutti gli elementi di legno strutturali. In particolare, si procederà alla trattazione dei calcoli svolti per:

- tavolato che sostiene il pacchetto verde della copertura;
- travetti di ventilazione;
- travi primarie della copertura prefabbricata;
- tavolato inferiore della copertura;
- travi primarie del solaio inferiore;
- tavolato inferiore del solaio.

La normativa a cui si è fatto riferimento e di cui si riportano alcuni estratti è l'aggiornamento delle Norme Tecniche per le costruzioni, pubblicato dalla Gazzetta ufficiale della Repubblica italiana nel 2018.

## LA NORMATIVA ITALIANA E LE PROCEDURE DI CALCOLO

In questo paragrafo, dopo una prima sezione in cui si caratterizzerà l'edificio nel suo complesso, si proseguirà ripercorrendo il procedimento di calcolo svolto per ciascuno dei sei elementi strutturali dimensionati, riportando tutti i riferimenti alle NTC necessari.

Il primo aspetto da sottolineare è che si è scelto di dimensionare il padiglione considerandolo non come un edificio temporaneo con funzione strettamente didattica e destinato ad accogliere principalmente campagne di monitoraggio; al contrario, è stato ipotizzato che l'edificio fosse permanente, suscettibile di affollamento e sfruttabile come luogo di ritrovo pubblico - per esempio un luogo adatto per ospitare una sala studio o conferenze occasionali.

Inizialmente è stato fissato il valore della vita nominale di progetto  $V_N$  e si è scelto di adottare un periodo di riferimento di 50 anni. Di seguito si riporta la tabella 2.4.I della NTC 2018 che espone i valori minimi per tre diversi tipi di costruzione.

Tab. 2.4.I – Valori minimi della Vita nominale  $V_N$  di progetto per i diversi tipi di costruzioni

	TIPI DI COSTRUZIONI	<b>Valori minimi</b> <b>di V</b> <sub>N</sub> (anni)
1	Costruzioni temporanee e provvisorie	10
2	Costruzioni con livelli di prestazioni ordinari	50
3	Costruzioni con livelli di prestazioni elevati	100

Tabella 4 Valori minimi della vita nominale  $V_N$  di progetto da adottare per i diversi tipi di costruzione. "La vita nominale di progetto  $V_N$  di un'opera è convenzionalmente definita come il numero di anni nel quale è previsto che l'opera, purché soggetta alla necessaria manutenzione, mantenga specifici livelli prestazionali."

Successivamente, è stata scelta la classe d'uso del padiglione, che fa riferimento alle conseguenze di un'eventuale interruzione di operatività o di un collasso. Visto quanto è stato chiarito in precedenza, si è ritenuto che la classe più appropriata fosse la seconda. Di seguito si trascrive la definizione ripresa dal paragrafo 2.4.2. delle NTC:

"Classe II: Costruzioni il cui uso preveda normali affollamenti, senza contenuti pericolosi per l'ambiente e senza funzioni pubbliche e sociali essenziali. Industrie con attività non pericolose per l'ambiente. Ponti, opere infrastrutturali, reti viarie non ricadenti in Classe d'uso III o in Classe d'uso IV, reti ferroviarie la cui interruzione non provochi situazioni di emergenza. Dighe il cui collasso non provochi conseguenze rilevanti."

Una volta definiti questi due parametri è stato possibile calcolare il periodo di riferimento per l'azione sismica  $V_R$ , che si ottiene tramite la formula esposta al paragrafo 2.4.3. e di seguito riportata:

$$V_R = V_N \cdot C_U$$

Dove  $C_U$  è il coefficiente d'uso, determinabile tramite la tabella 2.4. II delle NTC:

**Tab. 2.4.II** – Valori del coefficiente d'uso C<sub>11</sub>

CLASSE D'USO	I	II	III	IV
COEFFICIENTE C <sub>U</sub>	0,7	1,0	1,5	2,0

Tabella 5 Coefficiente d'uso C<sub>II</sub>

Per il padiglione:

$$V_R = 50 \cdot 1.0 = 50 \text{ anni}$$

quindi, il periodo di riferimento per l'azione sismica  $V_R$  è di 50 anni, come anche il periodo di ritorno standard di vento e neve. Al paragrafo 2.5.2., infatti, si legge che "per le azioni ambientali (neve, vento, temperatura) il periodo di ritorno è posto uguale a 50 anni, corrispondente ad una probabilità di eccedenza del 2% su base annua".

Dopo aver definito le caratteristiche generali del padiglione, come passaggio iniziale per ciascun elemento dimensionato, sono stati individuati i carichi agenti sulla struttura, che si possono suddividere in carichi permanenti strutturali  $G_1$ , permanenti non strutturali  $G_2$  e azioni variabili Q.

Nel lavoro presentato in questo capitolo sono state valutate esclusivamente le azioni statiche. Per quanto riguarda invece l'azione pseudo statica del vento, sono state adottate delle soluzioni progettuali allo scopo di contrastarle - si noti la travatura secondaria di solaio e copertura prefabbricati e le traverse delle travi d'appoggio sulle fondazioni - ma non sono state valutate e calcolate nello specifico le risposte della struttura. Un ragionamento analogo è applicabile all'azione dinamica sismica: il progetto prevede l'installazione di un sistema per migliorare le prestazioni sismiche delle pareti in paglia, ma nessuna valutazione numerica è stata esequita.

I carichi permanenti strutturali  $G_1$  sono stati definiti nei paragrafi specifici per il dimensionamento di ciascun elemento strutturale, mentre per osservare i carichi permanenti non strutturali  $G_2$  e le azioni variabili Q si deve consultare il paragrafo dedicato Definizione dei carichi  $G_2$  e delle azioni variabili Q.

Per le verifiche a stato limite ultimo SLU il carico complessivo è stato calcolato tramite la formula proposta al paragrafo 2.5.3., che vede impiegati dei coefficienti di sicurezza (vedi Tabella 6) e dei coefficienti di combinazione (vedi Tabella 7).

Nelle NTC si legge che "per la progettazione di componenti strutturali che non coinvolgano azioni di tipo geotecnico, le verifiche nei confronti degli stati limite ultimi strutturali (STR) si eseguono adottando i coefficienti y riportati nella colonna A1 della Tabella 2.6.I. [Tabella 6 del presente elaborato di tesi]". Mentre sono stati utilizzati i coefficienti di combinazione  $\psi_{0j}$ , come indicato dalla combinazione fondamentale - sotto riportata - generalmente impiegata per gli stati limite ultimi (SLU) ed esposta al paragrafo 2.5.3. della NTC:

$$\gamma_{G1} \cdot G_1 \, + \, \gamma_{G2} \cdot G_2 \, + \, \gamma_P \cdot P \, + \, \gamma_{Q1} \cdot Q_{k1} \, + \, \gamma_{Q2} \cdot \psi_{02} \cdot Q_{k2} \, + \, \gamma_{Q3} \cdot \psi_{03} \cdot Q_{k3} \, + \, ...$$

Tab. 2.6.I – Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni nelle verifiche SLU

		Coefficiente	EQU	A1	A2
		$\gamma_{\scriptscriptstyle F}$			
Conichi monto on onti Co	Favorevoli	2/	0,9	1,0	1,0
Carichi permanenti G1	Sfavorevoli	$\gamma_{G1}$	1,1	1,3	1,0
Conichi manna anati manatanati C (1)	Favorevoli	2/	0,8	0,8	0,8
Carichi permanenti non strutturali G <sub>2</sub> <sup>(1)</sup>	Sfavorevoli	$\gamma_{G2}$	1,5	1,5	1,3
A -ii i - hili O	Favorevoli	2/	0,0	0,0	0,0
Azioni variabili Q	Sfavorevoli	$\gamma_{\mathrm{Qi}}$	1,5	1,5	1,3

Nel caso in cui l'intensità dei carichi permanenti non strutturali o di una parte di essi (ad es. carichi permanenti portati) sia ben definita in fase di progetto, per detti carichi o per la parte di essi nota si potranno adottare gli stessi coefficienti parziali validi per le azioni permanenti.

Tabella 6 Coefficienti di sicurezza da applicare alle azioni per svolgere le verifiche a SLU

 ${\bf Tab.\ 2.5.I}-Valori\ dei\ coefficienti\ di\ combinazione$ 

Categoria/Azione variabile	Ψοϳ	$\psi_{1j}$	$\psi_{2j}$	
Categoria A - Ambienti ad uso residenziale	0,7	0,5	0,3	
Categoria B - Uffici	0,7	0,5	0,3	
Categoria C - Ambienti suscettibili di affollamento	0,7	0,7	0,6	
Categoria D - Ambienti ad uso commerciale	0,7	0,7	0,6	
Categoria E – Aree per immagazzinamento, uso commerciale e uso industriale Biblioteche, archivi, magazzini e ambienti ad uso industriale	1,0	0,9	0,8	
Categoria F - Rimesse , parcheggi ed aree per il traffico di veicoli (per autoveicoli di peso ≤ 30 kN)	0,7	0,7	0,6	
Categoria G – Rimesse, parcheggi ed aree per il traffico di veicoli (per autoveicoli di peso > 30 kN)	0,7	0,5	0,3	
Categoria H - Coperture accessibili per sola manutenzione	0,0	0,0	0,0	
Categoria I – Coperture praticabili	da val	da valutarsi caso per		
Categoria K – Coperture per usi speciali (impianti, eliporti,)		caso		
Vento	0,6	0,2	0,0	
Neve (a quota ≤ 1000 m s.l.m.)	0,5	0,2	0,0	
Neve (a quota > 1000 m s.l.m.)	0,7	0,5	0,2	
Variazioni termiche	0,6	0,5	0,0	

Tabella 7 Coefficienti di combinazione da applicare alle azioni variabili o ai carichi di esercizio

Dopo aver definito anche i coefficienti da applicare alle diverse azioni, sono stati individuati i parametri indispensabili per ottenere i valori di resistenza di progetto del legno.<sup>41</sup>

A seguire si riporta una tabella ricavata dalla UNI 11035 che elenca i valori caratteristici di varie tipologie di legno di provenienza italiana.

\_

 $<sup>^{41}</sup>$  Nelle NTC 2018 il capitolo dedicato nello specifico alle costruzioni di legno è il 4.4.

Tabella A-3 - Classi di resistenza per specie legnose di provenienza italiana (conifere)-UNI 11035

			Abete / Italia		Pino laricio / Italia		Larice / Nord Italia		Douglasia / Italia		Altre conifere <sup>(2)</sup> Italia		re <sup>(2)</sup> /
		S2	S3	S1	S2	S3	S2	S3	S1 <sup>(1)</sup>	S2/S3	S1	S2	S3
Resistenze [MPa]													
Flessione	$f_{ m m,k}$	25	18	40	22	15	23	18	35	22	33	26	22
Trazione parallela	$f_{t,0,k}$	15	-11	24	13	9	14	11	21	13	20	16	13
Trazione perpendicolare	$f_{\rm t,90,k}$	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Compressione parallela	$f_{\mathrm{c},0,\mathrm{k}}$	21	18	26	20	17	20	18	25	20	24	22	20
Compressione perpendicolare	$f_{\rm c,90,k}$	2.6	2.6	3.2	3.0	3.0	3.6	3.6	3.2	2.9	3.7	3.7	3.7
Taglio	$f_{\rm v,k}$	4.0	3.4	4.0	3.8	3.0	3.8	3.4	4.0	3.8	4.0	4.0	3.8
Rigidezze [GPa]													
Modulo di elasticità parallelo medio	$E_{0,\text{mean}}$	11.8	10.5	15.0	12.0	11.0	12.5	11.5	15.8	13.0	12.3	11.4	10.5
Modulo di elasticità parallelo 5-percentile	$E_{0,05}$	7.9	7.0	10.0	8.0	7.4	8.4	7.7	11.0	8.7	8.2	7.6	7.0
Modulo di elasticità perpendicolare medio	$E_{90,\mathrm{mean}}$	0.39	0.35	0.50	0.40	0.37	0.42	0.38	0.53	0.43	0.41	0.38	0.35
Modulo di taglio medio	$G_{\mathrm{mean}}$	0.74	0.66	0.94	0.75	0.69	0.78	0.72	0.99	0.81	0.77	0.71	0.66
Massa volumica [kg/m³]													
Massa volumica caratteristica	$\rho_{k}$	375	375	455	425	430	510	520	450	415	530	530	530
Massa volumica media	$ ho_{ m mean}$	450	450	550	520	520	610	620	540	500	575	575	575

<sup>(1)</sup> Massima altezza e larghezza 100mm.

Tabella 8 Classi di resistenza per specie legnose di provenienza italiana (conifere) Fonte secondaria: CNR - Commissione di studio per la predisposizione e l'analisi di norme tecniche relative alle costruzioni (2018). Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo delle Strutture di Legno

Al paragrafo 4.4.5. delle NTC si spiega che le resistenze di progetto e i moduli elastici del legno dipendono anche dalle condizioni ambientali in cui l'edificio si trova. Per questo è importante definire la classe di servizio che meglio rappresenta le condizioni in cui si trova la struttura in esame.

Visti l'elevato grado di traspirabilità al vapore acqueo degli elementi di chiusura, i dati climatici di Grugliasco (vedi Tabella 16 del capitolo 8) e il comportamento termoigrometrico dell'involucro (vedi capitolo 8); per il padiglione si è scelta la classe di servizio 2, di cui di seguito se ne riporta la definizione esposta in Tab. 4.4.II delle NTC:

la classe di servizio II "è caratterizzata da un'umidità del materiale in equilibrio con l'ambiente a una temperatura di 20 °C e un'umidità relativa dell'aria circostante che superi l'85% solo per poche settimane all'anno.".

In relazione alla classe di servizio e alla classe di durata del carico (considerato permanente) e basandosi sui valori caratteristici di resistenza del legno esposti in Tabella 8, si possono ottenere i valori di progetto tramite la formula riportata al paragrafo 4.4.6. delle NTC:

$$X_d = \frac{k_{mod} X_k}{\gamma_{M}}$$

dove:

<sup>(2)</sup> Pino silvestre, Pino nero, Pino marittimo, Pino domestico, Pino strobo, Cipresso, Cedro

 $X_k$  è il valore caratteristico della proprietà del materiale, come specificato al § 11.7, o della resistenza del collegamento. Il valore caratteristico  $X_k$  può anche essere determinato mediante prove sperimentali sulla base di prove svolte in condizioni definite dalle norme europee applicabili, come riportato nel paragrafo 11.7;

 $<sup>\</sup>gamma_{\rm M}$  è il coefficiente parziale di sicurezza relativo al materiale, i cui valori sono riportati nella Tab. 4.4.III;

 $k_{mod}$  è un coefficiente correttivo che tiene conto dell'effetto, sui parametri di resistenza, sia della durata del carico sia dell'umidità della struttura. I valori di  $k_{mod}$  sono forniti nella Tab. 4.4.IV.

**Tab. 4.4.III** - Coefficienti parziali  $\gamma_M$  per le proprietà dei materiali

Stati limite ultimi	Colonna A $\gamma_{\scriptscriptstyle M}$	Colonna B $\gamma_{\scriptscriptstyle M}$
combinazioni fondamentali		
legno massiccio	1,50	1,45
legno lamellare incollato	1,45	1,35
pannelli di tavole incollate a strati incrociati	1,45	1,35
pannelli di particelle o di fibre	1,50	1,40
LVL, compensato, pannelli di scaglie orientate	1,40	1,30
unioni	1,50	1,40
combinazioni eccezionali	1,00	1,00

Per i materiali non compresi nella Tabella si potrà fare riferimento ai pertinenti valori riportati nei riferimenti tecnici di comprovata validità indicati nel Capitolo 12, nel rispetto dei livelli di sicurezza delle presenti norme.

Tabella 9 Coefficienti parziali ym per le proprietà dei materiali

Tab. 4.4.IV -Valori di k<sub>mod</sub> per legno e prodotti strutturali a base di legno

			Classe di	Classe di durata del carico					
Materiale	Riferimo	ento	servizio	Permanente	Lunga	Media	Breve	Istanta- nea	
Legno massiccio	UNI EN 14081-1	UNI EN 14081-1		0,60	0,70	0,80	0,90	1,10	
Legno lamellare incollato (*)	UNI EN 14080		2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10	
LVL	UNI EN 14374, UNI	EN 14279	3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90	
			1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10	
Compensato	UNI EN 636:2015		2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10	
			3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90	
		OSB/2	1	0,30	0,45	0,65	0,85	1,10	
Pannello di scaglie orientate (OSB)	UNI EN 300:2006	OSB/3 -	1	0,40	0,50	0,70	0,90	1,10	
		OSB/4	2	0,30	0,40	0,55	0,70	0,90	
		Parti 4, 5	1	0,30	0,45	0,65	0,85	1,10	
Pannello di particelle	UNI EN 312 :2010	Parte 5	2	0,20	0,30	0,45	0,60	0,80	
(truciolare)		Parti 6, 7	1	0,40	0,50	0,70	0,90	1,10	
		Parte 7	2	0,30	0,40	0,55	0,70	0,90	
Pannello di fibre, pannelli duri	UNI EN 622-2:2005	HB.LA, HB.HLA 1 o 2	1	0,30	0,45	0,65	0,85	1,10	
•		HB.HLA 1 o 2	2	0,20	0,30	0,45	0,60	0,80	
		MBH.LA1 o 2	1	0,20	0,40	0,60	0,80	1,10	
Pannello di fibre, pannelli semiduri	UNI EN 622-3:2005	MBH.HLS1 o	1	0,20	0,40	0,60	0,80	1,10	
.1		2	2	-	-	-	0,45	0,80	
Pannello di fibra di legno, ottenuto per via secca (MDF)	UNI EN 622-5:2010	MDF.LA, MDF.HLS	1	0,20	0,40	0,60	0,80	1,10	
		MDF.HLS	2	-	-	-	0,45	0,80	

Per i materiali non compresi nella Tabella si potrà fare riferimento ai pertinenti valori riportati nei riferimenti tecnici di comprovata validità indicati nel Capitolo 12, nel rispetto dei livelli di sicurezza delle presenti norme.

Tabella 10 Valori di  $k_{mod}$  per legno e prodotti strutturali a base di legno

Nel caso specifico del progetto del padiglione, sono stati utilizzati i coefficienti  $\gamma_M$  della colonna A, in quanto quelli di colonna B si usano per "produzioni continuative di elementi o strutture, soggette a controllo continuativo del materiale dal quale risulti un coefficiente di variazione (rapporto tra scarto quadratico medio e valor medio) della resistenza non superiore al 15%.". Dato che tutti gli elementi dimensionati sono in legno massiccio, si è sempre considerato  $\gamma_M = 1.50$ .

Impiegando legno massiccio con classe di servizio II e carico permanente, il coefficiente  $k_{mod}$  vale 0.60.

Per ridurre il valore del modulo di elasticità medio parallelo alla fibratura E<sub>0,mean</sub> - utile per valutare la deformazione a lungo termine nelle verifiche a SLE - è necessario dividerlo per il fattore (1+k<sub>def</sub>), come indicato al paragrafo 4.4.7. delle NTC. Questo coefficiente "tiene conto dell'aumento di deformabilità con il tempo causato dall'effetto combinato della viscosità, dell'umidità del materiale e delle sue variazioni" e il suo valore si ricava dalla Tabella 11.

<sup>(\*)</sup> I valori indicati si possono adottare anche per i pannelli di tavole incollate a strati incrociati, ma limitatamente alle classi di servizio 1 e 2.

 $\textbf{Tab. 4.4.V -} Valori\ di\ k_{def}\ per\ legno\ e\ prodotti\ strutturali\ a\ base\ di\ legno$ 

Materiale	Riferimer		Classe di servizio			
Materiale	Kiferimei	110	1	2	3	
Legno massiccio	UNI EN 14081-1	0,60	0,80	2,00		
Legno lamellare incollato *	UNI EN 14080		0,60	0,80	2,00	
LVL	UNI EN 14374, UNI E	EN 14279	0,60	0,80	2,00	
			0,80	-	-	
Compensato	UNI EN 636:2015		0,80	1,00	-	
			0,80	1,00	2,50	
Pannolli di caralia ariantata (OCP)	UNI EN 300:2006	OSB/2	2,25	-	-	
Pannelli di scaglie orientate (OSB)	UNI EN 300:2006	OSB/3 OSB/4	1,50	2,25	-	
		Parte 4	2,25	-	-	
		Parte 5	2,25	3,00	-	
Pannello di particelle (truciolare)	UNI EN 312:2010	Parte 6	1,50	-	-	
		Parte 7	1,50	2,25	-	
		HB.LA	2,25	-	-	
Pannello di fibre, pannelli duri	UNI EN 622-2::2005	HB.HLA1, HB.HLA2	2,25	3,00	-	
Dannello di Chua mannelli comideni	UNI EN 622-3:2005	MBH.LA1, MBH.LA2	3,00	-	-	
Pannello di fibre, pannelli semiduri	OINI EIN 022-3;2003	MBH.HLS1, MBH.HLS2	3,00	4,00	-	
Pannello di fibra di legno, ottenuto per		MDF.LA	2,25	-	-	
via secca (MDF)	UNI EN 622-5:2010	MDF.HLS	2,25	3,00	-	

Tabella 11 Coefficiente di deformazione  $k_{def}$ 

Sulla base di quanto esposto finora, di seguito si riportano delle tabelle riassuntive con i valori caratteristici e di progetto utili per i dimensionamenti presentati nei paragrafi seguenti.

Valori <b>caratteristici</b> per i Larice Nord Ita da UNI 110:	lia S2	classe:	Valori di <b>progetto</b> per legno di larice S2 massiccio, con classe di servizio II e carico permanente					
Valore caratteristico della resistenza a flessione $f_{m,k} \label{eq:fmk}$	23	N/mm²	Coefficiente parziale di sicurezza YM	1,50	-			
Valore caratteristico della resistenza a taglio f <sub>v,k</sub>	3,8	N/mm²	Coefficiente di correzione della resistenza k <sub>mod</sub>	0,60	-			
Modulo di elasticità medio E <sub>O,mean</sub>	12.500	N/mm²	Valore di calcolo della resistenza a flessione $f_{\text{m,d}}$	9,2	N/mm²			
Modulo di elasticità parallelo alla fibratura 5-percentile E <sub>0,05</sub>	8.400	N/mm²	Valore di calcolo della resistenza a taglio f <sub>v,d</sub>	1,52	N/mm²			
Valore medio del modulo elastico tangenziale G <sub>mean</sub>	780	N/mm²	Coefficiente di deformazione k <sub>def</sub>	0,80	-			
Massa volumica media Pmean	610	kg/m³	Modulo elastico di progetto parallelo alle fibre E <sub>0,d</sub>	6.944,44	N/mm²			

## Valori **caratteristici** per il legno di classe: Abete italiano S3 da UNI 11035

# Valori di **progetto** per legno di abete S3 massiccio, con classe di servizio II e carico permanente

				-	
Valore caratteristico della resistenza a flessione $f_{m,k}$	18	N/mm²	Coefficiente parziale di sicurezza VM	1,50	-
Valore caratteristico della resistenza a taglio f <sub>v,k</sub>	3,4	N/mm²	Coefficiente di correzione della resistenza k <sub>mod</sub>	0,60	-
Modulo di elasticità medio E <sub>0,mean</sub>	10.500	N/mm²	Valore di calcolo della resistenza a flessione $f_{m,d} \label{eq:fmd}$	7,2	N/mm²
Modulo di elasticità parallelo alla fibratura 5-percentile E <sub>0,05</sub>	7.000	N/mm²	Valore di calcolo della resistenza a taglio f <sub>v,d</sub>	1,36	N/mm²
Valore medio del modulo elastico tangenziale G <sub>mean</sub>	660	N/mm²	Coefficiente di deformazione k <sub>def</sub>	0,80	-
Massa volumica media ρ <sub>mean</sub>	450	kg/m³	Modulo elastico di progetto parallelo alle fibre E <sub>0,d</sub>	5.833,33	N/mm²

Per quanto riguarda il legno di abete è stata considerata la classe S3 a favore di sicurezza, in quanto rappresenta la categoria con i valori di resistenza inferiori tra quelle descritte dalla UNI 11035. Per il legno di larice, invece, si è potuto utilizzare la classe più performante S2, perché nel momento in cui è stato scritto il presente capitolo di tesi avevamo già ricevuto i preventivi relativi alla fornitura degli elementi in larice. Sia Legnami Priola, sia Segheria Valle Sacra hanno offerto un legname di classe C24<sup>42</sup> che, dal punto di vista strutturale, è migliore rispetto a quello di classe S2.

Nel momento in cui sono state definite anche le resistenze di progetto è stato possibile iniziare le verifiche a stato limite ultimo SLU e le verifiche a stato limite di esercizio SLE, come prescritto dalla normativa.

Nello specifico sono state eseguite:

- verifica a flessione semplice;
- verifica a taglio semplice;
- verifica a torsione (solo per elementi sollecitati da carichi eccentrici);
- verifica a taglio e torsione combinati (solo per elementi soggetti a torsione);
- verifica di instabilità di trave;
- verifica a SLE per deformazione.

Di seguito si approfondiranno le suddette verifiche, anche riprendendo alcuni estratti della normativa. In ciascuno dei paragrafi dedicati ai dimensionamenti strutturali dei singoli elementi, invece, i procedimenti di calcolo verranno riportati in forma abbreviata come allegati.

<sup>&</sup>lt;sup>42</sup> La classe di resistenza C24 fa riferimento alla UNI-EN 338 e riguarda legno di conifere e di pioppo, senza specifiche rispetto alla provenienza.

#### Verifiche a stato limite ultimo SLU

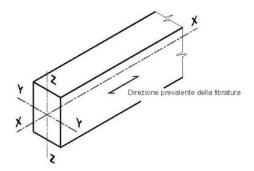


Figura 31 Schema rappresentante gli assi dell'elemento. Ripreso dal paragrafo 4.4.8.1. delle NTC 2018

Per la verifica a flessione semplice, la normativa (paragrafo 4.4.8.1.6) indica che le condizioni da soddisfare sono:

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,d}} \le 1$$
 [4.4.5a]

$$k_{\rm m} \frac{\sigma_{\rm m,z,d}}{f_{\rm m,z,d}} + \frac{\sigma_{\rm m,z,d}}{f_{\rm m,z,d}} \le 1 \tag{4.4.5b}$$

dove:

 $\sigma_{m,y,d} e \, \sigma_{m,z,d}$  sono le tensioni di progetto massime per flessione rispettivamente nei piani xz e xy determinate assumendo una distribuzione elastico lineare delle tensioni sulla sezione (vedi Fig. 4.4.1);

 $f_{m,y,d} e f_{m,z,d}$  sono le corrispondenti resistenze di progetto a flessione(formula 4.4.1), determinate tenendo conto anche delle dimensioni della sezione trasversale mediante il coefficiente  $k_{br}$  come definito al § 11.7.1.1.

I valori da adottare per il coefficiente  $k_{n\nu}$  che tiene conto convenzionalmente della ridistribuzione delle tensioni e della disomogeneità del materiale nella sezione trasversale, sono:

- k<sub>m</sub> = 0,7 per sezioni trasversali rettangolari;
- $-k_m = 1.0$  per altre sezioni trasversali.

Deve essere inoltre effettuata la verifica di stabilità per elementi inflessi (svergolamento o instabilità flesso-torsionale), come definita al  $\S$  4.4.8.2.1.

Nei casi in esame, però, le tensioni  $\sigma_{m,z,d}$  sono sempre nulle, per cui la formula di verifica risulta essere:

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \le 1$$

Con  $\sigma_{\text{m,y,d}}\,\text{che}$  si calcola mediante la formula di Navier:

$$\sigma_{m,y,d} = M_{max} / W_x$$

Dove:

M<sub>max</sub> è il momento massimo agente sull'elemento<sup>43</sup>;

 $W_x$  è il modulo di resistenza, calcolato tramite la formula (b  $\cdot$  h²) / 6.

<sup>&</sup>lt;sup>43</sup> Tutte le sollecitazioni di momento e taglio e le deformate calcolate nel presente capitolo sono state ricavate attraverso il software open source Ftool.

Per la verifica a taglio semplice la condizione imposta dalla normativa al paragrafo 4.4.8.1.9 è:

$$\tau_{d} \le f_{v,d}, \tag{4.4.8}$$

dove:

τ<sub>d</sub> è la massima tensione tangenziale di progetto, valutata secondo la teoria di Jourawski, **considerando una larghezza di trave** opportunamente ridotta per la presenza di eventuali fessurazioni;

 $f_{v,d}$  è la corrispondente resistenza di progetto a taglio (formula 4.4.1).

Alle estremità della trave si potrà effettuare la verifica sopra indicata valutando in modo convenzionale  $\tau_d$ , considerando nullo, ai fini del calcolo dello sforzo di taglio di estremità, il contributo di eventuali forze agenti all'interno del tratto di lunghezza pari all'altezza h della trave, misurato a partire dal bordo interno dell'appoggio, o all'altezza effettiva ridotta  $h_{eff}$  nel caso di travi con intagli.

La formula di Jourawski per calcolare la tensione tangenziale di progetto massima è:

$$\tau_d = \frac{3 \cdot T_{max}}{2 \cdot b_{af} \cdot h}$$

Mentre la larghezza effettiva si calcola mediante la formula:

$$b_{ef} = k_{ef} \cdot b$$

Dove:

b è la base dell'elemento studiato;

 $k_{ef}$  è un coefficiente che considera l'influenza delle fessurazioni presenti nell'elemento strutturale e per il legno massiccio è pari a  $0.67^{44}$ .

La verifica a torsione è da eseguire solamente nel caso in cui l'elemento da dimensionare sia sollecitato da un carico eccentrico, quindi avente la forza risultante applicata su un punto non appartenente all'asse baricentrico. Nel caso specifico del padiglione, gli unici elementi su cui si è dovuto fare la verifica a torsione sono stati le travi di bordo di solaio inferiore e copertura prefabbricata.

La condizione da verificare secondo le direttive fornite al paragrafo 4.4.8.1.10 delle NTC è:

$$\tau_{tor,d} \le k_{sh} \ f_{v,d,} \tag{4.4.9}$$

dove:

 $\tau_{tor,d}$  è la massima tensione tangenziale di progetto per torsione;

 $k_{sh}$  è un coefficiente che tiene conto della forma della sezione trasversale;

f<sub>v,d</sub> è la resistenza di progetto a taglio (formula 4.4.1).

Per il coefficiente  $k_{\text{sh}}$  si possono assumere i valori:

 $k_{sh} = 1,2$  per sezioni circolari piene;

 $k_{sh} = 1 + 0.15 \text{ h/b} \le 2$  per sezioni rettangolari piene, di lati b e h, b  $\le$  h;

 $k_{sh}$  = 1 per altri tipi di sezione.

La tensione tangenziale di progetto massima si calcola mediante la formula:

$$\tau_{\max} = \alpha \cdot \frac{M_t}{b \cdot a^2}$$

Dove:

a è la dimensione minore della sezione, nel caso in esame la base;

b è la dimensione maggiore della sezione, nel caso in esame l'altezza;

 $\alpha$  è un coefficiente variabile proporzionalmente al rapporto a/b (nel caso in esame b/h) e si calcola con la formula:

$$\alpha = 3 + 1.8 \cdot \frac{a}{h}$$

<sup>&</sup>lt;sup>44</sup> CNR - Commissione di studio per la predisposizione e l'analisi di norme tecniche relative alle costruzioni (2018). *Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo delle Strutture di Legno*. Paragrafo 7.6.1.1.9.

Mt è il momento torcente e si calcola con la formula:

$$M_t = P \cdot e$$

dove:

P è la forza risultante concentrata del carico totale agente sull'elemento; e è l'eccentricità di P, ovvero la distanza tra il punto di applicazione di P e l'asse baricentrico dell'elemento.

La forza P viene calcolata moltiplicando il carico eccentrico superficiale agente per l'area d'influenza, che è pari all'interasse moltiplicato per la lunghezza d'influenza. Tale lunghezza è considerata pari a 1 m, così da ottenere un momento torcente su metro lineare.

Se per l'elemento è stata fatta la verifica a torsione, allora è necessario eseguire anche la verifica per l'azione combinata di **taglio e torsione**, la cui condizione da verificare - presentata al paragrafo 4.4.8.1.11 - è:

$$\frac{\tau_{\text{tor,d}}}{k_{\text{sh}}f_{\text{v,d}}} + \left(\frac{\tau_{\text{d}}}{f_{\text{v,d}}}\right)^2 \le 1$$
 [4.4.10

ove il significato dei simboli è quello riportato nei paragrafi corrispondenti alle verifiche a taglio e a torsione.

L'ultima verifica a SLU eseguita su tutti gli elementi dimensionati non è una verifica di resistenza, come quelle viste finora, ma una verifica necessaria ad "accertare la sicurezza della costruzione, o delle singole membrature, nei confronti di possibili fenomeni di instabilità, quali lo svergolamento degli elementi inflessi [...]". È definita verifica per instabilità di trave o flesso-torsionale ed è trattata nel paragrafo 4.4.8.2.1 delle NTC 2018. La condizione che deve risultare soddisfatta è:

$$\frac{\sigma_{m,d}}{k_{crit,m}\,f_{m,d}} \hspace{-0.5cm} \leq \hspace{-0.5cm} 1 \hspace{1cm} [4.4.11]$$

 $\sigma_{m,d}$  tensione di progetto massima per flessione;

k<sub>crit,m</sub> coefficiente riduttivo di tensione critica per instabilità di trave, per tener conto della riduzione di resistenza dovuta allo sbandamento laterale:

 $f_{m,d}$  resistenza di progetto a flessione (formula 4.4.1), determinata tenendo conto anche delle dimensioni della sezione trasversale mediante il coefficiente  $k_h$ .

Il valore del coefficiente  $k_{crit,m}$  varia in relazione alla snellezza relativa di trave  $\lambda_{rel,m}$  come esposto di seguito:

$$k_{crit,m} = \begin{cases} 1 & \text{per } \lambda_{rel,m} \leq 0,75 \\ 1,56 - 0,75\lambda_{rel,m} & \text{per } 0,75 \\ 1/\lambda_{rel,m}^2 & \text{per } 1,4 \\ 1/\lambda_{rel,m}^2 & \text{per } 1,4 \end{cases}$$

La snellezza relativa di trave  $\lambda_{rel,m}$  a sua volta dipende dalla resistenza caratteristica a flessione  $f_{m,k}$  e dalla tensione normale critica per flessione  $\sigma_{m,crit}$  e si calcola tramite la formula:

$$\lambda_{\text{rel,m}} = \sqrt{f_{m,k} / \sigma_{m,\text{crit}}}$$

La tensione normale critica per flessione  $\sigma_{m,crit}$  assume un valore pari a:

$$\sigma_{\rm m,crit} = \frac{M_{\rm y,crit}}{W_{\rm v}}$$

dove:

- $M_{y,crit}$  è il momento critico per instabilità flesso-torsionale attorno all'asse forte y della sezione;
- $W_y$  è il modulo di resistenza a flessione attorno all'asse y.

Il momento critico è dato dalla relazione:

$$M_{\text{y,crit}} = \frac{\pi}{l_{\text{eff}}} \sqrt{E_{0.05} \cdot I_{\text{z}} \cdot G_{0.05} \cdot I_{\text{tor}}}$$

nella quale:

- $E_{0.05}$  è il modulo elastico caratteristico parallelo alla fibratura;
- $G_{0.05}$  è il modulo elastico tangenziale caratteristico: si può assumere $G_{0.05}$  /  $E_{0.05} = G_{\text{mean}}$  /  $E_{0,\text{mean}}$ ;
- $I_z$  è il momento di inerzia della sezione relativo all'asse debole z;
- I<sub>tor</sub> è il momento di inerzia torsionale della sezione;
- l<sub>eff</sub> è la luce efficace della trave, che tiene conto sia delle condizioni di vincolo che del tipo di carico.

La lunghezza efficace leff si calcola mediante la formula:

$$l_{\text{eff}} = \beta \cdot L$$

Dove:

L è la luce effettiva della trave;

 $\beta$  è un coefficiente riduttivo che dipende dallo schema statico dell'elemento studiato (vedi Tabella 12).

Tabella 7-4 - Valori del coefficiente  $\beta$  per il calcolo della lunghezza efficace  $l_{\rm eff}$ 

Condizioni di vincolo	β	
	Momento flettente costante	1.00
Semplice appoggio	Carico uniformemente distribuito	0.88
	Forza concentrata in mezzeria	0.74
Incastro ad un estremo	Carico uniformemente distribuito	0.49
(mensola)	Forza concentrata all'estremo libero	0.78

Tabella 12 Coefficiente riduttivo β per ricavare la lunghezza efficace di un elemento strutturale

Il momento di inerzia della sezione relativo all'asse debole z Iz vale:

$$I_z = (b^3 \cdot h) / 12$$

Il momento d'inerzia torsionale vale:

$$I_{tor} = \alpha \cdot h \cdot b^3$$

Con α ricavato nella tabella sottostante, dove a indica l'altezza della sezione e b la base:

a/b	1	1.2	1.5	2	2.5	3	5	10	00
α	0.141	0.166	0.196	0.229	0.249	0.263	0.291	0.312	0.333

Infine, il coefficiente  $k_h$  utile per incrementare la resistenza di progetto a flessione  $f_{m,d}$  in sezioni che hanno un'altezza inferiore a 150 mm si calcola mediante la funzione riportata al paragrafo 11.7.1.1 delle NTC:

$$k_h = \min \left\{ \left( \frac{150}{h} \right)^{0,2}; 1,3 \right\}$$

#### Verifiche a stato limite di esercizio SLE

L'ultima verifica eseguita rientra nell'ambito degli stati limite di esercizio SLE ed è descritta al paragrafo 4.4.7. delle NTC. Essa riguarda la freccia netta, ossia il "valore dello spostamento ortogonale all'asse dell'elemento", causata dai carichi permanenti (strutturali e non) e dai carichi variabili.

La normativa impone che  $\delta_2$  (freccia per carichi variabili) sia inferiore a L/300 e che  $\delta_{TOT}$  (freccia per carichi permanenti  $\delta_1$  + freccia per carichi variabili  $\delta_2$ ) sia inferiore a L/200. In entrambi i casi L rappresenta la luce dell'elemento studiato, a meno che non si tratti di una mensola, perché in questo caso L rappresenterebbe il doppio della lunghezza dello sbalzo.

#### Annotazione:

Seguendo le istruzioni fornite dal CNR nel documento Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo delle Strutture di Legno (2018) al capitolo 9 Regole specifiche per le tipologie e i sistemi strutturali), negli schemi strutturali riportati di seguito, ai fini del calcolo delle sollecitazioni agenti sull'elemento strutturale, nei nodi sono stati considerati dei vincoli a cerniera.

L'unica eccezione è stata fatta per la schematizzazione del travetto di ventilazione, in quanto esso è rappresentabile ragionevolmente da un incastro.

# Definizione dei carichi $G_2$ e delle azioni variabili Q

Nel presente paragrafo vengono esposti:

- i pesi propri di tutti gli elementi gravanti sulla struttura portante studiata (sezione *Pesi propri di tutti gli elementi costitutivi*);
- uno specchietto riassuntivo con i carichi permanenti non strutturali gravanti sugli elementi dimensionati (sezione Carichi permanenti non strutturali  $G_2$ );
- la spiegazione di come sono stati ricavati i diversi carichi variabili agenti sulla struttura (sezione Azioni variabili Q).

## Pesi propri di tutti gli elementi costitutivi

Elem	Elementi copertura a verde	Note materiale	Moltiplicatore Dimensione y Dimensione x		Spessore	Volume	Densità	Carico	Superficie	Subtotale
	pensile		ш	E	E	ш	Kg/m³	Ν N	m <sup>2</sup>	kN/m²
1	Tavolato	Larice Nord Italia S2	6,40	98'6	0,03	1,89	610	11,55	63,10	0,18
2	Travi contenimento	Larice Nord Italia S2	0,20	0,20	32,12	1,28	610	7,84		
3	Strato drenante	Ghiaia bagnata	5,20	8,66	0,05	2,25	1700	38,28		
4	Substrato colturale	Terra bagnata	5,20	8,66	0,10	4,50	1900	85,56		
2	Perimetro drenante	Ghiaia bagnata	0,15	0,40	30,12	1,81	1700	30,72		
						11,74		173,95	63,10	2,76

	Note materiale	Moltiplicatore	Dimensione y Dimensione x	Vimensione x	Spessore	Volume	Densità	Carico	Superficie	Subtotale
עפווו מו עפוווומבוטוופ			E	E	E	m <sub>3</sub>	Kg/m³	Ā	m <sup>2</sup>	$kN/m^2$
Travetti ventilazione	Travetti ventilazione Larice Nord Italia S2	4	60'0	1,90	0,15	0,10	610	69'0		
		14	60'0	1,50	0,15	0,28	610	1,73		
		12	60'0	2,40	0,15	0,39	610	2,37		
		8	60'0	2,00	0,15	0,22	610	1,32		
						66'0		6,04	63,10	0,10

F   0 m 0 n +	4444	Note materiale	Moltiplicatore I	Dimensione y	Dimensione y Dimensione x	Spessore	Volume	Densità	Carico	Superficie	Subtotale
בובוובוו	Eremenn copernora prenaborneana			E	E	ш	m <sub>3</sub>	Kg/m³	Ν¥	m <sup>2</sup>	$kN/m^2$
7	Tavolato inferiore	Abete italiano S3	1	4,80	8,26	0,02	62'0	450	3,57		
8	Travi primarie	Abete italiano S3	7	4,80	0,11	0,33	1,22	450	5,49	39,65	0,14
			2	4,80	0,12	0,33	0,38	450	1,71	39,65	0,04
6	Travi secondarie	Abete italiano S3	32	0,11	0,92	0,33	1,07	450	4,81		
10	Paglia	Fornitore TVTb	88	0,42	0,92	0,33	11,22	93	10,44	39,65	0,26
11	11 Tavolato superiore	Larice Nord Italia S2	1	4,80	8,26	0,02	62'0	610	4,84		
							15,48		30,71	39'68	71,0

										П
Note materiale Moltiplicatore Dimensione y Dimensione x Spessore		Moltiplicatore Dim	ensione y	Dimensione x	Spessore	Volume	Densità	Carico	Superficie	Subtotale
			E	E	Œ	m <sub>3</sub>	Kg/m³	×	$m^2$	$kN/m^2$
12 Paglia Fornitore Riso di Nori	Fornitore Riso di Nori					30,25	110	33,28		
Picchetti Legno di castagno o nocciolo	Legno di castagno o nocciolo					0,20	350	0,70		
Intonaco in argilla,						2,42	1800	43,51		
con strato fibrato						1,22	100	1,22		
15 Intonaco in calce						1,53	1600	24,45		
						35,62		103,16	11,55	8,93

Elen	Elementi solaio inferiore	Note materiale	Moltiplicatore	Dimensione y	Dimensione x	Spessore	Volume	Densità	Carico	Superficie	Subtotale
	prefabbricato			E	E	E	m <sub>3</sub>	Kg/m³	Ν	m <sup>2</sup>	kN/m²
16	16 Tavolato inferiore	Larice Nord Italia S2	1	4,80	8,26	0,02	62'0	610	4,84		
17	Travi primarie	Abete italiano S3	7	4,80	0,10	0,33	1,11	450	4,99	39,65	0,13
18		Abete italiano S3	2	4,80	0,13	0,33	0,41	450	1,85	39,65	0,05
19	Travi secondarie	Abete italiano S3	32	0,10	0,92	0,33	76'0	450	4,37		
20	Paglia	Fornitore TVTb	88	0,42	0,92	0,33	11,22	93	10,44	39,65	0,26
21	21 Tavolato superiore	Abete italiano S3	1	4,80	8,26	0,02	62'0	450	3,57		
							15,30		30,06	39,65	0,76

	T 1: Leader	Note materiale	Moltiplicatore I	Dimensione y	Dimensione y Dimensione x Spessore	Spessore	Volume	Densità	Carico	Superficie	Subtotale
	ravi di Tondazione			Æ	ш	E	m <sub>3</sub>	Kg/m³	kN	m <sup>2</sup>	kN/m²
22	Travi longitudinali di		6	0.20	3.00	0.20	1.08	450	4.86		
	appoggio		<b>1</b>					1			
23	23 Trasverse		8	0,05	1,85	0,20	0,15	451	0,67		
							1,23		2,53	39'68	0,14

Tabella 13 Definizione del peso proprio di ciascun elemento costitutivo il padiglione e gravante sulla struttura portante studiata

## Carichi permanenti non strutturali G2

	Elemento portante Rif. Tabella 13	Elementi portati	G₂ kN/m²
El. 1	Tavolato copertura verde	Elementi copertura a verde pensile, escluso il tavolato stesso	2,57
El. 6	Travetti di ventilazione	Elementi del pacchetto verde	2,76
El. 8	Travi principali copertura	Elem. copertura prefabbricata, escluse le travi stesse + travetti di ventilazione + elem. copertura verde	3,45
El. 7	Tavolato inferiore copertura	Paglia di tamponamento	0,26
El. 17	Travi principali solaio	Elementi solaio inferiore, escluse le travi stesse + elem. copertura + elem. pareti	13,14
El. 16	Tavolato inferiore solaio	Paglia	0,26

Tabella 14 Definizione dei carichi permanenti non strutturali G₂ sostenuti dagli elementi strutturali dimensionati

## Azioni variabili Q

Sulla struttura agiscono tre diversi carichi variabili:

- 1. il carico sulla copertura accessibile per la sola manutenzione e riparazione;
- 2. il carico neve;
- 3. il carico da calpestio in riferimento alla destinazione d'uso del padiglione.

Questi sovraccarichi, essendo che gli orizzontamenti sono considerati capaci di ripartire trasversalmente i carichi, si sono assunti come uniformemente distribuiti sulla base di quanto affermato nel paragrafo 3.1.4.1. delle NTC.

Il carico 1 e 3 sono valori tabellari determinati dalle NTC (vedi Tabella 15 di seguito riportata). Il primo corrisponde alla categoria H ed è pari a 0,5 kN/m², mentre il carico 3 appartiene alla categoria C1 (Aree con tavoli, quali scuole, caffè, ristoranti, sale per banchetti, lettura e ricevimento) e vale 3,00 kN/m².

Il carico neve, invece, è stato calcolato seguendo le indicazioni fornite nel sottocapitolo 3.4 e, come si può notare da quanto riportato di seguito, dipende dalla localizzazione del padiglione, dalla morfologia del sito di costruzione e dalla tipologia di copertura.

La normativa prevede la valutazione del carico qs provocato dalla neve sulle coperture tramite la formula:

$$q_s = q_{sk} \cdot \mu_i \cdot C_E \cdot C_t$$

Dove:

q<sub>sk</sub> è il valore di riferimento del carico della neve al suolo;

μ<sub>i</sub> è il coefficiente di forma della copertura;

C<sub>E</sub> è il coefficiente di esposizione;

Ct è il coefficiente termico.

Le NTC prevedono che si assuma il carico neve come una forza verticale agente sulla proiezione orizzontale della superficie della copertura.

Essendo che il comune di Grugliasco si trova nella zona di carico I-alpina e ha un'altitudine a<sub>s</sub> pari a 293 m s.l.m., il valore di riferimento del carico della neve al suolo q<sub>sk</sub> si calcola mediante la formula:

$$q_{sk} = 1.39 \cdot [1 + (a_s / 728)^2]$$

e risulta quindi uquale a 1,62 kN/m².

Dato che la copertura di progetto è piana, il coefficiente di forma è  $\mu_i$  = 0,80. La topografia è stata considerata normale sulla base della definizione fornita dalla normativa in tabella 3.4.I e quindi il coefficiente di esposizione vale  $C_E$  = 1. Infine, data la mancanza di dati specifici a supporto e in accordo con le direttive nazionali, il coefficiente termico è stato fissato pari a  $C_f$  = 1.

In conclusione, il carico della neve sulla copertura risulta pari a:

$$q_s = 1.62 \cdot 0.80 \cdot 1 \cdot 1 = 1.29 \text{ kN/m}^2$$

Tab. 3.1.II - Valori dei sovraccarichi per le diverse categorie d'uso delle costruzioni

Cat.	Ambienti	q <sub>k</sub> [kN/m <sup>2</sup> ]	Q <sub>k</sub> [kN]	H <sub>k</sub> [kN/m]
	Ambienti ad uso residenziale			
A	Aree per attività domestiche e residenziali; sono compresi in questa categoria i locali di abitazione e relativi servizi, gli alberghi (ad esclusione delle aree soggette ad affollamento), camere di degenza di ospedali	2,00	2,00	1,00
	Scale comuni, balconi, ballatoi	4,00	4,00	2,00
	Uffici			
	Cat. B1 Uffici non aperti al pubblico	2,00	2,00	1,00
В	Cat. B2 Uffici aperti al pubblico	3,00	2,00	1,00
	Scale comuni, balconi e ballatoi	4,00	4,00	2,00
	Ambienti suscettibili di affollamento	. , , , , , ,		. , ,
	Cat. C1 Aree con tavoli, quali scuole, caffè, ristoran- ti, sale per banchetti, lettura e ricevimento	3,00	3,00	1,00
	Cat. C2 Aree con posti a sedere fissi, quali chiese, teatri, cinema, sale per conferenze e attesa, aule universitarie e aule magne	4,00	4,00	2,00
С	Cat. C3 Ambienti privi di ostacoli al movimento delle persone, quali musei, sale per esposizioni, aree d'accesso a uffici, ad alberghi e ospedali, ad atri di stazioni ferroviarie	5,00	5,00	3,00
	Cat. C4. Aree con possibile svolgimento di attività fisiche, quali sale da ballo, palestre, palcoscenici.	5,00	5,00	3,00
	Cat. C5. Aree suscettibili di grandi affollamenti, quali edifici per eventi pubblici, sale da concerto, palazzetti per lo sport e relative tribune, gradinate e piattaforme ferroviarie.	5,00	5,00	3,00
		Secondo ca	tegoria d'uso se	rvita, con le
	Scale comuni, balconi e ballatoi	se	guenti limitazio	ni
		≥ 4,00	≥ 4,00	≥ 2,00
	Coperture			
	Cat. H Coperture accessibili per sola manutenzione e riparazione	0,50	1,20	1,00
H-I-K	Cat. I Coperture praticabili di ambienti di categoria d'uso compresa fra A e D	secondo	categorie di app	artenenza
	Cat. K Coperture per usi speciali, quali impianti,	da v	alutarsi caso pe	r caso

<sup>\*</sup> non comprende le azioni orizzontali eventualmente esercitate dai materiali immagazzinati

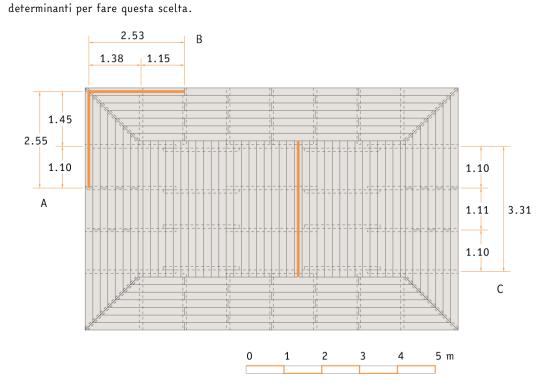
Tabella 15 Valori dei sovraccarichi per le diverse categorie d'uso delle costruzioni

<sup>\*\*</sup> per i soli parapetti o partizioni nelle zone pedonali. Le azioni sulle barriere esercitate dagli automezzi dovranno essere

# TAVOLATO DELLA COPERTURA A VERDE PENSILE

#### Scelta della tavola da dimensionare

Per eseguire i calcoli per il dimensionamento dello spessore del tavolato che sostiene la copertura a verde pensile (elemento 1 della Tabella 13) si è scelta la tavola avente la campata maggiore. Di seguito si riporta la pianta di riferimento con le lunghezze, espresse in metri, che sono state



Dalle misurazioni fatte, la tavola che risulta avere la campata maggiore è quella di tipo A, perché raggiunge una luce di 1.45 m. A favore di sicurezza, i calcoli di dimensionamento strutturale del tavolato in questione si riferiscono quindi a questa tipologia di tavola.

#### Definizione dei carichi

Il tavolato in larice, che verrà fissato sui travetti di ventilazione, dovrà sostenere tre diversi carichi:

- il peso proprio (carico permanente G1);
- il peso permanente non strutturale  $G_2$  degli elementi della copertura soprastanti (elementi da 2 a 5 della Tabella 13);
- il carico variabile Q.

Per quanto riuarda la definizione del carico variabile Q, di seguito si studieranno due diverse combinazioni di carico in quanto le azioni che gravano sul tavolato sono:

- il carico di esercizio della categoria H per coperture accessibili per sola manutenzione e riparazione, pari a  $0.50 \text{ kN/m}^2$ ;
- il carico neve, pari a 1,29 kN/m².

Dati in i	nput	
Base b	0,20	m
Altezza h	0,03	m
Lunghezza l	2,55	m
Volume	0,02	$m^3$
Densità	610,00	kg/m³
Peso proprio	9,31	kg
Interasse massimo i	0,20	m
Area influenza	0,51	$m^2$

Il carico permanente  $G_1$  si calcola dividendo il peso proprio 9,31 kg e l'area d'influenza 0,51 m². Convertendo poi il risultato in  $kN/m^2$ , si ottiene un carico totale di pari a 0,18  $kN/m^2$ .

Per il calcolo del carico permanente  $G_2$ , pari a 2,71 kN/ $m^2$  si rimanda alla Tabella 14.

Riassumendo, i carichi agenti sulla tavola sono:

Carichi		
Carico permanente strutturale G <sub>1</sub>	0,18	kN/m²
Carico permanente non strutturale $G_{\scriptscriptstyle 2}$	2,71	$kN/m^2$
Carico di esercizio per copertura accessibile per sola manutenzione e riparazione	0,50	kN/m²
Carico neve	1,29	kN/m²

I coefficienti di combinazione applicati ai carichi variabili, come si afferma anche a inizio capitolo, sono stati reperiti della tabella 2.5.I della NTC 2018 e sono pari a:

Coefficienti di combinazione $\Psi_0$	
Carico per copertura accessibile per sola	0.00
manutenzione e riparazione	0,00
Carico neve su copertura	0,50

Le due diverse combinazioni di carico sono state calcolate mediante la formula riportata al paragrafo 2.5.3 della NTC 2018 per le combinazioni fondamentali.

$$F_{d} \; = \; \gamma_{g1} \; \cdot \; g_{1} \; + \; \gamma_{g2} \; \cdot \; g_{2} \; + \; \gamma_{q} \; \cdot \; q \; + \; \gamma_{Qj} \; \cdot \; \left( \Sigma \; \Psi_{Qj} \; \cdot \; Q_{j} \right)$$

Azione dominante: Carico per copertura accessibile per sola manutenzione

	Carichi permanenti strutturali G <sub>1</sub>	Carichi permanenti non strutturali G2	Azioni variabili Q		
$F_d =$	1,3 · 0,18	1,5 · 2,71	1,5 · 0,50 + 1,5 · 0,50 · 1,29		_
F <sub>d</sub> =	0,24	4,06	1,72	6,01	kN/m²

Azione dominante: Carico neve sulla copertura

	Carichi permanenti strutturali G1	Carichi permanenti non strutturali G <sub>2</sub>	Azioni variabili Q		
$F_d =$	1,3 · 0,18	1,5 · 2,71	1,5 · 1,29 + 1,5 · 0 · 0,50		
$F_d =$	0,24	4,06	1,94	6,23	kN/m²

La combinazione più gravosa ha come azione dominante il carico neve, quindi il carico totale è pari a  $6,23 \text{ kN/m}^2$ .

Moltiplicando i valori appena ottenuti per l'interasse si ottengono i carichi su metro lineare, necessari per le verifiche a SLU e a SLE.

Carico permanente lineare =  $(0.24 + 4.06) \text{ kN/m}^2 \cdot 0.20 \text{ m} = 0.86 \text{ kN/m}$ 

Carico variabile lineare =  $1.94 \text{ kN/m}^2 \cdot 0.20 \text{ m} = 0.39 \text{ kN/m}$ 

Carico totale lineare = 0.86 + 0.39 = 1.25 kN/m

# Studio della condizione di carico più gravosa

Per il tavolato in questione sono state studiate e confrontate tre diverse condizioni di carico, per poter trovare le sollecitazioni e le deformate più gravose.

Nella prima il carico variabile è distribuito omogeneamente su tutta la luce della tavola.

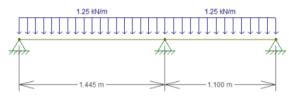


Figura 32 Schema strutturale della tavola scelta, opzione A

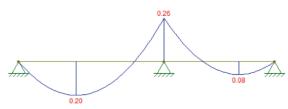


Figura 33 Diagramma del momento flettente della tavola scelta, opzione A

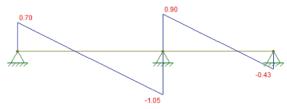


Figura 34 Diagramma di taglio della tavola scelta, opzione A

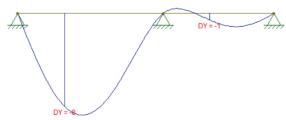


Figura 35 Deformata dovuta ai soli carichi permanenti della tavola scelta, opzione A

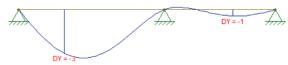


Figura 36 Deformata dovuta ai soli carichi variabili della tavola scelta, opzione A

Nella seconda il carico variabile grava solamente sulla campata rappresentata a sinistra.

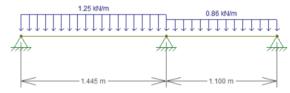


Figura 37 Schema strutturale della tavola scelta, opzione B

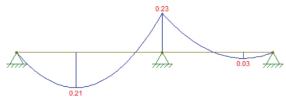


Figura 38 Diagramma del momento flettente della tavola scelta, opzione B

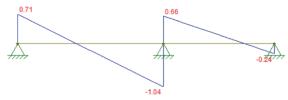


Figura 39 Diagramma di taglio della tavola scelta, opzione B

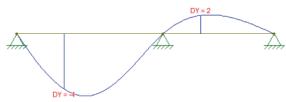


Figura 40 Deformata dovuta ai soli carichi variabili della tavola scelta, opzione B 45

Nella terza opzione il carico variabile grava solo sulla campata rappresentata a destra.

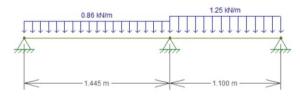


Figura 41 Schema strutturale della tavola scelta, opzione C

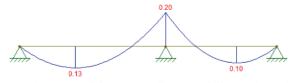


Figura 42 Diagramma del momento flettente della tavola scelta, opzione C

-

<sup>&</sup>lt;sup>45</sup> Per le opzioni B e C si omette lo schema della deformata dovuta ai soli carichi permanenti, in quando corrisponde a quello riportato in Figura 35 per l'opzione A.

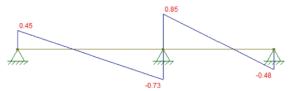


Figura 43 Diagramma di taglio della tavola scelta, opzione C



Figura 44 Deformata dovuta ai soli carichi variabili della tavola scelta, opzione C

Osservando i valori ottenuti per le tre diverse combinazioni di carico si può concludere che le risultanti più gravose sono:

Momento flettente massimo	opzione A	0,26	kN · m
Taglio massimo	opzione A	1,05	kN
Deformata dovuta ai soli carichi permanenti	-	8	mm
Deformata dovuta ai soli carichi variabili massima	opzione B	4	mm

Nelle tabelle riportate di seguito si possono osservare i calcoli eseguiti seguendo le direttive della NTC 2018 approfondite nel paragrafo iniziale del presente capitolo.

Le verifiche a SLU e SLE eseguite sono:

- verifica per flessione semplice;
- verifica per taglio semplice;
- verifica per deformazione;
- verifica per instabilità di trave.

# Verifiche a SLU e SLE della tavola scelta del tavolato della copertura verde

## Verifica a SLU per flessione semplice

NTC 2018 paragrafo 4.4.8.1.6

$\sigma_{m,y,d} \; / \; f_{m,y,d}$	0,94			≤1, allora è verificato
	Tensione di calcolo a flessione $\sigma_{m,y,d}$	88,40 8,67		kg/cm² N/mm²
		Momento massimo M <sub>max</sub>	0,26 2.651,26	kN·m kg·cm
		Modulo di resistenza W <sub>x</sub>	30,00	cm <sup>3</sup>
	Resistenza di progetto a flessione $f_{m,y,d} \\$	9,20		N/mm²
		a SLU per taglio se 2018 paragrafo 4.4.8.		
$\tau_d$ / $f_{v,d}$	0,26			≤1, allora è verificato
	Tensione tangenziale per taglio di progetto T <sub>d</sub>	0,39		N/mm²
		Taglio massimo	1,05	kN
		$T_{max}$	1.050,00	N
		Base efficace b <sub>eff</sub>	134,00	mm
		Coefficiente di riduzione k <sub>ef</sub>	0,67	
	Resistenza di progetto a taglio f <sub>v,d</sub>	1,52		N/mm²
		<b>SLE per deformazion</b> C 2018 paragrafo 4.4.		
Spostamento elast	ico verticale massimo	8		mm
dovuto ai cari	ichi permanenti $\delta_1$	0,8		cm
Spostamento elast	ico verticale massimo	4		mm
dovuto ai ca	richi variabili δ2	0,4		cm
Frecci	a massima	12		mm
	$\delta_{max}$	1,2		cm
Luce	elemento L	254,50		cm
	L/300	0,85		cm
	L/200	1,27		cm
		$\delta_1 \le L/300$	0,4 ≤ 0,85	verificato
		$\delta_{max} \le L/200$	1,2 ≤ 1,27	verificato
		<u> </u>		

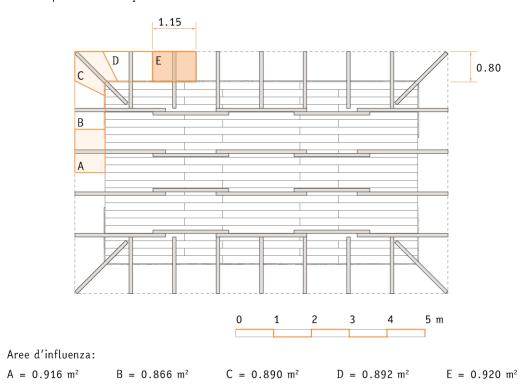
## Verifica a SLU per instabilità di trave NTC 2018 paragrafo 4.4.8.2.1

$\sigma_{m,d}$ / $(k_{crit,m} \cdot f_{m,d})$	0,72						≤1, allora è verificato
Tensione di calcolo a flessione $\sigma_{m,d}$	8,67						N/mm²
Coefficiente di correzione per instabilità di trave	1,00						perché λ <sub>rel,m</sub> ≤ 0,7!
k <sub>crit,m</sub>	Snellezza relativa	0,24					
_	λ <sub>rel,m</sub>	Resistenza caratteristica a flessione	23,00				N/mm²
		f <sub>m,k</sub> Tensione normale  critica per  flessione	399,17				N/mm²
		Om,crit	Momento flettente critico per instabilità di trave	79.833.883,53 79,83			N∙mm kN∙m
			M <sub>y,crit</sub>	Larghezza collaborante l <sub>eff</sub>	2.239,60		mm
					Parametro per la valutazione della larghezza collaborante β	0,88	
				$\begin{array}{c} \text{Momento} \\ \text{d'inerzia relativo} \\ \text{all'asse debole z} \\ I_z \end{array}$	20.000.000		mm <sup>4</sup>
				Modulo di elasticità tangenziale 5- percentile G <sub>0,05</sub>	569,74		N/mm²
				Momento d'inerzia torsionale I <sub>tor</sub>	33.840.000		mm <sup>4</sup>
					Parametro per la valutazione della larghezza collaborante α	0,141	perché h/b = 0,1!
			Modulo di resistenza W <sub>y</sub>	200.000			mm <sup>3</sup>
Resistenza di progetto a flessione	9,20						N/mm²
f <sub>m,d</sub> Coefficiente incrementale k <sub>h</sub>	1,30						

### TRAVETTI DI VENTILAZIONE

#### Scelta del travetto da dimensionare

Per eseguire i calcoli per il dimensionamento dei travetti di ventilazione (elemento 6 della Tabella 13) si è scelto l'elemento con l'area d'influenza maggiore e quindi con un carico maggiore. Visto che i travetti sono completamente appoggiati sul tavolato superiore della parte di copertura prefabbricata, lo schema strutturale con cui si studierà l'elemento è costituito da una mensola con luce pari allo sbalzo. Di seguito si riporta la pianta di riferimento con i valori delle aree d'influenza delle diverse tipologie di travetto espressi in metri quadrati.



Dopo aver confrontato i dati ottenuti, per eseguire il dimensionamento si è scelto, a favore di sicurezza, il travetto di tipo E avente lunghezza 0.80 m e interasse 1.15 m.

#### Definizione dei carichi

I travetti di ventilazione in larice dovranno sostenere tre diversi carichi:

- il peso proprio (carico permanente G1);
- il peso permanente non strutturale  $G_2$  degli elementi della copertura soprastanti (elementi da 1 a 5 della Tabella 13);
- il carico variabile Q.

Per quanto riuarda la definizione del carico variabile - analogamente a quanto è stato fatto al paragrafo *Tavolato della copertura a verde pensile* - di seguito si studieranno due diverse combinazioni di carico in quanto le azioni che gravano sul tavolato sono:

- il carico di esercizio della categoria H per coperture accessibili per sola manutenzione e riparazione, pari a 0,50 kN/m²;
- il carico neve, pari a 1,29 kN/m².

Dati in input			
Base b	0,09	m	
Altezza h	0,15	m	
Lunghezza l	0,80	m	
Volume	0,01	$m^3$	
Densità	610,00	kg/m³	
Peso proprio	6,59	kg	
Interasse massimo i	1,15	m	
Area influenza	0,92	$m^2$	

Il carico permanente  $G_1$  si calcola dividendo il peso proprio 6,59 kg e l'area d'influenza 0,92 m². Convertendo poi il risultato in kN/m², si ottiene un carico totale di pari a 0,07 kN/m².

Per il calcolo del carico permanente  $G_2$ , pari a 2,76 kN/ $m^2$  si rimanda alla Tabella 14.

Riassumendo, i carichi agenti sul travetto sono:

Carichi		
Carico permanente strutturale G <sub>1</sub>	0,07	kN/m²
Carico permanente non strutturale G2	2,76	kN/m²
Carico di esercizio per copertura accessibile	0,50	kN/m²
per sola manutenzione e riparazione	0,50	KIN/III
Carico neve	1,29	kN/m <sup>2</sup>

I coefficienti di combinazione applicati ai carichi variabili sono:

Coefficienti di combinazione Ψo	
Carico per copertura accessibile per sola	0.00
manutenzione e riparazione	0,00
Carico neve su copertura	0,50

Le due diverse combinazioni di carico sono state calcolate mediante la formula per le combinazioni fondamentali:

$$F_{d} = \gamma_{g1} \cdot g_{1} + \gamma_{g2} \cdot g_{2} + \gamma_{q} \cdot q + \gamma_{Qj} \cdot (\Sigma \Psi_{Qj} \cdot Q_{j})$$

Azione dominante: Carico per copertura accessibile per sola manutenzione

	Carichi permanenti strutturali G₁	Carichi permanenti non strutturali G <sub>2</sub>	Azioni variabili Q		
$F_d =$	1,3 · 0,07	1,5 · 2,76	1,5 · 0,50 + 1,5 · 0,50 · 1,29		
F <sub>d</sub> =	0,09	4,13	1,72	5,95	kN/m²

Azione dominante: Carico neve sulla copertura

	Carichi permanenti strutturali G <sub>1</sub>	Carichi permanenti non strutturali G2	Azioni variabili Q		
$F_d =$	1,3 · 0,07	1,5 · 2,76	1,5 · 1,29 + 1,5 · 0 · 0,50		
F <sub>d</sub> =	0,09	4,13	1,94	6,17	kN/m <sup>2</sup>

La combinazione più gravosa ha come azione dominante il carico neve, quindi il carico totale è pari a  $6,17 \text{ kN/m}^2$ .

Moltiplicando i valori appena ottenuti per l'interasse si ottengono i carichi su metro lineare, necessari per le verifiche a SLU e a SLE.

Carico permanente lineare =  $(0.09 + 4.13) \text{ kN/m}^2 \cdot 1.15 \text{ m} = 4.86 \text{ kN/m}$ Carico variabile lineare =  $1.94 \text{ kN/m}^2 \cdot 1.15 \text{ m} = 2.23 \text{ kN/m}$ Carico totale lineare = 5.12 + 2.23 = 7.09 kN/m

#### Analisi della condizione di carico

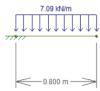


Figura 45 Schema strutturale del travetto di ventilazione scelto





Figura 46 (Sinistra) Diagramma del momento flettente del travetto di ventilazione scelto Figura 47 (Destra) Diagramma di taglio del travetto di ventilazione scelto





Figura 48 (Sinistra) Deformata dovuta ai carichi permanenti del travetto di ventilazione scelto Figura 49 (Destra) Deformata dovuta ai carichi variabili del travetto di ventilazione scelto

Osservando i valori ottenuti si può concludere che:

Momento flettente massimo	2,27	$kN\cdotm$
Taglio massimo	5,67	kN
Deformata dovuta ai soli carichi permanenti massima	2	mm
Deformata dovuta ai soli carichi variabili massima	1	mm

Nelle tabelle riportate di seguito si possono osservare i calcoli eseguiti seguendo le direttive della NTC 2018 approfondite nel paragrafo iniziale del presente capitolo.

Le verifiche a SLU e SLE eseguite sono:

- verifica per flessione semplice;
- verifica per taglio semplice;
- verifica per deformazione;
- verifica per instabilità di trave.

# Verifiche a SLU e SLE del travetto di ventilazione scelto

### Verifica a SLU per flessione semplice

NTC 2018 paragrafo 4.4.8.1.6

$\sigma_{m,y,d} \ / \ f_{m,y,d}$	0,75			≤1, allora è verificato
	Tensione di calcolo			
	a flessione	68,59		kg/cm²
	$\sigma_{m,y,d}$	6,86		N/mm²
		Momento massimo	2,27	kN⋅m
		$M_{\text{max}}$	23.147,56	kg∙cm
	•	Modulo di		
		resistenza	337,50	cm <sup>3</sup>
		W <sub>×</sub>		
	Resistenza di			
	progetto a flessione	9,20		N/mm <sup>2</sup>
	f <sub>m,y,d</sub>			
		<b>a SLU per taglio se</b> 2018 paragrafo 4.4.8.		
/ [	0.00			≤1, allora è
$\tau_d / f_{v,d}$	0,62			verificato
	Tensione			
	tangenziale per	0.04		N/mm²
	taglio di progetto	0,94		N/mm
	$\tau_{d}$			
		Taglio massimo	5,67	kN
	_	$T_{max}$	5.670,00	N
		Base efficace	60,30	mm
	-	b <sub>eff</sub>		
		Coefficiente di		
		riduzione	0,67	
		k <sub>ef</sub>		
	Resistenza di			
	progetto a taglio	1,52		N/mm <sup>2</sup>
	$f_{v,d}$			
		SLE per deformazion 2018 paragrafo 4.4.		
Spostamento elast	ico verticale massimo	2		mm
dovuto ai cari	chi permanenti $\delta_1$	0,2		cm
Spostamento elast	ico verticale massimo	1		mm
dovuto ai ca	richi variabili δ2	0,1		cm
Freccia	a massima	3		mm
	δ <sub>max</sub> Doppio dello sbalzo L			cm
Doppio o				cm
	L/300	0,53		cm
	L/200	0,80		cm
		$\delta_1 \le L/300$	0,2 ≤ 0,53	verificato
	_	$\delta_{max} \le L/200$	0,3 ≤ 0,80	verificato

# Verifica a SLU per instabilità di trave

NTC 2018 paragrafo 4.4.8.2.1

		I	NTC 2018 paragraf	o 4.4.8.2.1			
$\sigma_{m,d}$ / $(k_{crit,m} \cdot f_{m,d})$	0,75						≤1, allora verificato
Tensione di calcolo a flessione $\sigma_{m,d}$	6,86						N/mm²
Coefficiente di correzione per instabilità di trave	1,00						perché λ <sub>rel,m</sub> ≤ 0,
k <sub>crit,m</sub>	Snellezza relativa	0,14					
<u>-</u>	$\lambda_{\text{rel},m}$	Resistenza caratteristica a flessione $f_{\mathfrak{m},k}$	23,00				N/mm²
		Tensione normale critica per flessione $\sigma_{m,crit}$	1.209,96				N/mm²
			Momento flettente critico per instabilità di trave M <sub>y,crit</sub>	245.017.820,81 245,02			N∙mm kN∙m
			у,ст	Larghezza collaborante l <sub>eff</sub>	392,00		mm
					Parametro per la valutazione della larghezza collaborante β	0,49	
				Momento d'inerzia relativo all'asse debole z I <sub>z</sub>	9.112.500		mm <sup>4</sup>
				Modulo di elasticità tangenziale 5- percentile G <sub>0,05</sub>	569,74		N/mm²
				Momento d'inerzia torsionale I <sub>tor</sub>	21.432.600		mm <sup>4</sup>
					Parametro per la valutazione della larghezza collaborante	0,196	perché h/b = 1,6
			Modulo di resistenza W <sub>y</sub>	202.500	α		mm <sup>3</sup>
Resistenza di progetto a flessione $f_{m,d}$	9,20						N/mm²
Coefficiente incrementale k <sub>h</sub>	1,00						

# TRAVE PRIMARIA DI COPERTURA

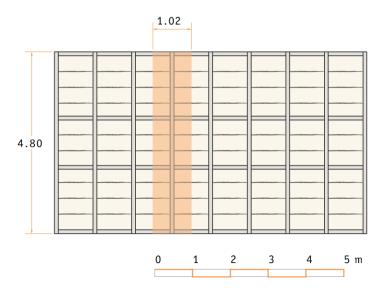
#### Scelta della trave da dimensionare

Le travi primarie della copertura hanno un'altezza fissa dettata dalle dimensioni delle ballette di paglia fornite dall'azienda agricola TVTb e usate come tamponamento; quindi, l'unica dimensione che può variare è la base.

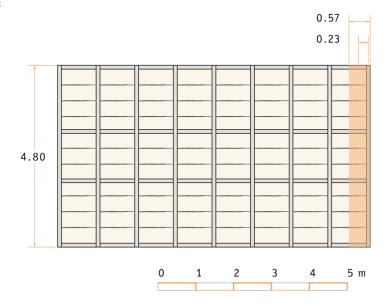
Per eseguire i calcoli per il dimensionamento si è scelta una delle travi interne alla scatola prefabbricata. Queste, infatti, hanno un interasse - e quindi un'area d'influenza - maggiore rispetto alle due travi di bordo. Come si vedrà in seguito, però, sulle travi di bordo è stato necessario eseguire anche una verifica della torsione e una per l'azione combinata di taglio e torsione; su questi due elementi, infatti, grava un carico che agisce fuori dall'asse baricentrico.

Di seguito si riportano due piante di riferimento, con le dimensioni utili ai fini del calcolo strutturale espresse in metri. La prima riguarda la trave interna, mentre la seconda la trave di bordo. Nel secondo schema vengono evidenziate le misure della lunghezza della trave, dell'interasse d'influenza e dell'eccentricità del carico.

Schema 1:



Schema 2:



#### Definizione dei carichi

Le travi primarie della copertura prefabbricata (elemento 8 della Tabella 13) saranno in abete e dovranno sostenere tre diversi carichi:

- il peso proprio (carico permanente strutturale G<sub>1</sub>);
- il peso permanente non strutturale  $G_2$  degli elementi della copertura soprastanti e di quelli appesi (elementi da 1 a 11, escluso il numero 8 della Tabella 13);
- il carico variabile Q.

Di seguito si farà riferimento sempre alla trave interna, mentre la trave di bordo verrà considerata unicamente per le verifiche a torsione e a taglio e torsione combinate.

Per quanto riuarda la definizione del carico variabile si sono studiate due diverse combinazioni di carico in quanto le azioni che gravano sul tavolato sono:

- il carico di esercizio della categoria H per coperture accessibili per sola manutenzione e riparazione, pari a 0,50 kN/m²;
- il carico neve, pari a 1,29 kN/m².

ave interna)	
0,11	m
0,33	m
4,80	m
0,17	$m^3$
450,00	kg/m³
78,41	kg
1,02	m
4,90	$m^2$
	0,11 0,33 4,80 0,17 450,00 78,41 1,02

Il carico permanente  $G_1$  si calcola dividendo il peso proprio 78,41 kg e l'area d'influenza 4,90 m². Trasformando poi il risultato in kN/m², si ottiene un carico totale di pari a 0,16 kN/m².

Per il calcolo del carico permanente  $G_2$ , pari a 3,45 kN/ $m^2$  si rimanda alla Tabella 14.

Riassumendo, i carichi agenti sulla trave scelta sono:

Carichi		
Carico permanente strutturale G1	0,16	kN/m²
Carico permanente non strutturale G2	3,45	kN/m²
Carico di esercizio per copertura accessibile per sola manutenzione e riparazione	0,50	kN/m²
Carico neve	1,29	kN/m²

I coefficienti di combinazione applicati ai carichi variabili sono stati reperiti della NTC e sono:

Coefficienti di combinazione $\Psi_0$	
Carico per copertura accessibile per sola	0.00
manutenzione	.,
Carico neve su copertura	0,50

Le due diverse combinazioni di carico sono state calcolate mediante la formula riportata al paragrafo 2.5.3 della NTC 2018 per le combinazioni fondamentali.

$$F_{d} \; = \; \gamma_{g1} \; \cdot \; g_{1} \; + \; \gamma_{g2} \; \cdot \; g_{2} \; + \; \gamma_{q} \; \cdot \; q \; + \; \gamma_{Qj} \; \cdot \; \left( \Sigma \; \Psi_{Qj} \; \cdot \; Q_{j} \right)$$

Azione dominante: Carico per copertura accessibile per sola manutenzione

	Carichi permanenti strutturali G <sub>1</sub>	Carichi permanenti non strutturali G <sub>2</sub>	Azioni variabili Q		
$F_d =$	1,3 · 0,16	1,5 · 3,45	1,5 · 0,50 + 1,5 · 0,50 · 1,29		
$F_d =$	0,21	5,17	1,72	7,10	kN/m²
		Azione dominante:	Carico neve sulla copertura		
	Carichi permanenti strutturali G1	Carichi permanenti non strutturali G <sub>2</sub>	Azioni variabili Q		
F <sub>d</sub> =	1,3 · 0,16	1,5 · 3,45	1,5 · 1,29 + 1,5 · 0 · 0,50		
F <sub>d</sub> =	0,21	5,17	1,94	7,32	kN/m²

La combinazione più gravosa ha come azione dominante il carico neve, quindi il carico totale è pari a  $7.32 \text{ kN/m}^2$ .

Moltiplicando i valori appena ottenuti per l'interasse si ottengono i carichi su metro lineare, necessari per le verifiche a SLU e a SLE.

Carico permanente lineare = (0,21 + 5,17)  $kN/m^2 \cdot 1,02 m = 5,49 kN/m$ 

Carico variabile lineare = 1,94 kN/m<sup>2</sup> · 1,02 m = 1,98 kN/m

Carico totale lineare = 5,49 + 1,98 = 7,47 kN/m

#### Analisi della condizione di carico

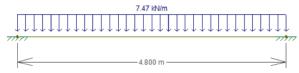


Figura 50 Schema strutturale della trave scelta

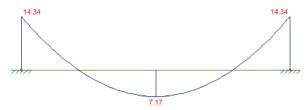


Figura 51 Diagramma del momento flettente della trave scelta

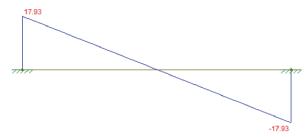


Figura 52 Diagramma di taglio della trave scelta

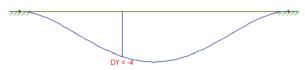


Figura 53 Deformata della trave scelta dovuta ai carichi permanenti



Figura 54 Deformata della trave scelta dovuta ai carichi variabili

Osservando i valori ottenuti si può concludere che:

Momento flettente massimo	14,34	kN · m
Taglio massimo	17,93	kN
Deformata dovuta ai soli carichi permanenti massima	4	mm
Deformata dovuta ai soli carichi variabili massima	1	mm

Nelle tabelle riportate di seguito si possono osservare i calcoli eseguiti seguendo le direttive della NTC 2018 approfondite nel paragrafo iniziale del presente capitolo.

Le verifiche a SLU e SLE eseguite sono:

- verifica per flessione semplice;
- verifica per taglio semplice;
- verifica per deformazione;
- verifica per instabilità di trave;
- verifica per torsione;
- verifica per taglio e torsione.

# Verifiche a SLU e SLE della trave scelta

## Verifica a SLU per flessione semplice

NTC 2018 paragrafo 4.4.8.1.6

$\sigma_{m,y,d}$ / $f_{m,y,d}$	1,00			≤1, allora è verificato
	Tensione di calcolo	73,24		kg/cm²
	a flessione	7,18		N/mm²
	$\sigma_{m,y,d}$			·
		Momento massimo	14,34	kN·m
	-	M <sub>max</sub> Modulo di	146.227,30	kg∙cm
		resistenza	1 006 50	cm <sup>3</sup>
		W <sub>x</sub>	1.996,50	CIII
	Resistenza di			
	progetto a flessione	7,20		N/mm <sup>2</sup>
	f <sub>m,y,d</sub>			
		<b>a SLU per taglio se</b> 2018 paragrafo 4.4.8.		
$\tau_d$ / $f_{v,d}$	0,81			≤1, allora è verificato
	Tensione			
	tangenziale per	1,11		N/mm²
	taglio di progetto	1,11		147 111111
	$\tau_d$			
		Taglio massimo	17,93	kN
	_	$T_{max}$	17.930,00	N
		Base efficace	73,70	mm
	-	b <sub>eff</sub>		
		Coefficiente di		
		riduzione	0,67	
		k <sub>ef</sub>		
	Resistenza di			2
	progetto a taglio	1,36		N/mm <sup>2</sup>
	$f_{v,d}$			
		<b>LE per deformazion</b> 2018 paragrafo 4.4.		
Spostamento elast	ico verticale massimo	4		mm
dovuto ai cari	chi permanenti $\delta_1$	0,4		cm
	ico verticale massimo	1		mm
dovuto ai ca	richi variabili δ2	0,1		cm
Frecci	a massima	5		mm
$\delta_{\text{max}}$		0,5		cm
Luce	elemento L	480,00		cm
	L/300	1,60		cm
	L/200	2,40		cm
		$\delta_1 \le L/300$	0,4 ≤ 1,60	verificato
		$\delta_{max} \le L/200$	$0.5 \le 2.40$	verificato

### Verifica a SLU per instabilità di trave

NTC 2018 paragrafo 4.4.8.2.1

	1	NTC 2018 paragraf	o 4.4.8.2.1			
1,00						≤1, allora verificat
7,18						N/mm²
1.00						perché
1,00						$\lambda_{\text{rel,m}} \leq 0$
Snellezza						
relativa	0,38					
$\lambda_{\text{rel},m}$						
	Resistenza					
	caratteristica a	10.00				N / 2
	flessione	18,00				N/mm²
	$f_{m,k}$					
	Tensione normale					
		127,54				N/mm²
						,
	σ <sub>m,crit</sub>					
			84.875.152,57			N·mm
			84,88			kN⋅m
		y,ciii	Larghezza			
				4.224,00		mm
				,		
				Parametro per la		
				valutazione della		
				larghezza	0,88	
				collaborante		
				β		
			Momento			
			all'asse debole z	36.602.500		mm <sup>4</sup>
				440.00		N/mm
				1 70,00		14/ 111111
			Momento			
			d'inerzia	445 547 400		4
			torsionale I <sub>tor</sub>	115.517.490		mm <sup>4</sup>
				Parametro per la		
				valutazione della		perché
				Laure I	0 000	
				larghezza	0,263	
				collaborante	0,263	
		Modulo di			0,263	
		Modulo di resistenza	665.500	collaborante	0,263	
			665.500	collaborante	0,263	h/b = 3,
		resistenza	665.500	collaborante	0,263	h/b = 3,
	7,18 1,00 Snellezza	$\begin{array}{c} 1,00 \\ \\ 7,18 \\ \\ \\ 1,00 \\ \\ \\ \\ Snellezza \\ relativa \\ \lambda_{rel,m} \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\ \\$	1,00  7,18  1,00  Snellezza relativa 0,38 $\lambda_{rel,m}$ Resistenza caratteristica a flessione $f_{m,k}$ Tensione normale critica per flessione  127,54	Tonsione normale critica per flessione om_crit  Momento flettente critico per instabilità di trave My,crit  Larghezza collaborante leff  Momento fletiente critico per instabilità di trave My,crit  Larghezza collaborante leff  Momento d'inerzia relativo all'asse debole z I, Modulo di elasticità tangenziale 5- percentille Go,os  Momento d'inerzia torsionale	1,00  Snellezza relativa λrel.m  Resistenza caratteristica a flessione f <sub>m,k</sub> Tensione normale critica per flessione σ <sub>m,crit</sub> Momento flettente critico per instabilità di trave M <sub>y,crit</sub> Larghezza collaborante leff  Parametro per la valutazione della larghezza collaborante β  Momento d'inerzia relativo all'asse debole z I₂  Modulo di elasticità trangenziale 5- percentile G <sub>0,05</sub> Momento d'inerzia trangenziale 5- percentile G <sub>0,05</sub> Momento	1,00  7,18  1,00  Snellezza relativa

### Verifica a SLU per torsione semplice in riferimento alla trave di bordo

NTC 2018 paragrafo 4.4.8.1.10

			1 agraio 4.4.0.1.10			
Carico permanente						
strutturale G <sub>1</sub>	0,17					kN/m²
Carico permanente						
non strutturale	3,46					kN/m²
G <sub>2</sub>	3,10					KIT/ III
Carico variabile						
Q	1,29					kN/m²
$\tau_{tor,d} / k_{sh} \cdot f_{v,d}$	0,39					≤1, allora è
tfor,d / Ksh · Iv,d	0,39					verificato
	Tensione					
	tangenziale di	754,56				kN/m²
	progetto massima	0,75				N/mm <sup>2</sup>
	per torsione	-,				,
	$\tau_{tor,d}$					
		Momento torcente				
		lineare massimo	0,98			(kN · m)/m
		M <sub>†</sub>				
			Forza risultante			1.11
			concentrata	4 ,27		kN
			Р	C	7.00	111/2
				Carico superficiale	7,36	kN/m²
				Interasse i	0,58	m
				 Larghezza		
				d'influenza	1,00	m
				l	1,00	
			Eccentricità			
			e	0,23		m
		Altezza sezione	0.22			
		h (b)	0,33			m
		Base sezione	0,12			m
		b (a)	0,12			
		Coefficiente	3,65			_
		α				
	Coefficiente K <sub>sh</sub>	1,41				-
	Resistenza di					
	progetto a taglio	1,36				$N/mm^2$
	$f_{v,d}$					

# Verifica a SLU per taglio e torsione in riferimento alla trave di bordo

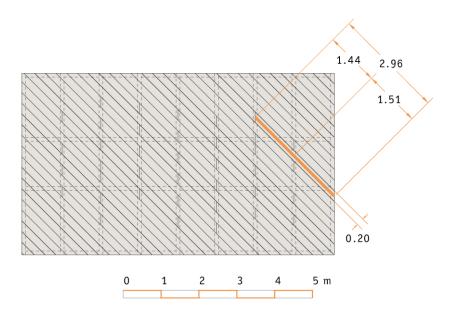
NTC 2018 paragrafo 4.4.8.1.11

$\tau_{tor,d}$ / $k_{sh}$ · $f_{v,d}$	+	$(\tau_d \ / \ f_{v,d})^2$	0,98		≤1, allora è verificato
			$\tau_{tor,d}$ / $k_{sh}$ · $f_{v,d}$	0,39	N/mm²
			$\tau_d$ / $f_{v,d}$	0,75	N/mm²

## TAVOLATO INFERIORE DELLA COPERTURA PREFABBRICATA

#### Scelta della trave da dimensionare

Per eseguire i calcoli per il dimensionamento dello spessore del tavolato che sostiene la paglia di tamponamento della scatola prefabbricata della copertura (elemento 7 della Tabella 13) si è scelta la tavola avente la campata maggiore. Di seguito si riporta la pianta di riferimento con le lunghezze espresse in metri.



### Definizione dei carichi

Il tavolato, in legno di abete, dovrà sostenere solamente due tipi di carichi:

- il peso proprio (carico permanente strutturale G1);
- il peso permanente non strutturale  $G_2$  delle ballette di paglia che fungono da tamponamento nella copertura (elemento 10 della Tabella 13).

Dati in input						
Base b	0,20	m				
Altezza h	0,02	m				
Lunghezza l	2,96	m				
Volume	0,01	$m^3$				
Densità	450,00	kg/m³				
Peso proprio	5,32	kg				
Interasse massimo i	0,20	m				
Area influenza	0,59	$m^2$				

Il carico permanente  $G_1$  si calcola dividendo il peso proprio 5,32 kg e l'area d'influenza 0,59 m². Trasformando poi il risultato in kN/m², si ottiene un carico totale di pari a 0,09 kN/m².

Per il calcolo del carico permanente  $G_2$ , pari a 0,26 kN/ $m^2$  si rimanda alla Tabella 14.

Riassumendo, i carichi agenti sulla tavola sono:

Carichi permanenti		
Carico permanente strutturale G <sub>1</sub>	0,09	kN/m²
Carico permanente non strutturale G2	0,26	kN/m <sup>2</sup>

I due carichi permanenti sono poi stati corretti applicando i rispettivi coefficienti di sicurezza, secondo la formula riportata al paragrafo 2.5.3 della NTC 2018 per le combinazioni fondamentali.

$$F_{d} \; = \; \gamma_{g1} \; \cdot \; g_{1} \; + \; \gamma_{g2} \; \cdot \; g_{2} \; + \; \gamma_{q} \; \cdot \; q \; + \; \gamma_{Qj} \; \cdot \; \left( \Sigma \; \Psi_{Qj} \; \cdot \; Q_{j} \right)$$

_	1.		1.	
Cond	112	rione	d١	carico

	Carichi permanenti	Carichi permanenti	Azioni variabili		
	strutturali G <sub>1</sub>	non strutturali G <sub>2</sub>	Q		
F <sub>d</sub> =	1,3 · 0,09	1,5 · 0,26	1,5 · 0		
F <sub>d</sub> =	0,12	0,39	0	0,51	kN/m²

Moltiplicando il valore appena ottenuto per l'interasse si ottiene il carico su metro lineare, necessario per le verifiche a SLU e a SLE.

Carico permanente lineare =  $(0.12 + 0.39) \text{ kN/m}^2 \cdot 0.20 \text{ m} = 0.10 \text{ kN/m}$ 

### Analisi della condizione di carico

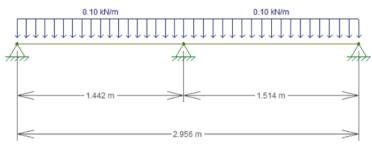


Figura 55 Schema strutturale della tavola scelta

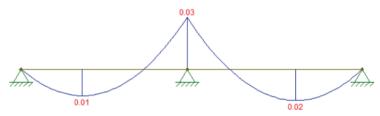


Figura 56 Diagramma del momento flettente della tavola scelta

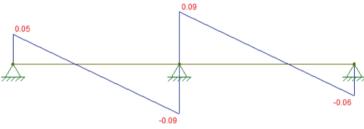


Figura 57 Diagramma di taglio della tavola scelta

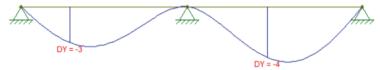


Figura 58 Deformata dovuta ai carichi permanenti della tavola scelta

Osservando i valori ottenuti si può concludere che:

Momento flettente massimo	0,03	kN · m
Taglio massimo	0,09	kN
Deformata dovuta ai soli carichi permanenti massima	4	mm

Nelle tabelle riportate di seguito si possono osservare i calcoli eseguiti seguendo le direttive della NTC 2018 approfondite nel paragrafo iniziale del presente capitolo.

Le verifiche a SLU e SLE eseguite sono:

- verifica per flessione semplice;
- verifica per taglio semplice;
- verifica per deformazione;
- verifica per instabilità di trave.

# Verifiche a SLU e SLE della tavola scelta

## Verifica a SLU per flessione semplice

NTC 2018 paragrafo 4.4.8.1.6

$\sigma_{m,y,d}$ / $f_{m,y,d}$	0,31			≤1, allora è verificato
	Tensione di calcolo a flessione	22,94 2,25		kg/cm² N/mm²
	σ <sub>m,y,d</sub>	Momento massimo	0,03	kN⋅m
		$M_{max}$	305,91	kg∙cm
	·	Modulo di		-
		resistenza	13,33	cm <sup>3</sup>
		W <sub>x</sub>		verificato  kg/cm²  N/mm²  kN·m  kg·cm
	Resistenza di	7.20		
	progetto a flessione	7,20		N/mm <sup>-</sup>
	f <sub>m,y,d</sub>			
		<b>a SLU per taglio se</b> 2018 paragrafo 4.4.8.3	•	
$\tau_d$ / $f_{v,d}$	0,03			
-4 / -1/,4				verificato
	Tensione tangenziale per taglio di progetto <sub>Td</sub>	0,05		N/mm²
		Taglio massimo	0,09	kN
		$T_{max}$	90,00	N
		Base efficace b <sub>eff</sub>	134,00	mm
	-	Coefficiente di riduzione k <sub>ef</sub>	0,67	
	Resistenza di progetto a taglio f <sub>v,d</sub>	1,36		N/mm²
		7 F 1-f		
		<b>SLE per deformazione</b> 2018 paragrafo 4.4.7		N/mm² kN·m kg·cm  cm³  N/mm²  ≤1, allora è verificato  N/mm²  kN N mm  N/mm²
Spostamento elas:		=		mm
dovuto ai car	NTC tico verticale massimo ichi permanenti $\delta_1$	2018 paragrafo 4.4.7		
dovuto ai car Spostamento elas	NTC tico verticale massimo ichi permanenti $\delta_1$ tico verticale massimo	2 2018 paragrafo 4.4.7 4		cm
dovuto ai car Spostamento elas dovuto ai ca	NTC tico verticale massimo ichi permanenti $\delta_1$ tico verticale massimo arichi variabili $\delta_2$	2 2018 paragrafo 4 . 4 . 7 4 0 , 4 0		c m mm
dovuto ai car Spostamento elas dovuto ai ca Frecc	NTC tico verticale massimo ichi permanenti $\delta_1$ tico verticale massimo arichi variabili $\delta_2$ ia massima	2 2018 paragrafo 4.4.7 4 0,4 0		cm mm cm
dovuto ai car Spostamento elas dovuto ai ca Frecci	NTC tico verticale massimo ichi permanenti $\delta_1$ tico verticale massimo arichi variabili $\delta_2$ ia massima $\delta_{max}$ dello sbalzo	2 2018 paragrafo 4 . 4 . 7 4 0 , 4 0		cm mm cm mm
dovuto ai car Spostamento elas dovuto ai ca Frecci	NTC tico verticale massimo ichi permanenti $\delta_1$ tico verticale massimo arichi variabili $\delta_2$ ia massima $\delta_{\text{max}}$	2 2018 paragrafo 4.4.7 4 0,4 0 4 0,4		cm mm cm mm cm

### Verifica a SLU per instabilità di trave

NTC 2018 paragrafo 4.4.8.2.1

		1	NTC 2018 paragraf	o 4.4.8.2.1			
$\sigma_{m,d}$ /	0,24						≤1, allora verificato
(k <sub>crit,m</sub> ·f <sub>m,d</sub> ) Tensione di							verilledTo
calcolo a							
flessione	2,25						$N/mm^2$
σ <sub>m,d</sub> Coefficiente di							
correzione per							
instabilità di	1.00						perché
	1,00						$\lambda_{\text{rel,m}} \leq 0$
trave							
k <sub>crit,m</sub>	C II						
	Snellezza	• • •					
	relativa	0,26					
_	$\lambda_{\text{rel,m}}$						
		Resistenza					
		caratteristica a	18,00				N/mm <sup>2</sup>
		flessione					•
		$f_{m,k}$					
		Tensione normale					
		critica per	275,70				N/mm²
		flessione	,. 0				,
		$\sigma_{m,crit}$					
			Momento			<del></del>	<del></del>
			flettente critico	26 760 420 55			NI
			per instabilità di	36.760.130,55			N·mm kN·m
			trave	36,76			KIN · M
			M <sub>y,crit</sub>				
				Larghezza			
				collaborante	2.601,28		mm
				$l_{eff}$			
				-	Parametro per la		
					valutazione della		
					larghezza	0,88	
					collaborante	0,00	
					β		
				Momento			
				d'inerzia relativo	13.333.333		$mm^4$
				all'asse debole z			
				Iz			
				Modulo di			
				elasticità			
				tangenziale 5-	440,00		N/mm²
				percentile			
				G <sub>0,05</sub>			
				Momento			
				d'inerzia	22 502 602		,
				torsionale	22.560.000		mm <sup>4</sup>
				$I_{\text{tor}}$			
					Parametro per la		
					valutazione della		
					larghezza	0,141	perché
					collaborante		h/b = 0
					α		
			Modulo di				
			resistenza	133.333			$mm^3$
			$W_y$				
Resistenza di							
progetto a	7.00						, , , , , ,
flessione	7,20						N/mm <sup>2</sup>
$f_{m,d}$							
t <sub>m,d</sub> Coefficiente							
	1,30						

### TRAVE PRIMARIA DI SOLAIO

#### Scelta della trave da dimensionare

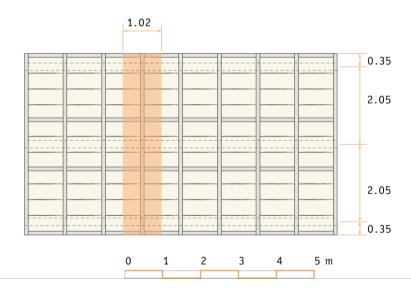
Le travi primarie del solaio inferiore, analogamente a quelle della copertura, hanno l'altezza fissa dettata dalle dimensioni delle ballette di paglia fornite dall'azienda agricola TVTb e usate come tamponamento; quindi, l'unica dimensione che può variare è la base.

Per eseguire i calcoli per il dimensionamento si è scelta una delle travi interne alla scatola prefabbricata. Queste, infatti, hanno un interasse - e quindi un'area d'influenza - maggiore rispetto alle due travi di bordo. Come si vedrà in seguito però, sulle travi di bordo è stato necessario eseguire anche una verifica a torsione e una per l'azione combinata di taglio e torsione; su questi due elementi, infatti, grava un carico che agisce fuori dall'asse baricentrico.

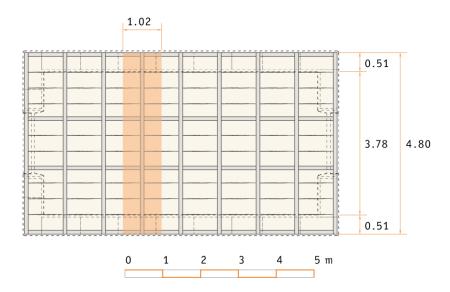
Di sequito si riportano tre diversi schemi (le dimensioni evidenziate sono sempre espresse in metri):

- 1. pianta di riferimento che esplicita la posizione delle travi d'appoggio delle fondazioni, che verranno identificate come appoggi negli schemi strutturali sottostanti;
- 2. pianta di riferimento per il dimensionamento della trave interna. Le misure esplicitate riguardano la lunghezza e l'interasse della trave e le lunghezze d'influenza dei carichi permanenti e variabili;
- 3. pianta di riferimento per il dimensionamento della trave di bordo. Le misure esplicitate riguardano la lunghezza e l'interasse della trave, l'eccentricità del carico e le lunghezze d'influenza dei carichi permanenti e variabili.

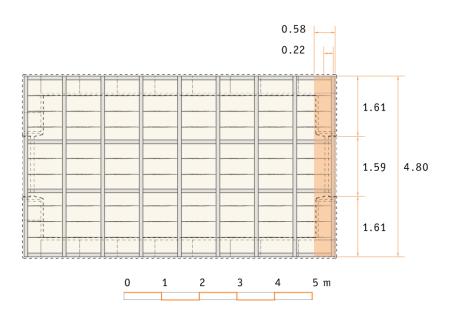




Schema 2:



Schema 3:



### Definizione dei carichi

Le travi primarie del solaio inferiore (elementi 17 e 18 della Tabella 13) saranno in abete e dovranno sostenere tre diversi carichi:

- il peso proprio (carico permanente strutturale G1);
- il peso permanente non strutturale  $G_2$  degli elementi soprastanti e di quelli appesi (elementi da 1 a 21, escluso i numeri 17 e 18 della Tabella 13);
- il carico di esercizio della categoria C1 per aree con tavoli, quali scuole, caffè, ristoranti, sale per banchetti, lettura e ricevimento, pari a  $3,00 \text{ kN/m}^2$ .

Di seguito si farà riferimento sempre alla trave interna, mentre la trave di bordo verrà considerata unicamente per le verifiche a torsione e a taglio e torsione combinate.

Dati in input (tra	ave interna)	
Base b	0,10	m
Altezza h	0,33	m
Lunghezza l	4,80	m
Volume	0,17	$m^3$
Densità	450,00	kg/m³
Peso proprio	78,41	kg
Interasse i	1,02	m
Area influenza	4,90	m <sup>2</sup>

Il carico permanente  $G_1$  si calcola dividendo il peso proprio 78,41 kg e l'area d'influenza 4,90 m². Trasformando poi il risultato in kN/m², si ottiene un carico totale di pari a 0,15 kN/m².

Per il calcolo del carico permanente G2, pari a 13,14 kN/m² si rimanda alla Tabella 14.

Riassumendo, i carichi agenti sulla trave sono:

Carichi		
Carico permanente strutturale G1	0,15	kN/m²
Carico permanente non strutturale G2	13,14	$kN/m^2$
Carico variabile Q	3,00	$kN/m^2$

Dato che il carico variabile agente è unico, esiste una sola combinazione di carico possibile ed è stata calcolata mediante la formula riportata al paragrafo 2.5.3 della NTC 2018 per le combinazioni fondamentali.

$$F_{d} = \gamma_{g1} \cdot g_{1} + \gamma_{g2} \cdot g_{2} + \gamma_{q} \cdot q + \gamma_{Qj} \cdot (\Sigma \Psi_{Qj} \cdot Q_{j})$$

Azione dominante: Carico di esercizio per ambienti suscettibili di affollamento (Cat. C1)

				`	,
	Carichi permanenti strutturali G1	Carichi permanenti non strutturali G2	Azioni variabili Q		
$F_d =$	1,3 · 0,15	1,5 · 13,14	1,5 · 3,00		
F <sub>d</sub> =	0,19	19,72	4,50	24,41	kN/m²

Il carico totale, quindi, è pari a 24,41 kN/m².

Moltiplicando i valori appena ottenuti per l'interasse si ottengono i carichi su metro lineare, necessari per le verifiche a SLU e a SLE.

Carico permanente lineare =  $(0.19 + 19.72) \text{ kN/m}^2 \cdot 1.02 \text{ m} = 20.31 \text{ kN/m}$ 

Carico variabile lineare =  $4,50 \text{ kN/m}^2 \cdot 1,02 \text{ m} = 4,59 \text{ kN/m}$ 

Carico totale lineare = 20,31 + 4,59 = 24,90 kN/m

# Analisi della condizione di carico

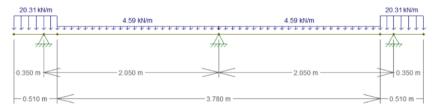


Figura 59 Schema strutturale della trave scelta

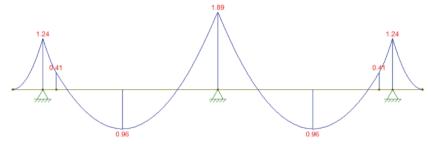


Figura 60 Diagramma del momento flettente della trave scelta

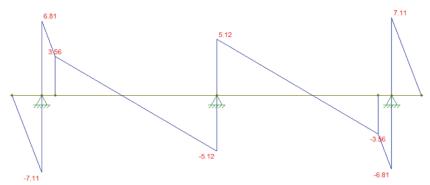


Figura 61 Diagramma di taglio della trave scelta



Figura 62 Deformata della trave scelta dovuta ai carichi permanenti

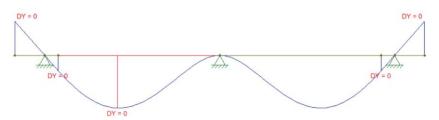


Figura 63 Deformata della trave scelta dovuta ai carichi variabili

Osservando i valori ottenuti si può concludere che:

Momento flettente massimo	1,89	kN · m
Taglio massimo	7,11	kN
Deformata dovuta ai soli carichi permanenti massima	0	mm
Deformata dovuta ai soli carichi variabili massima	0	mm

Nelle tabelle riportate di seguito si possono osservare i calcoli eseguiti seguendo le direttive della NTC 2018 approfondite nel paragrafo iniziale del presente capitolo.

Le verifiche a SLU eseguite sono:

- verifica per flessione semplice;
- verifica per taglio semplice;
- verifica per instabilità di trave;
- verifica per torsione;
- verifica per taglio e torsione.

Dato che le frecce risultano nulle, la verifica a SLE sulla deformazione sarebbe stata priva di significato, quindi non è stata svolta.

# Verifiche a SLU della trave scelta

### Verifica a SLU per flessione semplice

NTC 2018 paragrafo 4.4.8.1.6

$\sigma_{m,y,d} / f_{m,y,d}$	0,15			≤1, allora è verificato
	Tensione di calcolo a flessione $\sigma_{m,y,d}$	10,62 1,04		kg/cm² N/mm²
	-	Momento massimo	1,89	kN⋅m
		$M_{max}$	19.272,64	kg∙cm
	·	Modulo di		
		resistenza	1.815,00	c m <sup>3</sup>
		$W_x$		
	Resistenza di			
	progetto a flessione	7,20		$N/mm^2$
	$f_{m,y,d}$			N/mm²
	0.35			≤1, allora è
τ <sub>d</sub> / f <sub>v,d</sub>	0,35  Tensione tangenziale per	0,48		kg/cm² N/mm² kN·m kg·cm
τ <sub>d</sub> / t <sub>v,d</sub>	Tensione tangenziale per taglio di progetto	0,48		verificato
Td / fv,d	Tensione tangenziale per		7.11	verificato N/mm²
Td / fv,d	Tensione tangenziale per taglio di progetto	Taglio massimo	7,11 7,110,00	verificato  N/mm²
Td / fv,d	Tensione tangenziale per taglio di progetto		7,11 7.110,00 67,00	verificato  N/mm²  kN N
Td / fv,d	Tensione tangenziale per taglio di progetto	Taglio massimo T <sub>max</sub> Base efficace	7.110,00	verificato  N/mm²  kN N
Td / fv,d	Tensione tangenziale per taglio di progetto	Taglio massimo  T <sub>max</sub> Base efficace  b <sub>eff</sub>	7.110,00	verificato  N/mm²  kN N
Td / Tv,d	Tensione tangenziale per taglio di progetto	Taglio massimo  T <sub>max</sub> Base efficace  b <sub>eff</sub> Coefficiente di	7.110,00	verificato  N/mm²  kN N
Td / fv,d	Tensione tangenziale per taglio di progetto	Taglio massimo  T <sub>max</sub> Base efficace  b <sub>eff</sub> Coefficiente di  riduzione	7.110,00	verificato  N/mm²  kN N

 $f_{v,d}$ 

#### Verifica a SLU per instabilità di trave

NTC 2018 paragrafo 4.4.8.2.1

		ľ	NTC 2018 paragraf	0 4.4.8.2.1			
$\sigma_{m,d}$ /	0,15						≤1, allora
(k <sub>crit,m</sub> ·f <sub>m,d</sub> ) Tensione di							verificat
calcolo a	1,04						N/mm <sup>2</sup>
flessione							,
$\sigma_{m,d}$							
Coefficiente di							
correzione per							perché
instabilità di	1,00						
trave							$\lambda_{\text{rel,m}} \leq 0$
k <sub>crit,m</sub>							
	Snellezza						
	relativa	0,39					
	$\lambda_{\text{rel,m}}$						
_	,	Resistenza					
		caratteristica a					
		flessione	18,00				N/mm²
		f <sub>m,k</sub>					
		Tensione normale					
		critica per	115,94				N/mm²
		flessione					,
		$\sigma_{\text{m,crit}}$					
			Momento				
			flettente critico	63.767.958,36			N·mm
			per instabilità di	63,77			kN·m
			trave	03,77			KINTIII
			M <sub>y,crit</sub>				
				Larghezza			
				collaborante	4.224,00		mm
				$l_{eff}$			
					Parametro per la		
					valutazione della		
						0.00	
					larghezza collaborante	0,88	
					β		
				Momento			
				d'inerzia relativo	27.500.000		mm <sup>4</sup>
				all'asse debole z	27.300.000		
				$I_z$			
				Modulo di			
				riodoto di			
				elasticità	440,00		N/mm²
				elasticità tangenziale 5-	440,00		N/mm²
				elasticità tangenziale 5- percentile	440,00		N/mm²
				elasticità tangenziale 5- percentile G <sub>0,05</sub>	440,00		N/mm <sup>i</sup>
				elasticità tangenziale 5- percentile G <sub>0,05</sub>	440,00		N/mm <sup>2</sup>
				elasticità tangenziale 5- percentile G <sub>0,05</sub> Momento d'inerzia	440,00 86.790.000		N/mm <sup>2</sup> mm <sup>4</sup>
				elasticità tangenziale 5- percentile G <sub>0,05</sub> Momento d'inerzia torsionale			
				elasticità tangenziale 5- percentile G <sub>0,05</sub> Momento d'inerzia	86.790.000		
				elasticità tangenziale 5- percentile G <sub>0,05</sub> Momento d'inerzia torsionale	86.790.000 Parametro per la		
				elasticità tangenziale 5- percentile G <sub>0,05</sub> Momento d'inerzia torsionale	86.790.000 Parametro per la valutazione della		mm <sup>4</sup>
				elasticità tangenziale 5- percentile G <sub>0,05</sub> Momento d'inerzia torsionale	86.790.000  Parametro per la valutazione della larghezza	0,263	mm⁴ perché
				elasticità tangenziale 5- percentile G <sub>0,05</sub> Momento d'inerzia torsionale	86.790.000 Parametro per la valutazione della	0,263	mm⁴ perché
				elasticità tangenziale 5- percentile G <sub>0,05</sub> Momento d'inerzia torsionale	86.790.000  Parametro per la valutazione della larghezza	0,263	mm⁴ perché
			Modulo di	elasticità tangenziale 5- percentile G <sub>0,05</sub> Momento d'inerzia torsionale	86.790.000  Parametro per la valutazione della larghezza collaborante	0,263	mm <sup>4</sup> perché
			resistenza	elasticità tangenziale 5- percentile G <sub>0,05</sub> Momento d'inerzia torsionale	86.790.000  Parametro per la valutazione della larghezza collaborante	0,263	mm⁴ perché
				elasticità tangenziale 5- percentile G <sub>0,05</sub> Momento d'inerzia torsionale I <sub>tor</sub>	86.790.000  Parametro per la valutazione della larghezza collaborante	0,263	mm <sup>4</sup> perché h/b = 3,
Resistenza di			resistenza	elasticità tangenziale 5- percentile G <sub>0,05</sub> Momento d'inerzia torsionale I <sub>tor</sub>	86.790.000  Parametro per la valutazione della larghezza collaborante	0,263	mm <sup>4</sup> perché h/b = 3,
Resistenza di progetto a	7.00		resistenza	elasticità tangenziale 5- percentile G <sub>0,05</sub> Momento d'inerzia torsionale I <sub>tor</sub>	86.790.000  Parametro per la valutazione della larghezza collaborante	0,263	mm <sup>4</sup> perché h/b = 3,  mm <sup>3</sup>
	7,20		resistenza	elasticità tangenziale 5- percentile G <sub>0,05</sub> Momento d'inerzia torsionale I <sub>tor</sub>	86.790.000  Parametro per la valutazione della larghezza collaborante	0,263	perché h/b = 3,

### Verifica a SLU per torsione semplice in riferimento alla trave di bordo

NTC 2018 paragrafo 4.4.8.1.10

			1 agraio 4.4.6.1.10			
Carico permanente						
strutturale	0,25					kN/m <sup>2</sup>
$G_1$						
Carico permanente						
non strutturale	19,72					kN/m²
G <sub>2</sub>						
$\tau_{tor,d}$ / $k_{sh}$ · $f_{v,d}$	0,90					≤1, allora è
cior,a / Ksn iv,a	0,50					verificato
	Tensione					
	tangenziale di	1.694,46				kN/m²
	progetto massima	1,69				N/mm <sup>2</sup>
	per torsione	1,09				147 111111
	T <sub>tor,d</sub>					
		Momento torcente				
		lineare massimo	2,55			$(kN \cdot m)/m$
		M <sub>t</sub>				
			Forza risultante			
			concentrata	11,58		kN
			Р			
		•		Carico superficiale	10.07	LNI /2
				$G_1 + G_2$	19,97	kN/m²
		•		Interasse	0.50	
				i	0,58	m
		•		Larghezza		
				d'influenza	1,00	m
				l		
		•	Eccentricità			
			e	0,22		m
		Altezza sezione				
		h (b)	0,33			m
		Base sezione				
		b (a)	0,13			m
		Coefficiente	2.74			
		α	3,71			-
	Coefficiente	4.00				
	$K_sh$	1,38				-
	Resistenza di					
	progetto a taglio	1,36				N/mm <sup>2</sup>
	$f_{v,d}$					-

## Verifica a SLU per taglio e torsione in riferimento alla trave di bordo

NTC 2018 paragrafo 4.4.8.1.11

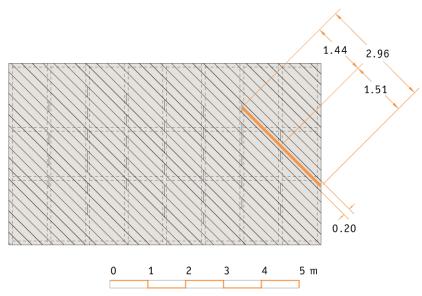
$\tau_{tor,d} \; / \; k_{sh} \; \cdot \; f_{v,d}$	+	$(\tau_d \ / \ f_{v,d})^2$	0,98		≤1, allora è verificato
			$\tau_{tor,d}$ / $k_{sh}$ · $f_{v,d}$	0,90	$N/mm^2$
			$\tau_d$ / $f_{v,d}$	0,27	N/mm²

## TAVOLATO INFERIORE DEL SOLAIO INFERIORE

#### Scelta della trave da dimensionare

Per eseguire i calcoli per il dimensionamento dello spessore del tavolato che sostiene la paglia di tamponamento della scatola prefabbricata del solaio inferiore (elemento 16 della Tabella 13) si è scelta la tavola avente la campata maggiore.

Di seguito si riporta la pianta di riferimento con le lunghezze espresse in metri. I dati dimensionali sono analoghi a quelli della tavola scelta per il tavolato inferiore della copertura, ma il legno impiegato per realizzare i due tavolati è di due specie diverse, quindi è stato necessario eseguire due diversi procedimenti di calcolo.



#### Definizione dei carichi

Il tavolato, in legno di larice, dovrà sostenere solamente due tipi di carichi:

- il peso proprio (carico permanente strutturale G1);
- il peso permanente non strutturale  $G_2$  delle ballette di paglia che fungono da tamponamento nel solaio (elemento 20 della Tabella 13).

Dati in input						
Base b	0,20	m				
Altezza h	0,02	m				
Lunghezza l	2,96	m				
Volume	0,01	$m^3$				
Densità	610,00	kg/m³				
Peso proprio	7,22	kg				
Interasse massimo i	0,20	m				
Area influenza	0,59	$m^2$				

Il carico permanente  $G_1$  si calcola dividendo il peso proprio 7,22 kg e l'area d'influenza 0,59 m². Trasformando poi il risultato in  $kN/m^2$ , si ottiene un carico totale di pari a 0,12  $kN/m^2$ .

Per il calcolo del carico permanente  $G_2$ , pari a  $0.26\ kN/m^2$  si rimanda alla Tabella 14.

Riassumendo, i carichi agenti sulla tavola sono:

Carichi permanenti			
Carico permanente portante G <sub>1</sub>	0,12	kN/m²	
Carico permanente portato G2	0,26	kN/m²	

I due carichi permanenti sono poi stati corretti applicando i rispettivi coefficienti di sicurezza, secondo la formula riportata al paragrafo 2.5.3 della NTC 2018 per le combinazioni fondamentali.

$$F_{d} \; = \; \chi_{g1} \; \cdot \; g_{1} \; + \; \chi_{g2} \; \cdot \; g_{2} \; + \; \chi_{q} \; \cdot \; q \; + \; \chi_{Qj} \; \cdot \; \left( \Sigma \; \Psi_{Qj} \; \cdot \; Q_{j} \right)$$

#### Condizione di carico

	Carichi permanenti strutturali G <sub>1</sub>	Carichi permanenti non strutturali G2	Azioni variabili Q		
F <sub>d</sub> =	1,3 · 0,12	1,5 · 0,26	1,5 · 0		
F <sub>d</sub> =	0,16	0,39	0	0,55	kN/m²

Moltiplicando il valore appena ottenuto per l'interasse si ottiene il carico su metro lineare, necessario per le verifiche a SLU e a SLE.

Carico permanente lineare =  $(0.16 + 0.39) \text{ kN/m}^2 \cdot 0.20 \text{ m} = 0.11 \text{ kN/m}$ 

### Analisi della condizione di carico

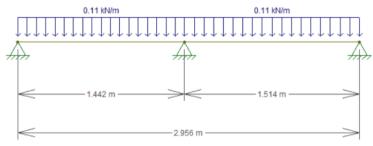


Figura 64 Schema strutturale della tavola scelta

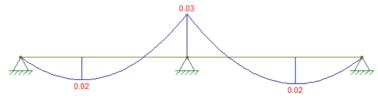


Figura 65 Diagramma del momento flettente della tavola scelta

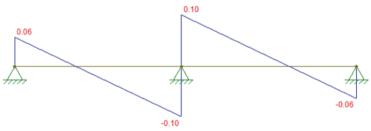


Figura 66 Diagramma di taglio della tavola scelta

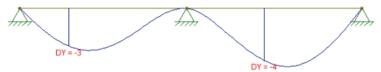


Figura 67 Deformata dovuta ai carichi permanenti della tavola scelta

Osservando i valori ottenuti si può concludere che:

Momento flettente massimo	0,03	kN · m
Taglio massimo	0,10	kN
Deformata dovuta ai soli carichi permanenti massima	4	mm

Nelle tabelle riportate di seguito si possono osservare i calcoli eseguiti seguendo le direttive della NTC 2018 approfondite nel paragrafo iniziale del presente capitolo.

Le verifiche a SLU e SLE eseguite sono:

- verifica per flessione semplice;
- verifica per taglio semplice;
- verifica per deformazione;
- verifica per instabilità di trave.

# Verifiche a SLU e SLE della tavola scelta

### Verifica a SLU per flessione semplice

NTC 2018 paragrafo 4.4.8.1.6

$\sigma_{m,y,d}$ / $f_{m,y,d}$	0,24			≤1, allora è verificato
	Tensione di calcolo a flessione $\sigma_{m,y,d}$	22,94 2,25		kg/cm² N/mm²
		Momento massimo	0,03	kN⋅m
		$M_{max}$	305,91	kg∙cm
		Modulo di		2
		resistenza	13,33	cm <sup>3</sup>
	Resistenza di	W <sub>x</sub>		
	progetto a flessione	9,20		N/mm²
	f <sub>m,y,d</sub>	3,22		,
		a SLU per taglio se	•	
	NTC	2018 paragrafo 4.4.8.	1.9	.4 . 11
$\tau_d$ / $f_{v,d}$	0,04			≤1, allora è verificato
	Tensione			
	tangenziale per taglio di progetto	0,06		N/mm <sup>2</sup>
	$\tau_{ m d}$			
		Taglio massimo	0,10	kN
		T <sub>max</sub> Base efficace	100,00	N
		base efficace b <sub>eff</sub>	134,00	mm
		Coefficiente di		
		riduzione	0,67	
		$k_{ef}$		
	Resistenza di			
	progetto a taglio	1,52		N/mm²
	- f <sub>v,d</sub>			
		SLE per deformazion C 2018 paragrafo 4.4.		
Spostamento elast	ico verticale massimo	4		mm
•	chi permanenti $\delta_1$	0,4		cm
Spostamento elast	ico verticale massimo	0		mm
dovuto ai ca	richi variabili δ <sub>2</sub>	0		cm
	a massima	4		mm
	$\delta_{max}$	0,4		cm
Doppio o	dello sbalzo L	295,60		cm
	L/200	1,48		cm
		$\delta_{max} \le L/200$	0,4 ≤ 1,48	verificato
			•	

### Verifica a SLU per instabilità di trave

NTC 2018 paragrafo 4.4.8.2.1

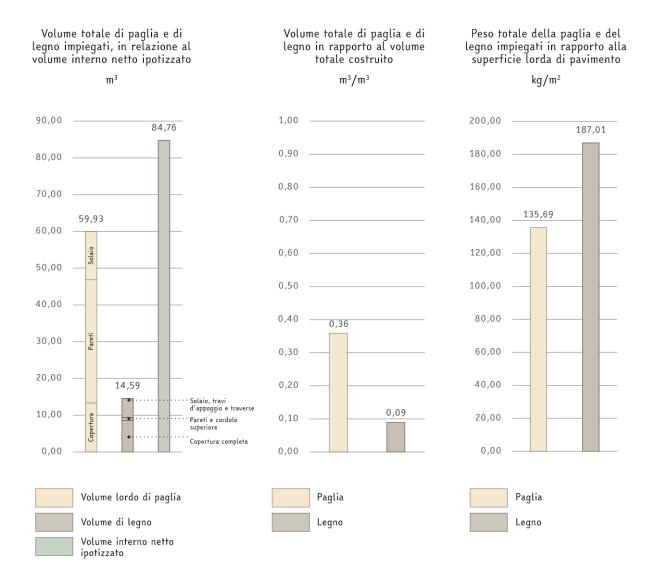
- /			TTC 2010 paragrai				-1 -11
$\sigma_{m,d}$ / $(k_{crit,m} \cdot f_{m,d})$	0,19						≤1, allora è verificato
Tensione di							
calcolo a							•
flessione	2,25						N/mm²
$\sigma_{\text{m,d}}$							
Coefficiente di							
orrezione per							ئامىسە ش
instabilità di	1,00						perché λ <sub>rel,m</sub> ≤ 0,75
trave							Λ <sub>rel,m</sub> ≤ U,/3
k <sub>crit,m</sub>							
	Snellezza						
	relativa	0,26					
_	$\lambda_{\text{rel,m}}$						
		Resistenza					
		caratteristica a	23,00				N/mm²
		flessione	,				,
		$f_{m,k}$					
		Tensione normale					
		critica per	343,67				N/mm <sup>2</sup>
		flessione					,
		σ <sub>m,crit</sub>					
			Momento				
			flettente critico	45.822.560,58			N·mm
			per instabilità di	45,82			kN⋅m
			trave				
			M <sub>y,crit</sub>				
				Larghezza			
				collaborante	2.601,28		mm
				L <sub>eff</sub>			
					Parametro per la		
					valutazione della		
					larghezza	0,88	
					collaborante o		
					β		
				Momento d'inerzia relativo			
				all'asse debole z	13.333.333		mm <sup>4</sup>
				I <sub>z</sub>			
				Modulo di			
				elasticità			
				tangenziale 5-	569,74		N/mm²
				percentile	-05/. 1		,
				G <sub>0,05</sub>			
				Momento			
				Momento d'inerzia			
				torsionale	22.560.000		mm <sup>4</sup>
				I <sub>tor</sub>			
				±10r	Parametro per la		
					valutazione della		
					larghezza	0,141	perché
					collaborante	•	h/b = 0,10
					α		
			Modulo di				
			resistenza	133.333			$mm^3$
			$W_y$				
Resistenza di							
progetto a	9,20						N/mm²
flessione	J,LU						14/ 111111
$f_{m,d}$							
Coefficiente							
incrementale	1,30						
$k_h$							

# QUANTITÀ IMPIEGATA DI PAGLIA E LEGNO

Di seguito vengono presentati tre grafici per valutare le quantità di paglia e di legno impiegate per la realizzazione del padiglione.

Il primo grafico (a sinistra) confronta il volume interno netto - che approssimativamente si otterrà dopo il completo assestamento delle ballette di paglia portanti - con il volume lordo di paglia e quello di legno.

Nel grafico al centro vengono riportati i volumi di paglia e legno in rapporto con il volume totale lordo costruito. Analogamente, l'ultimo grafico riporta i pesi complessivi di paglia e legno in rapporto con la superficie lorda di pavimento.





Nel presente capitolo verranno riportati in scala 1:20 alcuni dettagli costruttivi del progetto del padiglione e le stratigrafie degli elementi di chiusura. Gli elaborati grafici saranno seguiti da alcune indicazioni specifiche riguardanti, per esempio, i materiali scelti, il ruolo di alcuni componenti, dei consigli per la costruzione o i vantaggi derivati dalla specifica soluzione progettuale adottata.

Il capitolo è stato organizzato in quattro sezioni:

- le fondazioni;
- il solaio ventilato inferiore;
- le pareti in ballette di paglia portanti;
- la copertura ventilata con verde pensile estensivo.

#### LE FONDAZIONI

Non mi sono occupata in prima persona del progetto riguardante le fondazioni, perché questo rientra in un progetto di tesi di dottorato parallelo svolto dall'ingegnere Arthur Bohn.

Comunque, in riferimento a quanto riportato nella pubblicazione Werner Schmidt architekt. Ecology craft invention (2013), per realizzare una buona fondazione è fondamentale che l'edificio abbia un drenaggio inferiore continuo sotto tutto l'edificio e che il solaio controterra sia ventilato.

Il progetto del padiglione prevede, infatti, dodici plinti di fondazione appoggiati su uno strato di stabilizzato profondo circa 40 cm e, in appoggio su questi, nove travi di legno uso Fiume di larice o di castagno. Ciascun plinto è costituito da un unico blocco di pietra di cava non levigato.

Per collegare tra loro le suddette travi e irrigidire la struttura d'appoggio verranno fissate trasversalmente delle tavole aventi l'altezza pari a quella delle travi d'appoggio, ma una base inferiore. Di seguito verrà presentata la stratigrafia delle fondazioni con gli elementi di cui è composta e i rispettivi materiali scelti.

A titolo esemplificativo, si riportano due fotografie scattate al Gartist GmbH (edificio realizzato a Bubikon, in Svizzera, su progetto dell'architetto Werner Schmidt). Nelle Figure 68 e 69 si possono osservare gli elementi che compongono il sistema di fondazione dell'edificio: dei plinti affondati in un terreno reso drenante, delle travi d'appoggio in acciaio e un tavolato spesso di chiusura.



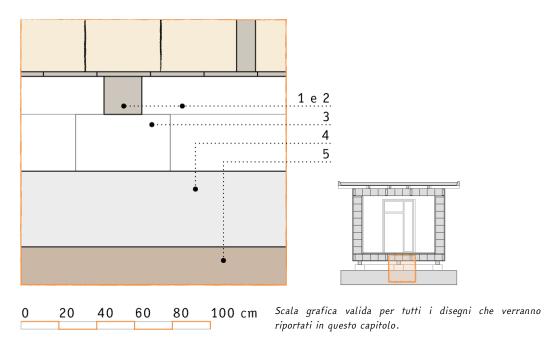


Figura 68 Fotografia del retro della residenza Gartist GmbH (Bubikon, Svizzera)
Figura 69 Dettaglio in riferimento all'immagine precedente raffigurante l'attacco a terra dell'edificio
Fonte: Anna Barbato, febbraio 2022

Altre soluzioni offerte dal mercato prevedono dei cordoli costituiti da gabbioni di pietrisco rotondo o una platea di ghiaia di vetro cellulare espanso.

In Figura 12 si può osservare un'ulteriore applicazione del vetro cellulare espanso nell'attacco a terra. Posare una lastra di questo materiale tra le travi rovesce di fondazione e le pareti può portare a diversi vantaggi: il vetro cellulare non si degrada se messo a contatto con dell'acqua liquida, quindi può fungere da drenante per l'eventuale acqua stagnante; non assorbe umidità per capillarità; ha un'elevata resistenza meccanica e al fuoco; è un buon isolante termico; è composto esclusivamente da vetro riciclato.

Quelli appena riportati sono solamente alcuni esempi di sistemi costruttivi che permettono l'utilizzo della paglia anche al piano terra e riducono notevolmente il ponte termico tra solaio e fondazioni.



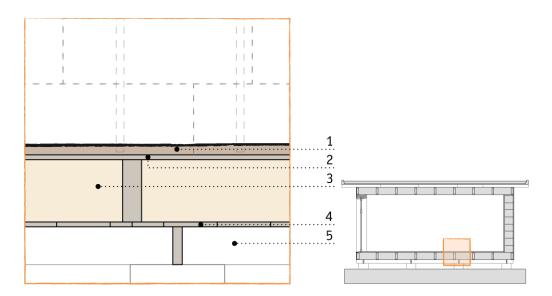
- 1. Trave d'appoggio in legno massiccio di larice o castagno
- 2. Tavola d'irrigidimento in legno massiccio di larice o castagno
- 3. Plinto di fondazione in pietra
- 4. Strato drenante di stabilizzato
- 5. Terreno originale

#### IL SOLAIO VENTILATO INFERIORE

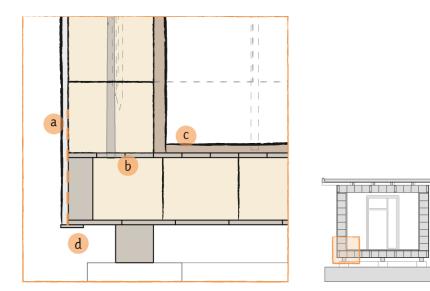
Com'è già stato anticipato nel capitolo *La progettazione del padiglione* la struttura portante del solaio inferiore è costituita da una doppia orditura di travi di legno massiccio di abete e sarà tamponata con ballette di paglia di grano; questa scatola prefabbricata sarà chiusa da due tavolati, quello interno in abete e quello esterno in larice. Il solaio sarà a contatto diretto con le nove travi d'appoggio di cui si è scritto nel paragrafo precedente.

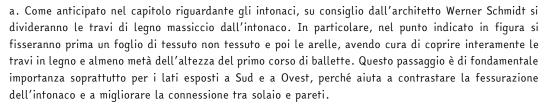
Il sistema costruttivo di solaio e fondazioni rispetta le indicazioni fornite nel paragrafo *L'acqua e le balle di paglia*, infatti il solaio inferiore è ben ventilato e rialzato dal terreno di circa 50 cm. L'umidità di risalita del terreno non dovrebbe raggiungere le ballette e la parte inferiore delle pareti è protetta dagli schizzi di pioggia che potrebbero rimbalzare dal terreno.

Di seguito si presentano dei dettagli costruttivi relativi al solaio, accompagnati da alcune note esplicative delle soluzioni progettuali adottate.



- 1. Pavimentazione in battuto di cocciopesto
- 2. Tavolato di chiusura della scatola prefabbricata in legno massiccio di abete
- 3. Doppia orditura di travi in legno massiccio di abete con tamponamento in ballette di paglia di grano
- 4. Tavolato di chiusura della scatola prefabbricata in legno massiccio di larice
- 5. Strato di ventilazione con plinti di pietra e travi d'appoggio in legno massiccio di larice o castagno





- b. Il primo corso di ballette viene reso solidale al solaio anche grazie a dei picchetti di legno. Prima di iniziare a posare le ballette, è necessario forare il tavolato superiore del solaio (come indicato nella scheda 1 del capitolo *Organizzazione del cantiere*) e appuntire l'estremità dei picchetti che resterà rivolta verso l'alto. I picchetti dovranno quindi essere inseriti nei fori.
- c. In questo progetto di tesi viene proposto un pavimento in battuto di cocciopesto, che secondo l'opinione di Schmidt potrebbe collaborare a rafforzare la connessione tra le pareti e il solaio.
- d. Solitamente alla base della parete intonacata viene fissata una scossalina in acciaio. Questa ha una doppia funzione: costituisce un limite netto, utile durante la stesura dell'intonaco, e protegge l'impasto, le arelle e il tessuto non tessuto dall'ambente esterno.

Durante il viaggio in Svizzera, precedentemente descritto, ho potuto osservare questo particolare nel complesso residenziale di Bombasei (Figure 70 e 71).

Con l'obbiettivo di testare l'impiego di materiali di origine vegetale, nel presente progetto di tesi si ipotizza che la suddetta scossalina possa essere sostituita da tavole di legno di larice o di castagno. Il medesimo ragionamento è applicabile alla sommità della parete.

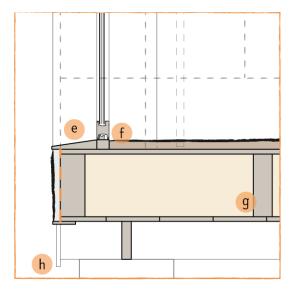


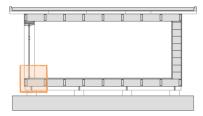


Figura 70 Fotografia del porticato del complesso residenziale Bombasei a Nänikon in Svizzera (progetto dell'arch. Werner Schmidt realizzato nel 2019)

Figura 71 Dettaglio della scossalina di chiusura dell'intonaco esterno a base di calce (in riferimento alla figura precedente)

Fonte: Anna Barbato, febbraio 2022





e. Per realizzare le soglie delle portefinestre si potrebbe fissare al solaio un elemento sagomato di legno di larice o di castagno oppure una lastra di pietra, avendo cura - in entrambi i casi - di imporre una pendenza adeguata a far defluire l'acqua meteorica (Schmidt consiglia una pendenza del 20% circa). La soglia in legno potrebbe diventare scivolosa in caso di pioggia, ma per limitare questo problema si potrebbero creare delle scanalature.

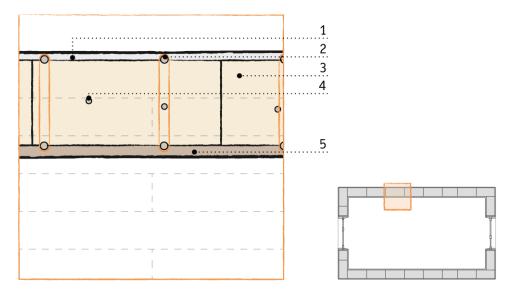
Per impedire delle infiltrazioni d'acqua nel solaio, prima di fissare la soglia sarebbe bene posare uno strato impermeabilizzante.

- f. Il travetto segnalato in figura ha una doppia funzione: funge da guida e da elemento di contenimento per la stesura del pavimento in battuto di cocciopesto ed è un buon appoggio per il telaio dell'infisso.
- g. L'altezza delle travi primarie e la distanza tra le stesse sono dettate dalle dimensioni delle ballette fornite dall'azienda agricola TVTb. Rispetto a queste dimensioni medie, comunque, sono stati considerati alcuni centimetri in meno, così da tenere in considerazione l'irregolarità delle stesse, il fatto che nelle campate non dovranno rimanere spazi vuoti e che la paglia deve essere leggermente pressata.
- h. Per limitare quanto più possibile l'assorbimento dell'acqua meteorica e quindi aumentare la durabilità della struttura, le teste delle travi d'appoggio possono essere coperte da tavole di sacrificio. Queste, infatti, potrebbero essere sostituite facilmente e senza creare disagi se dopo qualche anno dalla realizzazione si fossero deteriorate eccessivamente.

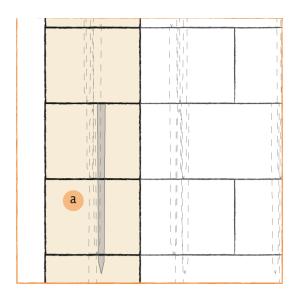
## LE PARETI IN BALLETTE DI PAGLIA PORTANTI

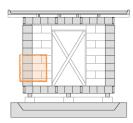
Come si è già scritto diffusamente, le pareti in ballette portanti di paglia di riso saranno protette esternamente da uno strato di intonaco a base di calce, spesso circa 4 cm, e internamente da almeno 6 cm di intonaco a base di arqilla.

Di seguito si espongono dei dettagli costruttivi delle pareti con le relative spiegazioni.



- 1. Intonaco esterno a base di calce
- 2. Sistema per migliorare la risposta sismica della parete
- 3. Ballette di paglia di riso portanti
- 4. Picchetti di nocciolo o di castagno
- 5. Intonaco interno a base di argilla

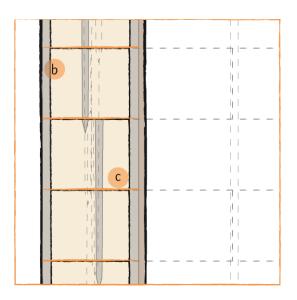




a. Grazie alla tecnica del *pinning*, le ballette delle pareti sono rese solidali tra loro e viene migliorata la resistenza della parete alle forze orizzontali. I picchetti, fissati a partire dal terzo corso, potrebbero essere in nocciolo o in castagno.

Barbara Jones nel suo manuale espone la modalità con cui, secondo la sua esperienza, bisogna collegare le balle di paglia in angolo: vanno affilate le estremità di un ramo di nocciolo lungo circa 90 cm; utilizzando un martello pesante, vanno stirate le fibre e piegate a 90° le estremità; con i picchetti a forma di graffetta così ottenuti, si collegano le ballette d'angolo di ogni corso. Sempre secondo Jones i picchetti dovrebbero avere un diametro di circa 4 cm, non dovrebbero avere troppi nodi e devono essere fissati sulle balle in modo da dividerle approssimativamente in terzi.

Schmidt, durante la revisione del progetto, ha spiegato che i picchetti danno un contributo maggiore alla resistenza meccanica della parete se vengono inseriti nelle ballette a zig-zag e non costantemente nella mezzeria. È comunque necessario aver cura di non avvicinarsi eccessivamente al bordo della balletta, perché in tal caso il picchetto sarebbe poco utile. L'architetto sostiene che più i picchetti si sovrappongono gli uni agli altri, più le prestazioni meccaniche della parete miglioreranno, quindi sarebbe meglio fossero abbastanza lunghi.





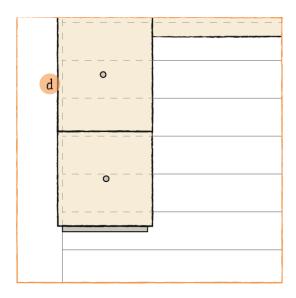
b. Come è già stato approfondito nel paragrafo riguardante gli intonaci, prima dell'intonaco a base di calce si potrebbe stendere un fondo di intonaco in argilla. Questo potrebbe anche aiutare a livellare la parete in prossimità dei pali per il miglioramento della risposta sismica della parete.

c. I pali in castagno o in bambù (elemento 2 della stratigrafia) potrebbero essere legati tra loro tramite corde in fibra di canapa o di rafia. Queste potrebbero essere formate da trecce di fibre vegetali o anche da trecce di trecce.

Per far attraversare la parete alle corde si utilizza un ago da paglia, che si fa passare tra un corso e l'altro di ballette.

Per facilitare la costruzione, una volta posati i primi corsi di ballette - prima di montare i ponteggi - si potrebbe segnare sulla paglia la posizione dei pali con della pittura o dello spago colorato; così facendo si potrà assicurare la corrispondenza tra il palo interno e quello esterno.

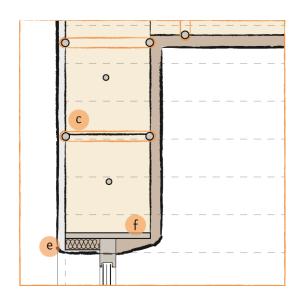
Nel suo manuale Jones, per una tecnica simile, consiglia di creare un solco dove andranno affogati i pali utilizzando un martello strappa-chiodi. In questo modo si otterranno diversi vantaggi: i pali saranno meno sporgenti dal filo della parete, la quantità di intonaco necessaria sarà inferiore e la probabilità che si formino delle crepe profonde diminuirà.





d. Le ballette vanno posate in modo tale che sporgano di circa 2,5 cm dal tavolato superiore del solaio, perché si deve tenere in considerazione che dopo il periodo di assestamento dovranno essere rasate. Jones precisa che se sulla parete sono previsti oggetti appesi - come mensole, quadri o lavagne - è necessario predisporre tra un corso e l'altro un elemento in legno, su cui successivamente andranno fissate le viti.

In figura si nota anche che le box degli infissi vanno installate prima di iniziare a posare le balle.





e. Per risolvere il ponte termico lineare tra l'infisso e la parete - sia in corrispondenza della spalletta verticale, sia lungo l'architrave - si è ipotizzato di installare la portafinestra nella mezzeria della parete e di rivestire esternamente il falso telaio con un pannello coibentante. L'isolante termico dovrebbe essere di origine vegetale e la scelta potrebbe ricadere tra la fibra di legno o la fibra di canapa. I pannelli prima di poter essere intonacati dovranno essere rivestiti con le arelle o con della rete porta intonaco.

Internamente, la strombatura potrebbe essere modellata utilizzando del termointonaco fibrato a base di argilla, che è il medesimo impasto impiegato sulle ballette per lo strato intermedio. Prima di stendere l'intonaco è importante fissare le arelle sulle box degli infissi e sul falso telaio, così da garantire un buon aggrappo all'impasto.

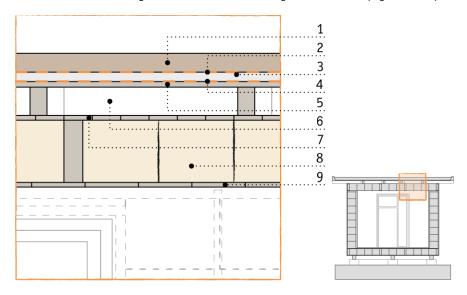
- f. Le box degli infissi analogamente al cordolo superiore saranno costruite durante i workshop didattici a partire da pannelli di legno lamellare di abete, che è stato scelto per diverse ragioni:
- tutti gli esperti delle segherie contattate hanno affermato che delle tavole in legno massiccio con una base da 45 cm sono molto difficili da reperire. Per i tavolati di solaio e copertura, infatti, le tavole preventivate hanno una base che varia tra 10 e 20 cm;
- il legno massiccio con essiccazione da piazzale (naturale), come quello che comunemente viene usato in edilizia, con il trascorrere del tempo continua la sua essiccazione e tende quindi a muoversi, andando a crepare l'intonaco. Negli elementi abbastanza sottili, come quello in esame, il fenomeno è ancora più accentuato. Un altro aspetto da tenere in considerazione è che le spallette degli infissi sono punti molto delicati in cui le crepe sono molto frequenti, perché si ha un'elevata disomogeneità sia nella morfologia, sia nei materiali.

In questo caso particolare, impiegare del legno lamellare sarebbe conveniente perché permette una maggiore libertà morfologica e riduce il rischio di fessurazione dell'intonaco (il legno lamellare viene essiccato artificialmente, quindi tende a muoversi molto meno).

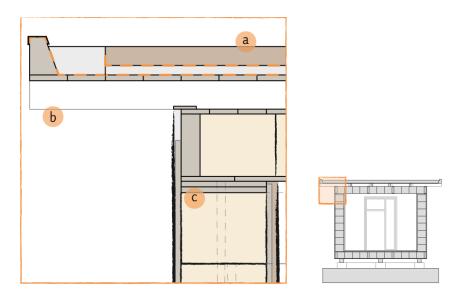
## LA COPERTURA VENTILATA CON VERDE PENSILE ESTENSIVO

La parte prefabbricata della copertura, avente una composizione analoga a quella del solaio, sarà costruita a terra e poi appoggiata sulle pareti con un'autogrù.

Questa scatola sarà protetta dalle intemperie da una seconda parte costruita direttamente sul padiglione. Tra le due porzioni ci sarà uno strato di ventilazione - aggiunto su consiglio dell'architetto Werner Schmidt - che dovrebbe garantire buone condizioni igrometriche alla paglia di tamponamento.



- 1. Strato colturale per manto erboso
- 2. Membrana filtrante
- 3. Strato drenante
- 4. Membrana antiradice e impermeabile all'acqua
- 5. Tavolato di sostegno in legno massiccio di larice
- 6. Strato di ventilazione con travetti di sostegno in legno massiccio di larice
- 7. Tavolato di chiusura della scatola prefabbricata in legno massiccio di larice
- 8. Doppia orditura di travi in legno massiccio di abete con tamponamento in ballette di paglia di grano
- 9. Tavolato di chiusura della scatola prefabbricata in legno massiccio di abete



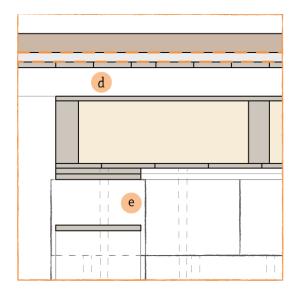
a. Per lo strato colturale potrebbe essere riutilizzata la terra scavata per realizzare lo strato drenante sotto i plinti di fondazione.

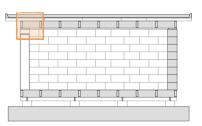
L'architetto Schmidt ha suggerito si mantenere bagnato il pacchetto verde durante il periodo di assestamento delle ballette portanti; così facendo il carico agente sulle pareti sarà maggiore e i tempi necessari per raggiungere il completo scorrimento degli steli gli uni sugli altri diminuirà. Per lo stesso motivo si potrebbero caricare sulla copertura anche eventuali sacchi contenenti inerti già presenti in cantiere, avendo cura di distribuirli il più omogeneamente possibile e tenendo sempre monitorato l'assestamento, come indicato nella scheda 2 del capitolo *Organizzazione del cantiere*.

Sovraccaricare in questo modo la struttura permette anche di simulare il carico neve e il carico di esercizio per coperture accessibili per sola manutenzione e riparazione, evitando così che le ballette si comprimano ulteriormente durante la vita utile del padiglione.

- b. In accordo con le indicazioni fornite nel paragrafo *L'acqua e le balle di paglia*, è stato progettato un sporto di 80 cm. Questa soluzione progettuale garantisce alle pareti un'adeguata protezione dall'acqua meteorica e concorre nell'aumentare la durabilità del padiglione.
- c. Il cordolo sovrastante le pareti (ring beam) è composto da due strati avvitati tra loro, così da coprire i giunti tra i pannelli e irrigidire la struttura. Schmidt nei suoi lavori lega il doppio strato impiegando anche della colla apposita, ma per il proqetto in esame questo passaggio verrà omesso.

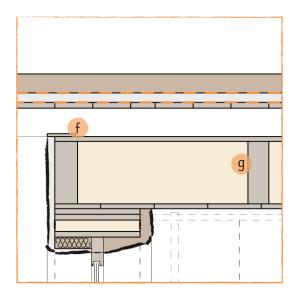
Dopo la posa, i pannelli devono essere forati come indicato nella scheda 1 del capitolo *Organizzazione del cantiere*, così da poter inserire i picchetti e rendere solidale il cordolo all'ultimo corso di ballette. Lo scopo per cui si posa questo elemento è distribuire omogeneamente i carichi su tutta la profondità della balletta e su tutti i lati dell'edificio. È importante che le pareti siano caricate allo stesso modo e che non si creino dei carichi concentrati, perché altrimenti si aumenterebbe il rischio di un assestamento non uniforme. Anche costruire una porzione di copertura a terra e appoggiarla in un secondo momento sulle pareti aiuta e caricare uniformemente le stesse.

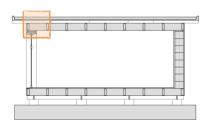




- d. Dato che il flusso d'aria sarà orizzontale, l'intercapedine dovrebbe essere abbastanza alta per riuscire a garantire comunque una buona ventilazione. Il progetto, infatti, prevede un'altezza di 15 cm.
- e. Lo spazio vuoto lasciato sopra le box degli infissi avrà un'altezza approssimativamente di 20-25 cm. Questa soluzione è stata adottata in previsione dell'abbassamento della copertura e l'altezza necessaria è stata valutata sulla base della densità media lorda delle ballette di riso e del carico che devono sostenere le pareti. Questo diaframma si ridurrà durante il periodo di assestamento delle pareti e prima dell'intonacatura dovrà essere riempito con della paglia sfusa pressata a mano.

Così facendo si ha un duplice vantaggio: si ha la certezza che sull'infisso non graverà mai nessun carico e, inoltre, sarà possibile preordinare gli infissi, perché le loro dimensioni si decideranno in fase progettuale.

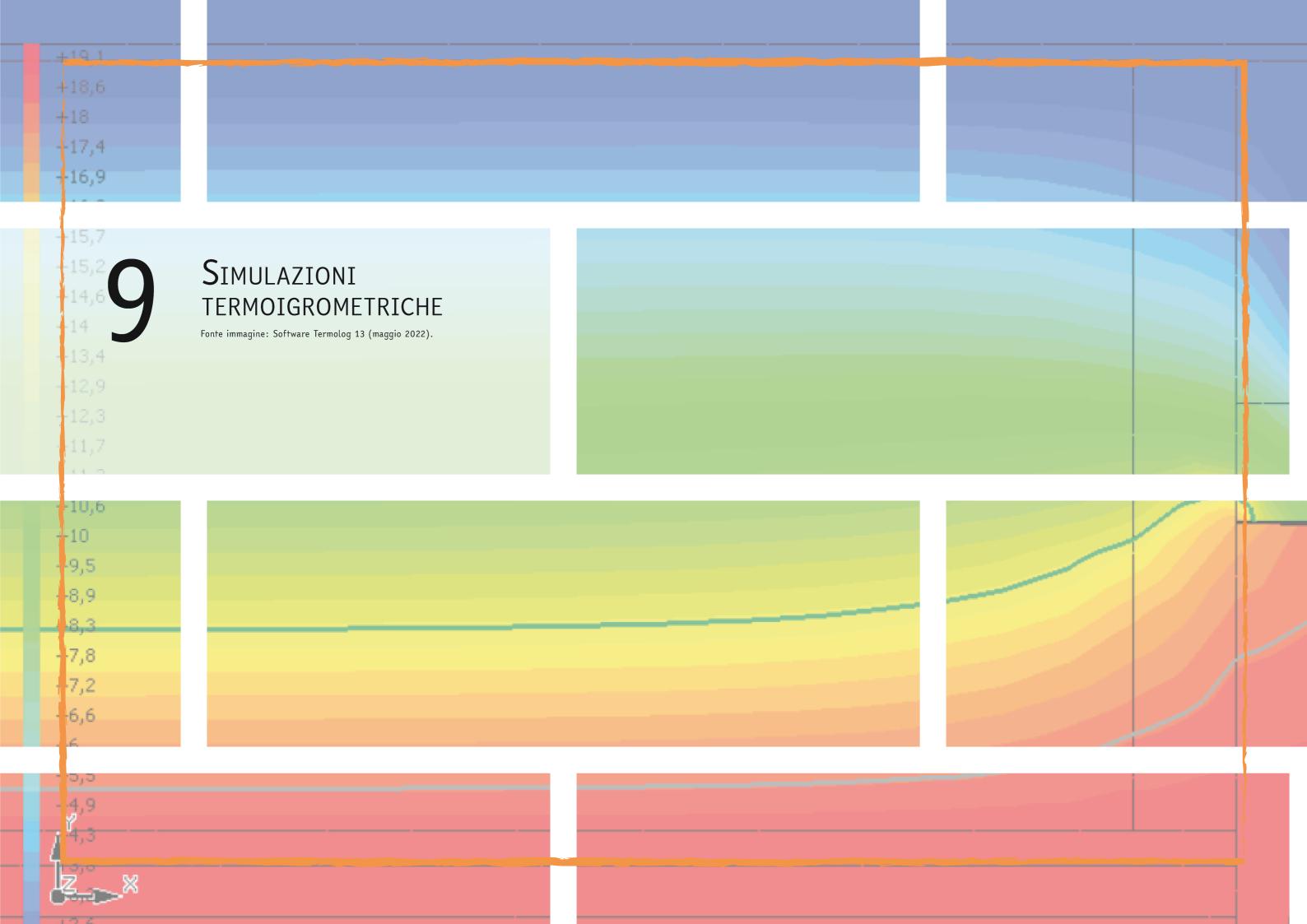




f. Per proteggere l'intonaco e fornire una superficie netta di partenza per la stesura degli impasti - analogamente a quanto progettato per la base - si potrebbero fissare alla sommità delle pareti delle tavole di legno di larice o di castagno.

È consigliabile avvitare questi elementi dopo aver posato i travetti di ventilazione, così da poter tagliare tavole della lunghezza corretta, ma prima di fissare il tavolato che sosterrà il pacchetto verde, perché sarebbe difficile usare gli avvitatori in uno spazio così ridotto.

g. L'orditura secondaria delle travi di solaio e copertura, lavorando in sinergia con i tavolati avvitati a 45°, funge da controvento rispondendo alle azioni orizzontali - come l'azione sismica e quella del vento. Inoltre, irrigidisce le scatole prefabbricate, contrastando la deformazione delle travi primarie, che è molto probabile viste le dimensioni ridotte delle basi rispetto a quelle delle altezze.



### **CONSIDERAZIONI INIZIALI**

Tutte le simulazioni termoigrometriche riportate nel presente capitolo sono state svolte tramite il programma Termolog 13, distribuito da Logical Soft, con il supporto tecnico dello staff del laboratorio LAMSA del Politecnico di Torino.

#### Caratteristiche ambientali

I dati di input forniti al programma Termolog 13 per eseguire le simulazioni riguardano in primo luogo la localizzazione dell'edificio studiato.

Come si è scritto in precedenza il sito di costruzione del padiglione si trova nel comune di Grugliasco, in provincia di Torino.



Figura 72 Rielaborazione della mappa creata a maggio 2022 sul sito https://snazzymaps.com/

Localizzazione					
Comune	Grugliasco				
Provincia	Torino				
Latitudine	45° 3' 47'' N				
Longitudine	7° 35' 33'' E				
Altezza s.l.m.	293 m				
Dati climatici					
Zona climatica	E				
Gradi giorno	2.687				
Temperatura esterna di progetto	-8,3 °C				

I dati climatici di seguito riportati sono stati reperiti dalla banca dati del software Termolog 13 e fanno riferimento alla stazione di rilevamento Bauducchi (comune di Moncalieri, Torino), che dista circa 15 km dal sito di costruzione.

In particolare, la norma UNI 10349 fornisce per tutte le stazioni climatiche di rilevamento dei dati le temperature esterne e le irradiazioni diretta e diffusa sul piano orizzontale. Il dato di escursione termica giornaliera della temperatura esterna è fornito dall'appendice G della norma UNI TS 11300 parte 4. Infine, le temperature esterne medie mensili per il comune di Grugliasco sono ricavate in riferimento all'altitudine del sito.

	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic
T <sub>e</sub> [°C]	0,9	2,8	8,0	11,6	17,7	21,8	23,3	22,3	18,8	12,0	6,5	2,3
H <sub>bh</sub> [MJ/m²]	2,2	3,9	6,8	9,9	11,4	13,7	15,2	12,6	8,6	4,7	2,0	1,9
H <sub>dh</sub> [MJ/m²]	2,4	3,8	4,9	6,1	8,3	9,1	8,8	7,5	6,0	4,2	2,8	2,0
P <sub>e</sub> [Pa]	544,5	601,7	863,8	908,3	1319,2	1573,4	1542,4	1950,3	1614,8	1148,6	899,9	637,9
φ <sub>e</sub> [%]	84	81	81	66	65	60	54	72	74	82	93	88
Δθ [°C]	5,6	6,8	7,7	8,3	8,8	9,2	9,4	8,9	8,3	6,9	5,5	5,1

T<sub>e</sub> [°C] Valore mensile della temperatura media giornaliera dell'aria esterna

H<sub>bh</sub> [MJ/m²] Irradiazione solare giornaliera media mensile diretta su piano orizzontale

 $H_{dh} \left[ MJ/m^2 \right]$  Irradiazione solare giornaliera media mensile diffusa su piano orizzontale

P<sub>e</sub> [Pa] Valore medio mensile della pressione parziale del vapor d'acqua dell'aria esterna

φ<sub>e</sub> [%] Umidità relativa esterna

Δθ [°C] Escursione media giornaliera della temperatura esterna

Tabella 16 Dati climatici per il comune di Grugliasco (Torino)

#### Caratteristiche del padiglione

Per eseguire le verifiche termoigrometriche, è stato ipotizzato che il padiglione fosse un locale riscaldato con temperatura interna di progetto pari a 20 °C. Per il periodo di riscaldamento sono stati considerati convenzionalmente i mesi da aprile a ottobre.

È stata considerata una classe di concentrazione pari a 1, che si riferisce a "edifici non occupati e magazzini per stoccaggio di materiale secco" (norma UNI 13788).

Infatti, se per i calcoli strutturali il padiglione è stato considerato come un ambiente aperto al pubblico a favore di sicurezza, per le simulazioni termoigrometriche si è voluto rappresentare una situazione il più verosimile possibile, perché questi dati dovranno essere confrontati con i dati ottenuti dalle misurazioni sul campo.

Di seguito vengono riportati, anche graficamente, i dati geometrici del padiglione forniti in input al software.

Dati dimensionali	
Superficie lorda di pavimento	$40.70 \text{ m}^2$
Superficie utile di pavimento	$28.16 \text{ m}^2$
Altezza lorda	3.82 m
Altezza netta	3.01 m
Superficie lorda disperdente	$182.40 \text{ m}^2$
Volume lordo riscaldato	$155.47 \text{ m}^3$
Fattore di forma	1.17 m <sup>-1</sup>

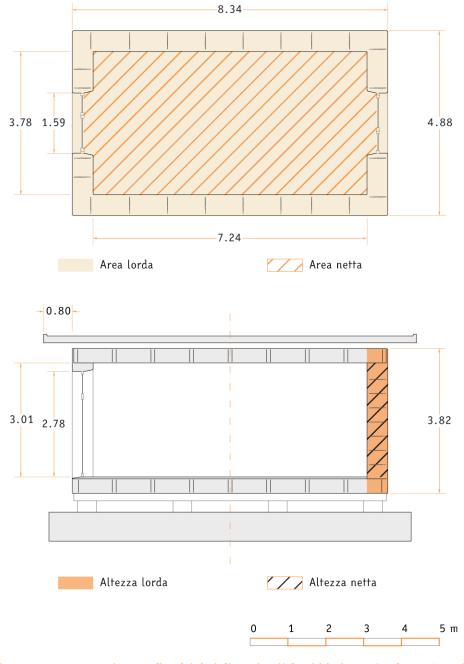


Figura 73 Rappresentazione grafica dei dati dimensionali forniti in input al software Termolog 13

## SIMULAZIONI TERMOIGROMETRICHE DEGLI ELEMENTI DISPERDENTI

Di seguito sono esposti i dati ottenuti dalle simulazioni svolte su ciascun elemento disperdente e in Figura 74 si riportano i codici assegnati alle stratigrafie studiate.

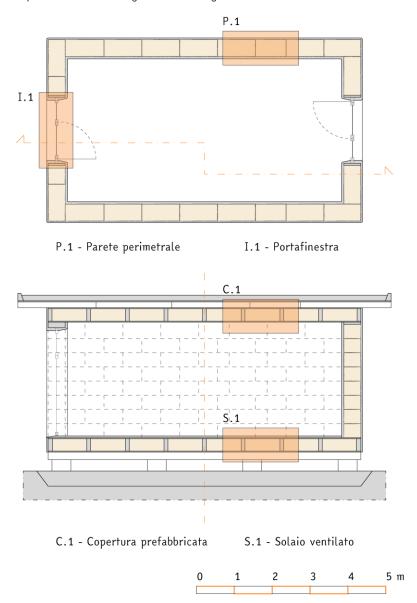


Figura 74 Codifica delle superfici disperdenti del padiglione

# Involucro trasparente - Portafinestra I.1

La portafinestra I.1 è stata ipotizzata con un triplo vetro basso emissivo, un telaio in legno e un distanziatore metallico. Non ha né schermature, né oscuranti e la trasmittanza termica Uw calcolata dal software è pari a  $0.95~\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ .

# Involucro opaco - Copertura ventilata C.1

Essendo una copertura ventilata, per le simulazioni termoigrometriche è stata considerata esclusivamente la parte prefabbricata, ossia quella che separa l'ambiente interno dall'intercapedine di ventilazione.

Per svolgere i calcoli, alla stratigrafia è stato assegnato un verso di dispersione verso l'esterno verticale ascendente.

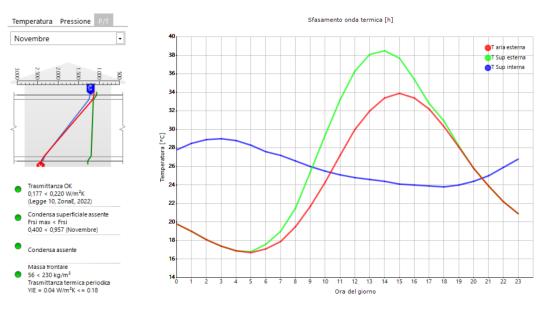
1 2 3

Figura 75 Stratigrafia della copertura prefabbricata. Codice C.1

		Spessore s	Massa volumica netta ρ	Fattore di resistenza al vapore µ	Calore specifico c	Conducibilità termica λ	Resistenza termica R
		[cm]	[kg / cm³]	[-]	[kJ / kg · °C]	[W / m · °C]	[m <sup>2</sup> · °C / W]
	Strato liminare interno						0,10
1	Tavolato in legno di abete	2,5	450	33,3	1,38	0,120	
2	Ballette di paglia	33,0	93	2,0	2,00	0,064	
3	Tavolato in legno di larice	2,5	610	44,4	2,40	0,180	
	Strato liminare esterno						0,04

Spessore totale s	Capacità termica areica interna k <sup>i</sup>	Trasmittanza termica U	Sfasamento ф
[cm]	[kJ / m² · K]	$[W/m^2 \cdot K]$	ore
38,0	21,33	0,177	12h 44'

Di seguito si riportano le verifiche di trasmittanza minima, condensa superficiale e interstiziale e massa frontale minima, accompagnate dal diagramma di Glaser del mese più critico e dal diagramma di sfasamento temporale.



# Involucro opaco - Parete perimetrale P.1

Per svolgere i calcoli, alla stratigrafia della parete è stato assegnato un verso di dispersione orizzontale uscente.

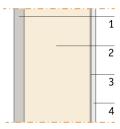
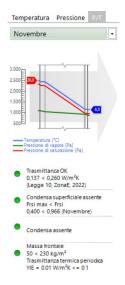


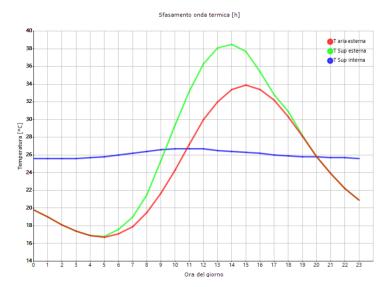
Figura 76 Stratigrafia della parete. Codice P.1

		Spessore s	Massa volumica netta ρ	Fattore di resistenza al vapore µ	Calore specifico c	Conducibilità termica λ	Resistenza termica R
		[cm]	[kg / cm <sup>3</sup> ]	[-]	[KJ / kg · °C]	[W / m · °C]	[m²·°C/W]
	Strato liminare interno						0,13
1	Intonaco a base di argilla	6,0	1.800	6,0	0,90	1,000	
2	Ballette di paglia di Riso di Nori	45,0	110	2,0	2,00	0,064	
3	Intonaco a base di argilla	1,0	1.800	6,0	0,90	1,000	
4	Intonaco a base di calce	3,0	1.600	10,0	0,85	0,700	
	Strato liminare esterno						0,04

Spessore totale s	Capacità termica areica interna k <sup>i</sup>	Trasmittanza termica U	Sfasamento ф
[cm]	[kJ / m <sup>2</sup> · K]	$[W/m^2 \cdot K]$	ore
55,0	65,7	0,137	20h 52'

Di seguito si riportano le verifiche di trasmittanza minima, condensa superficiale e interstiziale e massa frontale minima, accompagnate dal diagramma di Glaser del mese più critico e dal diagramma di sfasamento temporale.





# Involucro opaco - Solaio ventilato S.1

Come nel caso della copertura, essendo il solaio ventilato, per le simulazioni termoigrometriche è stata considerata esclusivamente la parte prefabbricata, che separa l'ambiente interno dall'intercapedine di ventilazione.

Per svolgere i calcoli, alla stratigrafia è stato assegnato un verso di dispersione verso l'esterno verticale discendente.

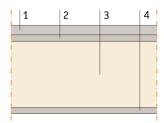
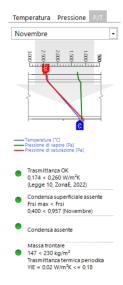


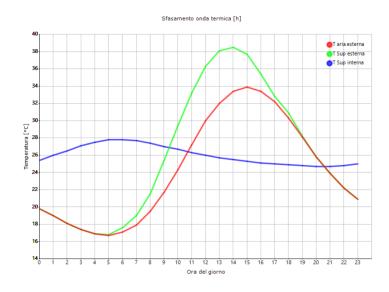
Figura 77 Stratigrafia del solaio. Codice S.1

		Spessore s	Massa volumica netta ρ	Fattore di resistenza al vapore µ	Calore specifico c	Conducibilità termica λ	Resistenza termica R
		[cm]	[kg / cm <sup>3</sup> ]	[-]	[J / kg · °C]	[W / m · °C]	[m <sup>2</sup> · °C / W]
	Strato liminare interno						0,17
1	Pavimento in battuto di cocciopesto	5,0	1.800	10,0	0,90	1,000	
2	Tavolato in legno di abete	2,5	450	33,3	1,38	0,120	
3	Ballette di paglia	33,0	93	2,0	2,00	0,064	
4	Tavolato in legno di larice	2,5	610	44,4	2,40	0,180	
	Strato liminare esterno						0,04

Spessore totale s	Capacità termica areica interna k <sup>i</sup>	Trasmittanza termica U	Sfasamento φ
[cm]	[kJ / m² · K]	$[W/m^2 \cdot K]$	ore
43,0	55,68	0,174	15h 49'

Di seguito si riportano le verifiche di trasmittanza minima, condensa superficiale e interstiziale e massa frontale minima, accompagnate dal diagramma di Glaser del mese più critico e dal diagramma di sfasamento temporale.





# STUDIO DEI PONTI TERMICI

Di seguito sono esposti i grafici ottenuti dallo studio dei ponti termici presenti nel padiglione e in Figura 78 si riportano i codici utilizzati.

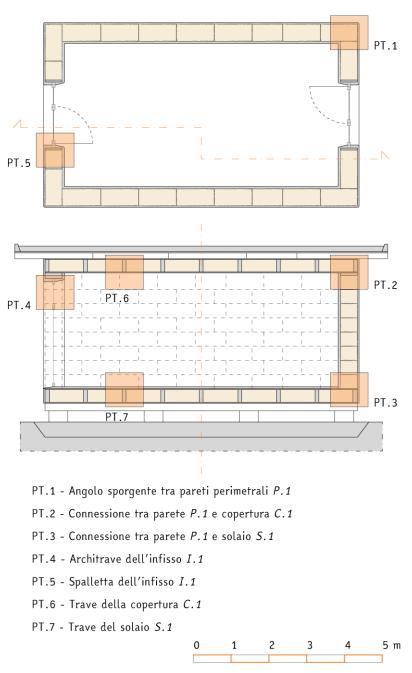
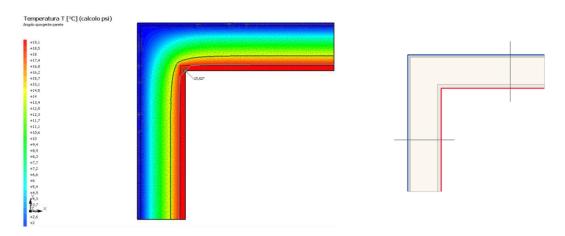


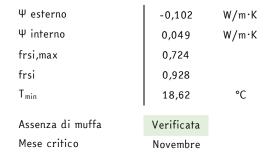
Figura 78 Codifica dei ponti termici del padiglione

# Ponte termico PT.1 - Angolo sporgente tra pareti perimetrali P.1

Nelle figure sottostanti si presentano il grafico delle temperature e il disegno della struttura su cui si sono eseguite le verifiche.

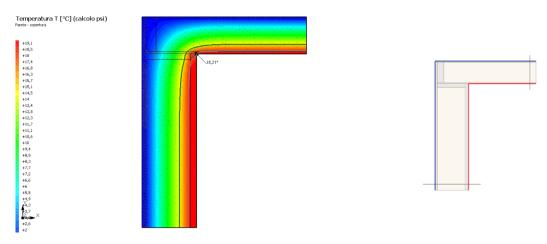


I principali valori calcolati tramite il programma sono:



## Ponte termico PT.2 - Connessione tra parete P.1 e copertura C.1

Nelle figure sottostanti si presentano il grafico delle temperature e il disegno della struttura su cui si sono eseguite le verifiche.

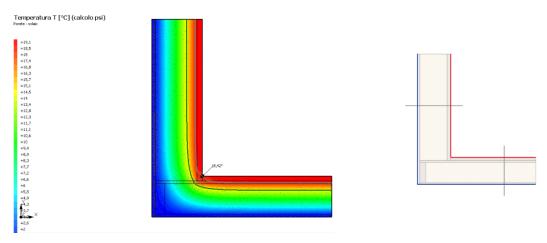


I principali valori calcolati tramite il programma sono:

Ψ esterno	-0,095	W/m·K
Ψinterno	0,053	W/m·K
frsi,max	0,724	
frsi	0,906	
$T_{min}$	18,21	°C
Assenza di muffa	Verificata	
Mese critico	Novembre	

# Ponte termico PT.3 - Connessione tra parete P.1 e solaio S.1

Nelle figure sottostanti si presentano il grafico delle temperature e il disegno della struttura su cui si sono eseguite le verifiche.

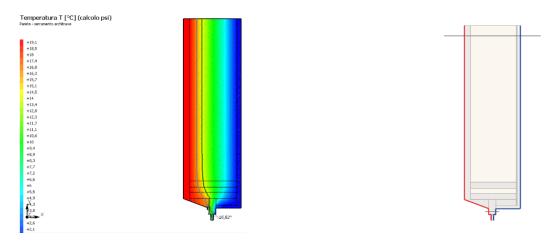


I principali valori calcolati tramite il programma sono:

Ψ esterno	-0,098	W/m·K
Ψ interno	0,055	W/m·K
frsi,max	0,724	
frsi	0,917	
$T_{min}$	18,42	°C
Assenza di muffa	Verificata	
Mese critico	Novembre	

### Ponte termico PT.4 - Architrave dell'infisso I.1

Nelle figure sottostanti si presentano il grafico delle temperature e il disegno della struttura su cui si sono eseguite le verifiche.

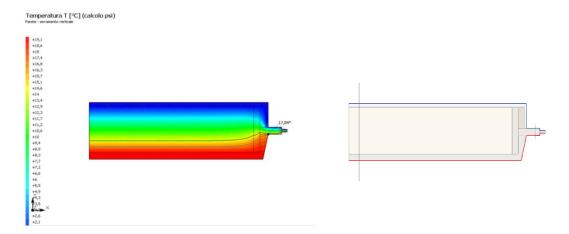


I principali valori calcolati tramite il programma sono:

Ψ esterno	0,193	W/m·K
Ψinterno	0,206	W/m·K
frsi,max	0,724	
frsi	0,834	
$T_{min}$	16,82	°C
Assenza di muffa	Verificata	
Mese critico	Novembre	

# Ponte termico PT.5 - Spalletta dell'infisso I.1

Nelle figure sottostanti si presentano il grafico delle temperature e il disegno della struttura su cui si sono eseguite le verifiche.

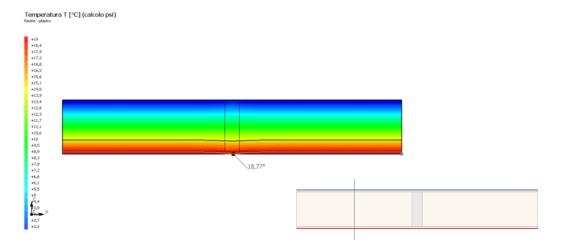


I principali valori calcolati tramite il programma sono:

Ψ esterno	0,171	W/m·K
Ψ interno	0,177	W/m·K
frsi,max	0,724	
frsi	0,845	
$T_{min}$	17,04	°C
Assenza di muffa	Verificata	
Mese critico	Novembre	

# Ponte termico PT.6 - Trave della copertura C.1

Nelle figure sottostanti si presentano il grafico delle temperature e il disegno della struttura su cui si sono eseguite le verifiche.

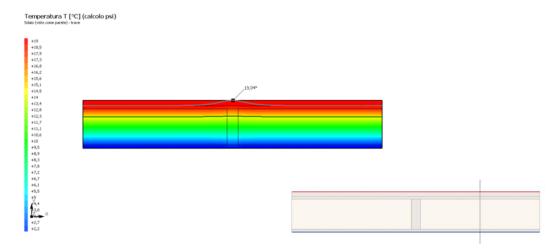


I principali valori calcolati tramite il programma sono:

Ψ esterno	0,013	W/m·K
Ψinterno	0,013	W/m·K
frsi,max	0,724	
frsi	0,936	
$T_{min}$	18,77	°C
Assenza di muffa	Verificata	
Mese critico	Novembre	

#### Ponte termico PT.7 - Trave del solaio S.1

Nelle figure sottostanti si presentano il grafico delle temperature e il disegno della struttura su cui si sono esequite le verifiche.



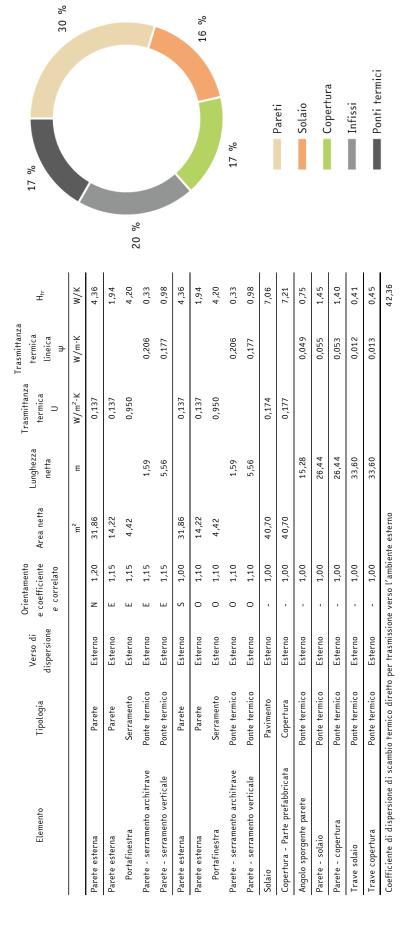
I principali valori calcolati tramite il programma sono:

Ψ esterno	0,012	W/m·K
Ψinterno	0,012	W/m·K
frsi,max	0,724	
frsi	0,95	
$T_{min}$	19,04	°C
Assenza di muffa	Verificata	
Assenza ur morra	verificata	
Mese critico	Novembre	

#### COEFFICIENTE GLOBALE DI SCAMBIO TERMICO PER TRASMISSIONE

Il padiglione disperde energia termica solamente verso l'esterno, perché non confina né con altri ambienti, né con il terreno, dato che il solaio è ventilato.

Di seguito si riporta una tabella riassuntiva con le dispersioni di scambio termico diretto per trasmissione del padiglione verso l'ambiente esterno e un grafico che permette di valutare l'impatto percentuale delle dispersioni delle pareti, del solaio, della copertura, degli infissi ipotizzati e quelle causate dai ponti termici.



## MISURAZIONI SUL CAMPO E IN LABORATORIO

Come già accennato precedentemente, uno degli obiettivi di questo progetto di ricerca è quello di confrontare le simulazioni fisico-tecniche presentate in questa tesi di laurea, con i corrispondenti dati rilevati sul campo o ottenuti in laboratorio.

Di seguito si presenta una tabella dove vengono riassunte tutte le possibili misurazioni, il campione specifico da studiare, la strumentazione necessaria e se questa deve essere acquistata o meno. Per la maggior parte dei monitoraggi il supporto tecnico e metodologico sarà gentilmente fornito dallo staff del laboratorio LASMA del Politecnico di Torino.

Successivamente sono esposti degli elaborati grafici che permettono di individuare approssimativamente il posizionamento delle sonde per il monitoraggio continuo di temperatura e umidità interne alle pareti, citato ai punti 5-9 di Tabella 17. Quello indicato sarebbe il numero di sonde ideale per ottenere un monitoraggio termoigrometrico completo, bisognerà però valutare in fare di acquisto quanto budget sarà possibile dedicare alle sonde embedded.

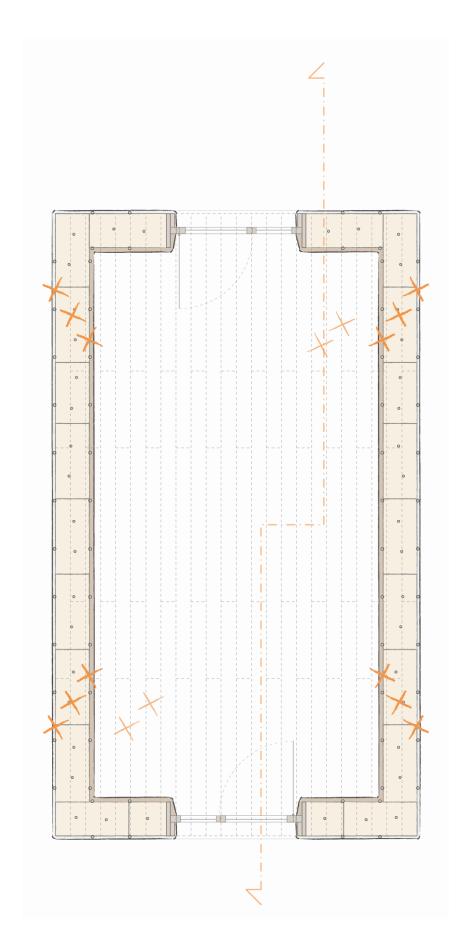
	Densità lorda							
9 9		Balletta	Misurazione spot (singola)	Prima del cantiere	Bilancia	ON		LaSTIn
e _ e	Temperatura e RH	Balletta	Misurazione spot (singola)	Prima del cantiere	Prove gravimetriche o termoigrometro a penetrazione	IS / ON		Se prove gravimetriche non ci sono attrezzature nuove da acquistare, altrimenti è da valutare l'acquisto di una sonda a penetrazione ad ago
<del>_</del> e	Temperatura e RH	Ambiente esterno	Monitoraggio continuo	Dall'inizio del cantiere	Termoigrometro con datalogger	ON		LASMA hanno datalogger per temperatura e umidità, più le relative protezioni per lasciarli all'esterno. Da capire per quanto tempo sono disponibili a prestarceli
	Temperatura e RH	Ambiente interno	Monitoraggio continuo	Dall'inizio del cantiere	Termoigrometro con datalogger	O <sub>N</sub>		LASMA hanno datalogger per temperatura e umidità. Da capire per quanto tempo sono disponibili a prestarceli
e_	Temperatura e RH	Interfaccia paglia parete - intonaco esterno	Monitoraggio continuo	Dall'inizio del cantiere	Sonde termoigrometriche con datalogger	IS	o o	
Te	Temperatura e RH	Interno parete	Monitoraggio continuo	Dall'inizio del cantiere	Sonde termoigrometriche con datalogger	IS	∞	LASMA ci può dare supporto tecnico e metodologico, ci può
T <sub>e</sub>	I Temperatura e RH	Interfaccia paglia parete - intonaco interno	Monitoraggio continuo	Dall'inizio del cantiere	Sonde termoigrometriche con datalogger	SI	∞	aiutare nella scelta e nell'acquisto. Comunque sostengono che l'unico metodo veramente sicuro per
Te	Temperatura e RH	Interfaccia paglia orizzontamenti - tavolato esterno	Monitoraggio continuo	Dall'inizio del cantiere	Sonde termoigrometriche con datalogger	SI	4	valutare umidita sia tare dei carotaggi periodici ed eseguire prove gravimetriche. I metodi elettrici resistivi asciugano l'ambiente attorno alle sonde, quindi bisogna fare delle considerazioni e dei concenianti aminitamenti dei dati ottennti i
Te	Temperatura e RH	Interfaccia paglia orizzontamenti - tavolato interno	Monitoraggio continuo	Dall'inizio del cantiere	Sonde termoigrometriche con datalogger	IS	4	
Dis per uter	Distribuzione della temperatura e dell'umidità interne / temperatura media radiante	Ambiente interno	Misurazioni spot (più campagne)	Periodo di utilizzo del padiglione	Globotermometro e igrometro con datalogger	ON		LASMA  Hanno due centraline. Si crea una mappatura a griglia tridimensionale di temperatura e umidità. Si potrebbe valutare scambio calore per irraggiamento.  Da capire per quanto tempo sono disponibili a prestarcele.
Ra	Radiazione solare	Quattro esposizioni delle pareti esterne	Monitoraggio continuo	Periodo di utilizzo del padiglione	Solarimetro	SI		Molto probabilmente non vale la pena comprarli, ci si potrà
_	Carico pioggia	Sito di costruzione	Monitoraggio continuo	Periodo di utilizzo del padiglione	Pluviometro	SI		appoggiare ai dati di AKFA Flemonte.
j.	Direzione del vento	Sito di costruzione	Monitoraggio continuo	Periodo di utilizzo del padiglione	Anemometro	SI		LASMA na un piccolo solarimetro, ma si dovreboe comunque comprare un datalogger
du	Tempo di apertura degli infissi	Ambiente interno	Monitoraggio continuo	Periodo di utilizzo del padiglione	Registro cartaceo	SI		
	Occupazione	Ambiente interno	Monitoraggio continuo	Periodo di utilizzo del padiglione	Registro cartaceo	SI		

16	Concentrazione in aria di CO <sub>2</sub>	Ambiente interno	Misurazioni spot (più campagne)	Periodo di utilizzo del padiglione		ON	LASMA ha due acquisitori per rilevare ${\sf CO}_2$ . Si potrebbe provare a contattare anche Stefano Ferraris, Corrado
17	Concentrazione in aria di formaldeide	Ambiente interno	Misurazioni spot (più campagne)	Periodo di ufilizzo del padiglione		ON	Carbonaro o Roberto Giordano. Oppure Marco Piras per il laboratorio mobile CC-moving-LAB.
18	Concentrazione in aria di TVOCs	Ambiente interno	Misurazioni spot (più campagne)	Periodo di utilizzo del padiglione		ON	Attenzione al range degli strumenti e se sono per ambienti interni o esterni.
19	Consumo elettrico	Ambiente interno	Monitoraggio continuo	Periodo di utilizzo del padiglione	Contatore elettrico monodirezionale o bidirezionale se c'è impianto fotovoltaico	IS	
20	Analisi termografica a infrarossi	Padiglione	Misurazioni spot (più campagne)	Periodo di utilizzo del padiglione	Termocamera ad infrarossi	ON	LASMA ha tutto occorrente per fare un padiglione alla volta, quindi importante registrare bene le condizioni termoigrometriche ambientali durante le aquisizioni per poi poter confrontare i
21	Trasmittanza termica in opera (analisi termoflussimetrica)	Padiglione	Misurazioni spot (più campagne)	Periodo di utilizzo del padiglione	Sistema termoflussimetrico	NO	risultati. Monitoraggio da novembre in poi. <sup>2</sup>
22	Reazione al fuoco	Balletta e balletta intonacata	Misurazione spot (singola)	•			
23	Prove strutturali sulla deformazione e sugli assestamenti progressivi delle pareti di paglia	Ambiente interno	Misurazioni spot (più campagne)	Dall'inizio del cantiere	Metro laser con scheda per annotare valori misurati	ON	LaSTIn

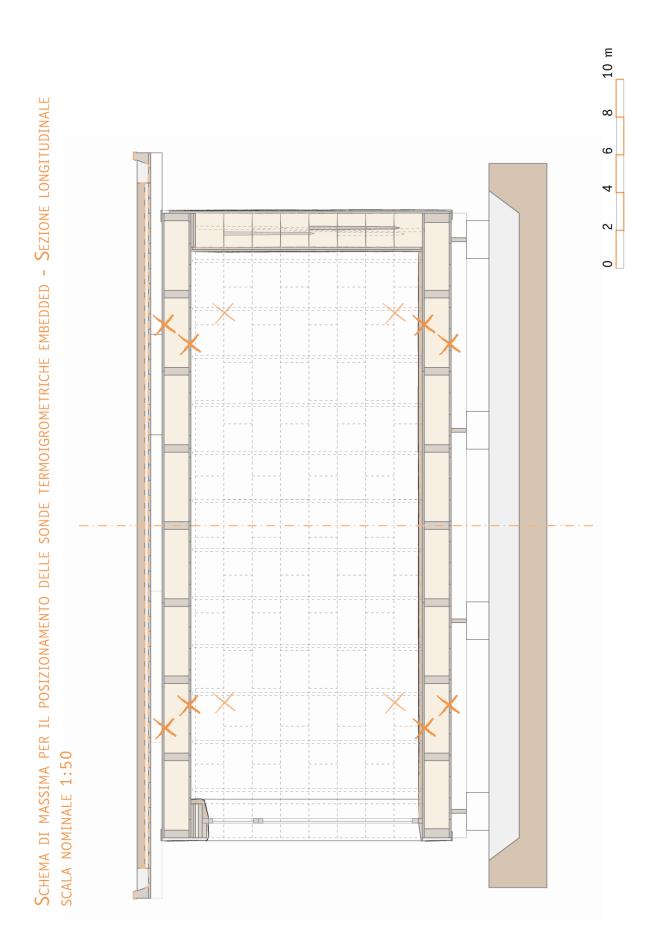
2 Prove da Fare in inverno, perché serve un 🏕 🔁 10 °C. Ambiente interno andrà scaldato con stufetta elettrica o (meglio) a olio. La fonte di calore andrà schermata così da bloccare scambio di calore convettivo e per irraggiamento con sonde. Schermo potrebbe essere del cartone, un pannello termoriflettente o una paretina in mattoni crudi. Per fare queste analisi il padiglione deve essere collegato alla corrente elettrica. 1 Si può considerare di impiegare il metodo 'Aqua Boy'. Ma sarebbero solo misurazioni a spot e superficiali (o comunque a profondità molto ridotte)

Tabella 17 Insieme delle possibili misurazioni fisico-tecniche che potrebbero essere fatte sul campo o in laboratorio su campioni di materiale

Schema di massima per il posizionamento delle sonde termoigrometriche embedded - Pianta SCALA NOMINALE 1:50









Nel paragrafo *Terza scelta: la morfologia della pianta* sono state fatte delle considerazioni in merito all'illuminamento naturale del padiglione. Nel presente capitolo si riportano le quattro diverse morfologie studiate per la pianta del padiglione in falsi colori, calcolate utilizzando il software open source Velux Daylight Visualizer 3 e i relativi valori medi del fattore medio di luce diurna e dell'illuminamento.

Le condizioni imposte al programma per svolgere i calcoli sono state le sequenti:

- localizzazione a Gruqliasco (latitudine 45,063 Nord longitudine 7,593 Est)
- cielo coperto;
- superficie di calcolo a 85 cm da terra e 50 cm dal perimetro del locale.

Riassumendo, le opzioni valutate al paragrafo precedentemente citato sono:

- P1: pareti costruite impiegando balle jumbo con aperture sui lati corti del padiglione;
- P2: pareti costruite impiegando balle jumbo con un'unica apertura sulla facciata esposta a Sud;
- P3: pareti costruite impiegando ballette di piccole dimensioni con aperture sui lati corti del padiglione;
- P4: pareti costruite impiegando ballette di piccole dimensioni con un'unica apertura sulla facciata esposta a Sud.

## FATTORE DI LUCE DIURNA FLD

Tutte le opzioni studiate soddisfano la condizione minima che impone un fattore medio di luce diurna FLDm maggiore o uguale del 2%. In particolare, i valori ottenuti sono pari a:

- 5,74% (opzione P1);
- 5,30% (opzione P2);
- 2,85% (opzione P3);
- 4,22% (opzione P4).

Come già anticipato, di seguito vengono riportate le quattro opzioni di pianta in falsi colori che permettono di valutare la distribuzione del fattore di luce diurna sulla superficie di calcolo considerata.

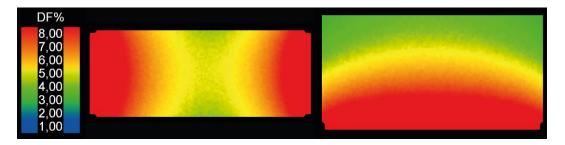


Figura 79 Distribuzione del FLD per l'opzione P1 (sinistra) e P2 (destra)

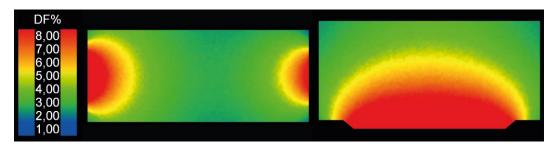


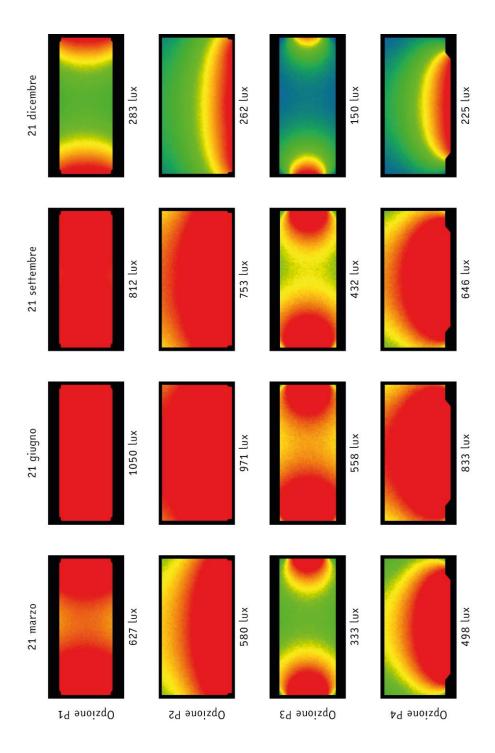
Figura 80 Distribuzione del FLD per l'opzione P3 (sinistra) e P4 (destra)

# **ILLUMINAMENTO NATURALE**

Di seguito si presenta uno schema che permette di confrontare l'illuminamento naturale delle diverse opzioni in quattro momenti dell'anno:

- alle ore 9.00 del 21 marzo;
- alle ore 9.00 del 21 giugno;
- alle ore 9.00 del 21 settembre;
- alle ore 9.00 del 21 dicembre.







### **CRONOPROGRAMMA**

Per organizzare i workshop didattici di costruzione del padiglione e gestire più squadre che lavorano contemporaneamente a diverse mansioni, la realizzazione del padiglione è stata strutturata in un cronoprogramma suddiviso in 5 fasi, ognuna delle quali è a sua volta frazionata in più passaggi. Il cronoprogramma viene riportato nell'allegato 1.

Questo programma potrebbe essere stampato e appeso in cantiere, così che i lavori da svolgere e gli obiettivi da raggiungere siano condivisi e discussi tra tutto il gruppo in un momento di briefing prima di iniziare la giornata. Ciascuna squadra una volta terminato il lavoro che stava svolgendo potrà barrare la casella corrispondente del cronoprogramma, così da fare il punto della situazione ed eventualmente aggiornare il programma dei lavori dei giorni successivi. Questo potrebbe incentivare la soddisfazione del gruppo e aumentare la consapevolezza del lavoro svolto.

Le squadre di lavoro sono state ipotizzate composte da quattro persone e più precisamente da due coppie di studenti, così che nessuno debba mai lavorare da solo. Questo dovrebbe favorire un'esperienza di crescita professionale e personale e uno scambio positivo. I partecipanti al workshop avranno attitudini e livelli di esperienza diversi, si potranno scambiare suggerimenti o metodi di lavoro e anche il semplice dialogo con persone - magari fino ad allora sconosciute - potrà giovare in primo luogo allo studente, ma anche all'ambiente di lavoro stesso. Tutto ciò si amplificherà se le squadre si mescoleranno di giorno in qiorno.

Le operazioni del cronoprogramma evidenziate in arancione - come la fase 2.B ripresa in Figura 81 - contengono lavori che potrebbero essere svolti anche precedentemente rispetto quanto indicato nel cronoprogramma. Se una squadra dovesse quindi risultare scarica, potrebbe consultare in autonomia il programma e procedere con le suddette operazioni.

Le linee arancioni che collegano verticalmente le fasi le une alle altre - come nel caso della fase 2.D di Figura 81 - indicano che quando una determinata operazione è conclusa, la sottostante può avere inizio. Nel caso esemplificativo di seguito riportato, la fase E 'Costruire box infissi e fissarli al solaio' deve avvenire necessariamente quando il solaio è terminato e non può essere procrastinata, altrimenti bloccherebbe le fasi successive. La fase D invece, riguardante la costruzione della porzione di copertura prefabbricata, può essere avviata nel momento in cui la scatola prefabbricata del solaio è stata posizionata sulle travi d'appoggio delle fondazioni e quindi lo spazio di lavoro è stato liberato, ma può anche essere svolta successivamente.

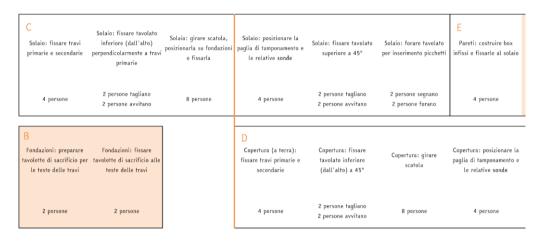


Figura 81 Estratto del cronoprogramma presentato nell'allegato 1

Nel cronoprogramma vengono segnalate le fasi in cui è necessaria la presenza di un professionista esterno (come nel caso della posa dei serramenti nella fase 5.V) o è indispensabile l'utilizzo di macchinari da noleggiare come il costipatore per la fase 1.A.

Alcune annotazioni riquardo le tempistiche:

- lo scavo di fondazione della fase 1.A sarebbe bene fosse terminato per il giorno in cui la ditta di trasporti consegna lo stabilizzato in cantiere. In questo modo il dipendente incaricato potrebbe scaricare il materiale direttamente nello scavo;
- per iniziare la fase 3 sarebbe opportuno che l'assestamento delle ballette avesse oltrepassato la fase acuta e che fosse quindi trascorsa almeno una settimana (per queste valutazioni avvalersi dei dati registrati nella scheda 1 riportata di seguito);
- per le tempistiche della fase 4.T attenersi a quanto indicato nel capitolo 4 riguardante gli intonaci;
- solo nel momento in cui gli infissi verranno installati (fase 5.V) i dati raccolti dalle sonde embedded acquisteranno rilevanza. Inoltre, solo in quel momento il padiglione potrà essere riscaldato e preparato per le campagne di misurazioni spot per l'analisi termografica a infrarossi e l'analisi termoflussimetrica.

#### LISTA DELLE ATTREZZATURE

Per un'organizzazione del cantiere più efficiente è stata preparata anche una lista delle attrezzature necessarie per ogni fase presentata nel cronoprogramma (vedi allegato 2).

Per ciascuna attrezzatura vengono riportati la fase specifica di utilizzo - a meno che non serva per l'intera durata del cantiere -, lo scopo, la quantità necessaria e se è da acquistare, da noleggiare o da chiedere in prestito a un laboratorio del Politecnico di Torino, che eventualmente viene segnalato a lato.

#### RICHIESTE DI PREVENTIVO PER GLI ELEMENTI DI LEGNO

Per quanto riguarda la fornitura degli elementi di legno sono state contattate 13 aziende piemontesi. Per gestire questa importante mole di dati e poterla condividere tra le diverse persone coinvolte nel progetto di ricerca, è stato utilizzato il software gestionale open source Trello.

Qui per ciascuna azienda sono stati appuntati: link del sito internet, e-mail e/o contatto telefonico, comune della sede operativa ed eventualmente il professore, l'artigiano o l'azienda che ha consigliato di contattare la specifica ditta. Il prof. Andrea Bocco, per esempio, ha suggerito di coinvolgere la Segheria Valle Sacra, mentre la società F.lli Perassi - a cui inizialmente era stata inviata la richiesta di preventivo - ha consigliato di contattare il Gruppo PEFC del Pinerolese che gestisce legname a filiera corta e che quindi avrebbe potuto soddisfare meglio le nostre esigenze.

Successivamente per ogni azienda contattata sono stati annotati tutti gli sviluppi della trattativa e in Figura 82 si riporta un estratto della scheda di Trello.

Le informazioni registrate sono state: interesse o meno per il progetto, eventuali richieste specifiche<sup>46</sup>, proposta di una visita in segheria o di una videochiamata di chiarimento, tipologia di legname trattato e rispettiva provenienza, l'eventuale necessità di sollecitare una risposta, ecc.

Questa organizzazione ha permesso di avere tutte le informazioni sempre aggiornate e accessibili a tutti.

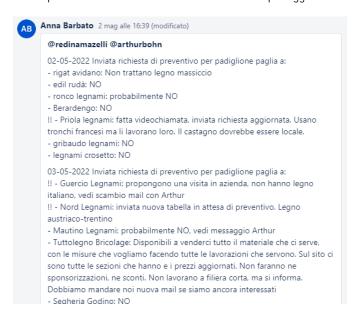


Figura 82 Estratto della scheda del software Trello riguardante le richieste di preventivo inviate e l'evolversi di ciascuna trattativa

In conclusione, abbiamo ricevuto due preventivi per gli elementi che secondo il progetto devono essere in legno di larice<sup>47</sup> dalla Segheria Valle Sacra di Castellamonte (TO) e dalla Segheria Legnami Priola di Carrù (CN), che è l'unica azienda che ha inviato anche un preventivo per gli elementi in legno di abete.

Nell'allegato 3 si riporta come esempio la richiesta di preventivo inviata alla Segheria Legnami Priola. Questa è suddivisa in tre parti: la prima sezione riguarda tavole segate grezze; la seconda travi 4 fili segate grezze e travi uso Fiume e include anche un'immagine esplicativa inviata come allegato alla richiesta di preventivo; l'ultima parte contiene i pannelli in legno lamellare di abete.

Per non sovradimensionare eccessivamente la travatura sono stati aumentati gli interassi - sono state ipotizzate due ballette tra ciascuna coppia di travi primarie anziché una - e di conseguenza anche lo spessore del tavolato inferiore di solaio e copertura è aumentato, perché la sua luce era maggiore rispetto a quanto progettato inizialmente. Tutte queste modifiche hanno anche causato una modifica delle dimensioni complessive del padiglione e quindi un aumento dell'estensione di tavolato necessaria.

<sup>&</sup>lt;sup>46</sup> L'azienda Nord Legnami di San Mauro Torinese, per esempio, aveva richiesto grosse modifiche alle dimensioni delle sezioni delle travi principali e secondarie di solaio e copertura, che avrebbero dovuto avere una sezione 30x30 cm. Questo ha imposto di rivedere completamente il progetto del padiglione elaborato fino ad allora per poter inviare una richiesta di preventivo congrua alla loro offerta.

<sup>&</sup>lt;sup>47</sup> Inizialmente era stato scelto il legno di larice per gli elementi esposti all'ambiente esterno perché, sebbene più durevole rispetto al legno di abete, è più economico di altre specie di legno adatte a tale destinazione d'uso - come, per esempio, il castagno e il frassino.

Dopo aver contattato vari falegnami esperti del settore, però, si è compreso che il larice è attualmente difficile da reperire nei boschi piemontesi, che invece sono ricchi di latifoglie. Volendo lavorare il più possibile a filiera corta, si è quindi proposto il legno di castagno come alternativa.

A seguire sono presentati i disegni attraverso i quali sono state calcolate le lunghezze delle tavole di tipo 1, 2 e 3, dei travetti di ventilazione e dei pannelli che formeranno il doppio strato del cordolo superiore.

Per quanto riguarda la lunghezza delle tavole 1, 2 e 3, inizialmente la richiesta di preventivo considerava solamente delle lunghezze commerciali di 400 cm. È stato il signor Mario Priola, proprietario della segheria, a richiedere un dettaglio delle dimensioni reali necessarie.

Infatti, le tavole di abete commercializzate dalla grande distribuzione solitamente vengono vendute con questa lunghezza standard, ma dato che il legno di larice viene lavorato direttamente dalla segheria Legnami Priola a partire dai tronchi, delle misure più dettagliate permettono di avere meno scarto e ottimizzare il volume complessivo di legno dei tronchi.

#### SCHEDE PER LA COSTRUZIONE E PER LE MISURAZIONI SUL CAMPO

Con l'obbiettivo di facilitare la costruzione del padiglione e il monitoraggio di alcune caratteristiche, sono state preparate alcune schede qui elencate e riportate di seguito all'allegato 3.

Scheda 1 - Quote utili per forare il tavolato superiore del solaio e il cordolo soprastante le pareti

Scheda 2 - Monitoraggio dell'altezza interna netta del padiglione durante il periodo di assestamento delle ballette di paglia portanti

Scheda 3 - Monitoraggio dell'altezza interna netta del padiglione durante la vita utile del padiglione

ASF 1

_		
rno	Posa delle fravi di fondazione	4 persone
1 giorno	Posa delle pietre di fondazione	Operaio esperto con autogrù
1 giorno	Costipazione dello stabilizzato	1 persona a turno con costipatore
5 giorni	Posa dello stabilizzato	Operaio esperto con escavatore
5 gi	Scavo di fondazione	Operaio esperto con escavatore
	A	

Allegato 1

FASE 2

C						ш	LL	g
	Solaio: fissare tavolato							
Solaio: fissare travi	inferiore (dall'alto)	Solalo: girare scalola,	Solato: posizionare la	Solaio: fissare tavolato	Solaio: forare tavolato	Pareti: costruire box	Pareti: preparare tutti i	Pareti: fissare picchetti
primarie e secondarie	perpendicolarmente a	posizionarla su fondazioni paglia di famponamento e	paglia di tamponamento e	superiore a 45°	per inserimento picchetti	infissi e fissarle al solaio	picchetti	per il primo corso
	travi primarie	e fissarla	le relative sonde					
								11-11-11-11-11-11-11-11-11-11-11-11-11-
	2 persone tagliano		,	2 persone tagliano	2 persone segnano			z + z persone (Turn dano
4 persone	2 persone avvitano	8 persone	4 persone	2 persone avvitano	2 persone forano	4 persone	4 persone	stesso lato partendo dalle
								estremità)
a			-					
2			U -				li on the contract of	
Fondazioni: preparare	Fondazioni: fissare		Copertura (a terra):	Copertura: fissare	ومرمزي ، دمانالمومدور)	Copertura: posizionare la	taxolato cimoriozo	
tavolette di sacrificio per tavolette di sacrificio alle	tavolette di sacrificio alle	G)	fissare travi primarie e	tavolato inferiore	coperiora, guare	paglia di tamponamento e	navotato superiore	
le teste delle travi	teste delle travi		secondarie	(dall'alto) a 45°	stalota	le relative sonde	perpendicularimente ane	
							navi primarie	
				oneilnet anostan C			2 norcone tanliano	
2+ persone	2+ persone		4 persone	2 nersone avvitano	8 persone	4 persone	2 nersone avvitano	
				2010010010010010010010010010010010010010			c persone avenano	
		,						
			Total	Totale presenze ipotizzate: 8 persone	rsone			

Parefi: posizionare balle Montare due ponteggi dal primo al terzo corso all'interno del padiglione su lato Nord (picchetti (alle estremità del lato solo sul terzo corso) e le Nord)	Parete: posizionare balle dal quarto all'ottavo corso sul lato Nord del padiglione (picchetti fino al settimo corso) e le relative sonde				
2+2 persone (tutti dallo stesso lato partendo dalle 4 persone estremità)	2+2 persone (tutti dallo stesso lato partendo dalle estremità)				
	Pareti: posizionare balle dal primo al terzo corso su lato Sud (picchetti solo sult terzo corso) e le relative sonde	Spostare ponteggio sul Lato Sud del padiglione	Parete: posizionare balle dal quarto all'ottavo corso sul lato Sud del padiglione (picchetri fino al settimo corso) e le relative sonde	Posizionare ponteggi su due vertici	Parete: posizionare il doppio strato del cordolo sull'utimo corso, forarlo e fissarlo con i picchetti
	2+2 persone (tutti dallo stesso lato partendo dalle estremità)	4 persone	2+2 persone (tutti dallo stesso lato partendo dalle estremità)	8 persone	4 persone (partendo da vertici)
	Totale	Totale presenze ipotizzate: 8 persone	rsone		

			1 giorno			
M Copertura: posizionare blocco prefabbricato su ring beam	OTNAMAT2322A O	Copertura: fissare internamente blocco prefabbricato a ring beam	Intonaci: coprire piastre di collegamento interne ring beam - copertura con impermeabilizzante	Portare fuori i due ponteggi	Copertura: fissare esternamente blocco prefabbricato a ring beam	Intonaci: coprire piastre di collegamento esterne ring beam - copertura con impermeabilizzante
Autogrù	IZINI	2+2 persone	2 persone	4 persone	2+2 persone	2 persone
			Totale presenze ipotizzate: 4 persone	4 persone		

ASE 3

				2 giorni				
N Copertura: fissare travetti di ventilazione	Copertura: fissare tavolato del pacchetto verde su travetti di ventilazione (potrebbe servire ponteggio per fissare tavole su sbalzo)	Copertura: fissare travi di contenimento pacchetto verde e forarle per drenaggio acqua piovana	Copertura: posare membrana impermeabile antiradice e installare griglie e doccioni	Copertura: stendere strato drenante	Copertura: posare membrana filtrante	Copertura: stendere strato colturale, finire perimetro drenante e bagnare il pacchetto verde	Copertura: fissare scossalina su travi contenimento	Copertura: semira erba e altre specie adatte per inverdimento estensivo
2+2 persone (distrubuite omogeneamente Monitorare assestamento)	2+2 persone (distrubuite a persone (distrubuite omogeneamente omogeneamente Monitorare assestamento )	2+2 persone (distrubuite 4 persone (distrubuite 0 distrubuite 0 distrubuite 0 distrubuite 0 omogeneamente 0 omogeneamente 0 monitorare assestamento) Monitorare assestamento) Monitorare assestamento) Monitorare assestamento)	4 persone (distrubuite omogeneamente Monitorare assestamento)	Autogrù	4 persone (distrubuite omogeneamente Monitorare assestamento)	Autogrù	4 persone (distrubuite omogeneamente Monitorare assestamento)	2 persone
	Intonaci: appendere re Intonaci: intingere rete di di juta ai travetti di juta nel caglio e stenderia ventilazione (quando n a terra su telo di plastica gocciola più eccessivamente)	Intonaci: appendere rete Intonaci: preparare e Intonaci: intingere rete di di juta ai travetti di fissare tavolette di juta nel caglio e stenderla ventilazione (quando non battuta per intonaco sulla a terra su telo di plastica gocciola più base e sulla sommità eccessivamente) delle pareti	Intonaci: preparare e fissare tavolette di battuta per intonaco sulla base e sulla sommità delle pareti				Pavimento: preparare e fissare travetti di contenimento per battuto di cocciopesto	Pareti: fissare secondo falso telaio per infissi e posare isolante con relativa rete portaintonaco
	4+ persone	4+ persone	4+ persone				2 persone	2 persone
			Totale	Totale presenze ipotizzate: 8 persone	ersone			

FASE 4

					_
	Intonaci: preparare e fissare arelle a elementi lignei interni	4 persone	Intonaci: preparare e fissare arelle a elementi lignei esterni	4 persone	
	S Intonaci: preparare e fissare TNT a elementi lignei interni	4 persone	S Intonaci: preparare e fissare TNT a elementi Lignei esterni	4 persone	: 8 persone
1 giorno	Pareti: fissare pali del sistema antisismico	4+4 persone (2+2 dentro 2+2 fuori)			Totale presenze ipotizzate: 8 persone
	R Montare un ponteggio esternamente e uno internamente	4+4 persone			
	etnemstelgmoo otner otsnimret	mteəzzA			
	Pareti: rasare ballette	1 persona a turno rasa 3 persone aiutano per teste balle in angolo			: 4 persone
1 giorno	Q Pareti: riempire vuoto sopra box infissi con trabattello	4 persone			Totale presenze ipotizzate: 4 persone
	otanimrət izaup otnə	mtsessA			

FASE 5

		10	10 giorni			2 giorni	1 giorno
T Intonaci: spruzzare primo strato interno	Intonaci: stendere a mano secondo strato fibrato interno	Intonaci: spruzzare primo strato esterno	Intonaci: spruzzare e Intonaci: posizionare reti stendere strato finale porta intonaco interne interno con frattazzo in legno	Intonaci: spruzzare e stendere strato finale interno con frattazzo in legno	Intonaci: spruzzare e stendere strato finale esterno con staggia	Pavimento: stendere il battuto di cocciopesto (quando intonaco interno è asciutto)	Pavimento: stendere il Pareti: montare infissi battuto di cocciopesto (quando intonaci e battuto sono completamente è asciutto)
A turno: 1 persona con intonacatrice 3+ persone con frattazzo	4+ persone	1 persona a turno con intonacatrice	4+ persone	A turno: 1 persona con A turno: 1 persona con intonacatrice intonacatrice 3+ persone con frattazzo 2+ persone con staggia	A furno: 1 persona con intonacatrice 2+ persone con staggia	Studenti con artigiano professionista	Serramentista professionista
		Presenze minime n	Presenze minime necessarie: 4 persone			Presenze minime ne	Presenze minime necessarie: 4 persone

#### Allegato 2

	Fase	Scopo	Attrezzatura	Quantità	Da acquistare	Fornitore / Laboratorio a cui rivolgersi
1	Generale	Antincendio	Scopa	2	SI	
2	Generale	Antincendio	Estintore	1	SI	
3	Generale	DPI	Caschetti	10	NO	LaSTIn
4	Generale	DPI	Guanti di scorta	10 paia	NO	LaSTIn
5	Generale	DPI	Occhiali di scorta	10	NO	LaSTIn
6	Generale	Elementi legno	Sega circolare	1	NO	LaSTIn
7	Generale		Ponteggio	2 porzioni	NO	Noleggio per tutto il WS
8	Generale		Trabattello	1	NO	LaSTIn
9	Generale		Scala	1	NO	LaSTIn
10	Generale	Lavorazioni legno	Avvitatori		NO	LaSTIn
11	Generale	Fissare picchetti	Martello	4	NO	LaSTIn
12	Generale	·	Secchi di varie tipologie	molti	NO	LaSTIn
13	Α	Scavo di fondazione	Pala	4	NO	LaSTIn
14	А	Preparazione dello stabilizzato	Costipatore	1	NO	Noleggio per 1/2 giorni
15	C e L	Lavorazioni legno	Punte trapano per forare legno (picchetti primo e ultimo corso)	1 set di punte	SI	
16	М	Stendere impermeabilizzante liquido	Pennello	2	NO	LaSTIn
17	N	Copertura verde	Tubo dell'acqua	1	NO	LaSTIn
18	0	Intonaco	Telo plastica		SI	
19	Q	Rasatura pareti	Sega elettrica o decespugliatore	1	SI/NO	Acquisto, noleggio o in prestito
20	Q e R	Pali sisma e rasatura pareti	Forbici	2	NO	LaSTIn
21	R	Pali sisma	Martello strappa-chiodi	2	NO	LaSTIn
22	R	Pali sisma	Ago da paglia	2	SI	_
23	S	Intonaco	Spara-graffette	1/2	NO	LaSTIn
24	T	Intonaco	Frattazzo di legno	4	NO	Autocostruito con scarti di tavolato non trattato
25	T	Intonaco	Vaporizzatore	4	NO	LaSTIn
26	T	Intonaco	Intonacatrice	1	NO	Noleggio o lo porta artigiano che aiuterà con intonaci
27	T	Intonaco	Staggia metallica	1/2	NO	LaSTIn
28	U	Battuto di cocciopesto	Mollazza	1	NO	LaSTIn

Politecnico di Torino - Richiesta fornitura materiale

Data 27/05/2022

All	egato 3	tavole in ire in seguito.	indo una base da gno su file .dxf	tavole in ire in seguito.	indo una base da gno su file .dxf
	Note	Aquisteremo anche alcune tavole in eccesso. Quantità da definire in seguito.	Quantità calcolate ipotizzando una base da 20 cm. Vedi dettaglio disegno su file .dxf allegato.	Aquisteremo anche alcune tavole in eccesso. Quantità da definire in seguito.	Quantità calcolate ipotizzando una base da 20 cm. Vedi dettaglio disegno su file .dxf allegato.
	Superficie minima [m²]	79,3		79,3	
	Numero elementi		24 48 9 21 10 29 8		24 48 9 21 10
Tavole	Lunghezza elemento [cm]		210,0 312,0 150,0 200,0 250,0 300,0 350,0		210,0 312,0 150,0 200,0 250,0 300,0
Ta	Altezza [cm]	2,0 (può essere maggiore)		2,0 (può essere maggiore)	
	Base [cm]	20,0 (può variare)		20,0 (può variare)	
	Tipologia	Tavole segate grezze		Tavole segate grezze	
	Legno	Larice massiccio		Abete massiccio	
	Utilizzo	Tavolato di chiusura inferiore - solaio e Tavolato di chiusura superiore - copertura		Tavolato di chiusura superiore - solaio e Tavolato di chiusura inferiore - copertura	
		$\vdash$	1 oilgettəb	2	S oilgettəb

Pagina 1 di 5

# Politecnico di Torino - Richiesta fornitura materiale

# Data 27/05/2022

3	Tavolato pacchetto verde	Larice massiccio	Tavole segate grezze	20,0 (può variare)	3,3 (può essere maggiore)			63,1	Aquisteremo anche alcune tavole in eccesso. Quantità da definire in seguito.
						360,0	36		
						150,0	9		
£ oi						200,0	8		Quantità calcolate ipotizzando una base da
18e:						250,0	32		20 cm. Vedi dettaglio disegno su file .dxf
цəр						300,0	16		allegato.
)						350,0	<b>∞</b>		
						400,0	8		
	Transport transi	Castago	Tavole	5,0					
4	וומעפוספ אפון נומעו	castagno	segate	(può essere	20,0	200,0	∞		
	u appoggio	IIIdassiccio	grezze	maggiore)					
		Larice							
	7. C.	massiccio	Tavole	15,0	1,5				Gli elementi possono avere basi, altezze e
2	hattuta con intonaco	e/o	segate	(bno	(bnd				lunghezze diverse fra loro. La lunghezza
	משנימים כסון ווויסוושכס	castagno	grezze	variare)	variare)				complessiva da coprire è di 52,5 m
		massiccio							

Pagina 3 di 5

Politecnico di Torino - Richiesta fornitura materiale

Data 27/05/2022

				T	Travi			
	Utilizzo	Legno	Tipologia	Base [cm]	Altezza [cm]	Lunghezza elemento [cm]	Numero elementi	Note
9	Travi primarie solaio e copertura	Abete massiccio	Travi segate grezze 4 fili	10,0	33,0	480,0	14	
7	Travi primarie solaio	Abete massiccio	Travi segate grezze 4 fili	12,0	33,0	480,0	4	
∞	Travi secondarie solaio e copertura	Abete massiccio	Travi segate grezze 4 fili	10,0	33,0	92,0	64	
6	Travetti di ventilazione	Larice massiccio e/o Castagno massiccio	Travetti segati grezzi	9,0 (può essere maggiore)	15,0 (può essere maggiore)			
e oilgatteb						150,0 190,0 200,0 240,0	14 4 8 12	Le lunghezze possono variare leggermente. Vedi dettaglio disegno su file .dxf allegato.

# Data 27/05/2022

	- Diametro medio = 20 cm - Lunghezza complessiva da coprire = 33 m - Vedi immagine di esempio allegata
6	
300,0	
20,0	
20,0	
Travi uso fiume	Tronchi
Castagno massiccio	Larice massiccio e/o Castagno massiccio
Travi d'appoggio	Contenimento pacchetto verde
10	11

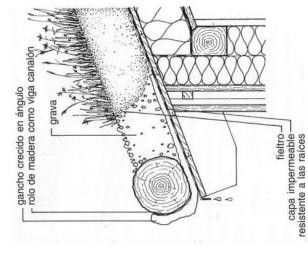


Figura 83 Immagine allegata alla richiesta di preventivo per una miglior comprensione della funzione dell'elemento 11. Fonte: Vera Friederike Frey (s.d.). Detalle de canalòn, usado ed Escandinavia [Disegno]: Minke, G. (2004). Techos verdes. Planificaciòn, ejecuciòn, consejos pràcticos. Editorial Fin de Siglo.

Pagina 4 di 5

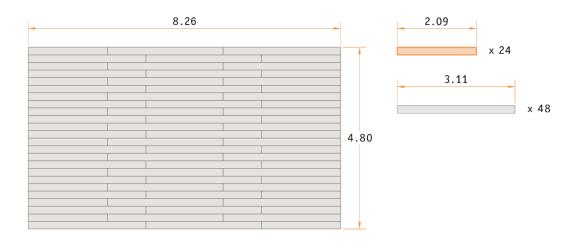
Pagina 5 di 5

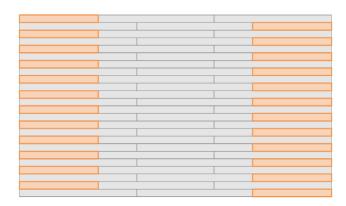
Politecnico di Torino - Richiesta fornitura materiale

Data 27/05/2022

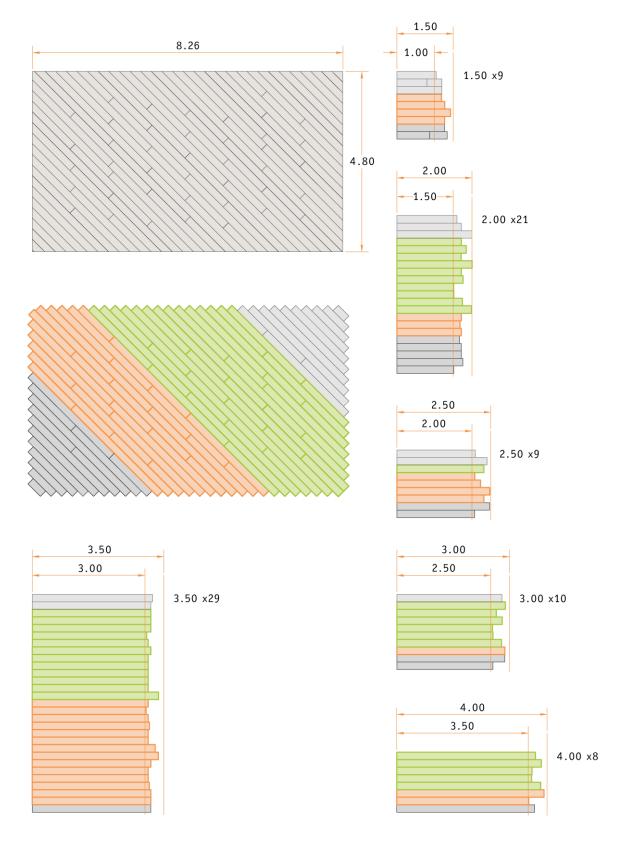
				ro essere					
	Note			Le lunghezze potrebbero essere leggermente maggiori					
	Numero elementi		4	4	12			4	2
	Lunghezza elemento [cm]		165	230	280			300	185
Pannelli	Altezza [cm]	3,0 (può essere maggiore)				4,0	leggermente)		
	Base [cm]	45,0				45.0			
	Tipologia	Pannelli segati				Pannelli	segati		
	Legno	Abete Iamellare essiccato				Abete	essiccato		
	Utilizzo	Ring beam (cordolo)				Box infissi			
		12	7	et. 1	р	7,	)	£1.	təb

## TAVOLATO SUPERIORE IN ABETE PER IL SOLAIO INFERIORE E TAVOLATO SUPERIORE IN LARICE PER LA COPERTURA - SCALA NOMINALE 1:100

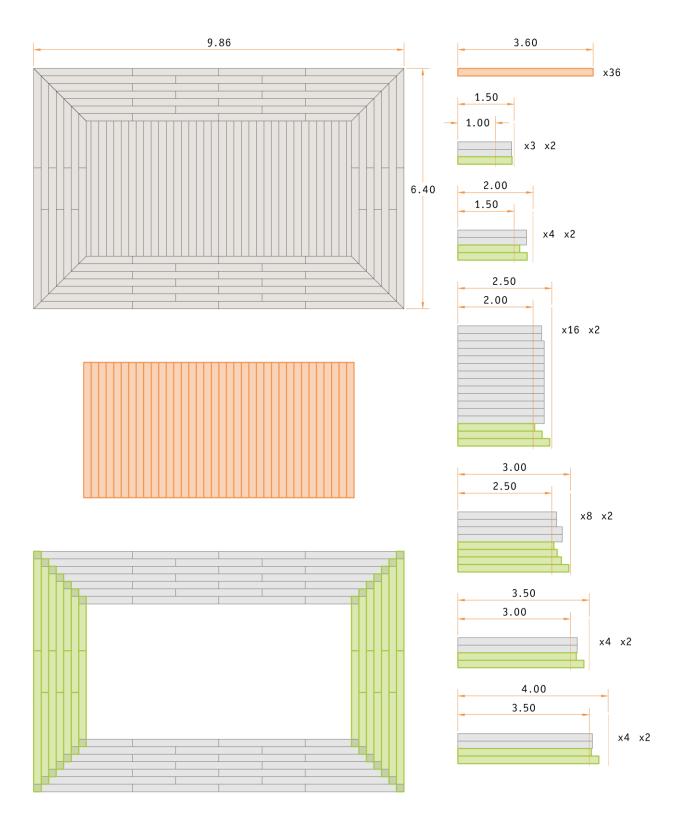




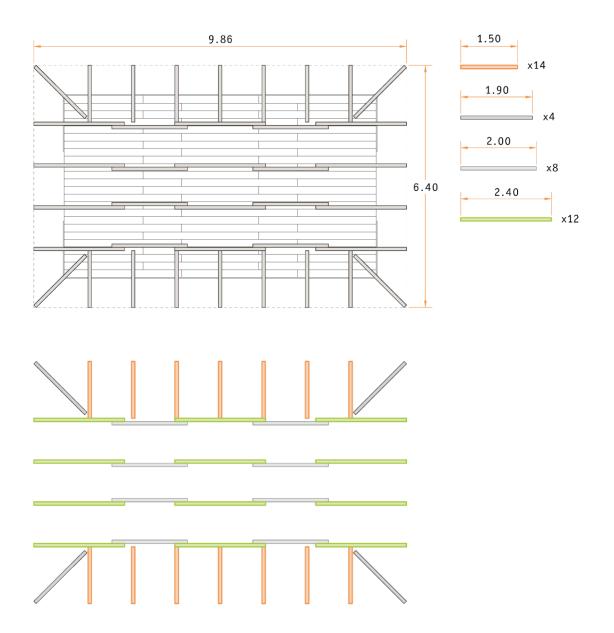
## TAVOLATO INFERIORE IN LARICE PER IL SOLAIO INFERIORE E TAVOLATO INFERIORE IN ABETE PER LA COPERTURA - SCALA NOMINALE 1:100



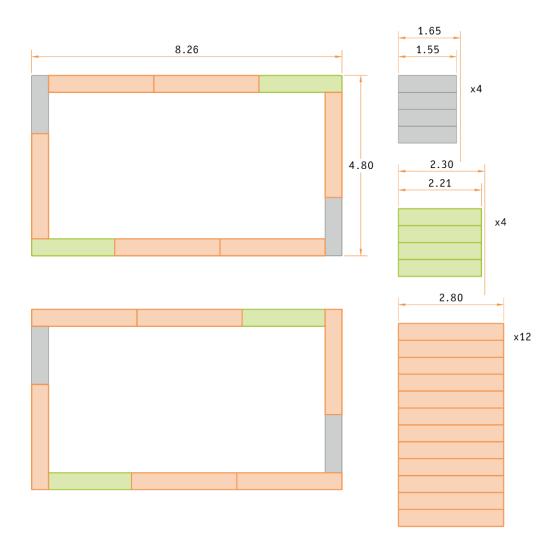
## TAVOLATO IN LARICE SOTTOSTANTE LA COPERTURA VERDE SCALA NOMINALE 1:100



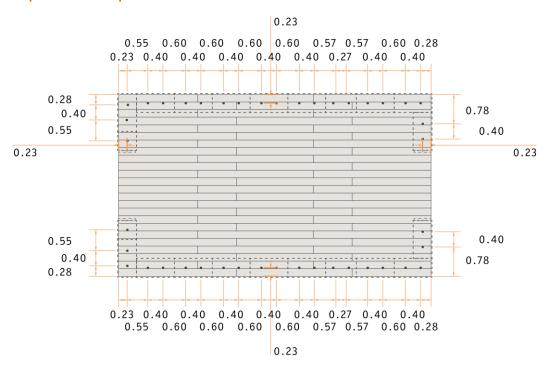
#### Travetti di ventilazione - scala nominale 1:100



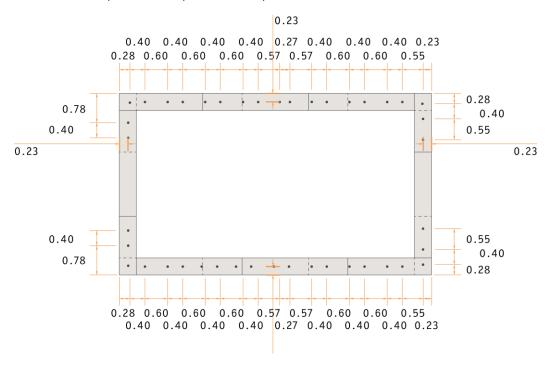
#### Pannelli in abete per il cordolo superiore - scala nominale 1:100



Scheda 1 - Quote per forare il tavolato superiore del solaio e il cordolo soprastante le pareti



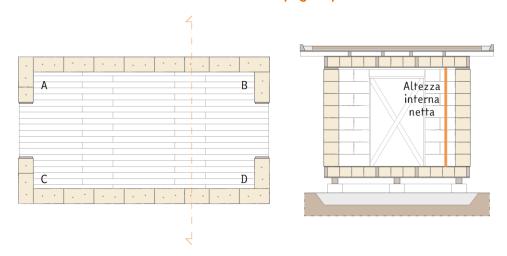
Le quote sopra riportate dovrebbero facilitare l'individuazione della corretta posizione dei fori dove andranno fissati i picchetti, utili per ancorare il primo corso di ballette al solaio.



Analogamente a quanto scritto prima, queste misure dovrebbero essere utili per segnare il secondo strato di pannelli del cordolo superiore.



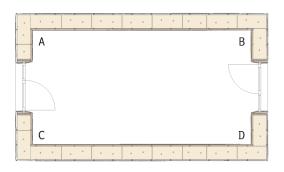
Scheda 2 - Monitoraggio dell'altezza interna netta del padiglione durante il periodo di assestamento delle ballette di paglia portanti



Queste misurazioni saranno utili per valutare il momento più opportuno in cui dare inizio alle fasi 3, 4.Q e 4.R.

Giorno n°	Altezza interna netta [m]	Giorno n°	Altezza interna netta [m]
1	A B C D	29	
5 //		33	
9		37	
13		41	
17		45	
21		2 sett. dopo fine assestamento	
25 //		4 sett. dopo fine assestamento//	

Scheda 3 - Monitoraggio dell'altezza interna netta del padiglione durante la vita utile del padiglione





Durante la vita utile del padiglione sarebbe bene registrare l'altezza interna netta una volta al mese, prestando particolare attenzione - e se possibile aumentando la frequenza di rilevazione - se dovesse nevicare. Queste campagne di misurazione potranno aiutare a comprendere il carico limite delle pareti e il ruolo giocato dall'intonaco nella resistenza meccanica complessiva delle pareti.

Se possibile si potrebbe fotografare e prendere appunti su posizione, morfologia, estensione e profondità delle crepe più estese dell'intonaco.

Mese n°	Altezza inter [m]	na netta	Mese n°	Altezza interna netta [m]
1	A B C D		7	
Note:	•			
2			8	
	•			
3			9	
	•			
4			10	
5 //			11 //	
6//			12 //	



#### Arelle di canne palustri



Figura 84 Arelle di canne palustri Fonte: Anna Barbato. Camisano Vicentino (VI)

Le canne palustri sono delle piante infestanti che solitamente crescono lungo gli argini dei fiumi e perciò sono facilmente reperibili localmente, velocemente rinnovabili, hanno un valore di embodied energy molto basso e un valore di embodied carbon negativo.

Le arelle di canne palustri sono un ottimo supporto per l'intonaco perché migliorano l'aderenza al legno. Questo materiale viene chiamato anche 'incannucciato'.

Non assorbono facilmente né l'acqua liquida, né l'umidità, hanno una resistenza al vapore estremamente bassa e possono essere facilmente sagomate per creare forme particolari.

Le canne sono legate tra loro da fili di nylon o di ferro zincato. Visto il loro assemblaggio a secco, alla fine della vita utile dell'edificio potrebbero essere rimosse dal supporto e i diversi

materiali potrebbero essere divisi e adeguatamente smaltiti: le canne si possono compostare, mentre le graffette e i fili di nylon o ferro si possono riciclare facendo una corretta raccolta differenziata.

#### Argilla



Calchèra di San Giorgio in *Prontuario di cantiere* (2012) descrive l'argilla come una roccia sedimentaria poco coerente e di aspetto terroso. È composta da silice, allumina e ossidi di ferro.

Figura 85 Terra argillosa Fonte: Anna Barbato. Malo (VI)

#### Calce idraulica



Ottenuta dalla cottura di calcari marnosi a temperature inferiori ai 1250°C. Questi calcari sono composti da miscele naturali che presentano anche percentuali di argilla.

Calchèra di San Giorgio in *Prontuario di cantiere* (2012) scrive che dopo la cottura si ottiene della calce viva, ma 'spegnendola' con l'aggiunta della corretta quantità d'acqua si ottiene appunto calce spenta, che viene infine macinata finemente.

Figura 86 Calce idraulica
Fonte: https://www.calcepiasco.it/wpcontent/uploads/2017/04/Calce-idrata-fiore.jpg

#### Caolino

Dal *Prontuario di cantiere* (2012) si legge che il caolino è un'argilla di qualità molto pregiata, che a causa della mancanza di ferro è di colore tendente al bianco. Questa argilla viene cotta tra i 750°C e gli 800°C e successivamente viene macinata fino ad ottenere una polvere finissima.

Il caolino ha ottime caratteristiche di pozzolanicità e viene usato prevalentemente per produrre porcellane.

#### Cocciopesto



Si ricava dalla macinazione di mattoni e coppi di recupero.

Calchèra di San Giorgio in *Prontuario di cantiere* (2012) scrive che l'argilla cotta, essendo il prodotto della torrefazione dei silico-alluminati, è un potenziale aggregato idraulicizzante per intonaci a base di calce. Infatti, tende a modificare il carattere della calce aerea inducendo processi chimici e reazioni di tipo idraulico. Per queste caratteristiche, il cocciopesto è detto anche pozzolana artificiale, ma è efficace in tal senso solamente se deriva da argilla cotta a temperature relativamente basse, quindi solamente se i mattoni o i coppi sono antichi.

Figura 87 Cocciopesto
Fonte: https://www.mgnintonaci.it/wp-content/uploads/2022/06/ST\_COTMAC01.pdf

#### Grassello di calce



Viene chiamato anche calce in pasta o calce di fossa. Secondo le indicazioni date da Calchèra di San Giorgio in *Prontuario di cantiere* (2012), si ricava dalla pietra calcarea (di monte o di fiume) sottoposta a cottura dolce a 900-1000 °C. Dopo la calcinazione si ottiene della calce viva, che deve essere spenta con l'aggiunta di acqua in eccesso. Il composto viene quindi fatto staqionare dai 12 ai 60 mesi.

Figura 88 Grassello di calce
Fonte: https://www.calcherasangiorgio.it/storage/products/full/grassello-di-calce-m0.jpg

#### **Paglia**



Figura 89 Paglia Fonte: Anna Barbato, Malo (VI)



Figura 90 Fieno Fonte: Anna Barbato, Camisano Vicentino (VI)

Nel linguaggio comune i termini 'paglia' e 'fieno' sono spesso utilizzati come sinonimi, ma nella realtà sono due materiali vegetali differenti - sebbene morfologicamente simili.

Il fieno è erba tagliata essiccata al sole e solitamente viene impiegato in agricoltura e nell'allevamento rispettivamente come fertilizzante e come alimento per gli animali.

In *Building with straw* (Minke & Mahlke, 2005) si legge che con il termine paglia si indicano gli steli secchi trebbiati di piante quali frumento, orzo, avena, miglio, lino, canapa o riso. Più precisamente, la paglia è la parte di culmo compresa tra la radice e la spiga.

La composizione chimica della paglia, simile a quella del legno, comprende cellulosa, lignina, emicellulosa e silice (in ordine decrescente di quantità in percentuale). Grazie alla silice - presente in maggior quantità nella paglia di riso - la paglia marcisce molto lentamente, inoltre la superficie esterna degli steli è cerosa e idrorepellente.

Attualmente, la paglia viene usata prevalentemente come lettiera per animali nelle stalle, viene aggiunta ai mangimi in inverno o viene interrata nei campi, soltanto raramente viene bruciata.

La paglia si ottiene dopo la trebbiatura dei raccolti e se le balle si impiegano in edilizia è molto importante che tra gli steli non siano presenti né elementi organici - come semi, fiori o foglie -, né sassi.

Le balle vengono legate con spaghi - posti parallelamente al lato lungo - che solitamente sono di propilene, nylon, sisal<sup>48</sup> o fibre di canapa. Questi, secondo Jones, dovrebbero essere ben tesi e fissati ad almeno 10 cm dal bordo.

<sup>-</sup>

<sup>&</sup>lt;sup>48</sup> Le fibre di sisal, o fibre d'Agave, sono ricavate dalle foglie della pianta grassa succulenta *Agave sisalana*.

#### **CONCLUSIONI**

L'obiettivo di questo elaborato di tesi era fornire delle basi utili per realizzare il padiglione con ballette di paglia portanti previsto dal progetto di ricerca del DIST Dipartimento di Eccellenza 2018-2022. La costruzione di questo prototipo durante dei workshop didattici consentirà l'approfondimento dello studio di questa tecnica costruttiva attraverso il monitoraggio a medio termine delle prestazioni termoigrometriche e strutturali raggiunte e renderà possibile il confronto con gli altri due padiglioni previsti dal progetto di ricerca.

I prossimi passi da compiere potrebbero riguardare:

- uno studio di dettaglio sulle giunzioni delle travi primarie e secondarie in legno massiccio di solaio e copertura, allo scopo di ridurre al minimo le connessioni metalliche e sperimentare durante i workshop didattici l'intaglio del legno per la creazione di incastri;
- un confronto dei dati ottenuti dalle simulazioni fisico-tecniche presentate in questa tesi con rilevazioni fatte sul campo, grazie al supporto tecnico e metodologico del laboratorio LAMSA del Politecnico di Torino;
- un'analisi LCA del padiglione che comprenda anche la fase di realizzazione;
- uno studio più approfondito sul contributo che il sistema di pali ideato dall'architetto Werner Schmidt dà alla resistenza delle pareti contro l'azione sismica, includendo se possibile delle prove svolte in laboratorio su tavola vibrante e riquardanti diversi campioni di parete.

#### **BIBLIOGRAFIA**

#### Libri

Minke, G., & Mahlke, F. (2005). Building with straw. Design and Technology of a Sustainable Architecture. Birkhäuser.

Jones, B. (2011). Costruire con le balle di paglia. Manuale pratico per la progettazione e la costruzione. (III edizione). Terra Nuova Edizioni.

Calchèra San Giorgio. Scuola d'Arte Muraria. Centro di ricerca e formazione di materiali per i professionisti del restauro architettonico. (2012). *Prontuario di cantiere*. https://www.scuoladartemuraria.org/img/biblioteca/CSG-Prontuario-Di-Cantiere.pdf

Bocco Guarneri, A. (2013). Werner Schmidt architekt. Ecology craft invention. Ambra/V.

Bocco Guarneri, A. (2020) Vegetarian Architecture: Case Studies on Building and Nature, Berlin, Jovis.

#### Tesi di laurea

Piccirillo, B., relatrici Montacchini E. P., Azzolino M. C., Lacirignola A. (2020). *La paglia negli interventi di riqualificazione*. Tesi di laurea magistrale, Politecnico di Torino. <a href="https://webthesis.biblio.polito.it/13609/1/tesi.pdf">https://webthesis.biblio.polito.it/13609/1/tesi.pdf</a>

#### **Pubblicazioni**

Straube, J. (2000). Moisture properties of plaster and stucco for straw bale buildings. CMHC Canada Mortgage and Housing Corporation. Research Division.

https://eppdscrmssa01.blob.core.windows.net/cmhcprodcontainer/sf/project/archive/publications/rht-penrt/62631.pdf

Eisenberg, D. (2009). Beyond Green Building & Codes: Seeing a Bigger Picture. CAZREN & YCCA, Hassayampa Inn, Prescott, Az. Una presentazione riassuntiva della conferenza è consultabile al link: https://www.dcat.net/about\_dcat/David\_Eisenberg\_CAZREN\_talk\_Dec\_5\_2009.pdf

Ozeryansky, D., & Hammer, M. (2010). Strawbale construction: an appropriate technology for developing countries with high seismic risk. Toronto, Canada. https://www.caee.ca/10CCEEpdf/2010EQConf-001612.pdf

Evrard, A., Louis, A., Biot, B., Dubois, S. (2012). Moisture equilibrium in straw bale walls. *Opportunities, Limits & Needs Towards an environmentally responsible architecture*. Conference paper, Lima, Perù. <a href="https://www.researchgate.net/publication/283567893">https://www.researchgate.net/publication/283567893</a> Moisture equilibrium in straw bale walls

Evrard, A. (2013). Thermal inertia and moisture regulation of straw bale buildings with earth plasters. https://www.researchgate.net/publication/283567965\_Thermal\_inertia\_and\_moisture\_regulation\_of\_straw\_bale\_buildings\_with\_earth\_plasters

Thomson, A., & Walker, P. J. (2013). Condition monitoring and durability assessment of straw bale construction. In L. Braganca, M. Pinheiro, & R. Mateus (Eds.), Portugal SB13: Contribution of Sustainable Building to Meet EU 20-20-20 Targets (pp. 791-798)

https://researchportal.bath.ac.uk/en/publications/condition-monitoring-and-durability-assessment-of-straw-bale-cons

Bocco, A. (2014). Architect Werner Schmidt's Straw-Bale Construction.

https://www.researchgate.net/publication/271962371\_Architect\_Werner\_Schmidt%27s\_Straw-Bale\_Construction

Evrard, A., Biot, B., Keutgen, G., Lebeau, F., Courard, L., & Herde, A. (2015). Straw-bale walls for sustainable architecture: Improving and promoting straw-bale use in European Buildings.

https://www.researchgate.net/publication/283567521\_Straw-

<u>bale\_walls\_for\_sustainable\_architecture\_Improving\_and\_promoting\_straw-</u> <u>bale\_use\_in\_European\_Buildings</u>

CNR - Commissione di studio per la predisposizione e l'analisi di norme tecniche relative alle costruzioni (2018). Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo delle Strutture di Legno

Elhacham, E., Ben-Uri, L., Grozovski, J., Bar-On, Y. M., & Milo, R. (2020). Global human-made mass exceeds all living biomass. Nature, 442-444. https://doi.org/10.1038/s41586-020-3010-5

Lentini, G., Messori, G., & Caserini, S. (2020). Il futuro visto dal passato: Guy Callendar e il riscaldamento globale. *Climalteranti*.

https://www.climalteranti.it/2020/06/10/il-futuro-visto-dal-passato-guy-callendar-e-il-riscaldamento-globale/

IPCC (2021). Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\_AR6\_WGI\_SPM.pdf

#### Atti parlamentari

Senato della Repubblica, Disegno di legge (Ratifica ed esecuzione del Protocollo alla Convenzione del 1979 sull'inquinamento atmosferico [...]), n. 607. X Legislatura, 10 novembre 1987. https://www.senato.it/service/PDF/PDFServer/DF/268696.pdf

Ministero delle infrastrutture e dei trasporti, Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni», Decreto 17 gennaio 2018. In Gazzetta ufficiale della Repubblica italiana n. 42, 20 febbraio 2018. https://www.gazzettaufficiale.it/eli/gu/2018/02/20/42/so/8/sg/pdf

#### Siti web e altre risorse digitali

Atelier di Werner Schmidt. Disegni progettuali, foto e video di cantiere, foto degli edifici completati e risorse riguardo l'architettura in paglia disponibili in: <a href="https://www.atelierschmidt.ch/">https://www.atelierschmidt.ch/</a>

Atelier di Barbara Jones. Disegni progettuali, foto di cantiere, foto degli edifici completati e risorse riguardo l'architettura in paglia disponibili in: <a href="https://strawworks.co.uk/">https://strawworks.co.uk/</a>

Atelier di Gernot Minke. Disegni progettuali, foto di cantiere, foto degli edifici completati e risorse riguardo l'architettura in paglia disponibili in: <a href="http://gernotminke.gernotminke.de/projects/">http://gernotminke.gernotminke.de/projects/</a>

Dati sulla situazione climatica attuale disponibili in: https://climate.nasa.gov/vital-signs/carbon-dioxide/

Presentazione degli obiettivi di sviluppo sostenibile disponibile in: <a href="https://sdgs.un.org/goals">https://sdgs.un.org/goals</a>

Personalizzazione del grafico 'Climate stripes' disponibile in: <a href="https://showyourstripes.info/s/globe">https://showyourstripes.info/s/globe</a>

Dati riguardanti l'impronta ecologica e la biocapacità disponibili in: <a href="https://data.footprintnetwork.org/#/countryTrends?cn=5001&type=BCtot,EFCtot">https://data.footprintnetwork.org/#/countryTrends?cn=5001&type=BCtot,EFCtot</a>

Seghezzi, A., Foresti, M. (direttori), Perri, L., Barbascura X, Foresti, M. (scrittori) (2021). *Infodemic:* il virus siamo noi [Documentario]. Distribuito da Amazon Prime Video. https://www.infodemic.it/

Hammond, G.; Jones, C. (2011). *Inventory of carbon & energy*, University of Bath. https://www.carbonsolutions.com/Resources/ICE%20V2.0%20-%20Jan%202011.xls

BMI - Deutsche Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat, (2021). Ökobaudata 2021. Deutsche Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat, Berlin. <a href="https://www.oekobaudat.de">www.oekobaudat.de</a>

Enciclopedia archeometrica. Tra gli argomenti trattati sono presenti gli intonaci a base di calce e il battuto di cocciopesto. Disponibile in:

https://www.quaderniquarneti.it/

Sito aziendale dell'azienda agricola che ha fornito le ballette di paglia di grano: <a href="https://www.terravivatb.it/">https://www.terravivatb.it/</a>

Sito aziendale dell'azienda risicola che ha donato le ballette di paglia di riso: <a href="http://www.risodinori.it/">http://www.risodinori.it/</a>

Grazie a tutte le scelte affrontate, a tutte le decisioni prese e grazie alla brezza, come direbbe Forrest. Grazie a tutte le persone che ho incontrato lungo il cammino.

Tutto questo ha fatto sì che arrivassi fino a qui.

Un grazie particolare al prof. Bocco, a Redina e ad Arthur. Grazie per le opportunità donatemi, per le esperienze condivise e per tutto il supporto.

