



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Architettura per il Progetto Sostenibile

A.A. 2022/2023

**Progettazione di un padiglione in terra alleggerita
con struttura portante in legno
(parte II)**

Relatore
prof. Andrea Bocco

Studente
Caterina Longo
s279583

“A mio padre, per avermi insegnato che
la bellezza è una questione di scelte e che
la creatività è una questione di limiti.

Grazie per avermi mostrato che la progettazione è
una questione di equilibrio
tra ispirazione e responsabilità”

Indice



8	Abstract IT
9	Abstract EN
10	Introduzione
14	Capitolo 1: Considerazioni di laboratorio
15	1.1 Risultati di laboratorio
18	1.2 La barbottina
21	1.3 La paglia
23	1.4 La costipazione
24	1.5 Conclusioni di laboratorio
26	Capitolo 2: Parametri termo-igrometrici
28	2.1 Conducibilità
34	2.2 Calore specifico
36	2.3 Fattore di resistenza al vapore
39	2.4 Schede tecniche dei composti in terra-paglia
44	Capitolo 3: Proprietà fisiche
46	3.1 Resistenza termica
47	3.2 Assorbimento e scarico igroscopico dell'umidità
51	3.3 Il ruolo dei pori
52	3.4 Ritenzione termica
53	3.5 Presentazione del progetto

57

Capitolo 4: Proposta progettuale A

59	4.1	Parete A
69	4.2	Solaio A
76	4.3	Copertura A
79	4.4	Struttura A
86	4.5	Nodi strutturali
88	4.6	Particolari costruttivi e ponti termici
94	4.7	Computo

98

Capitolo 5: Proposta progettuale B

104	5.1	Parete B
114	5.2	Solaio B
121	5.3	Copertura B
129	5.4	Struttura B
136	5.5	Nodi strutturali B
138	5.6	Particolari costruttivi e ponti termici
140	5.7	Computo

143

Capitolo 6: Confronto tra padiglioni

148	6.1	Confronto termico
157	6.2	Confronto sulla fattibilità costruttiva
159	6.3	Conclusioni

ABSTRACT IT

L'obiettivo di questa tesi è la progettazione di un padiglione con tamponamento in terrapaglia e struttura portante in legno.

La prima parte mira a fornire una panoramica sulle costruzioni in terrapaglia, attraverso l'analisi di risultati ottenuti da prove sperimentali. In particolare, si è cercato di fare valutazioni pratico-realizzative sull'utilizzo di questa tecnica costruttiva.

Successivamente, nei capitoli centrali, si sono indagate le caratteristiche termo-igrometriche, passo fondamentale per la formulazione di ipotesi stratigrafiche per i tamponamenti del padiglione.

Infine, sono state presentate due ipotesi progettuali che riassumono tutti i ragionamenti fatti, tenendo conto delle prestazioni termiche, della costruibilità e della sostenibilità economica e ambientale.

ABSTRACT EN

The aim of this thesis is the design of a pavilion with straw-earth insulation and wooden structural elements.

The first part aims to provide an overview on straw-earth constructions, through the analysis of results obtained from experimental tests. In particular, it is aimed to make practical-realization evaluations on the use of this building technique.

Subsequently, in the central chapters, the thermal-hygrometric characteristics of straw-earth materials were investigated, a fundamental step for the formulation and study of stratigraphic hypotheses for the pavilion's insulation.

Finally, two design hypotheses were presented that summarize all the reasoning done, taking into account the thermal performance, constructability and economic and environmental sustainability.

INTRODUZIONE

Questa tesi rappresenta un passo in avanti nello sviluppo di un progetto già avviato, con l'obiettivo primario di riconoscere la terra-paglia come un'alternativa valida ai tradizionali materiali da costruzione. In un contesto in cui l'architettura deve necessariamente contribuire allo sviluppo sostenibile, il progetto mira a ridurre l'impatto ambientale degli edifici.

Il progetto è parte dell'iniziativa DIST Dipartimento di Eccellenza 2018-2022, finanziata dal Ministero dell'Università e della Ricerca, e consiste in una sperimentazione dell'utilizzo di materiali a bassa energia grigia, combinati con tecniche costruttive semplici (low-tech), per ridurre al minimo l'impiego di materiali sintetici.

Il progetto prevede la realizzazione di tre padiglioni, ciascuno costruito con un materiale diverso: paglia, calce-canapa e terra-paglia. La ricerca avrà una durata compresa tra tre e cinque anni e comprenderà fasi di progettazione, montaggio e monitoraggio. L'obiettivo è raccogliere dati sulla performance degli edifici e comparare i tre prototipi per una futura costruzione a basso impatto

ambientale. I materiali scelti sono adatti per i cantieri didattici.

Nel corso della ricerca, si cercherà di valutare l'impatto ambientale dei tre padiglioni in termini di materiali, energia e risorse naturali utilizzate. In particolare, si analizzerà l'impiego di materiali a bassa energia grigia, come la paglia e la canapa, e si valuterà la loro efficacia nell'abbattere i costi di costruzione e di esercizio.

La tecnica costruttiva della terra-paglia è stata approfondita da Kawtar Brini e dalla sottoscritta. Il processo progettuale è stato diviso in due parti: nella prima, scritta da Brini, è stata fatta un'introduzione storica e metodologica alla tecnica costruttiva, seguita da ipotesi progettuali e simulazioni basate sulle nozioni apprese dalla letteratura.

Nella seconda parte del progetto, scritta dalla sottoscritta, gli studi teorici sono stati approfonditi con l'obiettivo di arrivare alla creazione di ipotesi progettuali definite in ogni aspetto. Sono state valutate diverse opzioni per la scelta dei materiali più idonei per la costruzione, tenendo conto delle proprietà termiche, meccaniche e di resistenza all'umidità. Inoltre, sono

state effettuate verifiche strutturali per garantire la stabilità e la sicurezza del progetto.

Inoltre, sono state individuate le soluzioni tecniche più adatte per la risoluzione dei nodi costruttivi, tenendo conto dei requisiti prestazionali e delle esigenze del progetto.

Il punto di partenza è stato un laboratorio nel quale è stato realizzato un prototipo di parete in terra-paglia. Questa esperienza ha permesso di mettere in pratica le nozioni teoriche apprese nei primi mesi di studio e di apprezzare le potenzialità e le criticità di questo materiale, modificando il modo di approcciare a questa tecnica costruttiva.

Un altro aspetto importante della ricerca sarà la valutazione delle prestazioni termiche e acustiche del padiglione. Si utilizzeranno sensori per monitorare la temperatura interna, l'umidità e il livello di rumore, per valutare l'efficacia dei materiali e delle tecniche costruttive utilizzate. Inoltre, si effettueranno analisi di simulazione per valutare il comportamento termico degli edifici in condizioni estreme, come le alte temperature estive e le basse temperature invernali.

Infine, un ulteriore obiettivo della ricerca sarà quello di valutare la fattibilità economica dei tre padiglioni. Si stimeranno i costi di costruzione, di esercizio e di manutenzione dei tre edifici, tenendo conto dei materiali, della tecnologia e delle risorse utilizzate. Inoltre, si valuterà l'impatto economico dei materiali a bassa energia grigia e delle tecniche costruttive sostenibili sul mercato immobiliare, per verificare se queste soluzioni possono essere una valida alternativa ai metodi convenzionali.

In sintesi, questa tesi mira a valutare l'impatto ambientale, termico, acustico e economico dell'utilizzo di materiali a bassa energia grigia e tecniche costruttive sostenibili, come la terra-paglia, per la costruzione di edifici a basso impatto ambientale. Si spera che i risultati di questa ricerca possano fornire informazioni utili per lo sviluppo di soluzioni sostenibili per la costruzione di edifici a basso impatto ambientale.

Capitolo 1

15	1.1	Risultati di laboratorio
18	1.2	La barbottina
21	1.3	La paglia
23	1.4	La costipazione
24	1.5	Conclusioni di laboratorio

Considerazioni di laboratorio

1.1 Risultati di laboratorio

Il prototipo è stato essenziale per capire se la struttura in legno ad incastro ideata dall'ingegnere Toki Hirokazu potesse essere associata a un tamponamento in terra e paglia.¹ Nonostante questo nostro primario obiettivo, l'esperienza in laboratorio è stata fondamentale per mettere le "mani in pasta" e provare le metodologie costruttive studiate.

Sono stati realizzati due tamponamenti di diversa densità che sono stati poi confrontati. Di seguito sono riportate le quantità di terra, acqua e paglia utilizzate per la realizzazione dei due composti.

COMPOSTO D1

$M_{\text{terra}} = 5,11 \text{ kg}$

$M_{\text{acqua}} = 7,30 \text{ kg}$

$M_{\text{paglia}} = 8,71 \text{ kg}$

$M_{D1}(\text{con acqua}) = 21,12 \text{ kg}$

$M_{D1}(\text{senza acqua}) = 13,82 \text{ kg}$

$V_{D1} = 0,18 \text{ m}^3$

$D_{D1}(\text{con acqua}) = 129,30 \text{ kg/m}^3$

$D_{D1}(\text{senza acqua}) = 78,07 \text{ kg/m}^3$

COMPOSTO D2

$M_{\text{terra}} = 13,63 \text{ kg}$

$M_{\text{acqua}} = 19,47 \text{ kg}$

$M_{\text{paglia}} = 9,51 \text{ kg}$

$M_{D2}(\text{con acqua}) = 42,59 \text{ kg}$

$M_{D2}(\text{senza acqua}) = 23,13 \text{ kg}$

$V_{D2} = 0,18 \text{ m}^3$

$D_{D2}(\text{con acqua}) = 240,62 \text{ kg/m}^3$

$D_{D2}(\text{senza acqua}) = 130,66 \text{ kg/m}^3$

Si deve tenere conto della densità apparente, cioè la densità del materiale completamente asciutto. La densità apparente è una caratteristica fondamentale per i materiali costruttivi perché influenza, tra le altre cose, le loro proprietà isolanti.

Le due miscele sono molto meno dense rispetto alle ipotesi fatte prima della costruzione del prototipo. Studiando le proprietà termiche dei materiali in terra-paglia, che verranno

¹ K. Brini, Progettazione di un padiglione in terra alleggerita con struttura portate in legno (parte I), tesi di laurea magistrale, Politecnico di Torino, 2022, relatore A. Bocco.

approfondite nel capitolo successivo, possiamo constatare che composti con densità così basse possono raggiungere ottime prestazioni termiche. Pensiamo quindi che possano essere in grado di isolare termicamente senza uno strato di isolamento aggiuntivo che era stato precedentemente considerato necessario². Questo ha permesso di semplificare le fasi costruttive del prototipo, che verrà solamente intonacato. Sul lato interno verrà steso un intonaco in calce idraulica naturale, internamente si è deciso di utilizzare un intonaco in argilla.

2 K. Brini, op. cit., pp. 121-126

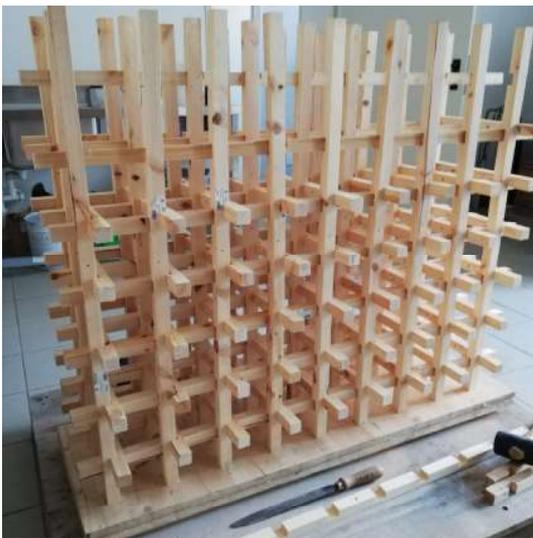


Figura 1
Prototipo della parete, struttura in legno a incastro. Foto realizzata durante le prove di laboratorio da K. Brini, C. Longo, A. Bohn, R. Mazelli. Laboratorio didattico MakeLab, Marzo 2022.

Nei climi temperati, le pareti in terra battuta o in terra alleggerita ad alta densità forniscono grande inerzia termica e ottime prestazioni estive.

Tuttavia, quando si progettano pareti con l'obiettivo di isolare dal freddo, occorre un isolamento termico superiore. L'inclusione di uno strato isolante è necessaria per raggiungere miglioramenti significativi nelle prestazioni invernali.³

In alternativa, come è stato mostrato in laboratorio, è possibile creare composti molto leggeri.

Non esistono delle vere e proprie dosi da utilizzare per la preparazione

3 K. Brini, op. cit., pp. 121-126



Figura 2
Prototipo della parete, tamponamento in terra paglia. Foto realizzata durante le prove di laboratorio da K. Brini, C. Longo, A. Bohn, R. Mazelli. Laboratorio didattico MakeLab, Marzo 2022.

della miscela di terra, acqua e paglia. Nonostante in letteratura sia possibile trovare delle linee guida, l'esperienza costruttiva è fondamentale.

La normativa italiana non considera la terra un materiale costruttivo: non è possibile quindi trovarvi riferimenti che possano guidare alla formazione della miscela ideale. In questo capitolo saranno esplicate le variabili e le azioni pratico-realizzative che possono influire sulla formazione delle miscele e si spiegherà come si sia arrivati alla realizzazione di miscele così leggere alla realizzazione di miscele così leggere.

I fattori che più influenzano la densità apparente dei composti in terra alleggerita sono:

- Rapporto terra-acqua
- Quantità di fibre di paglia
- Compressione durante la posa in opera del composto



Figura 3

Provini dei due composti realizzati. Composto D1 a destra, composto D2 a sinistra. Foto realizzata durante le prove di laboratorio da K. Brini, C. Longo, A. Bohn, R. Mazelli. Laboratorio didattico MakeLab, Marzo 2022.



Figura 4

Prototipo della parete realizzato con i due tamponamenti. Composto D1 a sinistra, composto D2 a destra. Foto realizzata durante le prove di laboratorio da K. Brini, C. Longo, A. Bohn, R. Mazelli. Laboratorio didattico MakeLab, Marzo 2022.

1.2 Barbottina

Come già descritto⁴, una settimana dopo l'inizio dei lavori è stato necessario formare la miscela di acqua e terra.

Per quanto concerne i rapporti specifici per la formazione della barbottina, si è deciso di improvvisarne le proporzioni. La terra gioca due ruoli: come già anticipato di massa per conferire inerzia termica all'edificio e quello di legante tra i diversi elementi di riempimento (nella terra, solo l'argilla assume questa funzione). Prima della preparazione della barbottina la terra è stata setacciata.

Le terre ricche di argilla hanno migliori proprietà coesive e possono essere preparate come una soluzione più sottile: il fatto che la terra sia stata finemente setacciata ha inciso sulla consistenza della miscela.

Non tutte le terre sono adatte, è preferibile scegliere terre argillose. Vanno in oltre utilizzate terre che si trovino al di sotto dello strato superficiale, in modo da evitare le parti ricche di materiale organico scarsamente elaborato o di scarti di origine antropica: le sostanze organiche potrebbero degradare

biologicamente la parete⁵.

Bisogna inoltre considerare che la quantità di acqua assorbita varia per le differenti tipologie di terreno. Abbiamo utilizzato l'acqua potabile della rete che è molto adatta. Se l'acqua proviene da un pozzo, non deve contenere spore di funghi che si svilupperebbero in modo incontrollato e potrebbero degradare il composto.⁶ Non si verifica alcuna reazione chimica tra l'argilla e l'acqua: essa verrà restituita all'atmosfera per evaporazione.

È fondamentale considerare che evaporando l'acqua lascerà all'interno del composto dei pori. Maggiore è la quantità di acqua usata per la formazione della miscela, maggiore sarà la porosità della massa.

Per la miscela sono stati impiegati due secchi di acqua e due secchi di terra⁷.

La barbottina preparata è stata lasciata decantare una settimana.

È infatti necessario che l'acqua venga completamente assorbita dalla terra.

⁵ M. Achenza, U. Sanna, *il manuale tematico della terra cruda*, Itaca, 2011.

⁶ A. Marcom, *Costruire en terre-paille*, Terre vivante, 2011.

⁷ K. Brini, op. cit., pp. 121-126

⁴ K. Brini, op. cit., pp. 121-126

L'argilla rispetto ad altri materiali come il limo o la sabbia ha la capacità di rimanere in sospensione molto a lungo. Per farla rimanere in questo stato l'abbiamo fatta riposare in un vasca bassa oblunga (figura 6).

Il giorno della costruzione del prototipo sono stati aggiunti altri due secchi di acqua.

La barbotina ottenuta era dunque molto sottile, di una consistenza semiliquida paragonabile al latte. Impasti così leggeri sono molto più facili da lavorare e la paglia fruscia durante la miscelazione. Dopo l'inserimento nel cassero, nella massa rimane un'elevata percentuale di vuoti, evidenti dopo la rimozione del cassero sulla superficie del muro.

Miscele più viscoso ricoprono



Figura 5
Barbotina preparata una settimana prima della costruzione della parete. Foto realizzata durante le prove di laboratorio da K. Brini, C. Longo, A. Bohn, R. Mazelli. Laboratorio didattico MakeLab, Marzo 2022.

l'aggregato in modo più spesso e la massa diventa più pesante, è quindi più difficile da lavorare. La massa viscosa appiccicosa, più densa, dopo la costipazione e successiva rimozione della cassaforma, presenta una tessitura superficiale più compatta e appiattita.⁸ L'uso di una barbotina sottile produce una massa leggera e ben isolante, mentre una barbotina più spessa è utile per realizzare pannelli di terra alleggeriti e mattoni che necessitano di una maggiore resistenza meccanica.⁹

Le barbotine sottili possono essere

⁸ Volhard F., *Light Earth Building. A Handbook for Building with Wood and Earth*, Holzhausen Druck GmbH, 2016

⁹ Volhard F., op. cit., pp. 57-80



Figura 6
Diluzione della barbotina il giorno della costruzione della parete. Foto realizzata durante le prove di laboratorio da K. Brini, C. Longo, A. Bohn, R. Mazelli. Laboratorio didattico MakeLab, Marzo 2022.

facilmente versate, spruzzate e mescolate con la paglia senza grandi sforzi. Abbiamo deciso di utilizzare due tecniche diverse per i due composti. Per ottenere un composto più denso abbiamo immerso la paglia direttamente nella miscela, per poi lasciarla asciugare per trenta minuti circa. Per il tamponamento più leggero abbiamo invece disteso la paglia su un telo per poi “battezzarla” (cioè spruzzandovi sopra la barbottina) cercando di distribuire la miscela in modo omogeneo: in questo modo la paglia è rimasta meno appesantita. Una miscela di acqua e terra così sottile

ha quindi facilitato la costruzione del prototipo ed ha consentito di ottenere un composto molto poroso e leggero. La prova in laboratorio ci ha permesso di capire che tipo di barbottina utilizzare, e quindi la quantità di acqua da aggiungere alla terra, in rapporto al tipo di risultato che si vuole ottenere. L'esperienza costruttiva permette quindi di giudicare intuitivamente le proporzioni tra acqua e terra.¹⁰

¹⁰ Volhard F., op. cit., pp. 57-80



Figura 7
Composto D2. La paglia dopo essere stata immersa nella barbottina viene lasciata asciugare. Foto realizzata durante le prove di laboratorio da K. Brini, C. Longo, A. Bohn, R. Mazelli. Laboratorio didattico MakeLab, Marzo 2022.



Figura 8
Composto D1. La paglia viene battezzata con la barbottina e il composto viene amalgamato. Foto realizzata durante le prove di laboratorio da K. Brini, C. Longo, A. Bohn, R. Mazelli. Laboratorio didattico MakeLab, Marzo 2022.

1.3 Paglia

La paglia utilizzata per il prototipo era raccolta in balle ben compresse, con una densità di circa 130 kg/m³. La paglia è stata quindi separata e sfilacciata per essere poi impastata con la barbottina nei due modi descritti in precedenza. La funzione della paglia è di racchiudere tasche molto piccole di aria nei e tra i suoi steli, e partecipare così all'isolamento dell'edificio.¹¹ La struttura fibrosa le permette inoltre di fornire una certa resistenza alla trazione.

Le fibre mantengono la terra ancorata contribuendo alla stabilità del tamponamento ed evitando il suo spanciamento. La paglia inoltre rende la superficie della parete ruvida, ideale per la posa dell'intonaco. Pertanto, pur essendo costituito da un composto molto leggero, il tamponamento risultava stabile. Rimossi i casseri, la parete non ha mostrato cedimenti e non si è deformata.

La lunghezza delle fibre è importante da considerare. Per ottenere la migliore lavorabilità, gli steli di paglia dovrebbero avere una lunghezza che corrisponda alla dimensione più piccola dell'elemento costruttivo,



Figura 9
Paglia utilizzata per la realizzazione del prototipo.
Foto realizzata durante le prove di laboratorio da K. Brini, C. Longo, A. Bohn, R. Mazelli. Laboratorio didattico MakeLab, Marzo 2022.



Figura 10
Posa in opera del composto, con particolare sulla lunghezza delle fibre di paglia. Foto realizzata durante le prove di laboratorio da K. Brini, C. Longo, A. Bohn, R. Mazelli. Laboratorio didattico MakeLab, Marzo 2022.

¹¹ A. Marcom, op. cit., pp. 106-123.

ad esempio per le pareti dovrebbe essere tra i 20 ed i 40 cm¹².

La paglia utilizzata durante la prova in laboratorio era molto lunga e non è stata sminuzzata prima dell'utilizzo. La posa e la costipazione dei due composti non è stata semplice. La difficoltà più grande era inserire in modo uniforme i composti all'interno della stretta struttura in legno.

La struttura è composta da listelli in legno, di sezione quadrata di 2,8 cm, incastrati tra di loro a formare una maglia molto stretta.

La notevole quantità di paglia in confronto alla terra rendeva difficoltoso il riempimento dei vuoti, in particolare nei punti di giunzione tra i listelli e nello spazio compreso tra la griglia in legno e il cassero di contenimento. Questo ha portato alla formazione di numerosi vuoti, specialmente a ridosso della struttura, che possono compromettere le prestazioni termogrometriche del tamponamento e anche la sua resistenza e la sua durabilità.

Pertanto la struttura testata non si combina bene con tamponamenti in terra-paglia molto leggeri con un'alta percentuale di paglia. L'utilizzo di composti di densità maggiore, come

quelli ipotizzati in fase progettuale¹³ con fibre di paglia più corte e una notevole percentuale di terra (che possa inserirsi bene tra i nodi della struttura) potrebbe invece essere una soluzione valida.

13 K. Brini, op. cit., pp. 97-105.

12 Volhard F., op. cit., pp. 57-80.

1.4 Costipazione del composto

La costipazione del composto è probabilmente la lavorazione più difficile da gestire. Considerando che gli edifici in terra-paglia a umido sono realizzati direttamente in cantiere senza l'ausilio di macchinari che possano standardizzare la costipazione del miscuglio, è impossibile ottenere una compattazione uniforme.

Il prototipo realizzato, dopo essere stato tolto dai casseri, ha difatti mostrato molte difformità. Queste disomogeneità influenzano notevolmente la densità della parete

ottenuta. Per evitare la formazione di vuoti e uniformare il tamponamento è preferibile che la posa in opera venga fatta dalla stessa persona (o perlomeno da poche persone) che tentino di mantenere la stessa forza nella compattazione.



Figura 11

Posa in opera del tamponamento in terra alleggerita, lavoro svolto da più persone. Foto realizzata durante le prove di laboratorio da K. Brini, C. Longo, A. Bohn, R. Mazelli. Laboratorio didattico MakeLab, Marzo 2022.



Figura 12

Dopo la scasserazione della parete, si evidenziano diversi vuoti, specialmente in prossimità dei listelli in legno della struttura. Foto realizzata durante le prove di laboratorio da K. Brini, C. Longo, A. Bohn, R. Mazelli. Laboratorio didattico MakeLab, Marzo 2022.

1.5 Conclusioni

Nel testo *Light Earth Building* (2016), per determinare il rapporto tra terra e paglia in composti di diversa densità, l'autore ha ipotizzato che la quantità di paglia in 1 m³ di materiale fosse sempre di circa 70 kg (figura 13). Per determinare la quantità di terra, si può seguire il seguente procedimento:

$$D(\text{terra}) = D(\text{composto}) - D(\text{paglia})$$

Otteniamo pertanto:

COMPOSTO D1

$$D(\text{terra}) = 78,07 - 70 = 8,07 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

COMPOSTO D2

$$D(\text{terra}) = 130,66 - 70 = 60,66 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

Tuttavia i risultati ottenuti da calcolo non rispecchiano gli esiti del laboratorio (tabella 1). La densità della paglia utilizzata infatti è intorno a 50 kg/m³, notevolmente inferiore al valore suggerito dal testo sopracitato. Questa discrepanza è probabilmente dovuta a tre fattori: al tipo di paglia utilizzata, alla costipazione del composto e al tipo di struttura.

Dopo aver chiarito le ragioni che

Dry bulk density		Lightweight mix 600 kg/m ³		Heavy mix 1,000 kg/m ³	
Aggregate	Density	Dry earth proportion ¹⁾	Earth required, crumbly, poured ²⁾	Dry earth proportion ¹⁾	Earth required, crumbly, poured ²⁾
	kg/m ³	kg/m ³	m ³ /m ³	kg/m ³	m ³ /m ³
Straw	70-90	520	0.4	920	0.7
Fine fibres	150	450	0.3	850	0.6
Woodchips	300	300	0.2	700	0.5
Foamed clay	350	250	0.2	650	0.5
Pumice	600	-	-	400	0.3

1) Earth proportion = bulk density - aggregate density (kg/m³)
 2) Earth required at a dry pouring density of 1,400 kg/m³
 Earth required = earth proportion / dry pouring density (m³/m³)

Figura 13

“Proporzioni di miscelazione per 1 m³ di terra alleggerita compattata”

Light Earth building; p.77

Densità apparente (kg/m ³)	D paglia (kg/m ³)	D terra (kg/m ³)	% Paglia	% Terra
100	50	50	50	50
200	50	150	25	75
300	50	250	17	83
400	50	350	13	88
500	50	450	10	90
600	50	550	8	92

Tabella 1

Determinazione delle proporzioni tra terra e paglia per composti in terra alleggerita di densità inferiori a 600kg/m³ considerando una densità della paglia di 50kg/m³

hanno portato all'ottenimento tali risultati, si vuole proseguire con la progettazione del padiglione in terra-paglia, andando ad approfondire lo studio di composti a bassa densità. Questi verranno poi confrontati con le miscele più dense che sono state già indagate nel primo volume di questo elaborato.¹⁴

Saranno quindi indagati composti con densità inferiori ai 800 kg/m³.

Per determinare i rapporti di miscelazione è necessario tenere in considerazione il tipo di struttura alla quale associarli.

Nel caso in cui si voglia proseguire con la sperimentazione della struttura a incastro progettata dall'ingegnere Toki Hirokazu, sarebbe opportuno considerare come densità della paglia il valore indicato nei risultati

di laboratorio (50 kg/m³). I rapporti di miscelazione saranno quelli indicati nella tabella 1.

In vista dell'imminente edificazione del padiglione, siamo state costretti ad abbandonare lo studio di tale tecnica costruttiva e studiare una struttura a telaio in legno, sistema strutturale comunemente adoperato in edilizia. Conseguentemente per determinare le proporzioni di terra e paglia è preferibile considerare come densità della paglia il valore suggerito da Volhard in *Light Earth* (70 kg/m³), ottenendo i rapporti indicati nella tabella 2. Come è stato dimostrato dalle prove in laboratorio, proporzioni specifiche di terra, paglia e acqua sono difficili da riprodurre e misurare in cantiere; è quindi consigliabile determinarle prima della costruzione del padiglione attraverso esperimenti con cubi di prova.

¹⁴ K. Brini, op. cit., pp. 97-105.

Densità apparente (kg/m ³)	Densità paglia (kg/m ³)	Densità terra (kg/m ³)	% Paglia	% Terra
100	70	30	70%	30%
200	70	130	35%	65%
300	70	230	23%	77%
400	70	330	18%	83%
500	70	430	14%	86%
600	70	530	12%	88%

Tabella 2

Determinazione delle proporzioni tra terra e paglia per composti in terra alleggerita di densità inferiori a 600kg/m³ considerando una densità della paglia di 50kg/m³

Capitolo 2

28

34

36

39

2.1 Conducibilità

2.2 Calore specifico

2.3 Fattore di resistenza al vapore

2.4 Schede tecniche dei composti
in terra-paglia

Parametri termo-igrometrici

Dopo aver studiato le proporzioni ideali per la realizzazione della miscela di terra, acqua e paglia, averne testato la fattibilità costruttiva e aver fatto le dovute considerazioni, siamo state in grado di individuare i composti più adatti al nostro progetto. Tuttavia, la terra e i materiali a base biologica presentano altri vantaggi che vale la pena indagare, vale a dire le loro proprietà igrotermiche, che descrivono come il materiale partecipa al trasferimento di calore e vapore acqueo. Di conseguenza, lo studio di queste proprietà è un primo passo per valutare l'impatto del materiale non solo sul consumo energetico per il riscaldamento, ma anche sul comfort interno, che dipende fortemente dalla temperatura e dall'umidità relativa.¹⁵

Nei capitoli successivi ci

concentreremo sull'analisi di impasti leggeri (densità inferiori ai 600 kg/m³). In particolare andremo a individuare i parametri che influenzano il comportamento termo-igrometrico dei composti.

Saranno analizzati:

- la conducibilità
- il calore specifico
- la permeabilità al vapore.

Sono proprietà intrinseche di ogni materiale, di conseguenza devono essere individuate attraverso determinate prove di laboratorio.

Non avendo a disposizione il tempo e gli strumenti per effettuare le dovute indagini sperimentali ne abbiamo puramente spiegato il procedimento. Per la loro identificazione ci siamo affidati a valori di letteratura che abbiamo confrontato e contestualizzato.

¹⁵ M. Labat, C. Magniont, N.Oudhof, J. Aubert, "From the experimental characterization of the hygrothermal properties of straw-clay mixtures to the numerical assessment of their buffering potential". *Building and Environment*, 2016.

2.1 Conducibilità

La conducibilità termica è importante da considerare per i materiali isolanti di un edificio. Questo parametro caratterizza la capacità di un materiale di condurre il calore. Il coefficiente di conducibilità termica, λ (W/mK), dipende direttamente dalla densità apparente del materiale, che a sua volta è determinata dalle proporzioni di miscelazione tra terra, acqua e paglia e il grado di compattazione (vedi capitolo 1).

Per la determinazione dei valori di conducibilità sono stati confrontate diverse fonti.

Franz Vollhard nel libro *Light Earth Building* indica che per i calcoli delle prestazioni termiche è possibile consultare la norma DIN 4108-4 (Figura 14). La norma prende però in considerazione densità relativamente alte, partendo da 500 kg/m³.

Lo stesso autore ha integrato tali informazioni, realizzando un grafico (Figura 15) nel quale sono forniti i

valori di conducibilità per composti di terra paglia descritti in un intervallo molto ampio partendo dalla densità di 200 kg/m³ fino a 2200 kg/m³.

I valori provengono da fonti diverse: alcuni derivano dalla normativa tedesca, altri da studi scientifici. Questo è dovuto al fatto che ogni documento riporta valori di conducibilità per intervalli di densità diversi. Il grafico è uno strumento di confronto tra diverse fonti, fornendo un quadro sui molteplici composti di terra-paglia, dal più leggero al più pesante. Lo stesso autore specifica che alcune volte ci sono valori diversi per una stessa densità e che in tal caso conviene utilizzare il dato peggiore.

Alla destra del grafico vengono quindi evidenziati i valori più sfavorevoli.

Nel grafico è evidente come siano disponibili molti più valori di conducibilità per densità nell'intervallo tra i 600 kg/m³ e i 1000 kg/m³, questo fa pensare che i dati sia più attendibili. Per densità minori ci troviamo

Bulk density (kg/m ³)	2,000	1,800	1,600	1,400	1,200	1,000	900	800	700	600	500
Thermal conductivity λ (W/mK)	1.1	0.91	0.73	0.59	0.47	0.35	0.3	0.25	0.21	0.17	0.14

Figura 14

Tabella: "Valori di conducibilità termica per materiali a base di terra (DIN 4108-4 2013)"
Light Earth building; p.196

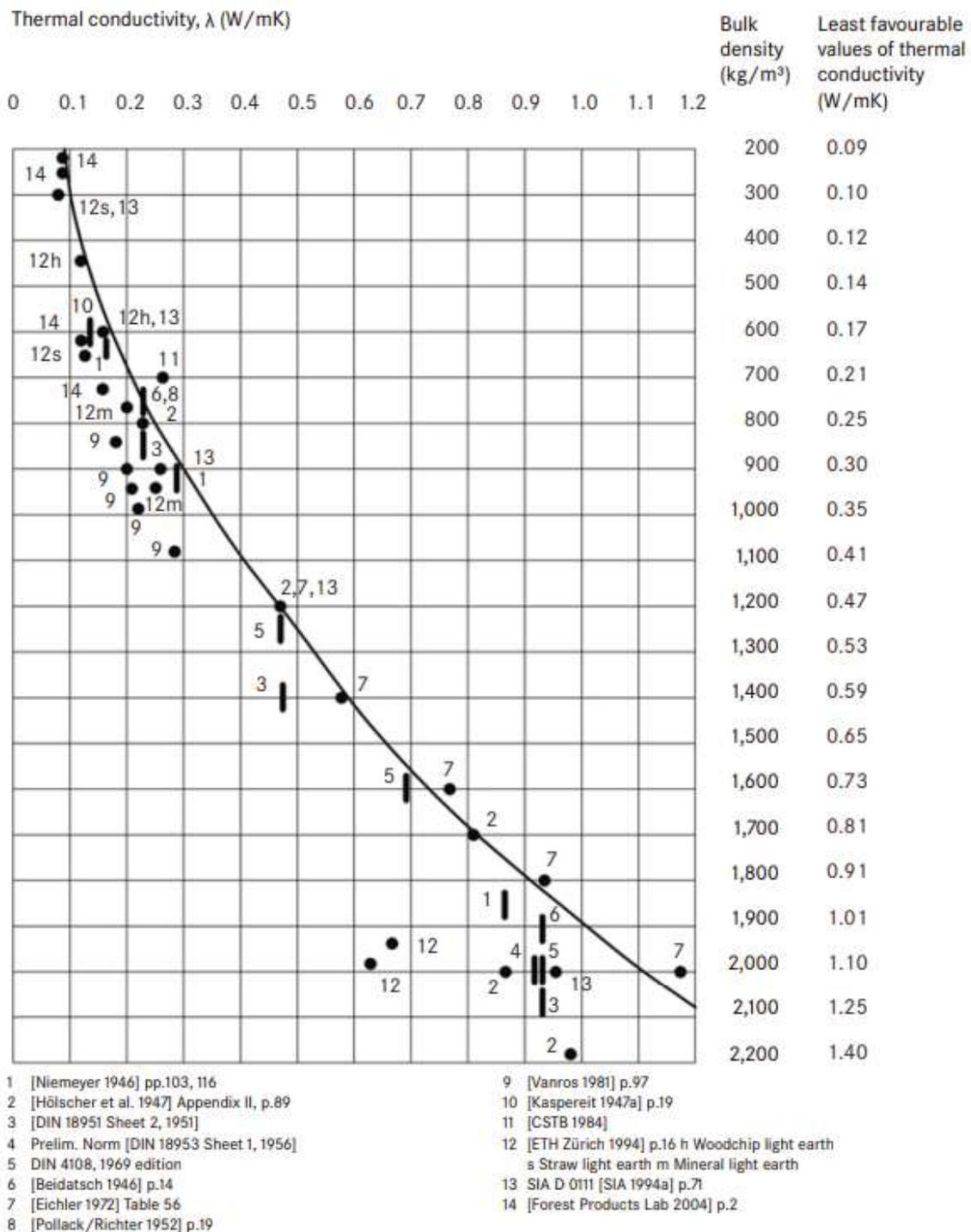


Figura 15

Gráfico “Valori di conducibilità termica per materiali a base di terra basati su valori forniti da letteratura e normative”
Light Earth building; p.201

Densità kg/m ³	Conducibilità W/mK	Trasmittanza con parete da 20 cm W/m ² K	Trasmittanza con parete da 30 cm W/m ² K	Trasmittanza con parete da 40 cm W/m ² K	Trasmittanza con parete da 50 cm W/m ² K
200	0.07	0.35	0.23	0.18	0.14
300	0.09	0.45	0.30	0.23	0.18
400	0.12	0.60	0.40	0.30	0.24
500	0.15	0.75	0.50	0.38	0.30
800	0.25	1.25	0.83	0.63	0.50
1000	0.35	1.75	1.17	0.88	0.90

Tabella 3

Riproduzione della tabella "Rendimento medio (t 20°C, HR-40%) del calcestruzzo grezzo, in funzione dello spessore e della densità (U in W/m²K e R in m²K/W)". *L'isolation thermique écologique*; p.174

nella situazione opposta. Volendo approfondire densità più basse è stato necessario ricercare altre fonti per verificar l'affidabilità dei dati forniti da Volhard.

*L'isolation thermique écologique*¹⁶ fornisce gli strumenti pratici per soddisfare gli esigenti obiettivi di riduzione del consumo energetico degli edifici, proponendo materiali ecologici. Tra questi viene citata

la terra alleggerita e viene fornita una tabella (*tabella 3*) con i valori di conducibilità di composti molto leggeri, con densità inferiori ai 1000 kg/m³. Vengono inoltre indicati i valori di trasmittanza che si otterrebbero in relazione allo spessore della parete. Nel un paper *From the experimental characterization of the hygrothermal properties of straw-clay mixtures to the numerical assessment of their buffering potential* sono state

16 S. Courgey, J. Oliva, *L'isolation thermique écologique, Conception, matériaux, mise en oeuvre - Neuf et réhabilitation*, Terre Vivante, 2010.

Miscele	1	2	3	4	5
Densità Kg/m ³	241	381	403	449	531
Conducibilità W/mK	0.071	0.088	0.099	0.104	0.120

Tabella 4

Riproduzione della tabella "Valori medi di conducibilità termica delle 5 miscele paglia-argilla".
"From the experimental characterization of the hygrothermal properties of straw-clay mixtures to the numerical assessment of their buffering potential"; p.11

determinate le proprietà igrotermiche di campioni di paglia-argilla forniti da due società francesi. Le miscele studiate avevano densità inferiori a 450 kg/m³. I risultati della ricerca evidenziano come questi composti molto leggeri sarebbero adatti come materiali isolanti nelle costruzioni. l'articolo specifica le modalità con cui sono stati ricavati i valori di conducibilità, conformemente alla norma ISO 12664, con un apparecchio a piastra calda¹⁷. Le misurazioni

sono state effettuate a 25 °C con 10 K di differenza di temperatura tra le due piastre. Si presume che lo stato stazionario sia stato raggiunto quando la variazione della conduttività sia inferiore all'1% in 60 minuti.

Prima della prova, i campioni sono stati asciugati in un forno a 55 °C fino a quando la variazione di massa del campione era inferiore di 0,1% tra due pesate a 24 ore di distanza. I risultati presentati sono valori medi di misurazioni effettuate su almeno 3 campioni¹⁸.

I dati raccolti sono stati riportati e

17 NF EN ISO 12664 Thermal performance of building materials and products – Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods – Dry and moist products of medium and low thermal resistance (2001).

18 M. Labat, C. Magniont, N. Oudhof, J. Aubert, op.cit. pp. 3-9

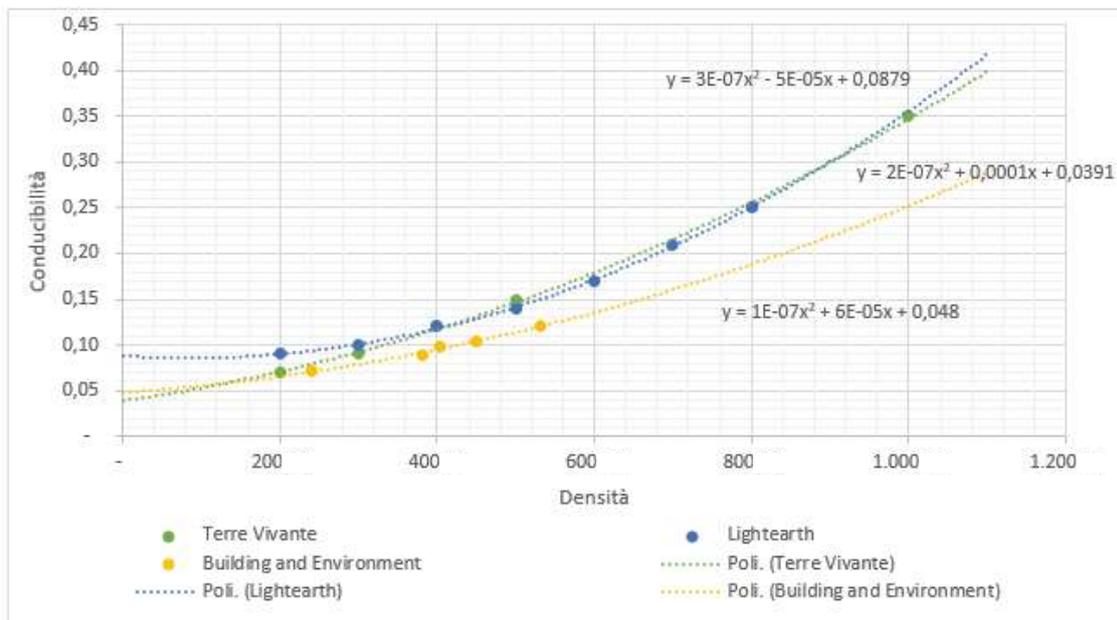


Grafico 1

Confronto dei valori di conducibilità termica dei materiali in terra alleggerita forniti da letteratura

confrontati nel *Grafico 1* e nella *Tabella 5*.

Esaminando il grafico a linee, si può vedere come i risultati di laboratorio siano molto inferiori rispetto a quelli degli altri due lavori. I valori ricavati dai libri *Light Earth Building* (indicati con il colore blu) e *l'isolation thermique écologique* (indicati con il colore verde) sono equiparabili per materiali con densità maggiori o uguali a 300 kg/m³. Osservando i valori di conducibilità di composti molto alleggeriti (con densità inferiori o uguali a 200 kg/m³), si può sottolineare che i dati presentati da Terre Vivante differiscono da Light

Earth in quanto i primi sono piuttosto bassi e più simili a quelli presentati nel paper di Labat et al. . Non volendo fare affidamento su un'unica fonte, è stata eseguita l'interpolazione lineare tra tutti i dati ricercati (*Grafico 2*). Si stabilisce così una linea di tendenza dalla quale si può ottenere il valore di conducibilità interessato. Stime di regressione possono essere eseguite anche per studiare densità inferiori a 200 kg/m³.

Le considerazioni fatte fino a ora ci permettono di determinare i valori di conducibilità dei composti interessati che sono state riassunti nella *Tabella 6*.

DENSITÀ kg/m ³	Conducibilità W/mK Terre Vivante	Conducibilità W/mK Lightearth	Conducibilità W/mK Building and Environment
200	0,07	0,09	
241			0,07
300	0,09	0,10	
381			0,09
400	0,12	0,12	
403			0,10
449			0,10
500	0,15	0,14	
531			0,12
600		0,17	
700		0,21	
800	0,25	0,25	
1.000	0,35		

Tabella 5

Confronto dei valori di conducibilità termica dei materiali in terra alleggerita forniti da letteratura

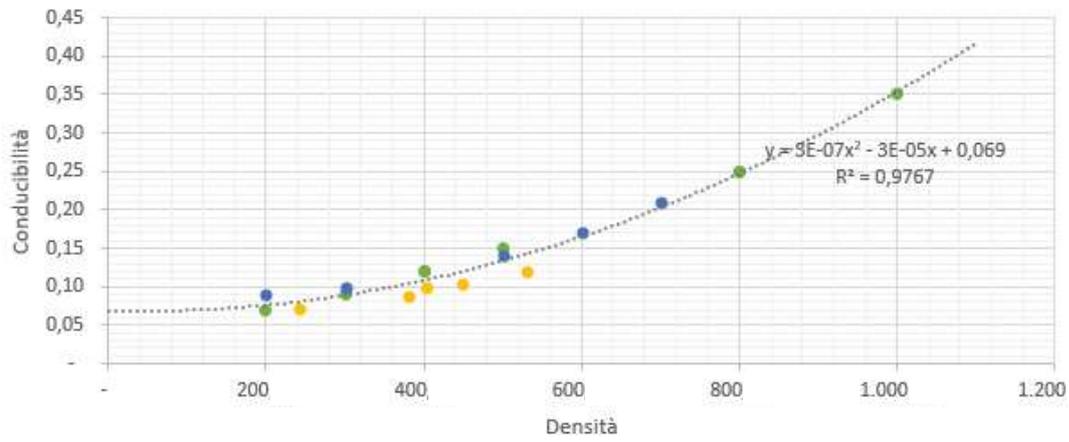


Grafico 2

Confronto dei valori di conducibilità termica dei materiali in terra alleggerita forniti da letteratura

DENSITÀ kg/m ³	CONDUCIBILITÀ W/mK
100	0,069
200	0,075
300	0,087
400	0,105
500	0,129
600	0,159

Tabella 6

Valori di conducibilità termica ricavati per composti di densità inferiori ai 600 kg/m³

2.2 Calore specifico

Il calore specifico (c) è l'energia necessaria per aumentare la temperatura di 1 chilogrammo di un materiale di 1 grado Kelvin.

Per calcolare il calore specifico di un materiale misto (come ad esempio la terra alleggerita) è possibile utilizzare la seguente formula¹⁹:

$$c_{ta} = 1 + (c_f - c_t) F / d$$

Dove:

c_{ta} = calore specifico della terra alleggerita (kJ/kgK)

c_f = calore specifico delle fibre (kJ/kgK)

c_t = calore specifico della terra

(kJ/kgK)

F = proporzione di fibre in peso (kg/m³)

d = Massa volumica della miscela leggera di terra (kg/m³)

Il calore specifico influisce fortemente sulla capacità termica delle strutture, intesa come attitudine ad accumulare energia termica.

La capacità termica specifica dei materiali da costruzione in terra è data come $c = 0.85 \sim 1$ kJ/kgK, mentre quella della paglia è oltre il doppio: 2,0 kJ/kgK²⁰. Il calore specifico è l'unico parametro che è stato ricavato in maniera analitica, per questo motivo verrà di seguito spiegato il

¹⁹Volhard F., op. cit., p. 206

²⁰Volhard F., op. cit.p.206

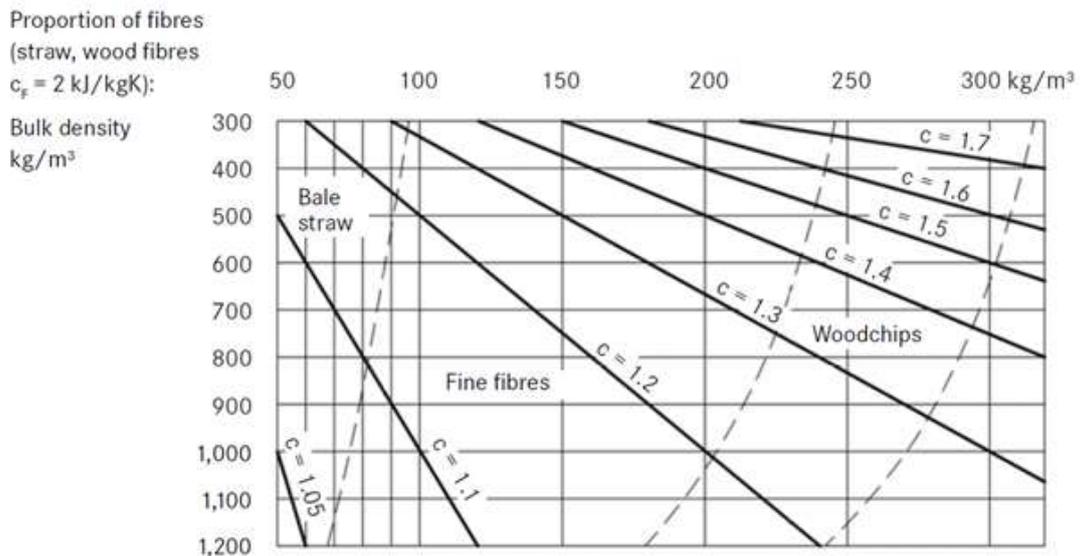


Figura 16

Grafico "Calore specifico, c , della terra alleggerita in rapporto al tipo di fibre contenuto"
Light Earth building; p.206.

procedimento utilizzato.

Possiamo portare come esempio il calcolo del calore specifico per i due composti ottenuti in laboratorio.

Riprendendo i dati ricavati dal laboratorio (cfr. cap 1) possiamo indicare le proporzioni di miscelazione e la densità apparente dei due composti realizzati:

COMPOSTO D1

Terra = 37%

Paglia = 63%

COMPOSTO D2

Terra = 59%

Paglia = 41%

Pertanto nei due composti abbiamo un rapporto di fibre e una densità apparente pari a:

Fd1 = 49,20 kg/m³

Fd2 = 53,67 kg/m³

Dd1 = 78,07 kg/m³

Dd2 = 130,66 kg/m³

Possiamo quindi calcolare il calore specifico:

$$cd1 = 1 + (2-1)49,20/78,07 = 1.63 \text{ kJ/kgK}$$

$$cd2 = 1 + (2-1)53,67/130,66 = 1.41 \text{ kJ/kgK}$$

Nello stesso modo, sono state calcolate le proporzioni tra terra e paglia e quindi i valori di calore specifico per i composti oggetto di indagine (*Tabella 7*).

Densità (kg/m ³)	Proporzione fibre (kg/m ³)	Calore specifico kJ/kgK
100	0,70	1,70
200	0,35	1,35
300	0,23	1,23
400	0,18	1,18
500	0,14	1,14
600	0,12	1,12

Tabella 7

Valori di calore specifico ricavati per composti di densità inferiori ai 600 kg/m³

2.3 Fattore di resistenza al vapore

La capacità di un materiale di resistere al vapore acqueo è indicata con (μ). Più basso è il valore, maggiore è la permeabilità al vapore del materiale. Il valore $\mu = 1$ è assegnato all'aria. Gli isolanti edili in EPS hanno un valore μ compreso tra 20 e 70, le lane minerali hanno valori molto bassi (inferiori a 5), mentre le barriere al vapore possono raggiungere valori superiori a 100.000²¹.

Il valore μ della terra-paglia è molto basso rispetto a quello di altri materiali edili, e varia poco per diverse formulazioni di miscela e gradi di

compattazione. Questa proprietà è notevolmente influenzato dalla porosità e dalla dimensione dei pori. Esistono diverse procedure per misurare la permeabilità al vapore acqueo. Il più comunemente usato è il *cup test* descritto dalla norma EN-ISO 12572²².

Nel test sopracitato, è possibile adottare due approcci: a tazza asciutta e a tazza bagnata²³.

Questi test hanno configurazioni sperimentali simili ma con condizioni diverse. Nel primo caso, la tazza contiene materiale solido mentre nel secondo l'acqua liquida.

21M. Reif, J. Zach, J. Hroudová, "Studying the properties of particulate insulating materials on natural basis", *International Conference on Ecology and new Building materials and products, ICEBMP 2016*; Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Brno.

22NF EN ISO 12572 Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties (2001).

23M. Labat, C. Magniont, N.Oudhof, J. Aubert, op. cit. p.12

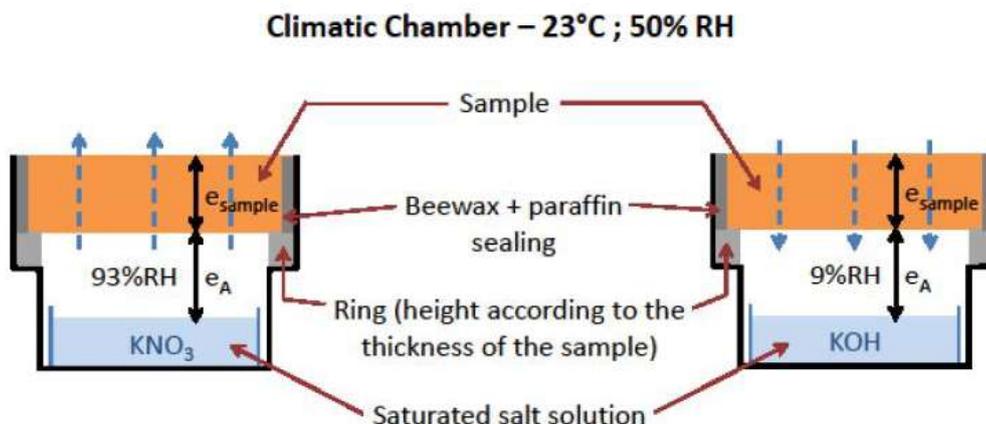


Figura 17

"Principio del metodo a tazza per la misurazione della permeabilità al vapore acqueo"

From the experimental characterization of the hygrothermal properties of straw-clay mixtures to the numerical assessment of their buffering potential, p.10

Il metodo della tazza bagnata dovrebbe essere utilizzato ogni volta che si prevede un'elevata umidità relativa in prossimità del materiale testato, mentre quando i livelli di umidità relativa sono inferiori dovrebbe essere utilizzata la prova a secco.

A causa della differenza di pressione di vapore tra l'interno della tazza e l'ambiente esterno umido, si formerà un flusso di vapore acqueo che farà variare la massa della tazza.

I contenitori vengono pesati a intervalli di tempo regolari e i valori di massa sono tracciati in base al tempo.

L'equilibrio si considera raggiunto quando almeno tre valori sono sulla stessa linea, quindi la quantità di vapore acqueo che passa attraverso il campione, nell'unità di tempo, è

costante²⁴. Non potendo eseguire le dovute prove di laboratorio ci siamo affidati a dati ricavati da letteratura.

Per la determinazione del fattore di resistenza al vapore acqueo sono stati presi a riferimento i valori della *Figura 18*²⁵.

I composti di terra-paglia hanno una elevata diffusione al vapore. Questa loro caratteristica rende il materiale molto adatto per sistemi di isolamento capillare aperti. I materiali isolanti capillari hanno una bassa conduttività termica, un'elevata permeabilità al vapore e la capacità di condurre l'umidità.

La resistenza alla diffusione del vapore per densità inferiori a 300 kg/m³ è stata ottenuta graficamente (*Grafico*

24 Rasha Mustapha, Assaad Zoughaib, Nesreen Ghaddar, Kamel Ghali, "Modified upright cup method for testing water vapor permeability in porous membranes", *Energy*, Volume 195, 2020, pp. 2-3.

25 Volhard F., op. cit., p. 210

Earth building material	Bulk density (kg/m ³)	μ (-)
Straw-clay and monolithic earth	1,200-2,100	5/10
Light earth	600-1,200	3/5
Light earth	300-600	2/5

Figura 18

"Valori dei fattori di resistenza al vapore acqueo per i materiali da costruzione a base di terra"

Light Earth building; p.210.

3). Attraverso un'interpolazione dei dati ricavati da letteratura è stato possibile determinare una linea di tendenza che ci ha permesso di individuare i valori di tale coefficiente per tutte le densità considerate nella *Tabella 8*.

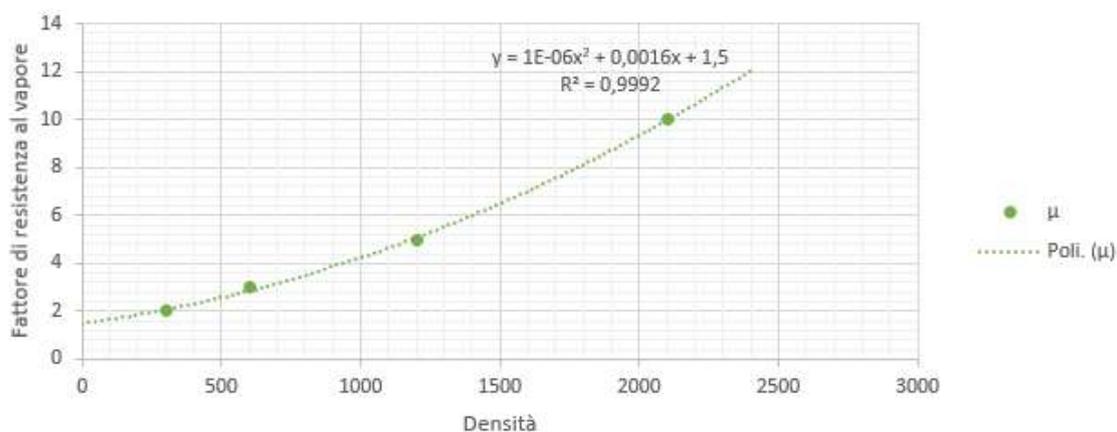


Grafico 3

Fattore di resistenza al vapore ricavati attraverso un'interpolazione dei dati

Densità (kg/m³)	Fattore di resistenza al vapore μ
100	1,7
200	1,9
300	2,1
400	2,3
500	2,6
600	2,8

Tabella 8

Fattore di resistenza al vapore per composti di densità inferiori ai 600 kg/m³

2.4 Schede tecniche dei composti in terra-paglia

Per continuare la progettazione del padiglione sono riassunti tutti i valori individuati per i parametri descritti (Tabella 9).

Grazie a questi dati è possibile creare delle “schede tecniche” per ognuno dei composti. In questo modo sarà possibile utilizzare tali materiali per lo studio di stratigrafie per il padiglione. Questo faciliterà la progettazione termica dei tamponamenti. Le schede tecniche create saranno inserite in un

software per il calcolo termico²⁶.

Termolog contiene al suo interno un ampio archivio per i materiali termici: l'aggiornamento di tale archivio con materiali personalizzati ci ha permesso di svolgere simulazioni il più possibile fedeli alla realtà.

²⁶ Termolog, software per la termotecnica, Logical Soft, Milano

Densità apparente	Conducibilità	Calore specifico	Fattore resistenza al vapore
kg/m ³	W/mK	kJ/kgK	
100	0,07	1,70	1,7
200	0,08	1,35	1,9
300	0,09	1,23	2,1
400	0,11	1,18	2,3
500	0,13	1,14	2,6
600	0,16	1,12	2,8

Tabella 9

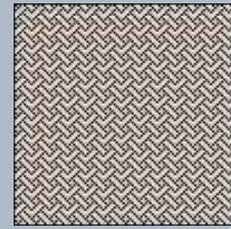
Valori delle proprietà termo.igrometriche indagate per composti di densità inferiori ai 600 kg/m³

TESI_TERRAPAGLIA D100

CARATTERISTICHE

Categoria: Terra-Paglia

Densità ρ : 100 kg/m³



PARAMETRI TERMO-IGROMETRICI

Conduttività indicativa di riferimento λ : 0,069 W/(m K)

Capacità termica c : 1,7 kJ/(kg K)

Fattore di resistenza alla diffusione del vapore μ : 1,70

Permeabilità al vapore δa : 117,6471 x 10⁻¹² kg/(msPa)

PROPOZIONI MISCELAZIONE

Cubi di prova
Volume = 0.3 m³

D paglia (kg/m ³)	D terra (kg/m ³)	% Paglia	% Terra
50	50	50	50
70	30	70	30

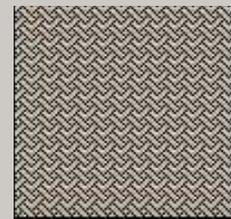
V Paglia	V Terra
0,15	0,15
0,21	0,09

TESI_TERRAPAGLIA D200

CARATTERISTICHE

Categoria: Terra-Paglia

Densità ρ : 200 kg/m³



PARAMETRI TERMO-IGROMETRICI

Conduttività indicativa di riferimento λ : 0,075 W/(m K)

Capacità termica c : 1,35 kJ/(kg K)

Fattore di resistenza alla diffusione del vapore μ : 1,90

Permeabilità al vapore δa : 105,2632 x 10⁻¹² kg/(msPa)

PROPOZIONI MISCELAZIONE

Cubi di prova
Volume = 0.3 m³

D paglia (kg/m ³)	D terra (kg/m ³)	% Paglia	% Terra
50	150	25	75
70	130	35	65

V Paglia	V Terra
0,08	0,23
0,11	0,20
0,14	0,17

TESI_TERRAPAGLIA D300

CARATTERISTICHE

Categoria: Terra-Paglia

Densità ρ : 300 kg/m³



PARAMETRI TERMO-IGROMETRICI

Conduktività indicativa di riferimento λ : 0,087 W/(m K)

Capacità termica c : 1,23 kJ/(kg K)

Fattore di resistenza alla diffusione del vapore μ : 2,10

Permeabilità al vapore δa : 95,2381 x 10⁻¹² kg/(msPa)

PROPOZIONI MISCELAZIONE

Cubi di prova
Volume = 0.3 m³

D paglia (kg/m ³)	D terra (kg/m ³)	% Paglia	% Terra
50	250	17	83
70	230	23	77

V Paglia	V Terra
0,05	0,25
0,07	0,23

TESI_TERRAPAGLIA D400

CARATTERISTICHE

Categoria: Terra-Paglia

Densità ρ : 400 kg/m³



PARAMETRI TERMO-IGROMETRICI

Conduktività indicativa di riferimento λ : 0,105 W/(m K)

Capacità termica c : 1,18 kJ/(kg K)

Fattore di resistenza alla diffusione del vapore μ : 2,30

Permeabilità al vapore δa : 86,95652 x 10⁻¹² kg/(msPa)

PROPOZIONI MISCELAZIONE

Cubi di prova
Volume = 0.3 m³

D paglia (kg/m ³)	D terra (kg/m ³)	% Paglia	% Terra
50	350	13	88
70	330	18	83

V Paglia	V Terra
0,04	0,26
0,05	0,25

TESI_TERRAPAGLIA D500

CARATTERISTICHE

Categoria: Terra-Paglia

Densità ρ : 500 kg/m³



PARAMETRI TERMO-IGROMETRICI

Conduktività indicativa di riferimento λ : 0,129W/(m K)

Capacità termica c : 1,14 kJ/(kg K)

Fattore di resistenza alla diffusione del vapore μ : 2,6

Permeabilità al vapore δ_a : 76,92308 x 10⁻¹² kg/(msPa)

PROPOZIONI MISCELAZIONE

Cubi di prova
Volume = 0.3 m³

D paglia (kg/m ³)	D terra (kg/m ³)	% Paglia	% Terra
50	450	10	90
70	430	14	86
90	410	18	82

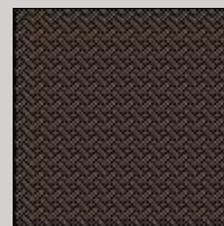
V Paglia	V Terra
0,03	0,27
0,04	0,26
0,05	0,25

TESI_TERRAPAGLIA D600

CARATTERISTICHE

Categoria: Terra-Paglia

Densità ρ : 600 kg/m³



PARAMETRI TERMO-IGROMETRICI

Conduktività indicativa di riferimento λ : 0,159 W/(m K)

Capacità termica c : 1,12 kJ/(kg K)

Fattore di resistenza alla diffusione del vapore μ : 2,80

Permeabilità al vapore δ_a : 71,42857 x 10⁻¹² kg/(msPa)

PROPOZIONI MISCELAZIONE

Cubi di prova
Volume = 0.3 m³

D paglia (kg/m ³)	D terra (kg/m ³)	% Paglia	% Terra
50	550	8	92
70	530	12	88

V Paglia	V Terra
0,03	0,28
0,04	0,27

Capitolo 3

46

47

51

52

53

3.1 Resistenza termica

3.2 Assorbimento e scarico igroscopico dell'umidità

3.3 Il ruolo dei pori

3.4 Capacità di ritenzione termica

3.5 Presentazione del progetto

Proprietà fisiche

confortevole, mentre l'aggregato a base biologica, altamente poroso, contribuisce all'isolamento termico. Inoltre, naturalmente, entrambi sono altamente biocompatibili e hanno basso impatto ambientale.

Oltre alle proprietà intrinseche dei materiali trattare fino a ora è possibile fare numerose considerazioni sulle prestazioni termoigrometriche dei materiali in terra alleggerita. I temi affrontati nel seguente capitolo sono necessari per una corretta progettazione dei diversi componenti edilizi.

La terra alleggerita è un materiale composito molto interessante dal punto di vista termico.

Rispetto alla terra, i materiali a base biologica (in questo caso la paglia) hanno una conduttività termica inferiore e possono quindi essere utilizzati come materiale termoisolante.

Il bio composto terra-paglia può quindi racchiudere i rispettivi vantaggi della paglia e della terra, che sono complementari: la terra può essere utilizzata per mantenere un ambiente interno

3.1 Resistenza termica

Le pareti non dovrebbero lasciarsi attraversare facilmente dal flusso di calore. La bassa conducibilità di un materiale limita il trasferimento di calore, ma anche lo spessore del materiale gioca un ruolo importante. Dal rapporto fra lo spessore e il lambda dell'isolante si ottiene il valore di resistenza termica R espressa in m²K/W. All'aumentare dello spessore aumenterà la resistenza termica dello strato di materiale.

$$R = \Sigma t / \lambda \text{ (m}^2\text{K/W)}$$

Un isolamento adeguato è un prerequisito per evitare fenomeni di condasazione. Nei periodi invernali, elementi da costruzione con bassa resistenza termica hanno superfici fredde. Se la superficie delle pareti interne è fredda l'umidità trasportata dall'aria può provocare fenomeni di

condensa superficiale. Se questo accade regolarmente, a lungo andare, può verificarsi la formazione di muffa. Per evitare questo sarà quindi necessario progettare pareti sufficientemente isolanti e minimizzare i ponti termici (vedi capitolo 4.7).

Di seguito verranno riportati i valori di resistenza termica per i composti studiati in relazione a ipotetici spessori di parete.

Densità apparente kg/m ³	Conducibilità W/mK	Resistenza termica (m ² K/W)				
		0,20 m	0,25 m	0,30 m	0,35 m	0,40 m
100	0,07	2,90	3,62	4,35	5,07	5,80
200	0,08	2,67	3,33	4,00	4,67	5,33
300	0,09	2,30	2,87	3,45	4,02	4,60
400	0,11	1,90	2,38	2,86	3,33	3,81
500	0,13	1,55	1,94	2,33	2,71	3,10
600	0,16	1,26	1,57	1,89	2,20	2,52

Tabella 8

Valori di resistenza termica in relazione a diversi spessori di parete.

3.2 Assorbimento e scarico igroscopico dell'umidità

La terra-paglia è un materiale igroscopico. L'igroscopicità è l'attitudine di un materiale ad trattenere l'umidità presente nell'ambiente circostante. La terra alleggerita è in grado di assorbire umidità e di rilasciarla nel tempo. L'accumulo e il rilascio di umidità avviene però in modo graduale.

La struttura di un edificio deve rimanere asciutta e l'assorbimento di acqua deve essere evitato.

L'umidità può essere assorbita solo entro certi limiti.

Per un particolare livello di umidità relativa dell'aria ambiente, vi è un livello di umidità equilibrio equivalente del materiale. Il contenuto di umidità di equilibrio è il contenuto di umidità al quale il materiale non assorbe e desorbe più umidità²⁷.

In condizioni ambientali standard di temperatura, pressione e umidità relativa (non superiore al 70%), il contenuto di umidità di equilibrio negli involucri di terra varia tra lo 0,5% e il

7%²⁸.

Rispetto ad altri materiali da costruzione, i materiali da costruzione in terra cruda, compresa la terra-paglia, hanno una bassa umidità di equilibrio: di conseguenza possono essere considerati materiali "secchi" (Figura 19). Il punto di equilibrio viene calcolato nel seguente modo:

Tenore di umidità per massa

$$u(\text{massa}) = (m_w - m_d) 100 / m_d \text{ (M\%)}$$

Tenore di umidità in volume

$$u(\text{volume}) = u(\text{massa}) \rho \text{ (Vol\%)}$$

dove:

m_w = Massa umida

m_d = massa a secco

ρ = Massa volumica

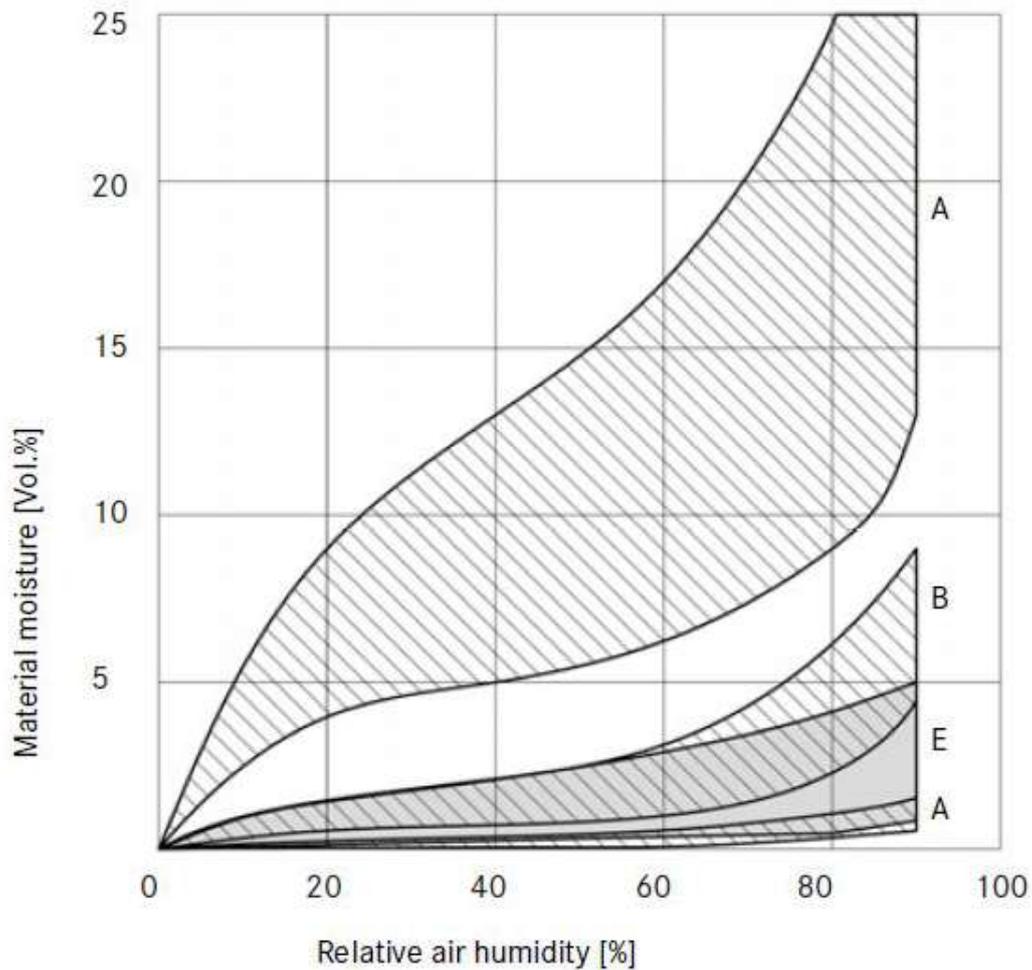
L'umidità pratica (u_v) è la quantità di umidità presente in un materiale che, in condizioni normali (ambiente con un umidità non superiore al 70%), non dovrebbe essere superato²⁹. Secondo Franz Volhard si può supporre un contenuto di umidità pratica per i materiali in terra alleggerita di $u_v = 3\%$.

L'umidità relativa del materiale può essere valutata mediante la costruzione di curve di assorbimento-desorbimento. La Figura 20 mostra

²⁷R. Caponetto, F. Nocera, "Hygrothermal Properties of Raw Earth Materials", Department of Civil Engineering and Architecture, University of Catania, Catania.

²⁸R. Caponetto, F. Nocera, op. cit., p. 4

²⁹Volhard F., op. cit., p.211



Legend:

- A Fired brick, gypsum¹⁾
- B Concrete, lightweight concrete, aerated concrete, lime-sand brick¹⁾
- C Wood, paper, organic fibres (wool, silk, linen)¹⁾
- E Earth building materials²⁾

Sources:

- 1) [Gösele/Schüle/Künzel 1997]
- 2) after the source of figure 317 [Hafezi 1996], [Goosens 1995], [Vanros 1981], [Figgemeier 1994], [Minke 1994], [Ziegert 2003], [Holl/Ziegert 2002]

Figura 19

Grafico: "Confronto tra l'umidità di assorbimento dei materiali da costruzione"

Volhard, Franz, *Lehm-feucht oder trocken? Lehmstoffe und Raumklima*. In: Pitz, Achim (Ed.): *Lehm im Innenraum*.

Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2010, pp. 29-36

Figura ricavata da *Light Earth building*; p.211

un grafico creato da Franz Volhard in uno studio del 2010³⁰ nel quale sono stati confrontati test differenti su materiali a base di terra di diverse densità. Le prove sottopongono i composti a improvvisi aumenti di umidità (dal 50% all'80 % a 20 °C.). Queste prove espongono la superficie ad un umidità dell'80% aggiungendo continuamente acqua per molte ore allo scopo simulare l'aumento dell'umidità relativa all'interno di un ambiente. In una reale paragonabile situazione, dopo azioni come la cottura di cibi o la produzione di vapore durante una doccia si aprirebbe una finestra per consentire l'umidità di fuggire. Ma anche in tali condizioni estreme, il livello di umidità relativa di un intonaco di terra aumenta solo di circa 0,05 vol% dopo un'ora. Quando la terra viene addizionata con fibre naturali l'umidità di equilibrio aumenta. Questo è evidente nei test effettuati da Minke (1994)³¹ che nel grafico sono rappresentati da delle linee tratteggiate. Nello studio, che

si basava sulla terra alleggerita, vengono riportate le curve di umidità di composti con densità che vanno dai 550 ai 1200 kg/m³. Al diminuire della densità la curva dell'umidità relativa si abbassa.

Tali prove mostrano chiaramente che la terra può mantenere in modo affidabile sia la costruzione sia l'ambiente interno secchi per lunghi periodi di tempo³². Materiali organici, come legno, fibre vegetali o paglia, assorbono più umidità. L'aggregato, che nel nostro caso è la paglia, contribuisce ad abbassare i livelli di umidità del materiale.

In fase di asciugatura, la capillarità della terra dovrebbe estrarre l'acqua dalla paglia (più umida), per poi disperderla nell'ambiente circostante. Questo offre anche una spiegazione sul perché il legno (e la paglia) trovati in vecchie strutture a graticcio sia stato in grado di sopravvivere intatto per molti centinaia di anni³³.

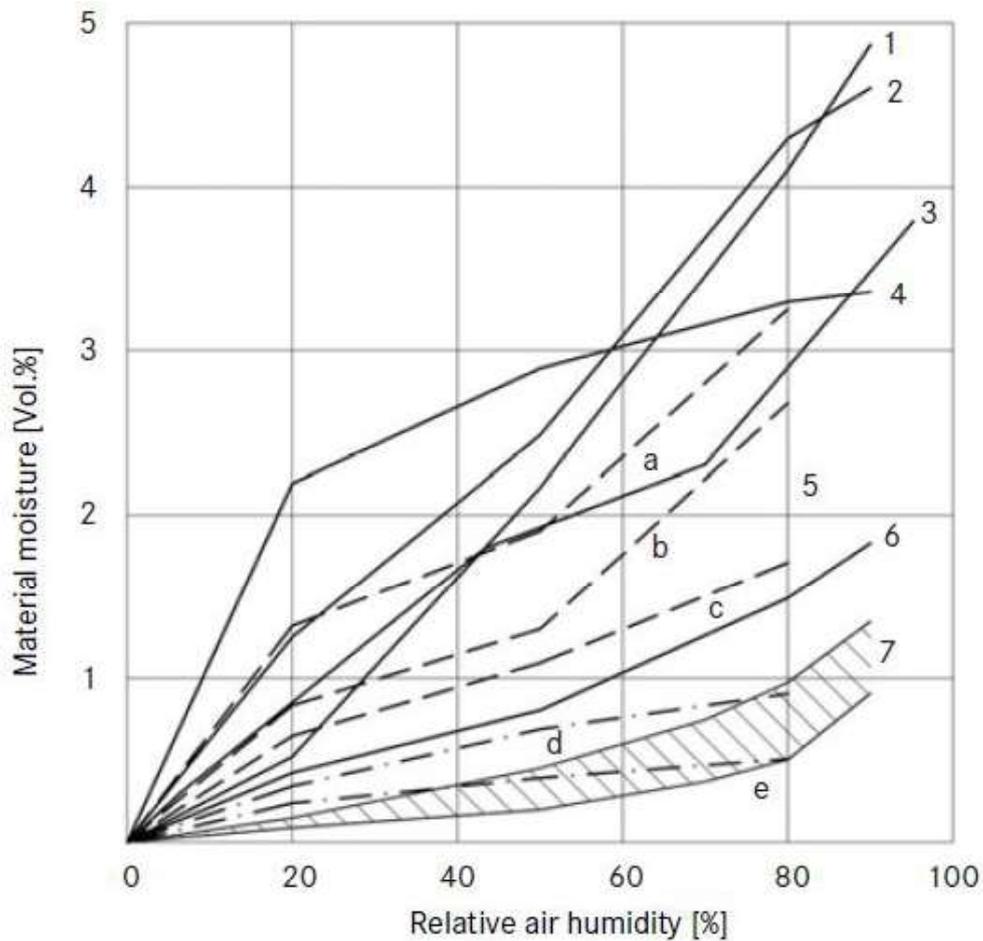
Un contenuto di umidità superiore al 18% può favorire la crescita di funghi nei materiali di terra, specialmente se addizionati con fibre naturali.

30 Volhard, F., *Lehm-feucht oder trocken? Lehmbaumstoffe und Raumklima*. In: Pilz, Achim (Ed.): *Lehm im Innenraum*. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2010, pp. 29-36

31 Minke, Gernot, *Lehmbau Handbuc. Der Baustoff Lehm und seine Anwendung*, Okobuch-Verlag Staufen, 1994

32 Volhard F., op. cit., pp. 213-214

33 Ibid



Legend:

- 1 Historical straw-clay, 1,800 kg/m³ [Hafezi 1996]
- 2 Historical earth bricks, Flamen 1,760 kg/m³ [Goosens 1995]
- 3 Historical straw-clay, Belgium 1,250 kg/m³ [Vanros 1981]
- 4 Historical straw-clay, 1,640 kg/m³ [Figgemeier 1994]
- 5 Straw light earth, a 1,200 kg/m³, b 850 kg/m³, c 450 kg/m³,
Expanded clay light earth, d 700 kg/m³, e 550 kg/m³ [Minke 1994]
- 6 Historical cob wall, 1,500 kg/m³ [Ziegert 2003]
- 7 Earth plasters, 1,850–1,650 kg/m³ [Holl/Ziegert 2002]

Figura 20

Grafico: "Confronto tra l'umidità di assorbimento dei materiali in terra"

Volhard, Franz, *Lehm-feucht oder trocken? Lehmbaumstoffe und Raumklima*. In: Pilz, Achim (Ed.): *Lehm im Innenraum*.

Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2010, pp. 29-36

Figura ricavata da *Light Earth building*; p.211

3.3

Il ruolo dei pori

La terra alleggerita è un materiale altamente poroso. La struttura porosa influenza diverse caratteristiche fisiche di questo materiale; in particolare determina la sua capacità di assorbire e dissipare umidità in forma liquida.

Per fare un confronto con altri materiali da costruzione di uso comune, possiamo evidenziare come il mattone cotto abbia un sistema capillare molto sviluppato. La presenza di micropori comunicanti all'interno della sua struttura gli permette di assorbire rapidamente grandi quantità di umidità e di asciugarsi con altrettanta facilità. Il calcestruzzo è un materiale molto più denso, in conseguenza assorbe e rilascia l'umidità lentamente³⁴.

Come già anticipato è fondamentale che l'assorbimento e il rilascio di acqua siano in equilibrio. Studi sulla terra alleggerita³⁵ mostrano che il volume totale dei micropori è relativamente basso, determinando un'umidità di

equilibrio molto bassa: leggermente superiore a quella del mattone, ma inferiore a quella del calcestruzzo aerato³⁶. I micropori ($<0,1 \mu\text{m}$) assorbono l'umidità atmosferica per igroscopicità fino al raggiungimento del contenuto di umidità di equilibrio. I capillari, o pori (da $0,1 \text{ mm}$ a $0,1 \mu\text{m}$), trasportano l'umidità in forma liquida. I pori grandi ($> 0,1 \text{ mm}$) non trasportano acqua, ma possono contenere acqua³⁷.

La maggior parte dei pori sono capillari conduttivi con elevato assorbimento d'acqua. I macropori sono in grado di assorbire e immagazzinare grandi quantità di acqua, ma essa può anche essere rilasciata rapidamente attraverso ai capillari più piccoli.

Le proprietà di conduzione dell'umidità della terra aiutano a garantire che il materiale si asciughi. Allo stesso tempo, i materiali a base di terra devono essere protetti dall'esposizione prolungata all'acqua, ad esempio dalla pioggia, dall'umidità ascendente o da altri fenomeni di ingresso dell'umidità.

34 Gregor A. Scheffler, "Hygric performance of internal insulation with light-weight autoclaved aerated concrete", Xella Technologie- und Forschungsgesellschaft, Kloster Lehnin, Germany

35 Vanros, Guy, "Studie van bouwfysische Kenmerken van Lemen Vakwerkwanden", Final thesis at the Catholic University of Leuven, Belgium, 1981

36 Volhard F., op. cit. p 214-215

37 Ibid.

3.4 Ritenzione termica

Come anticipato nel paragrafo 2.2, una caratteristica fondamentale dei materiali da costruzione è la capacità di ritenzione termica di un elemento edilizio. Questa dipende dal calore specifico, c , dalla densità apparente, ρ , e dallo spessore dell'elemento edilizio.

Capacità di ritenzione termica

$$Q = c \rho t \text{ (kJ/m}^2\text{K)}$$

Un materiale con una buona capacità di ritenzione termica soggetto a fluttuazioni di temperatura uniforme l'ampiezza di fluttuazione e gradualmente raggiunge una temperatura media.

In particolare dove ci sono significative variazioni tra le temperature diurne e notturne, la massa termica equalizza e ritarda il trasferimento della temperatura attraverso l'involucro. Aprendo le finestre di notte il calore immagazzinato può essere rilasciato (un processo noto come "spurgo notturno"), consentendo di assorbirne nuovamente il giorno successivo³⁸.

Di conseguenza in estate, attraverso il raffreddamento notturno, una massa termica interna può essere utilizzata per mantenere l'interno fresco durante

il giorno, mentre in inverno essa può immagazzinare il calore dei raggi del sole (per restituirlo nella notte). Questo effetto è meno desiderabile per gli ambienti che hanno bisogno di essere riscaldati o raffrescati rapidamente.

³⁸ Dobson S., *Rammed earth in the modern world*, Director, Ramtec Pty Ltd 2014

3.5 Presentazione del progetto

Il progetto prevede la realizzazione di un padiglione con tamponamento in terrapaglia.

Verrà realizzato nella zona industriale Il di Grugliasco, in corso Torino, nei pressi del cimitero comunale.

Il padiglione ha pianta rettangolare, con due aperture nei due lati corti (Figura 21) e una copertura monofalda inclinata verso sud.

Diversamente dalla terra cruda, utilizzata per la costruzione di elementi strutturali (ad esempio sotto forma di mattoni, tecnica Adobe), la terra-paglia non ha la resistenza

meccanica per comporre delle pareti portanti.

L'edificio avrà quindi una struttura portante in legno con fondazione in muratura di pietra.

Sono state fatte due ipotesi strutturali, che sono riassunte nella Figura 22.

In entrambe le soluzioni il tamponamento in terrapaglia delle pareti è rialzato di 40 cm rispetto al livello del terreno. Le due proposte gestiscono in modo diverso il dislivello. Nella soluzione A il piano di calpestio è allo stesso livello del terreno. L'ambiente interno è delimitato nella parte inferiore dal basamento in muratura e il ponte termico viene

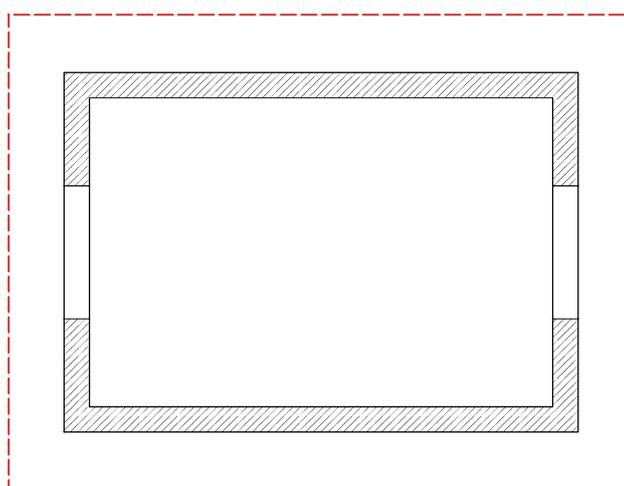


Figura 21

Schema progettuale: padiglione in terra-paglia in pianta.

risolto aggiungendo uno strato di isolamento interno. I pilastri di questa soluzione sono singoli e sono immersi nel tamponamento in terrapaglia.

Nella soluzione B il piano di calpestio è rialzato rispetto al terreno. L'ingresso al padiglione verrà garantito da scalini in legno. Le pareti perimetrali sono composte da un unico strato di terrapaglia. Per contenere il tamponamento sono stati pensati dei pilastri doppi.

Come anticipato, ad ogni componente delle due soluzioni (parete, copertura e solaio) verranno associate delle stratigrafie differenti. In questo modo sarà possibile valutare più possibilità

e scegliere la soluzione migliore a seconda di diversi parametri:

- fattibilità costruttiva
- quantità di legno impiegata
- prestazioni termiche

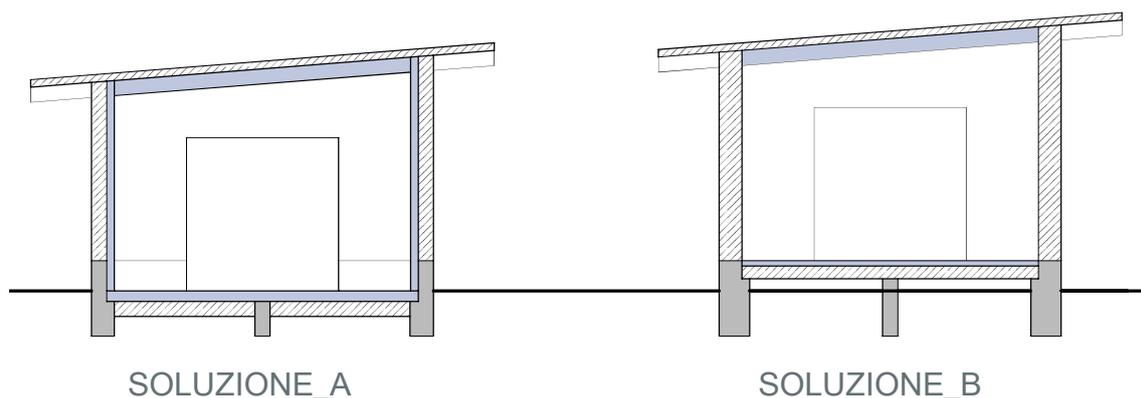


Figura 22

Schemi progettuali: Le due soluzioni del padiglione in terra-paglia

Capitolo 4

59

69

76

79

86

88

94

4.1 Parete A

4.2 Solaio A

4.3 Copertura A

4.4 Struttura A

4.5 Nodi strutturali A

4.6 Particolari costruttivi e ponti termici

4.7 Computo metrico

Proposta progettuale A

BASAMENTO

Questa soluzione prevede la realizzazione di un cordolo di fondazione che penetra per 60 cm nel terreno e fuoriesce di altri 40 cm. In questo modo il tamponamento in terra-paglia rimane separato dal terreno. Il composto viene così protetto dall'umidità di risalita.

Il solaio contro terra, a livello del terreno, ha le travi che poggiano direttamente sul cordolo di fondazione. Un dormiente in legno, posto al di sopra del cordolo in muratura ed ancorato a quest'ultimo attraverso

una giunzione metallica, farà da collegamento tra la fondazione e i pilastri.

PARETI PERIMETRALI

Il tamponamento prevede uno strato in terra-paglia, che verrà realizzato ad umido, e uno strato di isolamento interno. Il procedimento costruttivo per la parete in terra sarà lo stesso sperimentato durante le prove di laboratorio (vedi capitolo 1).

Il composto scelto verrà inserito in casseri che verranno poi rimossi dopo l'asciugatura della parete.

Come anticipato, in questa tesi verranno valutate e confrontate sette

COPERTURA

PARETI PERIMETRALI

BASAMENTO

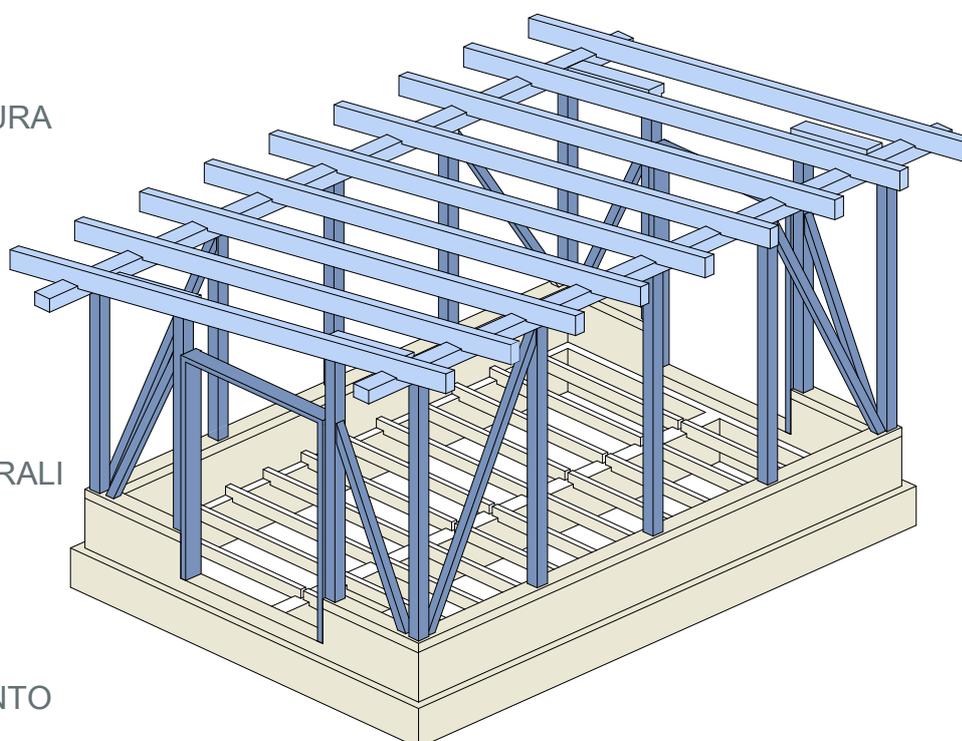


Figura 23

Schema progettuale: Soluzione A, assonometria strutturale

miscele diverse. Ogni composto ha un comportamento diverso e può necessitare di accorgimenti in fase esecutiva.

In associazione a pilastri singoli si è pensato di adottare dei controventi doppi, uno sul lato interno e uno sul lato esterno del pilastro. In questo modo l'elemento non servirà solo a controventare bensì anche a contenere il tamponamento.

È doveroso aggiungere che i controventi sul lato interno fanno anche da ancoraggio ai listelli che sostengono la controparete interna formando l'intercapedine che ospiterà il materiale isolante.

Questo accorgimento è stato ritenuto adatto ad ogni tipo di composto in terra proposto (vedi capitolo 2.4). Per miscele più dense sarà opportuno valutare l'inserimento di listelli orizzontali che possano evitare lo spanciamiento della parete (figura 24). Non avendo testato tutte le tipologie di composto in laboratorio, in questa fase non specifichiamo per quale di questi possa essere ritenuto necessario questo tipo di intervento, ma rimandiamo a una verifica in fase esecutiva.

COPERTURA

La copertura monofalda sarà leggermente inclinata verso sud (7°).

Le ragioni di questa scelta sono due:

- la possibilità, in un futuro, di munire il padiglione di un impianto elettrico che potrebbe essere alimentato da pannelli fotovoltaici.

- la volontà di dare priorità al comfort estivo esponendo la parete con la superficie minore a sud.

Il tetto eccederà di almeno 80 cm dal filo delle pareti per proteggerle dalle precipitazioni atmosferiche. Lo sporto non è così accentuato, in questo modo anche nelle stagioni più fredde, i raggi del sole potranno contribuire al riscaldamento ed eventuale asciugatura delle superfici.

4.1 Parete_A

INTERNO

1. intonaco a base argillosa
2. pannello in gessofibra
3. fibra di cellulosa
4. Terrapaglia
5. intonaco in calce

ESTERNO

La parete è composta da uno strato in terra-paglia interposto tra i pilastri e uno strato di isolamento interno. La controparete interna verrà realizzata con un pannello in gessofibra (non

visibile nella Figura 24) sostenuto da un telaio in listelli di legno. Come isolante è stato scelto la cellulosa, un materiale traspirante, resistente alla degradazione biologica e che non emette sostanze nocive. La finitura interna sarà realizzata con un intonaco in argilla, mentre quella esterna con un intonaco a base di calce idrata.

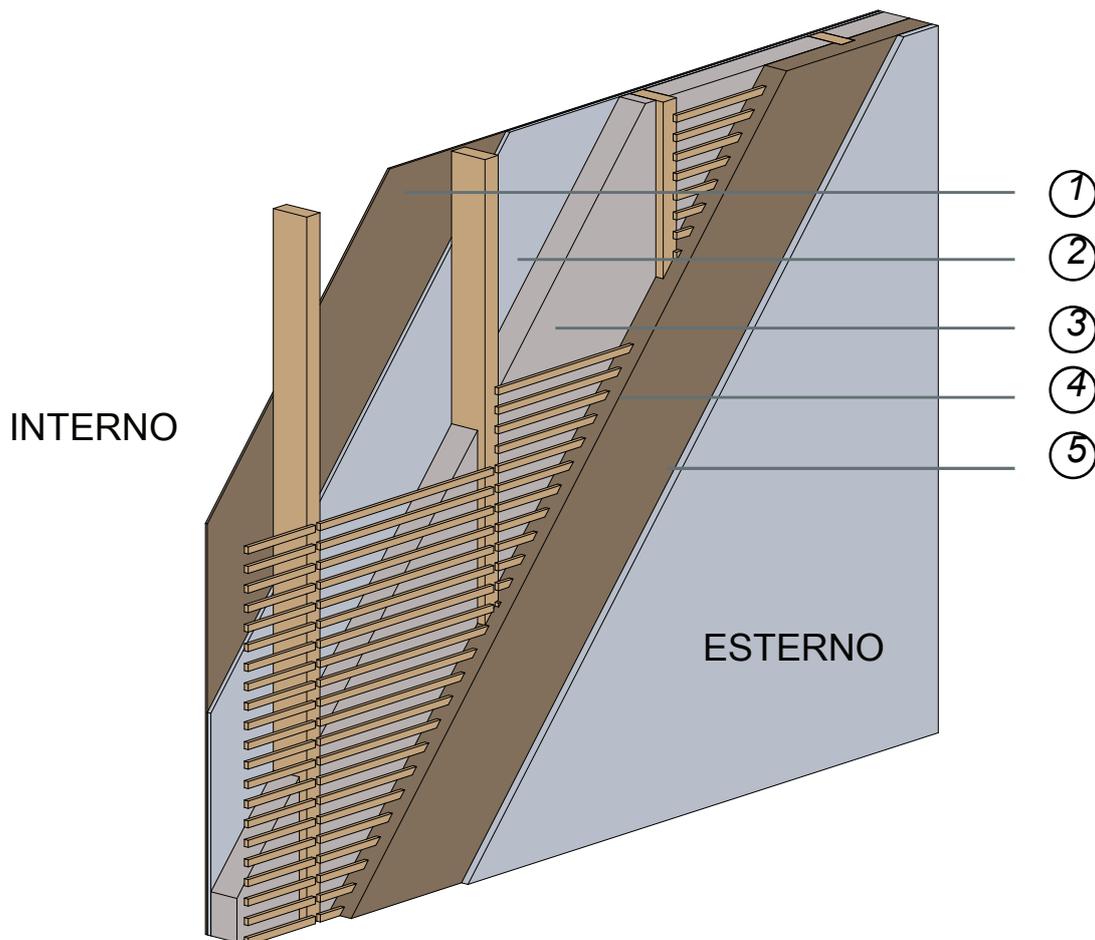


Figura 24

Schema progettuale: Parete A, assonometria

Parete_A100

		Spessore s	Conduttività λ	Resistenza R	Densità ρ	Capacità c	Fattore μ
		mm	W/(mK)	m ² K/W	kg/m ³	kJ/(kgK)	-
	Adduttanza interna (flusso orizzontale)			0,130			
A	TESI_TERMINTONACO CALCEPIASCO	30	0,085	0,353	400	1,50	0,0
B	TESI_TERRAPAGLIA D100	140	0,069	2,029	100	1,70	0,0
C	TESI_CELLULOSA	80	0,039	2,051	70	1,90	0,0
D	Gessofibra fermacell greenline	20	0,320	0,063	1.150	0,26	13,0
E	TESI_INTONACO TERRA E ARGILLA	10	0,900	0,011	1.800	1,00	7,5
	Adduttanza esterna (flusso orizzontale)	-	-	0,040	-	-	-
	TOTALE	280		4,677			

Spessore : 280 mm
Trasmittanza : 0,214 W/m²K

Resistenza termica :4,677 m²K/W
Massa superf.: 43 kg/m²

VERIFICHE DI CONDENSA

La struttura non è soggetta a fenomeni di condensa superficiale.

Metodo di calcolo umidità relativa ambiente interno: classi di concentrazione

Fattore di resistenza superficiale fRsi: 0,6843 (mese di gennaio)

La struttura non è soggetta a fenomeni di condensa interstiziale.

Quantità massima di vapore accumulato mensilmente: Gc: 0,00 kg/m²

Quantità ammissibile di vapore accumulato mensilmente in un'interfaccia: Gc,max: 0,50 kg/m²

CARATTERISTICHE DI INERZIA TERMICA - UNI 13786

Mese massima insolazione: luglio
Temperatura media nel mese di massima insolazione: 23,3 °C
Temperatura massima estiva: 33,9 °C
Escursione termica nel giorno più caldo dell'anno 17,2 °C
Irradianza mensile massima sul piano orizzontale 277,78 W/m²

Sfasamento dell'onda termica: 8h 09'

Capacità termica interna: 21,8 kJ/m²K

Capacità termica esterna: 30,3 kJ/m²K

Trasmittanza periodica Y: 0,104 W/m²K

Parete_A200

		Spessore s	Conduttività λ	Resistenza R	Densità ρ	Capacità c	Fattore μ
		mm	W/(mK)	m ² K/W	kg/m ³	kJ/(kgK)	-
	Adduttanza esterna (flusso orizzontale)			0,040			
A	TESI_TERMINTONACO CALCEPIASCO	30	0,085	0,353	400	1,50	0,0
B	TESI_TERRAPAGLIA D100	140	0,075	1,867	200	1,35	2,0
C	TESI_CELLULOSA	80	0,039	2,051	70	1,90	0,0
D	Gessofibra fermacell greenline	20	0,320	0,063	1.150	0,26	13,0
E	TESI_INTONACO TERRA E ARGILLA	10	0,900	0,011	1.800	1,00	7,5
	Adduttanza interna (flusso orizzontale)	-	-	0,130	-	-	-
	TOTALE	280		4,515			

Spessore : 280 mm
Trasmittanza : 0,222 W/m²K

Resistenza termica : 4,415 m²K/W
Massa superf.: 57 kg/m²

VERIFICHE DI CONDENSA

un'interfaccia:

Gc,max: 0,50 kg/m²

La struttura non è soggetta a fenomeni di condensa superficiale.

Metodo di calcolo umidità relativa ambiente interno: classi di concentrazione

Fattore di resistenza superficiale fRsi: 0,7238 (mese di novembre)

La struttura non è soggetta a fenomeni di condensa interstiziale.

Quantità massima di vapore accumulato mensilmente:

Gc: 0,00 kg/m²

Quantità ammissibile di vapore accumulato mensilmente in

CARATTERISTICHE DI INERZIA

TERMICA - UNI 13786

Sfasamento dell'onda termica:

9h 26'

Fattore di attenuazione 0,3577

Capacità termica interna:

21,8 kJ/m²K

Capacità termica esterna:

30,3 kJ/m²K

Trasmittanza periodica Y:

0,104 W/m²K

Parete_A300

		Spessore s	Conduttività λ	Resistenza R	Densità ρ	Capacità c	Fattore μ
		mm	W/(mK)	m ² K/W	kg/m ³	kJ/(kgK)	-
	Adduttanza esterna (flusso orizzontale)			0,040			
A	TESI_TERMINTONACO CALCEPIASCO	30	0,085	0,353	400	1,50	5,3
B	TESI_TERRAPAGLIA D300	160	0,087	1,839	300	1,23	2,0
C	TESI_CELLULOSA	80	0,039	2,051	70	1,90	2,0
D	GESSOFIBRA	20	0,320	0,063	1.150	0,26	13,0
E	TESI_INTONACO TERRA E ARGILLA	10	0,900	0,011	1.800	1,00	7,5
	Adduttanza interna (flusso orizzontale)	-	-	0,130	-	-	-
	TOTALE	280		4,677			

Spessore : 300 mm
Trasmittanza : 0,223W/m²K

Resistenza termica :4,487 m²K/W
Massa superf.: 77 kg/m²

VERIFICHE DI CONDENSA

La struttura non è soggetta a fenomeni di condensa interstiziale.

Quantità ammissibile di vapore accumulato mensilmente in un'interfaccia:

Gc,max: 0,50 kg/m²

La struttura non è soggetta a fenomeni di condensa superficiale.

Metodo di calcolo umidità relativa ambiente interno: classi di concentrazione

Fattore di resistenza superficiale fRsi:
0,6843 (mese di gennaio)

CARATTERISTICHE DI INERZIA TERMICA - UNI 13786

Sfasamento dell'onda termica:

11h 04'

Fattore di attenuazione 0,4864

Capacità termica interna:

22,2 kJ/m²K

Capacità termica esterna:

28,8 kJ/m²K

Trasmittanza periodica Y:

0,053 W/m²K

Parete_A400

		Spessore s	Conduttività λ	Resistenza R	Densità ρ	Capacità c	Fattore μ
		mm	W/(mK)	m ² K/W	kg/m ³	kJ/(kgK)	-
	Adduttanza esterna (flusso orizzontale)			0,040			
A	TESI_TERMINTONACO CALCEPIASCO	30	0,085	0,353	400	1,50	5,3
B	TESI_TERRAPAGLIA D400	200	0,105	1,905	400	1,18	2,3
C	TESI_CELLULOSA	80	0,039	2,051	70	1,90	2,0
D	GESSOFIBRA	20	0,320	0,063	1.150	0,26	13,0
E	TESI_INTONACO TERRA E ARGILLA	10	0,900	0,011	1.800	1,00	7,5
	Adduttanza interna (flusso orizzontale)	-	-	0,130	-	-	-
	TOTALE	340		4,553			

Spessore : 340 mm
Trasmittanza : 0,220 W/m²K

Resistenza termica: 4,553 m²K/W
Massa superf.: 109 kg/m²

VERIFICHE DI CONDENZA

La struttura non è soggetta a fenomeni di condensa interstiziale.

Quantità ammissibile di vapore accumulato mensilmente in un'interfaccia:

G_{c,max}: 0,50 kg/m²

La struttura non è soggetta a fenomeni di condensa superficiale.

Metodo di calcolo umidità relativa ambiente interno: classi di concentrazione

Fattore di resistenza superficiale fR_{si}:
0,7238 (mese di novembre)

CARATTERISTICHE DI INERZIA TERMICA - UNI 13786

Sfasamento dell'onda termica:

13h 23'

Fattore di attenuazione 0,1296

Capacità termica interna:

22,4 kJ/m²K

Capacità termica esterna:

28,2 kJ/m²K

Trasmittanza periodica Y:

0,028 W/m²K

Parete_A500

		Spessore s	Conduttività λ	Resistenza R	Densità ρ	Capacità c	Fattore μ
		mm	W/(mK)	m ² K/W	kg/m ³	kJ/(kgK)	-
	Adduttanza esterna (flusso orizzontale)			0,040			
A	TESI_TERMINTONACO CALCEPIASCO	30	0,085	0,353	400	1,50	5,3
B	TESI_TERRAPAGLIA D100	210	0,129	1,628	500	1,14	2,6
C	TESI_CELLULOSA	90	0,039	2,308	70	1,90	2,0
D	GESSFIBRA	20	0,320	0,063	1.150	0,26	13,0
E	TESI_INTONACO TERRA E ARGILLA	10	0,900	0,011	1.800	1,00	7,5
	Adduttanza interna (flusso orizzontale)	-	-	0,130	-	-	-
	TOTALE	360		4,532			

Spessore : 360 mm
Trasmittanza : 0,221 W/m²K

Resistenza termica: 4,532 m²K/W
Massa superf. : 134 kg/m²

VERIFICHE DI CONDENSA

La struttura non è soggetta a fenomeni di condensa interstiziale.

Metodo di calcolo umidità relativa ambiente interno: classi di concentrazione

Fattore di resistenza superficiale fR_{si}:
0, (mese di novembre)

La struttura non è soggetta a fenomeni di condensa superficiale.

Quantità massima di vapore accumulato mensilmente:

G_c: 0,00 kg/m²

Quantità ammissibile di vapore accumulato mensilmente in un'interfaccia:

G_{c,max}: 0,50 kg/m²

CARATTERISTICHE DI INERZIA TERMICA - UNI 13786

Sfasamento dell'onda termica:

14h 15'

Fattore di attenuazione 0,3577

Capacità termica interna:

21,8 kJ/m²K

Capacità termica esterna:

30,3 kJ/m²K

Trasmittanza periodica Y:

0,104 W/m²K

Parete_A600

		Spessore s	Conduttività λ	Resistenza R	Densità ρ	Capacità c	Fattore μ
		mm	W/(mK)	m ² K/W	kg/m ³	kJ/(kgK)	-
	Adduttanza esterna (flusso orizzontale)			0,040			
A	TESI_TERMINTONACO CALCEPIASCO	30	0,085	0,353	400	1,50	5,3
B	TESI_TERRAPAGLIA D100	240	0,159	1,509	600	1,12	2,8
C	TESI_CELLULOSA	100	0,039	2,564	70	1,90	2,0
D	GESSOFIBRA	20	0,320	0,063	1.150	0,26	13,0
E	TESI_INTONACO TERRA E ARGILLA	10	0,900	0,011	1.800	1,00	7,5
	Adduttanza interna (flusso orizzontale)	-	-	0,130	-	-	-
	TOTALE	280		4,515			

Spessore : 400 mm
Trasmittanza : 0,214 W/m²K

Resistenza termica : 4,670 m²K/W
Massa superf.: 174 kg/m²

VERIFICHE DI CONDENSA

Metodo di calcolo umidità relativa
ambiente interno: classi di
concentrazione

Fattore di resistenza superficiale fRsi:
0,7238 (mese di novembre)

*La struttura non è soggetta a fenomeni
di condensa superficiale.*

Quantità massima di vapore
accumulato mensilmente:
Gc: 0,00 kg/m²

*La struttura non è soggetta a fenomeni
di condensa interstiziale.*

Quantità ammissibile di vapore

accumulato mensilmente in
un'interfaccia:

Gc,max: 0,50 kg/m²

CARATTERISTICHE DI INERZIA

TERMICA - UNI 13786

Sfasamento dell'onda termica:
15h 54'

Fattore di attenuazione 0,0614

Capacità termica interna:

23,4 kJ/m²K

Capacità termica esterna:

28,2 kJ/m²K

Trasmittanza periodica Y:

0,013 W/m²K

Parete_A800

		Spessore s	Conduttività λ	Resistenza R	Densità ρ	Capacità c	Fattore μ
		mm	W/(mK)	m ² K/W	kg/m ³	kJ/(kgK)	-
	Adduttanza esterna (flusso orizzontale)			0,040			
A	TESI_TERMINTONACO CALCEPIASCO	30	0,085	0,353	400	1,50	5,3
B	TESI_TERRAPAGLIA D100	240,	0,237	1,013	800	1,09	3,4
C	TESI_CELLULOSA	120	0,039	3,077	70	1,90	2,0
D	GESSFIBRA	20	0,320	0,063	1.150	0,26	13,0
E	TESI_INTONACO TERRA E ARGILLA	10	0,900	0,011	1.800	1,00	7,5
	Adduttanza interna (flusso orizzontale)	-	-	0,130	-	-	-
	TOTALE	420		4,686			

Spessore : 420 mm
Trasmittanza : 0,213 W/m²K

Resistenza termica :4,686 m²K/W
Massa superf. : 223 kg/m²

VERIFICHE DI CONDENSA

Metodo di calcolo umidità relativa
ambiente interno: classi di
concentrazione

Fattore di resistenza superficiale fR_{si}:
0,6843 (mese di gennaio)

*La struttura non è soggetta a fenomeni
di condensa superficiale.*

Quantità massima di vapore
accumulato mensilmente:
G_c: 0,00 kg/m²

*La struttura non è soggetta a fenomeni
di condensa interstiziale.*

Quantità ammissibile di vapore
accumulato mensilmente in

un'interfaccia:

G_{c,max}: 0,50 kg/m²

CARATTERISTICHE DI INERZIA

TERMICA - UNI 13786

Sfasamento dell'onda termica:
16h 03'

Fattore di attenuazione 0,0519

Capacità termica interna:

24,4 kJ/m²K

Capacità termica esterna:

28,5 kJ/m²K

Trasmittanza periodica Y:

0,011 W/m²K

Confronto tra le diverse soluzioni di pareti.

Nel *Grafico 4* sono stati confrontati gli spessori di parete ottunuti in relazione al composto di terra che si vuole utilizzare.

È evidente come all'aumentare della densità del composto, aumenta lo spessore dello stesso e dell'isolante.

Nel *Grafico 5* è confrontata l'oscillazione della temperatura nelle diverse ore della giornata. Sono indicate:

- la temperatura esterna nel giorno più caldo
- la temperatura superficiale esterna nel giorno più caldo
- la temperatura interna per le diverse pareti.

Dai risultati ottenuti possiamo

constatare che, tra le stratigrafie proposte, quelle che presentano il miglior compromesso tra prestazioni invernali ed estive sono:

- PareteA_400

$$U = 0.222 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Sfasamento dell'onda termica:

13h 23'

Spessore: 340 mm

- PareteA_500

$$U = 0.221 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Sfasamento dell'onda termica:

14h 15'

Spessore: 360 mm

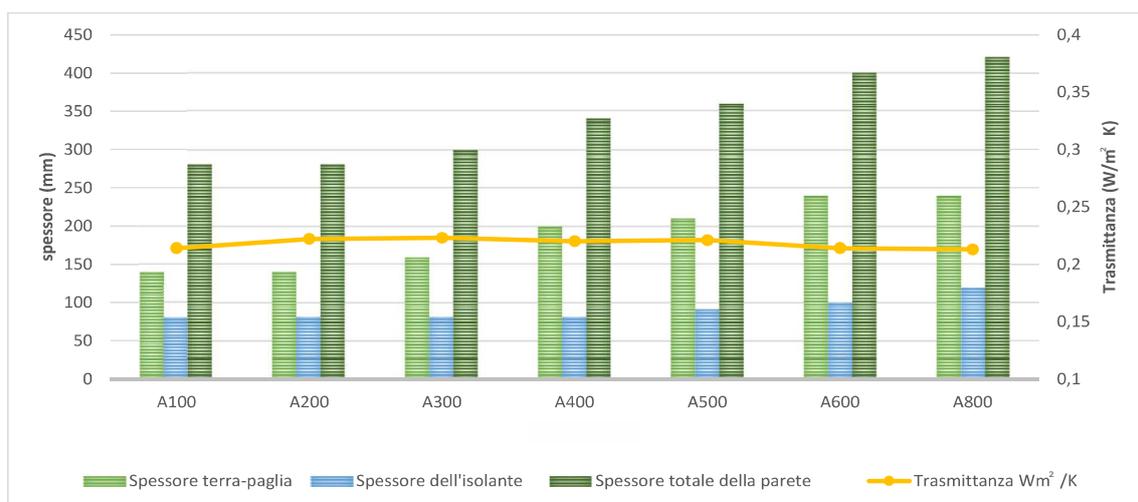


Grafico 4

Valori di trasmittanza termica in relazione allo spessore della parete, dello strato di terra paglia e quello dell'isolante per tutte le pareti simulate

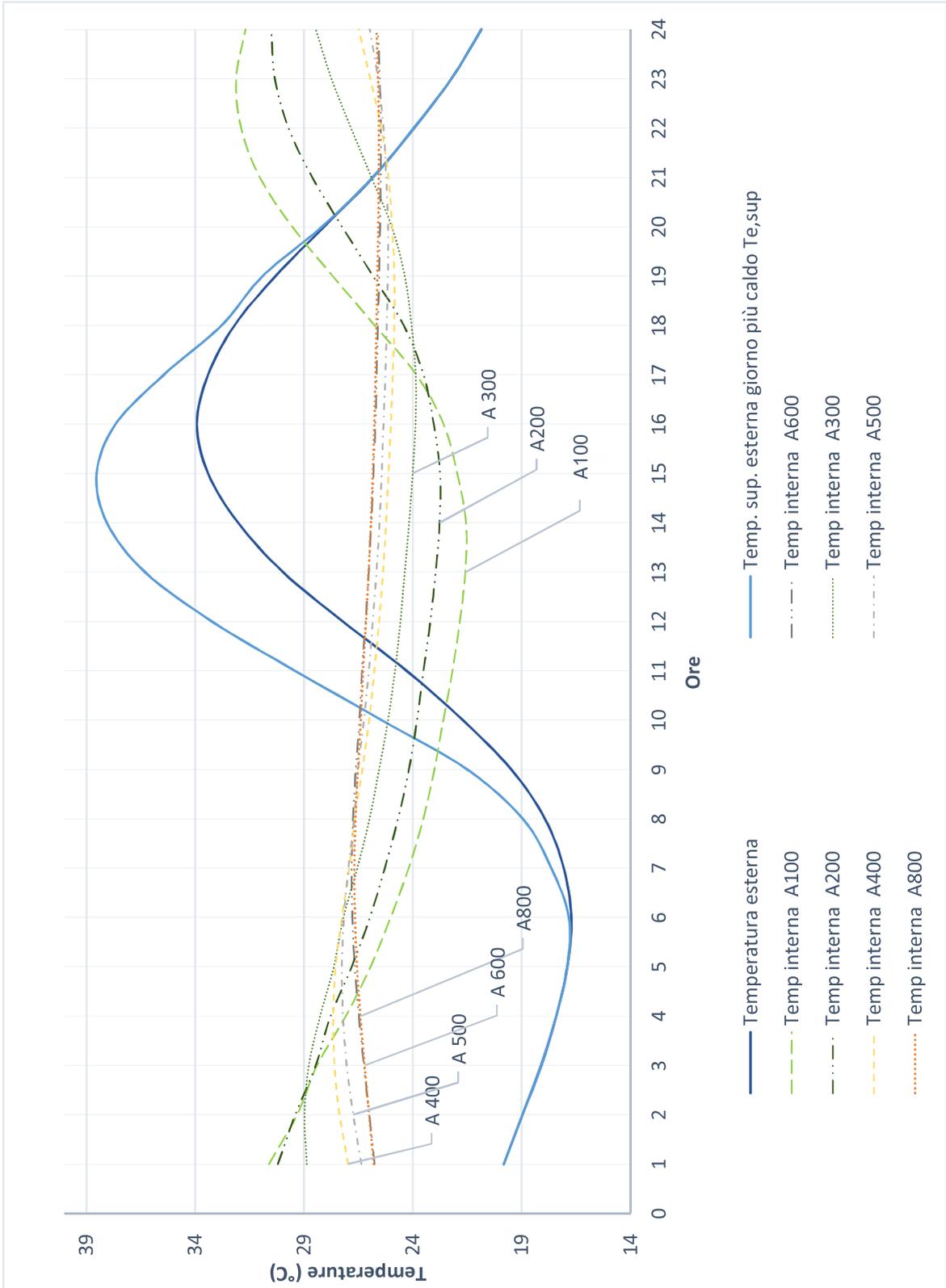


Grafico 5

Variazione di temperatura interna in relazione alle ore del giorno per le pareti simulate

4.2 Solaio_A

INTERNO

1. pavimentazione in legno
2. terrapaglia
3. tessuto non tessuto
4. argilla espansa
5. tessuto non tessuto

TERRENO

Per la stratigrafia del solaio sono stati utilizzati composti di terra-paglia molto alleggeriti. Sono state fatte tre simulazioni termiche con i tre composti più leggeri (D100, D200, D300).

Questa scelta è dovuta al fatto che il solaio controterra non è interessato

dall'irradianza solare e non necessita pertanto una composizione massiva.

La soluzione stratigrafica adottata prevede uno strato di argilla espansa che funge da vespaio aerato e contribuisce alla coibentazione del solaio. Le travi, che sostengono la pavimentazione in legno, hanno una sezione 7 x 14 cm. Lo strato di terrapaglia, interposto fra le travi in legno, ha pertanto uno spessore di 14 cm per tutte le soluzioni. Le travi poggeranno direttamente sulla fondazione in muratura.

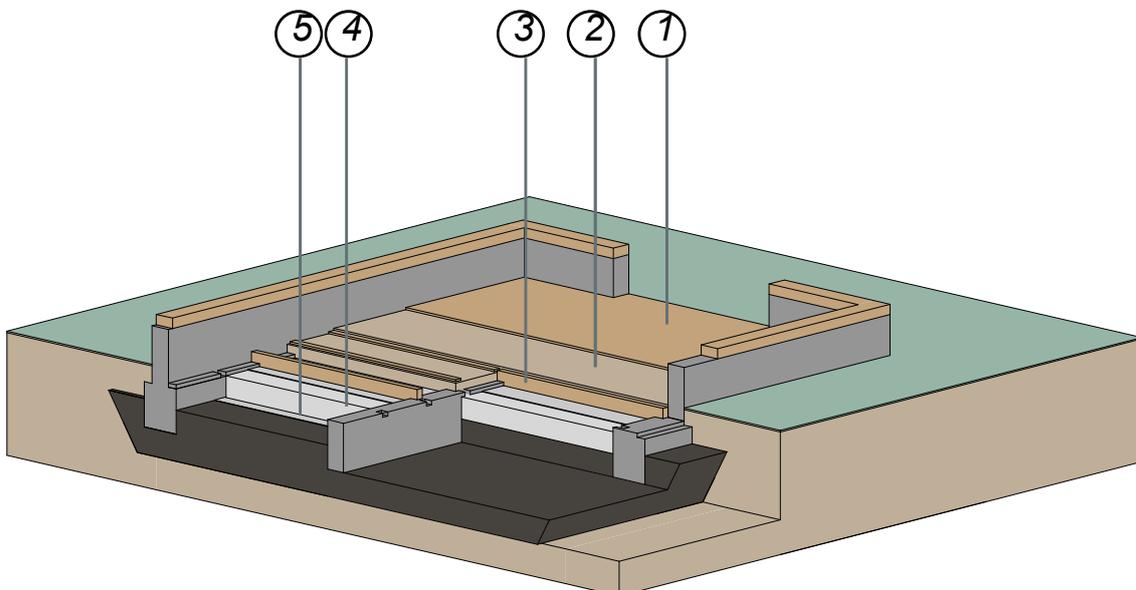


Figura 25

Schema progettuale: Solaio_A, assonometria

Solaio_A100

		Spessore s	Conduttività λ	Resistenza R	Densità ρ	Capacità c	Fattore μ
		mm	W/(mK)	m ² K/W	kg/m ³	kJ/(kgK)	-
	Adduttanza interna (flusso verticale discendente)			0,170			
A	LEGNAME	20	0,012	0,167	450	1,60	20,0
B	TESI_TERRAPAGLIA D100	140	0,069	2,029	100	1,70	1,7
C	TNT	10	0,037	0,027	30	1,40	2.192,0
D	ARGILLA ESPANSA	200	0,090	2,222	280	0,92	3,2
E	TNT	10	0,037	0,027	30	1,40	2.192,0
	Adduttanza esterna (flusso verticale discendente)	-	-	0,040	-	-	-
	TOTALE	362		4,682			

Spessore : 362 mm
Trasmittanza : 0,214 W/m²K

Resistenza termica : 4,682 m²K/W
Massa superf. : 79 kg/m²

VERIFICHE DI CONDENSA

La struttura è soggetta a fenomeni di condensa interstiziale. La quantità stagionale di vapore condensato è pari a 0,017 kg/m² (rievaporabile durante il periodo estivo).

Interfaccia D-E - Formazione di condensa:
0,0171 kg/m²

Quantità massima di vapore accumulato mensilmente

Gc: 0,0171 kg/m² D-E nel mese di gennaio

Quantità ammissibile di vapore accumulato mensilmente in un'interfaccia

Gc,max: 0,5000 kg/m²

Quantità di vapore residuo Ma: 0,0171 nel mese di gennaio kg/m² D-E

Esito della verifica di condensa interstiziale:

La struttura non è soggetta a fenomeni di condensa superficiale.

Metodo di calcolo umidità relativa ambiente interno: classi di concentrazione

Fattore di resistenza superficiale fRsi: 0,6843 (mese di gennaio)

Solaio_A200

		Spessore s	Conduttività λ	Resistenza R	Densità ρ	Capacità c	Fattore μ
		mm	W/(mK)	m ² K/W	kg/m ³	kJ/(kgK)	-
	Adduttanza interna (flusso verticale discendente)			0,170			
A	LEGNAME	20	0,012	0,167	450	1,60	20,0
B	TESI_TERRAPAGLIA D200	140	0,075	1,867	200	1,35	1,9
C	TNT	10	0,037	0,027	30	1,40	2.192,0
D	ARGILLA ESPANSA	200	0,090	2,222	280	0,92	3,2
E	TNT	10	0,037	0,027	30	1,40	2.192,0
	Adduttanza esterna (flusso verticale discendente)	-	-	0,040	-	-	-
	TOTALE	362		4,519			

Spessore : 362 mm
Trasmittanza : 0,221W/m²K

Resistenza termica : 4,519 m²K/W
Massa superf. : 93 kg/m²

VERIFICHE DI CONDENSA

La struttura è soggetta a fenomeni di condensa interstiziale. La quantità stagionale di vapore condensato è pari a 0,017 kg/m² (rievaporabile durante il periodo estivo).

La struttura non è soggetta a fenomeni di condensa superficiale.

Metodo di calcolo umidità relativa ambiente interno: classi di concentrazione

Fattore di resistenza superficiale fRsi: 0,6843
(mese di gennaio)

Quantità massima di vapore accumulato mensilmente

Gc: 0,0166 kg/m² D-E nel mese di gennaio

Quantità ammissibile di vapore accumulato mensilmente in un'interfaccia

Gc,max: 0,5000 kg/m²

Quantità di vapore residuo Ma: 0,0171 nel mese di gennaio kg/m² D-E

Esito della verifica di condensa interstiziale:

Interfaccia D-E - Formazione di condensa:

0,0171 kg/m²

Solaio_A300

		Spessore s	Conduttività λ	Resistenza R	Densità ρ	Capacità c	Fattore μ
		mm	W/(mK)	m ² K/W	kg/m ³	kJ/(kgK)	-
	Adduttanza interna (flusso verticale discendente)			0,170			
A	LEGNAME	20	0,012	0,167	450	1,60	20,0
B	TESI_TERRAPAGLIA D300	140	0,087	1,609	300	1,23	2,0
C	TNT	10	0,037	0,027	30	1,40	2.192,0
D	ARGILLA ESPANSA	200	0,090	2,222	280	0,92	3,2
E	TNT	10	0,037	0,027	30	1,40	2.192,0
	Adduttanza esterna (flusso verticale discendente)	-	-	0,040	-	-	-
	TOTALE	362		4,682			

Spessore : 362 mm
Trasmittanza : 0,235 W/m²K

Resistenza termica : 4,262 m²K/W
Massa superf. : 107 kg/m²

VERIFICHE DI CONDENSA

La struttura è soggetta a fenomeni di condensa. La quantità stagionale di vapore condensato è pari a 0,016 kg/m² (rievaporabile durante il periodo estivo).

Quantità massima di vapore accumulato mensilmente

Gc: 0,0159 kg/m² D-E nel mese di gennaio

Quantità ammissibile di vapore accumulato mensilmente in un'interfaccia

Gc,max: 0,5000 kg/m²

Quantità di vapore residuo Ma: 0,0159 nel mese di gennaio kg/m² D-E

Esito della verifica di condensa interstiziale:

Interfaccia D-E - Formazione di condensa:
0,0159 kg/m²

La struttura non è soggetta a fenomeni di condensa superficiale.

Metodo di calcolo umidità relativa ambiente interno: classi di concentrazione

Fattore di resistenza superficiale fRsi: 0,6843
(mese di gennaio)

Solaio_A2200

INTERNO

1. pavimentazione argilla e oli vegetali.
2. terra cruda
3. tessuto non tessuto
4. argilla espansa
5. tessuto non tessuto

TERRENO

Si è voluto proporre un'altra soluzione che prevede, come la precedente, un vespaio aerato che viene però associato a uno strato in terra cruda sul quale viene realizzata

una pavimentazione in argilla e oli vegetali.

La terra cruda adoperata dovrà avere una densità molto elevata (2200 kg/m^3) così da conferire ottime prestazioni meccaniche. Con questa proposta si possono eliminare le travi in legno del solaio.

L'argilla espansa del vespaio viene però sostituita con il vetro cellulare. Questo materiale conferisce maggiore stabilità e migliori prestazioni meccaniche.

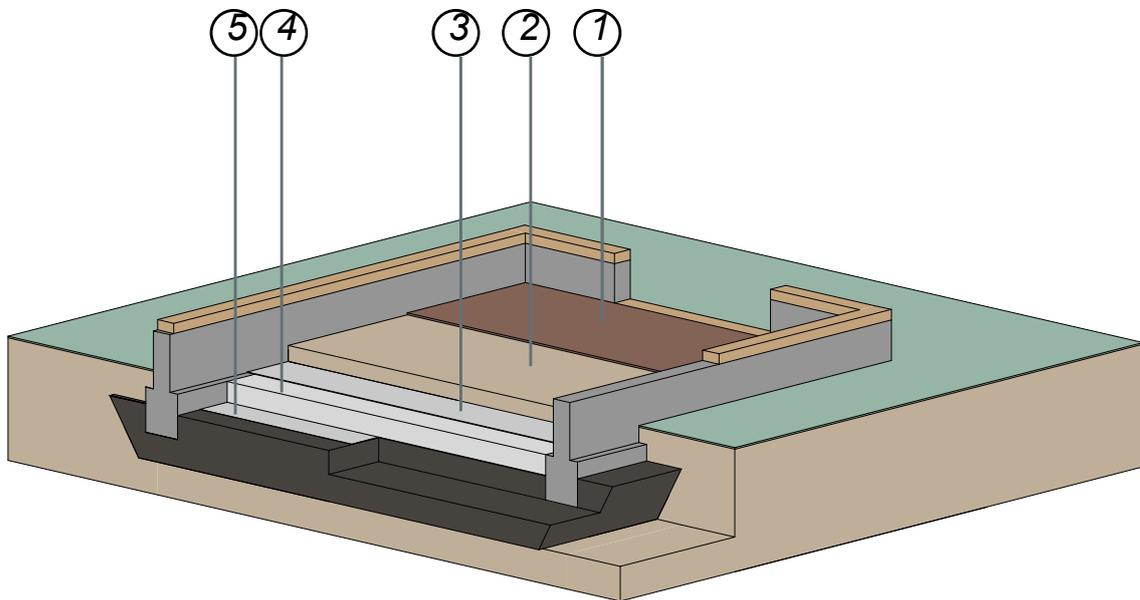


Figura 26

Schema progettuale: Solaio_A2200, assonometria

Solaio_A2200

		Spessore s	Conduttività λ	Resistenza R	Densità ρ	Capacità c	Fattore μ
		mm	W/(mK)	m ² K/W	kg/m ³	kJ/(kgK)	-
	Adduttanza interna (flusso verticale discendente)			0,170			
A	ARGILLA E OLI	20	1,130	0,018	2200	1,00	1,0
B	TESI_TERRACRUDA D2200	60	1,130	0,053	2200	1,00	1,0
C	TNT	10	0,037	0,027	30	1,40	2.192,0
D	VETRO CELLULARE	200	0,055	3,636	130	0,84	20000
E	TNT	10	0,037	0,027	30	1,40	2.192,0
	Adduttanza esterna (flusso verticale discendente)	-	-	0,040	-	-	-
	TOTALE	282		3,971			

Spessore : 282 mm
Trasmittanza : 0,252 W/m²K

Resistenza termica: 3,971 m²K/W
Massa superf.: 202 kg/m²

VERIFICHE DI CONDENSA

La struttura non è soggetta a fenomeni di condensa interstiziale

Quantità massima di vapore accumulato mensilmente

Gc: 0,00 kg/m²

Quantità ammissibile di vapore accumulato mensilmente in un'interfaccia

Gc,max: 0,50 kg/m²

La struttura non è soggetta a fenomeni di condensa superficiale.

Metodo di calcolo umidità relativa ambiente interno: classi di concentrazione

Fattore di resistenza superficiale fRsi: 0,6843 (mese di gennaio)

Confronto tra le soluzioni disolai

Le prime tre soluzioni riportate si equivalgono per spessore e composizione stratigrafica. Lo strato di terrapaglia va a riempire completamente lo spazio tra le travi così da poggiare direttamente sul vespaio aerato in argilla espansa.

Mantendendo lo stesso spessore per tutti i componenti, le differenze che emergono sono conseguenza del composto in terrapaglia utilizzato.

- SolaioA_100: $U= 0.214 \text{ W/m}^2\text{K}$

- SolaioA_200: $U= 0.221 \text{ W/m}^2\text{K}$

- SolaioA_300: $U= 0.235 \text{ W/m}^2\text{K}$

Le differenze tra i solai sono minime sia dal punto di vista delle prestazioni termiche, sia dal punto di vista della quantità di legname utilizzato. Per scegliere il composto di terrapaglia più adatto è quindi opportuno valutare, la lavorabilità del composto. Maggiore è il quantitativo di paglia, minore è la densità del composto e migliore è la sua lavorabilità (vedi capitolo 1).

Per questo motivo le analisi successive saranno condotte utilizzando il composto D100.

L'ultima proposta (Solaio_A2200) è stata inserita per considerare un'alternativa che non prevedesse l'utilizzo di legno. La terra cruda utilizzata, molto densa, non garantisce delle buone prestazioni di isolamento

invernale. L'utilizzo del vetro cellulare va a risolvere il problema.

Questa proposta non è stata presa in considerazione negli approfondimenti successivi perché necessita di una verifica delle proprietà meccaniche.

4.3 Copertura_A

INTERNO

1. tavolato in legno
2. fibra di cellulosa
3. tavolato in legno
4. doppia tavola di ventilazione
5. copertura in lamiera

ESTERNO

Per quanto riguarda la copertura è stato previsto un tetto ventilato con isolamento tra le travi.

È l'unica porzione studiata che non contempli l'utilizzo della terrapaglia,

per questo motivo è stata fatta un'unica simulazione termica.

L'isolante utilizzato per la simulazione è la lolla di riso, materiale sfuso che fornisce migliori prestazioni in isolamento termico rispetto alla cellulosa. Un tavolato in legno, posto al di sopra delle travi, sarà di appoggio alla doppia orditura di listelli che costituisce l'intercapedine di ventilazione. Un manto in lamiera completa il pacchetto.

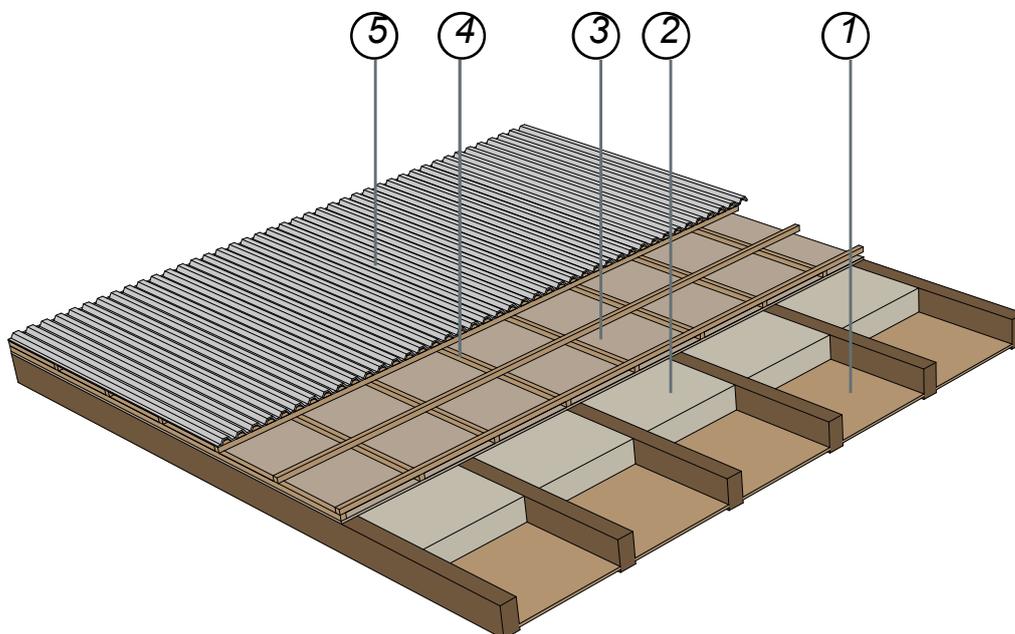


Figura 27

Schema progettuale: Copertura_A, assonometria

Copertura_A

		Spessore s	Conduttività λ	Resistenza R	Densità ρ	Capacità c	Fattore μ
		mm	W/(mK)	m ² K/W	kg/m ³	kJ/(kgK)	-
	Adduttanza interna (flusso orizzontale)			0,100			
A	LEGNAME	20	0,120	0,167	450	1,60	20,0
B	BARRIERA AL VAPORE	1	0,220	0,005	199	1,70	2.564,0
C	LOLLA DI RISO	180	0,037	4,865	120	1,90	3,1
D	FRENO AL VAPORE	1	0,220	0,005	224	1,70	67,0
	LEGNAME	20	0,120	0,167	450	1,60	20,00
	ARIA flusso ascendente	80	0,500	0,160	1	1,00	1,00
E	LAMIERA ALLUMINIO	20	160,0	0,00	2.800	0,88	3.000,
	Adduttanza esterna (flusso orizzontale)	-	-	0,040	-	-	-
	TOTALE	322		5,508			

Spessore : 322 mm
Trasmittanza : 0,182 W/m²K

Resistenza termica :5,508 m²K/W
Massa superf. : 96 kg/m²

VERIFICHE DI CONDENSA

Metodo di calcolo umidità relativa ambiente interno: classi di concentrazione

Fattore di resistenza superficiale fR_{si}:
0,7238 (mese di novembre)

La struttura non è soggetta a fenomeni di condensa superficiale.

Quantità massima di vapore accumulato mensilmente:

G_c: 0,00 kg/m²

La struttura è soggetta a fenomeni di condensa interstiziale.

Quantità massima di vapore accumulato mensilmente

G_c: 0,0729 kg/m² C-D nel mese di gennaio

CARATTERISTICHE DI INERZIA TERMICA - UNI 13786

Sfasamento dell'onda termica:
10h 34'

Fattore di attenuazione 0,3723

Capacità termica interna:20,9 kJ/m²K

Capacità termica esterna:63,1 kJ/m²K

Trasmittanza periodica Y:

0,068 W/m²K

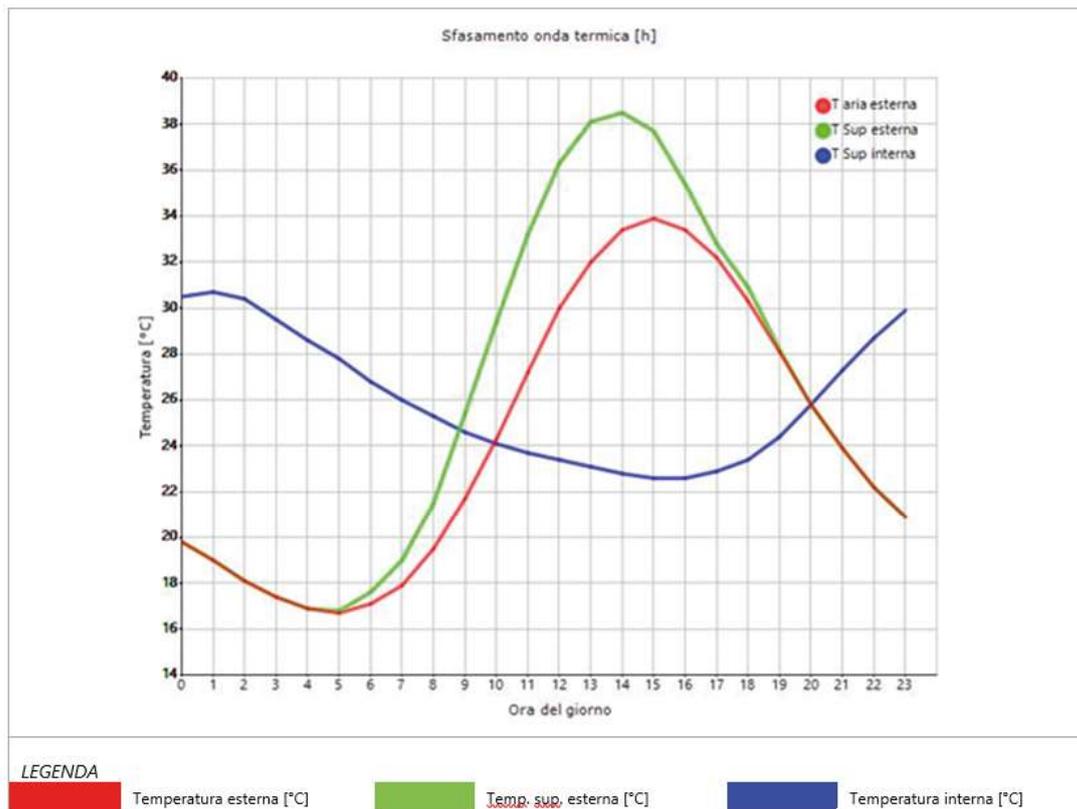


Grafico 5

Variazione di temperatura interna in relazione alle ore del giorno per la Copertura_A

Commento

La copertura simulata è una struttura leggera e poco massiva, con massa superficiale molto bassa. Presenta ottimi valori di resistenza termica che garantiscono ottime prestazioni invernali.

La tavola di ventilazione garantisce il ricircolo dell'aria, questo permette buone prestazioni estive.

La stratigrafia offre un valore di sfasamento termico superiore alle 10 h, buono anche se non paragonabile a quelli offerti dalle stratigrafie delle pareti, dove il valore di sfasamento termico arriva alle 15h.

Questo è dovuto al fatto che non è stato inserito uno strato di terrapaglia, componente massiva che permette di attenuare l'onda termica estiva.

4.4 Struttura_A

Dopo aver studiato le diverse proposte, per tutti i componenti edilizi sono state identificate le soluzioni stratigrafiche più adatte alla realizzazione del padiglione, tenendo conto delle caratteristiche termo-igrometriche dei componenti e la loro adattabilità al tipo di struttura proposta.

Molto peso è stato dato alla quantità di legname utilizzato sia per la struttura portante che per quella ausiliaria.

Le stratigrafie scelte in questa fase ci permetteranno di fare una valutazione sia dal punto di vista termico,

attraverso il calcolo dei carichi termici, sia dal punto di vista economico e ambientale, con la compilazione di un computo dei materiali impiegati.

Di seguito vengono quindi indicate le stratigrafie scelte e gli elementi in legno strutturale e ausiliari ai quali vengono associate.

PARETE PERIMETRALE

-stratigrafia:

PARETE_A400 per le pareti orientate a nord, est, ovest.

PARETE_A500 per le pareti orientate a sud.

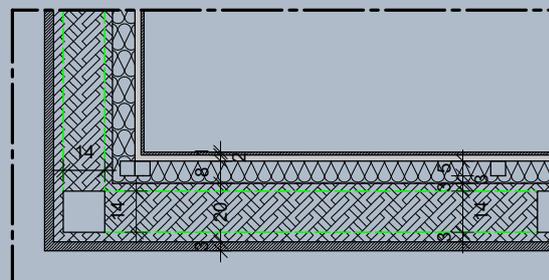
-legno strutturale:

PI_14*14 : pilastri in legno (sezione 14cmx14cm)

CV_14*14 : controventi (sezione 14cmx14cm)

-legname ausiliario:

LI_5*5 : listelli per controparete (sezione 5cmx5cm)



Parete_A400
scala 1:20

TESI_TERMINTONACO CALCEPIASCO	30 mm
TESI_TERRAPAGLIA D400	200 mm
TESI_CELLULOSA	80 mm
GESSOFIBRA	20 mm
TESI_INTONACO TERRA E ARGILLA	10 mm
TOTALE	340 mm

CHIUSURA INFERIORE

-stratigrafia:

SOLAIO_A100

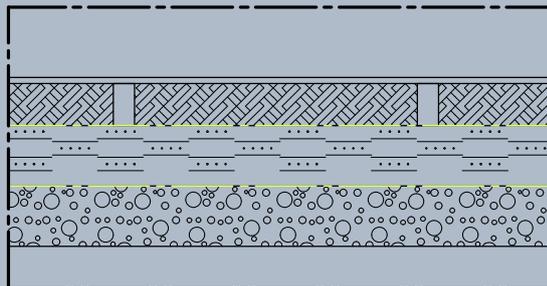
-legno strutturale:

DO_21*5: dormiente per cordolo di collegamento tra fondazioni in muratura e pilastro

TR_7*14: travi in legno (sezione 7cmx14cm)

-legname ausiliario:

TV_2: tavolato in legno (spessore 2cm)



Particolare costruttivo: Solai_A100
scala 1:20

LEGNAME	20 mm
TESI TERRAPAGLIA D100	140 mm
TNT	10 mm
ARGILLA ESPANSA	200 mm
TNT	10 mm
TOTALE	362 mm
Massa superficiale	79 kg/m ²

TETTO

-stratigrafia:

COPERTURA_A

-legno strutturale:

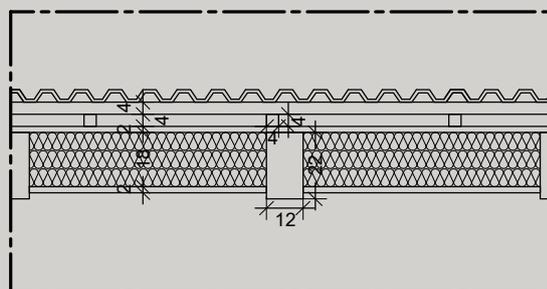
TR_22*12 Travi in legno (sezione 22cmx12cm)

-legname ausiliario:

TV_2: tavolato in legno (spessore 2cm)

LI_4*4: listelli in legno per doppia tavola di ventilazione (sezione 4cmx4cm)

DO_21*5: dormiente (sezione 21cmx15cm)



Copertura_A
scala 1:25

LEGNAME	20 mm
BARRIERA AL VAPORE	1 mm
LOLLA DI RISO	180 mm
FRENO AL VAPORE	1 mm
LEGNAME	20 mm
ARIA flusso ascendente	80 mm
LAMIERA IN ALLUMINIO	20 mm
TOTALE	322 mm
Massa superficiale	96 kg/m ²

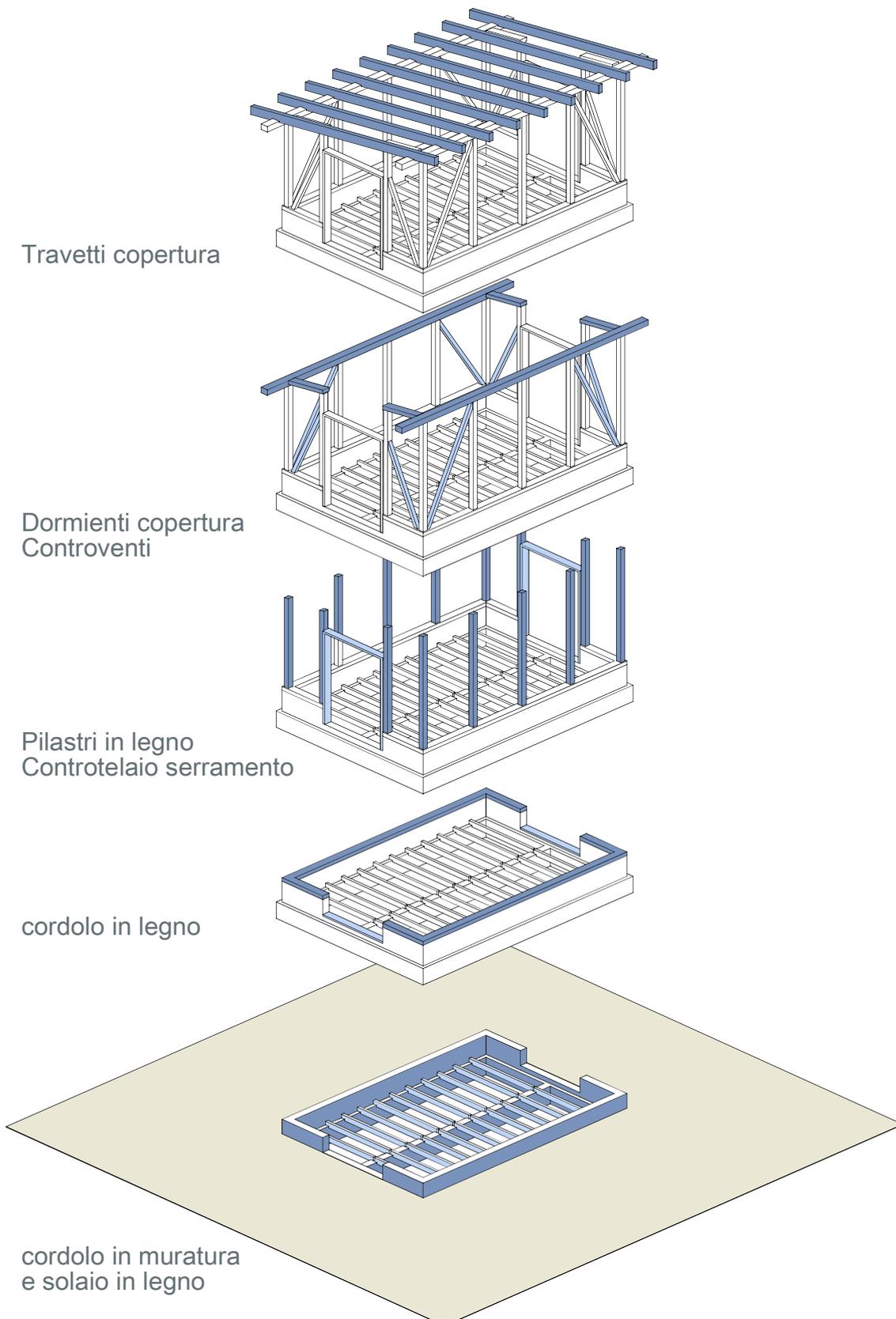


Figura 28
Schema progettuale: Struttura_A, spaccato assometrico

PILASTRO

Il pilastro è stato considerato incernierato agli estremi nei quali non agisce momento flettente, come si nota dai grafici la sollecitazione predominante è lo sforzo normale.

CONTROVENTO

Il controvento è stato progettato doppio per ragioni esecutive, legate alla posa in opera e al contenimento del tamponamento. Dal punto di vista strutturale è stato considerato come elemento singolo per una

semplificazione del calcolo. L'asta lavora principalmente a compressione ed è stata dimensionata per resistere allo sforzo normale. Visto che un'asta a compressione viene progettata in funzione della sollecitazione e dell'area della sezione, l'area della sezione calcolata è rimasta invariata nella scomposizione del controvento. Il controvento è stato calcolato e verificato a fronte delle azioni orizzontali. L'asta (come si può notare dal grafico) lavora solamente a sforzo normale e i nodi con i pilastri permettono la rotazione.

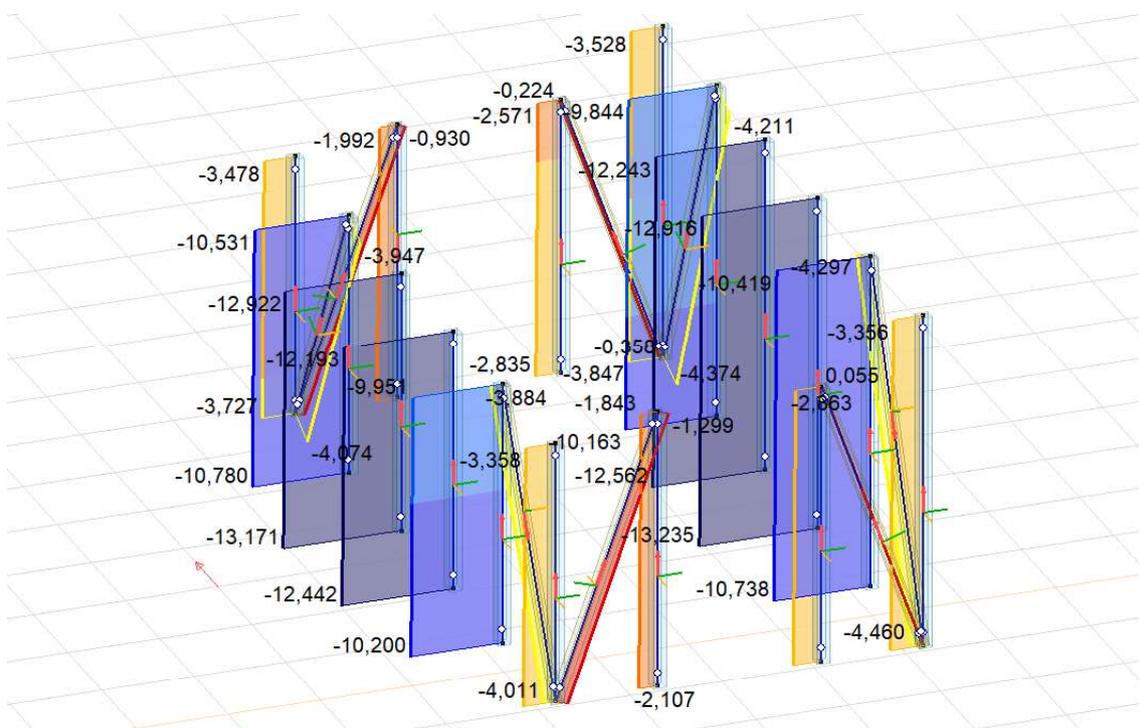


Figura 32
Caratteristiche di sollecitazione a sforzo normale dei pilastri

TRAVETTO DI COPERTURA

Il travetto di copertura è stato calcolato come una trave a doppio sbalzo incernierata.

In semplice appoggio, per questo motivo i nodi progettati impediscono il movimento nel piano orizzontale. Siccome tutti i nodi progettati non sono stati dimensionati ma solamente ipotizzati, la dimensione dei tasselli in legno è indicativa e deve essere calcolata.

NODI

Travi e pilastri sono collegati in semplice appoggio, per questo motivo i nodi progettati impediscono il movimento nel piano orizzontale. I nodi progettati non sono stati dimensionati ma solamente ipotizzati, la dimensione dei tasselli in legno è pertanto indicativa e deve essere calcolata.

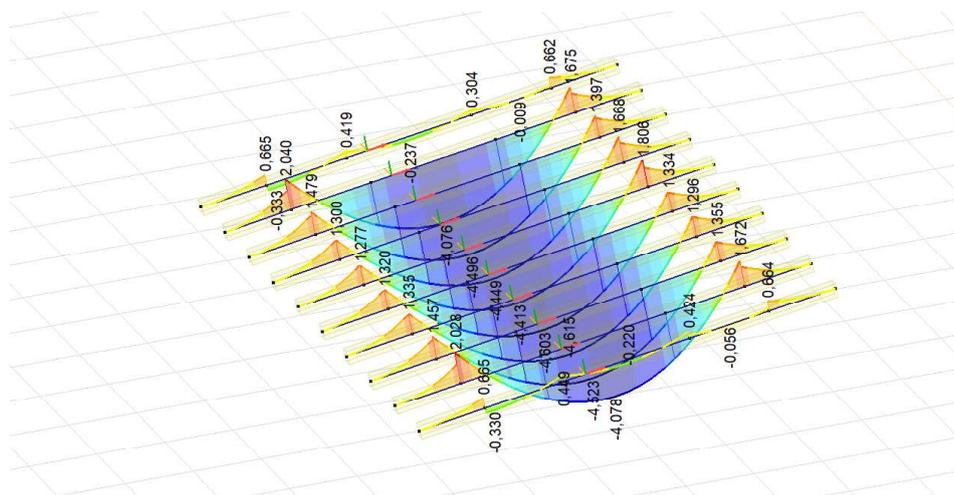


Figura 33

Caratteristiche di sollecitazione a momento flettente delle travi di copertura

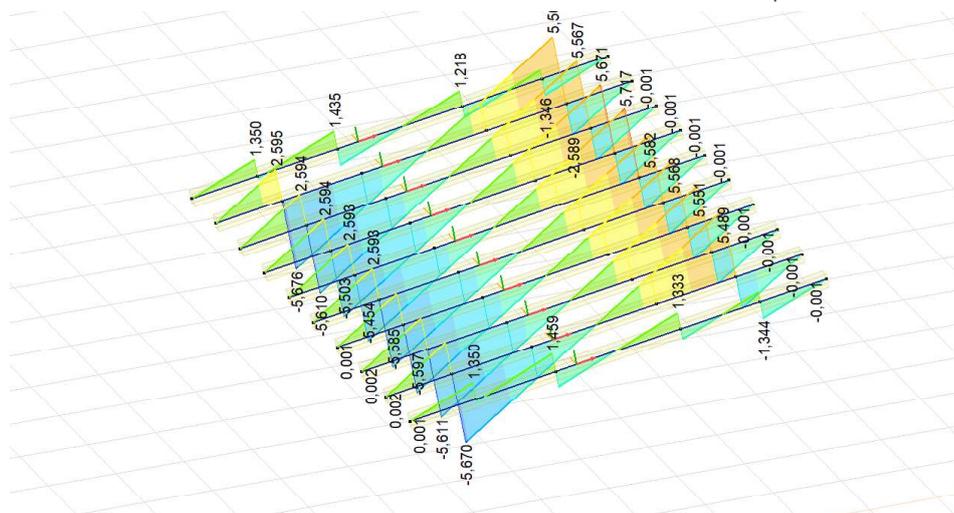


Figura 34

Caratteristiche di sollecitazione a taglio delle travi di copertura

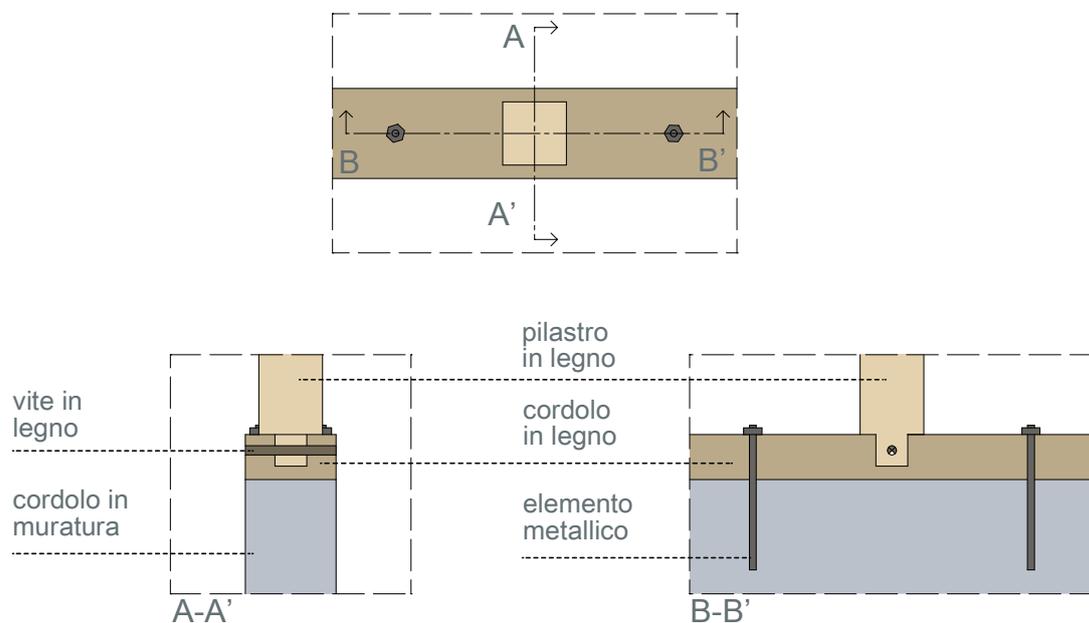
4.5 Nodi strutturali

Le giunzioni tra gli elementi strutturali sono stati pensati per minimizzare la quantità di acciaio impiegata.

Nodo pilastro-fondazione

Il cordolo di fondazione in muratura è collegato al cordolo in legno con degli elementi metallici. La giunzione tra il cordolo in legno e il pilastro è accoppiamento tenone-mortasa.

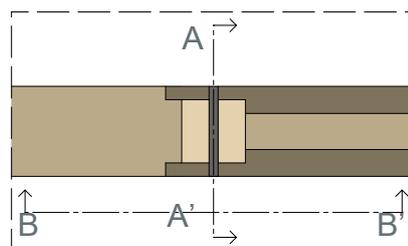
Il principio del nodo è che si realizzi un tenone, cioè un incastro maschio, che va ad infilarsi in una mortasa, ovvero una fresatura con la stessa forma. Un chiodo in legno andrà a fissare la giunzione.

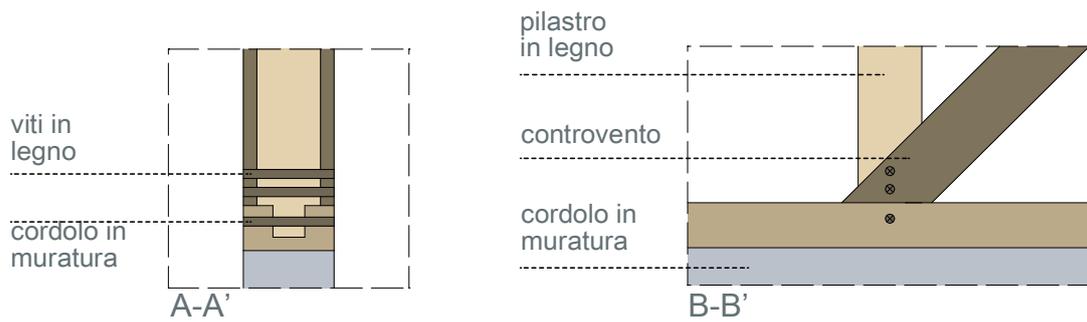


Nodo pilastro-controvento

Il controvento, poggiante sul cordolo di copertura, si incastra al pilastro.

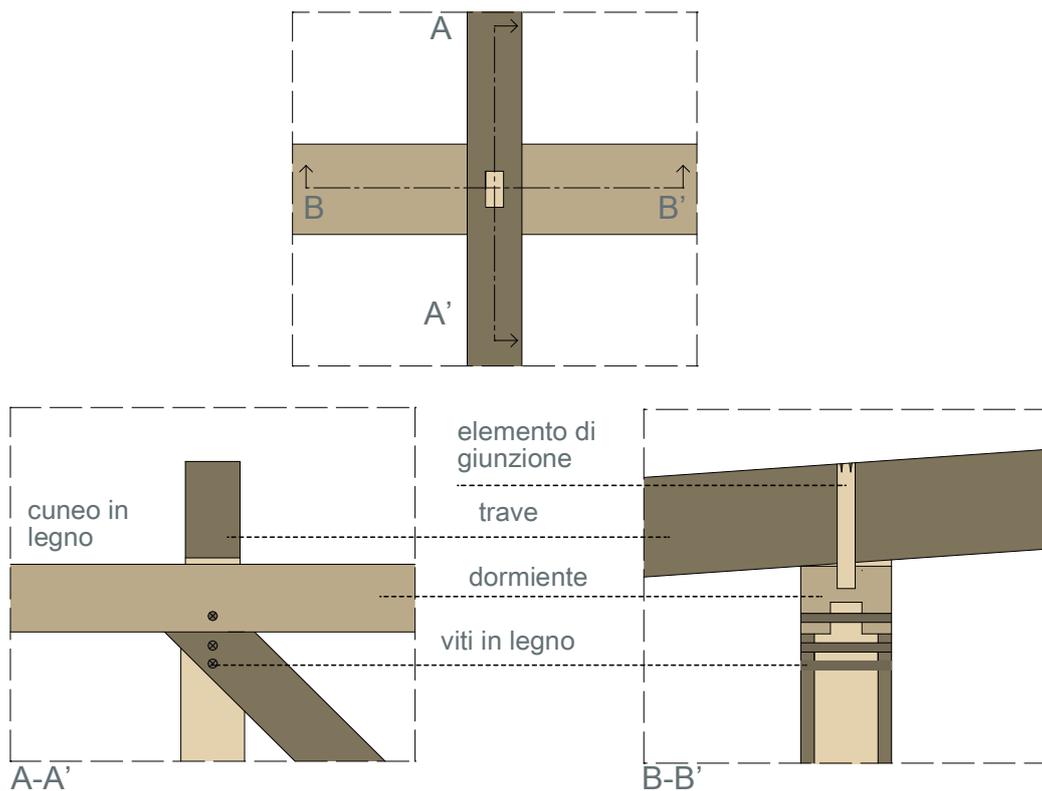
Due viti in legno passanti da un lato all'altro fissano la giunzione.





Nodo dormiente-trave

Il pilastro sarà ancorato al dormiente nello stesso modo in cui è risolto il nodo pilastro/fondazione: con un accoppiamento tenone-mortasa e l'aggiunta di un vite in legno. La trave, poggiante sul dormiente e su un cuneo che mantenga l'inclinazione ideale, verrà ancorata attraverso un elemento aggiuntivo in legno che con lo stesso accoppiamento tenone-mortasa farà da giunzione tra la trave e il dormiente.



4.6 Particolari costruttivi e ponti termici

Il ponte termico è una discontinuità dell'involucro edilizio nella quale la resistenza termica non è uniforme e cambia in modo significativo. I ponti termici, localizzati per la maggioranza dei casi nelle giunzioni tra gli elementi, provocano due effetti:

- Modifica del flusso termico
- Modifica della temperatura superficiale rispetto agli stessi elementi privi di ponte termico.

Di seguito è riportata la valutazione della trasmittanza lineica del ponte termico attraverso l'analisi ad elementi finiti (FEM).

Per ciascun ponte termico sono analizzati il flusso termico, il coefficiente di accoppiamento termico e la mappa delle temperature interne al nodo. La formazione di muffa e quindi di condensa superficiale si ottiene calcolando la temperatura superficiale raggiunta sulla faccia interna.

I ponti termici analizzati sono i seguenti:

-PT_PILASTRO: calcolato su PARETE_A400

-PT_ANGOLO: calcolato nel punto di incontro tra PARETE_A400 e

PARETE_A500

-PT_COPERTURA: calcolato nel punto di incontro tra PARETE_A400 e COPERTURA_A

-PT_FONDAZIONE: calcolato nel punto di incontro tra PARETE_A400 e SOLAIO_A100.

PT_PILASTRO

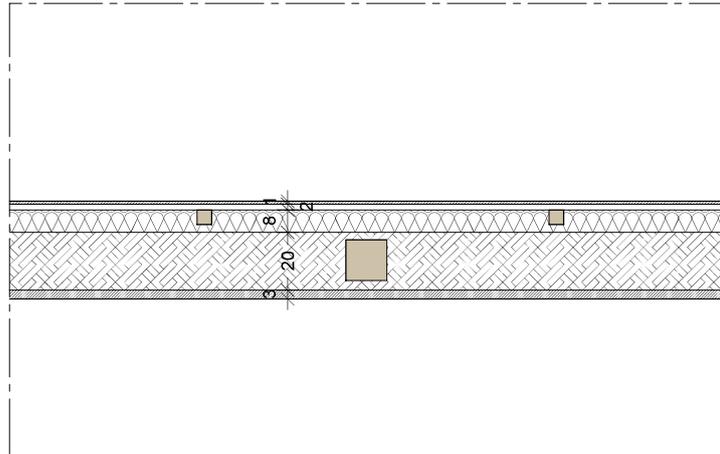


Figura 35

Particolare costruttivo: Parete con pilastro

Flusso Φ 9,24 W/m

Trasmittanza lineica interna: 0,0051 W/mK

Trasmittanza lineica esterna: 0,0051 W/mK

Coefficiente di accoppiamento L2D: 0,48 W/mK

Temperatura minima: 18,9 °C

ESITO DELLA VERIFICA DI ASSENZA DI MUFFA

Fattore di resistenza superficiale nel mese critico fR_{si} 0,943

Fattore di resistenza superficiale nel mese critico fR_{siAmm} 0,724

Mese critico: Novembre

ESITO VERIFICA DI CONDENSA SUPERFICIALE

$f_{rsi} > f_{rsi,max}$: assenza di muffa

Temperatura T [°C] (calcolo psi)
PT_PILASTRO

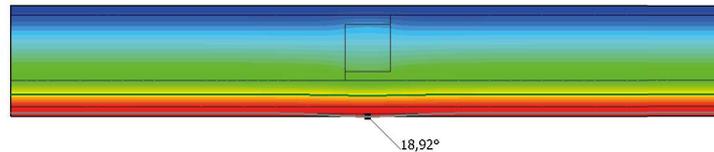


Figura 36

Ponte termico: Parete con pilastro

PT_ANGOLO

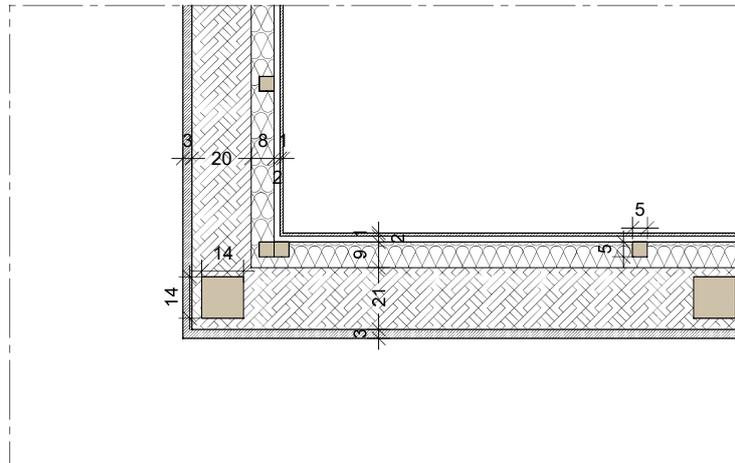


Figura 37

Particolare costruttivo: Angolo tra pareti con pilastro

Flusso Φ 9,57 W/m

Trasmittanza lineica interna: 0,0388 W/mK

Trasmittanza lineica esterna: -0,1153 W/mK

Coefficiente di accoppiamento L2D: 0,50 W/mK

Temperatura minima: 17,9 °C

ESITO DELLA VERIFICA DI ASSENZA DI MUFFA

Fattore di resistenza superficiale nel mese critico f_{Rsi} 0,891

Fattore di resistenza superficiale nel mese critico f_{RsiAmm} 0,724

Mese critico: Novembre

ESITO VERIFICA DI CONDENSA SUPERFICIALE

$f_{Rsi} > f_{Rsi,max}$: assenza di muffa

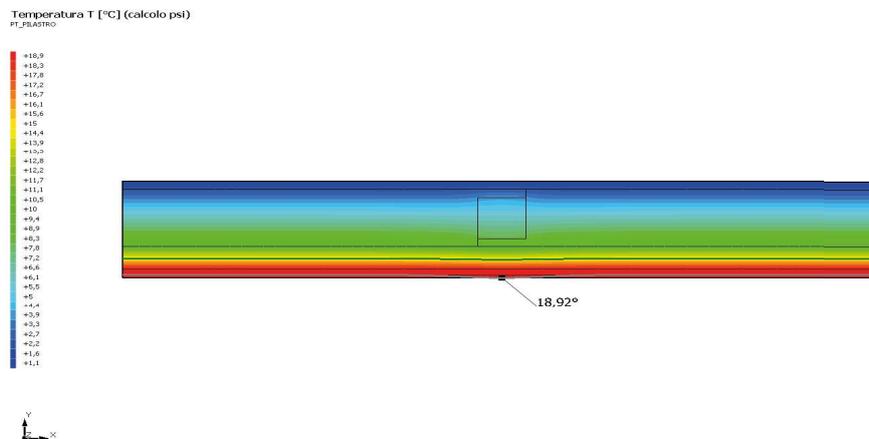


Figura 38

Ponte termico: Angolo tra pareti con pilastro

PT_PARETE-FONDAZIONE

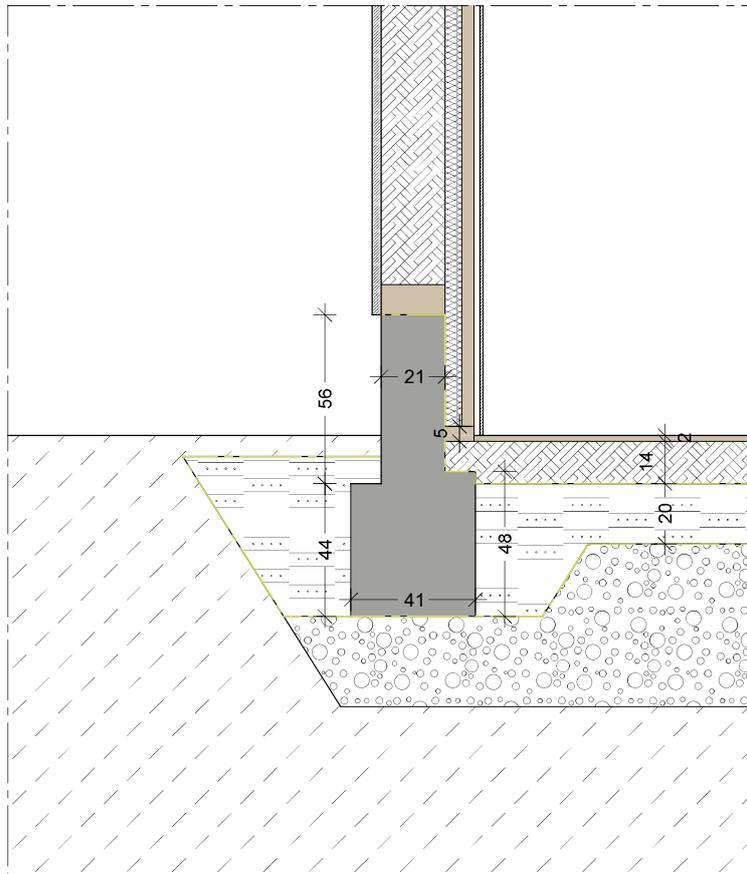


Figura 39

Particolare costruttivo: Nodo parete-fondazione

Flusso Φ 18,43 W/m

Trasmittanza lineica interna: 0,0560 W/mK

Trasmittanza lineica esterna: 0,0023 W/mK

Coefficiente di accoppiamento L2D: 0,91 W/mK

Temperatura minima: 17,9 °C

ESITO DELLA VERIFICA DI ASSENZA DI MUFFA

Fattore di resistenza superficiale nel mese critico f_{Rsi} 0,892

Fattore di resistenza superficiale nel mese critico f_{RsiAmm} 0,888

Mese critico: Gennaio

ESITO VERIFICA DI CONDENSA SUPERFICIALE

$f_{rsi} > f_{rsi,max}$: assenza di muffa

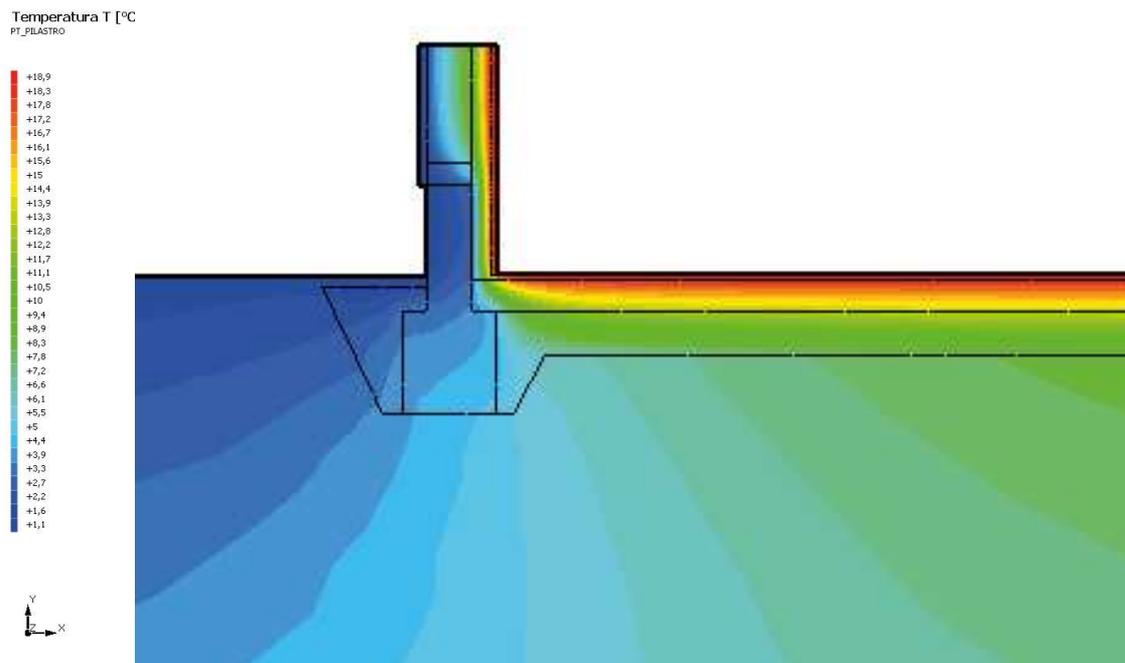


Figura 40
Ponte termico: Nodo parete-fondazione

PT_PARETE-COPERTURA

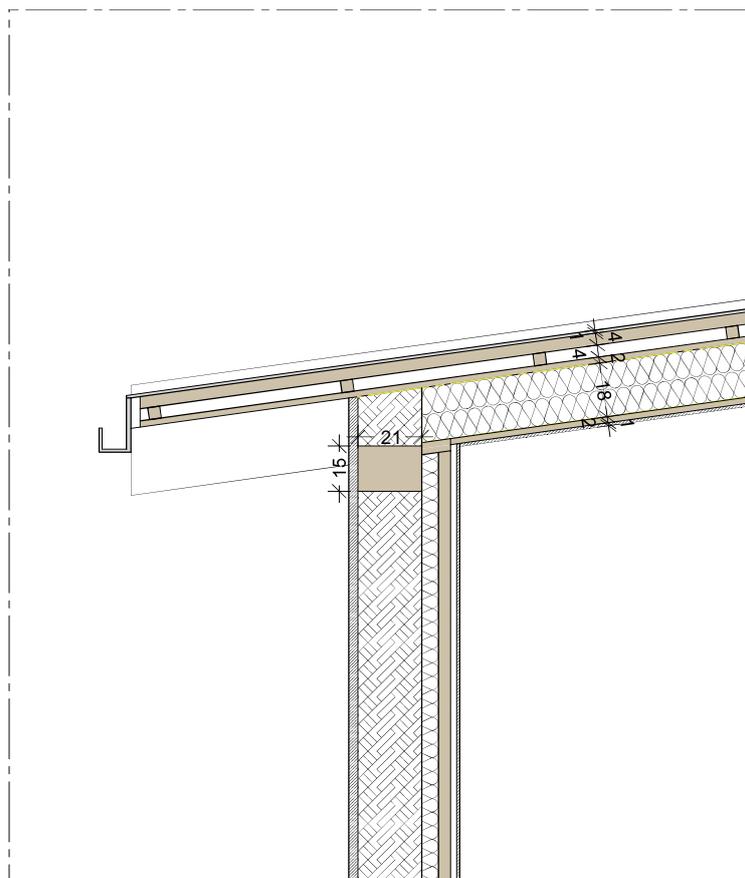


Figura 41
Particolare costruttivo: Nodo parete-copertura

Flusso Φ 9,26 W/m

Trasmittanza lineica interna: 0,0388 W/mK

Trasmittanza lineica esterna: -0,0805 W/mK

Coefficiente di accoppiamento L2D: 0,48 W/mK

Temperatura minima: 17,7 °C

ESITO DELLA VERIFICA DI ASSENZA DI MUFFA

Fattore di resistenza superficiale nel mese critico fR_{si} 0,880

Fattore di resistenza superficiale nel mese critico fR_{siAmm} 0,724

Mese critico: Novembre

ESITO VERIFICA DI CONDENSA SUPERFICIALE

$f_{rsi} > f_{rsi,max}$: assenza di muffa

Temperatura T [°C] (calcolo psi)
PT_PLASTRO

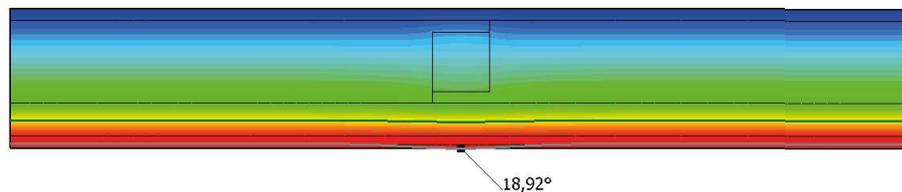
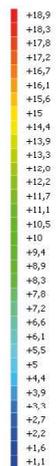
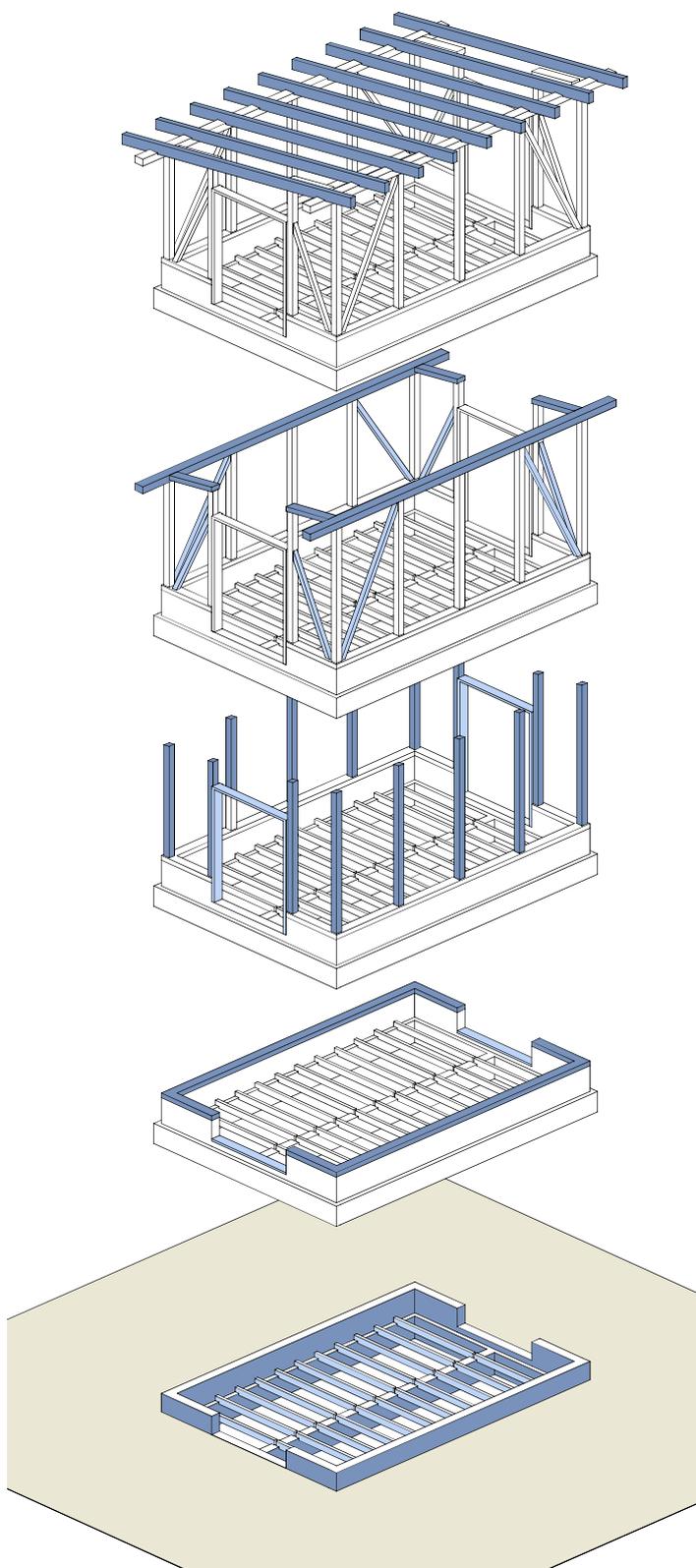


Figura 42

Ponte termico: Nodo parete-copertura

4.7 Computo metrico



COPERTURA

-legno strutturale

TR_22*12 Travi in legno

DO_21*5 : dormiente

-legno ausiliario

TV_2 : tavolato in legno

LI_4*4: listelli in legno

PARETE PERIMETRALE

VERTICALE

-legno strutturale:

PI_14*14 : pilastri

CV_10*10 : controventi

-legno ausiliario

LI_5*5 : listelli controparete

LI_2*2 : listelli tamponamento

CHIUSURA INFERIORE

-legno strutturale:

DO_21*7 : dormiente

TR_7*14 : travi in legno

-legno ausiliario

TV_2 : tavolato in legno

Figura 43

Schema progettuale: Struttura_A, spaccato assonometrico

LEGNO STRUTTURALE

PI_14*14

Altezza m	Quantità	Metri lineari m	Area profilo m ²	Volume m ³
2,4	5	12	0,019	0,235
2,6	2	5,2	0,019	0,102
2,8	2	5,6	0,019	0,109
3	5	15	0,019	0,294
TOTALE		37,8		0,741

DO_21*15

Lunghezza m	Quantità	Metri lineari m	Area profilo m ²	Volume m ³
7,5	2	15	0,032	0,473

DO_21*7

Lunghezza m	Quantità	Metri lineari m	Area profilo m ²	Volume m ³
1,3	4	5,2	0,015	0,076

TR_12*22

Lunghezza m	Quantità	Metri lineari m	Area profilo m ²	Volume m ³
6,3	9	56,7	0,026	0,076

TR_7*14

Lunghezza m	Quantità	Metri lineari m	Area profilo m ²	Volume m ³
2,1	14	29,4	0,01	0,288

CS_7*21

Lunghezza m	Quantità	Metri lineari m	Area profilo m ²	Volume m ³
2,54	4	9,8	0,015	0,144
2	2	4	0,015	0,059
TOTALE		13,8		0,203

CV_10*10

Lunghezza m	Quantità	Metri lineari m	Area profilo m ²	Volume m ³
2,5	4	10	0,01	0,1
3,5	2	7	0,01	0,07
2,85	2	5,7	0,01	0,057
TOTALE		22,7		0,227

LEGNAME AUSILIARIO

LI_5*5

Altezza m	Quantità	Metri lineari m	Area profilo m ²	Volume m ³
2,4	8	19,2	0,0025	0,048
2,6	4	10,4	0,0025	0,026
2,8	4	11,2	0,0025	0,028
3	8	24	0,0025	0,06
TOTALE		64,8		0,162

LI_4*4

Lunghezza m	Quantità	Metri lineari m	Area profilo m ²	Volume m ³
6,3	12	75,6	0,0016	0,121
8,2	9	73,8	0,0016	0,118
TOTALE		149,4		0,239

LI_2*2

Lunghezza m	Quantità	Metri lineari m	Area profilo m ²	Volume m ³
1	74	74	0,0004	0,023
1,45	185	268,25	0,0004	0,107
2	6	12	0,0004	0,005
TOTALE		354,25		0,135

TV_2

Quantità	Spessore m	Area superficie m ²	Volume m ³
2	0,02	51	2,04
1	0,02	26	0,52
TOTALE			2,56

VOLUME TOTALE

Legno strutturale: 2,5 m³

Legname ausiliario: 3,1 m³

TAMPONAMENTI IN TERRA-PAGLIA							
Descrizione	Superficie [m ²]	Spessore [m]	Volume [m ³]	Proporzione	Q.TA'	Q.TA' + 20%	Unità
Tamponamento verticale Parete_A400							
Terra Argillosa	46	0,2	9,2	0,88	8,096	9,72	[m ³]
Paglia	46	0,2	9,2	0,13	1,196	1,44	[m ³]
Tamponamento verticale Parete_A500							
Terra Argillosa	18	0,2	3,6	0,9	3,24	3,89	[m ³]
Paglia	18	0,2	3,6	0,1	0,36	0,43	[m ³]
Tamponamento orizzontale inferiore SolaioA_100							
Terra Argillosa	30	0,14	4,2	0,5	2,1	2,52	[m ³]
Paglia	30	0,14	4,2	0,5	2,1	2,52	[m ³]
ISOLAMENTI							
Descrizione	Superficie [m ²]	Spessore [m]	Volume [m ³]	Parti	Q.TA'	Q.TA' + 20%	Unità
Fibra vegetale_Muri	64	0,08	5,12	1	5,12	6,14	[m ³]
Fibra vegetale_Copertura	56	0,18	10,08	1	10,08	12,10	[m ³]

INTONACI E FINITURE										
Descrizione	Superficie [m ²]	Spessore [m]	Volume [m ³]	Parti	Q.TA'	Q.TA' + 20%	Unità			
Intonaco in terra-argilla	64	0,02	1,28	1	1,28	1,54	[m ³]			
Gessofibra	64	0,02	1,28	1	1,28	1,54	[m ³]			
Termointonaco in calce	64	0,03	1,92	1	1,92	2,30	[m ³]			
SOTTOFONDO										
Descrizione	Superficie [m ²]	Spessore [m]	Volume [m ³]	Parti	Q.TA'	Q.TA' + 10%	Unità			
Inerti	50	0,3	15	1	15	18,00	[m ³]			
Argilla espansa	50	0,2	10	1	10	12,00	[m ³]			
Membrane	50	0,01	0,5	1	0,5	0,60	[m ³]			
INFISSI										
Descrizione	Lunghezza [m]	Larghezza [m]	Altezza [m]	Parti	Q.TA'	Unità				
Porte finestre		1,75	2,91	/	2	[-]				
MEMBRANE										
Descrizione	Perimetro [m]	Altezza [m]	Superficie [m ²]	Parti	Q.TA'	Unità				
Teli di juta	25	4	89,68	0,25	22,42	[m ³]				

FERRAMENTA									
Descrizione	Lunghezza [mm]	Larghezza [mm]	Altezza [m]	Parti uguali	Q.TA'	Unità			
Chiodi per scandole 40mm	4				10000	[-]			
Viti per ferramenta da carpenteria	6	4			5000	[-]			
Angolari	7	15			100	[-]			
Tirafondi di ancoraggio su muretto, diametro : 10mm		10	0,25		60	[-]			
Rondelle, diametro interno : 10mm Esterno: 40mm		40,00			60	[-]			
Dadi, diametro : 10mm		10			120	[-]			
Grondaie (m)	25	0,1	0,02		0,03	[m ³]			
Lamiera tetto (m)	9	6	0,02		1,08	[m ³]			

Capitolo 5

104

114

121

129

136

138

140

5.1 Parete B

5.2 Solaio B

5.3 Copertura B

5.4 Struttura B

5.5 Nodi strutturali B

5.6 Particolari costruttivi e ponti termici

5.7 Computo

Proposta progettuale B

BASAMENTO

In questa proposta il cordolo di fondazione è uguale a quello della soluzione precedente: in muratura, probabilmente in pietra, penetrante nel terreno per 60 cm e per 40 cm fuori terra. La struttura del solaio è rialzata, il piano di calpestio è esattamente 40 cm al di sopra del livello del terreno. Il tamponamento del solaio non sarà quindi a contatto con il terreno ma avrà al di sotto un'intercapedine di aria.

PARETI PERIMETRALI VERTICALI

Il tamponamento delle strutture verticali è costituito da un unico strato in terra paglia realizzato a umido.

COPERTURA

PARETI
VERTICALI

BASAMENTO

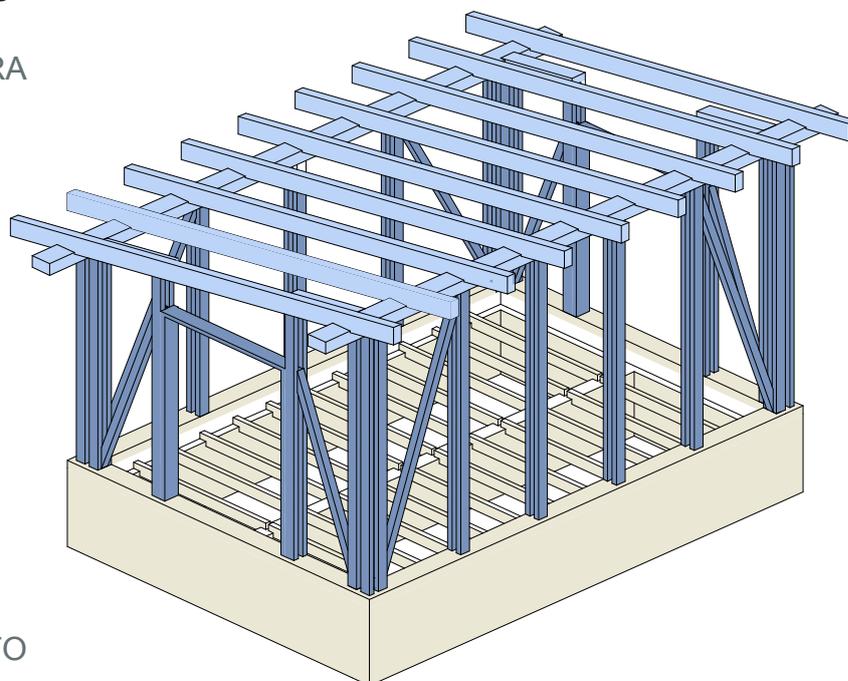


Figura 44

Schema progettuale: Soluzione B, assonometria

Non avendo voluto inserire uno strato isolante, lo spessore dello strato in terra-paglia è maggiore rispetto alla precedente soluzione. L'associazione di un pilastro singolo con il doppio controvento non è efficace per evitare lo spanciamento di tamponamenti molto spessi. Pertanto, in questo caso sono stati sdoppiati i pilastri.

COPERTURA

È stata progettata esattamente come la Struttura_A (vedi p. 54) per inclinazione e sporto.

5.1 Parete_B

INTERNO

1. intonaco a base argillosa
2. terra-paglia
3. intonaco in calce

ESTERNO

La parete è composta da un unico strato in terra-paglia.

La parete verrà realizzata attraverso l'utilizzo di casseri e la costipazione del composto. I doppi pilastri non saranno completamente inglobati dal getto ma, a seconda dello spessore dello strato di terra-paglia scelto, verrà adeguata la distanza tra di loro al fine di contenere meglio il composto.

A seconda della miscela utilizzata è possibile inserire delle aste orizzontali tra i pilastri in modo da contenere

composti molto densi che potrebbero essere soggetti a spanciamento.

Come riportato nell'immagine è tuttavia necessario inserire degli elementi portaintonaco, quali rete di iuta o cannucciato, in modo l'intonaco possa fare meglio presa sul montante in legno.

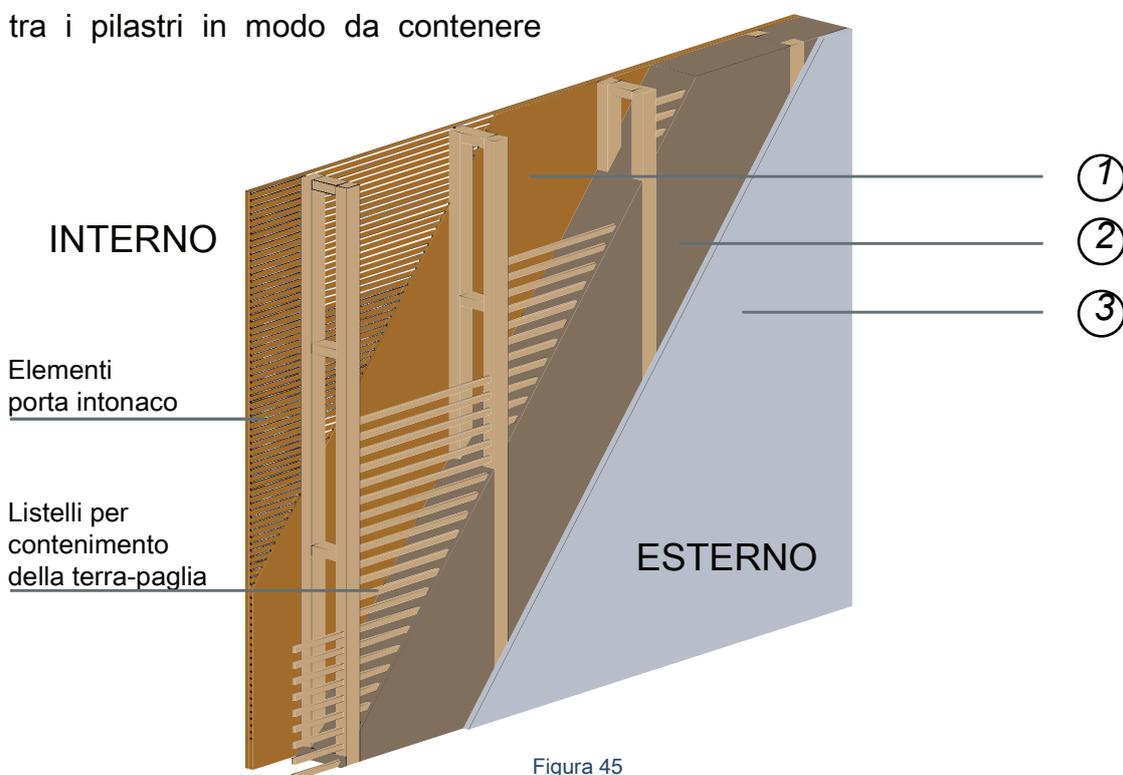


Figura 45

Schema progettuale: Parete_B, assonometria

Parete_B100

		Spessore s	Conduttività λ	Resistenza R	Densità ρ	Capacità c	Fattore μ
		mm	W/(mK)	m ² K/W	kg/m ³	kJ/(kgK)	-
	Adduttanza interna (flusso orizzontale)			0,130			
A	TESI_INTONACO TERRA E ARGILLA	2	0,900	0,022	1.800	1,00	7,5
B	TESI_TERRAPAGLIA D100	280	0,069	4,058	100	1,70	1,7
C	TESI_TERMINTONACO CALCEPIASCO	30	0,085	0,353	400	1,50	0,0
	Adduttanza esterna (flusso orizzontale)	-	-	0,040	-	-	-
	TOTALE	330		4,603			

Spessore : 330 mm
Trasmittanza : 0,217 W/m²K

Resistenza termica :4,603 m²K/W
Massa superf. :28 kg/m²

VERIFICHE DI CONDENSA

La struttura non è soggetta a fenomeni di condensa interstiziale.

Quantità ammissibile di vapore accumulato mensilmente in un'interfaccia:

G_{c,max}: 0,50 kg/m²

La struttura non è soggetta a fenomeni di condensa superficiale.

Metodo di calcolo umidità relativa ambiente interno: classi di concentrazione

Fattore di resistenza superficiale fR_{si}:
0,7238 (mese di ovembre)

CARATTERISTICHE DI INERZIA

TERMICA - UNI 13786

Sfasamento dell'onda termica:

10h 20'

Fattore di attenuazione 0,3764

Capacità termica interna:

39,7 kJ/m²K

Capacità termica esterna:

23,0 kJ/m²K

Trasmittanza periodica Y:

0,082 W/m²K

Parete_B200

		Spessore s	Conduttività λ	Resistenza R	Densità ρ	Capacità	Fattore μ
		mm	W/(mK)	m ² K/W	kg/m ³	kJ/(kgK)	-
	Adduttanza interna (flusso orizzontale)			0,130			
A	TESI_INTONACO TERRA E ARGILLA	20	0,900	0,022	1.800	1,00	7,5
B	TESI_TERRAPAGLIA D200	300	0,075	4,000	200	1,35	1,9
C	TESI_TERMINTONACO CALCEPIASCO	30	0,085	0,353	400	1,50	0,0
	Adduttanza esterna (flusso orizzontale)	-	-	0,040	-	-	-
	TOTALE	350		4,545			

Spessore : 350 mm
Trasmittanza : 0,220 W/m²K

Resistenza termica :4,545 m²K/W
Massa superf. :60 kg/m²

VERIFICHE DI CONDENSA

La struttura non è soggetta a fenomeni di condensa interstiziale.

Quantità ammissibile di vapore accumulato mensilmente in un'interfaccia:

G_{c,max}: 0,50 kg/m²

La struttura non è soggetta a fenomeni di condensa superficiale.

Metodo di calcolo umidità relativa ambiente interno: classi di concentrazione

Fattore di resistenza superficiale fR_{si}: 0,6843 (mese di gennaio)

CARATTERISTICHE DI INERZIA

TERMICA - UNI 13786

Sfasamento dell'onda termica:

13h 30'

Fattore di attenuazione 0,2001

Capacità termica interna:

40,3 kJ/m²K

Capacità termica esterna:

23,2 kJ/m²K

Trasmittanza periodica Y:

0,044 W/m²K

Parete_B300

		Spessore s	Conduttività λ	Resistenza R	Densità ρ	Capacità c	Fattore μ
		mm	W/(mK)	m ² K/W	kg/m ³	kJ/(kgK)	-
	Adduttanza interna (flusso orizzontale)			0,130			
A	TESI_INTONACO TERRA E ARGILLA	20	0,900	0,022	1.800	1,00	7,5
B	TESI_TERRAPAGLIA D300	350	0,087	4,023	300	1,23	2,0
C	TESI_TERMINTONACO CALCEPIASCO	30	0,085	0,353	400	1,50	0,0
	Adduttanza esterna (flusso orizzontale)	-	-	0,040	-	-	-
	TOTALE	400		4,568			

Spessore : 400 mm
Trasmittanza : 0,219 W/m²K

Resistenza termica : 4,568 m²K/W
Massa superf. : 105 kg/m²

VERIFICHE DI CONDENSA

La struttura non è soggetta a fenomeni di condensa interstiziale.

Quantità ammissibile di vapore accumulato mensilmente in un'interfaccia:

G_{c,max}: 0,50 kg/m²

La struttura non è soggetta a fenomeni di condensa superficiale.

Metodo di calcolo umidità relativa ambiente interno: classi di concentrazione

Fattore di resistenza superficiale fR_{si}: 0,7238 (mese di novembre)

CARATTERISTICHE DI INERZIA

TERMICA - UNI 13786

Sfasamento dell'onda termica:

17h 10'

Fattore di attenuazione 0,0908

Capacità termica interna:

41,5 kJ/m²K

Capacità termica esterna:

23,8 kJ/m²K

Trasmittanza periodica Y:

0,020 W/m²K

Parete_B400

		Spessore s	Conduttività λ	Resistenza R	Densità ρ	Capacità c	Fattore μ
		mm	W/(mK)	m ² K/W	kg/m ³	kJ/(kgK)	-
	Adduttanza interna (flusso orizzontale)			0,130			
A	TESI_INTONACO TERRA E ARGILLA	20	0,900	0,022	1.800	1,00	7,5
B	TESI_TERRAPAGLIA D400	420	0,105	4,000	400	1,18	2,3
C	TESI_TERMINTONACO CALCEPIASCO	30	0,085	0,353	400	1,50	0,0
	Adduttanza esterna (flusso orizzontale)	-	-	0,040	-	-	-
	TOTALE	470		4,545			

Spessore : 330 mm
Trasmittanza : 0,217 W/m²K

Resistenza :4,603 m²K/W
Massa superf. :28 kg/m²

VERIFICHE DI CONDENSA

La struttura non è soggetta a fenomeni di condensa interstiziale.

Quantità ammissibile di vapore accumulato mensilmente in un'interfaccia:

G_{c,max}: 0,50 kg/m²

La struttura non è soggetta a fenomeni di condensa superficiale.

Metodo di calcolo umidità relativa ambiente interno: classi di concentrazione

Fattore di resistenza superficiale 0,6843 (mese di gennaio)

CARATTERISTICHE DI INERZIA

TERMICA - UNI 13786

Sfasamento dell'onda termica:

21h 16'

Fattore di attenuazione 0,0356

Capacità termica interna:

43,3 kJ/m²K

Capacità termica esterna:

24,9 kJ/m²K

Trasmittanza periodica Y:

0,008 W/m²K

Parete_B500

		Spessore s	Conduttività λ	Resistenza R	Densità ρ	Capacità c	Fattore μ
		mm	W/(mK)	m ² K/W	kg/m ³	kJ/(kgK)	-
	Adduttanza interna (flusso orizzontale)			0,130			
A	TESI_INTONACO TERRA E ARGILLA	20	0,900	0,022	1.800	1,00	7,5
B	TESI_TERRAPAGLIA D500	520	0,129	4,031	500	1,14	2,6
C	TESI_TERMINTONACO CALCEPIASCO	30	0,085	0,353	400	1,50	0,0
	Adduttanza esterna (flusso orizzontale)	-	-	0,040	-	-	-
	TOTALE	570		4,576			

Spessore : 570 mm
Trasmittanza : 0,219 W/m²K

Resistenza termica: 4,576 m²K/W
Massa superf. : 260 kg/m²

VERIFICHE DI CONDENSA

La struttura non è soggetta a fenomeni di condensa interstiziale.

Quantità ammissibile di vapore accumulato mensilmente in un'interfaccia:

G_{c,max}: 0,50 kg/m²

La struttura non è soggetta a fenomeni di condensa superficiale.

Metodo di calcolo umidità relativa ambiente interno: classi di concentrazione

Fattore di resistenza superficiale fR_{si}:
0,7238 (mese di novembre)

CARATTERISTICHE DI INERZIA

TERMICA - UNI 13786

Sfasamento dell'onda termica:

26h 06'

Fattore di attenuazione 0,0113

Capacità termica interna:

45,3 kJ/m²K

Capacità termica esterna:

26,0 kJ/m²K

Trasmittanza periodica Y:

0,002 W/m²K

Parete_B600

		Spessore s	Conduktività λ	Resistenza R	Densità ρ	Capacità c	Fattore μ
		mm	W/(mK)	m ² K/W	kg/m ³	kJ/(kgK)	-
	Adduttanza interna (flusso orizzontale)			0,130			
A	TESI_INTONACO TERRA E ARGILLA	20	0,900	0,022	1.800	1,00	7,5
B	TESI_TERRAPAGLIA D600	650	0,159	4,088	600	1,12	2,8
C	TESI_TERMINTONACO CALCEPIASCO	30	0,085	0,353	400	1,50	0,0
	Adduttanza esterna (flusso orizzontale)	-	-	0,040	-	-	-
	TOTALE	700		4,633			

Spessore : 700 mm
Trasmittanza : 0,216 W/m²K

Resistenza termica :4,633 m²K/W
Massa superf. :390 kg/m²

VERIFICHE DI CONDENSA

La struttura non è soggetta a fenomeni di condensa interstiziale.

Quantità ammissibile di vapore accumulato mensilmente in un'interfaccia:

G_{c,max}: 0,50 kg/m²

La struttura non è soggetta a fenomeni di condensa superficiale.

Metodo di calcolo umidità relativa ambiente interno: classi di concentrazione

Fattore di resistenza superficiale fR_{si}: 0,6843 (mese di gennaio)

CARATTERISTICHE DI INERZIA

TERMICA - UNI 13786

Sfasamento dell'onda termica:

17h 53'

Fattore di attenuazione 0,0028

Capacità termica interna:

47,4 kJ/m²K

Capacità termica esterna:

26,9 kJ/m²K

Trasmittanza periodica Y:

0,001 W/m²K

Parete_B800

		Spessore s	Conduttività λ	Resistenza R	Densità ρ	Capacità c	Fattore μ
		mm	W/(mK)	m ² K/W	kg/m ³	kJ/(kgK)	-
	Adduttanza interna (flusso orizzontale)			0,130			
A	TESI_INTONACO TERRA E ARGILLA	20	0,900	0,022	1.800	1,00	7,5
B	TESI_TERRAPAGLIA D800	950	0,237	4,008	800	1,09	3,4
C	TESI_TERMINTONACO CALCEPIASCO	30	0,085	0,353	400	1,50	0,0
	Adduttanza esterna (flusso orizzontale)	-	-	0,040	-	-	-
	TOTALE	330		4,603			

Spessore :1000 mm
Trasmittanza : 0,220 W/m²K

Resistenza termica:4,554 m²K/W
Massa superf. :760 kg/m²

VERIFICHE DI CONDENSA

La struttura non è soggetta a fenomeni di condensa interstiziale.

Quantità ammissibile di vapore accumulato mensilmente in un'interfaccia:

G_{c,max}: 0,50 kg/m²

La struttura non è soggetta a fenomeni di condensa superficiale.

Metodo di calcolo umidità relativa ambiente interno: classi di concentrazione

Fattore di resistenza superficiale fR_{si}: 0,7238 (mese di novembre)

CARATTERISTICHE DI INERZIA

TERMICA - UNI 13786

Sfasamento dell'onda termica:

19h 23'

Fattore di attenuazione 0,0002

Capacità termica interna:

51,5 kJ/m²K

Capacità termica esterna:

28,5 kJ/m²K

Trasmittanza periodica Y:

0,001 W/m²K

Confronto tra le diverse soluzioni di parete

Il confronto è stato fatto per valutare le prestazioni di pareti monostrato di terra-paglia per evitare l'integrazione di uno strato di materiale isolante aggiuntivo.

Nel grafico 9q è possibile notare come, a parità di valori di trasmittanza, lo spessore delle pareti ottenute con i diversi composti cresca all'aumentare della densità.

Inversamente, lo sfasamento temporale (grafico 10) dell'onda termica è direttamente proporzionale all'aumento della densità del composto. Rispetto alla stratigrafia proposta per la struttura A (vedi capitolo 4.1) dove era possibile valutare lo spessore più adatto dello strato di terra-paglia e dell'isolante, in questa situazione (B) è sufficiente

considerare che le proposte che prevedono l'utilizzo di composti con densità superiori o uguali ai 500 kg/m³ comportano uno spessore troppo elevato per garantire adeguate prestazioni invernali. Pertanto le pareti che rappresentano il miglior compromesso tra prestazioni invernali ed estive sono:

- PareteB_200

$$U = 0.220 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Sfasamento termico: 13h 30'

Spessore: 350 mm

- PareteB_300

$$U = 0.219 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Sfasamento termico: 17h 10'

Spessore: 400 mm

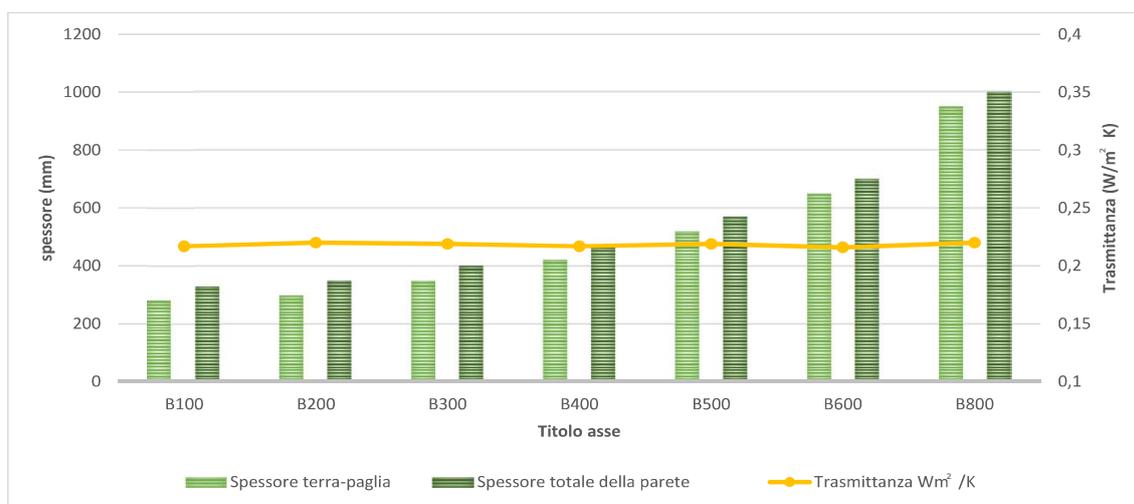


Grafico 9

Valori di trasmittanza termica in relazione allo spessore della parete, dello strato di terra paglia e quello dell'isolante per tutte le pareti simulate

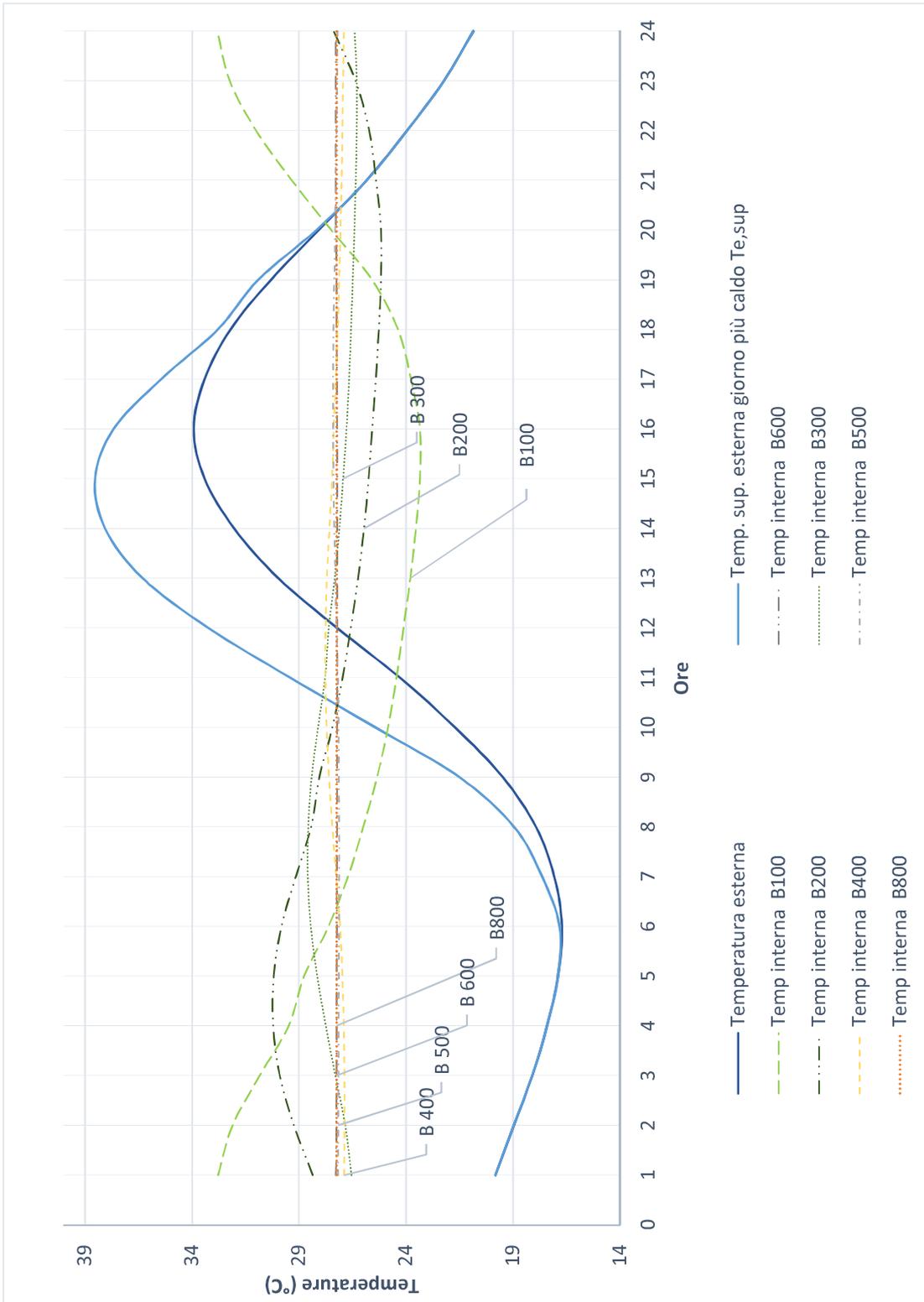


Grafico 10

Variazione di temperatura interna in relazione alle ore del giorno

5.2 Solaio_B

INTERNO

1. tavolato in legno
2. isolante in cellulosa
3. terra-paglia
4. legname

ESTERNO

Lo studio di questa soluzione stratigrafica parte dal presupposto che il solaio è rialzato rispetto al livello del terreno. Pertanto è presente un'intercapedine di aria.

La funzione di isolamento termico, che nella proposta fatta per la struttura A veniva svolta dall'argilla espansa, viene compensata dall'introduzione di

uno strato isolante in cellulosa sfusa. Le travi portanti del solaio, tra le quali viene inserito uno strato in terra-paglia che poggia su un tavolato in legno, viene aggiunta una serie di listelli in legno che faranno da sostegno alla pavimentazione a secco in legno. Nell'interasse tra i listelli viene insufflato l'isolamento in cellulosa.

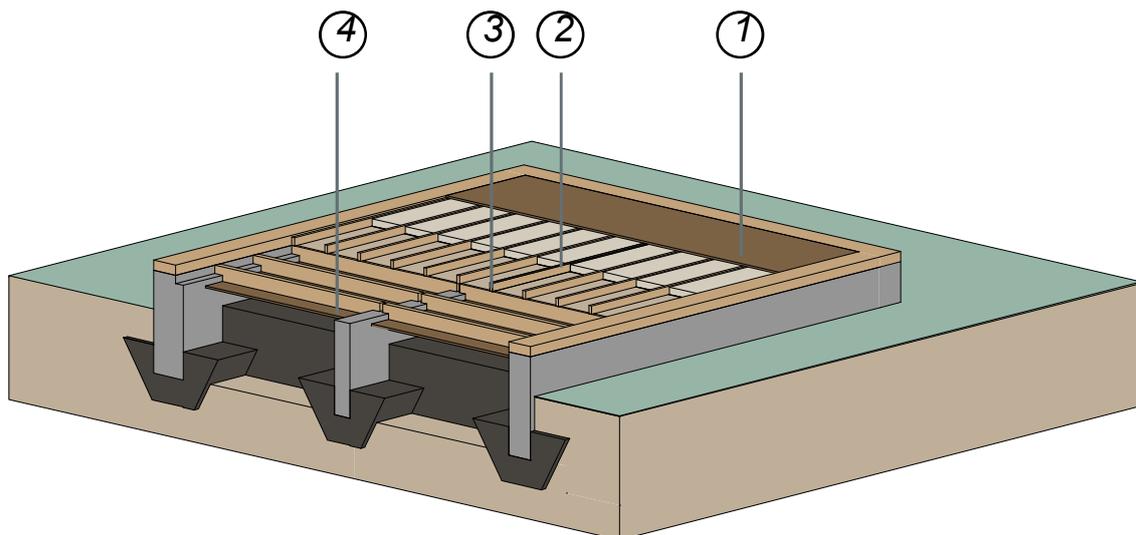


Figura 46

Schema progettuale: Solaio_B, assonometria

Solaio_B100

		Spessore s	Conduttività λ	Resistenza R	Densità ρ	Capacità c	Fattore μ
		mm	W/(mK)	m ² K/W	Kg/m ³	kJ/(kgK)	-
	Adduttanza interna (flusso verticale discendente)			0,170			
A	LEGNAME	20	0,012	0,167	450	1,60	20,0
B	TESI_CELLULOSA	60	0,039	1,538	70	1,90	2,0
C	TNT	10	0,037	0,027	30	1,40	2.192,0
D	TESI_TERRAPAGLIA D100	140	0,069	2,029	100	1,70	1,7
E	LEGNAME	20	0,012	0,167	450	1,60	20,0
	Adduttanza esterna (flusso verticale discendente)	-	-	0,040	-	-	-
	TOTALE	240		4,000			

Spessore : 240 mm
Trasmittanza : 0,25 W/m²K

Resistenza termica :4,00 m²K/W
Massa superf. : 46 kg/m²

VERIFICHE DI CONDENSA

La struttura è soggetta a fenomeni di condensa interstiziale. La quantità stagionale di vapore condensato è pari a 0,202 kg/m² (rievaporabile durante il periodo estivo).

Interfaccia C-D - Formazione di condensa: 0,2024 kg/m²

La struttura non è soggetta a fenomeni di condensa superficiale.

Quantità massima di vapore accumulato mensilmente

Metodo di calcolo umidità relativa ambiente interno: classi di concentrazione

Gc: 0,0594 kg/m² C-D nel mese di dicembre.

Fattore di resistenza superficiale fRsi: 0,7238

Quantità ammissibile di vapore accumulato mensilmente in un'interfaccia

(mese di novembre)

Gc,max: 0,50 kg/m²

Quantità di vapore residuo Ma: 0,0171 nel mese di gennaio kg/m² D-E

Esito della verifica di condensa interstiziale:

Solaio_B200

		Spessore s	Conduttività λ	Resistenza R	Densità ρ	Capacità c	Fattore μ
		mm	W/(mK)	m ² K/W	kg/m ³	kJ/(kgK)	-
	Adduttanza interna (flusso verticale discendente)			0,170			
A	LEGNAME	20	0,012	0,167	450	1,60	20,0
B	TESI_CELLULOSA	70	0,039	1,795	70	1,90	2,0
C	TNT	10	0,037	0,027	30	1,40	2.192,0
D	TESI_TERRAPAGLIA D200	140	0,075	1,867	200	1,35	1,9
E	LEGNAME	20	0,012	0,167	450	1,60	20,0
	Adduttanza esterna (flusso verticale discendente)	-	-	0,040	-	-	-
	TOTALE	251		4,121			

Spessore : 251 mm
Trasmittanza : 0,243 W/m²K

Resistenza termica :4,121 m²K/W
Massa superf. :61 kg/m²

VERIFICHE DI CONDENSA

La struttura è soggetta a fenomeni di condensa interstiziale. La quantità stagionale di vapore condensato è pari a 0,109 kg/m² (rievaporabile durante il periodo estivo).

Interfaccia D-E - Formazione di condensa: 0,1092 kg/m²

La struttura non è soggetta a fenomeni di condensa superficiale.

Quantità massima di vapore accumulato mensilmente

Metodo di calcolo umidità relativa ambiente interno: classi di concentrazione

Gc: 0,0342 kg/m² D-E nel mese di dicembre

Fattore di resistenza superficiale fRsi: 0,7238

Quantità ammissibile di vapore accumulato mensilmente in un'interfaccia

(mese di novembre)

Gc,max: 0,5000 kg/m²

Quantità di vapore residuo Ma: 0,1092 nel mese di febbraio kg/m² D-E

Esito della verifica di condensa interstiziale:

Solaio_B300

		Spessore s	Conduttività λ	Resistenza R	Densità ρ	Capacità c	Fattore μ
		mm	W/(mK)	m ² K/W	kg/m ³	kJ/(kgK)	-
	Adduttanza interna (flusso verticale discendente)			0,170			
A	LEGNAME	20	0,012	0,167	450	1,60	20,0
B	TESI_CELLULOSA	80	0,039	2,051	70	1,90	2,0
C	TNT	10	0,037	0,027	30	1,40	2.192,0
D	TESI_TERRAPAGLIA D300	140	0,087	1,609	300	1,23	2,0
E	LEGNAME	20	0,012	0,167	450	1,60	20,0
	Adduttanza esterna (flusso verticale discendente)	-	-	0,040	-	-	-
	TOTALE	260		4,093			

Spessore : 260 mm
Trasmittanza : 0,244 W/m²K

Resistenza termica : 4,093 m²K/W
Massa superf. : 76 kg/m²

VERIFICHE DI CONDENSA

La struttura è soggetta a fenomeni di condensa interstiziale. La quantità stagionale di vapore condensato è pari a 0,197 kg/m² (rievaporabile durante il periodo estivo).

Quantità massima di vapore accumulato mensilmente

Gc: 0,0580 kg/m² C-D nel mese di dicembre

Quantità ammissibile di vapore accumulato mensilmente in un'interfaccia

Gc,max: 0,50 kg/m²

Quantità di vapore residuo Ma: 0,1968 nel mese di marzo kg/m² C-D

Esito della verifica di condensa interstiziale:

Interfaccia C-D - Formazione di condensa: 0,1968 kg/m²

La struttura non è soggetta a fenomeni di condensa superficiale.

Metodo di calcolo umidità relativa ambiente interno: classi di concentrazione

Fattore di resistenza superficiale fRsi : 0,7238 (mese di novembre)

Solaio_B400

		Spessore s	Conduttività λ	Resistenza R	Densità ρ	Capacità c	Fattore μ
		mm	W/(mK)	m ² K/W	kg/m ³	kJ/(kgK)	-
	Adduttanza interna (flusso verticale discendente)			0,170			
A	LEGNAME	20	0,012	0,167	450	1,60	20,0
B	TESI_CELLULOSA	90	0,039	2,308	70	1,90	2,0
C	TNT	10	0,037	0,027	30	1,40	2.192,0
D	TESI_TERRAPAGLIA D400	140	0,105	1,333	400	1,18	2,3
E	LEGNAME	20	0,012	0,167	450	1,60	20,0
	Adduttanza esterna (flusso verticale discendente)	-	-	0,040	-	-	-
	TOTALE	270		4,073			

Spessore : 270 mm
Trasmittanza : 0,246 W/m²K

Resistenza termica : 4,073 m²K/W
Massa superf. : 90 kg/m²

VERIFICHE DI CONDENSA

La struttura è soggetta a fenomeni di condensa interstiziale. La quantità stagionale di vapore condensato è pari a 0,193 kg/m² (rievaporabile durante il periodo estivo).

Quantità massima di vapore accumulato mensilmente

Gc: 0,0572 kg/m² C-D nel mese di dicembre

Quantità ammissibile di vapore accumulato mensilmente in un'interfaccia

Gc,max: 0,50 kg/m²

Quantità di vapore residuo Ma: 0,1935 nel mese di marzo kg/m² C-D

Esito della verifica di condensa interstiziale:

Interfaccia C-D - Formazione di condensa: 0,1935 kg/m²

La struttura non è soggetta a fenomeni di condensa superficiale.

Metodo di calcolo umidità relativa ambiente interno: classi di concentrazione

Fattore di resistenza superficiale fRsi: 0,7238 (mese di novembre)

Solaio_B500

		Spessore s	Conduttività λ	Resistenza R	Densità ρ	Capacità c	Fattore μ
		mm	W/(mK)	m ² K/W	kg/m ³	kJ/(kgK)	-
	Adduttanza interna (flusso verticale discendente)			0,170			
A	LEGNAME	20	0,012	0,167	450	1,60	20,0
B	TESI_CELLULOSA	100	0,039	2,564	70	1,90	2,0
C	TNT	10	0,037	0,027	30	1,40	2.192,0
D	TESI_TERRAPAGLIA D500	140	0,129	1,085	500	1,14	2,6
E	LEGNAME	20	0,012	0,167	450	1,60	20,0
	Adduttanza esterna (flusso verticale discendente)	-	-	0,040	-	-	-
	TOTALE	280		4,082			

Spessore : 280 mm
Trasmittanza : 0,245 W/m²K

Resistenza termica : 4,082 m²K/W
Massa superf. : 105 kg/m²

VERIFICHE DI CONDENSA

La struttura è soggetta a fenomeni di condensa interstiziale. La quantità stagionale di vapore condensato è pari a 0,190 kg/m² (rievaporabile durante il periodo estivo).

Quantità massima di vapore accumulato mensilmente

Gc: 0,0562 kg/m² C-D nel mese di dicembre

Quantità ammissibile di vapore accumulato mensilmente in un'interfaccia

Gc,max: 0,50 kg/m²

Quantità di vapore residuo Ma: 0,1895 nel mese di marzo kg/m² C-D

Esito della verifica di condensa interstiziale:

Interfaccia C-D - Formazione di condensa: 0,1895 kg/m²

La struttura non è soggetta a fenomeni di condensa superficiale.

Metodo di calcolo umidità relativa ambiente interno: classi di concentrazione

Fattore di resistenza superficiale fRsi: 0,7238 (mese di novembre)

Confronto tra le diverse soluzioni di solaio

Le soluzioni stratigrafiche proposte mantengono invariato lo spessore di terrapaglia interposto alle travi portanti del solaio. Nel grafico 11 è evidente come a seconda del tipo di composto utilizzato viene adeguato lo spessore di isolante e dei listelli per ottenere stratigrafie con trasmittanze simili, che rispettino i limiti di legge. Analogamente al ragionamento fatto per la struttura A, avendo bisogno (per il solaio controterra) di una struttura che isoli dal freddo e non dal caldo sono stati valutati composti leggeri con densità inferiori ai 500 kg/m³. Dacché questa proposta porta a un ingente utilizzo di legname, la scelta è ricaduta sui solai che ci permettessero minimizzare, per quanto possibile, lo

spessore dei listelli di sostegno alla pavimentazione.

Di conseguenza i solai più adatti al nostro studio risultano:

- SolaioB_200

$$U = 0.220 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Sfasamento termico: 13h 30'

Spessore: 350 mm

- SolaioB_300

$$U = 0.219 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Sfasamento termico: 17h 10'

Spessore: 400 mm

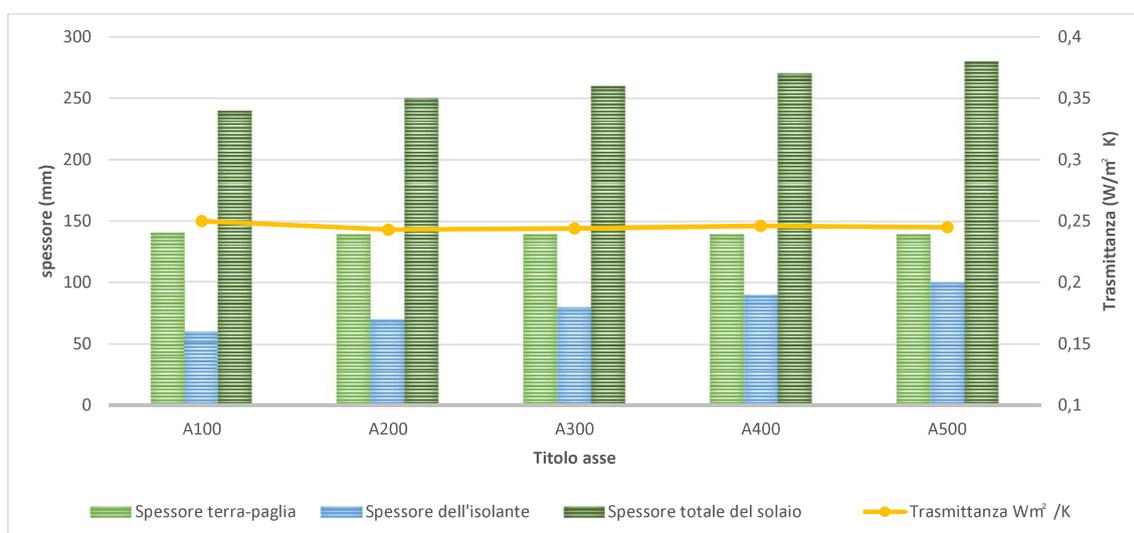


Grafico 11

Valori di trasmittanza termica in relazione allo spessore della parete, dello strato di terra paglia e quello dell'isolante per tutti i solai simulati

5.3 Copertura_B

INTERNO

1. intonaco in argilla
2. terra-paglia
3. lolla di riso
4. tavolato in legno
5. manto in lamiera

ESTERNO

La copertura è la struttura che è maggiormente soggetta all'irraggiamento solare; è pertanto opportuno studiare una stratigrafia massiva che possa contribuire all'attenuazione dell'onda termica nel periodo estivo. La soluzione proposta inserisce uno strato in terra-paglia nell'interasse tra le travi di copertura. Al contempo viene inserito uno strato

isolante in lolla di riso che garantisca le prestazioni di isolamento termico invernale, che i materiali in terra non possono raggiungere.

La finitura interna potrebbe variare a seconda del tipo di composto utilizzato. Se si tratta di composti con una densità superiore ai 400 kg/m^3 si suppone che sia possibile sostenere la miscela di terra e paglia con listelli incastrati alle travi: in questo caso la rifinitura interna potrebbe essere in argilla. Nel caso in cui si utilizzino composti più leggeri, si ipotizza di associare un tavolato in perline che saranno anch'esse avvitate alle travi.

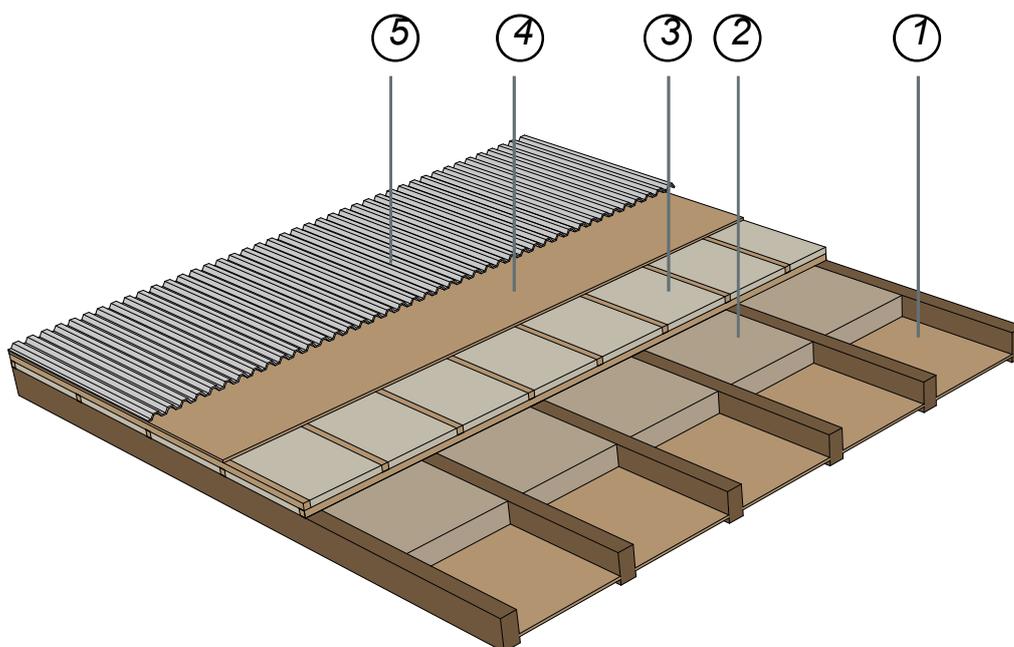


Figura 47

Schema progettuale: Copertura_B, assonometria

Copertura_B200

		Spessore s	Conduttività λ	Resistenza R	Densità ρ	Capacità c	Fattore μ
		mm	W/(mK)	m ² K/W	kg/m ³	kJ/(kgK)	-
	Adduttanza interna (flusso orizzontale)			0,100			
A	TESI_INTONACO TERRA E ARGILLA	30	0,900	0,033	1.800	1,00	7,5
B	TESI_TERRAPAGLIA D200	160	0,075	2,133	200	1,35	1,9
C	BARRIERA AL VAPORE	1	0,400	0,003	500	0,43	30000
D	LOLLA DI RISO	80	0,037	2,162	120	1,90	2,0
E	FRENO AL VAPORE	1	0,400	0,003	620	1,50	100,0
F	LEGNAME	20	0,120	0,167	450	1,60	20,0
G	LAMIERA ALLUMINIO	20	160,000	0,000	2.800	0,88	30000
	Adduttanza esterna (flusso orizzontale)	-	-	0,040	-	-	-
	TOTALE	312		4,641			

Spessore : 312 mm
Trasmittanza : 0,215 W/m²K

Resistenza termica : 4,641 m²K/W
Massa superf. : 108 kg/m²

VERIFICHE DI CONDENSA

Metodo di calcolo umidità relativa ambiente interno: classi di concentrazione

Fattore di resistenza superficiale fR_{si}:
0,7238 (mese di novembre)

La struttura non è soggetta a fenomeni di condensa superficiale.

Quantità massima di vapore accumulato mensilmente:

G_c: 0,00 kg/m²

La struttura è soggetta a fenomeni di condensa. La quantità stagionale di vapore condensato è pari a 0,114 kg/m² (rievaporabile durante il periodo estivo).

Quantità di vapore residuo Ma: 0,1143 nel mese di gennaio kg/m² B-C

CARATTERISTICHE DI INERZIA

TERMICA - UNI 13786

Sfasamento dell'onda termica:

11h 54'

Fattore di attenuazione 0,2928

Capacità termica interna:

54,7 kJ/m²K

Capacità termica esterna:

66,8 kJ/m²K

Trasmittanza periodica Y:

0,063 W/m²K

Copertura_B300

		Spessore s	Conduttività λ	Resistenza R	Densità ρ	Capacità c	Fattore μ
		mm	W/(mK)	m ² K/W	kg/m ³	kJ/(kgK)	-
	Adduttanza interna (flusso orizzontale)			0,100			
A	TESI_INTONACO TERRA E ARGILLA	30	0,900	0,033	1.800	1,00	7,5
B	TESI_TERRAPAGLIA D300	180	0,087	2,069	300	1,23	2,0
C	BARRIERA AL VAPORE	1	0,400	0,003	500	0,43	30000
D	LOLLA DI RISO	80	0,037	2,162	120	1,90	2,0
E	FRENO AL VAPORE	1	0,400	0,003	620	1,50	100,0
F	LEGNAME	20	0,120	0,167	450	1,60	20,0
G	LAMIERA ALLUMINIO	20	160,000	0,000	2.800	0,88	30000
	Adduttanza esterna (flusso orizzontale)	-	-	0,040	-	-	-
	TOTALE	331		4,574			

Spessore : 331 mm
Trasmittanza : 0,219 W/m²K

Resistenza termica : 4,574 m²K/W
Massa superf. : 129 kg/m²

VERIFICHE DI CONDENSA

Metodo di calcolo umidità relativa ambiente interno: classi di concentrazione

Fattore di resistenza superficiale fR_{si}:
0,7238 (mese di Novembre)

La struttura non è soggetta a fenomeni di condensa superficiale.

Quantità massima di vapore accumulato mensilmente:

G_c: 0,00 kg/m²

La struttura è soggetta a fenomeni di condensa. La quantità stagionale di vapore condensato è pari a 0,090 kg/m² (rievaporabile durante il periodo estivo).

Quantità di vapore residuo Ma: 0,0900 nel mese di marzo kg/m² F-G

CARATTERISTICHE DI INERZIA

TERMICA - UNI 13786

Sfasamento dell'onda termica:

13h 29'

Fattore di attenuazione 0,2020

Capacità termica interna:

55,5 kJ/m²K

Capacità termica esterna:

66,3 kJ/m²K

Trasmittanza periodica Y:

0,044 W/m²K

Copertura_B400

		Spessore s	Conducibilità λ	Resistenza R	Densità ρ	Capacità c	Fattore μ
		mm	W/(mK)	m ² K/W	kg/m ³	kJ/(kgK)	-
	Adduttanza interna (flusso orizzontale)			0,100			
A	TESI_INTONACO TERRA E ARGILLA	30	0,900	0,033	1.800	1,00	7,5
B	TESI_TERRAPAGLIA D400	160	0,105	1,524	400	1,18	2,3
C	BARRIERA AL VAPORE	1	0,400	0,003	500	0,43	30000
D	LOLLA DI RISO	100	0,037	2,703	120	1,90	2,0
E	FRENO AL VAPORE	1	0,400	0,003	620	1,50	100,0
F	LEGNAME	20	0,120	0,167	450	1,60	20,0
G	LAMIERA ALLUMINIO	20	160,000	0,000	2.800	0,88	30000
	Adduttanza esterna (flusso orizzontale)	-	-	0,040	-	-	-
	TOTALE	331		4,570			

Spessore : 331 mm
Trasmittanza : 0,219 W/m²K

Resistenza termica: 4,570 m²K/W
Massa superf. :142 kg/m²

VERIFICHE DI CONDENSA

Metodo di calcolo umidità relativa ambiente interno: classi di concentrazione

Fattore di resistenza superficiale fR_{si}:
0,7238 (mese di Novembre)

La struttura non è soggetta a fenomeni di condensa superficiale.

Quantità massima di vapore accumulato mensilmente:

G_c: 0,00 kg/m²

La struttura è soggetta a fenomeni di condensa. La quantità stagionale di vapore condensato è pari a 0,090 kg/m² (rievaporabile durante il periodo estivo).

Quantità di vapore residuo Ma: 0,0901 nel mese di marzo kg/m² F-G

CARATTERISTICHE DI INERZIA

TERMICA - UNI 13786

Sfasamento dell'onda termica:
13h 55'

Fattore di attenuazione 0,1877

Capacità termica interna:
56,8 kJ/m²K

Capacità termica esterna:
66,5 kJ/m²K

Trasmittanza periodica Y:
0,041 W/m²K

Copertura_B500

		Spessore s	Conduttività λ	Resistenza R	Densità ρ	Capacità c	Fattore μ
		mm	W/(mK)	m ² K/W	kg/m ³	kJ/(kgK)	-
	Adduttanza interna (flusso orizzontale)			0,100			
A	TESI_INTONACO TERRA E ARGILLA	30	0,900	0,033	1.800	1,00	7,5
B	TESI_TERRAPAGLIA D500	140	0,129	1,085	500	1,14	2,6
C	BARRIERA AL VAPORE	1	0,400	0,003	500	0,43	30000
D	LOLLA DI RISO	120	0,037	3,243	120	1,90	2,0
E	FRENO AL VAPORE	1	0,400	0,003	620	1,50	100,0
F	LEGNAME	20	0,120	0,167	450	1,60	20,0
G	LAMIERA ALLUMINIO	20	160,000	0,000	2.800	0,88	30000
	Adduttanza esterna (flusso orizzontale)	-	-	0,040	-	-	-
	TOTALE	331		4,672			

Spessore : 331 mm
Trasmittanza : 0,214 W/m²K

Resistenza termica : 4,672 m²K/W
Massa superf. : 150 kg/m²

VERIFICHE DI CONDENSA

Metodo di calcolo umidità relativa ambiente interno: classi di concentrazione

Fattore di resistenza superficiale fR_{si}:
0,7238 (mese di novembre)

La struttura non è soggetta a fenomeni di condensa superficiale.

Quantità massima di vapore accumulato mensilmente:

G_c: 0,00 kg/m²

La struttura è soggetta a fenomeni di condensa. La quantità stagionale di vapore condensato è pari a 0,088 kg/m² (rievaporabile durante il periodo estivo).

Quantità di vapore residuo Ma: 0,0882 nel mese di marzo kg/m² F-G

CARATTERISTICHE DI INERZIA

TERMICA - UNI 13786

Sfasamento dell'onda termica:

14h 03'

Fattore di attenuazione 0,1918

Capacità termica interna:

58,4 kJ/m²K

Capacità termica esterna:

66,7 kJ/m²K

Trasmittanza periodica Y:

0,041 W/m²K

Copertura_B600

		Spessore s	Conduttività λ	Resistenza R	Densità ρ	Capacità c	Fattore μ
		mm	W/(mK)	m ² K/W	kg/m ³	kJ/(kgK)	-
	Adduttanza interna (flusso orizzontale)			0,100			
A	TESI_INTONACO TERRA E ARGILLA	30	0,900	0,033	1.800	1,00	7,5
B	TESI_TERRAPAGLIA D600	120	0,159	0,755	600	1,12	2,8
C	BARRIERA AL VAPORE	1	0,400	0,003	500	0,43	30000
D	LOLLA DI RISO	140	0,037	3,784	120	1,90	2,0
E	FRENO AL VAPORE	1	0,400	0,003	620	1,50	100,0
F	LEGNAME	20	0,120	0,167	450	1,60	20,0
G	LAMIERA ALLUMINIO	20	160,000	0,000	2.800	0,88	30000
	Adduttanza esterna (flusso orizzontale)	-	-	0,040	-	-	-
	TOTALE	331		4,882			

Spessore : 331 mm
Trasmittanza : 0,205 W/m²K

Resistenza termica : 4,882 m²K/W
Massa superf. : 155 kg/m²

VERIFICHE DI CONDENSA

Metodo di calcolo umidità relativa ambiente interno: classi di concentrazione

Fattore di resistenza superficiale fR_{si}:
0,7238 (mese di novembre)

La struttura non è soggetta a fenomeni di condensa superficiale.

Quantità massima di vapore accumulato mensilmente:

G_c: 0,00 kg/m²

La struttura è soggetta a fenomeni di condensa. La quantità stagionale di vapore condensato è pari a 0,084 kg/m² (rievaporabile durante il periodo estivo).

Quantità di vapore residuo Ma: 0,0844 nel mese di marzo kg/m² F-G

CARATTERISTICHE DI INERZIA

TERMICA - UNI 13786

Sfasamento dell'onda termica:

14h 08'

Fattore di attenuazione 0,2011

Capacità termica interna:

60,7 kJ/m²K

Capacità termica esterna:

66,7 kJ/m²K

Trasmittanza periodica Y:

0,041 W/m²K

Confronto tra le diverse soluzioni di copertura

Obiettivo prioritario era trovare una composizione che potesse avere componente massiva senza aumentare troppo il peso della copertura, che andrebbe ad appesantire la struttura portante.

A questo scopo, come è evidenziato del grafico 12, all'aumentare della densità dei composti è stato volutamente diminuito lo spesso dello strato.

Analogamente alle altre strutture che vedono integrazione tra materiali a base terrosa e isolante, lo spessore di quest'ultimo è direttamente proporzionale all'aumento della densità per il primo.

Per quanto riguarda le prestazioni

estive, come risulta dal grafico 13, è possibile affermare che tutte le ipotesi stratigrafiche dimostrano ragguardevoli risultati.

Considerando lo spessore dello strato in terrapaglia (al fine di non appesantire la struttura) e dello strato isolante (allo scopo di minimizzare la sezione dei listelli interposti allo stesso), le soluzioni considerate più adatte al progetto sono:

- Copertura B_400

$$U = 0.219 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Sfasamento termico: 13h 55'

Spessore: 331 mm

- Copertura B_500

$$U = 0.214 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Sfasamento termico: 14h 03'

Spessore: 331 mm

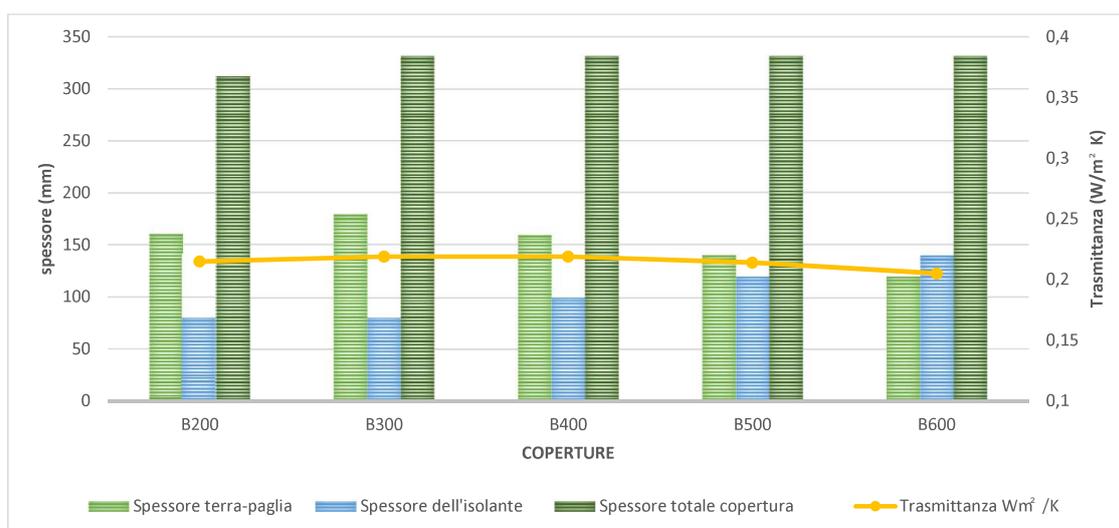


Grafico 12

Valori di trasmittanza termica in relazione allo spessore della parete, dello strato di terra paglia e quello dell'isolante per tutte le pareti simulate

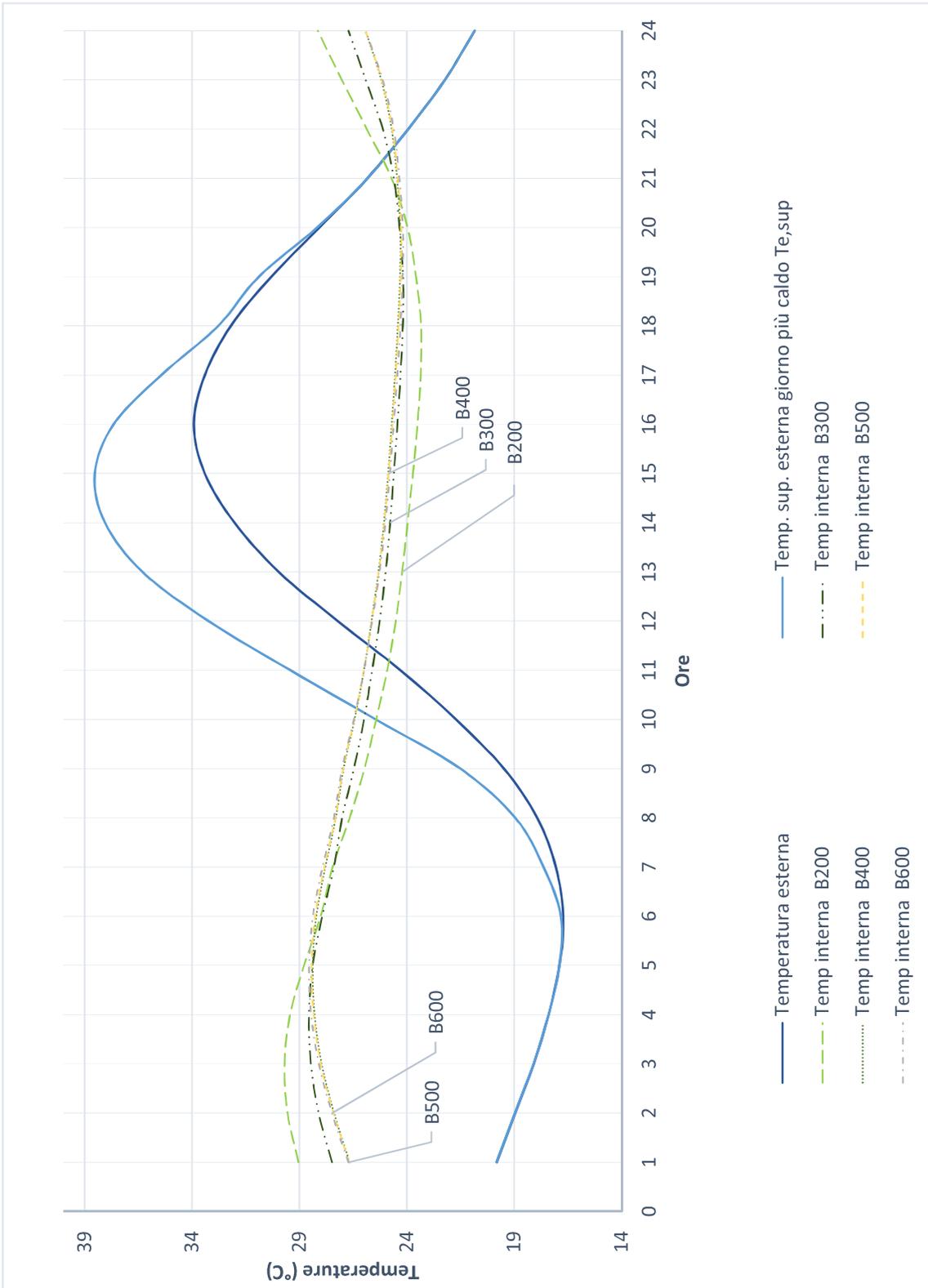


Grafico 13

Variazione di temperatura interna in relazione alle ore del giorno per le coperture simulate

5.4 Struttura_B

Dopo aver studiato le diverse ipotesi per tutte le strutture sono state identificate le soluzioni stratigrafiche che potessero essere più adatte alla realizzazione del padiglione, tenendo conto delle caratteristiche termogrometriche dei componenti e la loro specificità al tipo di struttura proposta. Molto peso è stato dato alla quantità di legname utilizzato sia per la struttura portante che per quella ausiliaria.

Le stratigrafie scelte in questa fase ci permetteranno una valutazione sia dal punto di vista termico, attraverso il calcolo dei carichi termici, sia dal punto

di vista economico e ambientale, con la compilazione di un computo dei materiali impiegati.

Di seguito verranno quindi indicate le stratigrafie scelte e gli elementi in legno strutturali e ausiliari ai quali vengono associate.

PARETI PERIMETRALI VERTICALI

- stratigrafia:

PARETE_B300

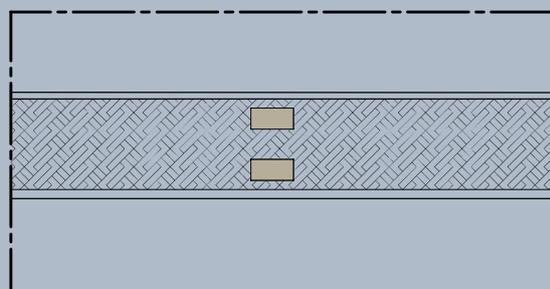
- legno strutturale:

PI_7*14 : pilastri in legno

(sezione 7cmx14cm)

CV_10*10 : controventi

(sezione 10cmx14cm)



Parete_B300
scala 1:20

TESI_INTONACO TERRA E ARGILLA	20 mm
TESI_TERRAPAGLIA D200	300 mm
TESI_CELLULOSA	80 mm
TESI_TERMINTONACO CALCEPIASCO	30 mm
TOTALE	350 mm
Massa superficiale	60 kg/m ²

SOLAIO INFERIORE

- stratigrafia

SOLAIO_B100

- legno strutturale:

DO_21*5 : dormiente per cordolo di collegamento tra fondazioni in muratura e pilastro

TR_7*14 : travi in legno

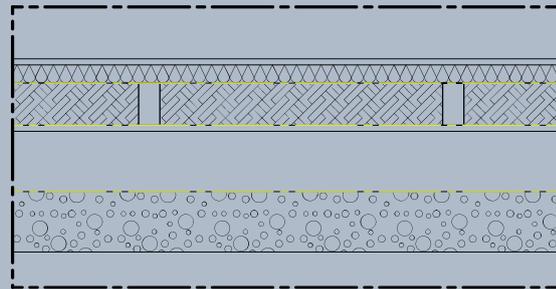
(sezione 7cmx14cm)

- legname ausiliario

TV_2 : tavolato in legno

(spessore 2cm)

LI_6*6: listelli di sostegno al tavolato



Solaio_B100
scala 1:20

LEGNAME	20 mm
TESI_CELLULOSA	60 mm
TNT	10 mm
TESI_TERRAPAGLIA D100	140 mm
LEGNAME	20 mm
TOTALE	362 mm
Massa superficiale	146 kg/m ²

COPERTURA

- stratigrafia

COPERTURA_B400

- legno strutturale

TR_22*12 Travi in legno

(sezione 22cmx12cm)

- legname ausiliario

TV_2 : tavolato in legno

(spessore 2cm)

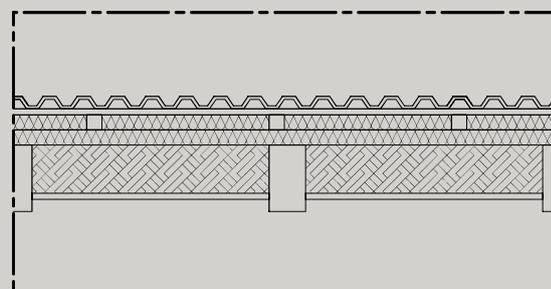
LI_4*4: listelli in legno per contenimento terra paglia

(sezione 4cmx4cm)

LI_5*5: listelli di sostegno al tavolato

DO_21*5 : dormiente

(sezione 21cmx15cm)



Copertura_A
scala 1:20

TESI_INTONACO TERRA E ARGILLA	30 mm
TESI_TERRAPAGLIA D400	160 mm
BARRIERA AL VAPORE	1 mm
LOLLA DI RISO	100 mm
FRENO AL VAPORE	1 mm
LEGNAME	20 mm
LAMIERA IN ALLUMINIO	20 mm
TOTALE	330 mm
Massa superficiale	142 kg/m ²

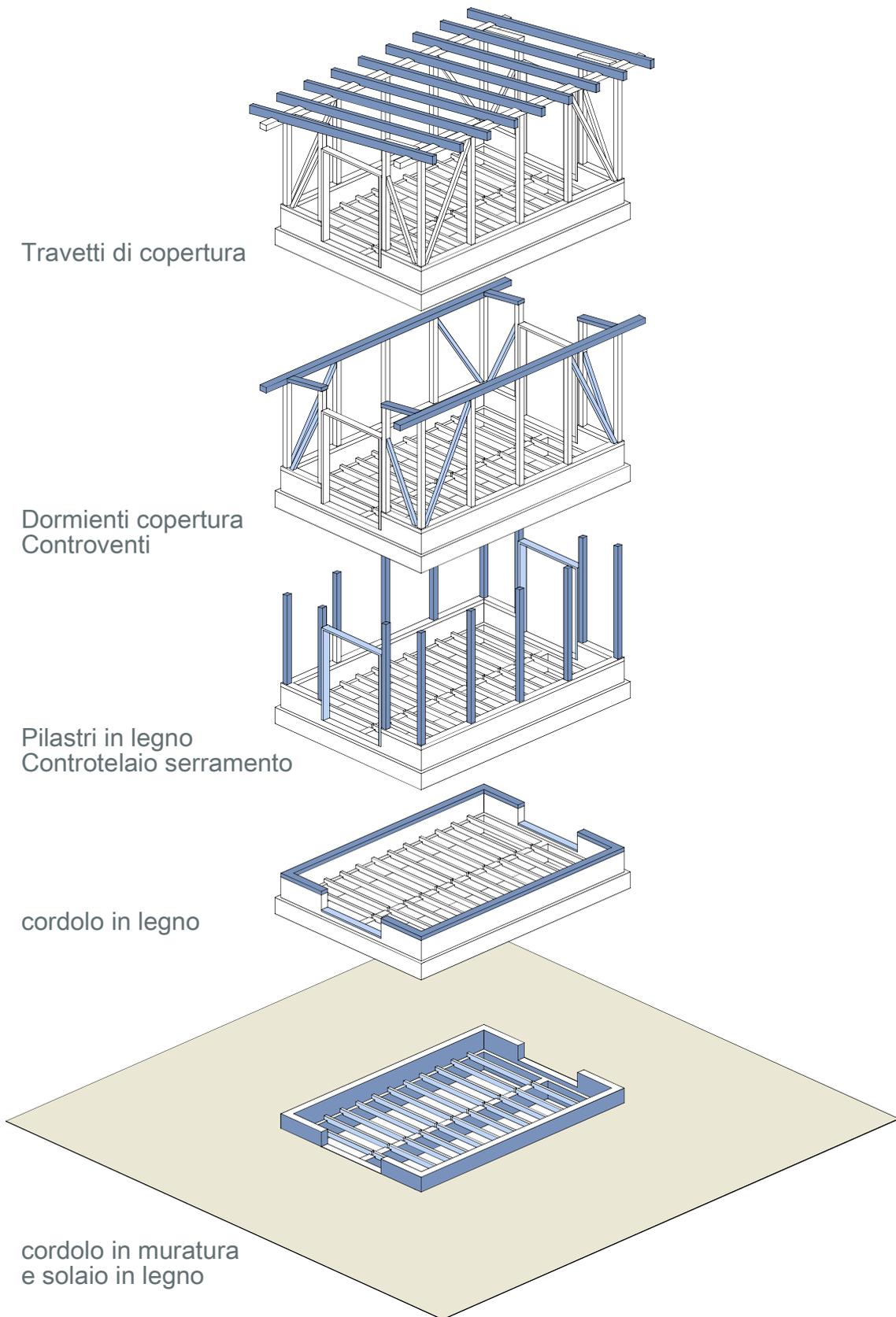


Figura 48

Schema progettuale: Struttura_A, spaccato assonometrico

FONDAZIONE

La fondazione è stata progettata prendendo a riferimento edifici in muratura ed è stata dimensionata in relazione all'edificio progettato. Non è stato possibile verificare la resistenza della fondazione.

TRAVETTI DEL SOLAIO

I travetti sono stati considerati in semplice appoggio: è consentita la rotazione rispetto all'asse Y dell'asta. La rotazione intorno all'asse X è stata vincolata.

La sezione del travetto è stata dimensionata e verificata in funzione del momento flettente rispetto all'asse Y, la sollecitazione predominante.

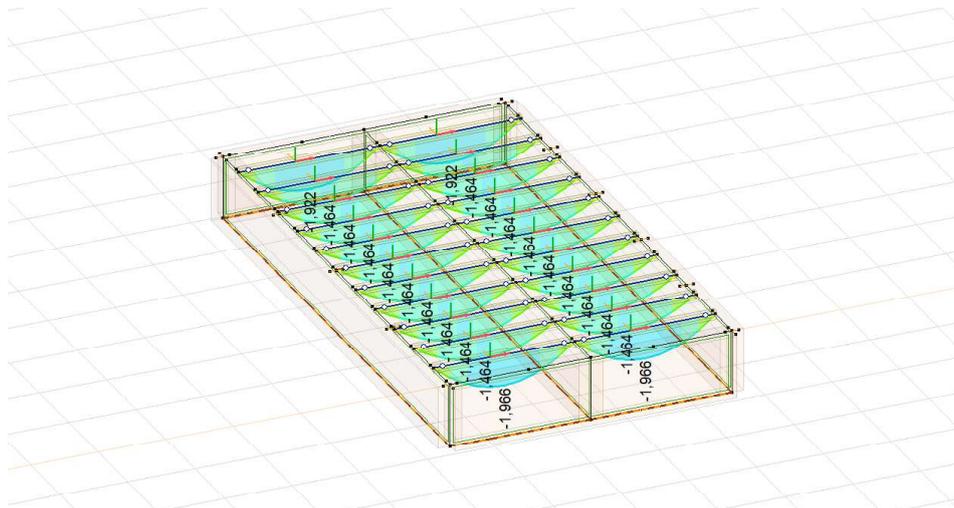


Figura 50

Caratteristiche di sollecitazione al momento flettente dei travetti del solaio

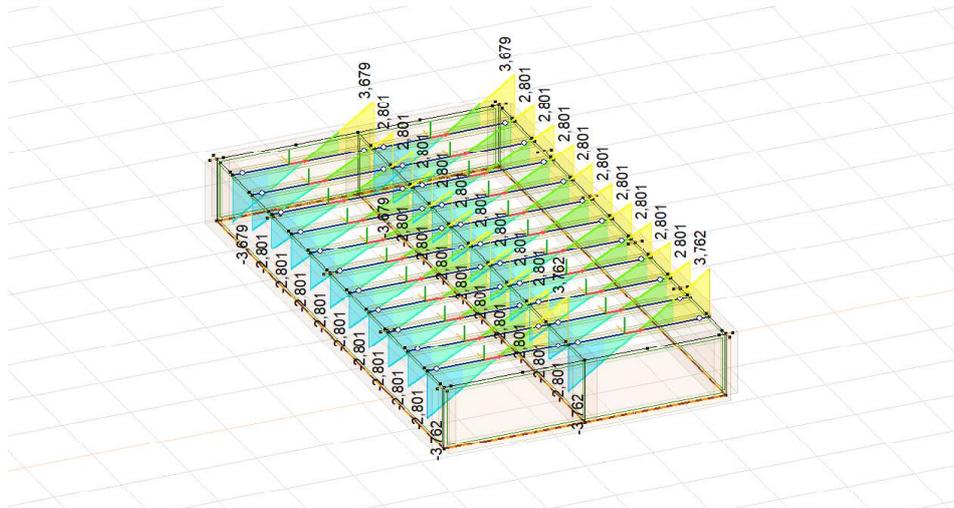


Figura 51

Caratteristiche di sollecitazione al taglio dei travetti del solaio

PILASTRO

Il pilastro è stato progettato doppio per ragioni esecutive. Nel calcolo sono state considerate entrambe le aste di ogni pilastro: in questo modo le due aste hanno grafici comparabili e le stesse sollecitazioni.

CONTROVENTO

Il controvento dal punto di vista strutturale è un elemento singolo. L'asta lavora principalmente a compressione ed è stata dimensionata per resistere allo sforzo normale. Il controvento è stato verificato a fronte delle azioni orizzontali.

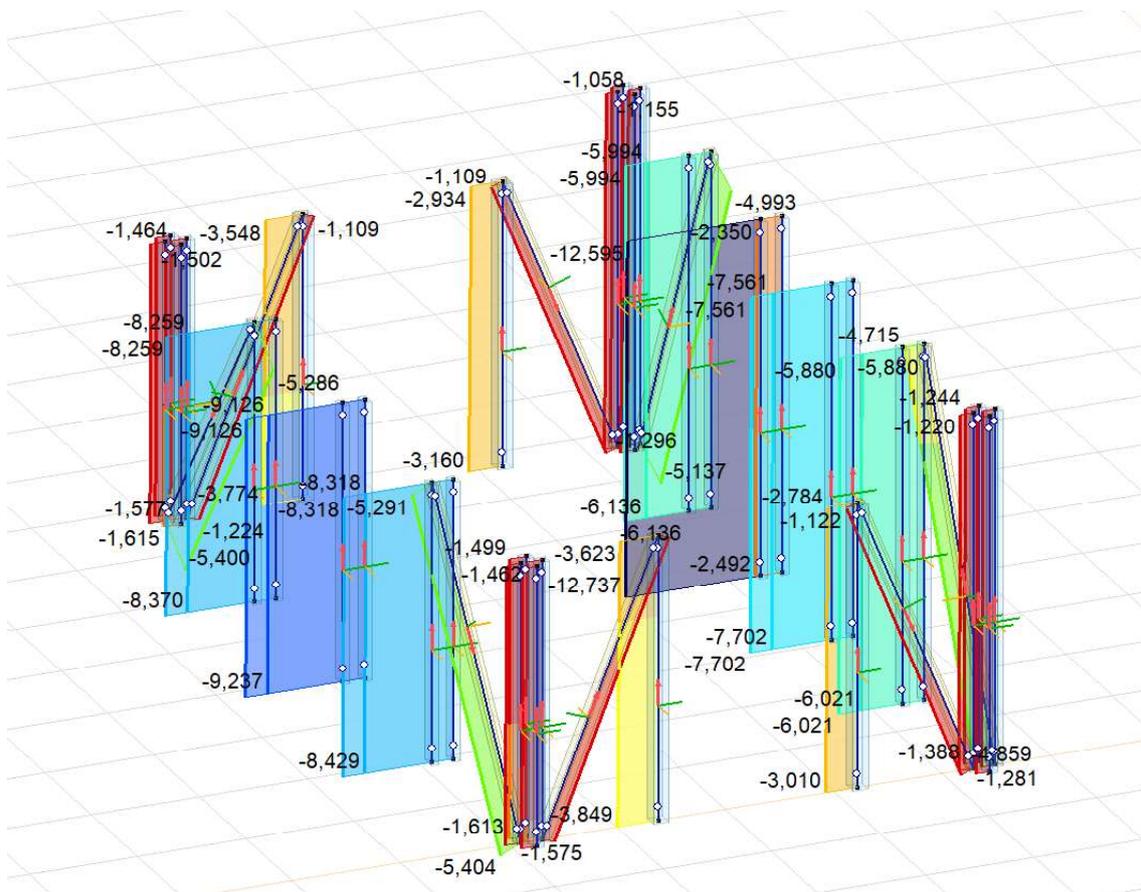


Figura 52
Caratteristiche di sollecitazione allo sforzo normale dei pilastri

TRAVETTI DI COPERTURA

I travetti di copertura sono stati calcolati come una travi a doppio sbalzo incernierate in semplice appoggio: per questo motivo i nodi progettati impediscono il movimento nel piano orizzontale. tutto i nodi progettati non sono stati dimensionati, quindi la dimensione dei tasselli in legno è ipotetica e deve essere calcolata.

NODI

Travi e pilastri sono collegati in semplice appoggio, per questo motivo i nodi progettati impediscono il movimento nel piano orizzontale. I nodi progettati non sono stati dimensionati, la dimensione dei tasselli in legno è pertanto ipotetica e deve essere calcolata.

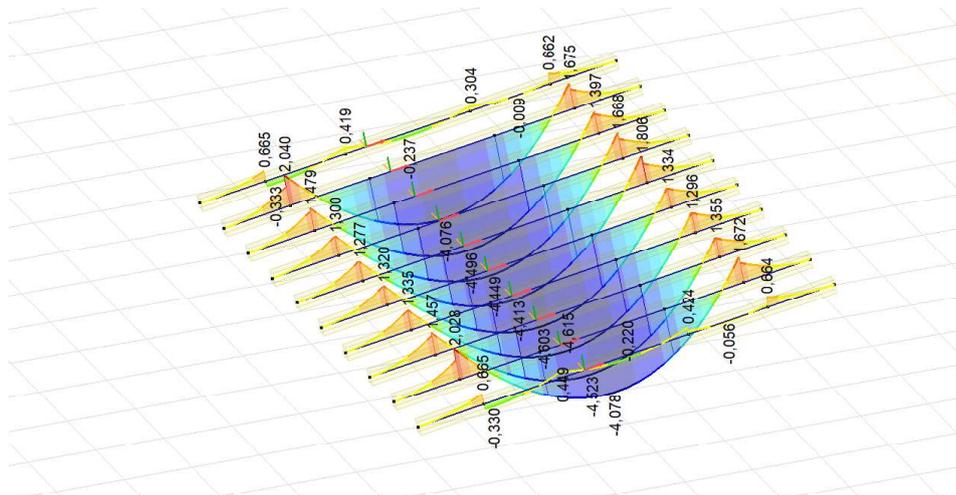


Figura 53

Caratteristiche di sollecitazione al momento delle travi di copertura

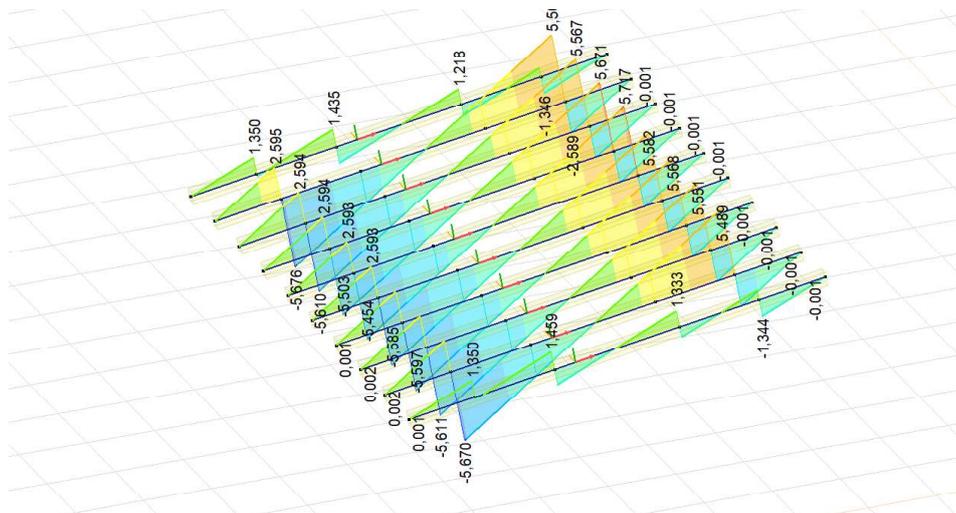


Figura 54

Caratteristiche di sollecitazione al taglio delle travi di copertura

5.5 Nodi strutturali

I giunti tra gli elementi strutturali, come quelli della proposta A, sono stati pensati per minimizzare la quantità di acciaio impiegata.

Nodo pilastro-fondazione

Come nella struttura A, il cordolo di fondazione in muratura è collegato al cordolo in legno con elementi metallici. Anche il giunto tra il cordolo in legno e il pilastro è accoppiamento tenone-mortasa, ma in questo caso è stato aggiunto un listello longitudinale nell'interasse tra i due pilastri. Il dormiente prende quindi una configurazione a T rovesciata, e si collega al pilastro tramite chiodi in legno.

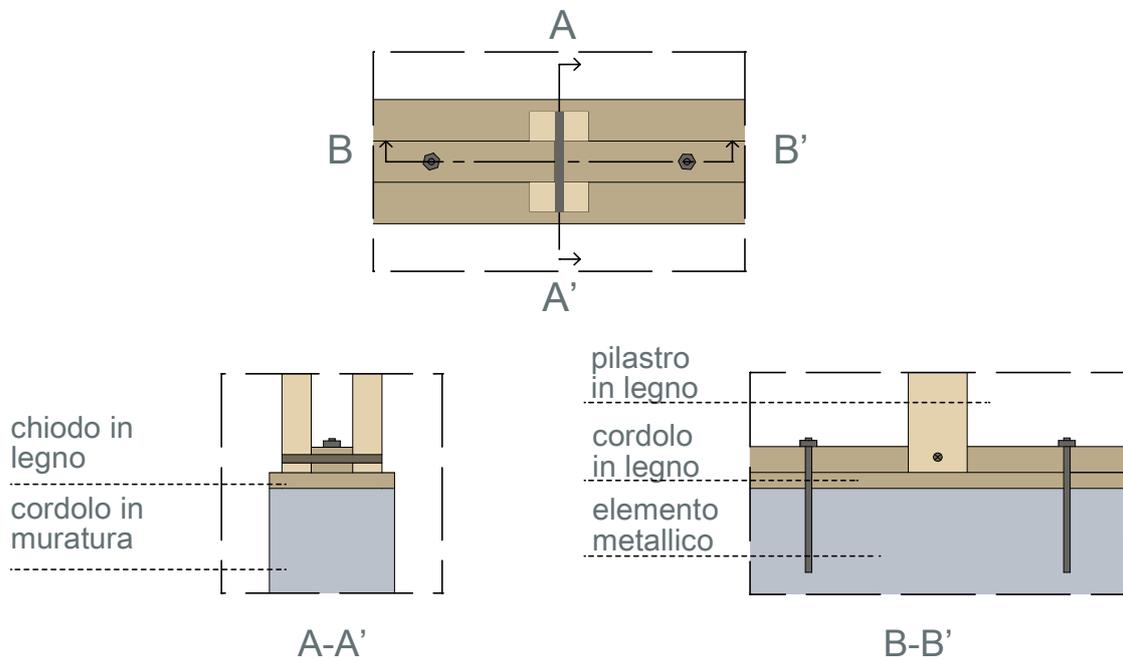


Figura 55

Cordolo in legno a T rovesciata

A. Marcom, *Costruire en terre-paille*, Terre vivante, 2011, p. 77..



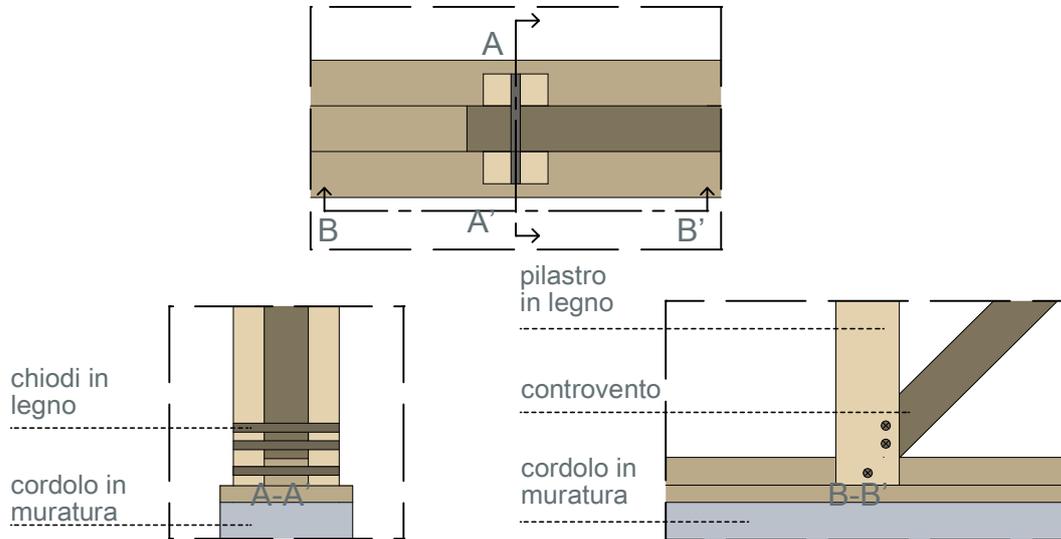
Figura 56

Cordolo in legno poggiante sul cordolo in muratura

A. Marcom, *Costruire en terre-paille*, Terre vivante, 2011, p. 77.

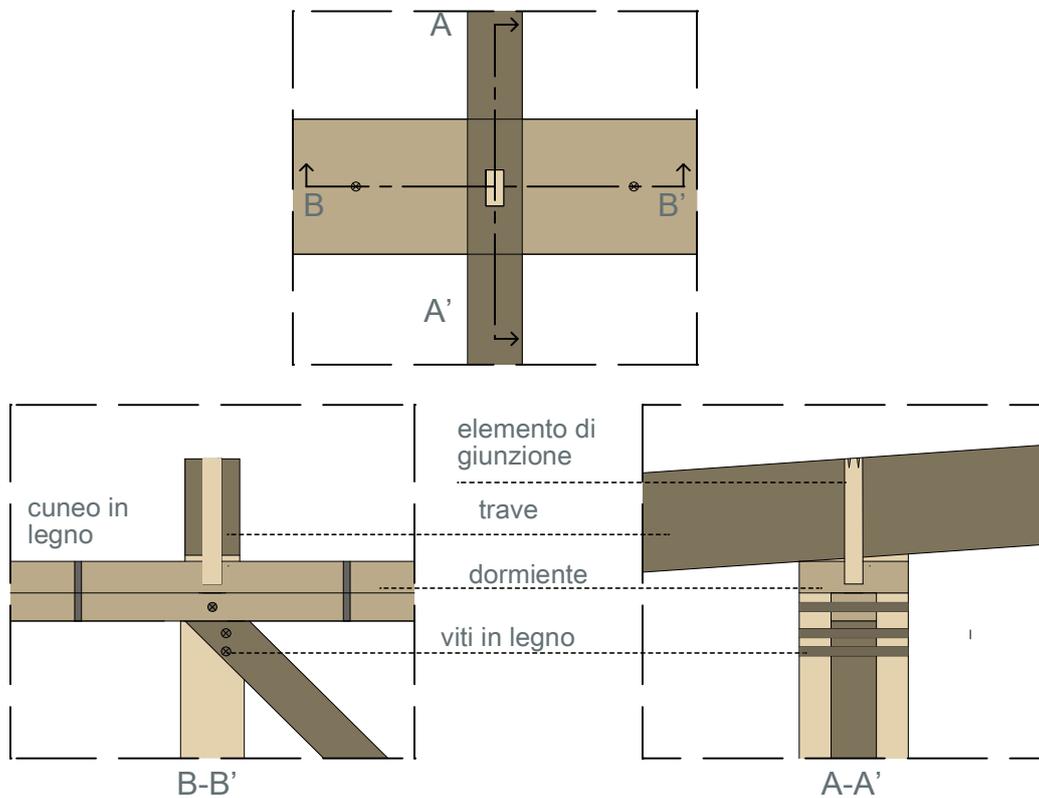
Nodo pilastro-controvento

Il controvento, poggiante sul cordolo di copertura, si incastra al pilastro. Due chiodi in legno passanti da un lato all'altro fissano il giunto.



Nodo dormiente-trave

Il giunto tra il dormiente di copertura e il pilastro è stato pensato come il nodo parete-fondazione. In questo modo i tre elementi (dormiente, pilastri e controventi) rimangono connessi dagli stessi elementi in legno.



5.6 Particolari costruttivi e ponti termici

I ponti termici analizzati sono i seguenti:

- PT_PILASTRO: calcolato su PATERE_B300
- PT_ANGOLO: calcolato su PATERE_A300
- PT_COPERTURA: calcolato nel punto di incontro tra PARETE_B300 e SOLAIO_B100.

e COPERTURA_B400

- PT_FONDAZIONE: calcolato nel punto di incontro tra PARETE_B300 e SOLAIO_B100.

PT_PILASTRO

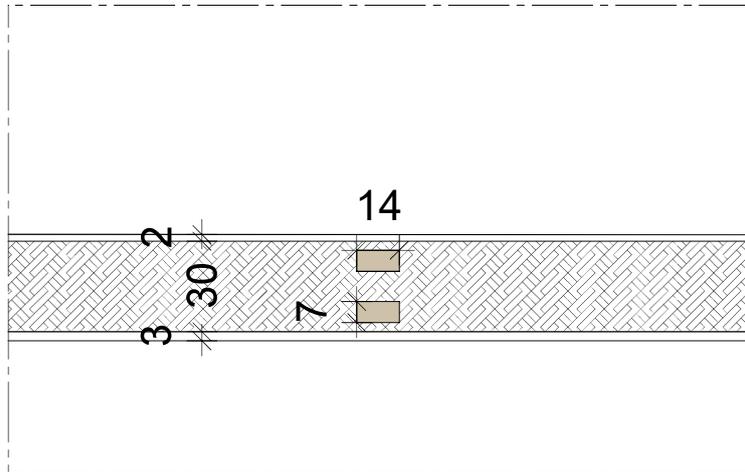


Figura 57

Particolare costruttivo: Parete
scala: 1:25

PT_PILASTRO

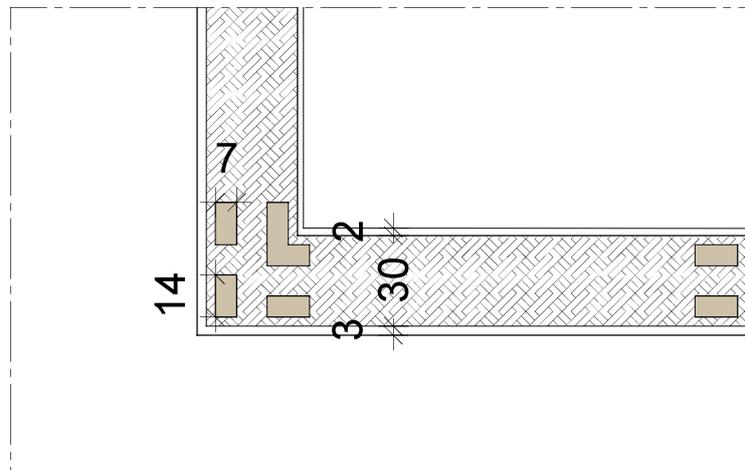


Figura 58

Particolare costruttivo: Angolo tra pareti
scala: 1:25

PT_PILASTRO

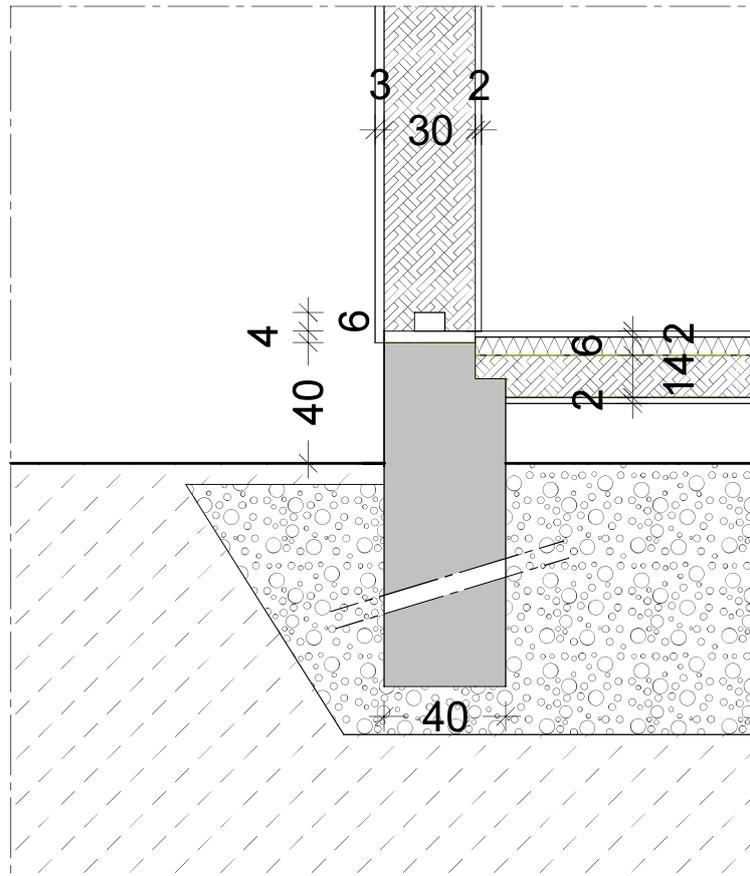


Figura 59

Particolare costruttivo: Parete-Fondazione
scala: 1:25

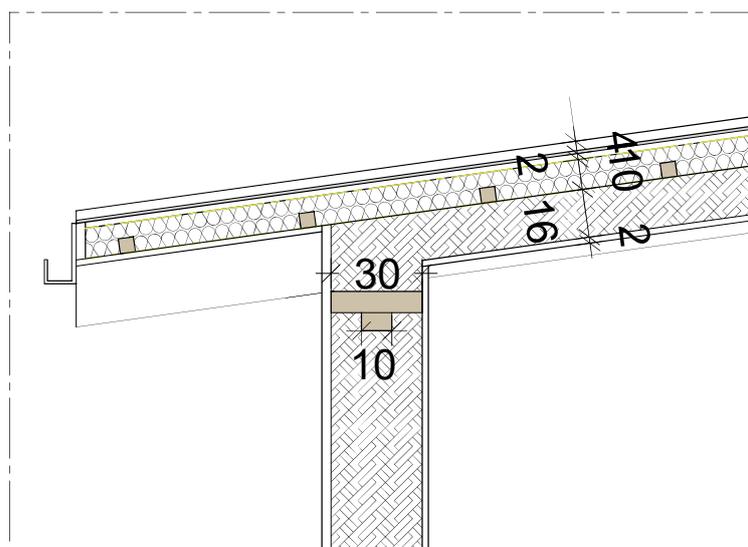
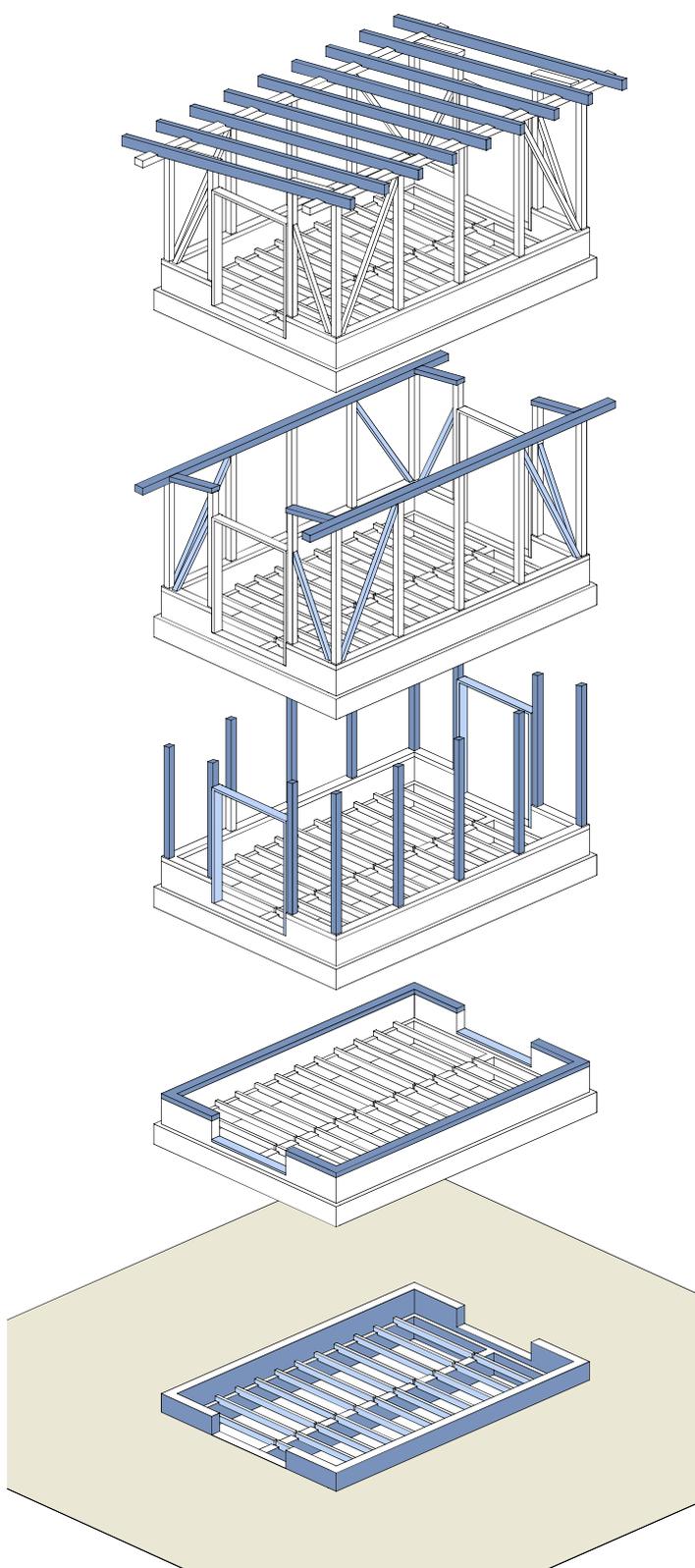


Figura 60

Particolare costruttivo: Parete-Copertura
scala: 1:25

5.7 Computo metrico



COPERTURA

- legno strutturale
 - TR_22*12 Travi in legno
 - DO_30*7 : dormiente
 - DO_10*6 : dormiente
- legname ausiliario
 - TV_2 : tavolato in legno
 - LI_4*4: listelli in legno
 - LI_5*5: listelli in legno

PARETE PERIMETRALE

- legno strutturale:
 - PI_14*14 : pilastri
 - CV_10*10 : controventi
 - LI_2*2: listelli tamponamento

FONDAZIONE

- legno strutturale:
 - DO_21*7 : dormiente
 - TR_7*14 : travi in legno
- legname ausiliario
 - TV_2 : tavolato in legno
 - LI_6*6: listelli per sostenere il tavolato

Figura 61
Schema progettuale: Assonometria

LEGNO STRUTTURALE

PI_14*14

Altezza m	Quantità	Metri lineari m	Area profilo m ²	Volume m ³
2,8	12	33,6	0,010	0,329
3,7	12	44,4	0,010	0,435
3,2	4	12,8	0,010	0,125
3	4	11,6	0,010	0,114
TOTALE		102,4		1,004

DO_30*7

Lunghezza m	Quantità	Metri lineari m	Area profilo m ²	Volume m ³
8,0	2	16	0,021	0,336

DO_10*6

Lunghezza m	Quantità	Metri lineari m	Area profilo m ²	Volume m ³
8,8	2	17,6	0,006	0,106

DO_30*4

Lunghezza m	Quantità	Metri lineari m	Area profilo m ²	Volume m ³
8	2	16	0,012	0,192
4	2	8	0,012	0,096
TOTALE		24		0,288

DO_10*6

Lunghezza m	Quantità	Metri lineari m	Area profilo m ²	Volume m ³
8	2	16	0,006	0,096
4	2	8	0,006	0,048
TOTALE		24		0,146

TR_12*22

Lunghezza m	Quantità	Metri lineari m	Area profilo m ²	Volume m ³
6	10	60	0,012	1,584

TR_7*14

Lunghezza m	Quantità	Metri lineari m	Area profilo m ²	Volume m ³
1,5	20	30	0,01	0,294

CS_7*21

Lunghezza m	Quantità	Metri lineari m	Area profilo m ²	Volume m ³
2,54	4	9,8	0,015	0,144
2	2	4	0,015	0,059
TOTALE		13,8		0,203

CV_10*10

Lunghezza m	Quantità	Metri lineari m	Area profilo m ²	Volume m ³
2,5	4	10	0,01	0,1
3,5	2	7	0,01	0,07
3	2	5,7	0,01	0,057
TOTALE		22,7		0,227

LEGNAME AUSILIARIO

LI_5*5

Altezza m	Quantità	Metri lineari m	Area profilo m ²	Volume m ³
6	19	114	0,0025	0,285
9.5	12	114	0,0025	0,285
TOTALE		228		0,570

LI_4*4

Lunghezza m	Quantità	Metri lineari m	Area profilo m ²	Volume m ³
1	12	24	0,0016	0,038

LI_6*6

Lunghezza m	Quantità	Metri lineari m	Area profilo m ²	Volume m ³
3,8	14	53,2	0,0036	0,192

LI_2*2

Altezza m	Quantità	Metri lineari m	Area profilo m ²	Volume m ³
1,2	80	96	0,0004	0,038
2,3	8	18,4	0,0004	0,007
1,8	220	3960	0,0004	1,584
TOTALE		228		1,629

TV_2

Quantità	Spessore m	Area superficie m ²	Volume m ³
1	0,02	60	2,4
2	0,02	28	1,12
TOTALE			3,52

VOLUME TOTALE

Legno strutturale: 4,2 m³

Legname ausiliario: 5,95 m³

TAMPONAMENTI IN TERRA-PAGLIA							
Descrizione	Superficie [m ²]	Spessore [m]	Volume [m ³]	Proporzione	Q.TA'	Q.TA' + 20%	Unità
Tamponamento verticale Parete_B300							
Terra Argillosa	76	0,3	22,8	0,83	18,924	22,71	[m ³]
Paglia	76	0,3	22,8	0,17	3,876	4,65	[m ³]
Tamponamento verticale Copertura_B400							
Terra Argillosa	56	0,16	8,96	0,88	7,8848	9,46	[m ³]
Paglia	56	0,16	8,96	0,13	1,1648	1,40	[m ³]
Tamponamento orizzontale inferiore SolaioB_100							
Terra Argillosa	30	0,14	4,2	0,5	2,1	2,52	[m ³]
Paglia	30	0,14	4,2	0,5	2,1	2,52	[m ³]
ISOLAMENTI							
Descrizione	Superficie [m ²]	Spessore [m]	Volume [m ³]	Parti uguali	Q.TA'	Q.TA' + 20%	Unità
Fibra vegetale_Solaio	30	0,06	1,8	1	1,8	2,16	[m ³]
Fibra vegetale_Copertura	56	0,1	5,6	1	5,6	6,72	[m ³]

INTONACI E FINITURE									
Descrizione	Superficie [m ²]	Spessore [m]	Volume [m ³]	Parti	Q.TA'	Q.TA' + 20%	Unità		
Intonaco in terra-argilla	76	0,02	1,52	1	1,52	1,82	[m ³]		
Termointonaco in calce	76	0,03	2,28	1	2,28	2,74	[m ³]		
SOTTOFONDO									
Descrizione	Superficie [m ²]	Spessore [m]	Volume [m ³]	Parti	Q.TA'	Q.TA' + 10%	Unità		
Inerti	50	0,3	15	1	15	18,00	[m ³]		
Membrane	50	0,01	0,5	1	0,5	0,60	[m ³]		
INFISSI									
Descrizione	Lunghezza [m]	Larghezza [m]	Altezza [m]	Parti uguali	Q.TA'	Unità			
Porte finestre		1,75	2,91	/	2	[-]			
MEMBRANE									
Descrizione	Perimetro [m]	Altezza [m]	Parti uguali	Q.TA'	Unità				
Teli di juta	25	4	89,68	0,25	22,42	[m ²]			

FERRAMENTA							
Descrizione	Lunghezza [mm]	Larghezza [mm]	Altezza [m]	Parti uguali	Q.TA'		Unità
	4				10000		[-]
	6	4			5000		[-]
Angolari	7	15			100		[-]
Tirafondi di ancoraggio		10	0,25		60		[-]
Rondelle, diametro interno : 10mm Esterno: 40mm		40,00			60		[-]
Dadi, diametro : 10mm		10			120		[-]
Grondaie (m)	25	0,1	0,02		0,05		[m ³]
Lamiera tetto (m)	9	6	0,02		1,08		[m ³]

Capitolo 6

148

157

159

6.1 Confronto termico

6.2 Confronto sulla fattibilità costruttiva

6.3 Conclusioni

Confronto tra padiglioni

Il capitolo conclusivo della presente tesi si propone di mettere a confronto due proposte progettuali per la realizzazione di un padiglione in terra-paglia. Entrambe le proposte prevedono la costruzione di un edificio di uguali dimensioni, ma con soluzioni stratigrafiche e nodi costruttivi diversi. L'obiettivo di questo confronto è quello di valutare quale sia la soluzione più adatta per la costruzione del padiglione durante un cantiere didattico e tenendo conto delle esigenze prestazionali, della costruibilità e della sostenibilità economica ed ambientale.

6.1 Confronto termico

I valori essenziali per fare un confronto tra le stratigrafie scelte per ogni padiglione sono state riassunte nella Tabella 9. Tutte le strutture progettate sono state pensate con lo scopo di rispettare la vigente normativa italiana, la quale prevede che gli edifici di nuova costruzione debbano rispettare determinati valori

di trasmittanza (Tabella 9)³⁹.

La trasmittanza termica viene differenziata in base a sei zone climatiche che differiscono a livello nazionale. Questa suddivisione si basa sulla quantità di gradi giorno, ovvero la somma delle sole escursioni positive giornaliere tra la temperatura all'interno degli ambienti e la temperatura media esterna (calcolata per tutti i giorni del periodo di riscaldamento). Tale classificazione è imposta dal DPR n° 59 del 02/04/2009⁴⁰ e identifica Grugliasco, sito dell'intervento, in zona climatica E. Per poter confrontare termicamente i padiglioni non è sufficiente confrontare individualmente tutte le stratigrafie, ma è opportuno procedere con la creazione di due modelli termici e eseguire, attraverso un software di calcolo termico, la valutazione delle prestazioni termiche dei due edifici. Il programma utilizzato è Termolog, un software BIM per il calcolo dell'efficienza energetica degli edifici

39 DM requisiti minimi, Allegato1, Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici, 2015.

40 Decreto del Presidente della Repubblica n. 59, Regolamento di attuazione dell'articolo 4, comma 1, lettere a) e b), del decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, concernente attuazione della direttiva 2002/91/CE sul rendimento energetico in edilizia, 2009.

prodotto dalla Logical Soft.
 I calcoli termici sono stati effettuati prendendo a riferimento le temperature di progetto della zona Climatica E, tali valori sono di -8°C⁴¹ come temperatura di progetto invernale e 30,5°C⁴² come temperatura estiva. È da evidenziare come tali valori non rispecchiano pienamente le temperature medie rilevate negli ultimi anni. I dati ARPA

sulle rilevazioni della temperatura indicano che nel 2022 la temperatura media calcolata nel mese più freddo dell'anno (gennaio) è di 3°C⁴³, mentre la temperatura media nel mese più caldo (luglio) è risultata costantemente superiore ai 32°C⁴⁴. È quindi fondamentale ricordare che le manifestazioni del cambiamento climatico stanno diventando sempre

41 Temperatura esterna di progetto invernale, UNI 5364, Impianti di riscaldamento ad acqua calda. Regole per la presentazione dell'offerta e per il collaudo, 1976.

42 Temperatura di progetto a Torino calcolata nel mese di luglio, Temperatura esterna a bulbo secco T.b.s.e. (°C), UNI 10339, Impianti aerulici al fini di benessere. Generalità, classificazione e requisiti. Regole per la richiesta d'offerta, l'offerta, l'ordine e la fornitura, 1995.

43 ARPA Piemonte, Sistema Nazionale, "Anno meteorologico 2022: doppio primato per temperature e precipitazioni", Dicembre 2022, <http://www.arpa.piemonte.it/news/anno-meteorologico-2022-doppio-primato-per-temperature-e-precipitazioni>

44 ARPA Piemonte, Sistema Nazionale per la protezione dell'ambiente, "Il Clima in Piemonte Estate 2022", Settembre 2022, pp.7.

PADIGLIONE A			
	SPESSORE mm	TRASMITTANZA W/m ² /K	TRASMITTANZA LIMITE W/m ² /K
Parete_A400	340	0,22	0,26
Parete_A500	360	0,22	0,26
Solaio_A100	362	0,21	0,26
Copertura_A	322	0,18	0,22
PADIGLIONE B			
	SPESSORE mm	TRASMITTANZA W/m ² /K	TRASMITTANZA LIMITE W/m ² /K
Parete_B300	400	0,22	0,26
Solaio_B100	240	0,25	0,26
Copertura_B400	331	0,22	0,22

Tabella 9
 Modello termico: Struttura_A

Modello termico A

STRUTTURA	AREA	N°
PARETE_A400	50,87	4
SERRAMENTO	9,2	2
COPERTURA_A	32,49	1
SOLAIO_A100	32,41	1
PT_ANGOLO	14,43	8
PT_COPERTURA	23,14	8
PT_FONDAZIONE	23,12	8
PT_PILASTRO	36,06	10

Superficie utile riscaldata	Su	24,89m ²
Volume lordo riscaldato	V	116,90m ³
Superficie disperdente	Sdisp	148,29m ²

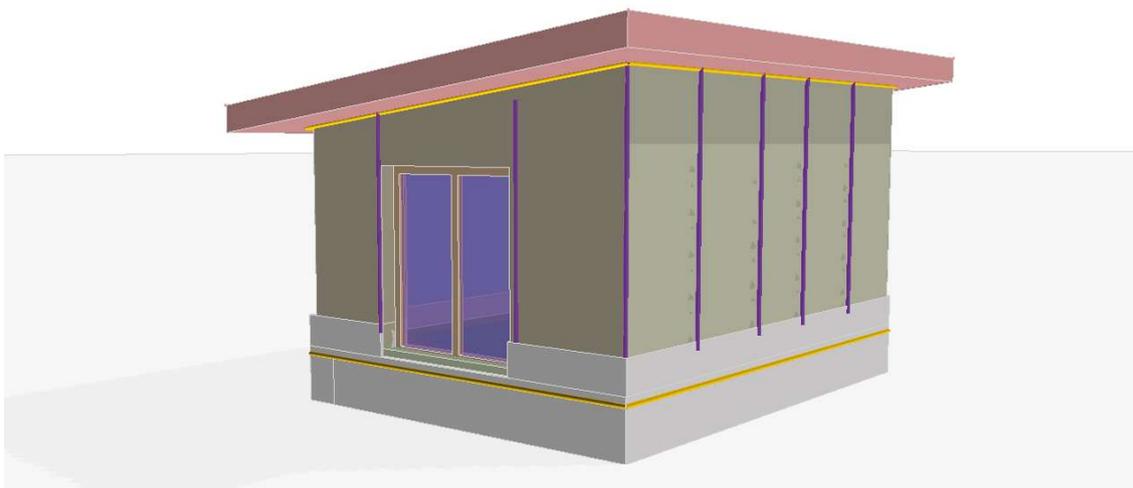


Figura 62
Modello termico: Struttura_A

Modello termico B

STRUTTURA	AREA	N°
PARETE_B300	59,87	4
SERRAMENTO	9,2	2
COPERTURA_B400	32,49	1
SOLAIO_B100	32,41	1
PT_ANGOLO CON PILASTRO	13,26	4
PT_COPERTURA	22,37	8
PT_FONDAZIONE	22,30	8
PT_PILASTRO	40,11	12

Superficie utile riscaldata	Su	24,89m ²
Volume lordo riscaldato	V	116,90m ³
Superficie disperdente	Sdisp	148,29m ²

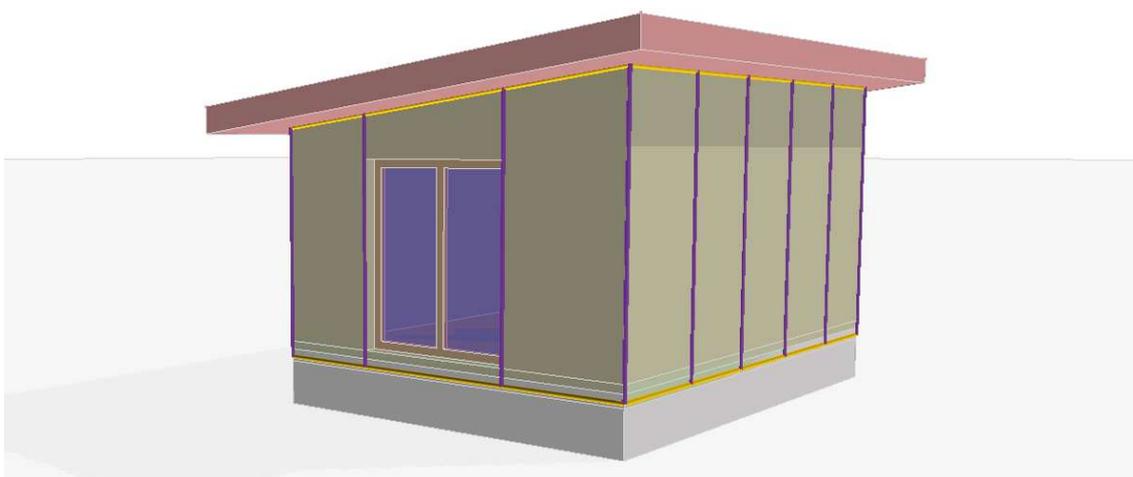


Figura 63

Modello termico: Struttura_B

più evidenti e che è necessario avere un approccio progettuale mirato alla risoluzione di problematiche relative l'innalzamento delle temperature. Dal calcolo termico dei due modelli termici sono stati valutati i parametri che interessavano l'involucro, andando a capire e confrontare l'efficienza prestazionale delle diverse strutture proposte.

Gli indici analizzati sono:

- il carico termico estivo
- il carico termico invernale
- il fabbisogno di energia termica

Il carico termico è la quantità di energia termica che un ambiente disperde verso l'esterno durante il periodo invernale o alla quantità di calore che lo stesso locale accumula in estate.

Dalla stima dei carichi termici invernali ed estivi dell'edificio è possibile fare un corretto dimensionamento

dell'impianto di climatizzazione.

Il calcolo è effettuato in regime stazionario secondo le indicazioni della UNI EN 12831⁴⁵.

Per quanto riguarda il carico termico invernale si tiene conto delle seguenti ipotesi di base:

- Si presume che la temperatura media esterna sia costante e uguale al valore minimo;
- Le condizioni più sfavorevoli si verificano in assenza di irraggiamento solare;
- L'accumulo di strutture non viene preso in considerazione.

Nella tabella 10 sono riportati:

- Φ_t : potenza termica dispersa per trasmissione in condizioni di progetto [W]
- Φ_v : potenza termica dispersa

⁴⁵ UNI EN 12831-3, Prestazione energetica degli edifici - Metodo di calcolo del carico termico di progetto - Parte 3: Carico termico dei sistemi di acqua calda sanitaria e caratterizzazione dei fabbisogni, Moduli M8-2, M8-3, 2018.

Locale	Φ_t	Φ_v	Φ_{rh}	Φ_{hl}
PADIGLIONE_A	976,89	280,09	273,79	1.530,77
PADIGLIONE_B	1.093,26	295,18	315,62	1.704,06

Tabella 10
Carico termico invernale

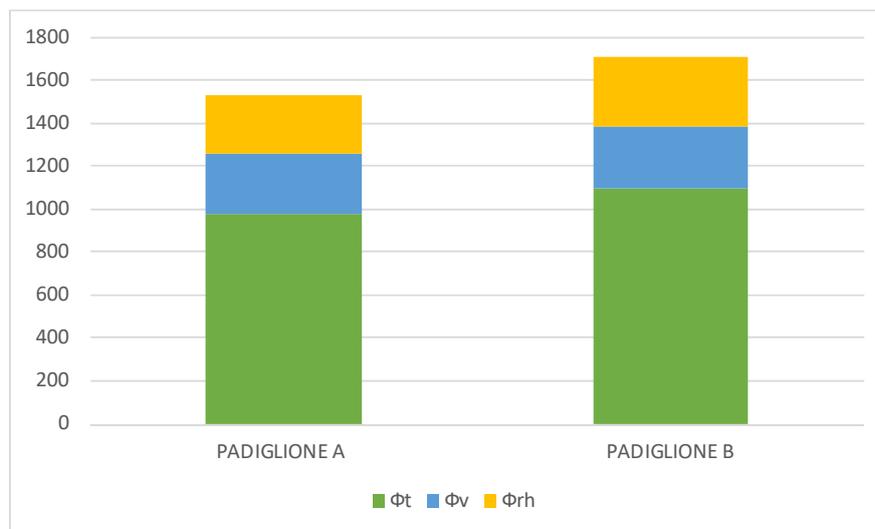


Grafico 14

Modello termico: Struttura_A

per ventilazione in condizioni di progetto [W]

- Φ_{rh} : potenza termica di ripresa [W]
- Φ_{hl} : carico termico totale [W]

Nel periodo estivo si parla di flusso di calore entrante nell'edificio poiché l'ambiente esterno ha una temperatura maggiore rispetto all'interno dei locali. La valutazione dei carichi termici estivi, necessaria per la determinazione della quantità di calore da esportare dall'edificio, risulta più complessa rispetto al calcolo invernale.

Il calcolo delle dispersioni invernali assume che la temperatura esterna rimanga costante nell'arco della giornata, facendo quindi riferimento a

condizioni stazionarie.

Il calcolo dei carichi estivi va effettuato in regime variabile andando a considerare gli sbalzi di temperatura giornalieri e dall'irraggiamento solare. Nella tabella 11 sono riportati:

- Φ_t : potenza termica dispersa per trasmissione in condizioni di progetto [W]
- Φ_v : potenza termica dispersa per ventilazione in condizioni di progetto [W]
- Φ_{rh} : potenza termica di ripresa [W]
- Φ_{hl} : carico termico totale [W]

Tali valori sono riferiti ad un giorno specifico, il 4 Luglio, durante il quale si ipotizza vengano registrate le condizioni più gravose.

Locale	Φ_{tr}	Φ_{irr}	$\Phi_{int,sen}$	$\Phi_{int,lat}$	Φ
PADIGLIONE A	682,81	1.031,41	1.553,14	39,82	3.307,12
PADIGLIONE B	645,34	839,43	1.553,14	39,82	3.075,17

Tabella 11
Carico termico estivo

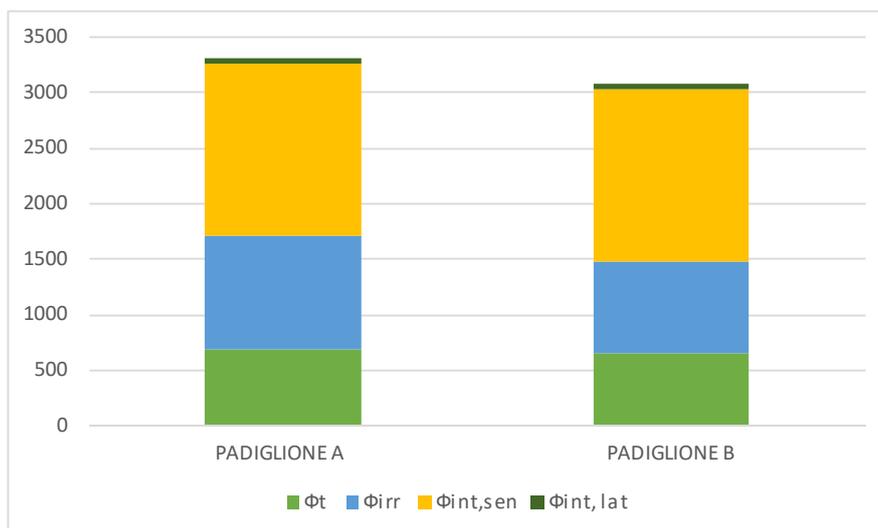


Grafico 15
Modello termico: Struttura_A

Il fabbisogno di energia termica (utile) è la quantità di calore che deve essere fornita o sottratta ad un ambiente climatizzato per mantenere le condizioni di temperatura desiderate durante un dato periodo di tempo.¹

Questo parametro viene riferito in relazione al tipo di servizio al quale deve essere fornita l'energia (tabella 12):

- EP_{H,nd} [kWh/m²]: indice di prestazione termica utile per riscaldamento

- EPC_{nd} [kWh/m²]: indice di prestazione termica utile per raffrescamento
- EP_{w,nd} [kWh/m²]: indice di prestazione termica utile per acqua calda sanitaria.

Dal punto di vista termico le due soluzioni si equivalgono abbastanza. Hanno delle ottime prestazioni termiche sia in estate che in inverno. Tali risultati dimostrano che questo materiale può adattarsi a condizioni climatiche variabili.

I valori di carico termico invernale, che ci permettono di valutare le prestazioni termiche dell'involucro,

⁴⁵ UNI/TS 11300-, Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed

invernale, 2014

	PADIGLIONE A	PADIGLIONE B	
EPH,nd	60,66	67,49	Durata 183 giorni
EPC,nd	24,74	18,44	Durata 139 giorni
EPW,nd	23,57	23,57	

Tabella 12
Fabbisogno di energia termica

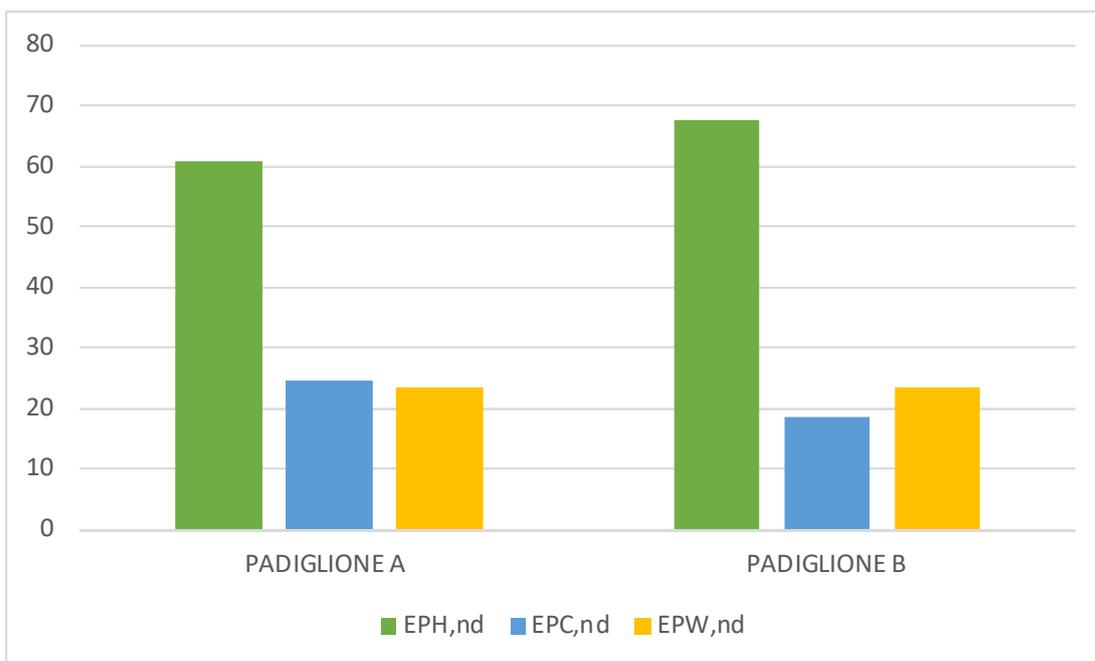


Grafico 16
Modello termico: Struttura_A

senza prendere in considerazione la presenza o meno di impianti di riscaldamento e di raffrescamento, sono di 60 kW/m² per la proposta progettuale A e di 80 kW/m² per la proposta progettuale B. La prima proposta che vede l'integrazione tra la terra-paglia con strati isolanti aggiuntivi hanno prestazioni termiche invernali migliori alla proposta B che si affida solamente alle proprietà isolanti della terra-paglia.

Dal lato opposto quest'ultima

garantisce delle prestazioni estive migliori, infatti il carico termico estivo è di 132 kW/m² per la proposta progettuale A, mentre per la proposta progettuale B è leggermente più basso arrivando a valori di 120 kW/m².

I valori di carico termico estivo sono tuttavia elevati per entrambe le soluzioni. Questo è dovuto a diversi fattori riguardanti scelte obbligate di forma, orientamento, composizione e costruibilità.

Il nostro progetto, facendo parte di un progetto universitario che comprende la realizzazione di tre diversi padiglioni, doveva sottostare a dei limiti imposti dal sito di intervento e al budget, doveva inoltre essere di semplice realizzazione al fine di poter essere adatto ad un cantiere studentesco. La prima ragione che porta ad avere un alto carico termico estivo è sicuramente la grande ampiezza dei due serramenti rispetto alla dimensione del padiglione. I serramenti sono sprovvisti di schermature solari che sicuramente contribuirebbero al miglioramento delle prestazioni estive. Un'altro fattore da considerare è la copertura che, per i motivi già citati, non è stata progettata con un sporto tale da poter oscurare in modo adeguato le pareti e i serramenti.

Allargando lo sguardo possiamo quindi dire che entrambe le costruzioni posseggono strutture che rispettano i requisiti imposti dalle vigenti normative italiane, ma in questa sede il paragone deve essere fatto anche con gli altri padiglioni presenti nel progetto.

Il padiglione con il quale è possibile fare un confronto è quello che prevede la realizzazione di tutte le strutture

con un tamponamento in paglia.

Sono state solamente confrontate le trasmittanze delle diverse strutture. Nelle tabelle 13 e 14 è evidente come i valori ottenuti dai padiglioni in terra-paglia siano nettamente superiori rispetto a quelle in sola paglia. Di conseguenza quest'ultimo otterrà sicuramente delle prestazioni termiche migliori rispetto alle nostre proposte. Le motivazioni che determinano tali risultati sono:

- lo spessore delle stratigrafie
- la conducibilità dei materiali
- la struttura portante del padiglione
- la costruibilità del padiglione

Per spiegare questi fattori è necessario fare una premessa sul padiglione in paglia. Il progetto, portato avanti da Anna Barbato, prevede l'utilizzo di balle di paglia per la realizzazione di pareti portanti, senza l'ausilio di una struttura in legno. Le balle di paglia vanno a comporre anche le stratigrafie del solaio e della copertura.

Per garantire adeguate prestazioni meccaniche sono state progettate strutture molto spesse, questo ha portato ad avere ottime prestazioni termiche.

Bisogna inoltre considerare che la paglia presenta valori di conducibilità inferiori, quindi migliori, rispetto alla

terra-paglia.

Progettare delle stratigrafie che potessero raggiungere i risultati del padiglione in paglia, avrebbe comportato la realizzazione di strutture molto spesse, molto difficili da associare ad una struttura in legno. Adattare la struttura A e la struttura B a stratigrafie di tale dimensioni porterebbe a complicazioni sia in fase progettuale che esecutiva nonché a un aumento del quantitativo di legname utilizzato

6.2 Confronto sulla fattibilità costruttiva

In questo paragrafo vengono riassunte le caratteristiche principali dei due padiglioni, confrontando le scelte tecniche adottate per le diverse strutture.

Partendo dalle fondazioni, per entrambe le strutture avremo un basamento in muratura, elemento fondamentale per la separazione dello strato di terra-paglia dal terreno. Nel padiglione A il piano di calpestio è a livello del terreno e il cordolo in muratura viene isolato termicamente dalla strato isolante interno (quello

	PARETE	COPERTURA	SOLAIO
PADIGLIONE IN PAGLIA	380 mm	550 mm	430 mm
PADIGLIONE A	360 mm	320 mm	360 mm
PADIGLIONE B	400 mm	330 mm	240 mm

Tabella 13
Confronto tra gli spessori delle strutture dei padiglioni

	PARETE	COPERTURA	SOLAIO
PADIGLIONE IN PAGLIA	0,18 W/m ² /K	0,14 W/m ² /K	0,17 W/m ² /K
PADIGLIONE A	0,22 W/m ² /K	0,18 W/m ² /K	0,21 W/m ² /K
PADIGLIONE B	0,22 W/m ² /K	0,22 W/m ² /K	0,25 W/m ² /K

Tabella 14
Confronto tra la trasmittanza termica delle strutture dei padiglioni

che ricopre tutta la parete in terra-paglia), questo permette di risolvere efficacemente il ponte termico. Questo non avviene nella soluzione B, nella quale il piano di calpestio è al di sopra del cordolo di fondazione e la parete perimetrale non presenta uno strato isolante aggiuntivo. Come si può vedere nella figura 64 nella proposta B i pilastri della struttura saranno più alto e ciò andrà ad influire sul quantitativo dei materiali.

Tra le due soluzioni del nodo parete-solaio quella che potrebbe essere più efficace è quella adottata nella proposta A. È però opportuno sottolineare che anche la scelta, adottata nella soluzione B, di rialzare completamente il piano di calpestio dal terreno creando un'intercapedine di aria è molto valida: perchè mantiene il solaio ben aerato ed evita di inserire uno strato di argilla espansa (materiale

molto costoso) come vespaio.

Per quanto riguarda la scelta della parete più adatta il fattore che potrebbe maggiormente influenzare la decisione è la quantità di legno utilizzata. La soluzione con il pilastro singolo proposta nel padiglione A è quella più economicamente conveniente. Infatti mettendo a paragone i computi metrici delle due strutture si evince che per le pareti della soluzione A sono necessari $0,96 \text{ m}^3$ di legno strutturale e $0,16 \text{ m}^3$ di legname ausiliario, mentre per la soluzione B sono necessari $1,27 \text{ m}^3$ di legno strutturale e $1,63 \text{ m}^3$ di legname ausiliario.

Per quanto riguarda la copertura la soluzione termicamente più interessante è quella della proposta progettuale B che vede l'inserimento di uno strato di terra-paglia di

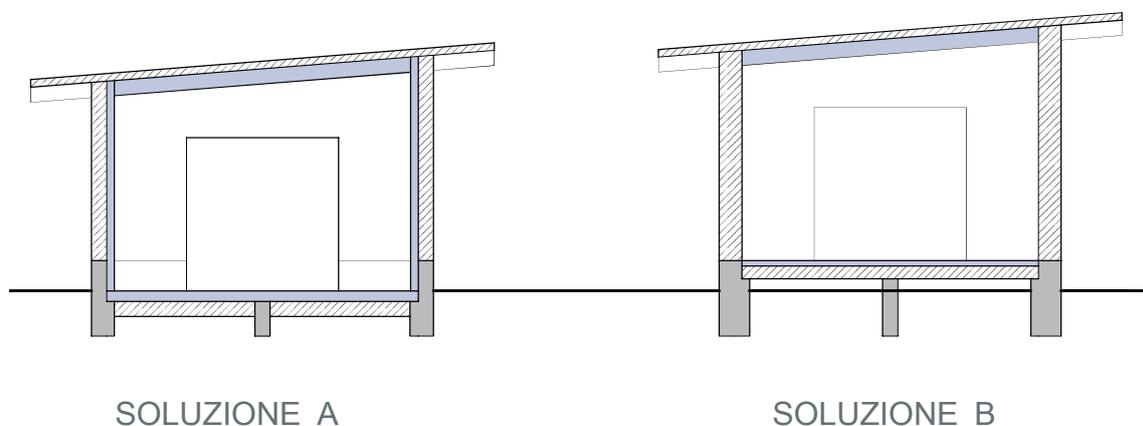


Figura 64

Schemi progettuali: Le due soluzioni del padiglione in terra-paglia

medie densità (400 kg/m³). Questa soluzione è la migliore dal punto di vista dello smorzamento termico durante il periodo estivo. La copertura del padiglione A è tuttavia più semplice da realizzare e sarebbe più adatta ad un cantiere studentesco.

6.3 Conclusioni

In conclusione il presente elaborato non ha l'intenzione di scegliere quale delle due proposte sia la migliore. Entrambe hanno punti di forza e di debolezza. L'intenzione era quella di fornire un ventaglio di possibilità progettuali che possono essere adattate alle diverse esigenze pratico-realizzative. Reputiamo che quella che meglio si adatta ad un

cantiere studentesco è il padiglione A. Come si può notare dal computo riassuntivo presentato nella tabella 15 questa proposta è più economica ed è più semplice dal punto di vista costruttivo. Questo però non esclude la possibilità di integrare, in fase esecutiva, delle soluzioni presenti nella proposta progettuale B.

Ad ogni modo questo elaborato conferma che la terra-paglia è un materiale molto versatile, che si può adattare a diverse metodologie costruttive e associare a molteplici materiali. Questa sua versatilità lo rende una valida alternativa ai tradizionali metodi costruttivi.

VOLUME TOTALE	PADIGLIONE A Volume (m ³)	PADIGLIONE B Volume (m ³)
Legno strutturale	2,50	4,20
Legname ausiliario	3,10	5,94
Terra	15,13	34,69
Paglia	4,39	8,57
Isolante	18,24	8,88
Intonaco in terra	1,54	1,82
Termointonaco in calce	2,30	2,74
Interi	18,00	18,00
Argilla espansa	12,00	/
Teli di juta	22,42	22,42

Tabella 15
Confronto tra i compositi metrici dei padiglioni

Riferimenti

Bibliografia

Pubblicazioni

Normativa

Bibliografia

M. Achenza, U. Sanna, *Il manuale tematico della terra cruda*, Itaca, 2011.

A. Marcom, *Costruire en terre-paille*, Terre vivante, 2011.

Volhard F., *Light Earth Building. A Handbook for Building with Wood and Earth*, Holzhausen Druck GmbH, 2016

S. Courgey, J. Oliva, *l'isolation thermique écologique*, Conception, matériaux, mise en oeuvre - Neuf et réhabilitation, Terre Vivante, 2010.

S. Dobson, *Rammed earth in the modern world*, Ramtec Pty. Ltd., Australia Vice President, EBAA, Australia

Pubblicazioni

K. Brini, *“Progettazione di un padiglione in terra alleggerita con struttura portate in legno (parte I)”*, tesi di laurea magistrale, Politecnico di Torino, 2022, relatore A. Bocco.

M. Labat, C. Magniont, N. Oudhof, J. Aubert, *“From the experimental characterization of the hygrothermal properties of straw-clay mixtures to the numerical assessment of their buffering potential”*, Building and Environment, Elsevier, 2016,.

M. Reif, J. Zach, J. Hroudová, *“Studying the properties of particulate insulating materials on natural basis, International Conference on Ecology and new Building materials and products”*, ICEBMP 2016; Brno University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Brno.

R. Mustapha, A. Zoughaib, N. Ghaddar, K. Ghali, “*Modified upright cup method for testing water vapor permeability in porous membranes*”, *Energy*, Volume 195, 2020,

Minke, Gernot, *Lehmbau Handbuc*, “*Der Baustoff Lehm und seine Anwendung*”, Okobuch-Verlag Staufen, 1994

G. Scheffler, “*Hygric performance of internal insulation with light-weight autoclaved aerated concrete*”, Bydgoszcz, Poland, 2011

Vanros, Guy, “*Studie van bouwfysische Kenmerken van Lemen Vakwerkwanden*”, Final thesis at the Chatholic University of Leuven, Belgium, 1981

ARPA Piemonte, Sistema Nazionale, “Anno meteorologico 2022: doppio primato per temperature e precipitazioni”, Dicembre 2022, <http://www.arpa.piemonte.it/news/anno-meteorologico-2022-doppio-primato-per-temperature-e-precipitazioni>

“*Il Clima in Piemonte Estate 2022*”, ARPA Piemonte, Sistema Nazionale per la protezione dell’ambiente, Settembre 2022.

A. Barbato, “*Progettazione di un padiglione con balleste di paglia portanti*”, tesi di laurea magistrale, Politecnico di Torino, 2022, relatore A. Bocco.

Normativa

NF EN ISO 12664 Thermal performance of building materials and products – Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods – Dry and moist products of medium and low thermal resistance, (2001).

NF EN ISO 12572 Hygrothermal performance of building materials and products – Determination of water vapour transmission properties, (2001)

Termolog, software per la termotecnica, Logical Soft, Società soggetta all'attività di direzione e coordinamento di TeamSystem S.p.A., Milano

DM requisiti minimi, Allegato1, *Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici*, 2015.

Decreto del Presidente della Repubblica n. 59, *Regolamento di attuazione dell'articolo 4, comma 1, lettere a) e b), del decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, concernente attuazione della direttiva 2002/91/CE sul rendimento energetico in edilizia*, 2009.

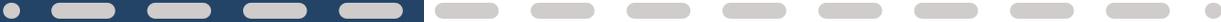
UNI 5364, *Impianti di riscaldamento ad acqua calda. Regole per la presentazione dell'offerta e per il collaudo*, 1976.

UNI 10339, *Impianti aeraulici al fini di benessere. Generalità, classificazione e requisiti. Regole per la richiesta d'offerta, l'offerta, l'ordine e la fornitura*, 1995.

UNI/TS 11300-1, *Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale*, 2014

UNI EN 12831-3, *Prestazione energetica degli edifici - Metodo di calcolo del carico termico di progetto - Parte 3: Carico termico dei sistemi di acqua calda sanitaria e caratterizzazione dei fabbisogni, Moduli M8-2, M8-3*, 2018.

Ringraziamenti



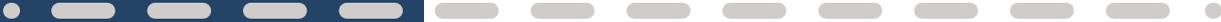
Ringraziamenti formali

Con la presente, desidero esprimere la mia gratitudine al mio relatore, il Professor Andrea Bocco, per l'attenzione e il supporto che ha riservato al mio progetto. Vorrei anche ringraziare sentitamente Redina Mazelli ed Arthur Bohn per il loro costante sostegno, per la loro presenza, i loro consigli e la loro collaborazione e guida.

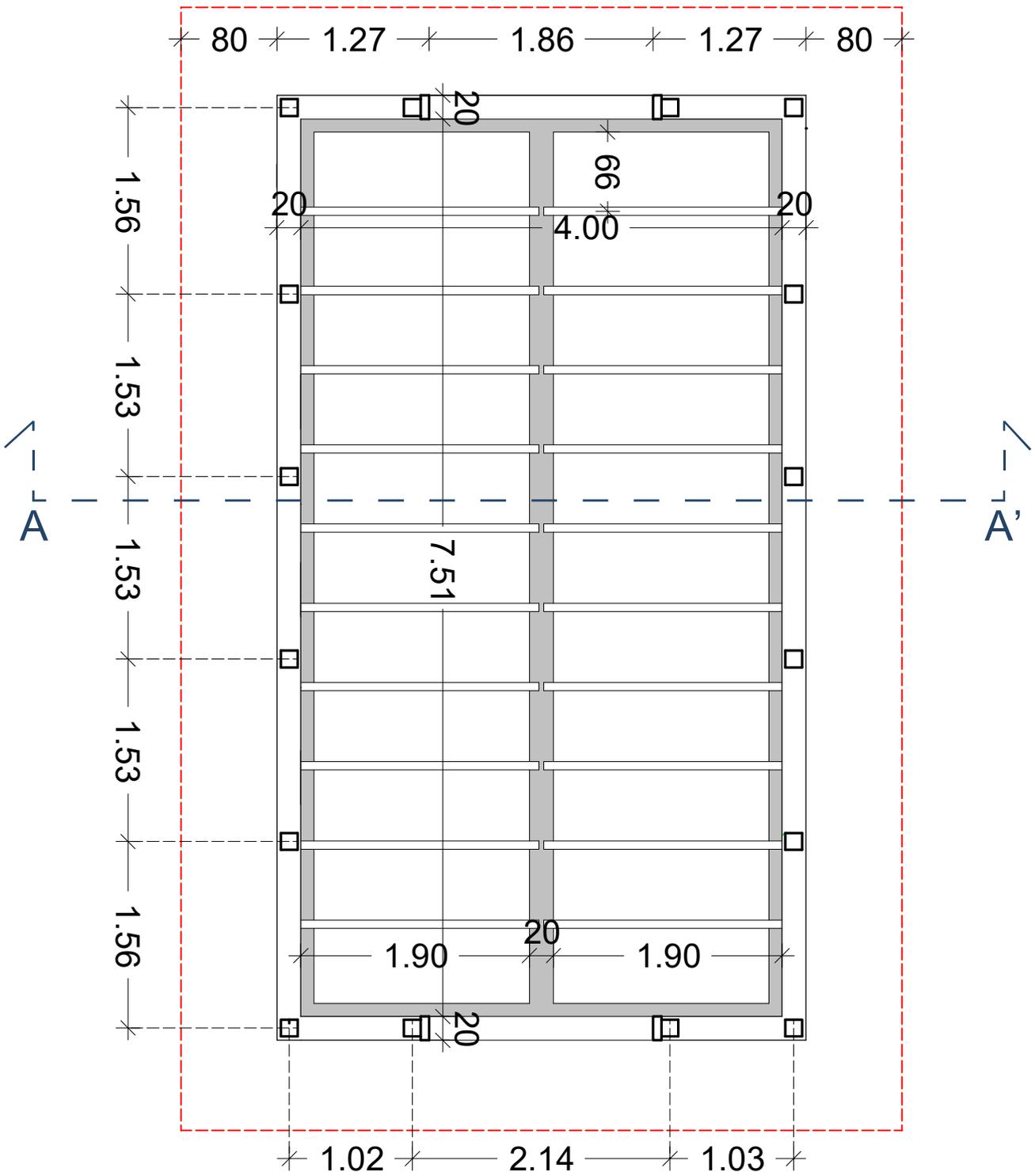
Inoltre, manifestare la mia riconoscenza verso il Laboratorio Sistemi Tecnologici Innovativi (LaSTIn) del Dipartimento di Architettura e Design (DAD) per aver ospitato le attività di laboratorio e monitoraggio, e verso la referente tecnico della sezione Autocostruzione del laboratorio, Angela Lacirignola, per il suo supporto tecnico.

Infine, ringraziare il MOD Lab design del Dipartimento di Architettura e Design (DAD) presso la cittadella Politecnica di Mirafiori, per aver ospitato le attività di taglio e lavorazione degli elementi lignei, e verso il Responsabile del MODLab Design arch. Koukzelas Antonio e la Ricercatrice arch. Ronco Francesca per il loro supporto tecnico.

Allegati



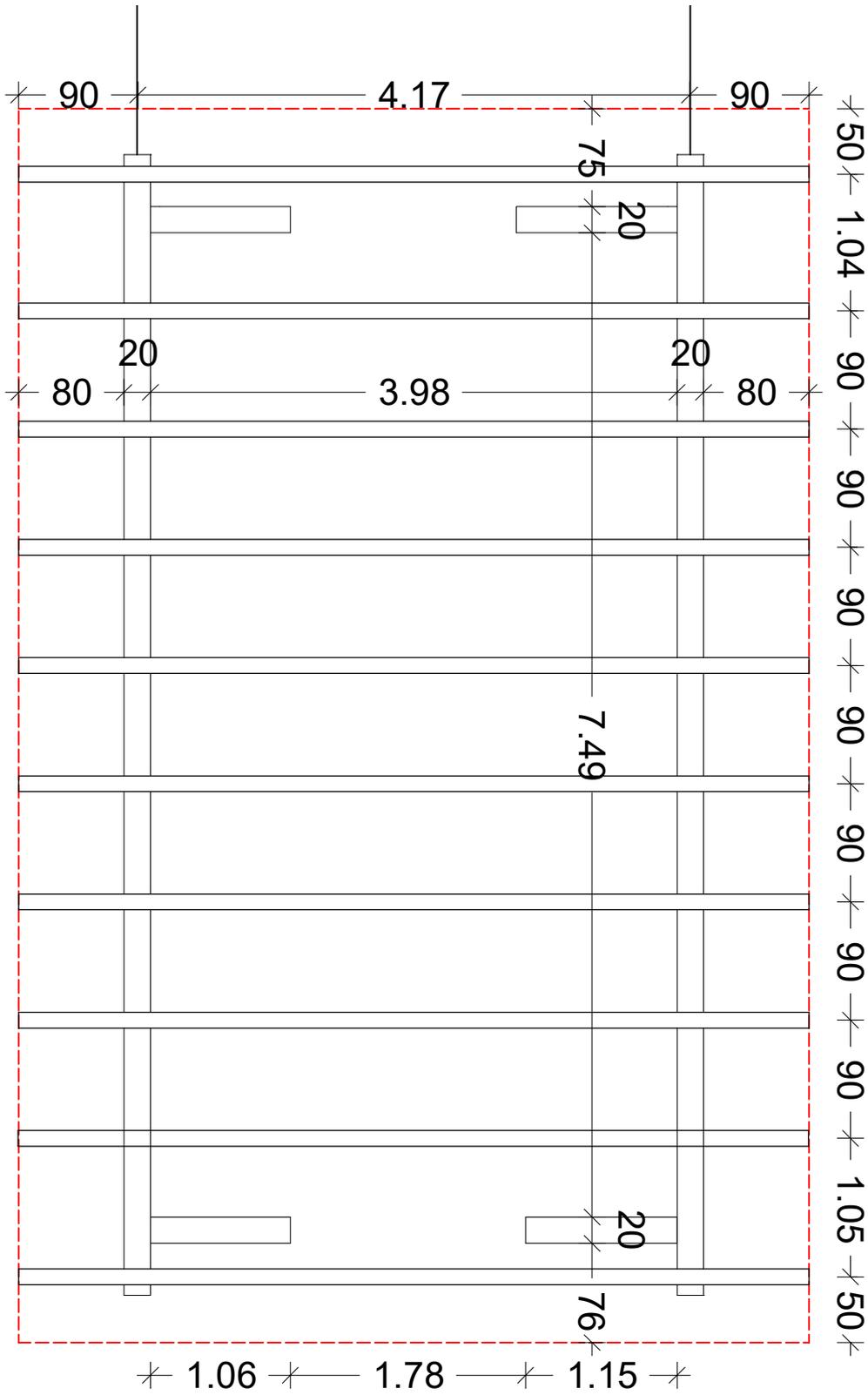
Elaborato grafico
STRUTTURA_A : PLANIMETRIA STRUTTURALE
scala 1:50



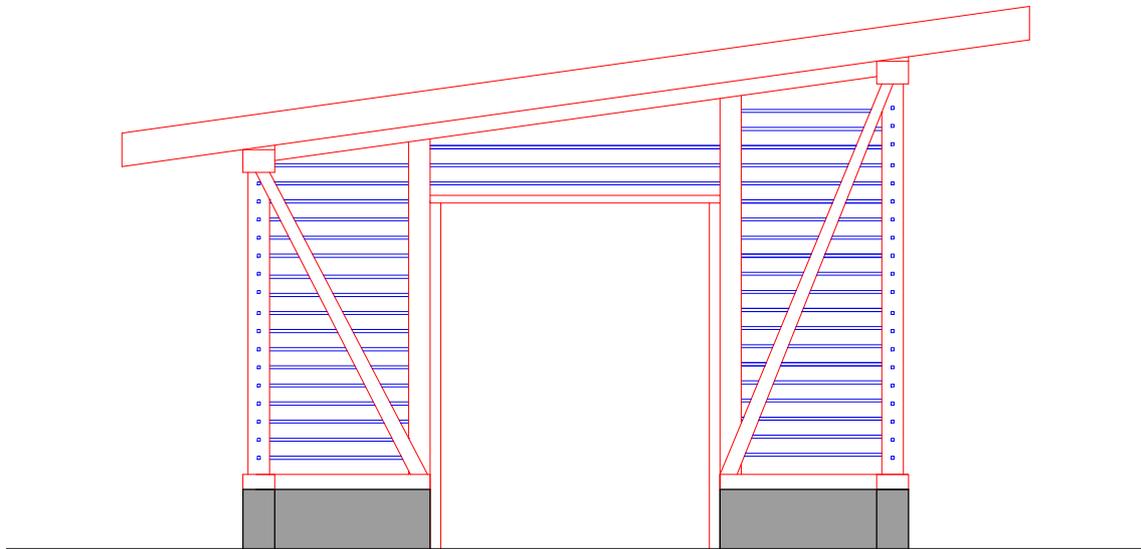
Elaborato grafico

STRUTTURA_A : PLANIMETRIA COPERTURA STRUTTURALE

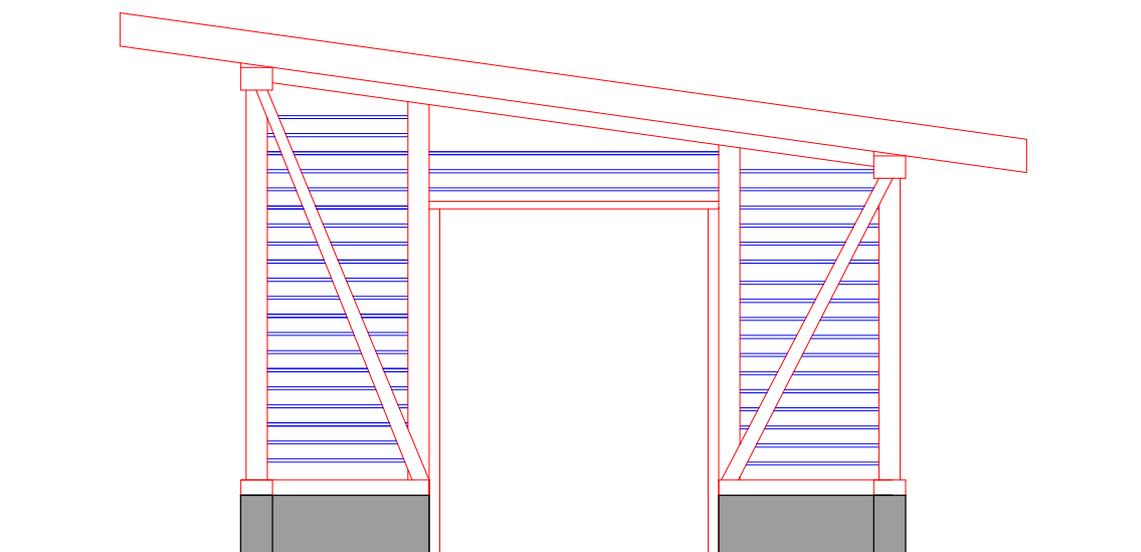
scala 1:50



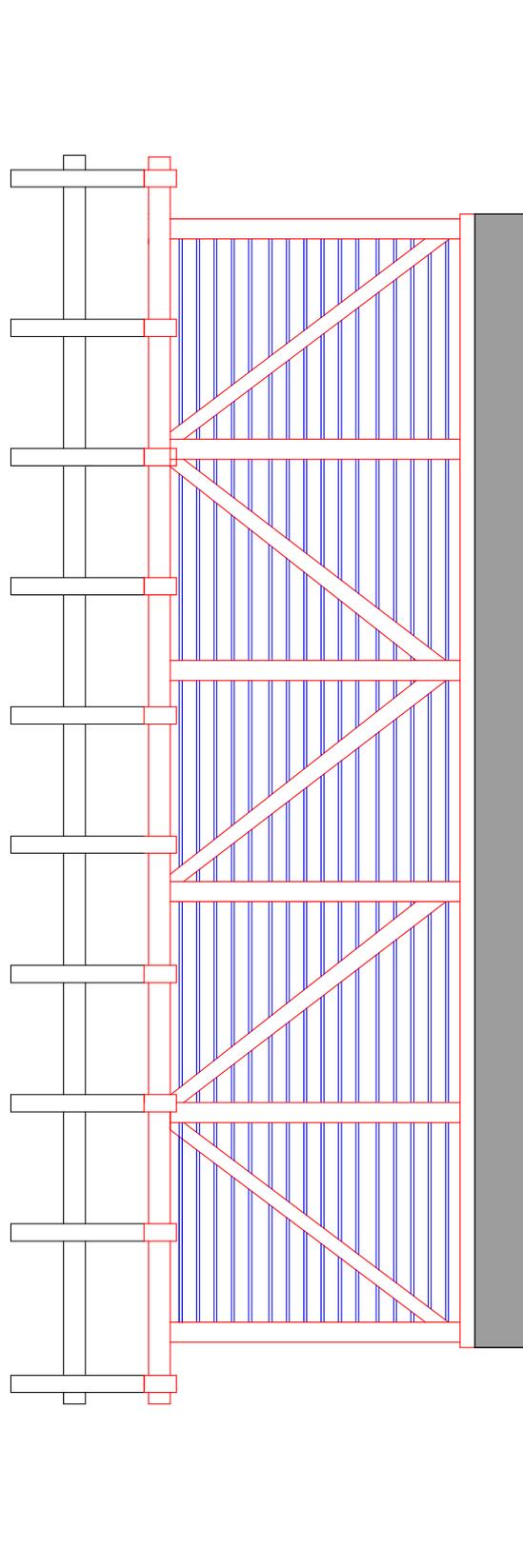
Elaborato grafico
STRUTTURA_A : PROSPETTO EST STRUTTURALE
scala 1:50



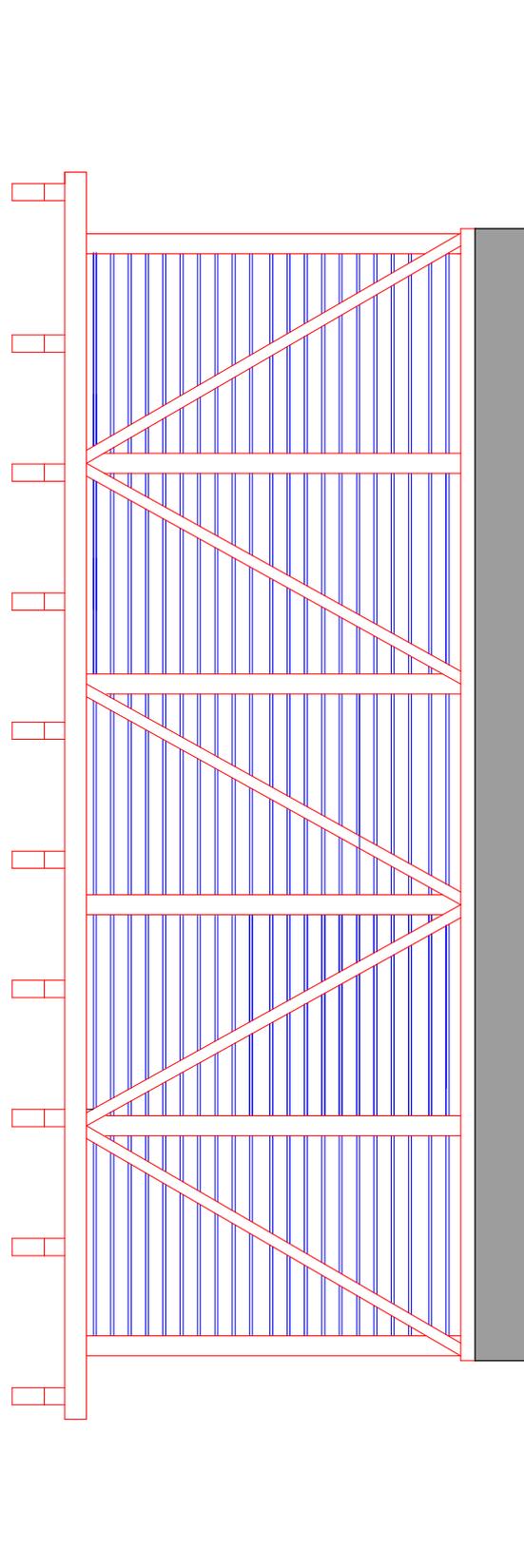
Elaborato grafico
STRUTTURA_A : PROSPETTO OVEST STRUTTURALE
scala 1:50



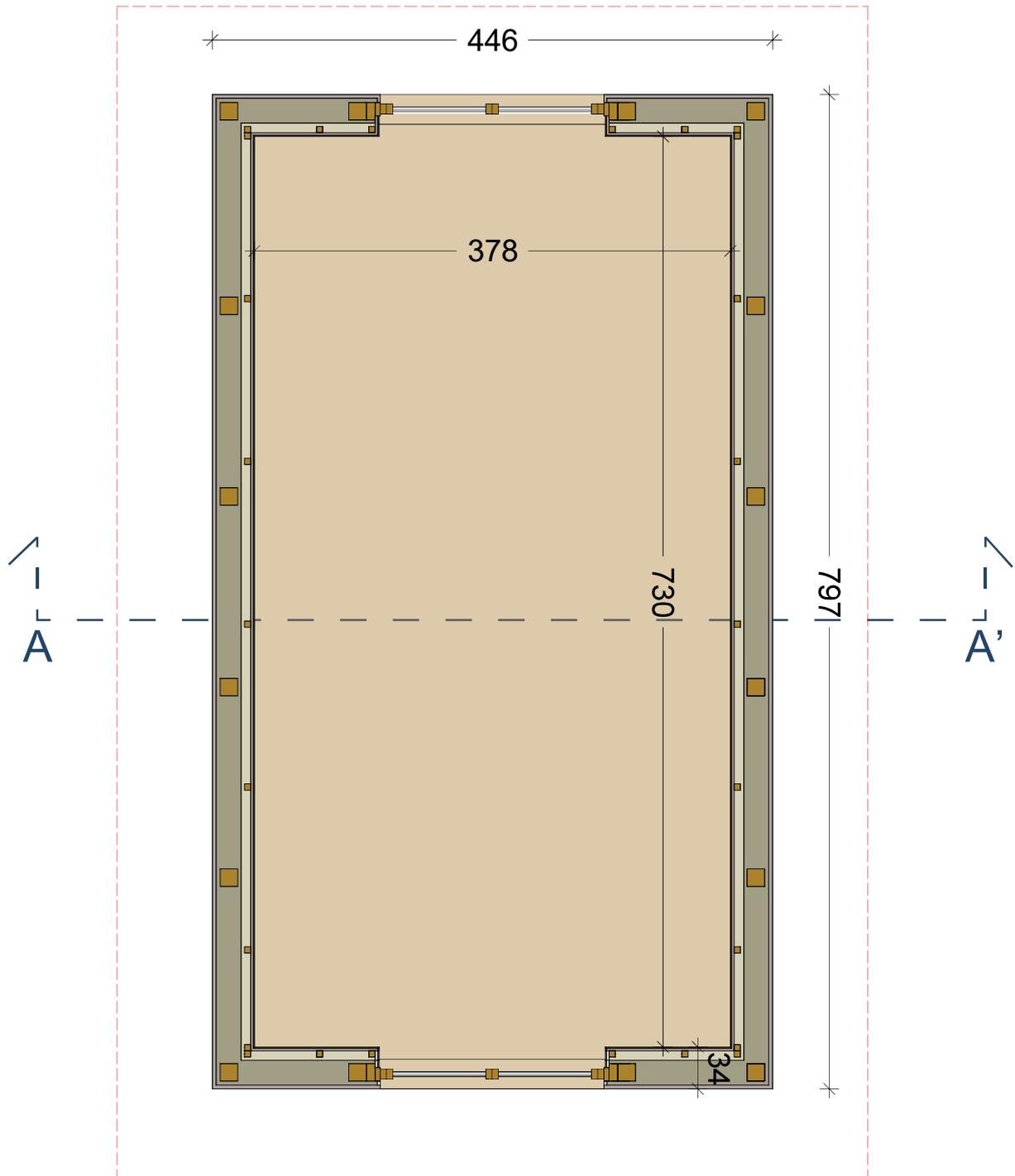
Elaborato grafico
STRUTTURA_A : PROSPETTO SUD STRUTTURALE
scala 1:50



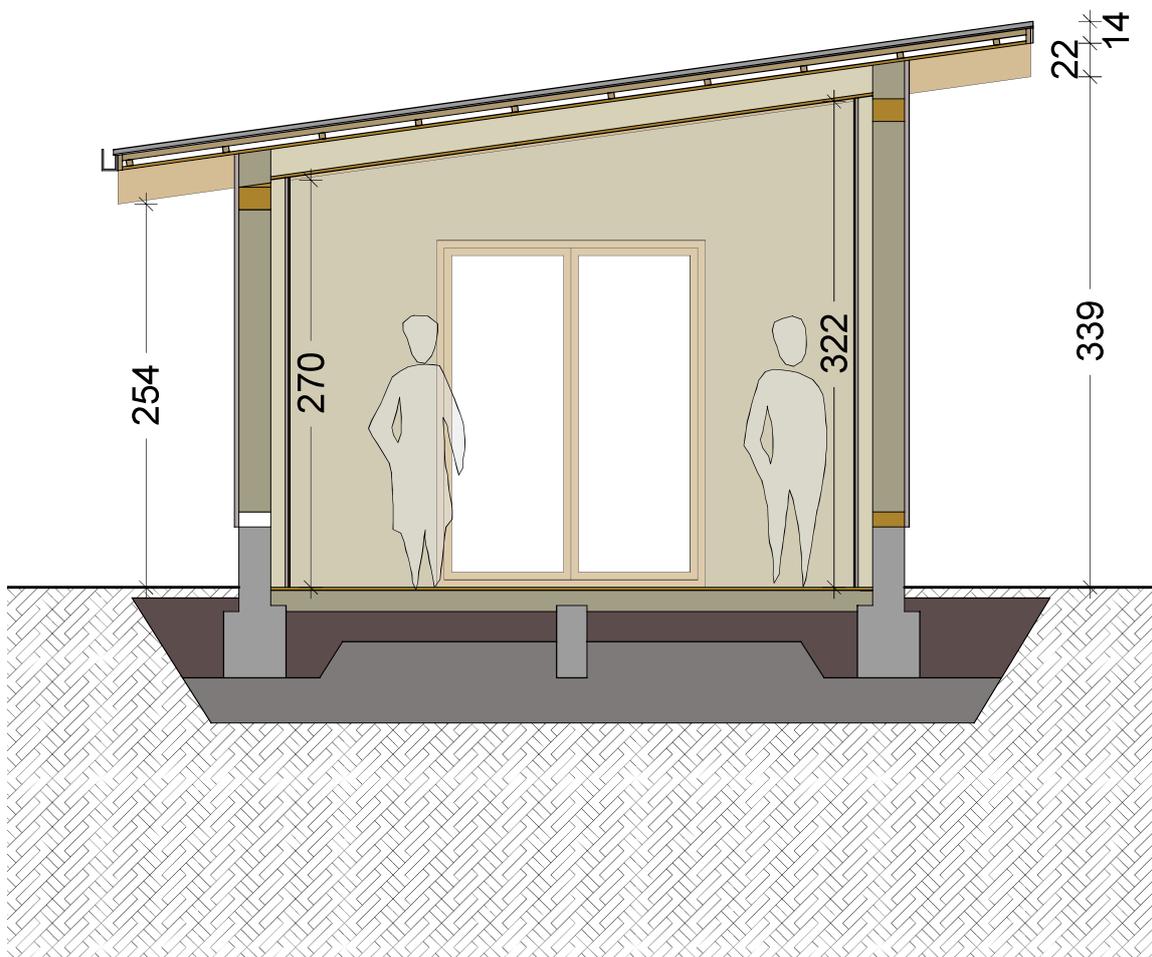
Elaborato grafico
STRUTTURA_A : PROSPETTO NORD STRUTTURALE
scala 1:50



Elaborato grafico
STRUTTURA_A : PLANIMETRIA ARCHITETTONICA
scala 1:50



Elaborato grafico
STRUTTURA_A : SEZIONE ARCHITETTONICA A-A'
scala 1:50



Elaborato grafico
STRUTTURA_A : PROSPETTO EST ARCHITETTONICO
scala 1:50



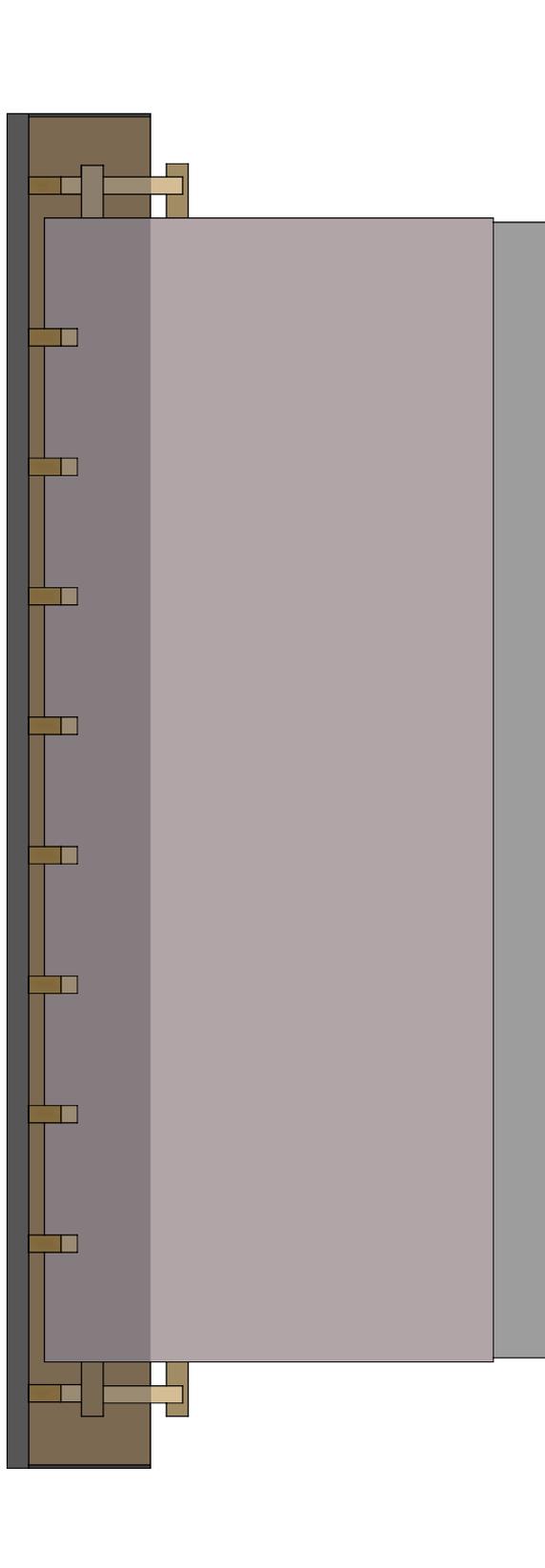
Elaborato grafico
STRUTTURA_A : PROSPETTO OVEST ARCHITETTONICO
scala 1:50



Elaborato grafico

STRUTTURA_A : PROSPETTO NORD ARCHITETTONICO

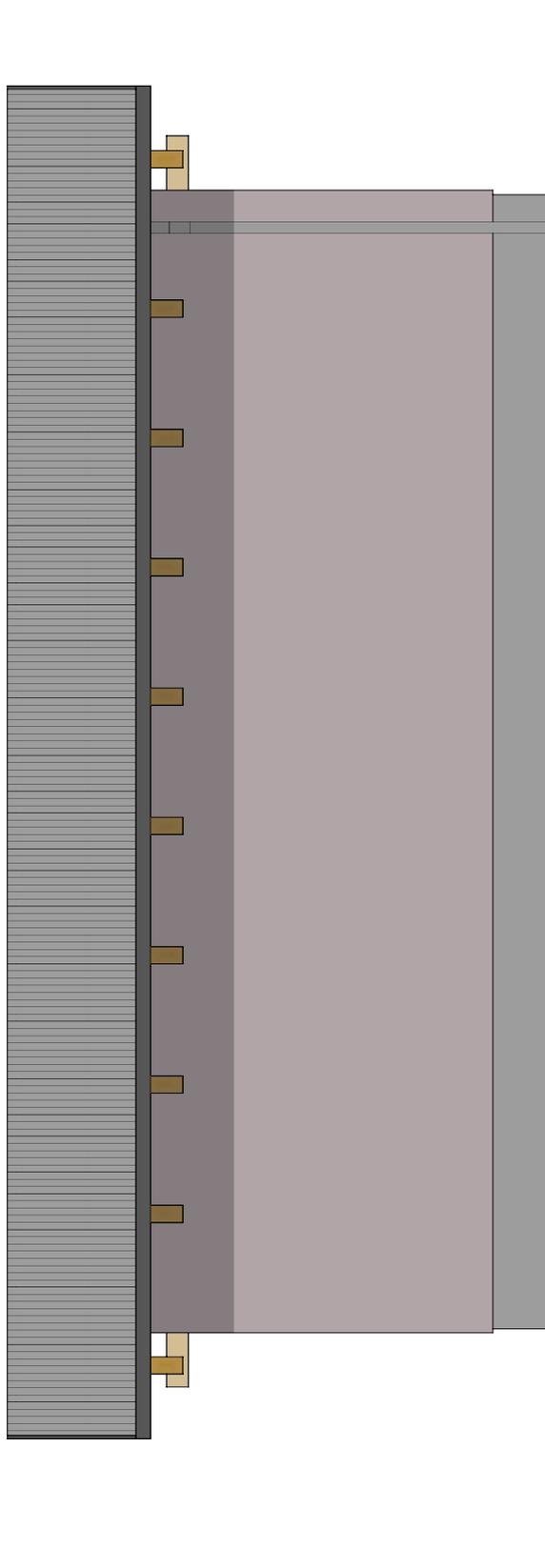
scala 1:50



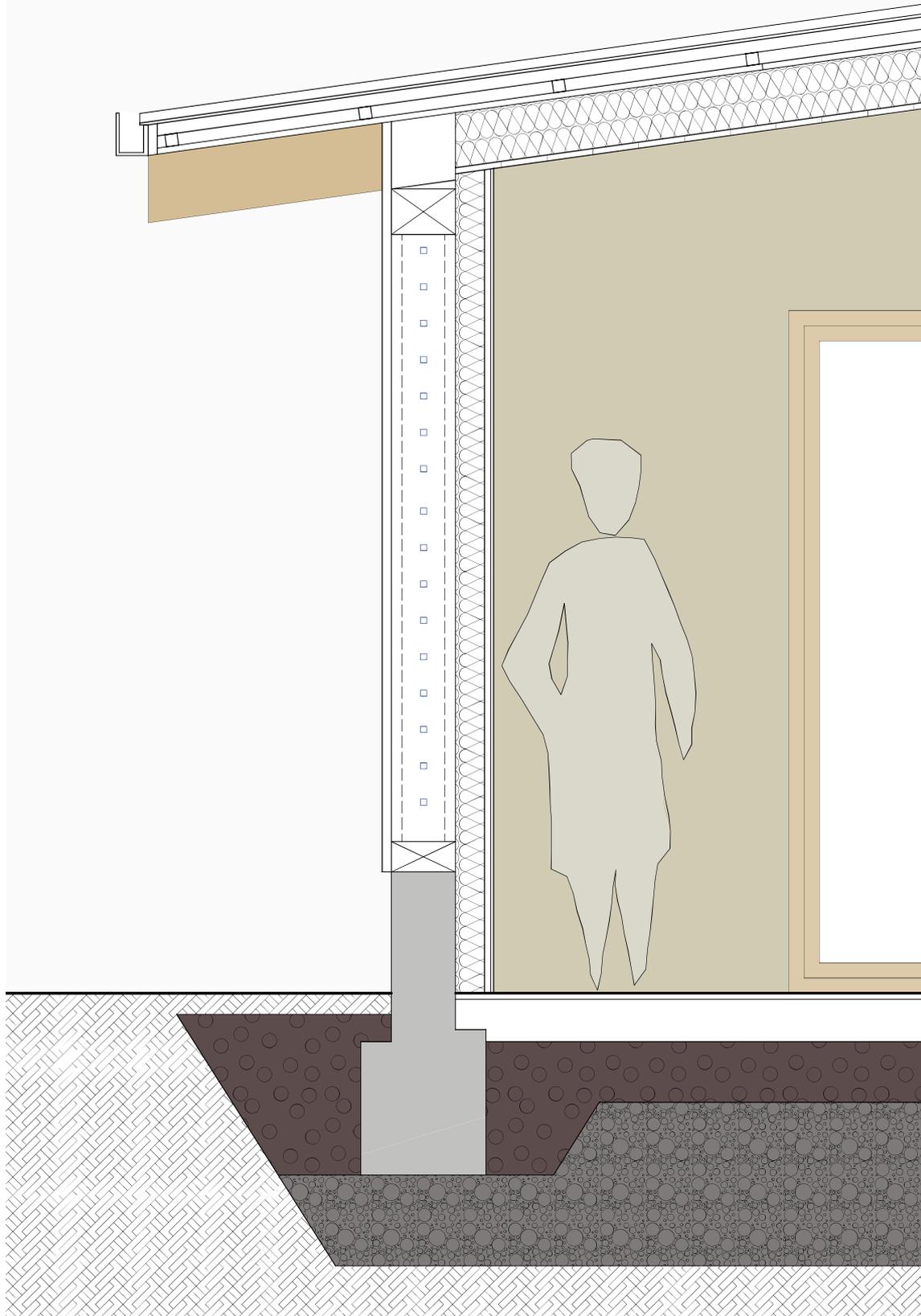
Elaborato grafico

STRUTTURA_A : PROSPETTO SUD ARCHITETTONICO

scala 1:50



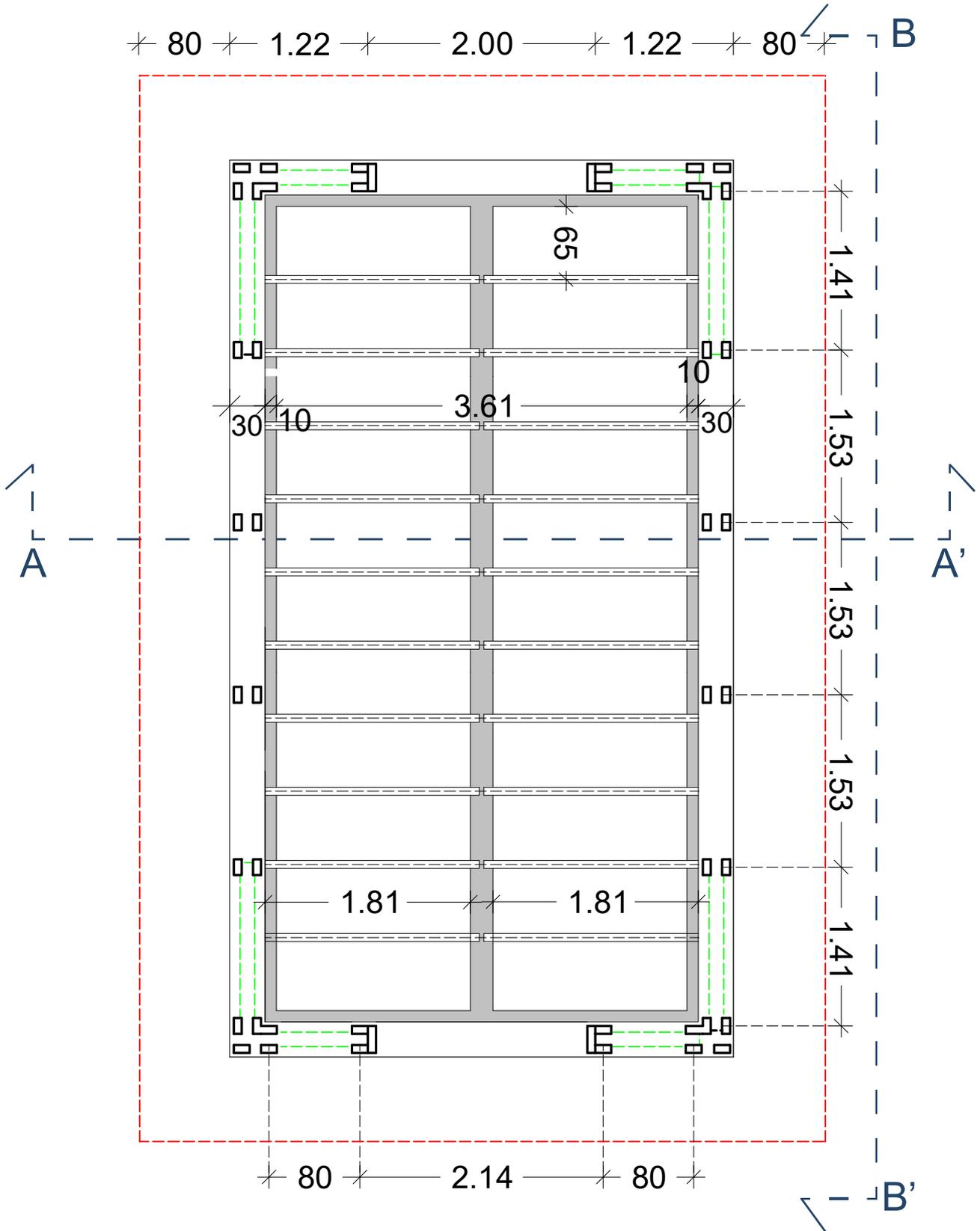
Elaborato grafico
STRUTTURA_A : PARTICOLARE COSTRUTTIVO
scala 1:20



Elaborato grafico

STRUTTURA_B : PLANIMETRIA STRUTTURALE

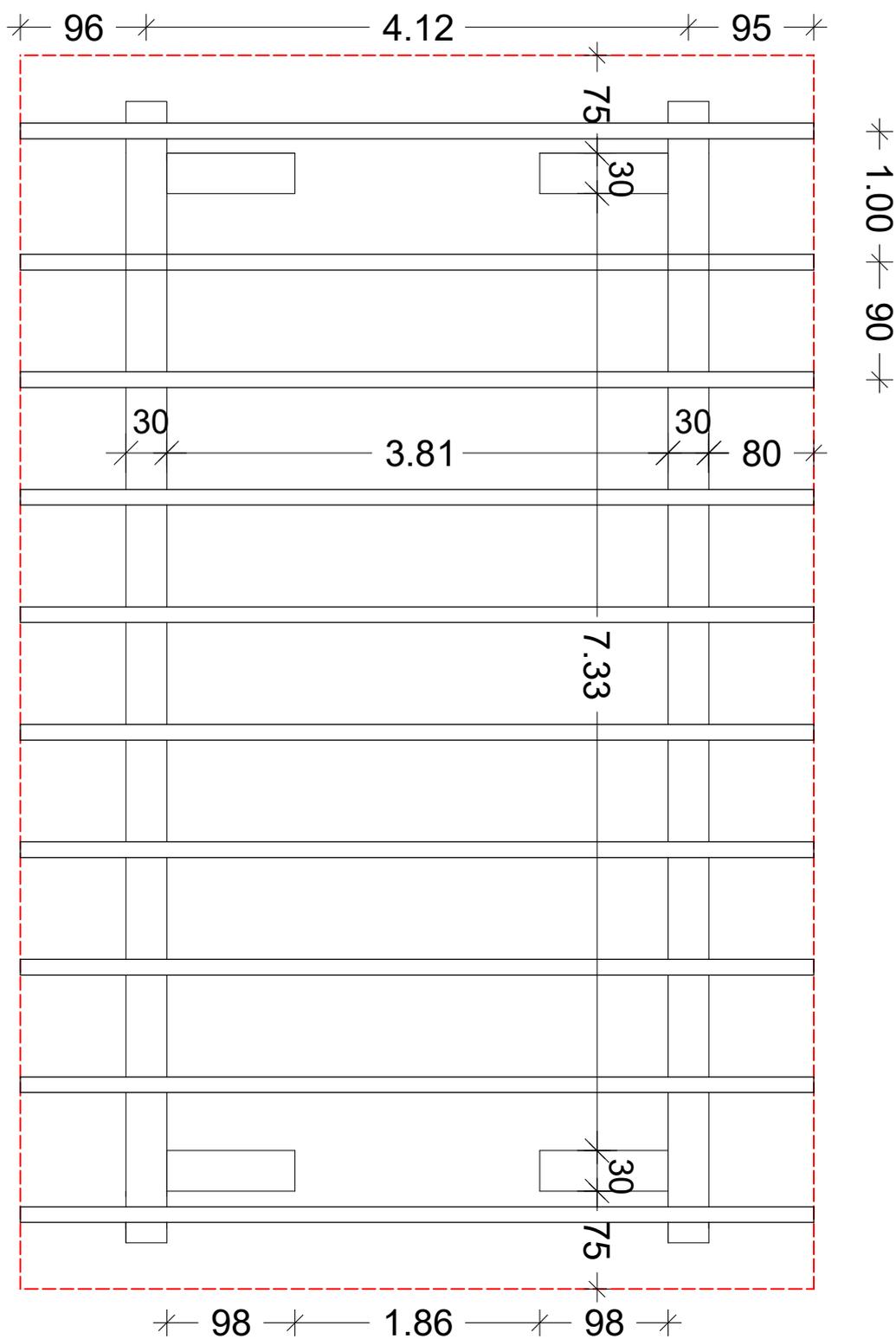
scala 1:50



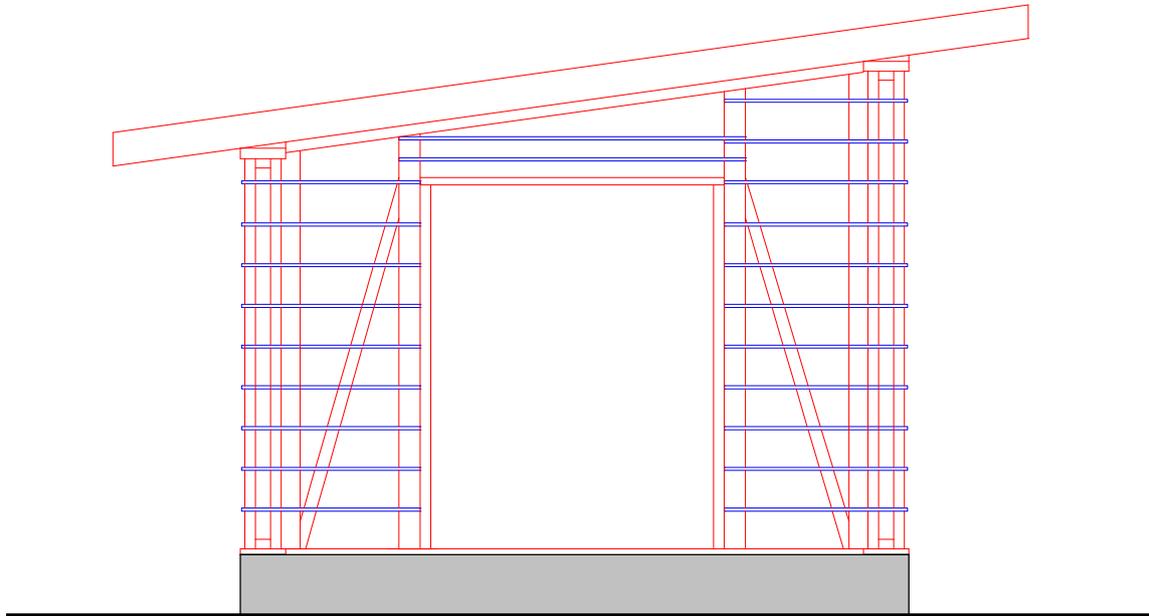
Elaborato grafico

STRUTTURA_B : PLANIMETRIA COPERTURA STRUTTURALE

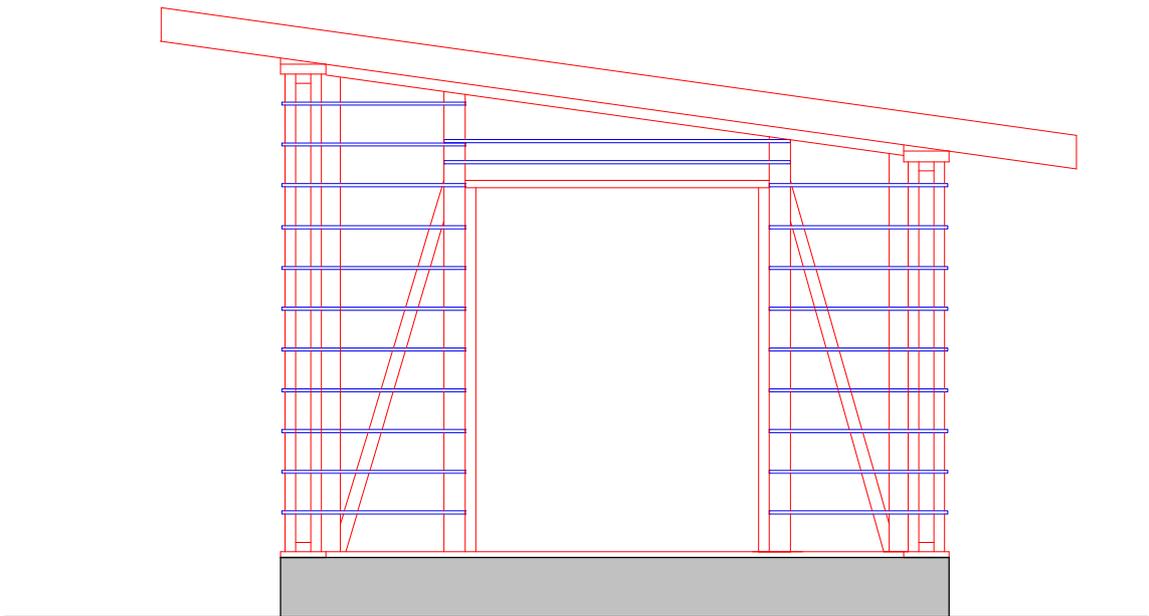
scala 1:50



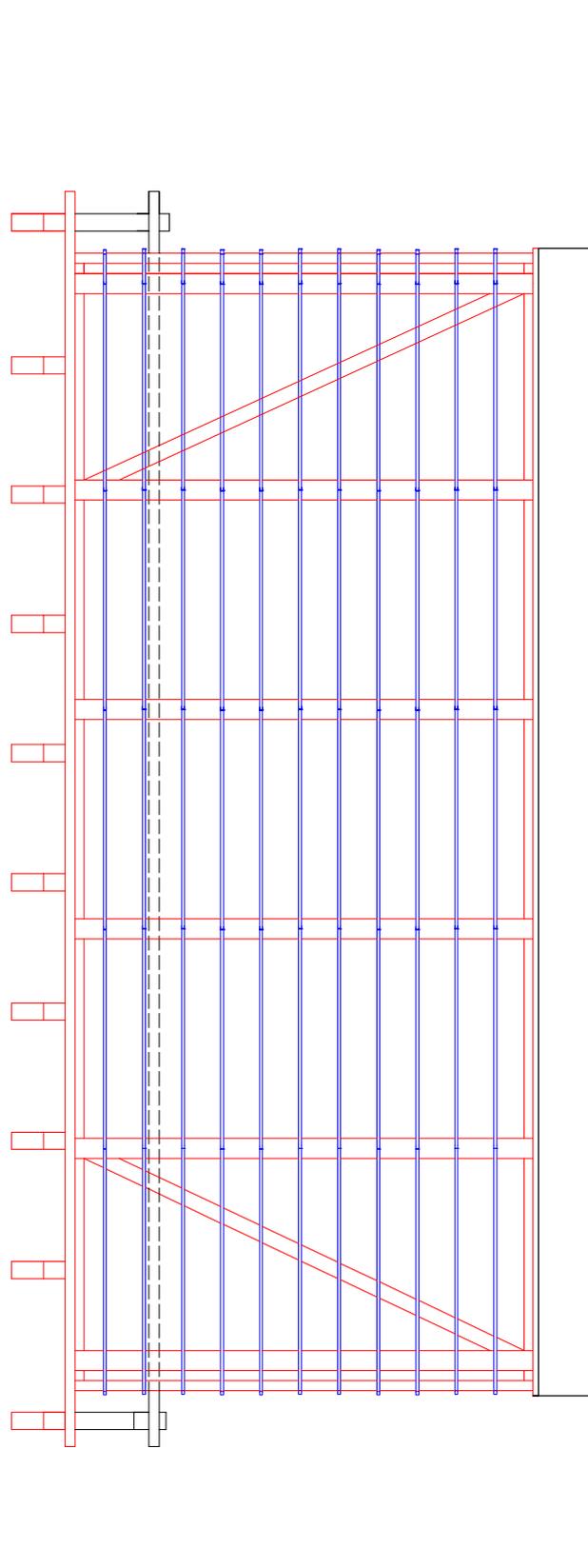
Elaborato grafico
STRUTTURA_B : PROSPETTO EST STRUTTURALE
scala 1:50



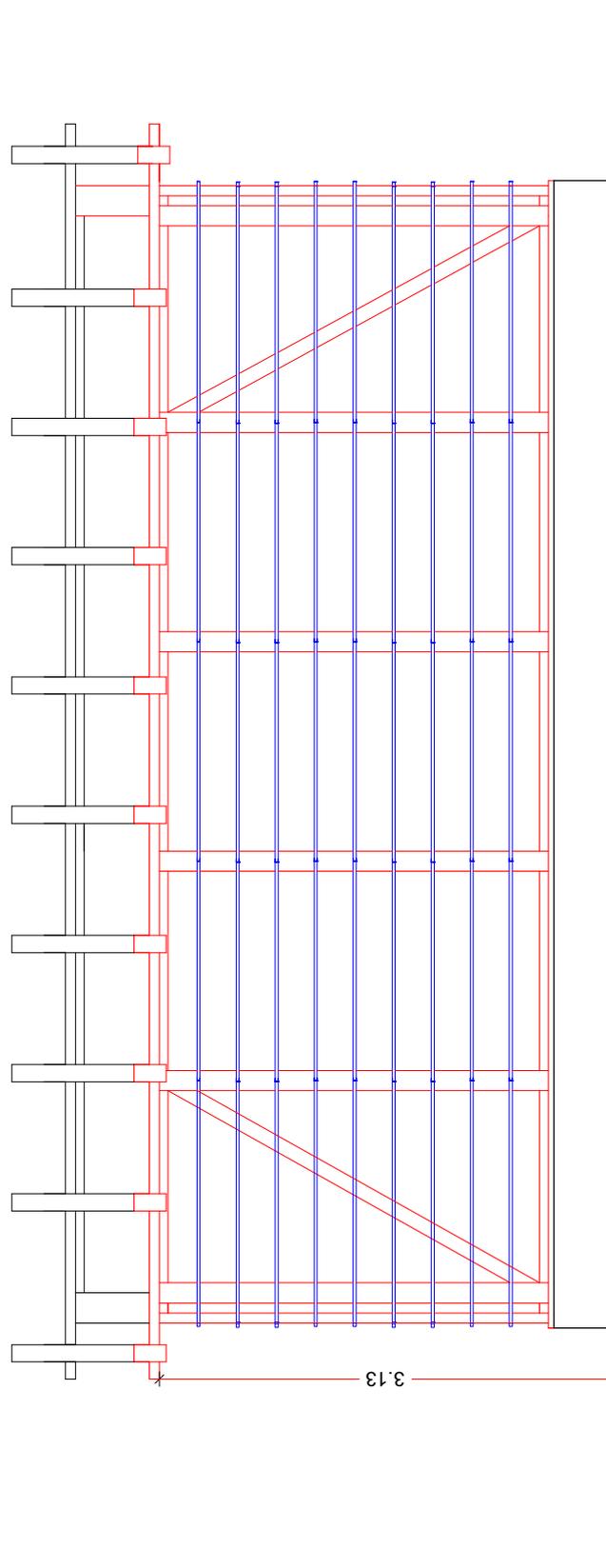
Elaborato grafico
STRUTTURA_B : PROSPETTO OVEST STRUTTURALE
scala 1:50



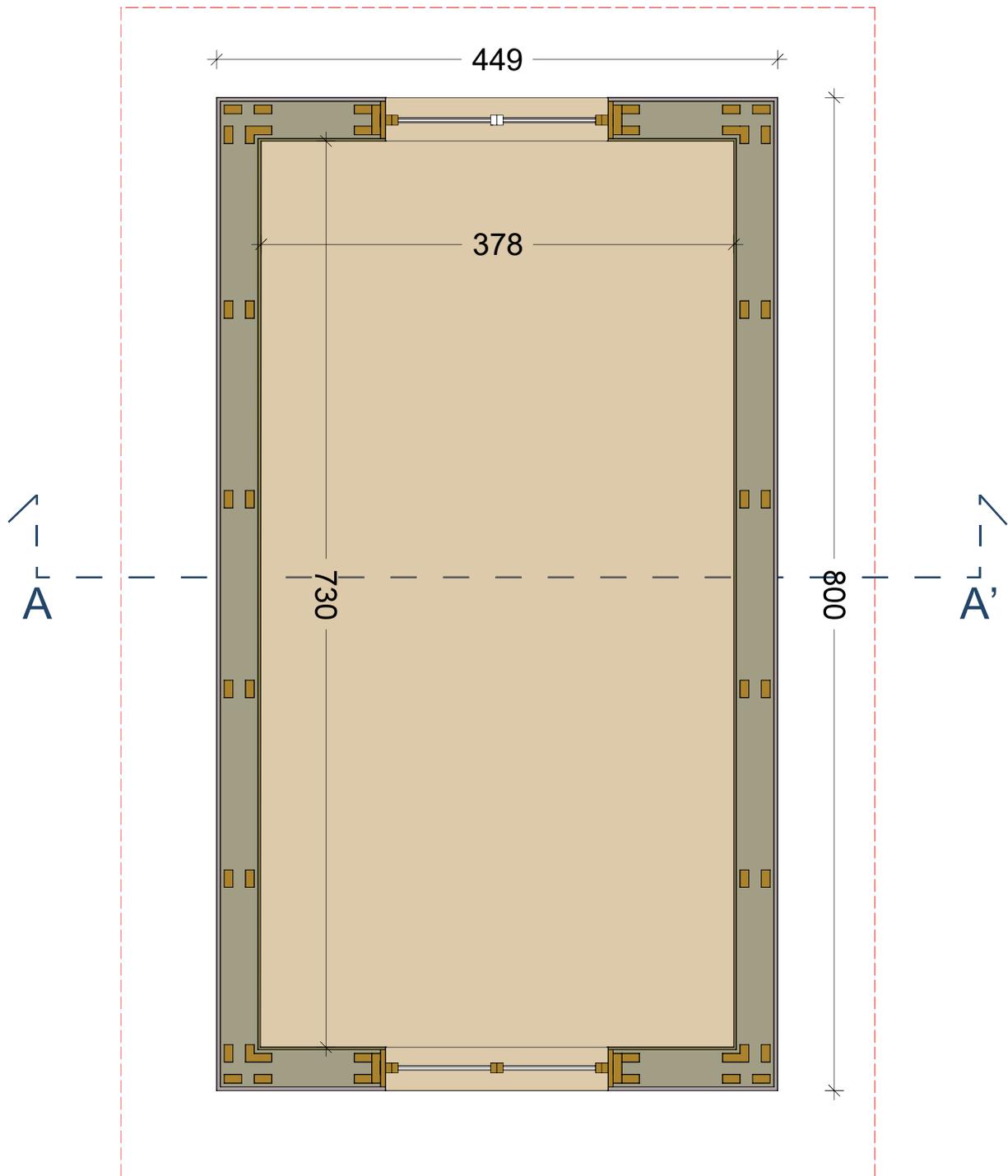
Elaborato grafico
STRUTTURA_B : PROSPETTO NORD STRUTTURALE
scala 1:50



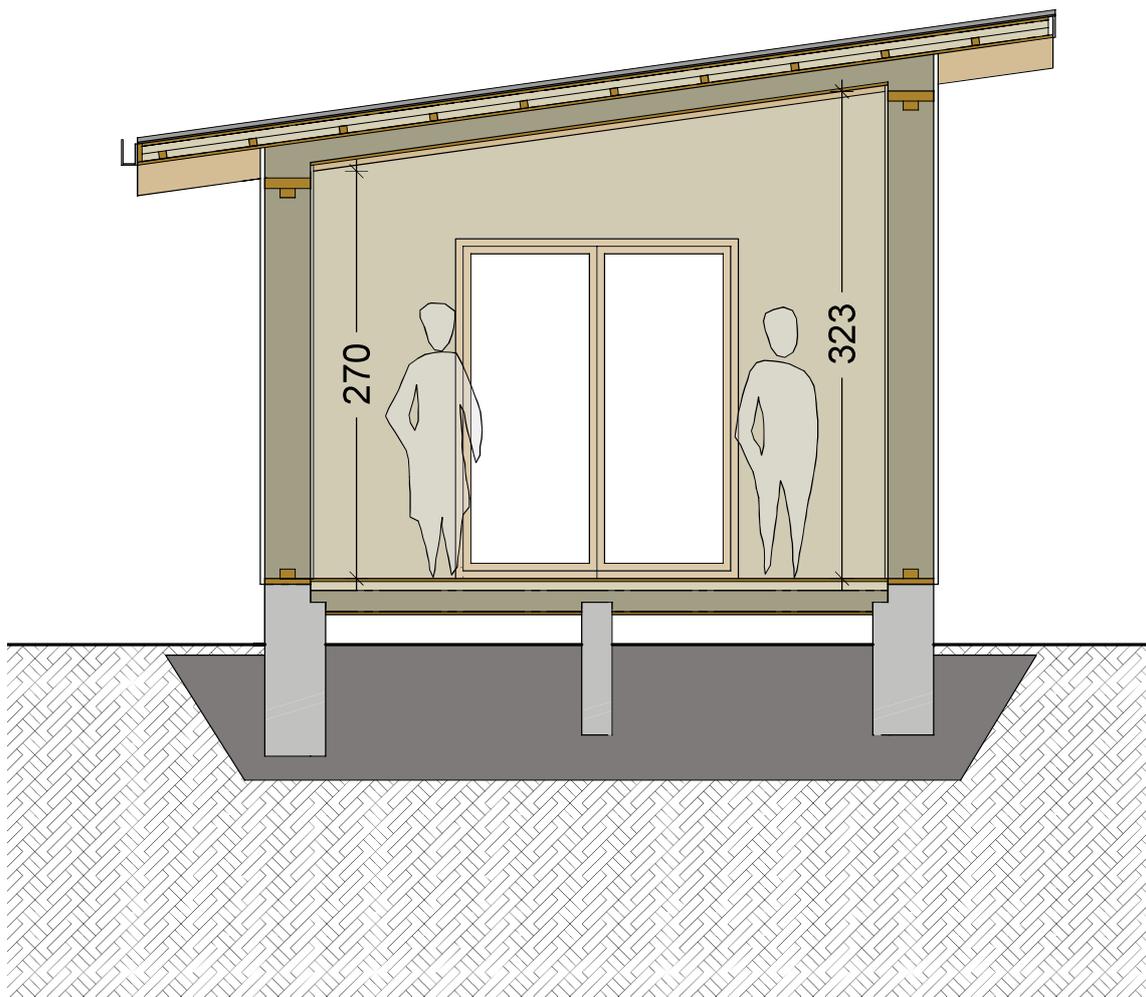
Elaborato grafico
STRUTTURA_B : PROSPETTO SUD STRUTTURALE
scala 1:50



Elaborato grafico
STRUTTURA_B : PLANIMETRIA ARCHITETTONICO
scala 1:50



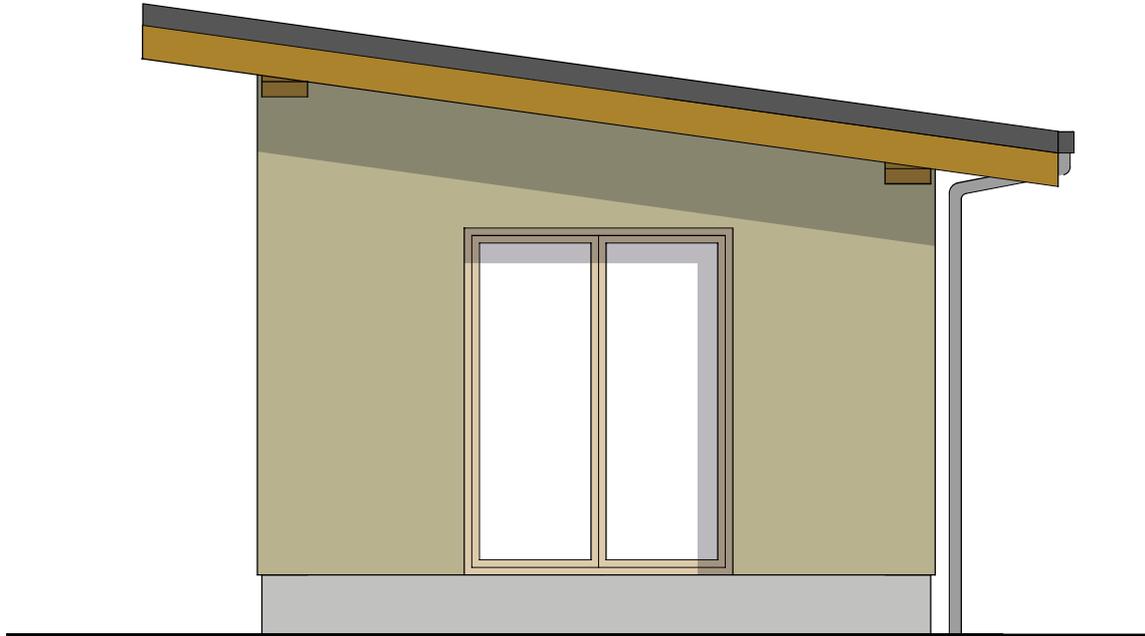
Elaborato grafico
STRUTTURA_B : SEZIONE A-A' ARCHITETTONICO
scala 1:50



Elaborato grafico

STRUTTURA_B : PROSPETTO EST ARCHITETTONICO

scala 1:50



Elaborato grafico

STRUTTURA_B : PROSPETTO OVEST ARCHITETTONICO

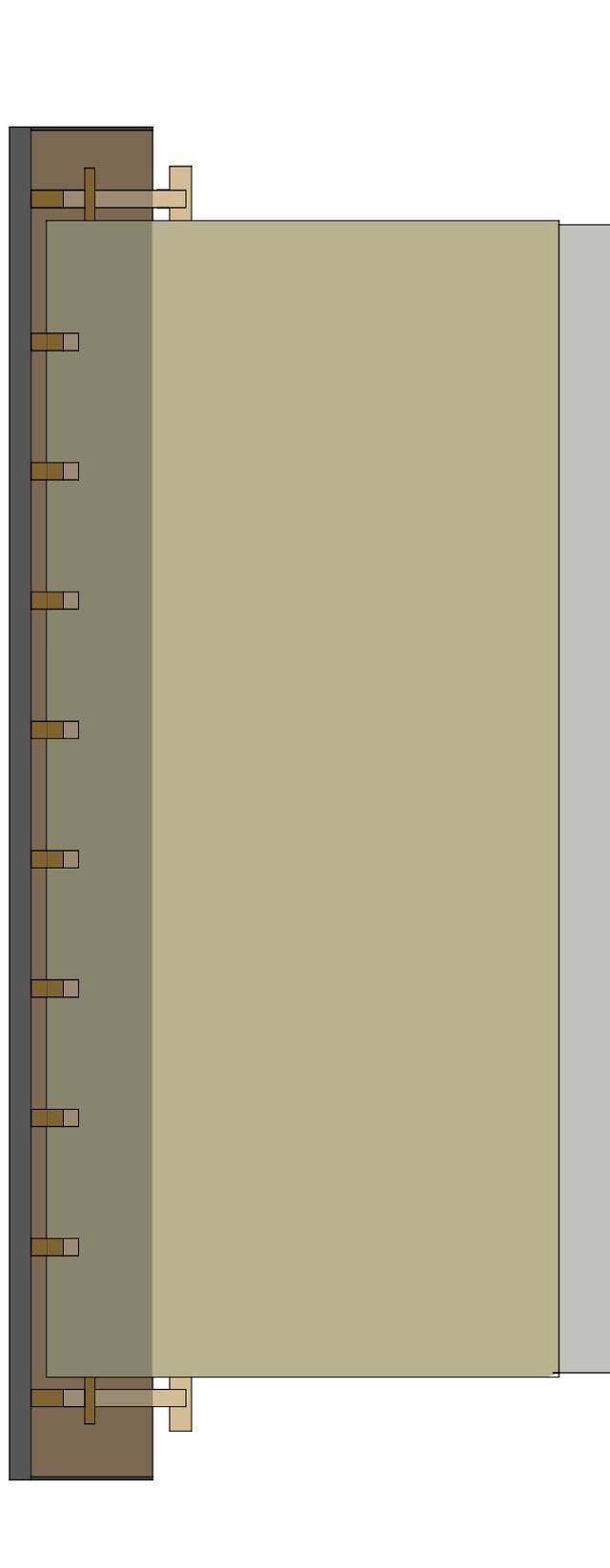
scala 1:50



Elaborato grafico

STRUTTURA_B : PROSPETTO NORD ARCHITETTONICO

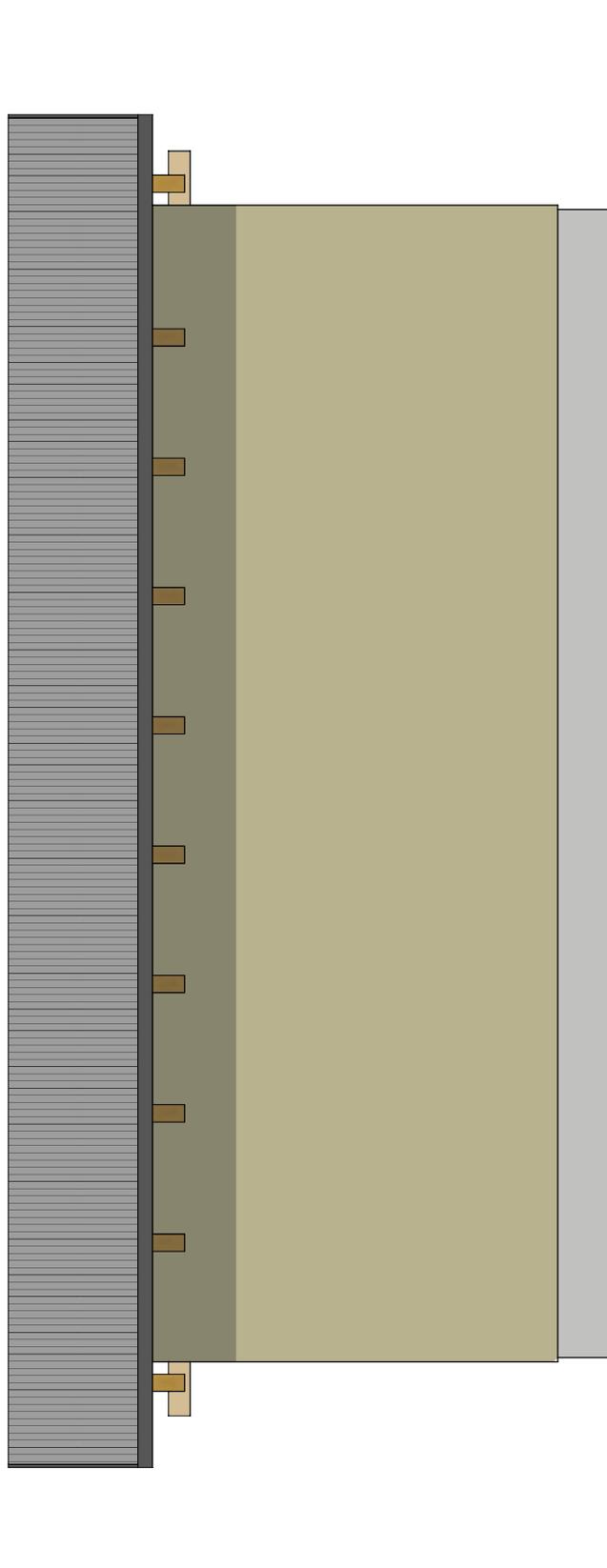
scala 1:50



Elaborato grafico

STRUTTURA_B : PROSPETTO SUD ARCHITETTONICO

scala 1:50



Elaborato grafico
STRUTTURA_B : PARTICOLARE COSTRUTTIVO
scala 1:20

