

# **POLITECNICO DI TORINO**

Corso di Laurea Magistrale  
in Ingegneria Energetica e Nucleare

Tesi di Laurea Magistrale

**Valutazione energetica ed igrometrica di una struttura  
leggera in legno.**

**Un Caso Studio**



**Relatore:**

Prof.ssa Valentina Serra

**Corelatori:**

Arch. Stefano Fantucci

Ing. Giuseppe Gianolio

**Candidato:**

Luca Baldi

Con il supporto e la supervisione di:

**VASS**  
TECHNOLOGIES

Anno Accademico 2019/2020



## ABSTRACT

Questo lavoro ha come scopo la valutazione energetica e igrometrica della struttura di un edificio in legno ed è frutto della collaborazione con l'azienda VASS Technologies, operante nel settore della progettazione e della costruzione di tali edifici.

Nell'elaborato sono stati dapprima simulati e confrontati i comportamenti termo-igrometrici di diverse soluzioni costruttive, riferite ai diversi elementi che compongono l'involucro opaco. In una seconda fase la simulazione è stata estesa ad un "Caso Studio" reale relativo ad un intero edificio di civile abitazione di tipo residenziale monofamiliare. Le simulazioni sono state effettuate in regime statico e dinamico con la valutazione del fabbisogno energetico futuro.

Il rapporto presenta una prima sezione relativa ad una panoramica sulla bioedilizia, che spazia da un'analisi introduttiva del mercato europeo ed italiano alla descrizione delle differenti tipologie costruttive e dei materiali impiegati, con particolare attenzione all'aspetto normativo.

Nella seconda parte viene descritto il "Caso Studio" partendo dalla presentazione e dalla modellizzazione del progetto e analizzando successivamente l'aspetto termo-igrometrico delle differenti soluzioni costruttive, principalmente basate sull'introduzione delle facciate ventilate.

In questa sezione è riportata infine una simulazione sul comportamento termico dell'intero edificio per determinarne il fabbisogno energetico richiesto nelle diverse soluzioni previste, verificando quindi che quelle migliori dal punto di vista termo-igrometrico non comportino un aumento del fabbisogno energetico dell'edificio nel suo complesso o che, al massimo, siano comparabili.

L'analisi si conclude con la verifica della fattibilità economica, tenendo in considerazione sia i costi di costruzione che di gestione.

Per la valutazione termica e igrometrica delle differenti soluzioni sono stati utilizzati specifici software di calcolo basati sulla normativa vigente.

La valutazione dei componenti e del sistema nel suo complesso è stata svolta sia in regime stazionario sia in quello dinamico, in modo da non tralasciare nessun fenomeno termico inerente al processo, ridurre il più possibile le approssimazioni e, infine, per avere un riscontro immediato tra le due tipologie di calcolo.

La valutazione igrometrica è stata riferita principalmente all'elemento più critico della stratigrafia, l'OSB, mentre per quella dell'edificio nel suo complesso è stato ricercato il mantenimento del miglior comfort interno.

Dalla prima analisi, riguardante i singoli componenti, l'introduzione della facciata ventilata ha comportato una notevole riduzione dei valori di umidità interna nella totalità dei casi, con alcune criticità in determinate soluzioni alternative.

La tipologia migliore per il proseguimento delle analisi è stata dunque scelta sulla base dell'aspetto economico, in quanto quelle a facciata ventilata si sono dimostrate maggiormente efficienti.

Una volta analizzato il fabbisogno energetico dell'edificio in entrambi i casi, sia nella soluzione di progetto sia nella variante proposta, è stato possibile affermare che i risultati sono pienamente comparabili, anche dal punto di vista economico.

Ciò permette di concludere che l'applicazione della facciata ventilata ad un edificio con struttura a telaio leggera, posata a secco, sia pienamente vantaggiosa. Essa, infatti, non comporta un aumento significativo di costo, sia in fase di costruzione sia in fase di gestione, garantendo un miglioramento notevole dal punto di vista della durabilità.

# Indice

NOMENCLATURA UTILIZZATA .....	7
<b>PARTE 1: LE COSTRUZIONI IN LEGNO.....</b>	<b>9</b>
<b>1 Un nuovo materiale: il legno.....</b>	<b>11</b>
<b>2 La bioedilizia e il mercato del legno in Europa e in Italia.....</b>	<b>13</b>
<b>3 Le strutture in legno .....</b>	<b>17</b>
3.1 Costruzioni intelaiate leggere .....	17
3.2 Strutture principali e connessioni.....	20
3.3 Gli elementi costruttivi principali .....	29
3.3.1 Elementi strutturali.....	29
3.3.2 Elementi piani composti da fibre di legno.....	30
3.3.3 Pannelli truciolari.....	31
3.3.4 Le guaine .....	31
3.4 Trasporto e sollevamento delle componenti prefabbricate.....	32
<b>4 Le caratteristiche prestazionali .....</b>	<b>34</b>
4.1 Comportamento termico dell'edificio .....	34
4.1.1 Le soluzioni tecniche.....	39
4.2 Isolamento acustico .....	41
4.3 Tenuta all'aria .....	43
4.4 Biodegradamento, durabilità e preservazione del legno.....	45
4.5 Resistenza al fuoco.....	50
<b>5 Comportamento sismico delle strutture in legno.....</b>	<b>54</b>
5.1 Normativa e certificazioni .....	56
<b>6 Metodologie di analisi .....</b>	<b>59</b>
6.1 Analisi termo-igrotermica.....	59
6.1.1 La normativa.....	59
6.1.2 Metodologia di calcolo.....	60
6.2 Progettazione nel ciclo di vita.....	65
6.2.1 Life Cycle Thinking.....	65
6.2.2 Life Cycle Assessment (LCA).....	66
6.2.3 Life Cycle Cost (LCC) .....	67
6.2.4 Life Cycle Sustainable Assessment (LCSA) .....	68
6.2.5 Social Life Cycle Assessment (SLCA) .....	68

<b>PARTE SECONDA: CASO STUDIO DI UN EDIFICIO RESIDENZIALE IN LEGNO.....</b>	<b>69</b>
<b>1 Company profile .....</b>	<b>69</b>
<b>2 Caso Studio .....</b>	<b>71</b>
2.1 Introduzione al caso studio .....	71
2.2 Software utilizzati .....	72
2.3 Edificio in esame e parametri principali.....	73
2.4 Analisi delle strutture portanti .....	78
2.4.1 Descrizione dell'analisi .....	78
2.4.2 Configurazioni delle stratigrafie .....	83
2.5 Risultati e commenti.....	121
2.5.1 Pareti portanti.....	121
2.5.2 Coperture .....	126
2.5.3 Materiali isolanti .....	129
2.6 Analisi termo-igrometrica dell'edificio.....	131
2.6.1 Introduzione all'analisi.....	131
2.6.2 Varianti in esame e parametri dell'edificio .....	132
2.6.3 Parametri di simulazione .....	133
2.7 Risultati analisi energetica dell'edificio .....	137
2.7.1 Valutazione del comfort adattivo.....	137
2.7.2 Analisi del mese di luglio .....	141
2.8 Valutazione economica .....	147
<b>3 Conclusioni.....</b>	<b>149</b>
<b>INDICI.....</b>	<b>151</b>
<b>1 Indice delle figure.....</b>	<b>151</b>
<b>2 Indice delle tabelle .....</b>	<b>152</b>
<b>3 Indice dei grafici .....</b>	<b>153</b>
<b>NORMATIVA UTILIZZATA .....</b>	<b>155</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>158</b>
<b>RINGRAZIAMENTI.....</b>	<b>163</b>

## Nomenclatura utilizzata

Simbolo	Unità di misura	Descrizione
T	[K]	Temperatura
U	[W/ m <sup>2</sup> K]	Trasmittanza termica
YIE	[W/ m <sup>2</sup> K]	Trasmittanza termica periodica
R	[m <sup>2</sup> K /W]	Resistenza termica
U <sub>w</sub>	[W/m <sup>2</sup> K]	Trasmittanza termica dell'infisso
c	[J/kgK]	Calore specifico
C	[J/K]	Capacità termica
λ	[W/mK]	Conducibilità termica
h <sub>e</sub>	[J/kg]	Entalpia di evaporazione
q	[J/s]	Flusso di termico
p	[Pa]	Pressione
ρ	[kg/m <sup>3</sup> ]	Densità del materiale
μ	[-]	Fattore di resistenza al vapore
δ	[kg/msPa]	Permeabilità al vapore
f	Hz	Frequenza



## Parte 1: Le costruzioni in legno

Nel corso dei secoli, il legno è stato il materiale protagonista nell'ambito delle costruzioni. Risorsa naturale, rinnovabile e potenzialmente inesauribile ha fornito agli uomini combustibile, ripari ed utensili fin dai tempi antichi.

Surclassato da nuovi materiali, come il cemento armato e l'acciaio, ha subito una significativa diminuzione di impiego, in particolare durante il periodo della ricostruzione del secondo dopoguerra.

In seguito alla crisi energetica degli anni '70 si mette in luce la problematica del risparmio energetico, estesa non solo all'ambito industriale ma anche a quello edile.

In un mondo in cui le tematiche di sostenibilità e di salvaguardia dell'ambiente sono di primo rilievo, il legno torna ad occupare una posizione di rilievo tra i materiali da costruzione.

Oltre all'aspetto ecologico, il legno da costruzione garantisce ottime caratteristiche meccaniche, termiche, acustiche e migliora la sensazione di comfort abitativo interno.

È possibile costruire strutture più leggere rispetto ad analoghe in cemento armato grazie alla maggiore leggerezza del materiale ligneo, che possiede comunque un'ottima resistenza statica.

Inoltre, si tratta di un materiale elastico, in grado di sopportare minime deformazioni ed assorbire forze esterne limitando i danni alla struttura. Questa caratteristica lo rende una valida soluzione anche per zone ad attività sismica.

Dal punto di vista dell'isolamento possiede una conducibilità termica ridotta garantendo così un miglioramento del potere isolante della struttura ed un conseguente risparmio energetico, mentre da quello igrometrico possiede la capacità di assorbire e scambiare molecole d'acqua con l'ambiente, migliorando la qualità dell'aria interna.

In caso di incendio si potrebbe pensare che un edificio in legno sia meno sicuro di uno tradizionale, in realtà lo strato soggetto a combustione è soltanto quello esterno, assicurando il mantenimento delle caratteristiche meccaniche della struttura, permettendo così l'evacuazione delle persone.

Ad oggi, con l'aumento della sensibilità verso i temi di sostenibilità ambientale, la bioedilizia rappresenta il mercato più florido del settore edile di tutta Europa.

È finalizzata al raggiungimento del miglior comfort ambientale interno limitando al minimo l'utilizzo di energia primaria, eliminando quella derivante da combustibili fossili.

Durante la progettazione si tiene conto dell'intero ciclo di vita di tutti i materiali, al fine di contenere i livelli di inquinamento nelle diverse fasi, compreso lo smaltimento.

Vengono introdotti nuovi materiali, la maggior parte di matrice legnosa e altri naturali come il sughero, le fibre di legno e le lane di roccia, fino all'utilizzo di pannelli in paglia e lane biologiche.

Negli Stati del nord Europa prima e in quelli meridionali dopo, la progettazione di edifici in legno risulta una valida alternativa a quella con materiali tradizionali.

In Italia, la penuria e la poca cura dell'area boschiva, la varietà climatica e l'attaccamento alla tradizione hanno favorito il rallentamento di questo processo rispetto ad altri Paesi europei.

# 1 Un nuovo materiale: il legno

Ricavato dagli alberi, il legno rappresenta una materia prima di fondamentale importanza per la realizzazione di manufatti e per la costruzione di edifici.

È un materiale composito caratterizzato da una massa fibrosa, composta da cellule saldamente legate tra loro, costituite principalmente da acqua, cellulosa, emicellulosa, lignina, tannino ed alcaloidi.

Le possibilità di impiego sono molteplici: ogni specie legnosa deve essere però utilizzata assecondando le sue caratteristiche (densità, durezza, resistenza, ecc.)

L'elemento legno, come ogni altro materiale, presenta pregi e difetti:

## **Pregi:**

- elevata leggerezza del materiale e un'ottima resistenza meccanica nella direzione delle fibre;
- materiale molto semplice da lavorare, da assemblare, riparare e/o sostituire;
- possiede una buona resistenza al gelo;
- è un buon isolante termico;
- rinnovabile e abbondante (caratteristiche veritiere se supportate da un efficiente programma di rimboschimento);
- basso costo energetico, poiché per produrre un elemento di legno è necessaria una minor quantità di energia rispetto ad altri materiali.

## **Difetti:**

- è altamente infiammabile;
- è soggetto ad attacchi di parassiti, funghi e muffe;
- in funzione dell'orientamento delle fibre assume comportamenti strutturali differenti;
- sensibile alle condizioni igrometriche dell'ambiente;
- è un materiale "vivo" che necessita di un tempo di stagionatura, durante il quale la struttura si essicca.

## **La classificazione**

Come per tutti i materiali il legno ha diversi tipi di classificazione a seconda degli ambiti di utilizzo, delle forme, delle caratteristiche e infine della durezza.

Tuttavia, la classificazione più caratterizzante nell'ambito delle costruzioni, dal punto di vista merceologico, riguarda la distinzione fra legno massiccio e legno lamellare.

Il primo è ottenuto direttamente da pezzi del tronco e il secondo, che rappresenta una recente innovazione tecnologica, dall'incollaggio di lamelle di legno.

Quest'ultima tipologia, in particolare, permette di poter direzionare le fibre in modo tale da opporre maggiore resistenza meccanica ai carichi applicati, permettendo quindi di poter creare elementi strutturali di forme particolari e di lunghezze considerevoli.

Di seguito le altre principali classificazioni.

#### Ambiti di utilizzo:

- Legname per costruzioni, ricavato da fusti legnosi di essenza resistente e utilizzato per la costruzione di travi e pilastri, traversine per opere ferroviarie e nella realizzazione di pali in legno.
- Legname per falegnameria, ricavato dai tronchi per la produzione di tavole, listelli e altri elementi simili.
- Legname da ebanisteria, ricavato da trochi e radici di legni con una durezza elevata e utilizzati per la produzione di arredi e oggetti.

#### Forme e caratteristiche:

- Legno segato, come travi e tavole per ponteggi, ottenuto tramite lavorazioni di falegnameria.
- Prodotti di legno massiccio o massello ottenuti con ulteriori lavorazioni:
  - elementi per strutture portanti in legno;
  - elementi di formazione per pareti in legno;
  - elementi per pavimentazione;
  - elementi per rivestimenti;
  - telai e controtelai per serramenti;
- Prodotti derivati tramite l'utilizzo di metodi quali sfogliatura e tranciatura:
  - pannelli di legno compensato e paniforti;
  - pannelli tamburati;
  - pannelli sandwich;
  - pannelli di particelle di fibre, lana di legno ecc.

#### Durezza:

- Commercialmente il legno è classificato in tenero e duro: il primo è quello derivante dalle conifere, il secondo dalle latifoglie.

## 2 La bioedilizia e il mercato del legno in Europa e in Italia

In questa sezione dell'elaborato viene presentata una panoramica riguardante il mercato della prefabbricazione in legno in Europa, con una focalizzazione successiva riguardante il mercato italiano.

I dati analizzati sono di fonte Eurostat<sup>1</sup>, ricercati tramite il riferimento al settore della produzione di edifici prefabbricati in legno ed identificato dal codice NACE REV.2<sup>2</sup>.

L'arco temporale preso in esame si sviluppa dal 2009 al 2017 e si riferisce a dati di import-export-produzione di 28 paesi.

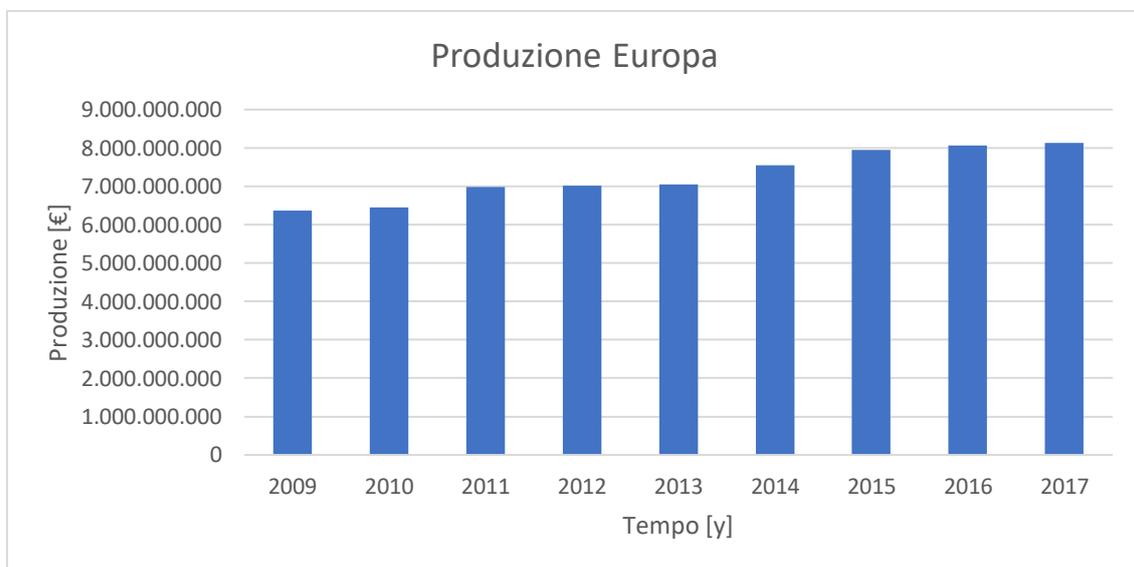


Grafico 1.1 Andamento della produzione europea nella prefabbricazione in legno. Fonte: Eurostat

Nel grafico proposto, si può osservare il valore di mercato pari a 8,1 miliardi di euro, con una crescita del 3% sul totale del 2016. Negli ultimi anni la produzione ha avuto un assestamento, soprattutto rispetto alla crescita degli anni precedenti, in cui si sono registrati picchi fino al +8% (2013-2014) e +5,6% (2014-2015), ma nonostante ciò non si è mai verificata una contrazione di mercato riguardante questo settore.

A livello europeo, la classifica dei singoli paesi sulla produzione di edifici prefabbricati in legno vede la Germania al primo posto, con una quota rispetto al totale che si attesta al 23% circa, seguita dal Regno Unito al 19% e dalla Svezia al 16% circa.

<sup>1</sup> Eurostat: L'Ufficio Statistico dell'Unione Europea è una Direzione Generale della Commissione europea; raccoglie ed elabora dati dagli Stati membri dell'Unione Europea a fini statistici.

<sup>2</sup> NACE REV.2: volume F, 162320 Manufacture of other builders carpentry and joinery – Prefabricated buildings of wood.

L'Italia si posiziona al quarto posto, mantenendo una discreta stabilità attorno al 9% del totale. Il seguente grafico evidenzia le quote di produzione dei principali paesi produttori europei sul totale.

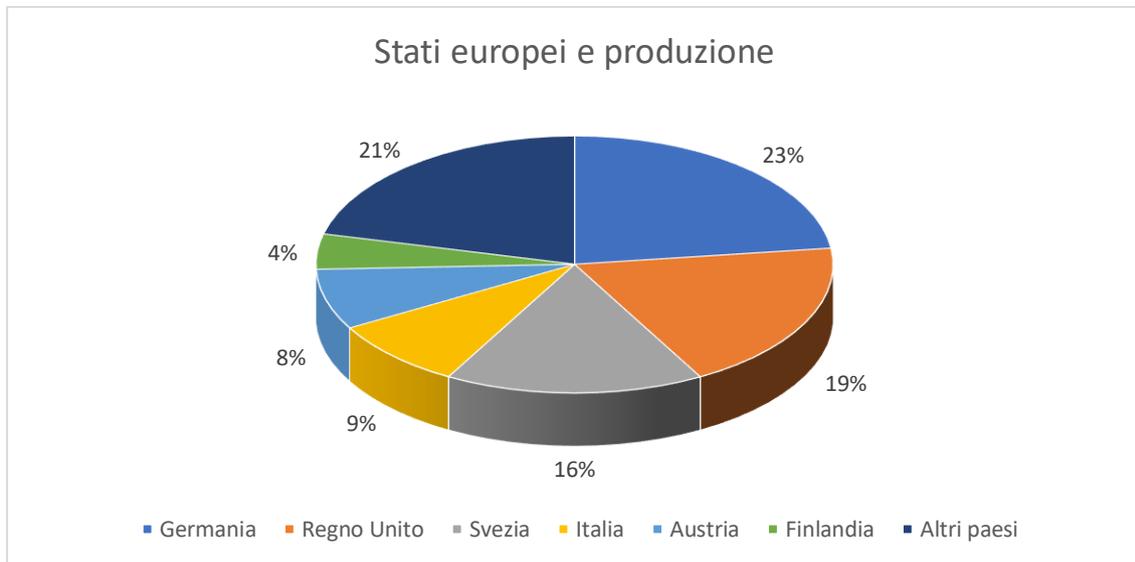


Grafico 1.2 Peso dei singoli Stati sulla produzione europea nella prefabbricazione in legno. Fonte: Eurostat

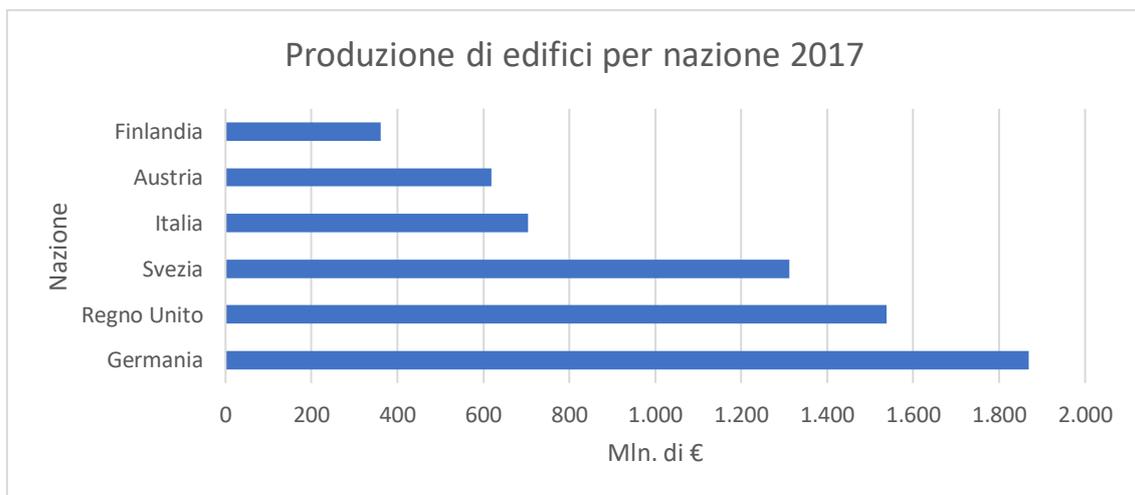


Grafico 1.3 Produzione di edifici prefabbricati in legno nei principali Stati europei. Fonte: Eurostat.

I grafici 1.2 e 1.3 evidenziano come nei paesi del Nord Europa e dell'Europa Continentale il settore della prefabbricazione in legno sia particolarmente florido, lasciando comunque notevoli spiragli alle imprese dei paesi dell'Europa Meridionale tra i quali spicca l'Italia. Quest'ultima presenta un trend di crescita positivo nell'arco temporale considerato. Sebbene i produttori italiani abbiano risentito della contrazione del settore immobiliare sono comunque riusciti a mantenere costanti i livelli di produzione.

Nel grafico successivo si può notare come sia presente un picco significativo nel livello di produzione del 2015 ed una riduzione considerevole l'anno successivo. Tale incremento è facilmente giustificabile dall'EXPO 2015, incentrato su edifici ecosostenibili in cui il legno ha svolto un ruolo da protagonista.

Nonostante la contrazione del 2016, la produzione italiana continua ad essere comunque in linea con la tendenza di mercato.

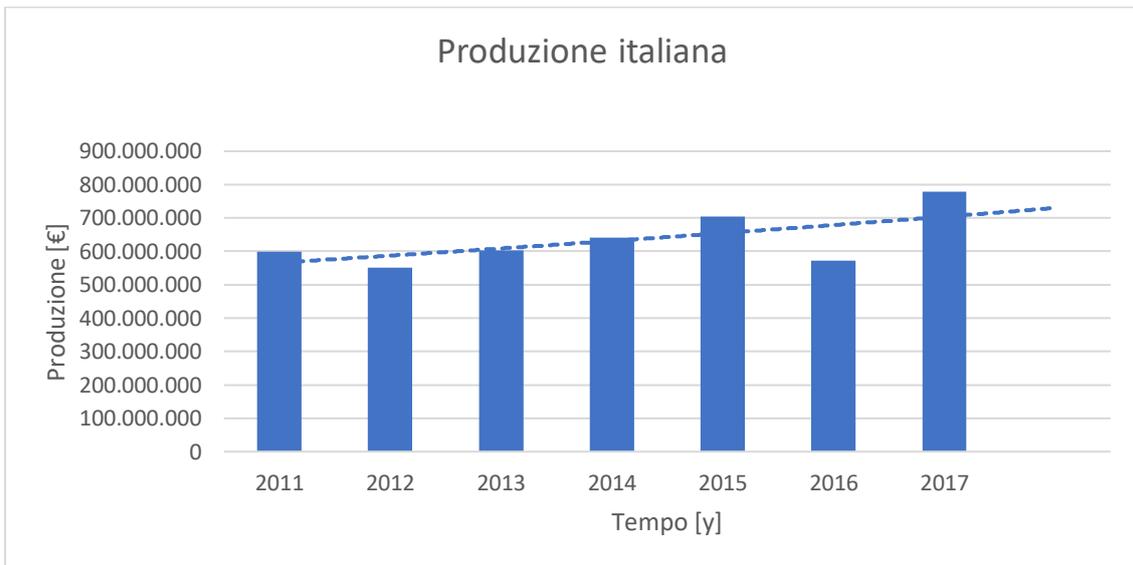


Grafico 1.4 Produzione di edifici prefabbricati in legno in Italia. Fonte: Eurostat.

Per quanto riguarda l'export, a livello europeo, al primo posto si trova l'Estonia con circa 314 milioni di euro. Seguono la Lituania con 145 milioni di euro di export, la Germania con 110 milioni e la Polonia con 95 milioni di euro.

L'Italia si colloca al decimo posto della classifica, vicino a Slovenia e Repubblica Ceca, con 52 milioni di euro.

Di notevole importanza il dato dell'export italiano che supera di gran lunga quello dell'import, che si aggira attorno ai 29 milioni di euro.

Con riferimento al trend dell'export italiano di edifici prefabbricati in legno, si osserva una forte contrazione nel 2014 alla quale è però seguita un'immediata ripresa nel 2015.

Il trend positivo che si è ripetuto nel 2016 e 2017 pone buone prospettive di continuità per i periodi a seguire.



Grafico 1.5 Andamento delle esportazioni in Italia. Fonte: Eurostat.

Dal punto di vista delle importazioni, la Germania è il paese con il valore maggiore: 220 milioni di euro su un totale europeo di circa 690 milioni.

Livelli di notevole interesse si riscontrano in Francia e Svezia al di sopra dei 70 milioni di euro ed il Regno Unito con 50 milioni di euro.

A livello europeo l'Estonia presenta il miglior rapporto import/export, riuscendo a soddisfare pienamente il proprio fabbisogno interno.

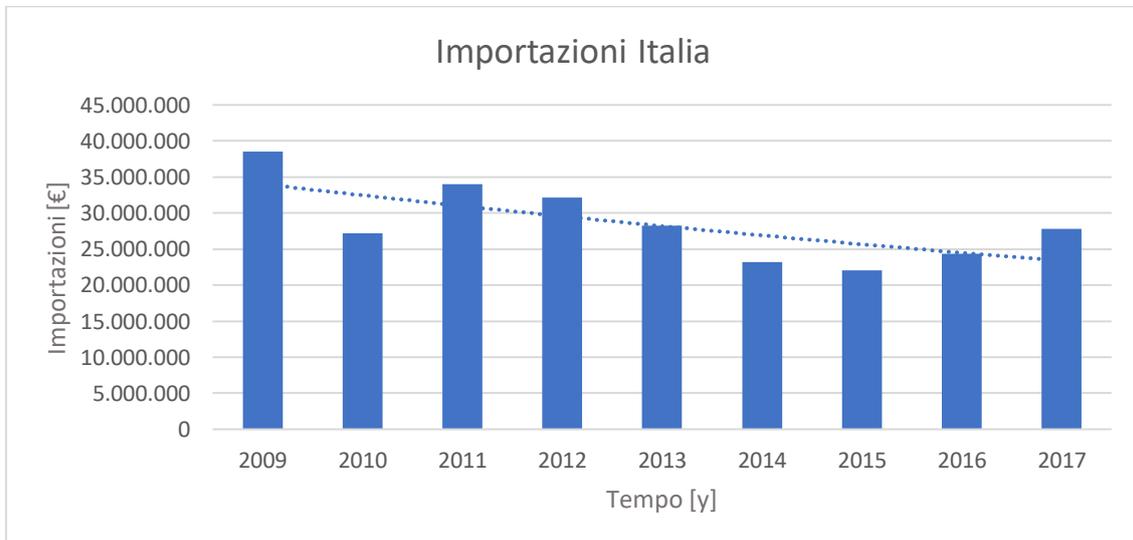


Grafico 1.6 Andamento delle importazioni in Italia. Fonte: Eurostat.

L'Italia presenta un livello medio alto di importazioni, attorno a 35 milioni di euro.

Dal grafico 1.6 è possibile notare come dopo una notevole diminuzione negli anni 2014-2015, il 2017 si sia concluso con un rialzo delle importazioni.

## **3 Le strutture in legno**

### **3.1 Costruzioni intelaiate leggere**

#### **Introduzione alla struttura a telaio leggero**

Le prime strutture a telaio leggero nascono in America nei primi anni del 1800, in quanto i primi coloni, principalmente inglesi, si trovarono di fronte ad una grande abbondanza di alberi di conifere e latifoglie, ed un'esiguità di manodopera.

Per questa ragione sorse la necessità di ottimizzare e semplificare le lavorazioni, rendendo obsolete le metodologie costruttive europee.

Il primo fattore di svolta, fondamentale per questo processo, arriva verso la fine del 1700 con la prima macchina per la costruzione di chiodi di ferro.

La produzione in serie di chiodi a basso costo rivoluziona così il sistema costruttivo, dando un notevole impulso all'edilizia locale.

Bisogna però attendere ancora qualche anno, quando in Nord America nascono le prime segherie meccanizzate in grado di fornire tavole e squadrati in grande quantità.

Con questi due fattori combinati i sistemi tradizionali europei, ad intelaiatura di tronchi squadrati con riempimento di pietre e mattoni, risultano obsoleti ed inadeguati alle condizioni del Nord America.

I grossi tronchi e i loro riempimenti sono presto sostituiti da un'intelaiatura leggera, tamponata esternamente con assiti inchiodati ai montanti, mentre la parte interna da un assito più leggero.

Successivamente viene introdotto un sistema costruttivo composto da montanti, travi e tavole per formare un insieme costruttivo solidale, permettendo così di assottigliare le dimensioni della struttura portante grazie alla collaborazione dei diversi elementi per la stabilità dell'edificio.

Infine, le tavole sono sostituite da compensati strutturali e l'intercapedine riempita con materiali isolanti.

#### **Balloon frame e platform frame**

Grazie alla reperibilità legname e all'evolversi delle tecniche di produzione di chiodi in ferro, nel 1826 nasce un nuovo sistema costruttivo ad ossatura lignea, denominato "balloon frame", il quale elimina tutti gli elementi strutturali molto pesanti e tutte le lavorazioni complesse sostituendoli con elementi sottili e lunghi per tutta l'altezza dell'edificio.

Questo sistema permette ad un solo uomo munito di sega e martello di edificare una struttura a due livelli seguendo un preciso schema di montaggio ed un semplice approccio di esecuzione.

Le aperture rimangono comunque piccole e distanziate per non indebolire eccessivamente la struttura, mentre per l'ancoraggio si utilizzava la canna fumaria dei grossi camini in pietra utilizzati per il riscaldamento invernale.

Il sistema balloon frame impiega quindi montanti aventi l'altezza di due piani, senza interruzioni tra la piattaforma di base al suolo e la trave di gronda.

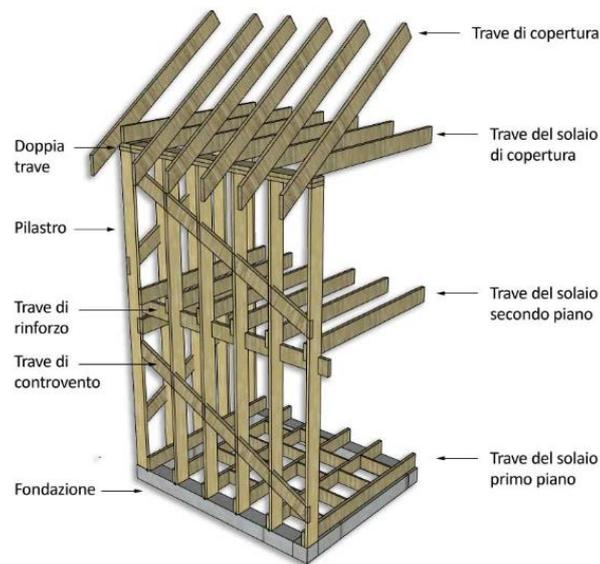


Figura 1.1 Struttura balloon frame

Successivamente viene introdotto un nuovo sistema costruttivo noto come “platform frame”, il quale prevede montanti che si interrompono alla soletta interpiano, che costituisce la piattaforma per la costruzione del secondo piano.

Ad oggi questa metodologia costruttiva è sicuramente la più utilizzata, poiché garantisce anche una maggiore sicurezza in fase di cantiere.

Il concetto alla base di queste strutture prevede che pareti, solai, montanti ed ogni altro componente formino telai strutturali in grado di scaricare a terra tutti gli sforzi, sia quelli verticali che orizzontali, dovuti a vento e sismi.

Tutte le pareti portanti sono costruite con montanti verticali, di sezione e numero definiti dal progetto strutturale, e controventature in compensati fenolici o lastre di OSB<sup>3</sup> di spessore adeguato opportunamente chiodate.

---

<sup>3</sup> OSB: Oriented Strand Board

La stabilizzazione e il controvento rappresentano gli aspetti di progettazione principali di una struttura a telaio leggera, poiché ne determinano il comportamento in caso di carichi trasversali e le relative deformazioni.

Il controventamento si riferisce a tutti i sistemi progettati per contrapporsi ad “azioni esterne”, principalmente orizzontali, che devono essere trasmesse alle fondazioni o ad altre componenti dell’edificio: tra queste le principali sono il vento, il sisma, gli urti, ecc. La stabilizzazione invece definisce l’azione di stabilizzare un singolo elemento strutturale soggetto ad “azioni fittizie”, forze interne agli elementi, come per esempio nelle travi snelle soggette a fenomeni di instabilità flesso-torsionale.

La differenza principale tra strutture ad ossatura portante e strutture intelaiate leggere è che nella prima i carichi sono assorbiti da elementi di tipo lineare, come travi e montanti, mentre nella seconda l’elemento costruttivo è la lastra. Per questo motivo tutti gli elementi portanti sono strettamente interconnessi a quelli di controventatura e stabilizzazione.

Per quanto concerne la copertura è possibile utilizzare due metodologie costruttive: la prima costituita da capriate leggere in legno appoggiate in corrispondenza dei montanti, oppure la seconda costituita da un reticolo di travetti fissati in basso al dormiente superiore della parete e in alto alla trave di colmo.

Tutte le intercapedini della struttura possono essere riempite con materiali isolanti diversi, le cui caratteristiche dipendono dai requisiti prestazionali e di resistenza al fuoco desiderati.

Il dimensionamento strutturale è di competenza del progettista, poiché il sistema di calcolo del carico a neve, di vento e sisma varia notevolmente a seconda della nazione

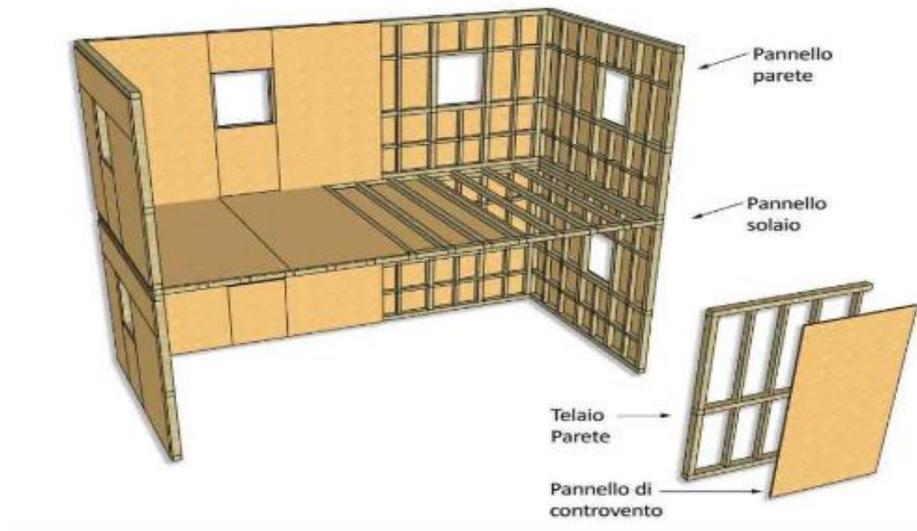


Figura 1.2 Struttura platform frame

## **La struttura a telaio in Europa**

Di norma gli edifici a struttura intelaiata in Europa seguono la modalità platform frame e vengono perciò costruiti piano per piano.

Le pareti portanti sono costruite con un'ossatura portante composta da montanti, posti generalmente a 40-80 cm l'uno dall'altro e collegati da traversi.

Le sezioni dei montanti sono notevolmente superiori rispetto alle strutture del Nord America ed è ancora irrigidito da due pannelli di OSB strutturale, per garantire l'azione di controventatura e tamponamento, opportunamente chiodati.

Un'alternativa ai pannelli di OSB è l'utilizzo di un assito posto a 45°, avvitato o inchiodato.

In un secondo momento vengono applicati alla parete lastre di matrice gessosa o cementizia per la creazione di intercapedini o cavedi adibiti al passaggio degli impianti.

Dal punto di vista strutturale i montanti interni alla parete assorbono tutti i carichi verticali provenienti dalla copertura e dai solai di piano e quelli orizzontali di natura sismica e ventosa.

Il solaio, invece, ridistribuisce tutti i carichi e le forze sismiche sui componenti verticali di controventatura e tamponamento.

Tutte le giunzioni tra pannelli e montanti avvengono tramite avvitatura e per questa ragione la struttura richiede montanti distanziati ad interassi, che di regola non superano i 62,5 cm.

Porte e finestre possono essere inserite in qualsiasi posizione dell'edificio, anche non in linea con il telaio strutturale, ma in tal caso il progettista deve prevedere un rinforzo puntuale della struttura tramite ulteriori montanti e la costruzione di un architrave.

## **3.2 Strutture principali e connessioni**

### **Le fondazioni**

Le fondazioni rappresentano l'elemento più delicato dell'edificio in legno, poiché hanno il ruolo di isolare le pareti dall'umidità che risale dal suolo, dalla pioggia battente e di rimbalzo e dal gas radon.

La presenza del vespaio areato o ventilato diventa quindi essenziale, antepoendo una camera d'aria ventilata al di sotto del solaio contro terra.

Esistono diverse tipologie e modalità di costruzione di un vespaio ma la più usata in questo periodo è la soluzione ad "igloo": moduli quadrati prefabbricati di plastica che vengono ricoperti da un getto di calcestruzzo armato con rete elettrosaldata, uno strato di

caldana cementizia, guaina, isolante termico calpestabile di idoneo spessore, barriera al vapore e radon, massetto e pavimentazione.

Lo spessore dell'isolante è definito in base alla prestazione energetica desiderata ed è necessario tenere in considerazione l'eventuale presenza di un impianto di riscaldamento radiante a pavimento, al fine di garantire un flusso di calore unidirezionale.

Sono predisposte condutture in plastica affogate nei setti murari della fondazione, sia interni che perimetrali, per garantirne il ricircolo dell'aria; il livello di areazione è garantito dalle bocchette di presa, che a loro volta dipendono dalla dimensione della fondazione.

Il ricircolo d'aria nel vespaio avviene per effetto camino e di conseguenza risulta necessario un corretto dimensionamento delle bocchette per garantirne il tiraggio.

La prima fenomenologia, in caso di ridotta o mancata ventilazione, risulta essere la formazione di condensa interstiziale: il raffreddamento della stratigrafia comporta la condensazione dell'aria umida presente all'interno degli igloo.

Esistono soluzioni costruttive per ridurre questo rischio, come effettuare uno scavo di circa 2 m di profondità e 50 cm di larghezza lungo tutto il perimetro della casa e riempirlo di ghiaia.

Un altro fattore fondamentale è la creazione di uno spessore per separare la parete dalla platea. Sono due le soluzioni: la prima è l'utilizzo di una "trave radice", una trave in legno orizzontale su cui appoggiare la parete, oppure la creazione di un cordolo in calcestruzzo armato.

Quest'ultima risulta più sicura dal punto di vista igrometrico in quanto si evita il contatto tra platea e oggetto putrescente.

In Italia non è presente una normativa tecnica specifica riguardante le direttive sulle fondazioni per costruzioni in legno e per questa ragione i progettisti adottano le norme nazionali tedesche DIN<sup>4</sup>.

---

<sup>4</sup> DIN: Deutsche Institut für Normung, un'organizzazione tedesca per la definizione di norme fondata nel 1917.



Figura 1.3 Platea di fondazione con cordolo in C.A.

## Le pareti

La soluzione a telaio presenta una struttura composta da:

- montanti in abete, i quali hanno il ruolo di trasferire alla fondazione il carico del solaio e dei piani sovrastanti;
- traverse disposte sulla base e sulla sommità dell'elemento con il compito di tenere uniti i montanti per irrigidire la struttura;
- pannelli di OSB di tamponamento per garantire la controventatura dell'elemento.

Per quanto riguarda la geometria è definita da dimensioni e distanze regolari, definite principalmente da quelle dei pannelli di rivestimento.

La distanza tra un montante e l'altro è generalmente di 62,5 cm e nello spazio interposto ai montanti viene inserito un pannello in fibra di legno con una larghezza di 60 cm e 16 cm di spessore.

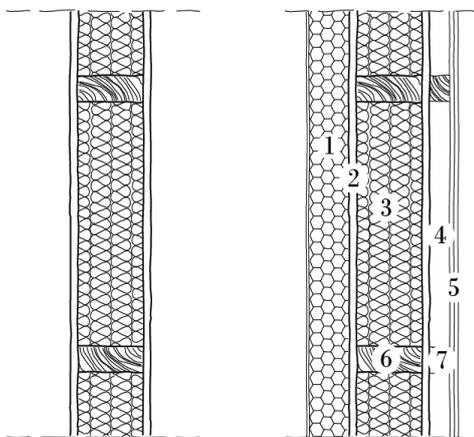
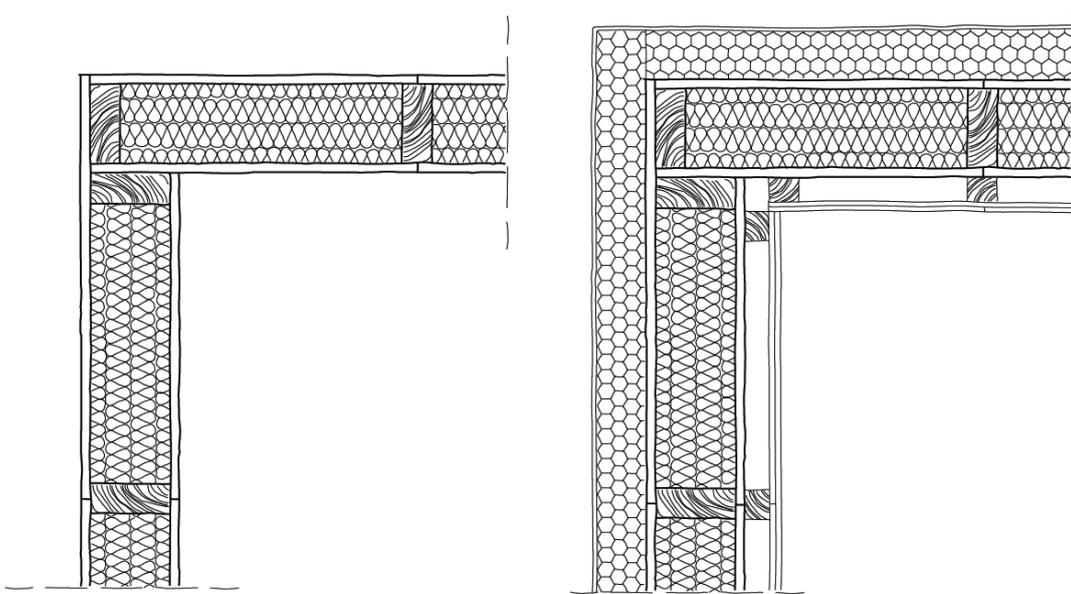


Figura 1.4 Sezioni orizzontali della parete platform-frame

- 1 – Strato isolante del cappotto
- 2 – Pannello controvento OSB
- 3 – Isolante in fibra di legno interposto ai montanti
- 4 – Controparete interna isolata o semplice cavedio impianti
- 5 – Pannello cartongesso o fibrogesso rinforzato
- 6 – Montante portante in abete 60 x 160 mm
- 7 – Montante per pannello in cartongesso 50 x 50 mm



*Figura 1.5 Sezione orizzontale angolo platform-frame e sezione angolo platform-frame completa di cappotto e cartongesso*

Tutti gli elementi sono fissati tramite viti autofilettanti in grado di generarsi autonomamente il foro ed evitare fessurazioni che comprometterebbero l'integrità e la tenuta all'aria dell'elemento.

### **Le aperture**

Porte e finestre possono essere inserite in qualsiasi posizione, anche non allineate al reticolo strutturale generato dai montanti, con al massimo un ridimensionamento strutturale di quelli laterali.

Si tratta di un notevole vantaggio per la committenza in fase progettuale, che genera però un maggiore numero di elementi "speciali" che dovranno essere tagliati e montati preventivamente in fase di progettazione.

Ogni serramento è composto da una parte opaca e da una trasparente: la prima è composta da un telaio fisso e uno mobile, la seconda da un vetro a doppia o tripla camera in base alla prestazione energetica richiesta.

In alcune situazioni è possibile escludere la presenza del contro-telaio fissando direttamente il serramento alla struttura della parete portante.

Un dettaglio fondamentale del nodo serramento-parete è la cura dell'accoppiamento tra i due elementi, al fine di garantire la miglior prestazione.

Si rende quindi necessario l'utilizzo di:

- Nastri tra gli elementi della parete ed il serramento per garantire la tenuta all'aria.
- Guarnizioni comprimibili tra telaio fisso e contro-telaio, le quali vengono compresse durante la fase di avvitaratura aderendo agli elementi connessi e ne garantisce la tenuta all'aria.
- Risvolto dell'isolante della parete a contatto con il telaio fisso del serramento per garantire la continuità termica.

Una volta montati tutti i serramenti e completato l'involucro, è consigliato un test per la verifica della corretta costruzione che monitori le dispersioni calore e il passaggio dell'aria tramite il Blower-Door-Test e l'ausilio di una telecamera termica.

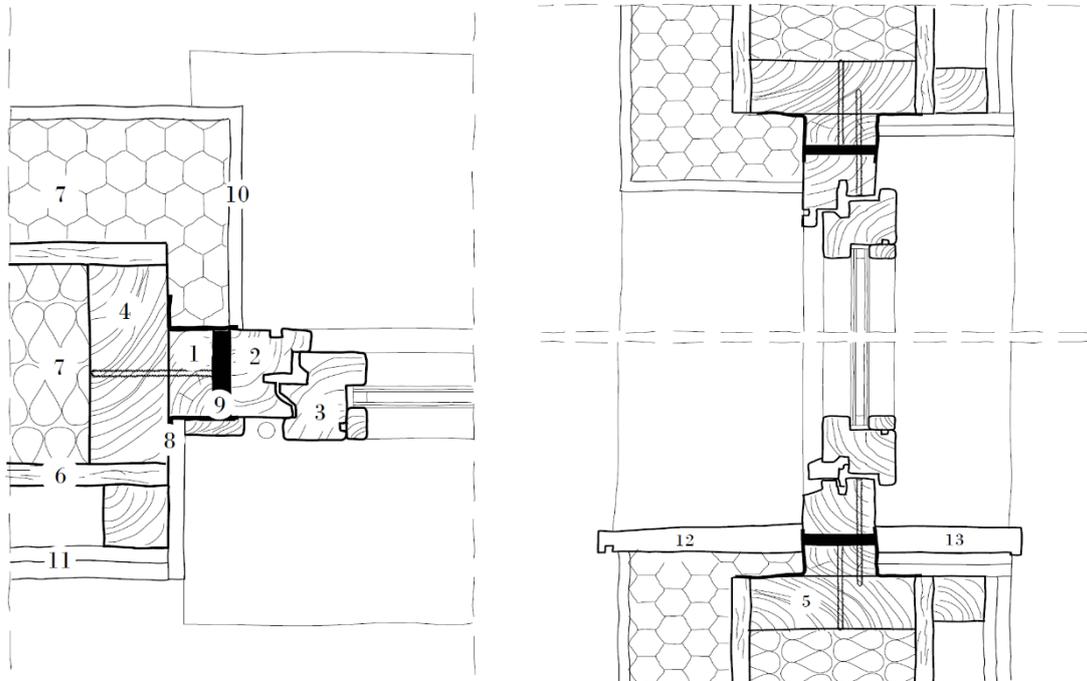


Figura 1.6 Sezione orizzontale e verticale del serramento

- |                                |                                   |
|--------------------------------|-----------------------------------|
| 1 – Contro-telaio              | 8 – Nastro di tenuta all'aria     |
| 2 – Telaio fisso               | 9 – Guarnizione sigillante        |
| 3 – Telaio mobile              | 10 – Intonaco                     |
| 4 – Montante della parete      | 11 – Doppia lastra di cartongesso |
| 5 – Traversa della parete      | 12 – Davanzale interno            |
| 6 – Pannello di OSB            | 13 – Davanzale esterno            |
| 7 – Isolante in fibra di legno |                                   |

## Il solaio

Il solaio rappresenta la struttura piana orizzontale a copertura e costituisce il sostegno per le pareti dei piani superiori.

Anche in questo caso, come per le pareti, i sistemi costruttivi principalmente usati sono due: quello con uno scheletro composto da travi che consentono l'appoggio di un piano, solitamente creato con perline in legno, o quello basato su una soluzione analoga alla parete, ma ribaltata.

Tutti gli elementi sono progettati in funzione della posizione all'interno dell'edificio, che ne definisce lo sforzo a cui vengono sottoposti e di conseguenza la dimensione.

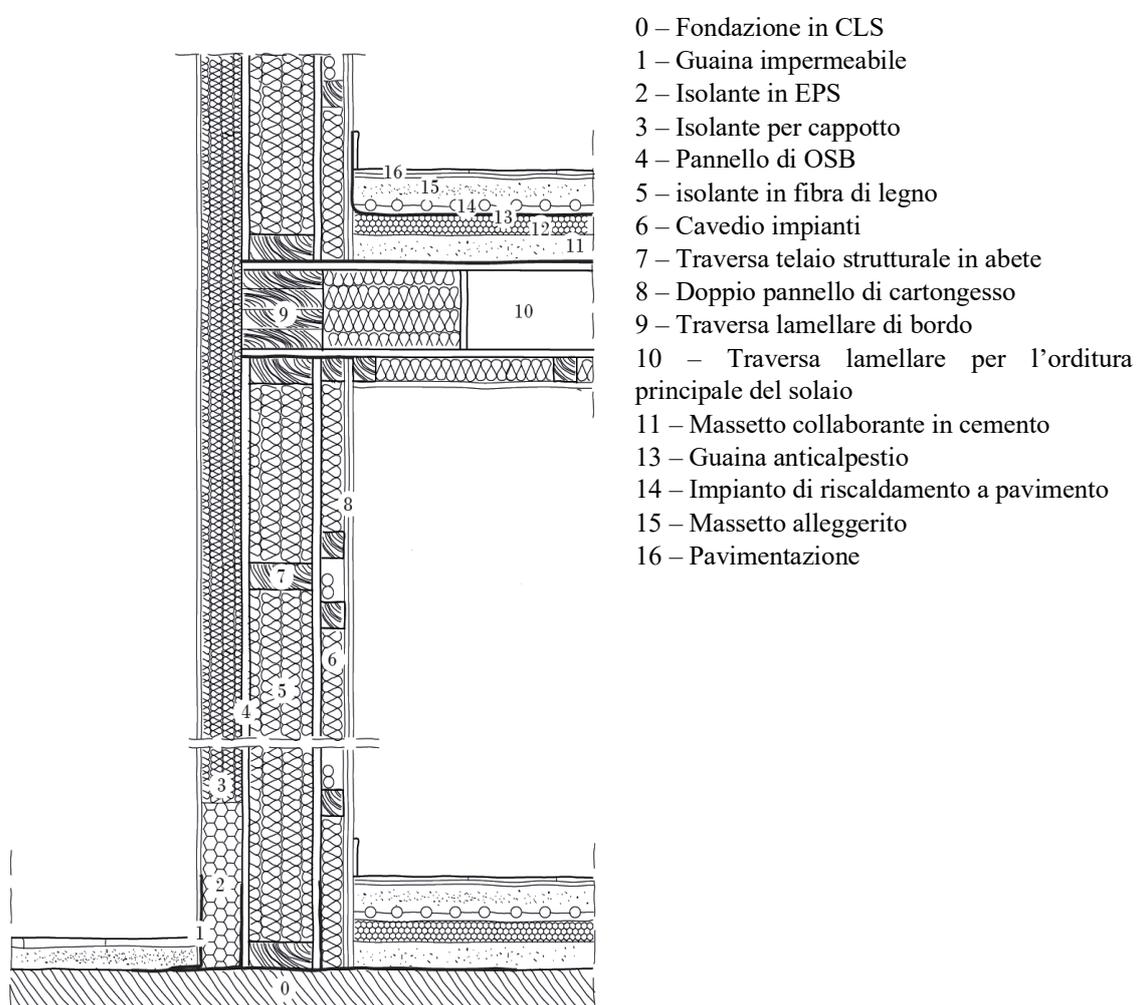


Figura 1.7 Sezione verticale nodo parete esterna e solaio

## La copertura

Le componenti della copertura hanno il ruolo di rendere la struttura in grado di trasmettere i carichi verticali alle pareti del perimetro.

Il tetto è composto da diverse travi portanti che sostengono tutti i componenti sovrastanti e la stratigrafia della copertura.

L'orditura del tetto è composta dai seguenti elementi:

- la trave di colmo, posta in sommità alla copertura, ha il ruolo di sostenere i puntoni;
- i puntoni ripartiscono i carichi sul perimetro della struttura e alla trave di colmo;
- i cantonali ripartiscono anch'essi i carichi sul perimetro della struttura e alla trave di colmo, ma sono posti in corrispondenza del displuvio;
- i travicelli, elementi di sezione inferiore rispetto al puntone e posizionati perpendicolarmente a questi ultimi;
- i travetti, posti sopra le terzere hanno la funzione di creare la base su cui poggiare le tegole;
- i listelli hanno la funzione di fissaggio elementi che compongono la copertura;
- i passafuori, elementi legati al falso puntone con il compito di sostenere lo sporto della copertura;
- i dormienti rappresentano la base di appoggio dei falsi puntoni;
- le controcatene legano i falsi puntoni e sono disposti sotto la trave di colmo.

Per garantire la continuità della struttura è necessaria l'adozione di una banchina per unire la parete verticale alla copertura e garantire la corretta distribuzione dei carichi.

Tutti gli elementi sono fissati tramite squadre per resistere agli sforzi di taglio e hold down a quelli di trazione.

Dal punto di vista geometrico le coperture possono avere uno sviluppo ad una o più falde inclinate, in funzione delle direttive tecniche della zona. La loro progettazione unisce diversi aspetti: tecnologici, energetici, strutturali ed estetici.

Un ruolo fondamentale nella copertura lo possiede la ventilazione, soprattutto durante il periodo estivo, aiutando a trasportare il calore verso l'alto tramite l'effetto camino.

Lo strato isolante adiacente alla camera di ventilazione ha invece il ruolo di isolare durante l'inverno, limitando quindi le dispersioni di calore e respingendo quello dovuto all'incidenza dei raggi solari nella stagione estiva.

Tuttavia, esistono due metodologie costruttive per le coperture: la prima, detta anche *tetto caldo*, non prevede l'utilizzo della camera ventilata e l'uso di una barriera al vapore ed è utilizzata principalmente in ambito industriale con tetti poco inclinati, la seconda, o a *tetto freddo*, prevede l'utilizzo della camera di ventilazione e di conseguenza viene impiegato un telo di freno al vapore che permette una traspirazione maggiore della copertura e il passaggio di vapore tra i vari strati.



Figura 1.8 Vista interna dell'orditura della copertura in un cantiere di proprietà VASS Technologies

### **Sistemi di connessione e viti**

Nella struttura in legno le connessioni sono di tipo:

- parete/parete;
- parete/fondazione;
- parete/solaio/parete;
- solaio/solaio;

Si tratta di connessioni metalliche orizzontali o verticali, comprese quelle che legano la struttura alle fondazioni escludendone il ribaltamento e lo scorrimento.

La caratteristica fondamentale risulta essere la capacità dissipativa in seguito a numerosi cicli di carico, che a sua volta è funzione delle caratteristiche meccaniche dei materiali e della configurazione geometrica.

Questo comportamento dissipativo si basa su due fenomeni principali: il rifollamento del legno e la plasticizzazione dei connettori metallici.

La resistenza al rifollamento è una proprietà della plasticizzazione della vite, la quale una volta giunta allo sforzo limite cede determinando il rifollamento della trave attorno al foro di alloggiamento. Questa è funzione anche della specie legnosa che compone l'elemento oltre che del tipo di vite.

La scelta e la definizione delle connessioni e delle differenti metodologie di giunzione vanno di pari passo con una corretta progettazione antisismica della struttura, in modo tale da garantire deformazioni anelastiche in contrapposizione alle forze del vento e del sisma.

Gli hold down e le staffe metalliche rappresentano gli elementi di giunzione maggiormente utilizzati per garantire una corretta connessione tra le diverse parti della struttura.

Il primo è un sistema di ancoraggio finalizzato alla contrapposizione delle forze di trazione agenti nella direzione del suo stesso asse, che agiscono su tutta la lunghezza del lato inferiore della parete, con il punto critico localizzato negli angoli.

Per questo motivo gli hold down vengono fissati in prossimità delle zone più deboli, come in prossimità delle aperture.

Gli elementi possono essere singoli, accoppiati oppure contrapposti, ma in quest'ultima situazione è presente una barra filettata di collegamento.

Le staffe metalliche, invece, hanno il ruolo di contrastare le spinte orizzontali prevenendo lo scorrimento della struttura e sono distribuite con regolarità lungo tutta la parte inferiore. A differenza dell'hold down, il quale si avvita direttamente al montante, esse sono fissate alla traversa base della parete.



*Figura 1.9 Staffe metalliche per la connessione tra parete e cordolo in C.A.*

Ad oggi le viti sono appositamente studiate e progettate per garantire le prestazioni richieste e sopperire alle necessità di cantiere.

Sulla punta è stata inserita una piccola fresa in grado di praticare un foro di invito alla penetrazione della filettatura per diminuire le tensioni nel materiale. Sulla testa è poi inserito un estrattore meccanico per la rimozione del truciolo prodotto durante l'avvitamento.

Esiste un tipo di vite differente a seconda della lavorazione o destinazione d'uso richiesta, che deve sempre garantire un grado di duttilità adeguato.

Oltre alle viti le connessioni metalliche possono essere applicate tramite chiodatura, utilizzando appositi chiodi ANKER e considerando che anche il numero di chiodi utilizzati è determinato da software progettuali.

### **3.3 Gli elementi costruttivi principali**

#### **3.3.1 Elementi strutturali**

##### Legno massiccio da costruzione con giunti a pettine (KVH)

Si tratta di un legname squadrato, seccato artificialmente e successivamente piallato per un perfezionamento della squadratura.

Le giunzioni a pettine sono necessarie per l'ottenimento di elementi più lunghi e vengono, di conseguenza, effettuate longitudinalmente.

La tipologia di taglio viene definita “cuore spaccato” o “fuori taglio” e ne garantisce una maggiore stabilità dimensionale e minore possibilità di fessurazione.

La zona adibita alla giunzione viene fresata a pettine, utilizzando lo stesso profilo per garantirne un incastro perfetto e successivamente fissata tramite incollaggio.

Questi elementi sono sottoposti a controlli di qualità sia dal produttore che da un istituto esterno.

Sono componenti edilizi che possono raggiungere anche notevoli lunghezze, fino ai 18 m con sezioni standard o preferenziali.

#### Legno lamellare incollato

Manufatto ottenuto dall'incollaggio di lamelle, generalmente appartenenti alla stessa specie legnosa, parallelamente alla fibra. La conifera, come abete rosso o bianco, pino e larice rappresenta la specie più comune, ma si possono utilizzare anche legni di latifoglie come faggio, frassino oppure quercia.

Come tutti i legni lamellari la laminazione può avvenire sia in orizzontale che in verticale e la normativa di legge li distingue in sezioni omogenee e combinate: nella prima la classe di resistenza e specie legnosa sono uguali, nella seconda sono differenti.

Tutte le caratteristiche fisiche e meccaniche dipendono dalla qualità del giunto a pettine e dalla disposizione delle lamelle all'interno dell'elemento finito.

#### Travi Duo e Trio

Manufatti costituiti da due o tre elementi legnosi squadrati ed incollati su di un lato. Il singolo elemento, prima di venire incollato, viene sottoposto ad essiccazione e classificazione sulla base della sua resistenza e al suo interno presenta giunzioni a pettine. Sono elementi strutturali utilizzati principalmente per la realizzazione di solai, con la condizione però che non siano esposti ad agenti atmosferici.

### **3.3.2 Elementi piani composti da fibre di legno**

Si tratta di elementi ricavati tramite il processo di sfibratura direttamente dal legno grezzo. Il legame del pannello è garantito direttamente dall'azione coesiva delle sostanze interne al legno e all'intreccio delle fibre. È comunque possibile l'aggiunta di miscele collanti, sia naturali che artificiali, per aumentarne la coesione.

Vengono classificati in pannelli per via umida e pannelli per via secca in funzione del loro contenuto di umidità durante il processo produttivo.

### Pannelli in fibra di legno duri e medio duri

Sono pannelli generati attraverso miscele di fibra compattate, essiccate e pressate ad alta temperatura.

Sono utilizzati principalmente come tamponamenti oppure come materiali isolanti, ma non possono essere utilizzati come materiale da comportamento membranale, ovvero sollecitate nel proprio piano medio, a causa della scarsa resistenza meccanica.

I pannelli a media densità garantiscono una maggiore traspirabilità rispetto agli altri, grazie ad una maggiore presenza di paraffina, una diversa composizione delle fibre ed una minore massa volumica dovuta a pressatura modificata.

### **3.3.3 Pannelli truciolari**

Elementi prodotti dalla pressatura a caldo di particelle di legno, trucioli da pialla, trucioli da segatura, strand e altri piccoli scarti di lavorazione e miscelati con colla.

Si classificano in funzione delle dimensioni e della forma delle particelle di cui sono composti.

### Pannello di OSB

L'OSB (Oriented Strand Board) rappresenta l'elemento più comune in ambito edile per questa categoria.

Si tratta di un pannello di legno formato da tre strati a struttura simmetrica composto principalmente da trucioli piatti.

L'orientamento delle particelle avviene parallelamente alla direzione di produzione, mentre quelle più interne sono disposte in maniera casuale e sono più sottili e con dimensioni differenti tra loro.

L'alto grado di stabilità e di resistenza al taglio del pannello è garantito dalla struttura a tre strati perpendicolari tra di loro.

Il suo utilizzo principale è il tamponamento in strutture leggere e a telaio. Ne esistono di diverso spessore, quello standard è 18 mm ed è in grado di garantire anche un'azione di controventatura per pareti portanti a telaio.

### **3.3.4 Le guaine**

La condensa rappresenta la problematica maggiore per questa tipologia di costruzione ed è strettamente legata all'aspetto termico.

Il vapore, sempre presente nell'aria, si trasforma in condensa quando viene a contatto con una superficie fredda.

Per limitare la quantità di vapore nell'elemento legnoso e di conseguenza l'assorbimento nelle pareti, solaio e copertura, si applica una guaina di freno al vapore nel lato interno dell'elemento.

### **Guaine traspiranti/impermeabili**

Sono elementi utilizzati principalmente nelle coperture, come primo manto della stratigrafia; si tratta di tessuti microforati che permettono la fuoriuscita del vapore ma impediscono l'ingresso della molecola d'acqua, poiché di dimensione maggiore rispetto al foro.

### **Barriera al vapore**

Si tratta di una membrana che impedisce totalmente il passaggio del vapore, solitamente composta da materiale bituminoso oppure da un foglio di polietilene alluminizzato.

Di conseguenza si crea un accumulo di acqua sulla superficie che deve essere smaltita tramite ventilazione, naturale se ci si trova sul lato esterno, forzata su quello interno.

### **Membrane traspiranti**

Queste membrane presentano una resistenza al passaggio di vapore molto modesta, e vengono utilizzate principalmente in ambienti molto umidi.

Tuttavia, l'utilizzo di questa membrana associato ad un livello di umidità elevato comporta un accumulo eccessivo di condensa, la quale deve comunque essere asportata tramite ventilazione.

## **3.4 Trasporto e sollevamento delle componenti prefabbricate**

Il trasporto, inerente quindi alla movimentazione delle componenti grezze dell'involucro dal sito di produzione al luogo del cantiere, prevede uno studio ed una pianificazione molto dettagliata.

Innanzitutto, è necessaria una valutazione del sito per verificarne la morfologia e l'accessibilità dei mezzi.

Dalla fabbrica le pareti e gli altri componenti vengono trasportati su un bilico adibito al trasporto di tali manufatti fino all'area di smistamento, la quale può essere un magazzino o addirittura il sito del cantiere stesso nel caso in cui le dimensioni ne permettano l'ingresso.

Solitamente, se l'edificio non è eccessivamente elevato (non superiore a due piani), è possibile utilizzare semplicemente un camion gru per la movimentazione ed il posizionamento delle pareti in loco, senza la necessità di utilizzare una gru ancorata a terra, la quale farebbe aumentare i tempi e i costi di posa.

In caso di siti impervi, quali località montane, è possibile il trasporto delle componenti tramite elicottero.



*Figura 1.10 Fase di movimentazione e collocamento di una parete portante tramite camion-gru all'interno di un cantiere VASS Technologies*

Un altro fattore da tenere in considerazione durante la fase progettuale della struttura e inerente alla movimentazione riguarda le sollecitazioni a cui sono sottoposti gli elementi durante il trasporto.

Per questo motivo vengono utilizzate funi, cinghie e ganci in modo da scaricare tutte le forze sulle componenti portanti dell'elemento, le quali sono in grado di resistere alle sollecitazioni.

Per quanto riguarda il trasporto non esistono metodologie standard di ancoraggio, ma solitamente vengono usate piattaforme di carico con montante centrale, così da permettere il trasporto delle pareti in posizione verticale e le coperture in orizzontale.

## 4 Le caratteristiche prestazionali

È ormai noto come la progettazione energetica debba andare di pari passo con la progettazione architettonica ed impiantistica, poiché da questa sinergia dipende la sensazione di benessere relativa al comfort recepita dall'utente finale.

È necessario quindi intersecare la progettazione geometrica dell'edificio con la scelta dei diversi tipi di materiale coibente, senza mai trascurare l'aspetto impiantistico, per garantire un alto livello di comfort sia termico che acustico, che ad oggi si dimostra come una caratteristica irrinunciabile e regolato da leggi specifiche.

### 4.1 Comportamento termico dell'edificio

Si tratta dell'aspetto forse più conosciuto tra quelli che caratterizzano l'edificio, anche se tuttora la normativa italiana presenta alcune lacune in merito.

Per questa ragione è possibile, infatti, che una corretta progettazione rispettosa delle norme vigenti in ambito nazionale riguardanti il risparmio energetico, porti alla realizzazione di strutture con prestazioni conformi ai parametri vigenti per quanto riguarda le prestazioni invernali, mentre i vantaggi durante il periodo estivo risultano essere minimi.

Al contrario, è possibile in alcuni casi avere delle spese per il raffrescamento addirittura superiori a quelle di riscaldamento.

Questo fatto è dovuto anche alla varietà di climi a cui è soggetta la penisola italiana, passando da climi freddi nelle regioni del nord a quelli caldi e secchi del sud. Bisogna considerare, inoltre la presenza di zone con elevate escursioni termiche, rilevanti durante la progettazione.

Ad oggi la normativa nazionale, tramite i D.Lgs. 192/05 e 311/2006, prevede per ciascuna delle sei zone climatiche tre valori limite: uno per l'indice annuo di prestazione energetica riguardante il solo riscaldamento invernale (EPI), uno di trasmittanza termica per le singole componenti dell'involucro, comprendenti strutture verticali e orizzontali opache e uno di "ponte termico".

Tuttavia, la legislazione vigente non prende in considerazione le condizioni estive se non in modo vago e comunque non esaustivo.

Per la valutazione del comportamento termico sono fondamentali tre grandezze: la conducibilità termica  $\lambda$ , la resistenza termica R e la trasmittanza termica U.

### La conducibilità termica

La conducibilità o conduttività termica, unità di misura [W/mK], è una proprietà specifica del materiale, utilizzata per caratterizzare il trasporto di calore stazionario.

La conduttività termica descrive il trasporto di energia sotto forma di calore attraverso un corpo come risultato di un gradiente di temperatura e dipende solamente dalla natura del materiale e non dalla forma.

$$\lambda(T) = \rho(T) \cdot c_p(T) \cdot a(T)$$

Dove:

a: diffusività termica del materiale [m<sup>2</sup>/s]

$\rho$ : densità del materiale [kg/m<sup>3</sup>]

C<sub>p</sub>: calore specifico [J/kgK].

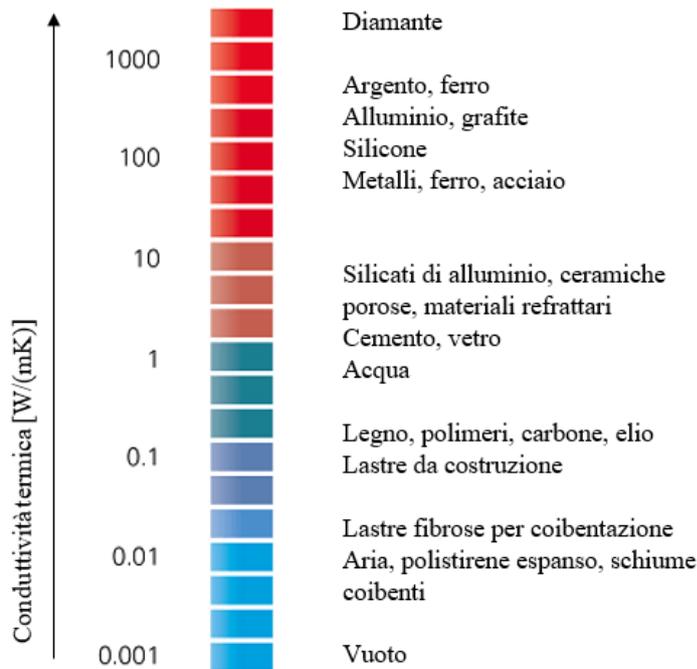


Figura 1.11 Riepilogo valori di conduttività termica nei principali materiali

### **La resistenza termica**

La resistenza termica di una parete, unità di misura [ $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ ], rappresenta l'opposizione che offre un determinato materiale al passaggio di calore.

$$R = s/\lambda$$

Dove

s: spessore dello strato

La formula sopra indicata è valida per il calcolo della resistenza di un materiale monostrato, nel caso di più strati è necessario sommare le resistenze dei diversi strati:

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$

### **La trasmittanza termica**

La trasmittanza termica  $U$  è il parametro principale per la valutazione delle dispersioni termiche attraverso l'involucro di un edificio. La *trasmittanza termica* rappresenta il flusso di calore che attraversa una superficie unitaria sottoposta a differenza di temperatura pari a  $1^\circ\text{C}$ . L'unità di misura è [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ]. La norma di riferimento per il calcolo della trasmittanza termica e della resistenza termica è la UNI EN ISO 6946.

La trasmittanza termica non è una caratteristica del materiale, ma bensì una caratteristica dell'intero elemento costruttivo in esame, comprensivo di tutti i suoi materiali ed i relativi spessori.

Un valore ridotto di trasmittanza termica garantisce un minor scambio di calore con l'esterno attraverso la parete sia durante il periodo estivo che in quello invernale e di conseguenza una maggiore capacità isolante del componente.

La trasmittanza termica, come si è potuto notare, è legata anche alle caratteristiche dei singoli materiali che compongono la stratigrafia e alle condizioni di scambio termico liminare tra parete lato caldo e parete lato freddo.

### **La prestazione invernale e quella estiva**

Ma come si può definire un corretto pacchetto isolante?

Innanzitutto, è necessario distinguere la prestazione invernale ed estiva.

Nella prima situazione la qualità principale dell'involucro rappresenta la capacità di garantire che il calore presente all'interno dell'edificio non si disperda attraverso le superfici perimetrali.

Per questa ragione risulta necessaria una corretta coibentazione delle superfici che compongono l'involucro edilizio: pareti, copertura e solaio.

Durante la stagione invernale il ruolo del coibente risulta ostacolare il flusso termico dall'interno dell'edificio, che tende a migrare verso l'esterno.

La normativa nazionale, attraverso il D.Lgs. 311, riporta i valori massimi di trasmittanza per ogni singolo componente in funzione della zona climatica di appartenenza, ed è a cura del singolo progettista comporre una stratigrafia il cui valore di U sia minore dei limiti di legge.

La prestazione estiva, per quanto riguarda gli edifici residenziali di altezze contenute (fino a tre piani), è rappresentata principalmente dalle caratteristiche della copertura, la quale è la componente di maggior impatto in questa situazione.

La copertura rappresenta, infatti, la superficie maggiormente esposta all'irraggiamento solare e di conseguenza l'elemento più critico in fase di raffrescamento.

I parametri principali sono lo sfasamento e la massa superficiale.

Non sempre un buon isolamento garantisce una buona protezione dal "caldo estivo", soprattutto nelle strutture leggere come per esempio quelle in legno.

Durante il giorno la copertura può raggiungere temperature considerevoli, fino a 80-85°C, e di conseguenza tende a trasmettere parte del calore all'interno dell'edificio mediante tre fenomeni: conduzione, convezione ed irraggiamento.

La combinazione dei tre fenomeni può portare ad una diminuzione del comfort abitativo, portandolo a livelli inaccettabili e obbligando l'utente a ricorrere ai condizionatori d'aria. Tuttavia, attraverso qualche accorgimento durante la progettazione della stratigrafia della copertura è possibile ottenere buone prestazioni anche in questa stagione.

Un ruolo rilevante è attribuito all'inerzia termica della struttura, intesa come la capacità dei materiali coibenti di governare nel tempo le pulsazioni del flusso termico entrante.

A tale proposito è necessario introdurre il concetto di sfasamento termico temporale di una struttura, inteso come il tempo che il calore impiega per arrivare dall'esterno dell'edificio, attraverso la copertura e le pareti, all'interno dell'edificio e viene misurato in ore.

### **Il ponte termico**

L'ultimo fattore riguardante il comportamento termico dell'edificio riguarda le discontinuità di isolamento termico che si possono verificare in prossimità di giunzioni, cambiamenti di materiale, angoli della geometria e aperture di infissi.

Per ponte termico si intende una zona delimitata da una concentrazione di flusso termico superiore a quello delle superfici circostanti.

Sovente i ponti termici possono essere il risultato di errori durante la foratura dell'involucro per il posizionamento delle tubature oppure di montaggi approssimativi dei serramenti.

La conseguenza principale dei ponti termici è rappresentata da un abbassamento localizzato della temperatura interna e dalla conseguente possibile formazione di umidità interstiziale e perfino di condensa.

È necessaria, quindi, una progettazione accurata dell'isolamento, analizzando nel dettaglio con l'ausilio di software di simulazione, tutte le situazioni "critiche" dell'involucro.

### Parametri dell'involucro

Le seguenti tabelle riportano i valori delle trasmittanze di riferimento delle strutture, comprensive di incidenza del ponte termico, divise per data di entrata in vigore come indicato nell'All.1 del DM 26/6/15.

Valori di trasmittanza termica in vigore dal 1° ottobre 2015

Zona climatica	Strutture opache verticali	Strutture opache orizzontali e inclinate		Chiusure trasparenti
		Copertura	Pavimento	
A	0,45	0,38	0,46	3,20
B	0,45	0,38	0,46	3,20
C	0,38	0,36	0,40	2,40
D	0,34	0,30	0,32	2,00
E	0,30	0,25	0,30	1,80
F	0,28	0,23	0,28	1,50

Tabella 1.1 Valori delle trasmittanze di riferimento secondo Appendice A dell'All.1 del DM 26/6/15

Valori di trasmittanza termica in vigore dal 1° gennaio 2019/2021

Zona climatica	Strutture opache verticali	Strutture opache orizzontali e inclinate		Chiusure trasparenti
		Copertura	Pavimento	
A	0,43	0,35	0,44	3,00
B	0,43	0,35	0,44	3,00
C	0,34	0,33	0,38	2,20
D	0,29	0,26	0,29	1,80
E	0,26	0,22	0,26	1,40
F	0,24	0,20	0,24	1,10

Tabella 1.2 Valori delle trasmittanze di riferimento secondo Appendice A dell'All.1 del DM26/6/15

La tabella 1.2 presenta due date di entrata in vigore: la prima nel 2019 valida per gli edifici pubblici, mentre la seconda nel 2021, per tutti gli altri edifici.

### **4.1.1 Le soluzioni tecniche**

È fondamentale curare in tutti i suoi dettagli l'involucro per massimizzarne l'efficienza. L'isolamento, gli elementi di tenuta all'aria e all'acqua, la prevenzione dei ponti termici sono aspetti primari per la realizzazione di un edificio a energia quasi zero.

Le principali tecniche di isolamento dall'esterno sono due: il cappotto termico e la facciata ventilata.

#### **Cappotto termico**

Il cappotto termico, anche noto con la sigla ETICS (External Thermal Insulation Composite System), rappresenta la tecnica più utilizzata sia per le nuove costruzioni che per le riqualificazioni.

Permette infatti di sfruttare al meglio l'inerzia termica delle pareti e di correggere eventuali ponti termici.

Solitamente negli edifici in legno si predilige la posa "a secco" del cappotto termico, in quanto risulta semplice l'applicazione delle strutture metalliche nelle quali alloggiare gli strati isolanti.

È necessario utilizzare pannelli isolanti, preferibilmente in lana naturale o in fibra di legno, con superfici regolari e adeguate caratteristiche di resistenza meccanica e con un buon comportamento in caso di contatto con l'acqua.

Sia per i polistireni che per le lane minerali esistono due norme armonizzate, la EN 13499 e la EN 13500, che ne attestano l'idoneità nei sistemi a cappotto.

Per coprire e proteggere lo strato coibente vengono applicate lastre di cemento fissate direttamente alla struttura metallica del sistema a cappotto, nel caso di posa "a secco", oppure viene applicata una rasatura armata per proteggere l'isolante da agenti atmosferici e dall'irraggiamento. All'interno di questo strato viene annegata una rete di armatura che conferisce resistenza ad urti e movimenti dovuti a escursioni termiche o fenomeni di ritiro. Questa soluzione è utilizzata nel caso di posa tradizionale con il cappotto incollato o ancorato alla parete senza l'utilizzo dell'intelaiatura metallica.

#### **La facciata ventilata**

La facciata ventilata è definita nella norma UNI 11018 come "un tipo di facciata a schermo avanzato in cui l'intercapedine tra il rivestimento e la parete è progettata in modo tale che l'aria in essa presente possa fluire per effetto camino in modo naturale o in modo artificialmente controllato, a seconda delle necessità stagionali o giornaliere, al fine di migliorarne le prestazioni energetiche complessive".

Essa prevede l'applicazione a secco mediante staffe ed ancoraggi, sulla superficie esterna dell'edificio, del rivestimento esterno di finitura. In tal modo si crea un'intercapedine nella quale si ha il moto convettivo dell'aria dato dalla presenza di aperture, disposte alla base e alla sommità della facciata.

Originariamente questa scelta costruttiva era legata all'esigenza di proteggere la parete dalla pioggia battente e dall'ingresso dell'acqua. Oggi è una soluzione innovativa molto apprezzata dai progettisti perché consente totale libertà di espressione architettonica e stilistica mantenendo comunque un ruolo chiave riguardo l'aspetto energetico, superando limiti del cappotto termico.

L'intercapedine rappresenta una separazione fisica del rivestimento dall'isolante, permettendo la scelta di materiali magari incompatibili tra loro dal punto di vista delle variazioni dimensionali.

Si suddivide in quattro strati funzionali, così definiti dall'esterno verso l'interno:



- 1- rivestimento esterno;
- 2- sottostruttura metallica, generalmente in alluminio o in acciaio inox, di supporto al rivestimento;
- 3- intercapedine di ventilazione;
- 4- strato isolante, eventualmente protetto da una membrana traspirante al vapore ed impermeabili all'acqua.

Figura 1.12 Schema di una parete in legno con facciata ventilata

Le facciate ventilate si dividono in *microventilate* e *ventilate* a seconda della tipologia di intercapedine.

I sistemi microventilati non sono dotati di griglie di immissione ed espulsione dell'aria, quindi la circolazione di quest'ultima risulta limitata e dipende solamente dall'area libera dei giunti verticali e orizzontali del rivestimento.

Nelle pareti ventilate la portata dipende dalle dimensioni delle griglie di apertura ed espulsione dell'aria stessa. Si dividono in debolmente ventilate e fortemente ventilate in relazione al rapporto tra l'area delle aperture superiori ed inferiori e la lunghezza delle pareti.

I vantaggi della facciata ventilata sono molteplici, sia in campo termico che acustico.

Dal punto di vista termico migliora il comportamento estivo della struttura riducendo i carichi termici della struttura grazie all'effetto della ventilazione; da quello acustico l'intero sistema è assimilabile ad una "trappola acustica", nella quale l'onda incidente viene in parte riflessa dal rivestimento e in parte smorzata dalle lastre. Un'ulteriore dissipazione di energia si ha attraverso l'intercapedine e l'isolante fibroso.

## 4.2 Isolamento acustico

L'udito umano è in grado di percepire suoni prodotti da vibrazioni di corpi elastici con frequenza comprese tra i 16 e i 20000 Hz.

Al di sotto di questo range si trovano gli infrasuoni mentre al di sopra gli ultrasuoni. Entrambi non sono udibili dall'orecchio umano.

Con la legge 477/95 e tutti i decreti ad essa collegati, il legislatore sancisce i requisiti minimi a cui deve sottostare il progettista per la realizzazione degli elementi verticali e orizzontali, al fine di salvaguardare il benessere dell'utente finale e la qualità ambientale riducendo l'esposizione al rumore sia proveniente dall'esterno che da unità abitative adiacenti.

La cura e il dettaglio durante tutta la posa in opera della struttura diventano quindi fondamentali per un corretto isolamento dal punto di vista acustico, a maggior ragione in edifici in legno, che è un materiale elastico in grado di trasmettere le vibrazioni.

L'unità di misura del rumore è il decibel [dB], e la soglia del dolore all'orecchio umano è definita a 140 dB.

Per edifici adibiti a residenza o assimilabili, i valori limite relativi all'involucro edilizio sono 50 dB per l'indice di potere fonoisolante dei tramezzi e 40 dB per l'isolamento acustico di facciata.

<b>Tabella a – classificazione degli ambienti abitativi</b>					
Categoria A:	edifici adibiti a residenza o assimilabili				
Categoria B:	edifici adibiti ad uffici e assimilabili				
Categoria C:	edifici adibiti ad alberghi, pensioni ed attività assimilabili				
Categoria D:	edifici adibiti ad ospedali, cliniche, case di cura e assimilabili				
Categoria E:	edifici adibiti ad attività scolastiche a tutti i livelli e assimilabili				
Categoria F:	edifici adibiti ad attività ricreative o di culto e assimilabili				
<b>Tabella b – requisiti acustici passivi degli edifici, delle loro componenti e degli impianti tecnologici</b>					
	<b>Rw(*)</b>	<b>D2m,nT,w</b>	<b>Ln,w</b>	<b>Lasmax</b>	<b>Laeq</b>
D	55	45	58	35	25
A, C	50	40	63	35	25
E	50	48	58	35	25
B, F	50	42	55	35	35

Tabella 1.3 Tabelle a, b del D.P.C.M del 5 dicembre 1997 - Requisiti acustici passivi degli edifici

### **Le vibrazioni e la capacità fonoassorbente**

Il suono proviene dall'esterno dell'edificio facendo vibrare le pareti perimetrali o il solaio, trasmettendo così l'onda sonora verso l'interno.

Il potere fonoisolante di un involucro omogeneo e isotropo è direttamente proporzionale alla massa superficiale della parete.

L'assorbimento acustico rappresenta la capacità di un materiale di dissipare l'energia sonora convertendola in calore; l'energia che colpisce il corpo viene, dunque, in parte riflessa e in parte assorbita dal materiale.

Si può quindi determinare un coefficiente di assorbimento ottenuto dal rapporto tra l'energia assorbita e quella incidente sulla superficie del corpo e, di conseguenza, maggiore è il valore del coefficiente, maggiore è la capacità fonoassorbente del materiale.

### **Composizione di una parete e di un solaio**

La capacità di una parete di respingere i suoni provenienti dall'esterno ed allo stesso tempo assorbire quelli provenienti dall'interno risulta essere una contrapposizione.

Infatti, per il primo è necessaria una scelta di materiali compatti e pesanti, per il secondo materiali più leggeri e soprattutto porosi.

Per questa ragione sono adottate delle soluzioni combinate di stratigrafie composte, utilizzando il concetto "massa-molla-massa", le quali isolano meglio rispetto ad una parete monolitica.

In una struttura in legno le vibrazioni sono trasmesse più facilmente e risulta necessaria una maggiore accuratezza nella progettazione e nella posa in opera.

Le vibrazioni possono essere longitudinali, trasversali e di torsione e possono essere trasmesse per:

- via aerea tra gli ambienti;
- via solida tra le pareti;
- dal calpestio tramite il solaio;
- da impianti tecnici.

Risulta fondamentale la previsione della trasmissione indiretta, riguardante la propagazione del rumore attraverso le condutture e i giunti.

Per diminuire il livello di rumore risulta necessario limitare il più possibile le vibrazioni delle pareti; per fare ciò si possono adottare diverse metodologie di impedimento: disponendo fodere di materiale fonoassorbente lungo le pareti oppure applicando alle

stesse dei compensati con delle piccole cavità nelle quali l'energia vibrazionale viene dissipata senza la produzione di suoni.

La sola correzione acustica dall'interno non è sufficiente per un buon isolamento acustico e risulta necessaria una limitazione dei suoni provenienti dall'esterno. Per questo motivo si utilizzano delle guaine, posizionate nei punti di contatto tra le pareti e il solaio e tra le prime e il cordolo in cemento, specifiche per l'abbattimento acustico.

Oltre alle pareti anche i solai trasmettono vibrazioni, e in particolare sia rumore aereo sia quello dovuto al calpestio.

Esistono a riguardo materiali e membrane per la riduzione della trasmissione dovuta al calpestio applicate direttamente sul piano del solaio al fine di ridurre gli effetti; tuttavia è necessario considerare che le viti di fissaggio e gli impianti che attraversano il solaio possano dar luogo a vibrazioni fastidiose, e pertanto devono essere accuratamente isolati eliminando tutti i possibili ponti acustici.

### **4.3 Tenuta all'aria**

Una corretta progettazione dell'edificio non può tralasciare la valutazione di possibili infiltrazioni d'aria attraverso l'involucro, che potrebbero alterare le condizioni climatiche interne ed il comfort.

È compito di nastri, sigillanti, bande bituminose, schiume e guarnizioni garantire la corretta impermeabilità all'aria. La scorretta posa in opera di tali elementi può portare a una serie di ripercussioni sia sui componenti che sul comfort interno:

- Entrata di calore durante il periodo estivo, con conseguente aumento della temperatura interna e di fabbisogno energetico di raffrescamento.
- Perdita di calore durante il periodo invernale, con conseguente diminuzione della temperatura interna e aumento del fabbisogno di riscaldamento.
- Formazione di condensa negli strati più esterni della stratigrafia durante la stagione fredda.
- Formazione di condensa negli strati interni della stratigrafia durante la stagione calda.
- Riduzione del comfort interno a causa di micro-correnti d'aria.
- Aumento della trasmissione del rumore attraverso la parete.

I punti di maggiore criticità presenti sono rappresentati dalle interruzioni dell'involucro edilizio, e per tale ragione è necessaria una maggiore accuratezza in fase di posa in opera.

Le principali criticità si trovano dunque in corrispondenza di:

- punti di sovrapposizione con membrane traspiranti o barriere al vapore;
- serramenti;
- camini, sfiati di aria e gas;
- passaggio di tubature o condotte per impianti;
- congiunzioni tra due pareti o tra parete e copertura;
- fori di vite passanti attraverso l'involucro;

A seconda della tipologia di nodo è possibile utilizzare materiali appositi per garantire la tenuta all'aria.

### **Tenuta all'aria tramite nastratura**

Le principali tipologie di nastri per la tenuta all'aria sono due: i nastri adesivi e quelli definiti "punto chiodo".

I nastri adesivi vengono applicati alle giunzioni tra due componenti come parete-parete oppure parete-copertura, al fine di garantire una continuità dell'elemento. Sono utilizzati su entrambi i lati dell'involucro per ottenere la massima prestazione di tenuta all'aria.

Tutte le giunzioni di quest'ultimo, comprese quelle con i serramenti, prevedono l'utilizzo di nastri adesivi rinforzati, mentre per quelle tra gli strati di membrana impermeabile e barriera al vapore presenti sul tetto sono utilizzati nastri differenti ma con medesimo scopo.

La seconda tipologia di nastri è utilizzata principalmente nella copertura.

Si tratta di nastri sigillanti in schiuma di polietilene che garantiscono la sigillatura totale delle membrane nei punti di attraversamento delle viti che issano i listoni di ventilazione.

Una doppia banda adesiva assicura una perfetta aderenza tra membrana e listello anche in superfici lievemente irregolari, preservando un'ermeticità all'aria e all'acqua anche se forato ripetutamente.

### **Test di tenuta all'aria**

Test per la tenuta all'aria dell'involucro diventano quindi fondamentali non solo al termine della fase cantieristica ma anche durante. Possono infatti permettere la verifica ed eventuali correzioni prima del proseguimento del lavoro.

Il principale test utilizzato è il Blower Door Test, nel quale attraverso un apposito ventilatore viene immessa o ispirata aria dall'edificio in esame.

Per effettuare il controllo di tenuta all'aria, secondo la norma UNI EN ISO 9972, viene creata e mantenuta una differenza di pressione tra interno ed esterno dell'involucro

costante di 50 Pa. Durante questa fase viene ispezionata l'intera superficie alla ricerca di possibili zone non perfettamente ermetiche, che causano le principali perdite di carico termico per infiltrazione. Per svolgere queste attività spesso si ricorre all'ausilio di macchine per il fumo e telecamere termiche.

Una seconda fase del test prevede la generazione di una depressione decrescente, partendo da un valore di circa 70 Pa e procedendo per step di 5 Pa fino al raggiungimento di 25 Pa. Durante ogni step sono registrati i volumi d'aria che si perdono attraverso i punti di permeabilità e viene calcolato l'indice di quantità d'aria penetrata in un'ora (n50).

Infine, nella terza fase, viene generata una sovrappressione e si ripete l'iter dello stadio precedente al fine di valutare le dispersioni dovute alle diverse guarnizioni.

Si è così in grado di definire il numero di ricambi orari del volume d'aria interna passanti attraverso l'involucro, la cui sommatoria definisce la perdita totale.

Tipologia di edificio	Ricambio d'aria [1/h]
Casa passiva	≤ 0,6
Edificio a basso consumo energetico	≤ 2,0
Edificio con impianto di ventilazione forzata	≤ 1,5
Edificio tradizionale	≤ 3,0

*Tabella 1.4 Valori di ricambio d'aria per tipologia di edificio in esame*

## 4.4 Biodegradamento, durabilità e preservazione del legno

### Premessa

Il legno è un materiale totalmente biodegradabile, ma ciò non sancisce un degradamento assicurato nel tempo.

Il degrado dovuto ad insetti e funghi avviene solamente in determinate condizioni: a seconda della tipologia di legno e dell'ambiente considerato, l'elemento risulta più o meno resistenti all'attacco di agenti biotici.

Questo fenomeno dipende principalmente da una progettazione errata: la scelta di una specie legnosa sbagliata, un trattamento preservante non idoneo oppure a dettagli costruttivi non precisi.

In condizioni ottimali il legno non subisce alcun degrado o decadimento delle caratteristiche meccaniche dovute al solo scorrere del tempo.

### Il degrado da funghi e insetti

I funghi della carie si diffondono in aria tramite le spore, e se queste entrano in contatto con il legno germinano su di esso nel caso in cui l'umidità superi il 20%.

Queste entità si moltiplicano all'interno della massa legnosa, degradando chimicamente il legno e determinandone una drastica diminuzione della resistenza del materiale anche nelle prime fasi dell'attacco, quando segni macroscopici superficiali non sono ancora visibili.

La causa principale risulta quindi l'aumento di umidità, dovuta ad infiltrazioni, condensa, ristagni di umidità oppure al contatto con acqua liquida.

Nella maggior parte dei casi l'attacco del fungo inizia dall'interno dell'elemento ligneo, senza alcuna manifestazione esterna, in quanto la superficie del legno generalmente ha la possibilità di asciugarsi.

Un'altra forma di degrado biologico è dovuta agli insetti xilofagi, i quali depositano le loro uova in piccole cavità o fessure del legno.

Una volta schiuse danno vita ad una larva che penetra nella massa legnosa scavando gallerie e nutrendosi, anche per diversi anni, fino a diventare adulto.

A questo punto l'organismo lignivoro lascerà il legno forandone la superficie, iniziando un nuovo ciclo di vita.

Il legno massiccio è più sensibile a questo tipo di degradamento in quanto presenta fessure maggiori (in termini di spessore) rispetto a quello lamellare, nel quale attacchi da insetti nelle travi risultano sporadici e limitati.

È importante sottolineare come questo fenomeno non possa essere quantificato osservando solamente la presenza dei fori, in quanto si tratta solamente di fori d'uscita e non forniscono nessuna indicazione sull'entità dell'infestazione in corso.

Generalmente questi parassiti si nutrono solamente della parte periferica del tronco, l'alburno, in quanto maggiormente ricca di amidi e zuccheri, mentre scartano il durame se differenziato.

I carboidrati contenuti nel legno tendono a perdere le loro sostanze nutritive con il passare del tempo dopo l'abbattimento, rendendo sgradito il materiale e quindi immune dagli attacchi delle famiglie di insetti xilofagi.

Trattamenti superficiali come impregnanti, vernici, sostanze preventive e rivestimenti come intonaci o cartongessi, impediscono all'organismo adulto la deposizione delle uova e riducono notevolmente la possibilità di un'infestazione.

### **La durabilità naturale del legno**

Da una trattazione generale si può affermare che l'alburno di tutte le specie sia poco durabile a causa degli insetti e dei funghi: con riferimento al solo durame le varietà maggiormente durabili sono le querce, la robinia, il castagno e il larice, mentre quelle poco durabili sono l'abete e il pioppo.

Tuttavia, i tronchi con uno spessore modesto di alburno, una volta squadrati, presentano solamente il durame.

### **Normativa**

Di seguito verranno riportati i concetti fondamentali riguardanti la normativa in esame:

- Le classi di utilizzo, definite nel EN 335-1 ed EN 335-2, rappresentano le diverse situazioni alle quali possono essere esposti il legno e i suoi manufatti.
- La durabilità del materiale in funzione della specie legnosa, definita nel EN 350-2, che indica il comportamento di ciascuna specie legnosa e del relativo degrado biologico.
- L'impregnabilità, definita anch'essa nel EN 350-2, indica la facilità di penetrazione delle sostanze preservanti.
- I requisiti di durabilità per il legno massiccio o lamellare da utilizzarsi in funzione della classe di utilizzo, definiti nella EN 460.

Le costruzioni in legno

<b>Classe di utilizzo</b>	<b>Ambiente</b>	<b>Rischio</b>
1	Situazione in cui il legno è riparato, completamente protetto da agenti atmosferici e non esposto all'umidità, non è a contatto con il terreno ed è in ambiente secco. Umidità del legno inferiore al 20%	Non c'è rischio di attacco da funghi. Rischio di attacco da insetti.
2	Situazione in cui il legno è riparato dagli agenti atmosferici ma si trova in un ambiente particolarmente umido, che può determinare umidificazione occasionale ma non persistente, non è a contatto con il terreno. Umidità del legno occasionalmente superiore al 20%.	Moderato rischio di attacco da funghi. Rischio di attacco da insetti.
3	Situazione in cui il legno non è riparato dagli agenti atmosferici o comunque è soggetto ad umidificazione frequente, non è a contatto con il terreno. Umidità del legno frequentemente superiore al 20%.	Rischio di attacco da funghi. Rischio di attacco da insetti.
4	Situazione in cui il legno si trova a contatto con il terreno o con acqua dolce ed è pertanto permanentemente esposto all'umidificazione. Umidità del legno perennemente superiore al 20%	Rischio di attacco da funghi. Rischio di attacco da insetti.
5	Situazione in cui il legno si trova permanentemente a contatto con acqua salata. Umidità del legno permanentemente superiore al 20%.	Rischio di attacco da organismi marini. Rischio di attacco da funghi. Rischio di attacco da insetti.

Tabella 1.5 Riepilogo delle classi di utilizzo, secondo la norma EN335, Fonte: Federlegno.

Per quanto riguarda la durabilità naturale e l'impregnabilità, la norma EN 350-2, anche se principalmente riferita al legno massiccio, può essere applicata anche al lamellare, in quanto la durabilità si comporta, a parità di specie legnosa, come il legno massiccio.

Classe di durabilità	Descrizione
1	Molto durabile
2	Durabile
3	Moderatamente durabile
4	Poco durabile
5	Non durabile

Tabella 1.6 Classificazione della durabilità naturale nei confronti dei funghi cariogeni, riferita al solo durame.

L'alburno di qualsiasi specie legnosa è da considerarsi sempre in classe 5.

Classe di durabilità	Descrizione
R	Resistente
NR	Non resistente

Tabella 1.7 Classificazione della durabilità naturale nei confronti degli insetti, ad esclusione delle termiti ed organismi marini.

Classe di durabilità	Descrizione
R	Resistente
MR	Moderatamente resistente
NR	Non resistente

Tabella 1.8 Classificazione della durabilità nei confronti delle termiti.

Classe di impregnabilità	Descrizione
1	Impregnabile
2	Moderatamente impregnabile
3	Poco impregnabile
4	Non impregnabile

Tabella 1.9 Classificazione dell'impregnabilità.

Classe di durabilità	Descrizione
<2 cm	molto sottile
2÷5 cm	Sottile
5÷10 cm	Medio
>10 cm	Ampio
x	Non c'è distinzione netta tra alburno e durame

Tabella 1.10 Spessore dell'alburno nelle piante adulte.

## 4.5 Resistenza al fuoco

Il legno è un materiale organico di origine vegetale, dotato di una serie di caratteristiche intrinseche che ne hanno permesso una vasta gamma di utilizzi.

Tuttavia, essendo un elemento altamente combustibile, è spesso ritenuto potenzialmente pericoloso nelle costruzioni. Di conseguenza l'utilizzo del legno come materiale da costruzione deve essere supportato da una corretta progettazione.

### Il comportamento al fuoco

Alla base dello studio del comportamento al fuoco si trova la prevenzione incendi intesa come tutela della vita umana, l'incolumità delle persone e la salvaguardia dell'ambiente.

I due aspetti principali di questa valutazione sono:

- La reazione al fuoco, la quale esprime il grado di partecipazione all'incendio.
- La resistenza al fuoco, la quale esprime l'attitudine di un elemento a conservare, almeno in parte, la resistenza meccanica, la tenuta e l'isolamento.

Per quanto concerne la reazione, i materiali legnosi, sia massicci sia ricostruiti sotto forma di pannelli, presentano un alto grado di partecipazione al fuoco, collocandosi secondo le classi della normativa italiana per il materiale legno tra la 3 e la 5.

Invece, a riguardo della resistenza al fuoco, tutto dipende dalla combustione del materiale, un processo chimico-fisico non istantaneo, il quale procede dalla parete esterna verso l'interno ad una velocità comunque prevedibile, detta velocità di carbonizzazione.

Questa caratteristica dipende dalla specie legnosa in esame, da fattori ambientali e dalla ventilazione.

Tipo di essenza lignea	Velocità di carbonizzazione $\beta_0$ [mm/min]
Conifere <ul style="list-style-type: none"> <li>- Legno massiccio con massa volumica caratteristica <math>\geq 290 \text{ kg/m}^3</math> ed una dimensione minima di 35 mm</li> <li>- Legno lamellare incollato con massa volumica caratteristica <math>\geq 290 \text{ kg/m}^3</math></li> <li>- Pannelli di legno con massa volumica caratteristica di <math>450 \text{ kg/m}^3</math> ed una dimensione minima di 20 mm</li> </ul>	0,8  0,7  0,9
Latifoglie, legno massiccio o legno lamellare incollato con massa volumica caratteristica $\geq 450 \text{ kg/m}^3$ e quercia	0,5
Latifoglie, legno massiccio o legno lamellare incollato con massa volumica caratteristica $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,7

Tabella 1.11 Velocità di carbonizzazione di alcune specie legnose. Fonte Federlegno.

Durante il fenomeno della combustione non è propriamente il legno a bruciare, ma bensì i vapori dello stesso nella giusta concentrazione con l'ossigeno dell'aria. Prima di poter bruciare il materiale deve perdere tutta l'acqua contenuta al suo interno sotto forma di umidità.

Si possono quindi individuare tre zone durante un processo di combustione:

- Zona carbonizzata: rappresenta la parte più esterna, lo strato di legno direttamente interessato nel processo di combustione.
- Zona alterata: un tratto intermedio, dello spessore di qualche millimetro, che rappresenta lo strato di avanzamento del processo di combustione caratterizzato da un aumento progressivo della temperatura fino a superare i 300°C.
- Zona inalterata: rappresenta lo strato più interno alla sezione, non ancora soggetto a fenomeni di degradazione termica.

Per quanto riguarda le caratteristiche meccaniche del materiale, ed in particolare della resistenza meccanica, risultano totalmente annullate nella zona carbonizzata, mentre nella zona alterata l'aumento graduale della temperatura muta tali caratteristiche ma senza annullarle completamente.

Nella zona inalterata, invece, le caratteristiche meccaniche possono considerarsi quasi invariate, poiché la loro diminuzione provocata dall'aumento di temperatura è bilanciato dalla conseguente diminuzione dell'umidità interna.

Nell'ipotesi che non si verificano distacchi di materiale dello strato carbonizzato, il calore penetra verso l'interno della massa legnosa in maniera lenta e con una velocità inversamente proporzionale a quest'ultimo.

Per tale ragione l'utilizzo di materiali legnosi per la costruzione di elementi portanti garantisce una soluzione efficace per la sicurezza dell'individuo in caso di incendio.

### **Normativa**

In base al D.M 30.11.83 il "*grado di partecipazione di un materiale combustibile al fuoco al quale è sottoposto*" è definito in funzione della propria natura chimica e delle effettive condizioni di messa in opera.

Secondo il D.M. 26.06.84 "Classificazione di reazione al fuoco ed omologazione dei materiali ai fini della prevenzione incendi" i materiali sono assegnati alle classi 0, 1, 2, 3, 4 e 5 con l'aumentare della loro partecipazione alla combustione; quelli di classe "0" sono incombustibili.

Per tutti i materiali classificati ai fini della reazione al fuoco vige il regime di OMOLOGAZIONE “*procedura tecnico- amministrativa con la quale viene provato il prototipo di materiale, certificata la sua classe di reazione al fuoco ed emesso da parte del Ministero dell’Interno il provvedimento di autorizzazione alla riproduzione del prototipo stesso, per l’utilizzazione nelle attività soggette alle norme di prevenzione incendi*”.

In base al D.M. 30.11.93 affinché un elemento da costruzione possa resistere all’azione del fuoco deve conservare, almeno in parte, secondo un programma termico prestabilito e per un determinato arco temporale, la stabilità (R), la tenuta (E) e l’isolamento termico (I).

Si definiscono così i simboli: “REI”, il quale identifica un elemento costruttivo provvisto di tutti i requisiti della resistenza al fuoco; “RE” provvisto di resistenza meccanica e di tenuta; “R” provvisto solamente di resistenza meccanica.

Tuttavia, il requisito necessario di resistenza al fuoco da attribuire ad un elemento costruttivo è descritto in maniera univoca ed esaustiva dalla normativa italiana solamente per particolari attività.

Di conseguenza, il requisito viene stabilito in base al carico di incendio secondo le indicazioni della Circolare 91/61.

Nello specifico per gli edifici con struttura portante in legno il D.M.06.03.86 impone di considerare nel calcolo di carico di incendio il contributo del legno eventualmente presente nel compartimento, secondo la relazione seguente.

$$q = Q + 12,5 \frac{S}{A}$$

Dove:

q: carico di incendio totale [kg/m<sup>2</sup>]

Q: carico di incendio dei materiali combustibili contenuti nel locale, escluse le strutture portanti lignee [kg/m<sup>2</sup>]

S: superficie esposta al fuoco delle strutture portanti in legno [m<sup>2</sup>]

A: superficie orizzontale del locale [m<sup>2</sup>]

Infine, il valore 12,5 consente di considerare come contributo all’incendio solamente la parete superficiale del componente ligneo (crosta) dello spessore di 2,5 cm.

Per la valutazione della resistenza al fuoco è possibile procedere per via sperimentale oppure per trattazione analitica.

La prima prevede la collaborazione di un istituto autorizzato e riconosciuto dal Ministero dell'Interno, nel quale eseguire un test specifico normalizzato.

La classe di resistenza al fuoco così ottenuta e riportata nel rapporto di prova sperimentale redatto direttamente dal laboratorio si riferisce solamente al campione testato, ed è perciò valida solamente nelle condizioni di test o più favorevoli.

D'altro canto, la trattazione analitica si basa su criteri di verifica delle strutture e fa riferimento solamente al parametro "R" della resistenza al fuoco. Gli altri due parametri di tenuta e isolamento non possono essere valutati e verificati per via analitica.

Inoltre, sono necessarie due ipotesi per poter utilizzare questa metodologia:

- che la carbonizzazione del legno sotto l'azione del fuoco proceda perpendicolarmente alle superfici esposte dell'elemento a velocità costante;
- che il legno conserva inalterate le sue caratteristiche meccaniche nella parte ancora non raggiunta dalla carbonizzazione;

La normativa italiana in merito alla valutazione della resistenza al fuoco viene definita all'interno di due norme:

- UNI 9504, *"Procedimento analitico per la valutazione della resistenza al fuoco degli elementi costruttivi in legno"*.
- UNI EN 1995-1-2 – *"Progettazione delle strutture in legno, Parte 1-2: Regole generali – Progettazione strutturale contro l'incendio"*.

## 5 Comportamento sismico delle strutture in legno

Il legno risulta essere un materiale particolarmente appropriato per la realizzazione di strutture in grado di resistere a sismi anche di notevole intensità, lo dimostra la grande quantità di edifici in legno presenti in paesi caratterizzati da una elevata attività sismica, come la California e il Giappone.

Il legno, e di conseguenza anche le strutture lignee, possiedono caratteristiche intrinseche che li rendono non solo adatti, ma quasi consigliabili per l'impiego in zone sismiche.

Queste caratteristiche sono:

- **Leggerezza:** se paragonate alle strutture tradizionali, in calcestruzzo o cemento armato, quelle in legno sono più leggere e di conseguenza le sollecitazioni dovute all'azione del sisma sono ridotte.
- **Resistenza:** la resistenza del legno ha valori totalmente paragonabili e confrontabili con quelli del calcestruzzo ma in più è presente anche per la trazione.
- **Deformabilità:** il valore medio del modulo elastico del legno è circa 1/3 di quello del calcestruzzo, e ciò comporta bassi valori di rigidità e un'alta flessibilità, traducibile in un aumento del periodo proprio di oscillazione e quindi una riduzione della suscettibilità della struttura sottoposta al sisma.

Tuttavia, oltre alle caratteristiche vantaggiose sopra descritte, ne esiste un'altra che sconsiglierebbe l'utilizzo di questo materiale in una zona sismica: la fragilità.

Questa problematica viene però superata attraverso l'utilizzo di elementi meccanici di collegamento, i quali possiedono un elevato comportamento plastico e garantiscono un livello di duttilità dell'intera struttura maggiore di 1.

Soprattutto in edifici residenziali, l'impiego dell'intelaiatura e di pannelli in compensato strutturale o OSB e l'elevato utilizzo di chiodi per il fissaggio degli stessi assicura un eccellente livello di duttilità, necessario al buon comportamento dell'edificio sotto l'azione del terremoto.

### **La normativa**

In Italia la normativa relativa alla progettazione di strutture in legno rispetto al loro comportamento sismico presenta ancora delle lacune.

Questa situazione, dovuta principalmente al ritardo con cui in nostro Paese ha preso in considerazione l'utilizzo del legno come materiale strutturale in alternativa a quelli tradizionali come il cemento armato o l'acciaio, ne ha limitato fortemente l'utilizzo.

Così, per sopperire alla mancanza di normative esaustive, si utilizzano per la progettazione le cosiddette “norme di comprovata validità”, ossia leggi che sono in vigore in Paesi in cui l’esperienza e la regolamentazione sono maggiori. Un esempio è rappresentato dalle DIN<sup>5</sup> tedesche o le corrispondenti norme svizzere e francesi, ma è di fondamentale importanza l’Eurocodice 5, che rappresenta l’unione di tutte le norme nazionali dei diversi Paesi europei.

In Italia tra il 2005 e il 2008 furono redatte le Norme Tecniche sulle Costruzioni, contenenti tre capitoli riguardanti le costruzioni in legno, ma rimangono tuttavia assenti formule per il calcolo e la verifica e si rimanda comunque all’Eurocodice.

### **Progettazione in zona sismica: criteri generali**

La capacità di una struttura di resistere alle sollecitazioni dovute dal sisma dipende principalmente dalla sua attitudine a sviluppare deformazioni plastiche nei suoi elementi strutturali, dissipando l’energia senza arrivare al punto di rottura.

Un elemento strutturale in legno ha un comportamento lineare elastico fino alla rottura, ma sotto l’effetto di un carico ciclico presenta una notevole fragilità, dovuta sia a difetti naturali propri, come i nodi, sia alla praticamente quasi nulla dissipazione di energia.

È possibile raggiungere un comportamento duttile e capacità di dissipare energia tramite l’utilizzo di connessioni semi-rigide, come per esempio la maggior parte delle connessioni meccaniche, al posto di quelle fisse, come l’incollaggio dei giunti.

Alla base della progettazione antisismica, come previsto dall’Eurocodice 8, si trova il “Criterio della gerarchia delle resistenze”, il quale denota la necessità di prevedere che elementi con comportamento plastico raggiungano lo stato post-elastico quando altri a comportamento fragile sono ancora in fase elastica, e comunque lontani dal raggiungimento della rottura.

Di conseguenza, nelle strutture in legno, tale criterio viene assecondato progettando i giunti con connettori meccanici e rendendo gli elementi lignei più resistenti di questi.

Si introduce ora il fattore di struttura “q”, che mette in relazione la duttilità della struttura e la sua progettazione, ed è definito come *il rapporto fra l’accelerazione di picco del sisma che porta al crollo la struttura e l’accelerazione di picco che porta la struttura al raggiungimento del limite elastico.*

---

<sup>5</sup> DIN: Deutsche Institut für Normung, Istituto tedesco per la standardizzazione, fondata il 22 dicembre 1917

È così possibile la progettazione di una struttura in campo lineare tenendo conto dell'effettivo comportamento non lineare, valutandone la sua capacità dissipativa della struttura attraverso un comportamento duttile.

## 5.1 Normativa e certificazioni

La Direttiva europea sui prodotti da costruzione è il quadro legislativo del CEN<sup>6</sup> che regola ed implementa le Norme valide per tutti i 28 paesi dell'Unione Europea.

All'interno si trova la definizione di prodotto di costruzione: *“è qualsiasi prodotto fabbricato con lo scopo di essere incorporato permanentemente in opere di costruzione (cioè ne fa parte integrante) che comprende edifici ed opere di ingegneria”*.

È stato previsto che tutti i prodotti da costruzione debbano avere la marcatura CE<sup>7</sup>, in modo da garantire i requisiti essenziali per l'utilizzo, rappresentati da:

- resistenza meccanica e stabilità;
- sicurezza in caso di incendio;
- igiene, salute e ambiente;
- protezione contro il rumore;
- sicurezza nell'impiego;
- risparmio energetico e ritenzione del calore.

Per poter ricevere il marchio CE i prodotti da costruzione devono essere sottoposti a procedure codificate che ne attestino la conformità di idoneità all'impiego, i quali vanno dalla dichiarazione del fabbricante, al prelievo in azienda di campioni, fino alle prove svolte da Enti terzi.

### La norma UNI

È la norma tecnica, emessa dall'UNI (Ente Nazionale Italiano di Unificazione) ed è un documento obbligatorio, prodotto consensualmente da pubblica amministrazione, produttori, venditori, laboratori di prova, utilizzatori e consumatori per definire lo “stato dell'arte” di prodotti, processi e servizi al fine di migliorarne non solo la qualità ma anche la sicurezza, il rapporto con l'ambiente e la commerciabilità.

---

<sup>6</sup> CEN: Comitato Europeo di Normazione

<sup>7</sup> Marcatura CE: in vigore dal 1993, indica la conformità a tutti gli obblighi che incombono sui fabbricanti in merito ai loro prodotti in virtù delle direttive comunitarie, consentendo la libera commercializzazione dei prodotti marcati entro il mercato europeo.

### **La norma ISO**

È una norma tecnica emessa dall'ente mondiale ISO (International Organisation for Standard), al quale aderiscono gli enti di normazione nazionale (UNI per l'Italia).

Svolge il ruolo di redigere le attività normative a livello mondiale.

### **La norma EN**

È la norma tecnica europea redatta dall'apposito organo europeo CEN.

Una volta emanata, questa deve essere recepita da tutti gli enti normativi nazionali, e va a sostituire quelle inerenti alla stessa materia.

È contrassegnata dalla sigla EN seguita da un numero identificativo.

### **La norma UNI EN**

Rappresenta una norma tecnica recepita dall'UNI, quindi valida sul territorio italiano, ma anche negli altri stati europei aderenti al CEN.

### **La Regola Tecnica**

È un documento emanato dal Consiglio delle Comunità Europee che contiene norme, specifiche tecniche e codice di pratica.

La sua osservanza è obbligatoria poiché è stata emanata da un organo avente potere legislativo.

### **Il Codice Pratica**

Rappresenta il documento nel quale vengono elencate e precisate le procedure e le regole per la progettazione, la fabbricazione, il montaggio, la manutenzione e l'utilizzo di strutture o prodotti.

### **ETA: Benessere Tecnico Europeo**

È una delle modalità previste dalla direttiva 86/106/CEE per l'acquisizione dell'attestato di conformità dei prodotti da costruzione e viene definita come: *“Valutazione tecnica positiva dell'idoneità di un prodotto per l'impiego previsto, fondata sulla corrispondenza ai requisiti essenziali per le opere per le quali il prodotto deve essere utilizzato”*.

### **La certificazione di prodotto**

È la certificazione che attesta la qualità del prodotto. Attesta che le caratteristiche di durabilità, affidabilità, sicurezza del prodotto siano coerenti con la normativa specifica.

## **Il marchio CE**

La marchiatura CE è stata istituita dalla Comunità Economica Europea (CEE) ed è stata inserita nella legislazione comunitaria del Mercato Interno Comunitario. Viene espressa con la sigla CE, la quale deve essere ben visibile ed indelebile sul prodotto, ed ha il ruolo di attestare che il prodotto non arrechi danni alla salute, all'ambiente e alla persona. I requisiti essenziali elencati dalla Direttiva europea sono stati elencati precedentemente.

## **Certificazione FSC**

La certificazione FSC è una certificazione internazionale, indipendente e di parte terza, specifica per il settore forestale e i prodotti – legnosi e non legnosi – derivanti dalle foreste.

Esistono due tipi di certificazione FSC: la certificazione di Gestione Forestale, per proprietari e gestori forestali, e la certificazione di Catena di custodia, per imprese di trasformazione e/o commercio di prodotti forestali.

La certificazione garantisce che i prodotti provengono da foreste gestite in maniera responsabile, garantendo così benefici ambientali, sociali ed economici.

## **Eurocodice 5**

Il testo unico europeo di riferimento è l'Eurocodice 5 (EC5) ed è dedicato alle opere in legno strutturale.

Si presenta in tre parti: Regole generali – Regole comuni e regole per edifici (Parte 1-1), Regole generali – Progettazione strutturale contro l'incendio (Parte 1-2) e Ponti in legno (Parte 2-2).

Nel gennaio 2008 sono stati racchiusi in un testo unico, Norme Tecniche delle Costruzioni (NTC08), i principi di progettazione da seguire con i vari materiali costruttivi, muratura, acciaio, cemento armato e legno.

Assume così il ruolo di testo normativo di riferimento, riassumendo non solo le regole ma anche i principi alla base della progettazione e della scelta dei materiali costruttivi.

## 6 Metodologie di analisi

### 6.1 Analisi termo-igrotermica

Ormai da anni gli edifici in legno sono riconosciuti come altamente performanti in termini di resistenza strutturale e prestazioni energetiche.

Tuttavia, uno degli aspetti fondamentali per garantire la loro durabilità ed efficienza energetica riguarda la buona progettazione.

La trasmissione del vapore attraverso l'involucro opaco è un tema di non semplice trattazione che, se trascurato, può dar luogo a problematiche relative alla formazione di condensa e muffe nella stratigrafia dell'involucro.

Tali avvenimenti possono determinare problemi che spaziano dal danneggiamento della struttura, alla perdita delle caratteristiche isolanti dell'involucro fino al discomfort ambientale.

#### 6.1.1 La normativa

Un aspetto fondamentale nella progettazione di un edificio, nuovo o da riqualificare, è il controllo termo igrometrico delle strutture nei confronti dell'umidità presente nell'ambiente.

Il DM 26/06/2015 "Adeguamento linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici", colloca le verifiche di condensazione interstiziale e rischio di muffa tra quelle "comuni a tutti gli ambiti di applicazione" e, quindi, sempre obbligatorie, qualunque intervento si vada ad eseguire su un edificio.

Il DM 26/06/2015, All.1 Art. 2.3 comma 2 prescrive quanto segue:

*"Nel caso di intervento che riguardi le strutture opache delimitanti il volume climatizzato verso l'esterno, si procede in conformità alla normativa tecnica vigente (UNI EN ISO 13788) alla verifica dell'assenza:*

- *di rischio di formazione di muffe, con particolare attenzione ai ponti termici negli edifici di nuova costruzione;*
- *di condensazioni interstiziali.*

*Le condizioni interne di utilizzazione sono quelle previste nell'appendice alla norma sopra citata, secondo il metodo delle classi di concentrazione. Le medesime verifiche possono essere effettuate con riferimento a condizioni diverse, qualora esista un sistema di controllo dell'umidità interna e se ne tenga conto nella determinazione dei fabbisogni di energia primaria per riscaldamento e raffrescamento."*

Il 18 dicembre 2018 il Ministero dello Sviluppo Economico ha pubblicato una serie di FAQ (la terza) sul DM 26/06/2015 con l'obiettivo di specificare meglio quanto già previsto per la verifica del rischio di condensa interstiziale introducendo, inoltre, valori limiti per materiali quali il legno, non considerati prima.

Tra queste, la FAQ 3.11 riporta quanto segue:

*“Per la verifica della condensa interstiziale si procede in conformità alla normativa tecnica vigente (UNI EN ISO 13788). Si ritiene che la condensazione interstiziale possa considerarsi assente quando siano soddisfatte le condizioni poste dalla norma, ovvero la quantità massima ammissibile e nessun residuo alla fine di un ciclo annuale. Tale norma definisce infatti la quantità ammissibile di condensa presente in un elemento al termine del periodo di condensazione. Lo stesso paragrafo specifica anche che tutta la condensa formata all'interno di un elemento deve sempre evaporare completamente alla fine di un ciclo annuale.”*

In altre parole, “assenza di condensazione” non significa che la struttura debba essere asciutta in ogni momento, ma si può applicare il concetto di “quantità massima ammissibile”, così come definito dall'appendice nazionale della norma UNI EN ISO 13788, ovvero:

- la condensa non deve mai superare i 500 g/m<sup>2</sup>;
- tutta la condensa deve evaporare nell'arco dell'anno.

La normativa però non cita dati strettamente correlati alle strutture in legno, benché questo sia un materiale facilmente putrescente e, pertanto, esiste la necessità di prevedere opportuni accorgimenti.

Ad oggi il limite di riferimento comunemente usato per materiali di matrice legnosa è rappresentato dal 18 % in massa della quantità di umidità relativa interna al materiale stesso.

Questo valore, oggi comunemente usato nello stato dell'arte, garantisce il mantenimento delle caratteristiche del materiale sottoposto ad umidità.

### **6.1.2 Metodologia di calcolo**

Come citato in precedenza la normativa vigente si basa principalmente su due norme: la UNI EN ISO 13788 e UNI EN 15026.

La prima propone metodologie semplificate per il calcolo della condensazione interstiziale, superficiale e muffa, che considerano solamente il trasporto di vapore per diffusione e l'uso di dati climatici medi mensili. Così facendo si trascurano tutte le altre forme di umidità, come la penetrazione della pioggia o il fenomeno di convezione.

I software basati su questa norma utilizzano, in regime stazionario, un calcolo predittivo basato sulle semplificazioni proposte.

La UNI EN ISO 15026, norma europea recepita a livello nazionale, fornisce le equazioni da utilizzare in regime dinamico per il calcolo del trasferimento di calore e umidità nelle strutture.

In questo caso l'attenzione viene posta ai contributi del calore latente e del trasporto capillare, trascurati nel caso stazionario.

Alla base degli algoritmi di calcolo si trovano la legge di conservazione del calore e la legge del trasporto di umidità. Queste, in entrambi i regimi analizzati, si presentano come un'equazione che da una parte individua la capacità di assorbimento di calore e umidità del materiale e dall'altra la capacità di trasporto degli stessi.

### Legge di conservazione del calore

Secondo la UNI EN 15026, nella legge di conservazione del calore, o legge di Fourier, sono eguagliati la potenza termica immagazzinata per unità di volume e la potenza termica generata per unità di volume.

$$[c_m \rho + c_w w(\varphi)] \frac{\partial T}{\partial t} = - \frac{\partial (q_{sens} + q_{lat})}{\partial x} \quad (1)$$

Dove:

$c_m \rho$ : capacità termica volumetrica del materiale secco, data dal prodotto del calore specifico del materiale secco per la sua densità [J/m<sup>3</sup>K];

$c_w w$ : capacità termica volumetrica dell'acqua, data dal prodotto del calore specifico dell'acqua per il contenuto di umidità in massa su unità di volume [J/m<sup>3</sup>K];

$q_{sens}$ : flusso di calore sensibile;

$q_{lat}$ : flusso di calore latente;

Ricordando che:

$$q_{sens} = -\lambda(w) \frac{\partial T}{\partial x}$$

$$q_{lat} = h_e g_v$$

Dove:

$\lambda$ : conduttività termica del materiale in funzione dell'umidità [W/mK];

$h_e$ : entalpia di evaporazione [J/kg];

La formula (1) estesa diventa:

$$[c_m \rho + c_w w(\varphi)] \frac{\partial T}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x} [-\lambda(w) \frac{\partial T}{\partial x} + h_e g_v] \quad (2)$$

Invece, in caso di utilizzo della norma UNI EN ISO 13788, e conseguente semplificazione al caso stazionario, il metodo di calcolo del trasporto del calore si basa sulla risoluzione analitica dell'equazione del calore, con condizioni al contorno periodiche.

$$\rho c \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = - \frac{\partial q(x, t)}{\partial x} \quad (3)$$

Dove:

$\rho$ : densità [kg/m<sup>3</sup>];

$c$ : calore specifico [J/kgK];

$\lambda$ : conduttività termica [W/mK];

In questo caso il termine “ $c \rho$ ” rappresenta la capacità termica volumetrica del materiale, senza tener conto però della capacità termica dell'acqua.

I valori di temperatura sono ricavati dalla norma UNI 10349 versione 2016.

Ricordando che:

$$q(x, t) = -\lambda \frac{\partial T(x, t)}{\partial x}$$

Il flusso di calore, nel caso di regime stazionario, non tiene conto dell'apporto del calore latente e poiché i valori di conduttività termica, calore specifico e densità sono costanti, la formula estesa risulta:

$$\frac{\partial T(x, t)}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c} \frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} \quad (4)$$

$$a = \frac{\lambda}{\rho c}$$

Essendo “ $a$ ” la diffusività, si può osservare come il trasferimento del calore sia proporzionale, ed essa aumenti all'aumentare della conduttività e al diminuire del calore specifico e densità del materiale.

Per riassumere, nel calcolo in regime stazionario rispetto a quello in dinamico non vengono considerati:

- gli scambi termici dovuti al cambiamento di fase determinati dall'apporto del calore latente;
- la variazione della conducibilità termica in funzione della temperatura e dell'umidità;
- il contributo della capacità volumetrica dell'acqua in funzione del contenuto di umidità relativa.

### Legge del trasporto di umidità

Secondo la UNI EN 15026, quindi per il calcolo in regime dinamico, il flusso netto di umidità determina l'aumento del contenuto di umidità per unità di volume.

$$\frac{\partial w(\varphi)}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\partial (g_v + g_w)}{\partial x} \quad (5)$$

Dove:

w: contenuto di umidità in massa su unità di volume [kg/m<sup>3</sup>];

g<sub>v</sub>: flusso di vapore che si propaga per diffusione [kg/m<sup>2</sup>s];

g<sub>w</sub>: flusso di acqua che si instaura per effetto del trasporto capillare, strettamente legato alla porosità del materiale [kg/m<sup>2</sup>s];

Il flusso di umidità eguaglia la somma del flusso di vapore per diffusione e del flusso di acqua per trasporto capillare.

Ricordando che:

$$g_v = \frac{1}{\mu(\varphi)} \delta_0 \frac{\partial P_v}{\partial x}$$

$$g_w = K(P_{suc}) \frac{\partial P_{suc}}{\partial x}$$

La formula (5) diventa:

$$\frac{\partial w(\varphi)}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{1}{\mu(\varphi)} \delta_0 \frac{\partial P_v}{\partial x} + K(P_{suc}) \frac{\partial P_{suc}}{\partial x} \right] \quad (6)$$

$$K(P_{suc}) = -D_w(w) \frac{\partial w}{\partial P_{suc}}$$

Dove:

$\mu$ : fattore di resistenza igroscopica o fattore di resistenza al vapore [-];

$\delta_0$ : permeabilità al vapore acqueo dell'aria riferita alla pressione parziale del vapore [kg/msPa];

$P_v$ : pressione vapore [Pa];

$K$ : coefficiente di trasporto che rappresenta la conducibilità del liquido;

$D_w$ : coefficiente di trasporto;

$P_{suc}$ : pressione di succhiamento [Pa];

Nel caso in cui ci si trovasse in regime stazionario, utilizzando quindi la norma UNI EN ISO 13788, la massa di vapore per unità di superficie, accumulata in corrispondenza dell'interfaccia, viene calcolata come se fosse influenzata solamente dalla diffusione del vapore acqueo, senza tener conto quindi del contributo del trasporto capillare.

$$\frac{\partial M_a(x, t)}{\partial t} = g_v \quad (7)$$

$$g_v = \delta_0 \frac{\Delta P}{s_d}$$

$$s_d = \mu d$$

Dove:

$M_a$ : massa di vapore per unità di superficie accumulata in corrispondenza dell'interfaccia [kg];

$g_v$ : flusso di vapore che si propaga per diffusione [kg/m<sup>2</sup>s];

$s_d$ : spessore equivalente di aria per la diffusione del vapore acqueo [m];

La formula (7) in forma estesa risulta:

$$\frac{\partial M_a(x, t)}{\partial t} = \frac{\delta_0}{\mu} \frac{\partial P(x, t)}{\partial x} \quad (8)$$

Ovviamente il considerare costanti alcune delle proprietà dei materiali costituisce un'ulteriore approssimazione.

Secondo la norma UNI EN ISO 13788, per la valutazione della quantità di acqua evaporata e condensata, si effettua l'analisi a partire dal primo giorno in cui la condensa è prevista.

La quantità di acqua che si accumula durante i mesi in cui avviene la condensazione viene poi confrontata con la quantità di acqua evaporata durante il resto dell'anno. Di conseguenza si avrà un flusso nullo nella condizione in cui la quantità di acqua accumulata sia uguale a quella evaporata.

Per riassumere, utilizzando il calcolo in regime stazionario rispetto a quello in dinamico, non vengono considerati:

- l'assorbimento capillare e il trasporto di acqua liquida;
- il fattore di resistenza al vapore costante;
- il valore  $\delta_0$  calcolato in dipendenza della temperatura e pressione atmosferica.

Inoltre, nel calcolo in regime stazionario, si considera il trasporto di umidità solamente in relazione alla presenza di condensa interstiziale, senza considerare le condizioni igrometriche all'interno della stratigrafia, considerando quindi i materiali completamente asciutti fino alla formazione di condensa.

## 6.2 Progettazione nel ciclo di vita

Il concetto di sostenibilità di un progetto è strettamente legato ad aspetti ambientali e sociali, tenendo sempre in considerazione quello economico.

Spesso il vincolo del costo di un edificio ha un peso maggiore rispetto al suo grado di qualità ambientale. In quest'ottica sorge la necessità di uno strumento che permetta una valutazione complessiva e che tenga conto di aspetti sia economici sia socio-ambientali, in grado di fornire alla committenza uno strumento decisionale.

Alla teoria *time-cost-quality triangle* espressa durante il secolo scorso dal *Project Management*, ai tradizionali tempi, costo e qualità si aggiungono “ambiente”, “società” e “valore estetico”.

### 6.2.1 Life Cycle Thinking

Il Life Cycle Thinking (LCT) è una metodologia per la valutazione degli impatti di un sistema, a costi inclusi, basata sulla premessa che il consumo di un prodotto/servizio comporta una molteplicità di azioni interconnesse tra loro.

Riportando questo concetto in ambito edile tali attività possono essere suddivise in fasi: estrazione delle materie prime, lavorazione dei materiali, trasporto e distribuzione, consumo, manutenzione, riciclo o smaltimento.

Questi stadi rappresentano esattamente l'intero ciclo di vita dell'edificio e per questo motivo tale tipologia di analisi si adatta in maniera estremamente efficiente a questo ambito.

Sul suolo italiano le tecniche di valutazione risultano principalmente concentrate alla sola fase di costruzione, espandendosi al più ad uno studio riguardante la fattibilità e la gestione del progetto e trascurando impatti e smaltimento futuro.

Più limitata è così la trattazione riguardante l'intera vita dell'edificio, dovuta anche ad un maggiore complessità di analisi.

Tuttavia, in ambito internazionale esistono numerosi approcci, tutti accomunati dai principi del LCT e del concetto di ciclo di vita, e tra questi i più utilizzati sono il Life Cycle Assessment (LCA) e il Life Cycle Cost (LCC).



Figura 1.13 Articolazione delle macro-voci di costo aggregate lungo le fasi del ciclo di vita edilizio secondo LCT

### 6.2.2 Life Cycle Assessment (LCA)

È un'analisi definita nelle norme ISO 14040/44:2006, basate sulle attività ISO/TC 207/SC 5, avviate nel 1993.

Procedimento oggettivo di valutazione dei carichi ambientali relativi ad un prodotto (compreso l'edificio), un processo o un servizio durante l'intero ciclo di vita, attraverso la quantificazione dei flussi di materia e energia in entrata (consumi) e in uscita (emissioni) nelle fasi di estrazione delle materie prime, trasporto, produzione, distribuzione, uso e dismissione.

Alla base della metodologia LCA si trova la quantificazione e la valutazione dei carichi energetici e ambientali, comprensivi dei possibili impatti potenziali associati ad un determinato prodotto, processo o attività, lungo tutto il ciclo di vita.

Va definito ora il concetto di “vita utile”, alla base del metodo LCA, il quale non coincide con la vita dell’edificio fisico, ma rappresenta il tempo assunto per l’analisi.

La vita utile di un edificio è stabilita tenendo conto di due principali considerazioni: la prima è che deve essere abbastanza lunga da permettere una corretta valutazione dei risultati globali limitando l’incertezza dei dati iniziali di input, mentre la seconda è che deve essere minore di 80 anni per tenere in considerazione la possibile obsolescenza dei sistemi tecnologici.

Questa metodologia permette una notevole flessibilità di analisi, consentendo una valutazione in scala del singolo componente o esaminando l’edificio come un unico sistema funzionale a seconda del dettaglio richiesto, e la possibilità di collocare l’oggetto analizzato in un contesto geografico ben definito e secondo anche la destinazione d’uso.

### **6.2.3 Life Cycle Cost (LCC)**

Nota anche come Lyfe Cycle Cost Analysis (LCCA) è definita dalle norme ISO 15686 – 5:2008, basate sulle attività ISO/TC 59/SC 14, nel 1997.

Si tratta di un approccio per la quantificazione dei costi e dei benefici, sempre valutando l’intero arco di vita dell’edificio, finalizzato al supporto decisionale o progettuale tra diverse soluzioni in esame, giudicandone parametri costruttivi, tipologie di materiali e criteri di efficienza economica.

La LCC rappresenta quindi una tecnica per la valutazione dei costi, sia immediati che futuri, applicabile a diversi casi: prodotti o componenti singoli, all’intero sistema di impianti di un edificio, ad un intero progetto di nuova costruzione oppure ad un progetto di ristrutturazione di un bene esistente.

Le finalità possono essere quindi molteplici:

- Comparazione di diverse soluzioni progettuali, con la possibilità di stimare la differenza relativa tra i costi calcolati per tutto il ciclo di vita.
- Definizione di una graduatoria di priorità tra progetti alternativi, ponendo al centro il beneficio ottenibile in funzione del costo quando ci si trova in situazioni di risorse limitate.
- Stimare il budget di spesa di un progetto per un periodo temporale fissato.

#### **6.2.4 Life Cycle Sustainable Assessment (LCSA)**

Tecnica derivante dalle due sopra citate, affermata nel 2011 a seguito di studi condotti nell'ambito del United Nations Environment Programme – UNEP<sup>8</sup>.

Rappresenta sempre una metodologia “life cycle” focalizzata sull'ambito economico, ambientale e sociale del concetto di sostenibilità, combinando conoscenze interdisciplinari e modelli di analisi specifici.

È dunque un approccio in grado di valutare in maniera completa tutti gli impatti in termini di benefici e svantaggi, sia ambientali, sociali ed economici.

#### **6.2.5 Social Life Cycle Assessment (SLCA)**

Metodologia per la valutazione dell'impatto sociale prodotto da un intervento di costruzione/ristrutturazione di un edificio a basso consumo, in relazione ad una costruzione di tipo tradizionale, calcolato su buone pratiche di risparmio energetico.

La tecnica SLCA si rivela particolarmente utile nei casi in cui sia necessaria una valutazione di opere di nuova costruzione in relazione a impatti e utilità collettiva.

Negli ultimi anni la ricerca si è concentrata anche su metodologie combinate LCC e LCA in grado di valutare simultaneamente aspetti di sostenibilità ambientale ed economica, per supportare processi decisionali in presenza di un singolo progetto o per la scelta fra diverse alternative.

---

<sup>8</sup> UNEP: Programma delle Nazioni Unite per l'ambiente, organizzazione internazionale che opera dal 1972 contro i cambiamenti climatici a favore della tutela dell'ambiente e dell'uso sostenibile delle risorse naturali.

## **PARTE SECONDA: Caso Studio di un edificio residenziale in legno**

### **1 Company profile**

“*Verae Amicitiae Sempiternae Sunt*”, questo l’acronimo da cui prende il nome *VASS Technologies*, l’azienda fondata nel 2010 dall’Ing. Giuseppe Gianolio, con sede a Carmagnola (TO).

Nata per operare nel settore delle coperture, fin dal principio ha intravisto la possibilità di utilizzo del legno quale elemento innovativo nell’edilizia, storicamente legata alla tradizione del laterizio e del cemento armato.

Con il suo gruppo di ingegneri si dedica allo studio del mercato e delle tecnologie in ambito coperture, fino a sviluppare il suo primo prodotto, il *VASS Puzzle Roof*, un sistema di copertura isolante modulare prefabbricato per abitazioni nuove o preesistenti.

Il rapido montaggio e le elevate caratteristiche tecniche hanno permesso a *VASS Technologies* di consolidare il suo prodotto ed elevarsi a posizioni di rilievo nel mercato del Nord Italia.

Nel 2015, con all’attivo oltre 90 coperture realizzate, l’Ing. Gianolio e il team *VASS* intraprendono la scelta di sviluppare un nuovo prodotto: **la sopraelevazione**.

Inizia dunque il percorso di *VASS* nel mercato della bioedilizia, un mercato ancora oggi in forte crescita a livello nazionale rispetto all’edilizia tradizionale, che trova nelle regioni nord-orientali dell’Italia i maggiori produttori del settore.

Nel 2016 l’azienda decide di ampliare il proprio mercato effettuando i primi test su edifici completi in legno, per poi avviare la produzione e la commercializzazione nell’anno seguente, varcando così la soglia di questo mercato con un prodotto innovativo, forte di tecnologie integrate e brevettate, ed un modello di *business*, differente rispetto ai propri *competitors*, in grado di porla al centro della filiera del legno.

Attualmente l’azienda è specializzata nello sviluppo, progettazione e realizzazione di edifici prefabbricati in legno, ad alta efficienza ed in grado di gestire commesse dalla sola struttura al cosiddetto “chiavi in mano”.

Attraverso una progettazione energetica dettagliata, volta a garantire una coibentazione ottimale sia per il periodo invernale sia per quello estivo, le case prefabbricate prodotte dall’azienda presentano un elevato comfort abitativo e costi di gestione ridotti, poiché

tutti gli elementi che compongono il fabbricato, certificati in laboratori esterni, rispondono ad elevati standard qualitativi.

La *policy* aziendale si basa sull'idea di "costruire un casa attorno al cliente", lasciando così spazio ad una progettazione flessibile, dalla scelta delle forme e le suddivisioni degli spazi dei vari locali interni alla scelta dei materiali e allo stile dei rivestimenti.

Si crea così una sinergia tra le parti per la realizzazione dell'intera abitazione, dall'involucro alle finiture interne mirando, ovviamente, alla più alta soddisfazione del cliente.

L'azienda inoltre, forte della possibilità di poter progettare insieme l'involucro edilizio e il sistema impiantistico, ottimizzando così l'edificio nel suo insieme, offre anche varie soluzioni di impianti volti a creare il miglior comfort abitativo possibile.

Tutti i componenti dell'involucro sono prodotti nella sede produttiva di *VASS Industries*, a Busca (CN), pre-assemblati in fabbrica e montati in cantiere da installatori professionisti, permettendo di offrire così garanzie su tempistiche, qualità e costi di costruzione.

Un altro punto fermo della politica aziendale di VASS è la formazione dei montatori: l'azienda non ne possiede di propri, ma si affida ai *VASS PRO*, costruttori opportunamente formati nella costruzione in legno.

In questo modo si crea una sinergia fondamentale tra l'azienda ed il montatore, dove i benefici sono per la prima il mantenimento del contatto con la filiera locale, rappresentata dall'insieme dei singoli artigiani, per il secondo la possibilità di una formazione e continui aggiornamenti riguardanti un settore in continua evoluzione e la possibilità di espandersi ad un ulteriore ramo dell'edilizia.

In questo modo VASS garantisce non solo tutte le competenze necessarie alla costruzione dell'opera, ma anche un servizio post-opera proprio attraverso gli artigiani locali.

## 2 Caso Studio

### 2.1 Introduzione al caso studio

Il caso studio si concentra sull'analisi di un edificio monofamiliare, ora in fase di costruzione, commissionato a VASS Technologies.

Lo scopo della ricerca presentato in questo capitolo è quello di confrontare strutture diverse analizzando sia l'aspetto strettamente termico legato quindi ai consumi dell'edificio nel suo complesso sia, soprattutto, quello igrometrico, strettamente connesso al deperimento e quindi alla durabilità delle strutture legnose stesse, argomento questo di fondamentale importanza nel caso di edifici di questa tipologia.

Da anni, infatti, gli edifici in legno sono riconosciuti come altamente performanti in termini di resistenza strutturale e prestazioni energetiche, ma occorre ancora fare molta attenzione alle modifiche delle loro caratteristiche dovute all'umidità, sia per quanto riguarda le trasmittanze stesse delle strutture sia per il loro degrado strutturale nel tempo. Le analisi qui svolte sono mirate a simulare il clima interno in condizione di “*free-running*”, tenendo quindi conto solamente della risposta dell'involucro esterno dell'edificio, al variare delle condizioni climatiche esterne della zona climatica in esame. In prima battuta sono state analizzate diverse modalità costruttive di parete portante esterna e copertura, partendo da quella di progetto e spostandosi su varianti atte a migliorare la durabilità del materiale più soggetto all'umidità e, di conseguenza, della struttura nel suo complesso.

In particolare, sono state ipotizzate modifiche strutturali come l'introduzione di una parete ventilata, e l'utilizzo di materiale diversi, per ridurre problemi di costruzione.

I risultati di queste analisi sono riportati nella sezione seguente.

Analizzando i risultati dell'analisi inerente alle sole stratigrafie è stata individuata la soluzione alternativa più idonea, sia da un punto di vista termo-igrometrico che economico, ed utilizzata nella successiva analisi energetica, questa volta riguardante l'intero edificio.

È stata così svolta una simulazione di due soluzioni costruttive, quella di progetto e una alternativa, volta a definire il fabbisogno termico in entrambi i casi, definendo un quadro energetico-economico completo.

## 2.2 Software utilizzati

Per la realizzazione dello studio svolto in questa sede sono stati utilizzati diverse tipologie di software a seconda dell'operazione richiesta.

Per quanto riguarda la progettazione del modello sono stati utilizzati i seguenti software:

- Autocad, programma della software house statunitense Autodesk, per la progettazione assistita in 2D.
- SkechUp PRO, software di computer grafica per la modellizzazione 3D.

Per l'analisi termica e igrometrica sono stati utilizzati i seguenti software:

- PAN, software della libreria ANIT<sup>9</sup>, per l'analisi termica delle stratigrafie in regime stazionario secondo la norma UNI EN ISO 13788.
- IRIS, software della libreria ANIT per il calcolo agli elementi finiti dei ponti termici secondo la norma UNI EN 10211.
- APOLLO, software della libreria ANIT, per l'analisi dell'involucro trasparente e delle schermature secondo la norma UNI EN ISO 10077-1.
- ECHO, software della libreria ANIT, per l'analisi dei requisiti acustici passivi delle unità immobiliari secondo le norme UNI EN ISO 12354:2017, UNI/TR 11175 e UNI 11367.
- WUFI PRO, software sviluppato dal Dipartimento di igrotermica al Fraunhofer IBP<sup>10</sup>, per il calcolo igro-termico monodimensionale su componenti dell'involucro opaco, in regime dinamico. Questo software tiene in considerazione l'umidità iniziale, la pioggia battente, la radiazione solare, la radiazione ad onde lunghe, il trasporto capillare e la condensazione estiva.
- WUFI PLUS, software sviluppato dal Dipartimento di igrotermica al Fraunhofer IBP, per la simulazione, in regime dinamico, delle condizioni igrotermiche delle componenti dell'intero edificio. L'analisi comprende la simulazione dell'ambiente interno, il livello di comfort ed il consumo energetico; inoltre è possibile inserire i parametri dell'impianto termico dell'edificio all'interno della simulazione, per analizzarne i carichi interni secondo la norma UNI EN 15026.

Attraverso l'utilizzo di questi software, in particolare PAN e WUFI, è stato possibile valutare il fenomeno in regime stazionario e in seguito in regime dinamico, riducendo in questo modo le approssimazioni di calcolo.

---

<sup>9</sup> ANIT: Associazione Nazionale per l'Isolamento Termico e acustico

<sup>10</sup> Fraunhofer IBP: Fraunhofer Institute for Building Physics, application-oriented research organization

## 2.3 Edificio in esame e parametri principali

L'oggetto in esame è un edificio residenziale monofamiliare, ad un piano, con copertura a due falde su tutta la struttura.

Si tratta di un edificio prefabbricato, con struttura delle pareti portanti a telaio in legno, una copertura leggera, anch'essa in legno, con travi a vista, il tutto opportunamente isolato per garantire il massimo comfort abitativo sia in condizioni invernali sia in quelle estive. Essendo uno stabile "leggero" non necessita di fondazioni profonde e, pertanto, prevede la costruzione di un basamento in cemento armato dello spessore di 40 cm ed un relativo cordolo di 20 cm di altezza per creare un appoggio alle pareti portanti.

Per garantire l'areazione e la salubrità dell'edificio è stato previsto un vespaio areato ad "igloo" di 60 cm sovrapposto alla platea in cemento.

Ubicato in zona collinare, nelle colline intorno a Chieri (TO), l'edificio sarà costruito su piani sfalsati per assecondare il profilo naturale del terreno.

La struttura si compone di una zona giorno, cucina e soggiorno open-space, e di una zona notte con tre camere da letto e tre bagni. Sul lato est, adiacente alla casa, è presente la struttura del garage.

All'esterno, in fronte al salone, è presente un porticato di notevoli dimensioni, progettato sia per garantire un riparo esterno in prossimità dell'abitazione, sia per favorire l'ombreggiamento estivo nei confronti delle due grandi vetrate del salone esposte a sud.

Su tutto il perimetro della copertura è presente uno sporto del tetto non coibentato per garantire l'ombreggiamento estivo e per ridurre, di conseguenza, anche l'apporto termico sulle pareti perimetrali e sugli infissi trasparenti.

## La geometria

Di seguito sono presentate le piante ed i prospetti dell'edificio in esame.

### 1) Pianta dell'edificio

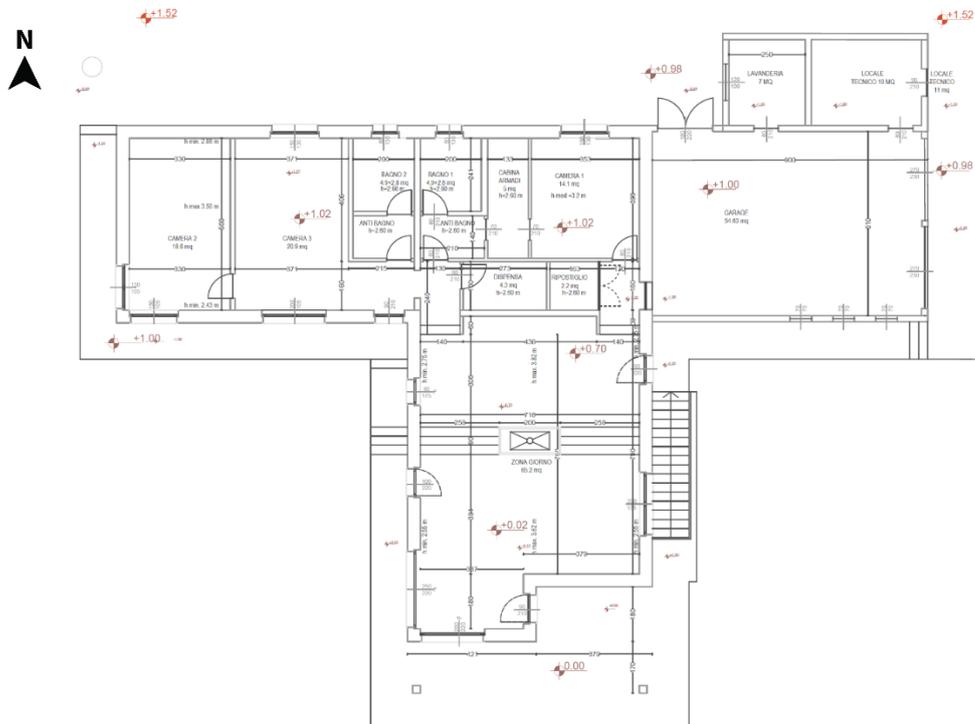


Figura 2.1 Pianta piano terra

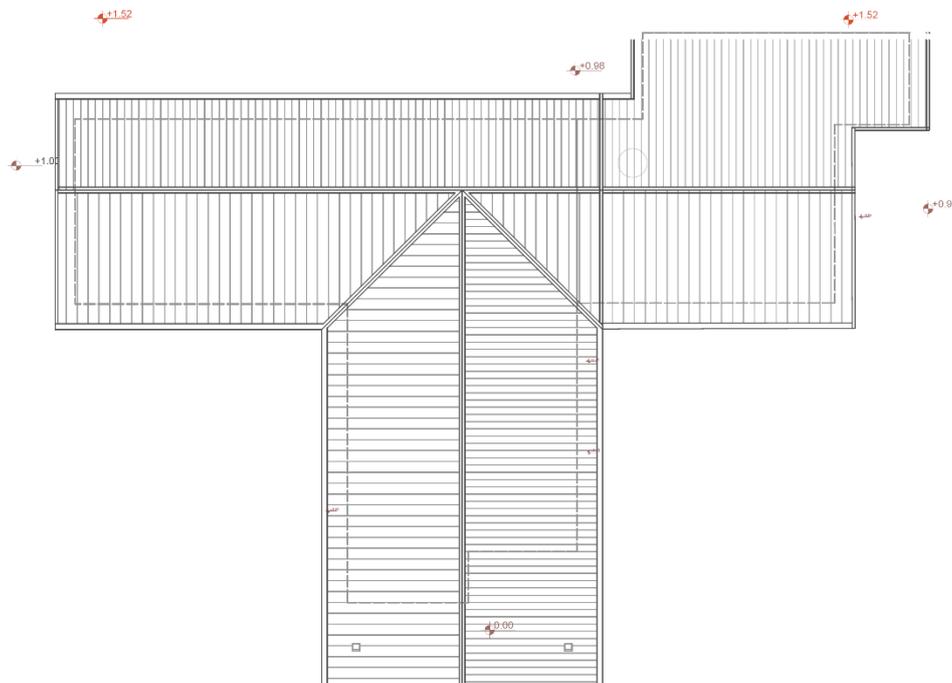


Figura 2.2 Pianta della copertura

## Prospetti dell'edificio

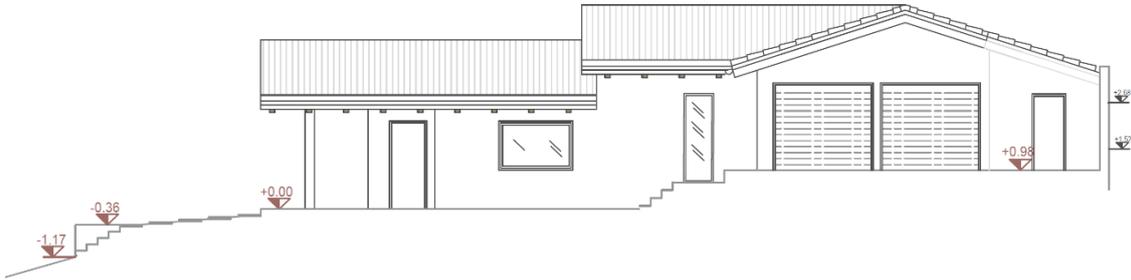


Figura 2.3 Prospetto est



Figura 2.4 Prospetto ovest

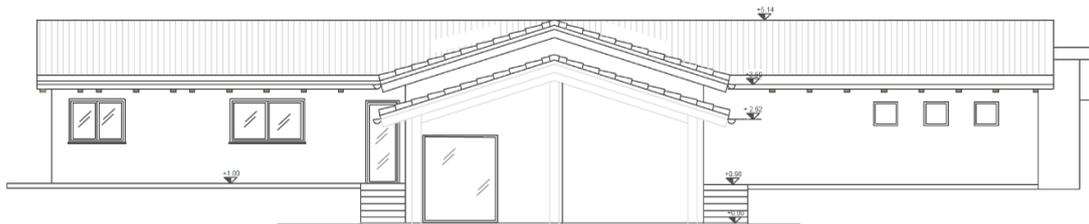


Figura 2.5 Prospetto sud

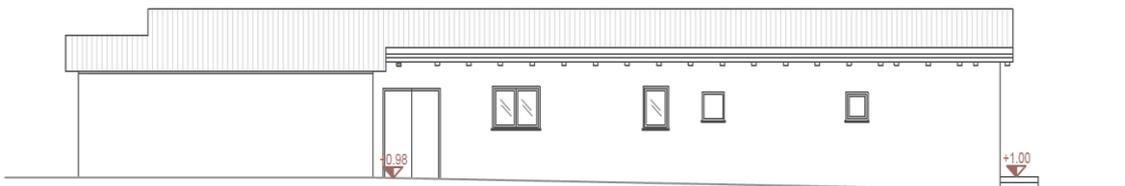


Figura 2.6 Prospetto nord

### Parametri geometrici dell'edificio

Nella tabella 2.1 è riportato un riepilogo dei principali parametri geometrici dell'edificio in esame, utilizzati come dati di input per le analisi igrometriche e termiche.

<b>Principali parametri geometrici</b>		
Pareti portanti esterne	148	m <sup>2</sup>
Pareti portanti esterne garage	52	m <sup>2</sup>
Copertura coibentata	176	m <sup>2</sup>
Copertura non coibentata	89	m <sup>2</sup>
Copertura coibentata garage	81	m <sup>2</sup>
Pavimentazione	163	m <sup>2</sup>
Pavimentazione garage	75	m <sup>2</sup>
Infissi abitazione	33	m <sup>2</sup>
Infissi garage	21	m <sup>2</sup>
Volume abitato	513	m <sup>3</sup>
Volume garage	219	m <sup>3</sup>
Volume vespaio	119	m <sup>3</sup>

*Tabella 2.1 Parametri geometrici dell'edificio*

### Modello 3D dell'edificio

Attraverso il software Skechup PRO è stato creato un modello 3D del progetto.

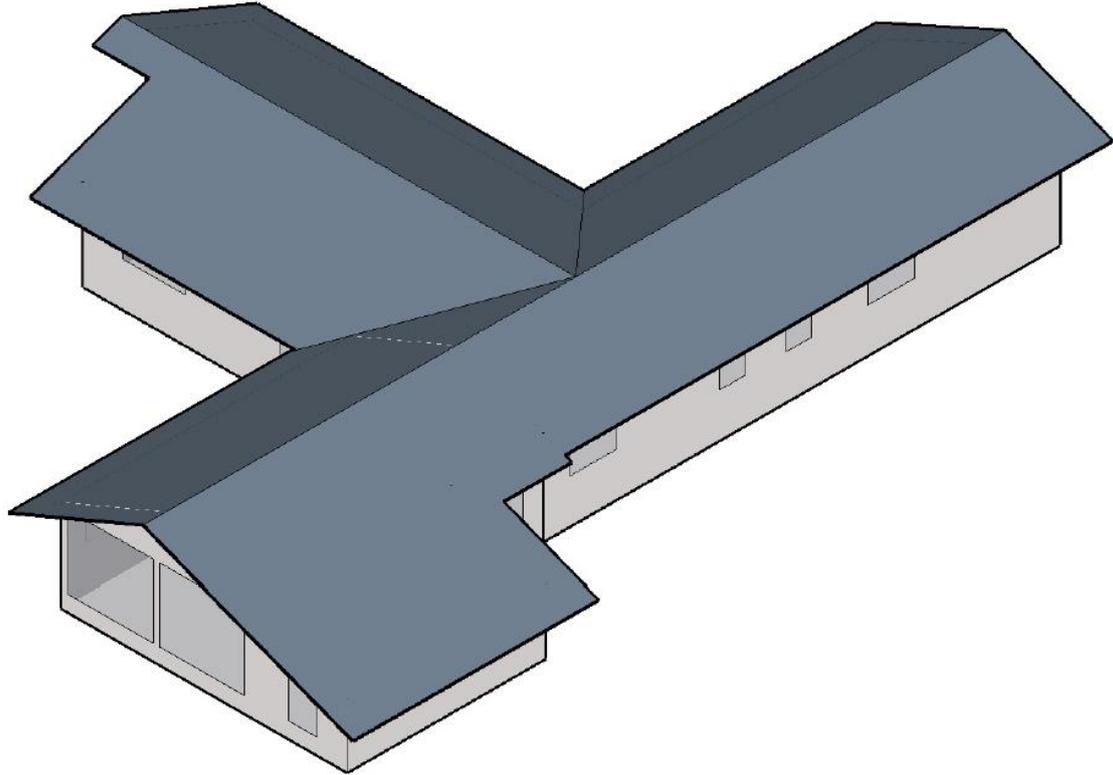
Sono state previste alcune semplificazioni alla geometria dell'edificio con l'intento di aumentare la velocità computazionale del software di simulazione ma senza modificare i parametri chiave dell'analisi come i volumi e le superfici esposte.

Le semplificazioni apportate sono:

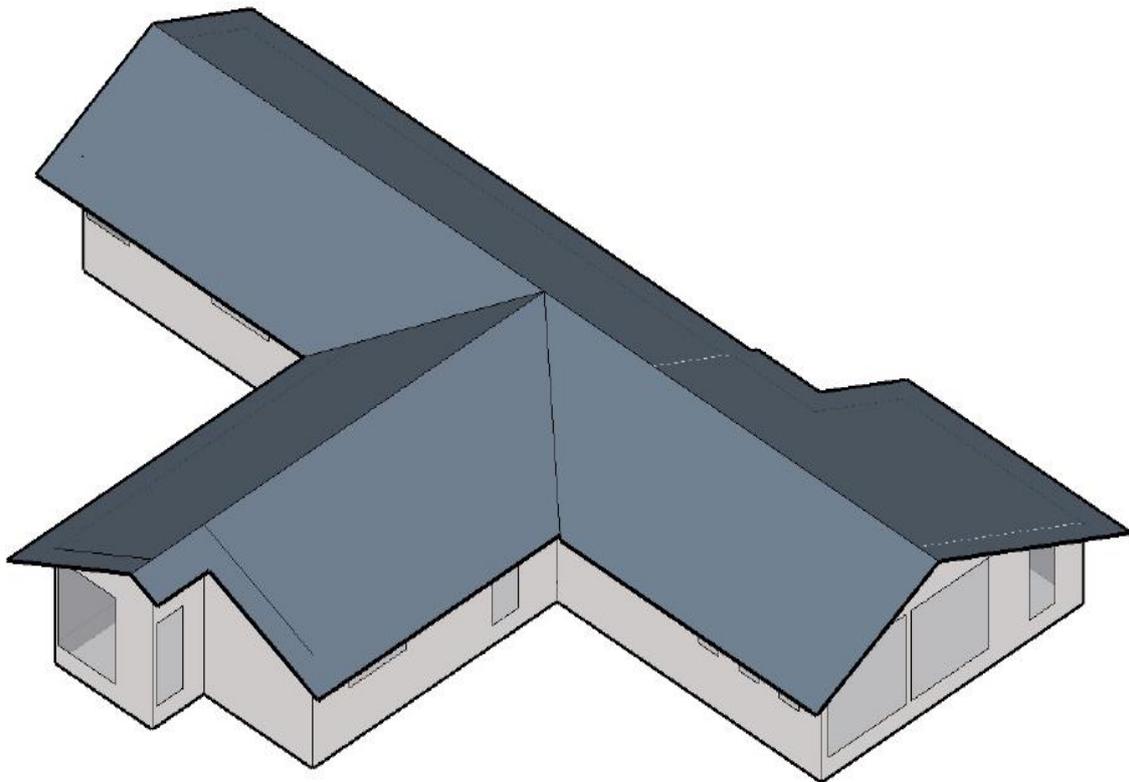
- L'eliminazione dei diversi piani sfalsati, creando così un edificio mono-piano, mantenendo invariata la volumetria interna.
- Non sono stati considerati i divisori interni creando così un edificio diviso in tre zone: l'ambiente abitativo, la zona garage e la zona vespaio areato.

Il modello 3D, oltre a fornire un maggiore dettaglio ai disegni 2D, è necessario per le successive analisi del fabbisogno dell'intero edificio.

Infatti, rappresenta il modello di layout da importare successivamente nell'analisi del fabbisogno energetico nel software WUFI PLUS.



*Figura 2.7 Assonometria modello 3D, vista nord-est*



*Figura 2.8 Assonometria modello 3D, vista sud-est*

## **2.4 Analisi delle strutture portanti**

### **2.4.1 Descrizione dell'analisi**

In questo paragrafo sono esposti i parametri ed i risultati delle analisi per le varianti delle pareti e delle coperture prese in considerazione per questo progetto.

Partendo dall'analisi relativa alla situazione di progetto sono state cercate soluzioni alternative atte a migliorare non tanto l'aspetto termico, di fatto già altamente efficiente, ma aspetti di durabilità dei materiali putrescenti, andando a simulare diverse metodologie costruttive, fino ad arrivare a possibili sostituzioni di materiale per semplificare le fasi di costruzione e di cantiere.

Attraverso il software WUFI PRO sono stati analizzati, tramite simulazioni in regime statico e dinamico, le caratteristiche delle componenti opache dell'involucro, simulando la formazione di umidità all'interno di ogni singolo materiale della stratigrafia in esame. In particolare, la finalità dell'analisi riguarda la valutazione dell'umidità relativa interna allo strato di OSB\3 più, il quale risulta quello più critico tra i materiali putrescenti presenti avendo anche funzione strutturale.

Il software simula le condizioni climatiche esterne prendendo i dati da un suo database interno e, in questo caso, sono state utilizzate quelle di Torino, ritenute idonee per la località dove risulta ubicato l'edificio, a circa 25 km di distanza dal capoluogo piemontese.

Per il profilo di simulazione sono stati presi in esame quattro anni, dal 1° gennaio 2020 al 31 dicembre 2023, per tener conto delle condizioni iniziali, appena dopo la costruzione, che influenzano notevolmente l'andamento durante tutto il primo anno.

Per l'analisi dei risultati è stato quindi valutato il range temporale compreso tra 1 agosto 2021 e il 31 settembre 2022, assunto come anno "tipo", in cui i valori simulati assumono un carattere periodico stabile, permettendone l'esportazione per le analisi successive.

### **Simulazione dinamica**

In questa sezione sono analizzate diverse strutture e modalità costruttive delle pareti portanti e delle coperture.

Partendo dalla struttura di progetto, sono state analizzate diverse varianti ottenute non solo modificando spessori e materiali della stratigrafia, ma anche studiando la possibilità di costruire una parete ventilata.

Appunto quest'ultima tipologia costruttiva rappresenterà il tema centrale di questo elaborato, poiché la facciata ventilata permette una migliore areazione dell'intero blocco

parete, migliorandone il comportamento igrometrico durante la stagione fredda e il comportamento termico durante quella calda.

In aggiunta si adatta perfettamente alle costruzioni “a secco”, non incidendo in maniera eccessiva sui costi di costruzione.

### Parametri di input

Di seguito sono riportati i parametri di input utilizzati nel software per la caratterizzazione della simulazione.

Sono suddivisi in tre categorie, inerenti all’elemento costruttivo, alle impostazioni di calcolo ed infine alle condizioni climatiche.

#### - Elemento costruttivo

I primi parametri inseriti, geometrici e termici, riguardano l’elemento costruttivo (Tabella 2.2) e sono i medesimi per tutte le varianti.

Le diverse stratigrafie proposte sono elencate, invece, nella sezione seguente.

<b>Parametri elemento costruttivo parete</b>	
Orientamento	Nord
Inclinazione [°]	90
Carico di pioggia	Secondo ASHRAE Standard 160
Coeff. Trasmissione superficiale – Sup. esterna	Correlato al vento
Valore Sd – Sup. esterna [m]	Senza pittura o vernice
Coeff. Assorbimento onde corte [-]	0,2 - chiaro
Coeff. Assorbimento onde lunghe [-]	0,9
Riflessione a onde corte del terreno [-]	0,26 – Terreno con erba fresca
Coeff. Assorbimento pioggia	0,7 – In funzione dell’inclinazione
Resistenza termica superficie interna [(m <sup>2</sup> K) /W]	0,125
Valore Sd – Sup. interna [m]	0,01 – Pittura ai silicati
Umidità iniziale nell’elemento costruttivo	Costante su tutto l’elemento
Temperatura iniziale nell’elemento costruttivo	Costante su tutto l’elemento
Umidità relativa iniziale [-]	60%
Temperatura iniziale [°C]	10

*Tabella 2.2 Parametri elemento costruttivo parete*

<b>Parametri elemento costruttivo copertura</b>	
Orientamento	Nord
Inclinazione [°]	20
Carico di pioggia	1
Coeff. Trasmissione superficiale – Sup. esterna	Correlato al vento
Valore Sd – Sup. esterna [m]	Senza pittura o vernice
Coeff. Assorbimento onde corte [-]	0,68 – Mattone argilla, rosso
Coeff. Assorbimento onde lunghe [-]	0,9
Fattore di riduzione per ombreggiamenti per l'assorbanza [-]	1,0 – Nessun ombreggiamento
Fattore di riduzione per ombreggiamenti per l'emissività [-]	1,0
Bilancio radiativo esplicito	Si
Riflessione a onde corte del terreno [-]	0,26 – Terreno con erba fresca
Coeff. Assorbimento pioggia	1,0 – In funzione dell'inclinazione
Resistenza termica superficie interna [(m <sup>2</sup> K) /W]	0,125
Valore Sd – Sup. interna [m]	Senza pittura o vernice
Umidità iniziale nell'elemento costruttivo	Costante su tutto l'elemento
Temperatura iniziale nell'elemento costruttivo	Costante su tutto l'elemento
Umidità relativa iniziale [-]	60%
Temperatura iniziale [°C]	10

Tabella 2.3 Parametri elemento costruttivo copertura

Alcuni parametri, come l'orientamento e l'umidità relativa iniziale, sono stati scelti al fine di rappresentare meglio una situazione più critica per l'elemento costruttivo.

Non sono presenti i valori riguardanti la vernice esterna poiché questa è stata inserita come strato all'interno della stratigrafia stessa per la valutazione del suo comportamento igrometrico.

Infine, la temperatura iniziale interna di 10°C è stata ipotizzata come temperatura media plausibile nel periodo di gennaio in cui avviene l'inizio della simulazione.

- Impostazioni di calcolo

Inizio della simulazione	01/01/2020
Fine della simulazione	01/01/2023
Passo temporale [h]	1
Modalità di calcolo	Calcolo del trasporto termico
Modalità di calcolo	Calcolo del trasporto di umidità
Geometria	Cartesiano

*Tabella 2.4 Impostazioni di calcolo*

Come già precedentemente indicato, la simulazione è stata svolta su quattro anni al fine di garantire una periodicità costante dell'andamento dell'umidità interna ai singoli strati, non più influenzata dalle condizioni iniziali.

Lo step temporale scelto è di 1 [h], ritenuto come ottimale per il dettaglio cercato nella simulazione. Un'ulteriore diminuzione dello step temporale comporterebbe solamente una diminuzione della velocità di simulazione.

- Condizioni climatiche

Zona climatica	Torino
Latitudine [°]	45,00 N
Longitudine [°]	7,68 E
Altitudine s.l.m. [m]	267
Zona oraria	1
EN 15026/WTA 6-2	
Umidità relativa	Carico d'umidità medio +5%(progetto)
UNI EN ISO 13788	
Umidità relativa	Classe di umidità 3
Valor medio temperatura [°C]	20
ASHRAE 160	
Tipo di AC	Riscaldamento
Modifica della temperatura interna variabile [°C]	2,8
Set-point per il riscaldamento	21,1
Ricambio d'aria	Costruzione standard
Volume dell'edificio [m <sup>3</sup> ]	513,26

*Tabella 2.5 Condizioni climatiche*

Come detto in precedenza la località è quella di Torino e data la distanza minima rispetto alla locazione dell'edificio di circa 25 km, non rappresenta fonte di incertezza.

Nei grafici seguenti (grafici 2.1 e 2.2) viene riportato l'andamento della temperatura e dell'umidità esterne relative ad un anno campione.

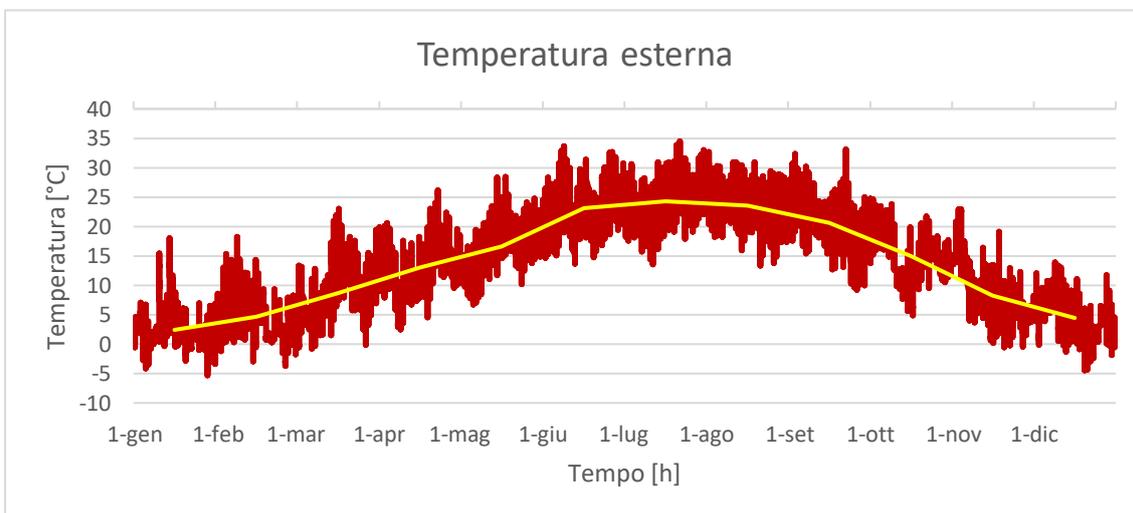


Grafico 2.1 Temperatura esterna a Torino

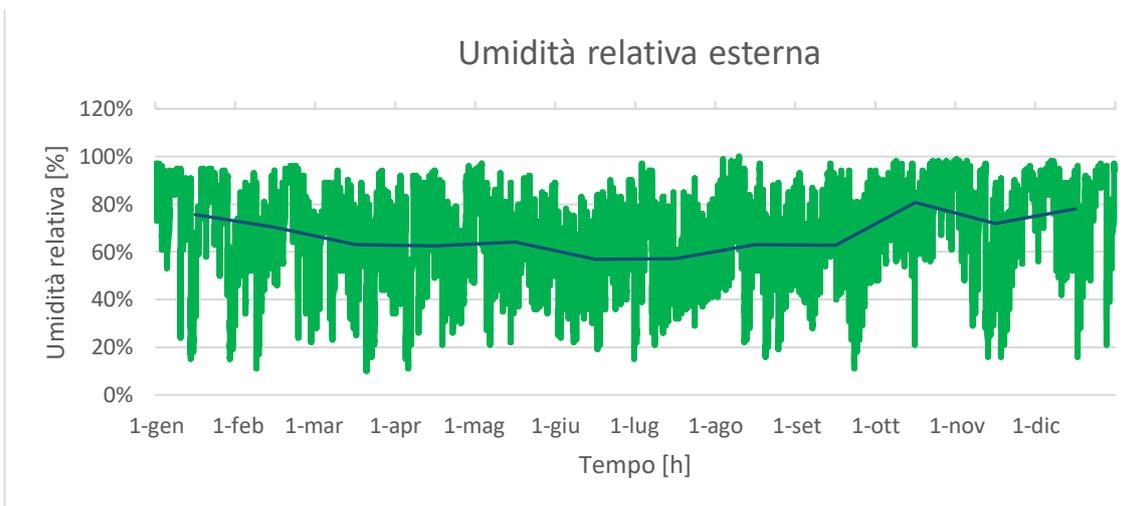


Grafico 2.2 Umidità relativa esterna

## 2.4.2 Configurazioni delle stratigrafie

Nella sezione seguente sono elencate ed analizzate singolarmente le diverse soluzioni prese in esame, suddivise in pareti e coperture.

### Materiali e relative proprietà

Materiale	Densità [kg/m <sup>3</sup> ]	Porosità [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	Calore specifico [J/kg K]	Conducibilità [W/m K]	Resistenza al vapore [-]
Vernice esterna	1550,0	0,275	840	0,371	86,7
Intonaco esterno	1850,0	0,240	850	1,200	19,0
Lastra fibrogesso rinforzato per esterni	1100,0	0,520	1200	0,192	113,0
Membrana impermeabile	124,0	0,600	1500	0,420	3000,0
Pannello in fibra di vetro per cappotto	35,0	0,999	1030	0,038	1,2
Pannello in fibra di vetro	11,5	0,999	840	0,038	1,2
Pannello di OSB\3	595,0	0,850	1699	0,105	120,0
Lastra in fibrogesso rinforzata per interni	960,0	0,480	1030	0,026	28,0
Barriera al vapore	130,0	0,001	2300	2,300	100000,0
Pannello in fibra di legno	140,0	0,910	1400	0,039	3,0
Pannello in gessofibra strutturale	1153,0	0,520	1200	0,320	16,0
Lastra di cartongesso	850,0	0,650	850	0,200	8,3

Tabella 2.6 Proprietà fisiche e termiche dei materiali che compongono le stratigrafie delle pareti portanti

Materiale	Densità [kg/m <sup>3</sup> ]	Porosità [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	Calore specifico [J/kg K]	Conducibilità [W/m K]	Resistenza al vapore [-]
Coppi	1410,0	0,196	840	0,400	16,0
Pannello in fibra di legno HD	320,0	0,970	1880	0,053	16,8
Pannello in fibra di legno MD	160,0	0,910	2100	0,041	3,0
Membrana impermeabile	150,0	0,001	2300	2,300	2000,0
Barriera al vapore	330,0	0,001	1799	0,300	25000,0
Perlina in abete	400,0	0,900	1880	0,086	552,0
Pannello in fibra di legno legata con cemento	400,0	0,640	1810	0,065	5,0
Pannello in OSB\3	595,0	0,850	1699	0,105	120,0
Lastra in fibrogesso rinforzata per interni	960,0	0,480	1030	0,026	28,0

Tabella 2.7 Proprietà fisiche e termiche dei materiali che compongono le stratigrafie della copertura

## Pareti portanti dell'abitazione

È possibile ipotizzare alcuni miglioramenti per diminuire ulteriormente la quantità di umidità interna, andando a ridurre lo spessore degli strati isolanti (date le notevoli prestazioni termiche, altamente superiori a quelle richieste dalla Legge) e simulando una ventilazione in facciata.

Soluzione	Descrizione
Parete portante esterna di progetto	Configurazione di progetto
Parete portante esterna di progetto variante ventilata	Configurazione di progetto con implementazione di una facciata ventilata
Parete portante esterna Variante 1	Configurazione con controparete interna non isolata
Parete portante esterna Variante 2	Configurazione con cappotto esterno ridotto
Parete portante esterna Variante 3	Configurazione combinata con controparete interna non isolata e cappotto di spessore ridotto
Parete portante esterna Variante 4	Configurazione con spessori dei pannelli di OSB\3 variabili
Parete portante esterna Variante 5	Configurazione con differenti materiali in sostituzione ai pannelli di OSB\3

*Tabella 2.8 Riepilogo stratigrafie delle pareti portanti esterne*

La tabella 2.8 riepiloga le tipologie di configurazioni studiate in questa prima parte dell'elaborato, le quali verranno analizzate nel dettaglio nella sezione dedicata.

## Parete portante esterna di progetto

### Stratigrafia



Strato	Materiale	Spessore
Esterno		
1	Vernice esterna	0,002 m
2	Intonaco esterno	0,015 m
3	Lastra in fibrogesso rinforzato per esterni	0,013 m
4	Intercapedine non ventilata	0,010 m
5	Membrana impermeabile	0,001 m
6	Pannello in fibra di vetro	0,100 m
7	Pannello di OSB3	0,018 m
8	Pannello in fibra di legno media densità	0,160 m
9	Pannello di OSB3	0,018 m
10	Pannello in fibra di vetro	0,045 m
11	Lastra in fibrogesso rinforzato per interni	0,025 m
Interno		

Valori Stratigrafia	
Valore Sd interno [m]	0,01
Spessore totale [m]	0,407
Trasmittanza termica periodica [W/(m <sup>2</sup> K)]	0,020
Trasmittanza termica [W/(m <sup>2</sup> K)]	0,113

Riepilogo Risultati	
Durata della misurazione:	01/08/2022 – 31/07/2023
Umidità massima pannello di OSB3:	17,4 %
Data raggiungimento umidità massima per pannello OSB3:	19/05/2023
Umidità massima pannello di fibra di legno:	10 %
Data raggiungimento umidità massima per pannello di fibra di legno:	31/11/2022

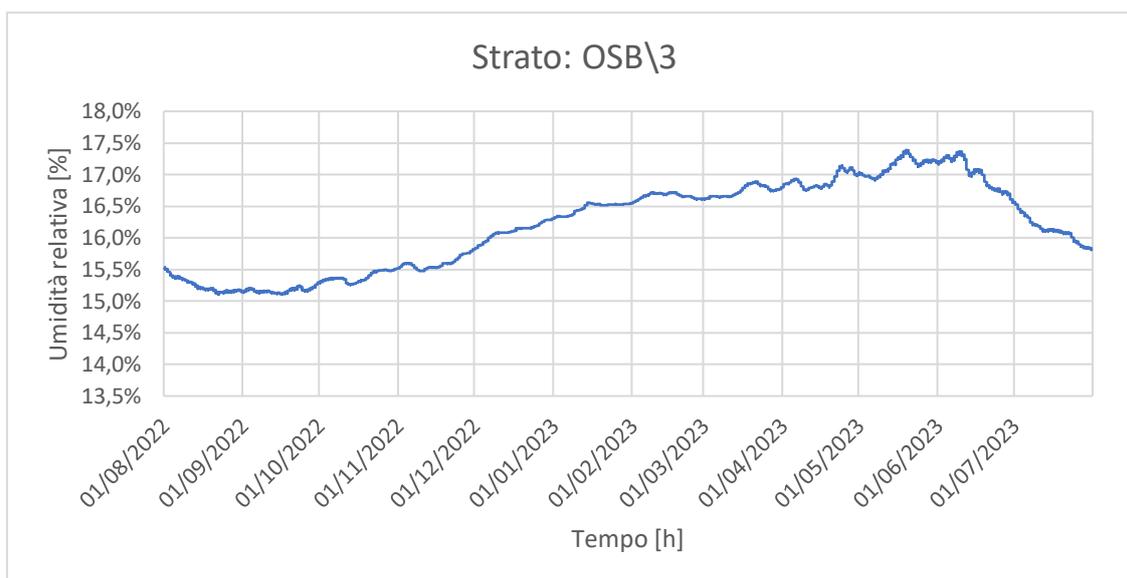


Grafico 2.3 Andamento dell'umidità relativa interna allo strato di OSB\3

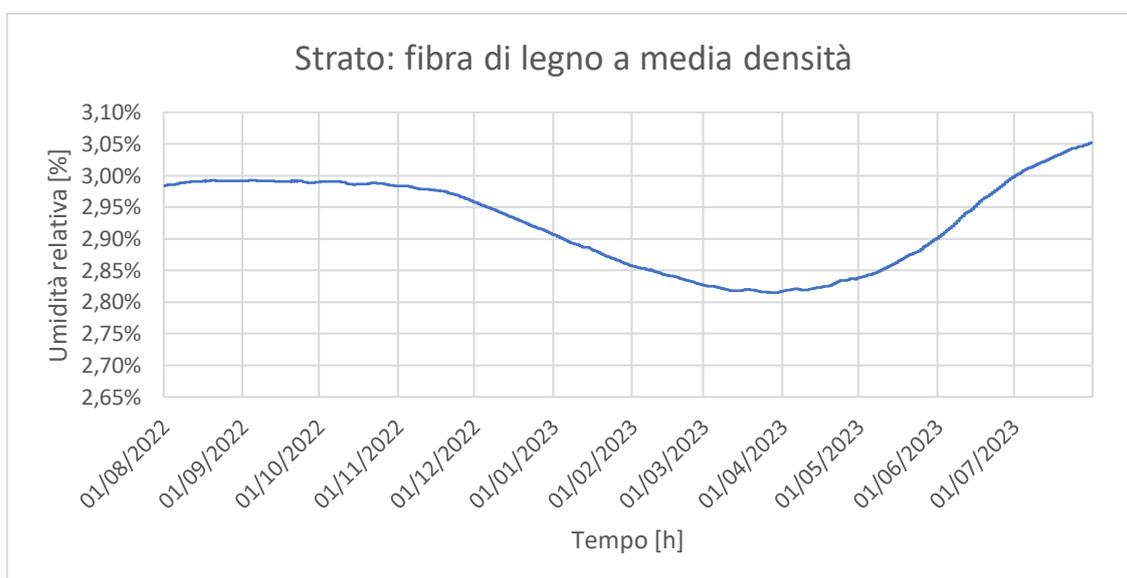


Grafico 2.4 Andamento dell'umidità relativa interna allo strato di fibra di legno

Questa configurazione rappresenta la stratigrafia di progetto, la quale verrà presa come riferimento per tutti i confronti futuri.

Si tratta di una soluzione già ampiamente collaudata e che non presenta criticità evidenti dal punto di vista igrometrico poiché, in tutti gli strati, i valori sono al di sotto dei limiti di umidità.

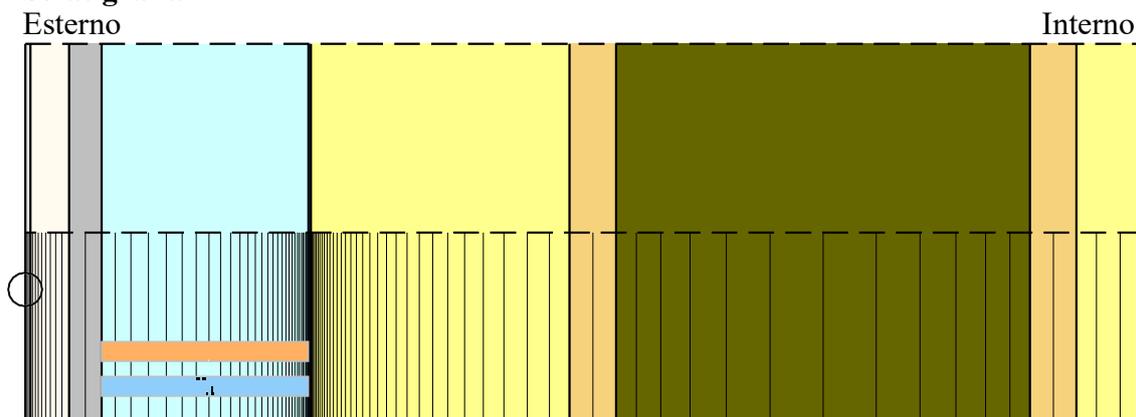
Dal primo grafico (grafico 2.3) si può però notare come in determinate situazioni si raggiungano livelli di umidità superiori al 15 % in massa all'interno dello strato di OSB\3 più esterno.

Il secondo grafico (grafico 2.4) rappresenta, invece, l'andamento dell'umidità all'interno dello strato isolante in fibra di legno interposta tra i due pannelli di OSB\3.

Gli andamenti dei due grafici presentano notevoli differenze, in quanto lo strato di OSB\3 risente maggiormente dell'umidità sia esterna che interna che si accumula su di esso a causa dei collanti presenti nella sua struttura.

## Parete portante esterna Variante progetto ventilata

### Stratigrafia



Strato	Materiale	Spessore
Esterno		
1	Vernice esterna	0,002 m
2	Intonaco esterno	0,015 m
3	Lastra in fibrogesso rinforzato per esterni	0,013 m
4	Intercapedine ventilata	0,080 m
5	Membrana impermeabile	0,001 m
6	Pannello in fibra di vetro	0,100 m
7	Pannello di OSB3	0,018 m
8	Pannello in fibra di legno media densità	0,160 m
9	Pannello di OSB3	0,018 m
10	Pannello in fibra di vetro	0,045 m
11	Lastra in fibrogesso rinforzato per interni	0,025 m
Interno		

Valori Stratigrafia	
Valore Sd interno [m]	0,010
Spessore totale [m]	0,477
Trasmittanza termica periodica [W/(m <sup>2</sup> K)]	0,019
Trasmittanza termica [W/(m <sup>2</sup> K)]	0,108

Riepilogo Risultati	
Durata della misurazione:	01/08/2022 – 31/07/2023
Umidità massima pannello di OSB3:	15,4 %
Data raggiungimento umidità massima per pannello OSB3:	18/03/2023
Umidità massima pannello di fibra di legno:	11 %
Data raggiungimento umidità massima per pannello di fibra di legno:	23/07/2023

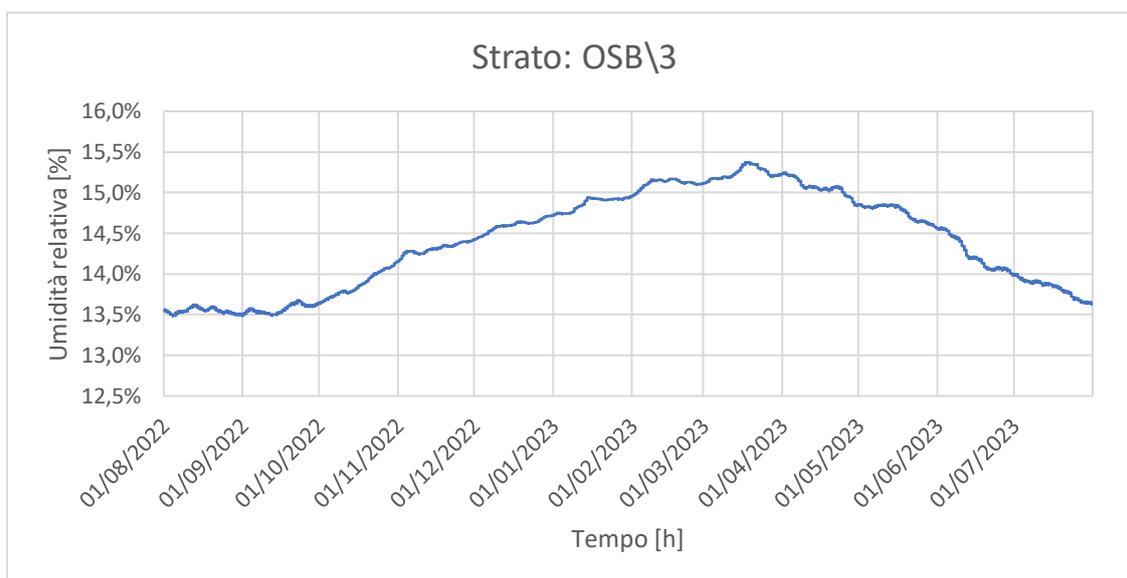


Grafico 2.5 Andamento dell'umidità relativa interna allo strato di OSB\3

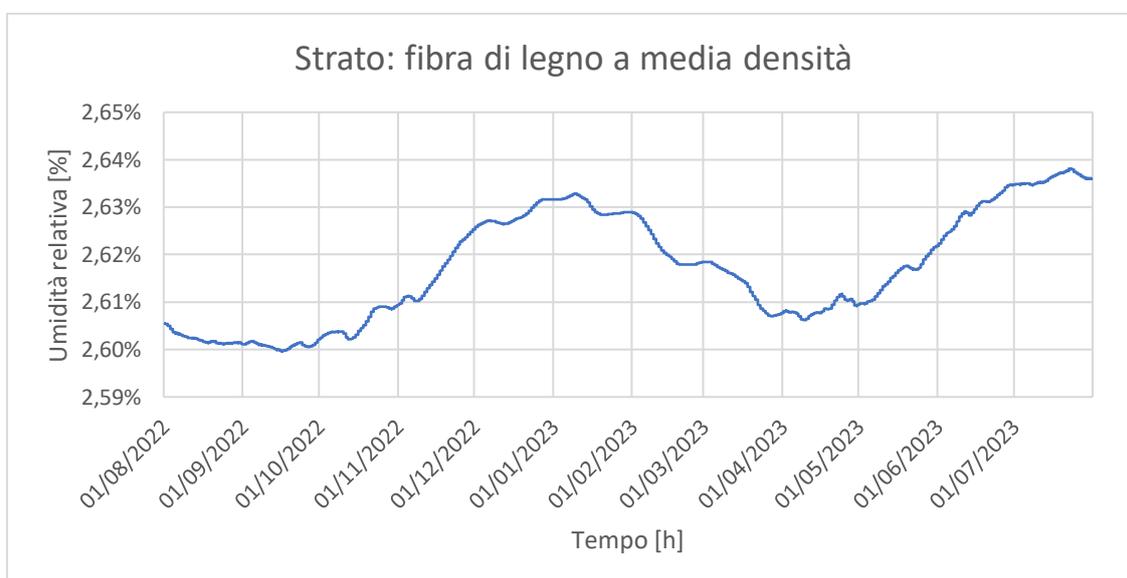


Grafico 2.6 Andamento dell'umidità relativa interna allo strato di fibra di legno

Questa configurazione prevede l'aggiunta della facciata ventilata alla soluzione di progetto.

Questa modifica è stata presa in considerazione sia per i vantaggi in termini prestazionali e di riduzione dell'umidità sia per la conveniente interazione con la struttura "a secco".

Infatti, la sua realizzazione non genera elevati costi aggiuntivi come nel caso di una soluzione tradizionale.

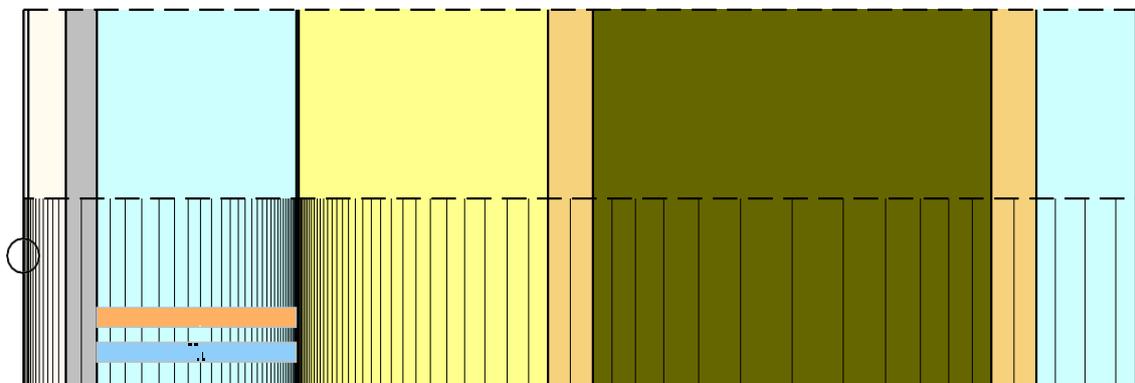
I risultati mostrano una riduzione notevole dell'umidità relativa allo strato del pannello strutturale e, inoltre, la soluzione garantisce notevoli miglioramenti delle caratteristiche termiche dell'involucro durante il periodo estivo.

## Parete portante esterna Variante 1

### Stratigrafia

Esterno

Interno



Strato	Materiale	Spessore
Esterno		
1	Vernice esterna	0,002 m
2	Intonaco esterno	0,015 m
3	Lastra in fibrogesso rinforzato per esterni	0,013 m
4	Intercapedine ventilata	0,080 m
5	Membrana impermeabile	0,001 m
6	Pannello in fibra di vetro	0,100 m
7	Pannello di OSB3	0,018 m
8	Pannello in fibra di legno media densità	0,160 m
9	Pannello di OSB3	0,018 m
10	Intercapedine non ventilata	0,045 m
11	Lastra in fibrogesso rinforzato per interni	0,025 m
Interno		

Valori Stratigrafia	
Valore Sd interno [m]	0,010
Spessore totale [m]	0,472
Trasmittanza termica periodica [W/(m <sup>2</sup> K)]	0,040
Trasmittanza termica [W/(m <sup>2</sup> K)]	0,124

RIEPILOGO RISULTATI	
Durata della misurazione:	01/08/2022 – 31/07/2023
Umidità massima pannello di OSB\3:	15 %
Data raggiungimento umidità massima per pannello OSB\3:	18/03/2023
Umidità massima pannello di fibra di legno:	11 %
Data raggiungimento umidità massima per pannello di fibra di legno:	05/12/2022

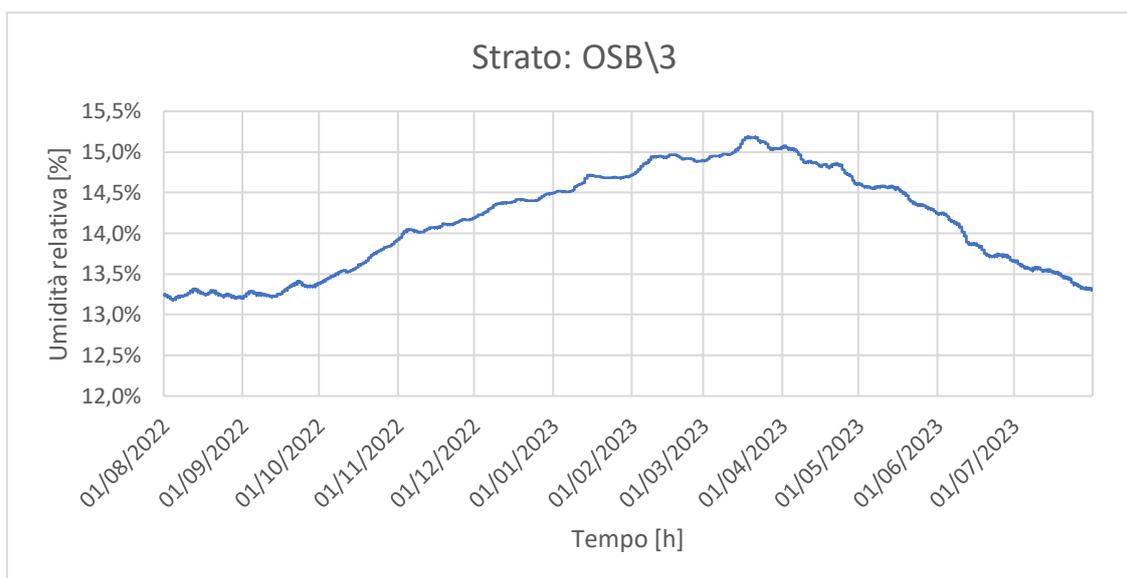


Grafico 2.7 Andamento dell'umidità relativa interna allo strato di OSB\3

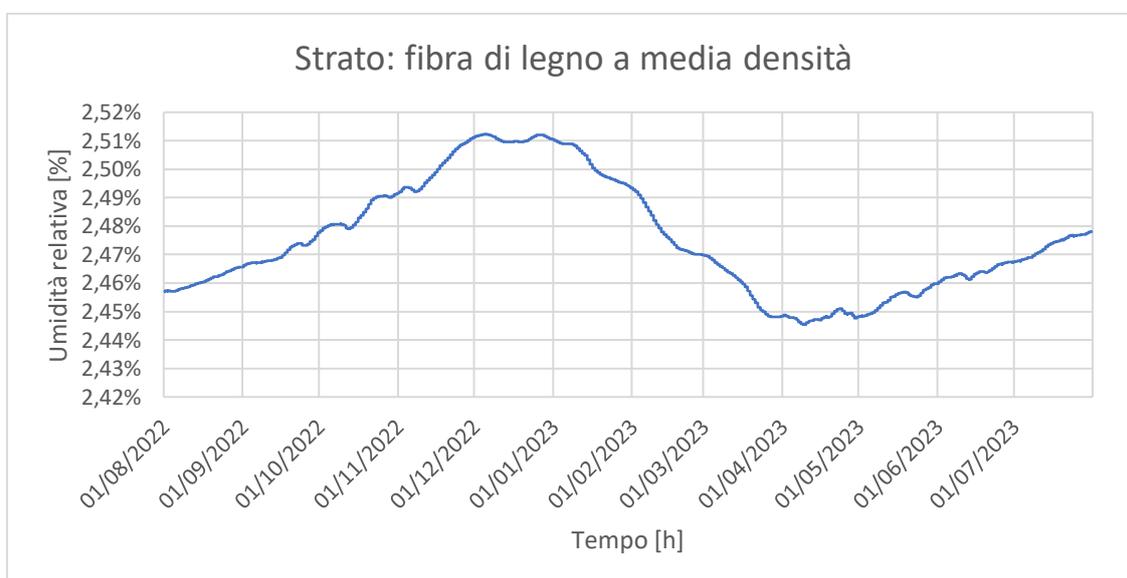


Grafico 2.8 Andamento dell'umidità relativa interna allo strato di fibra di legno

Anche questa soluzione presenta la facciata ventilata ma, a differenza del caso precedente, non è stato inserito l'isolante nell'intercapedine interna, che verrà quindi utilizzata solamente come cavedio per impianti.

La riduzione del pacchetto isolante, che garantisce una migliore traspirabilità, è stata possibile poiché la stratigrafia di progetto presenta comunque performance termiche molto elevate.

Ovviamente si avrà una leggera ripercussione sulle prestazioni termiche della parete stessa, con un leggero aumento della trasmittanza, le quali rimarranno comunque estremamente performanti.

Un altro fattore da tenere in considerazione è la diminuzione del prezzo del manufatto, al quale va sottratto il costo dell'isolante omesso.

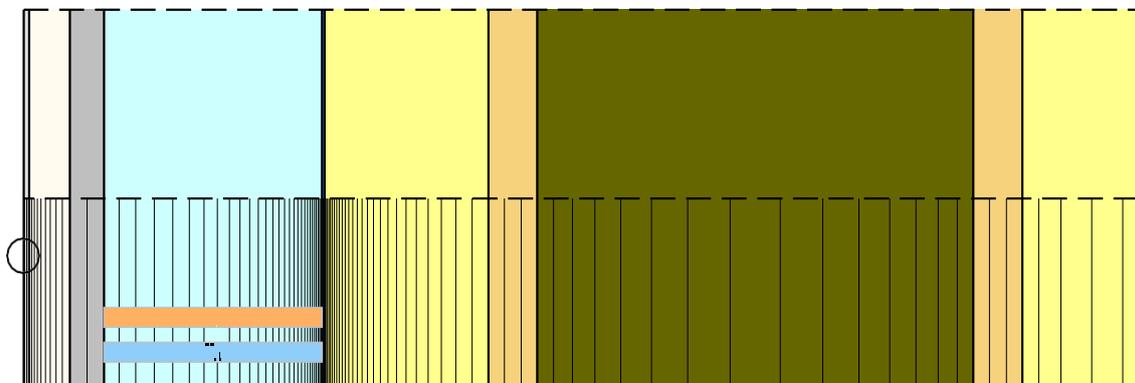
Dai grafici è possibile osservare un miglioramento notevole dal punto di vista igrometrico, dovuto sia alla ventilazione in facciata che alla maggiore traspirabilità della parete.

## Parete portante esterna Variante 2

### Stratigrafia

Esterno

Interno



Strato	Materiale	Spessore
Esterno		
1	Vernice esterna	0,002 m
2	Intonaco esterno	0,015 m
3	Lastra in fibrogesso rinforzato per esterni	0,013 m
4	Intercapedine ventilata	0,080 m
5	Membrana impermeabile	0,001 m
6	Pannello in fibra di vetro	0,060 m
7	Pannello di OSB3	0,018 m
8	Pannello in fibra di legno media densità	0,160 m
9	Pannello di OSB3	0,018 m
10	Pannello in fibra di vetro	0,045 m
11	Lastra in fibrogesso rinforzato per interni	0,025 m
Interno		

Valori Stratigrafia	
Valore Sd interno [m]	0,010
Spessore totale [m]	0,437
Trasmittanza termica periodica [W/(m <sup>2</sup> K)]	0,035
Trasmittanza termica [W/(m <sup>2</sup> K)]	0,121

Riepilogo Risultati	
Durata della misurazione:	01/08/2022 – 31/07/2023
Umidità massima pannello di OSB3:	17 %
Data raggiungimento umidità massima per pannello OSB3:	16/03/2023
Umidità massima pannello di fibra di legno:	12 %
Data raggiungimento umidità massima per pannello di fibra di legno:	29/06/2023

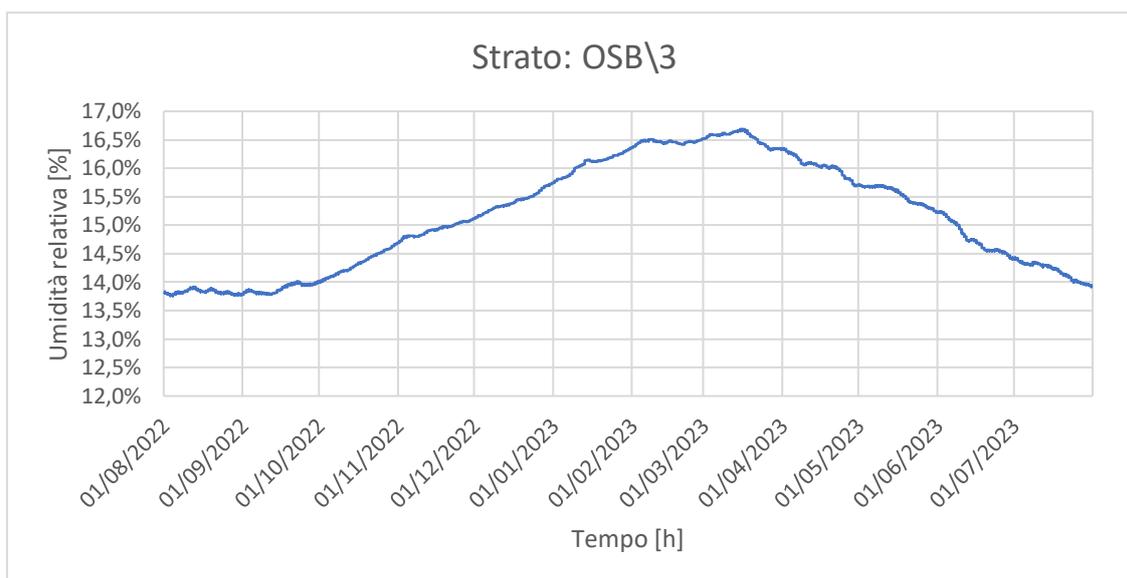


Grafico 2.9 Andamento dell'umidità relativa interna allo strato di fibra di OSB\3

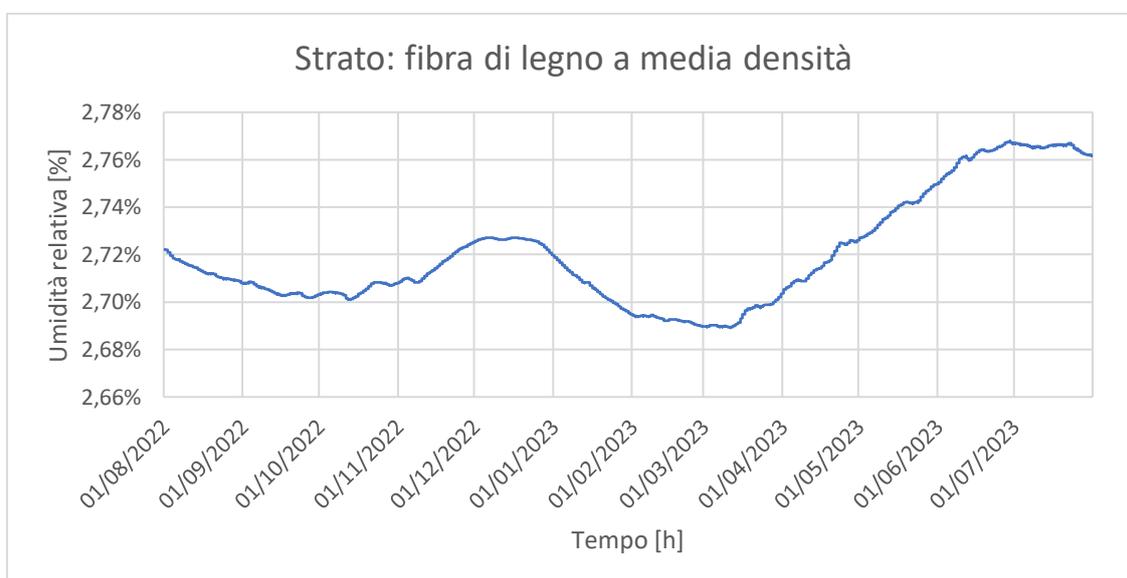


Grafico 2.10 Andamento dell'umidità relativa interna allo strato di fibra di legno

La configurazione in esame prevede la diminuzione dello strato isolante del cappotto, ora di 6 cm, sempre utilizzando la facciata ventilata, con controparete interna completamente isolata.

Anche se la parete, da un punto di vista delle caratteristiche termiche, è ancora molto al di sotto dei limiti richiesti dalla legge, non è possibile ridurre ulteriormente lo strato in esame.

In tal caso si andrebbero ad esporre eccessivamente i ponti termici relativi alle connessioni interne tra le pareti, generando così delle criticità termiche nella struttura.

Questa modifica alla stratigrafia di progetto porta ad un miglioramento rispetto all'andamento generale della curva rappresentante l'umidità relativa nello strato di OSB\3

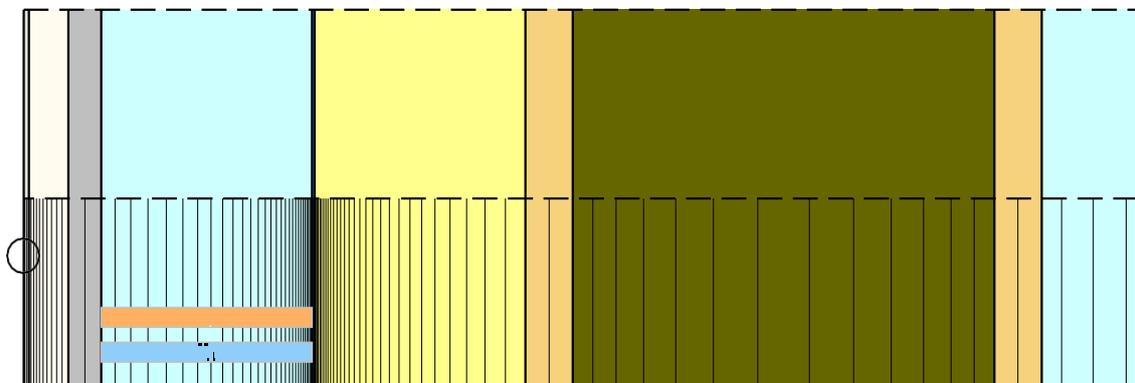
più esterno ma, tuttavia, presenta criticità dovute ad un minor isolamento verso l'esterno. Viene infatti raggiunta la temperatura di rugiada in una zona più interna della parete, con possibile formazione di condensa interstiziale.

### Parete portante esterna Variante 3

#### Stratigrafia

Esterno

Interno



Strato	Materiale	Spessore
Esterno		
1	Vernice esterna	0,002 m
2	Intonaco esterno	0,015 m
3	Lastra in fibrogesso rinforzato per esterni	0,013 m
4	Intercapedine ventilata	0,080 m
5	Membrana impermeabile	0,001 m
6	Pannello in fibra di vetro	0,080 m
7	Pannello di OSB3	0,018 m
8	Pannello in fibra di legno media densità	0,160 m
9	Pannello di OSB3	0,018 m
10	Intercapedine non ventilata	0,045 m
11	Lastra in fibrogesso rinforzato per interni	0,025 m
Interno		

Valori Stratigrafia	
Valore Sd interno [m]	0,010
Spessore totale [m]	0,452
Trasmittanza termica periodica [W/(m <sup>2</sup> K)]	0,045
Trasmittanza termica [W/(m <sup>2</sup> K)]	0,127

Riepilogo Risultati	
Durata della misurazione:	01/08/2022 – 31/07/2023
Umidità massima pannello di OSB3:	16 %
Data raggiungimento umidità massima per pannello OSB3:	18/03/2023
Umidità massima pannello di fibra di legno:	11 %
Data raggiungimento umidità massima per pannello di fibra di legno:	27/12/2022

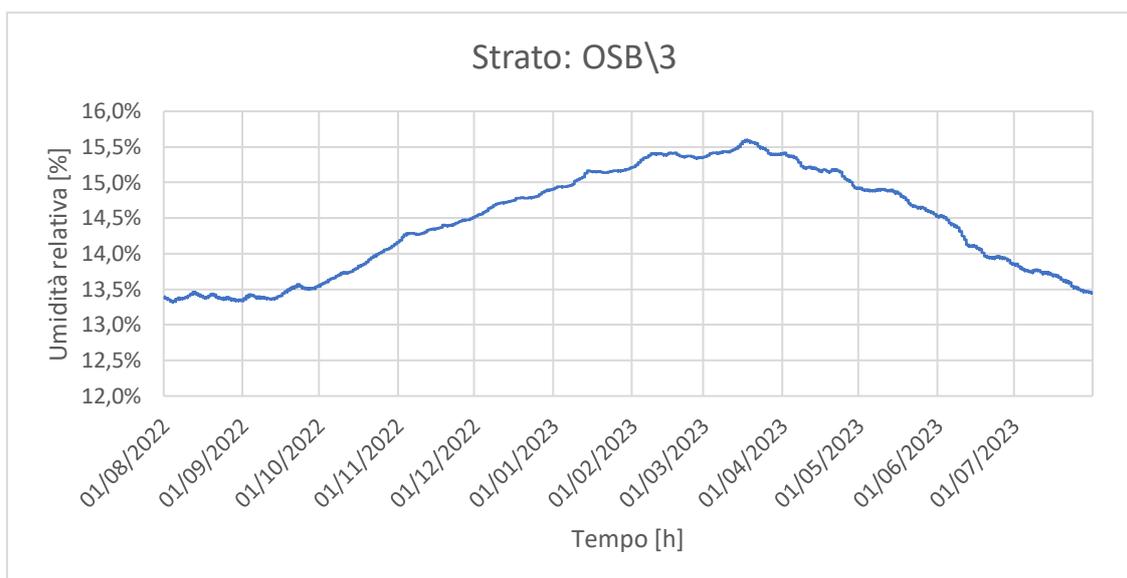


Grafico 2.11 Andamento dell'umidità relativa interna allo strato di OSB\3

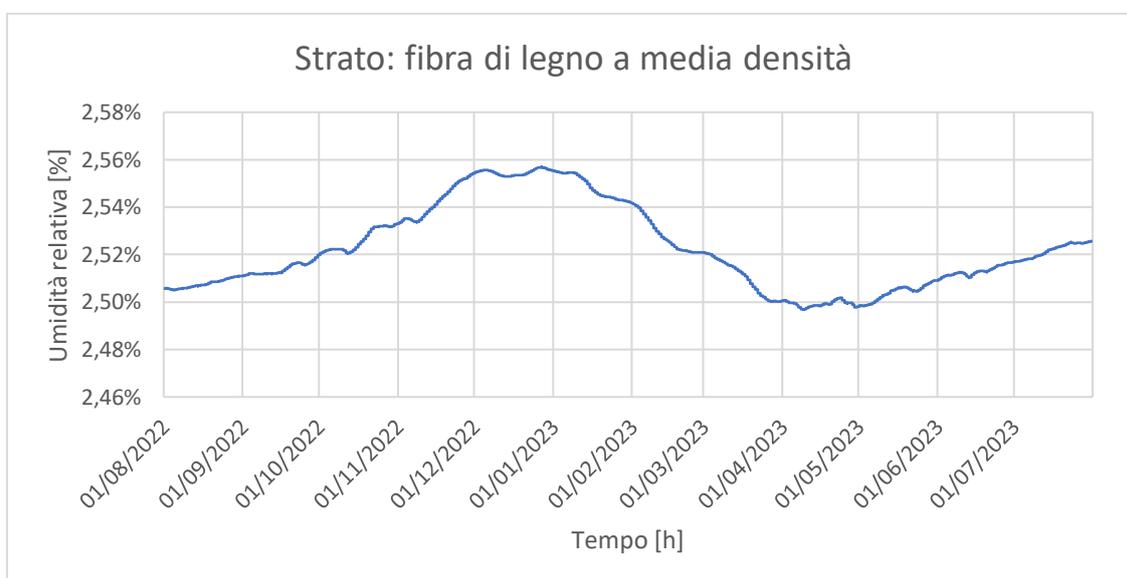


Grafico 2.12 Andamento dell'umidità relativa interna allo strato di fibra di legno

L'ipotesi di questa soluzione nasce dalla volontà analizzare contemporaneamente l'aspetto economico e quello tecnico. I risultati in termini igrometrici, riguardanti quindi la durata e il mantenimento del manufatto, sono ottimi ma, essendo un caso studio reale, l'aspetto economico gioca un ruolo fondamentale.

L'idea di questa soluzione nasce quindi dall'integrazione delle due soluzioni precedenti, opportunamente modificate, al fine di garantire una diminuzione del parametro umidità riducendo al contempo la differenza di costo rispetto alla stratigrafia di progetto.

La configurazione si presenta quindi con una controparete non isolata adibita a cavedio per impianti e uno strato di isolante in fibra di vetro che compone il cappotto ridotto di

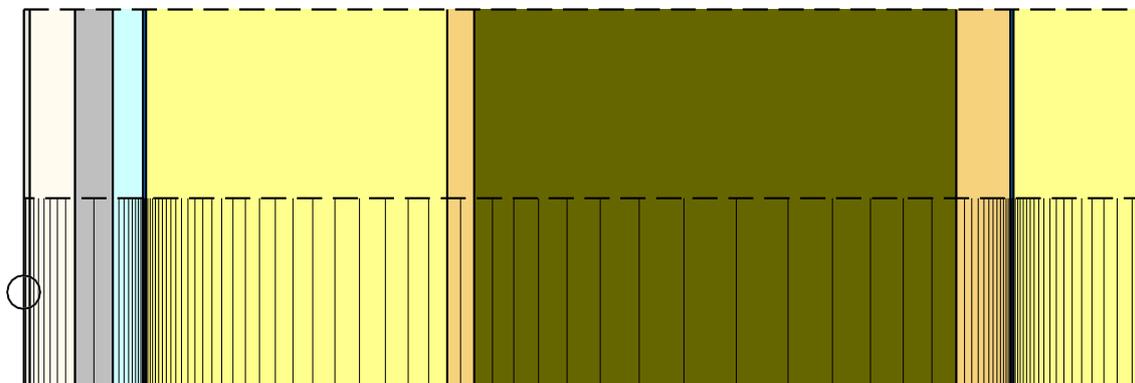
soli 2 cm; si arriva così ad uno spessore di 8 cm che garantisce una corretta protezione dei ponti termici e un ottimo isolamento dall'esterno dell'edificio.

## Parete portante esterna Variante 4

### Stratigrafia

Esterno

Interno



Strato	Materiale	Spessore
Esterno		
1	Vernice esterna	0,002 m
2	Intonaco esterno	0,015 m
3	Lastra in fibrogesso rinforzato per esterni	0,013 m
4	Intercapedine non ventilata	0,010 m
5	Membrana impermeabile	0,001 m
6	Pannello in fibra di vetro	0,100 m
7	Pannello di OSB3	0,009 m
8	Pannello in fibra di legno media densità	0,160 m
9	Pannello di OSB3	0,018 m
10	Freno al vapore	0,045 m
11	Pannello in fibra di vetro	0,045 m
12	Lastra in fibrogesso rinforzato per interni	0,025 m
Interno		

Valori Stratigrafia	
Valore Sd interno [m]	0,010
Spessore totale [m]	0,399
Trasmittanza termica periodica [W/(m <sup>2</sup> K)]	0,020
Trasmittanza termica [W/(m <sup>2</sup> K)]	0,114

Riepilogo Risultati	
Durata della misurazione:	01/08/2022 – 31/07/2023
Umidità massima pannello di OSB3:	15,5 %
Data raggiungimento umidità massima per pannello OSB3:	24/04/2023
Umidità massima pannello di fibra di legno:	10 %
Data raggiungimento umidità massima per pannello di fibra di legno:	10/06/2023

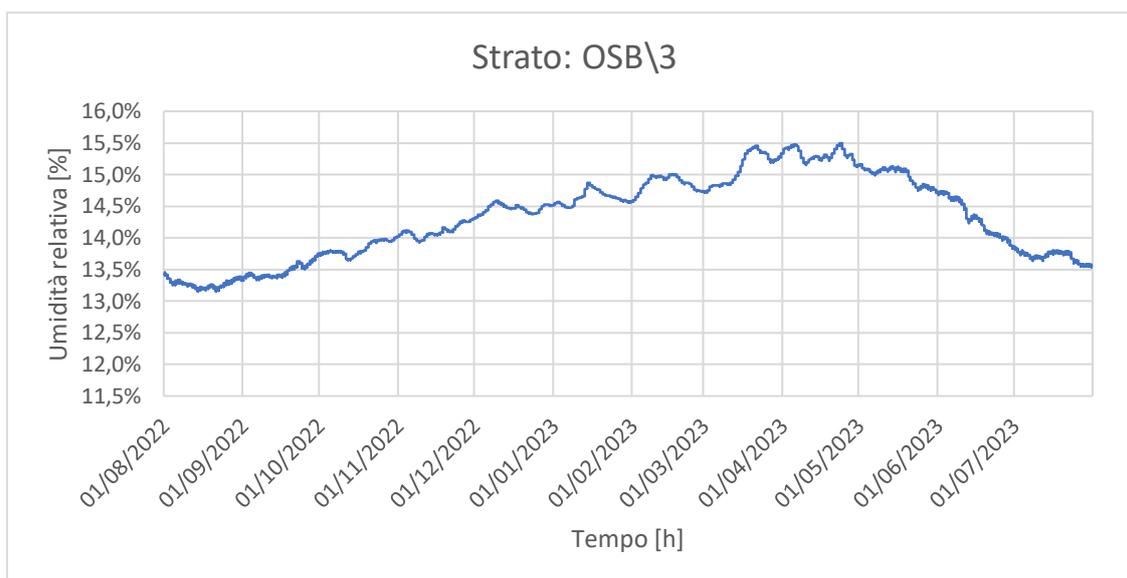


Grafico 2.13 Andamento dell'umidità relativa interna allo strato di fibra di OSB\3

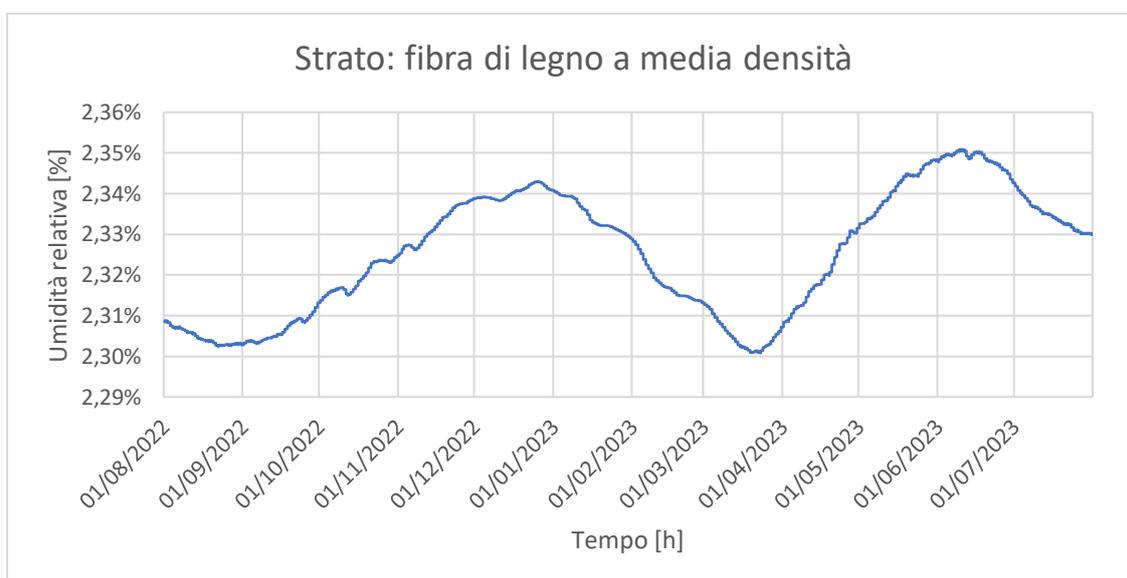


Grafico 2.14 Andamento dell'umidità relativa interna allo strato di fibra di legno

I grafici sopra mostrati riportano anch'essi l'andamento dell'umidità relativa nei due strati in esame.

Questa soluzione prevede l'utilizzo di un pannello OSB\3 più sottile, 9 mm di spessore, nel lato esterno della stratigrafia.

Questa modifica non comporta problematiche strutturali poiché la funzione di controventatura viene garantita dal pannello più interno, mentre la diminuzione dello spessore dovrebbe garantire un miglioramento nel passaggio dell'umidità attraverso lo strato, riducendone in tal modo l'accumulo.

Tuttavia, ciò non accade ed il livello limite del 18 % di umidità relativa in massa è stato superato e, pertanto, è stata necessaria l'applicazione di una barriera al vapore.

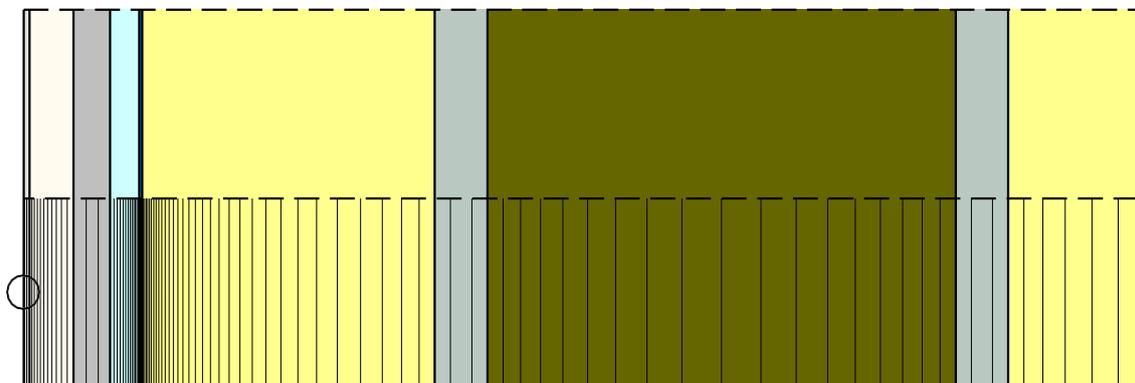
La diminuzione dello spessore ha fatto sì che la quantità d'acqua accumulata sia diminuita, ma la conseguente diminuzione della massa dello strato in esame ha aumentato il rapporto massa acqua-massa OSB\3.

## Parete portante esterna Variante 5

### Stratigrafia

Esterno

Interno



Strato	Materiale	Spessore
Esterno		
1	Vernice esterna	0,002 m
2	Intonaco esterno	0,015 m
3	Lastra in fibrogesso rinforzato per esterni	0,013 m
4	Membrana impermeabile	0,001 m
5	Pannello in fibra di vetro	0,100 m
6	Pannello in gessofibra strutturale	0,018 m
7	Pannello in fibra di legno media densità	0,160 m
8	Pannello in gessofibra strutturale	0,018 m
9	Pannello in fibra di vetro	0,045 m
10	Lastra in fibrogesso rinforzato per interni	0,025 m
Interno		

Valori Stratigrafia	
Valore Sd interno [m]	0,010
Spessore totale [m]	0,407
Trasmittanza termica periodica [W/(m <sup>2</sup> K)]	0,037
Trasmittanza termica [W/(m <sup>2</sup> K)]	0,115

Riepilogo Risultati	
Durata della misurazione:	01/08/2022 – 31/07/2023
Umidità massima pannello di fibra di legno:	15 %
Data raggiungimento umidità massima per pannello di fibra di legno:	31/07/2023

Questa soluzione rappresenta un “off-topic” in quanto è stata studiata per ridurre problematiche durante la fase cantieristica.

Si tratta di una soluzione che non presenta la facciata ventilata, nella quale i pannelli di OSB\3, di matrice legnosa e per questo motivo soggetti all’azione dell’acqua, sono sostituiti da lastre di fibrogesso rinforzato con caratteristica strutturale.

Queste lastre garantiscono la funzione di controventatura della struttura risentendo meno dell’azione dell’umidità.

Si tratta di una soluzione ideata per ovviare problematiche durante la fase di costruzione dell’edificio, quando ancora le pareti non sono del tutto impermeabilizzate.

Dal punto di vista termico si aumenta la massa superficiale della parete e, di conseguenza, la capacità termica; dal lato igrometrico si risolve la situazione dell’elemento critico utilizzandone uno di matrice non putrescente.

Essendo però questo elaborato focalizzato sull’analisi igrometrica e sul mantenimento della struttura attraverso confronti tra le diverse configurazioni, non è possibile utilizzare questa variante nelle analisi future a causa della sostituzione dell’elemento OSB\3 di confronto.

Viene comunque riportata in questo paragrafo in quanto studiata ed analizzata.

### **Pareti portanti garage**

Di seguito sono riportate le due ipotesi della parete del garage, quella di progetto e una variante ventilata.

Si tratta di pareti simili dal punto di vista strutturale a quelle definite in precedenza ma, essendo il garage un locale non climatizzato e destinato solamente ad autorimessa, gli spessori degli strati isolanti sono minori.

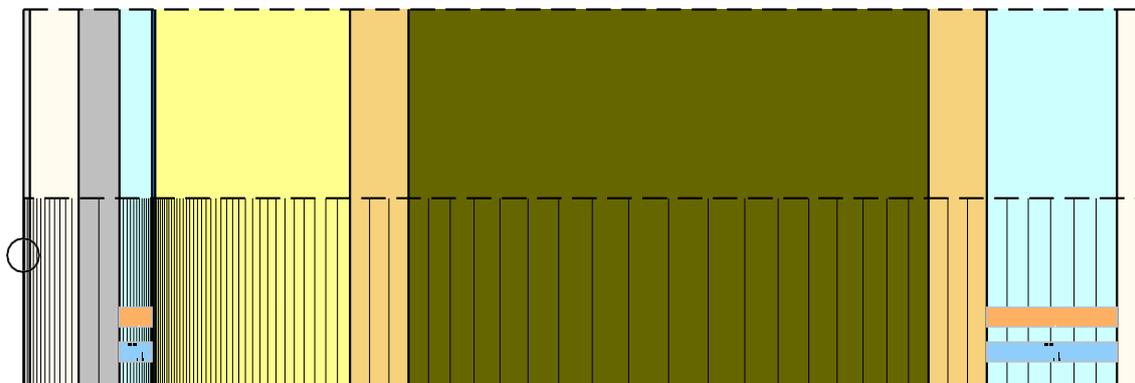
Tuttavia, il locale garage è adiacente all’abitazione e, di conseguenza, ne influenzerà l’andamento termico della parete comune alle due zone.

## Parete portante esterna garage di progetto

### Stratigrafia

Esterno

Interno



Strato	Materiale	Spessore
Esterno		
1	Vernice esterna	0,025 m
2	Intonaco esterno	0,045 m
3	Lastra in fibrogesso rinforzato per esterni	0,018 m
4	Intercapedine ventilata	0,010 m
5	Membrana impermeabile	0,001 m
6	Pannello in fibra di vetro	0,060 m
7	Pannello di OSB\3	0,018 m
8	Pannello in fibra di legno media densità	0,160 m
9	Pannello di OSB\3	0,018 m
10	Intercapedine non ventilata	0,045 m
11	Lastra in cartongesso per interni	0,013 m
12	Lastra in cartongesso per interni	0,013 m
Interno		

Valori Stratigrafia	
Valore Sd interno [m]	0,010
Spessore totale [m]	0,362
Trasmittanza termica periodica [W/(m <sup>2</sup> K)]	0,009
Trasmittanza termica [W/(m <sup>2</sup> K)]	0,144

Riepilogo Risultati	
Durata della misurazione:	01/08/2022 – 31/07/2023
Umidità massima pannello di OSB\3:	15 %
Data raggiungimento umidità massima per pannello OSB\3:	18/03/2023
Umidità massima pannello di fibra di legno:	10 %
Data raggiungimento umidità massima per pannello di fibra di legno:	30/11/2022

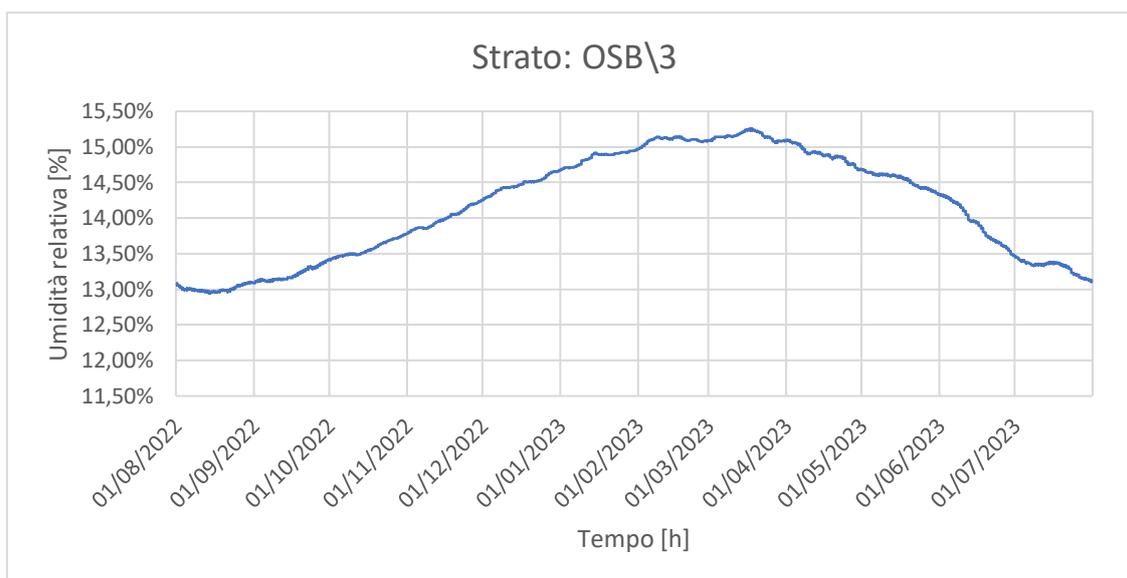


Grafico 2.15 Andamento dell'umidità relativa interna allo strato di OSB\3

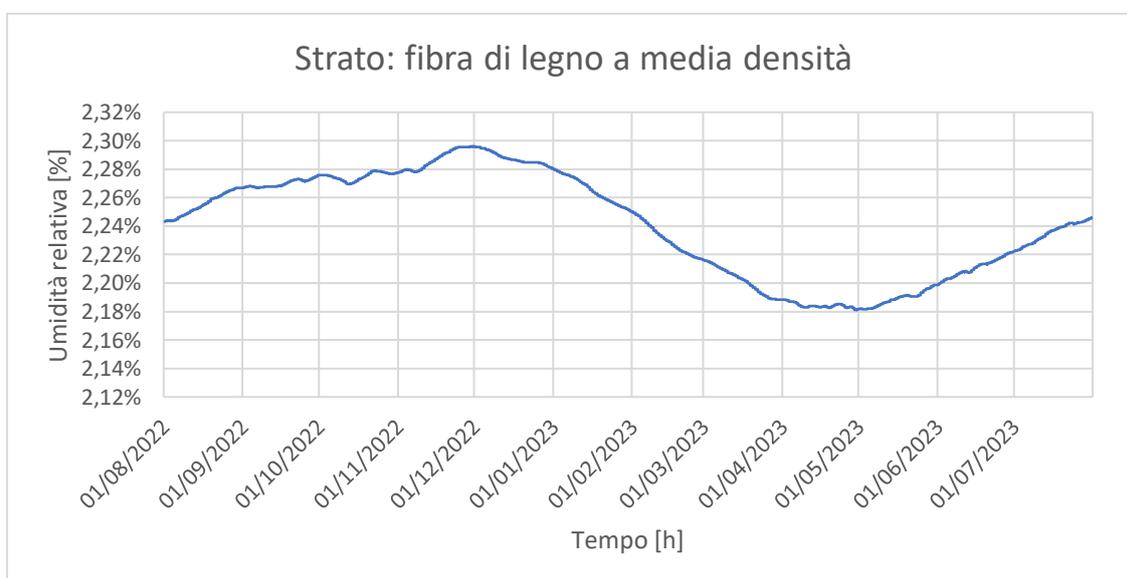


Grafico 2.16 Andamento dell'umidità relativa interna allo strato di fibra di legno

La stratigrafia rappresenta la soluzione di progetto e prevede un isolamento ridotto essendo relativa alla parete del garage, nel quale non è prevista nessuna soluzione impiantistica e non sono presenti carichi di umidità interna elevati.

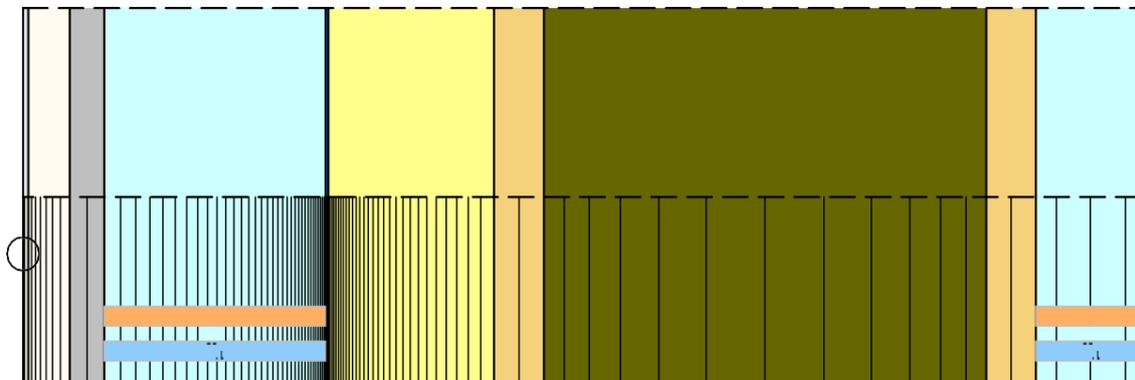
In questo caso gli strati isolanti di spessore ridotto permettono una maggiore traspirabilità della parete. Inoltre, una maggiore ventilazione dovuta alle infiltrazioni derivanti principalmente dal doppio portone sezionale, garantisce una ridotta umidità relativa interna alla struttura.

## Parete portante esterna garage Variante 1

### Stratigrafia

Interno

Esterno



Strato	Materiale	Spessore
Interno		
1	Vernice esterna	0,025 m
2	Intonaco esterno	0,045 m
3	Lastra in fibrogesso rinforzato per esterni	0,018 m
4	Intercapedine ventilata	0,080 m
5	Membrana impermeabile	0,001 m
6	Pannello in fibra di vetro	0,060 m
7	Pannello di OSB\3	0,018 m
8	Pannello in fibra di legno media densità	0,160 m
9	Pannello di OSB\3	0,018 m
10	Intercapedine non ventilata	0,045 m
11	Lastra in cartongesso per interni	0,013 m
12	Lastra in cartongesso per interni	0,013 m
Esterno		

Valori Stratigrafia	
Valore Sd interno [m]	0,010
Spessore totale [m]	0,432
Trasmittanza termica periodica [W/(m <sup>2</sup> K)]	0,008
Trasmittanza termica [W/(m <sup>2</sup> K)]	0,150

Riepilogo Risultati	
Durata della misurazione:	01/08/2022 – 31/07/2023
Umidità massima pannello di OSB\3:	15 %
Data raggiungimento umidità massima per pannello OSB\3:	17/03/2023
Umidità massima pannello di fibra di legno:	9 %
Data raggiungimento umidità massima per pannello di fibra di legno:	1/12/2022

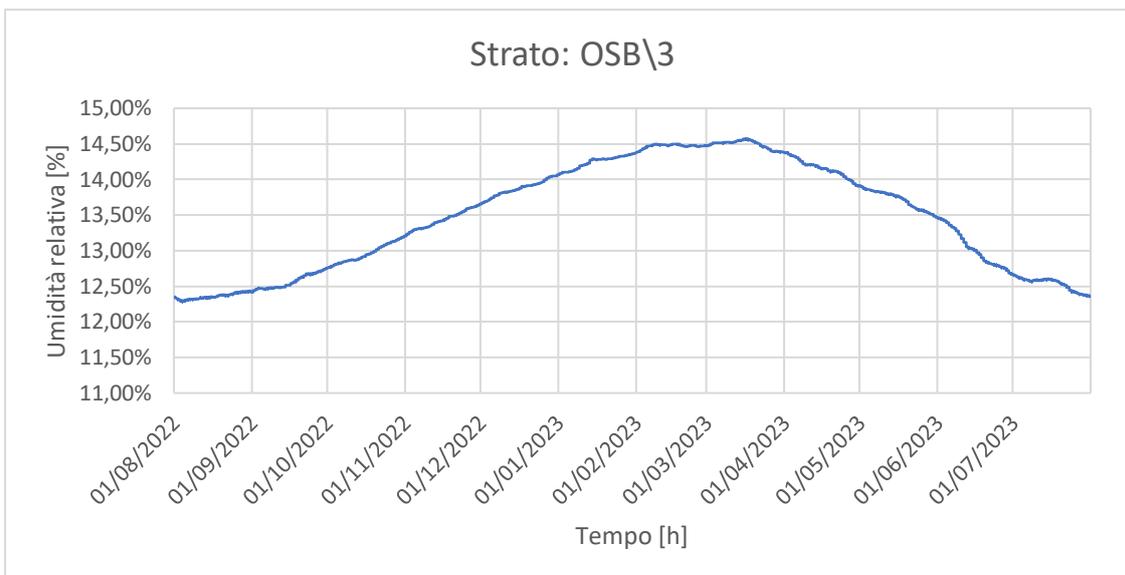


Grafico 2.17 Andamento dell'umidità relativa interna allo strato di OSB\3

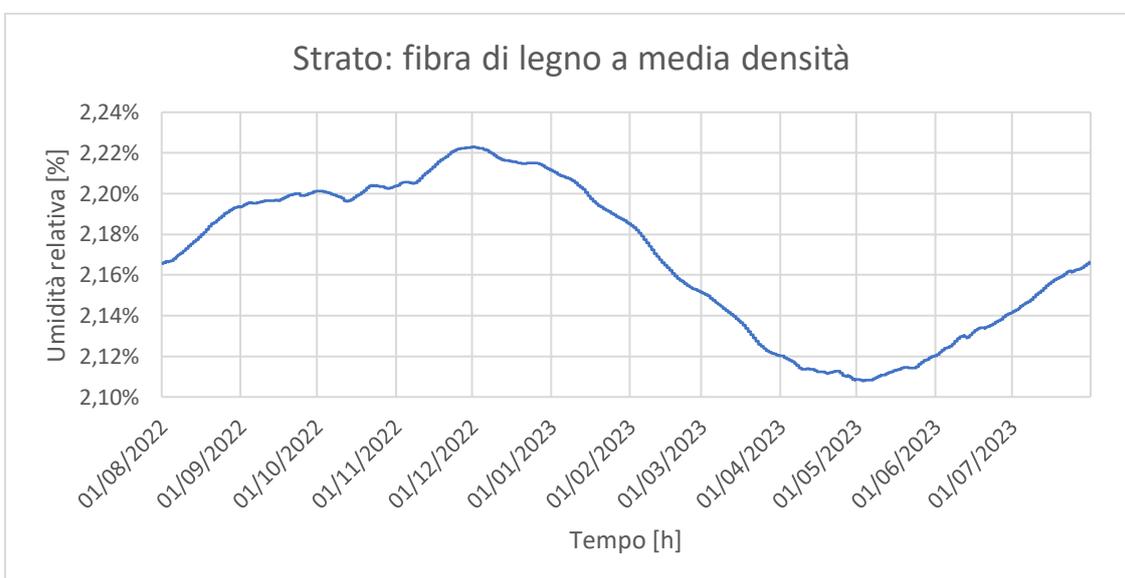


Grafico 2.18 Andamento dell'umidità relativa interna allo strato di fibra di legno

Questa configurazione è stata ideata per garantire una continuità su tutta la struttura nel caso si utilizzi la facciata ventilata nella soluzione costruttiva della zona abitativa.

La maggiore ventilazione in facciata garantisce una notevole riduzione del contenuto di umidità, una maggiore protezione dalla pioggia battente e un miglioramento delle condizioni interne durante il periodo estivo.

## Coperture

### Copertura zona abitativa – stratigrafia di progetto

#### Stratigrafia

Esterno



Interno

Strato	Materiale	Spessore
Esterno		
1	Coppi	0,015 m
2	Intercapedine ventilata	0,080 m
2	Telo impermeabile	0,001 m
3	Pannello di OSB\3	0,009 m
4	Pannello in fibra di legno HD	0,020 m
5	Pannello in fibra di legno HD	0,020 m
6	Pannello in fibra di legno MD	0,080 m
7	Pannello in fibra di legno MD	0,080 m
8	Barriera al vapore	0,001 m
9	Perlina in abete	0,020 m
Interno		

#### Valori Stratigrafia

Spessore totale [m]	0,326
Resistenza termica [(m <sup>2</sup> K) /W]	5,814
Trasmittanza termica [W/ (m <sup>2</sup> K)]	0,172
Massa superficiale [kg/ m <sup>2</sup> ]	73,465
Sfasamento termico	11h 12'

#### Riepilogo Risultati

Durata della misurazione:	01/08/2022 – 31/07/2023
Umidità massima pannello di OSB\3:	17 %
Data raggiungimento umidità massima per pannello OSB\3:	14/03/2023
Umidità massima pannello di fibra di legno HD:	25 %
Data raggiungimento umidità massima per pannello di fibra di legno HD:	11/3/2023
Umidità massima pannello di fibra di legno MD:	4 %
Data raggiungimento umidità massima per pannello di fibra di legno MD:	19/10/2022

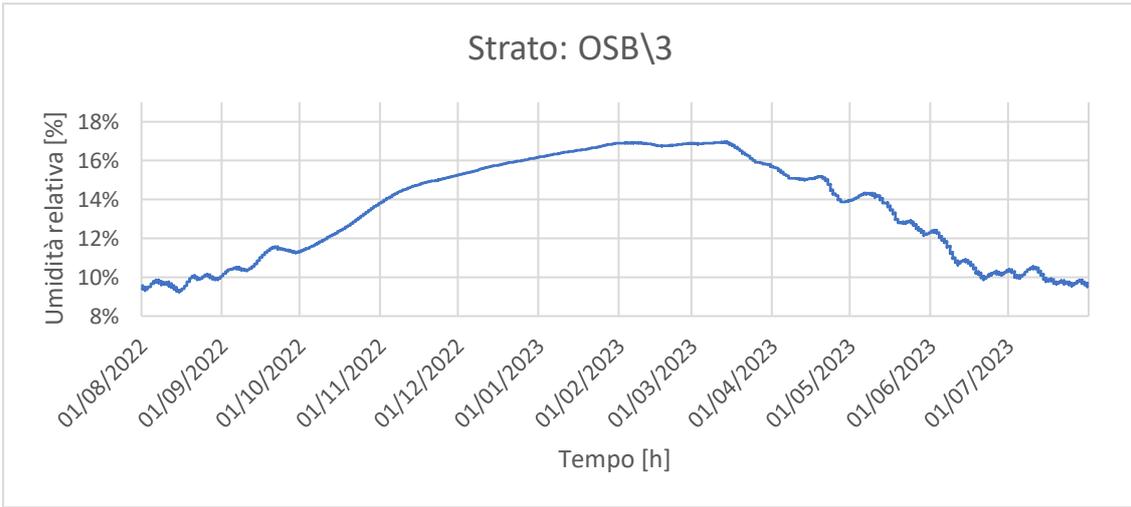


Grafico 2.19 Andamento dell'umidità relativa interna allo strato di OSB\3

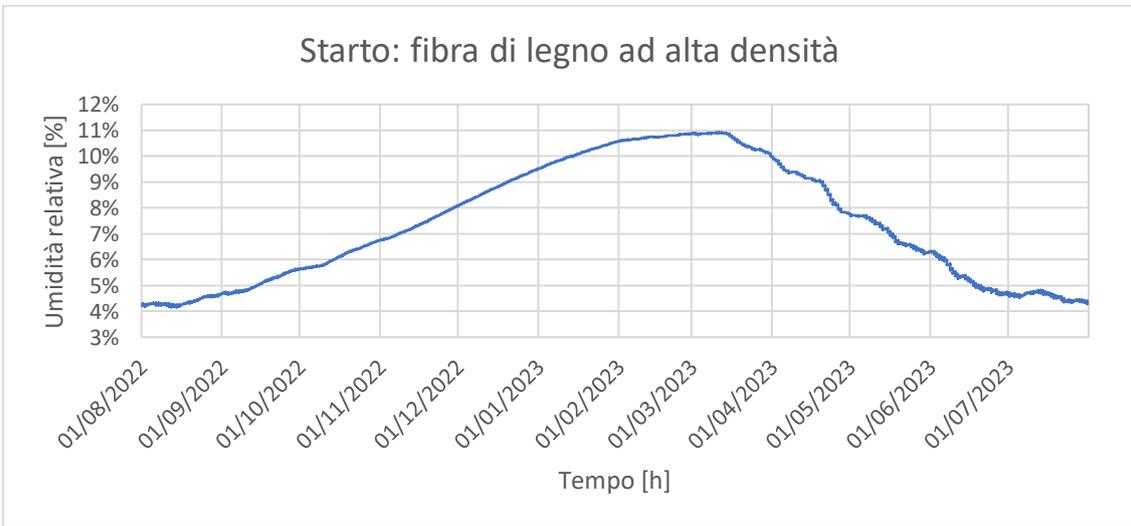


Grafico 2.20 Andamento dell'umidità relativa interna allo strato di fibra di legno

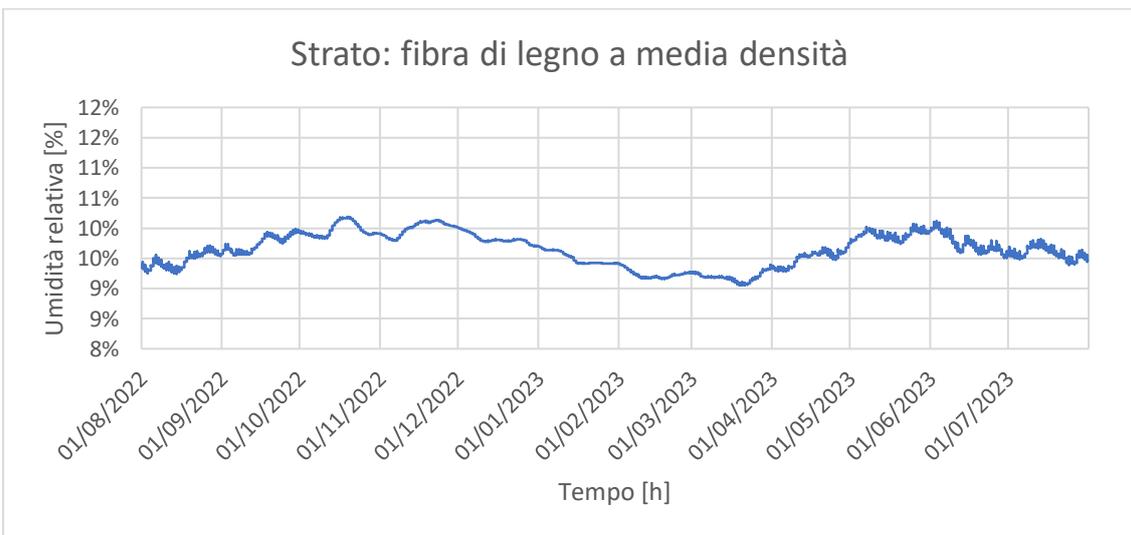


Grafico 2.21 Andamento dell'umidità relativa interna allo strato di fibra di legno

La soluzione di progetto prevede una copertura leggera con struttura portante in legno e pannelli isolanti in fibra di legno a diverse densità.

Si tratta di una copertura ventilata, in grado di massimizzare la ventilazione estiva riducendone i carichi termici ma, al contempo, proprio perché leggera e quindi con bassa inerzia termica, presenta svantaggi durante il periodo estivo. Per contrastare questa problematica vengono utilizzati pannelli isolanti in fibra di legno con densità elevate per aumentare la massa superficiale.

Nel periodo invernale garantisce invece un ottimo comfort termico all'abitazione trattandosi di una copertura con una trasmittanza termica molto bassa, quindi molto performante.

**Copertura zona abitativa – Variante 1****Stratigrafia**

Esterno



Interno

Strato	Materiale	Spessore
Esterno		
1	Coppi	0,015 m
2	Intercapedine ventilata	0,080 m
2	Telo impermeabile	0,001 m
3	Pannello di OSB\3	0,009 m
4	Pannello in fibra di legno HD	0,020 m
5	Pannello in fibra di legno HD	0,020 m
6	Pannello in fibra di legno MD	0,120 m
7	Pannello in fibra di legno legata con cemento	0,040 m
8	Barriera al vapore	0,001 m
9	Lastra in fibrogesso rinforzato	0,025 m
Interno		

**Valori Stratigrafia**

Spessore totale [m]	0,331
Resistenza termica [(m <sup>2</sup> K) /W]	5,887
Trasmittanza termica [W/ (m <sup>2</sup> K)]	0,179
Massa superficiale [kg/ m <sup>2</sup> ]	108,665
Sfasamento termico	13h 43'

**Riepilogo Risultati**

Durata della misurazione:	01/08/2022 – 31/07/2023
Umidità massima pannello di OSB\3:	16 %
Data raggiungimento umidità massima per pannello OSB\3:	02/02/2023
Umidità massima pannello di fibra di legno HD:	22 %
Data raggiungimento umidità massima per pannello di fibra di legno HD:	12/3/2023
Umidità massima pannello di fibra di legno MD:	5 %
Data raggiungimento umidità massima per pannello di fibra di legno MD:	09/06/2022

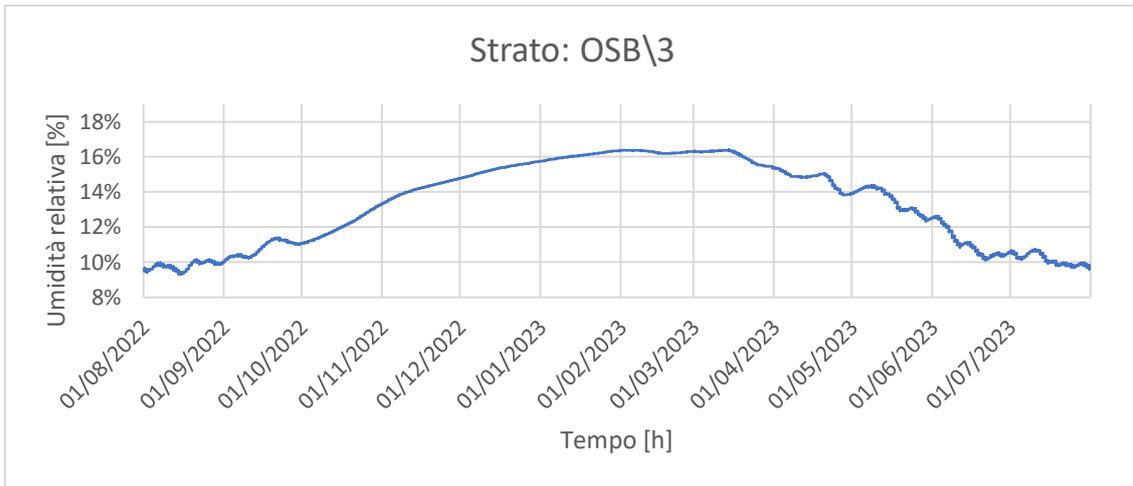


Grafico 2.22 Andamento dell'umidità relativa interna allo strato di OSB\3



Grafico 2.23 Andamento dell'umidità relativa interna allo strato di fibra di legno



Grafico 2.24 Andamento dell'umidità relativa interna allo strato di fibra di legno

La variante nasce dall'idea di voler aumentare la massa della copertura in modo da aumentare l'inerzia dell'intero componente, visibile nell'aumento dello sfasamento termico.

Si nota fin da subito che non si tratta di un miglioramento preventivo per ridurre l'umidità all'interno dei singoli strati, i quali sono già ampiamente al di sotto dei limiti critici.

In particolare, le modifiche rispetto al caso precedente sono due:

- La sostituzione della perlina in abete con una doppia lastra di fibrogesso rinforzato, con densità maggiore rispetto alla prima.
- La sostituzione di 4 cm di fibra di legno a media densità con un pannello di fibra di legno legata con cemento, sempre di 4 cm, con un conseguente significativo aumento della massa del componente.

Si tratta comunque di una copertura molto efficiente, con una trasmittanza termica molto bassa, quindi molto performante durante il periodo invernale.

## Copertura zona abitativa – Variante 2

### Stratigrafia

Esterno



Interno

Strato	Materiale	Spessore
Esterno		
1	Coppi	0,015 m
2	Intercapedine ventilata	0,080 m
2	Telo impermeabile	0,001 m
3	Pannello di OSB\3	0,009 m
4	Pannello in fibra di legno HD	0,020 m
5	Pannello in fibra di legno HD	0,020 m
6	Pannello in fibra di legno MD	0,080 m
7	Pannello in fibra di legno legata con cemento	0,080 m
8	Barriera al vapore	0,001 m
9	Lastra in fibrogesso rinforzato	0,025 m
Interno		

Valori Stratigrafia	
Spessore totale [m]	0,331
Resistenza termica [(m <sup>2</sup> K) /W]	5,435
Trasmittanza termica [W/ (m <sup>2</sup> K)]	0,184
Massa superficiale [kg/ m <sup>2</sup> ]	127,865
Sfasamento termico	15h 17'

Riepilogo Risultati	
Durata della misurazione:	01/08/2022 – 31/07/2023
Umidità massima pannello di OSB\3:	16 %
Data raggiungimento umidità massima per pannello OSB\3:	31/01/2023
Umidità massima pannello di fibra di legno HD:	17 %
Data raggiungimento umidità massima per pannello di fibra di legno HD:	11/3/2023

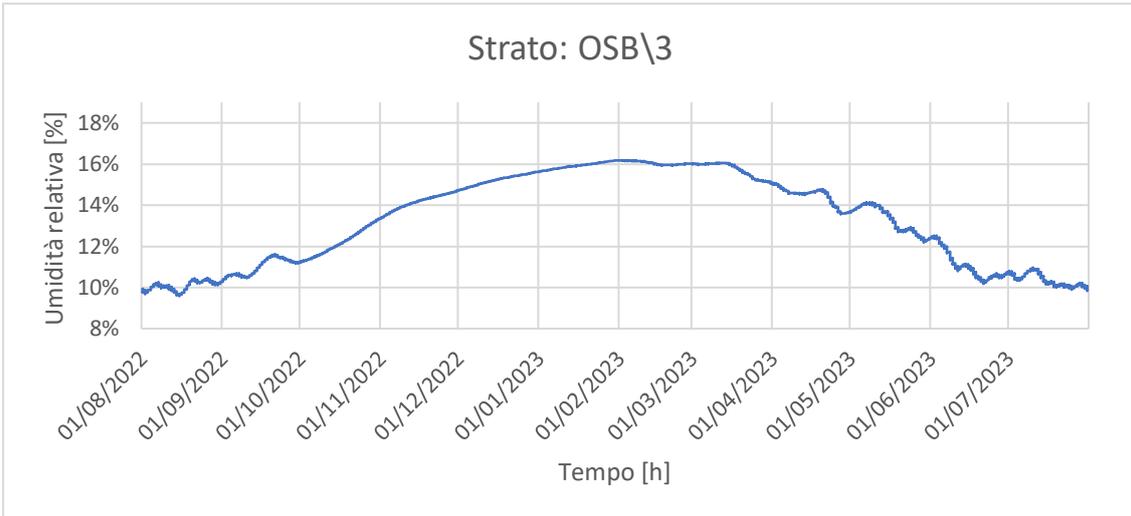


Grafico 2.25 Andamento dell'umidità relativa interna allo strato di OSB\3

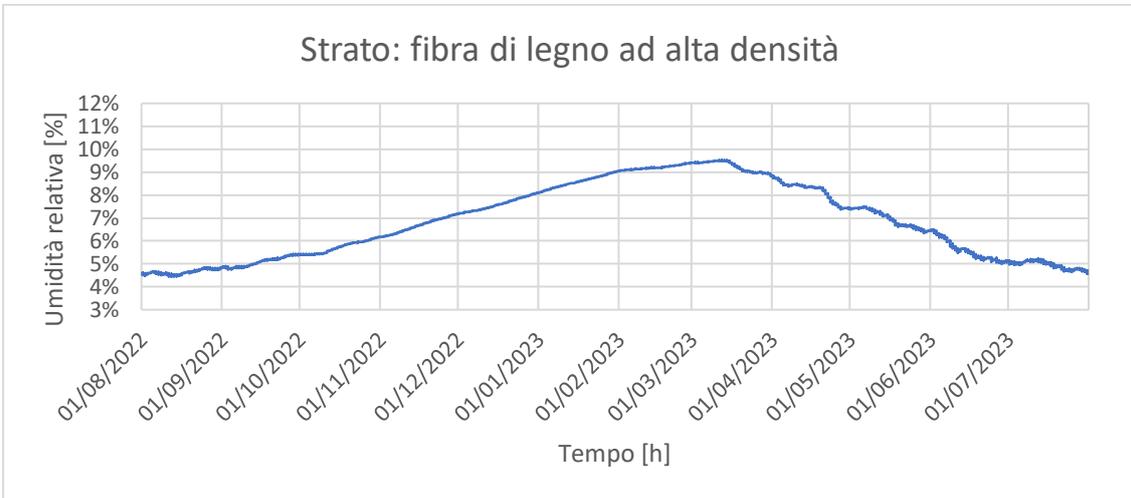


Grafico 2.26 Andamento dell'umidità relativa interna allo strato di fibra di legno

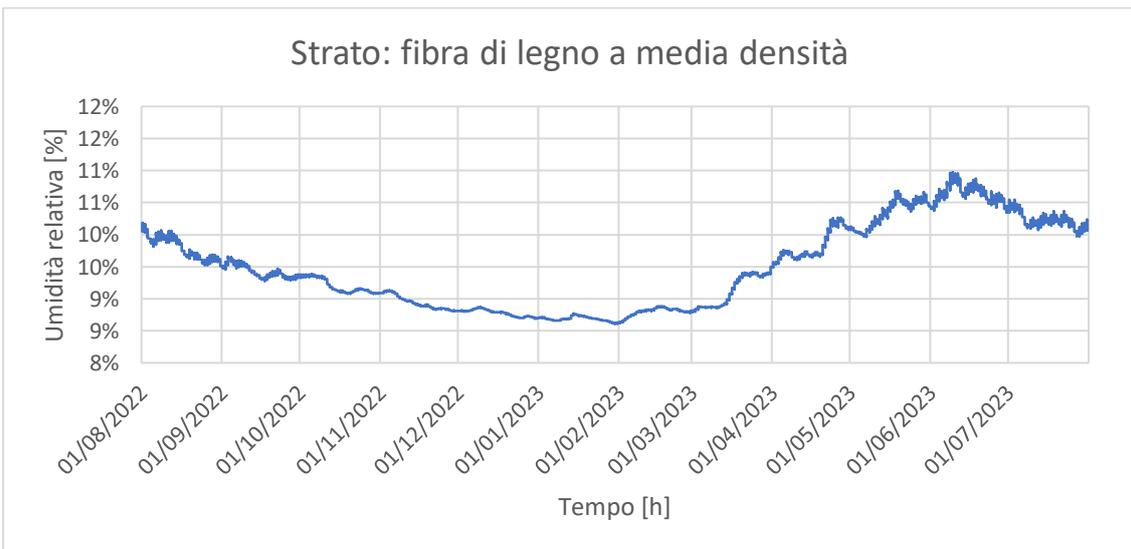


Grafico 2.27 Andamento dell'umidità relativa interna allo strato di fibra di legno

Questa soluzione presenta uno strato in fibra di legno legata con cemento di 8 cm, per aumentare ulteriormente l'inerzia della copertura.

Si tratta di una soluzione non razionale in quanto è noto come l'influenza dello strato pesante sulla temperatura interna diminuisca significativamente dopo i primi 4/5 cm.

## Coperture garage

### Copertura zona garage – Stratigrafia di progetto

#### Stratigrafia

Esterno



Interno

Strato	Materiale	Spessore
Esterno		
1	Coppi	0,015 m
2	Intercapedine ventilata	0,080 m
2	Telo impermeabile	0,001 m
3	Pannello di OSB\3	0,009 m
4	Pannello in fibra di legno HD	0,020 m
6	Pannello in fibra di legno MD	0,040 m
7	Pannello in fibra di legno MD	0,080 m
8	Barriera al vapore	0,001 m
9	Perlina in abete	0,020 m
Interno		

#### Valori Stratigrafia

Spessore totale [m]	0,266
Resistenza termica [(m <sup>2</sup> K) /W]	5,070
Trasmittanza termica [W/ (m <sup>2</sup> K)]	0,191
Massa superficiale [kg/ m <sup>2</sup> ]	71,500
Sfasamento termico	8h 49'

#### Riepilogo Risultati

Durata della misurazione:	01/08/2022 – 31/07/2023
Umidità massima pannello di OSB\3:	18 %
Data raggiungimento umidità massima per pannello OSB\3:	02/02/2023
Umidità massima pannello di fibra di legno HD:	11 %
Data raggiungimento umidità massima per pannello di fibra di legno HD:	31/01/2023
Umidità massima pannello di fibra di legno MD:	12 %
Data raggiungimento umidità massima per pannello di fibra di legno MD:	02/08/2022

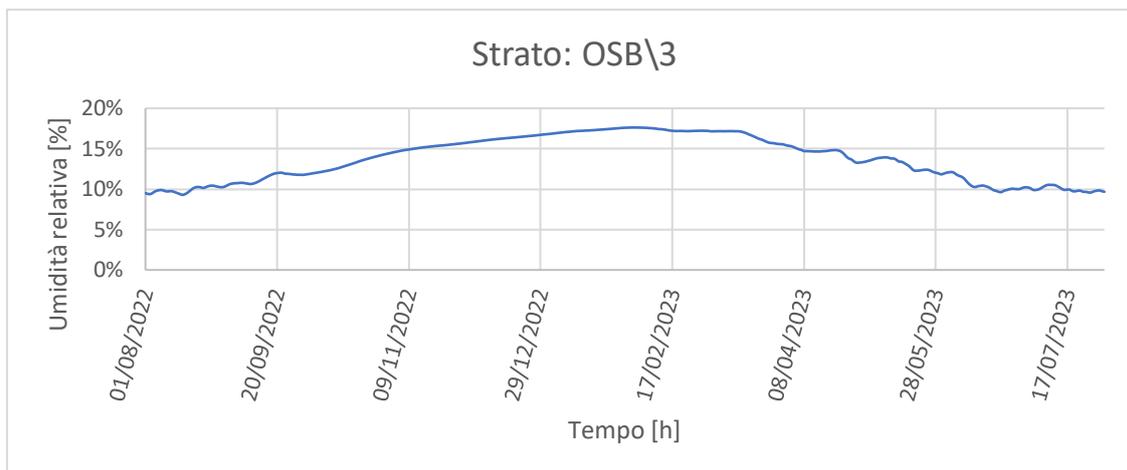


Grafico 2.28 Andamento dell'umidità relativa interna allo strato di OSB\3

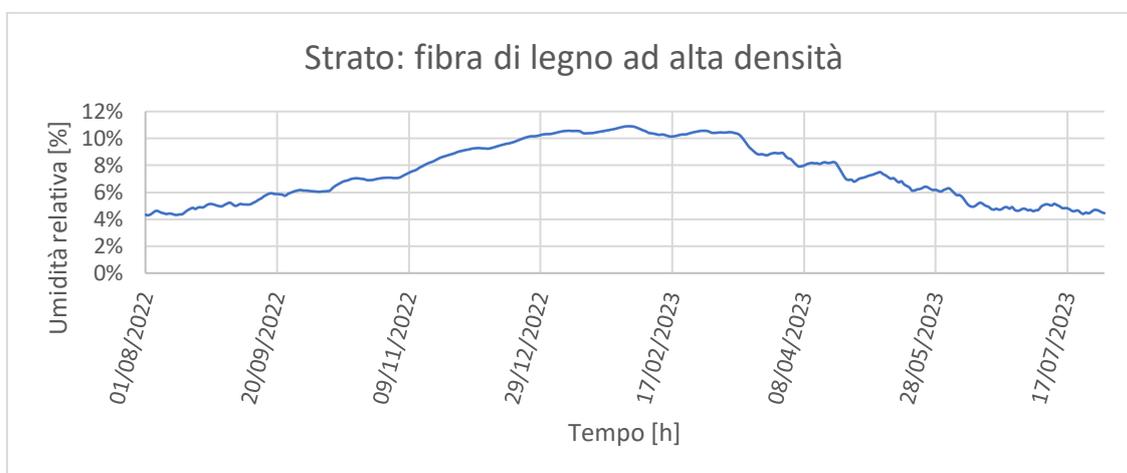


Grafico 2.29 Andamento dell'umidità relativa interna allo strato di fibra di legno

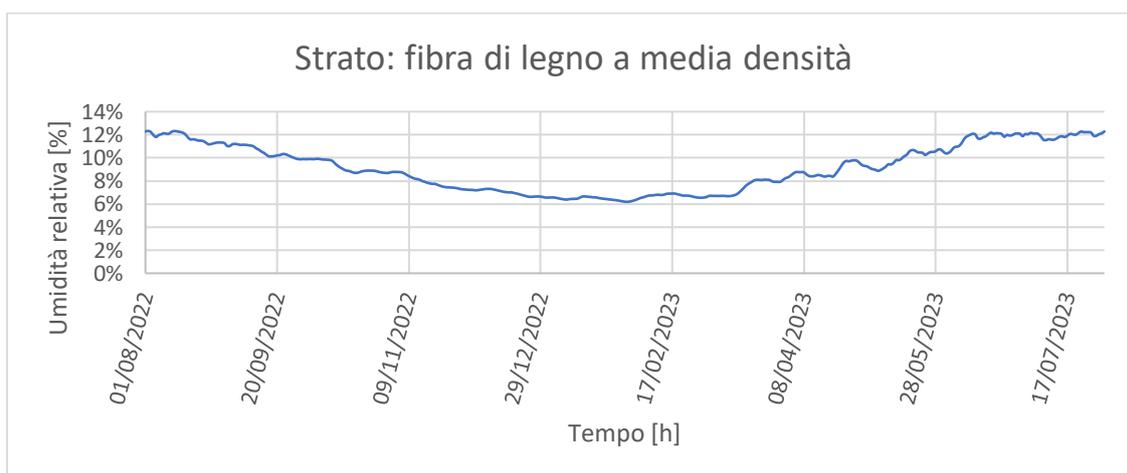


Grafico 2.30 Andamento dell'umidità relativa interna allo strato di fibra di legno

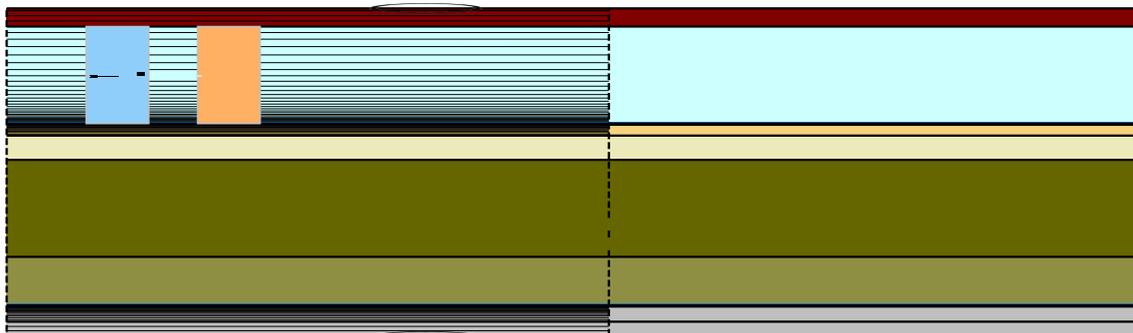
La soluzione di progetto prevede una copertura leggera del garage, con una stratigrafia meno isolata rispetto a quella della zona abitativa.

Non essendo presenti impianti la zona garage verrà trattata come zona non riscaldata e, pertanto, si è preso in considerazione una soluzione meno performante.

## Copertura zona garage – Variante 1

### Stratigrafia

Esterno



Interno

Strato	Materiale	Spessore
Esterno		
1	Coppi	0,015 m
2	Intercapedine ventilata	0,080 m
2	Telo impermeabile	0,001 m
3	Pannello di OSB\3	0,009 m
4	Pannello in fibra di legno HD	0,020 m
6	Pannello in fibra di legno MD	0,120 m
7	Pannello in fibra di legno legata con cemento	0,040 m
8	Barriera al vapore	0,001 m
9	Lastra in fibrogesso rinforzato	0,025 m
Interno		

### Valori Stratigrafia

Spessore totale [m]	0,271
Resistenza termica [(m <sup>2</sup> K) /W]	5,181
Trasmittanza termica [W/ (m <sup>2</sup> K)]	0,193
Massa superficiale [kg/ m <sup>2</sup> ]	101,850
Sfasamento termico	9h 20'

### Riepilogo Risultati

Durata della misurazione:	01/08/2022 – 31/07/2023
Umidità massima pannello di OSB\3:	17 %
Data raggiungimento umidità massima per pannello OSB\3:	03/02/2023
Umidità massima pannello di fibra di legno HD:	10 %
Data raggiungimento umidità massima per pannello di fibra di legno HD:	11/03/2023
Umidità massima pannello di fibra di legno MD:	11 %
Data raggiungimento umidità massima per pannello di fibra di legno MD:	18/05/2023

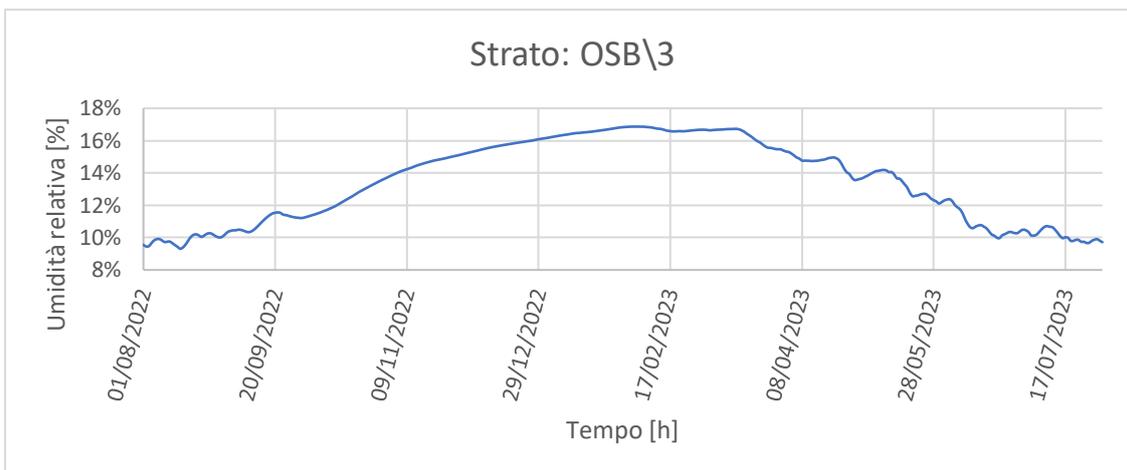


Grafico 2.31 Andamento dell'umidità relativa interna allo strato di OSB\3

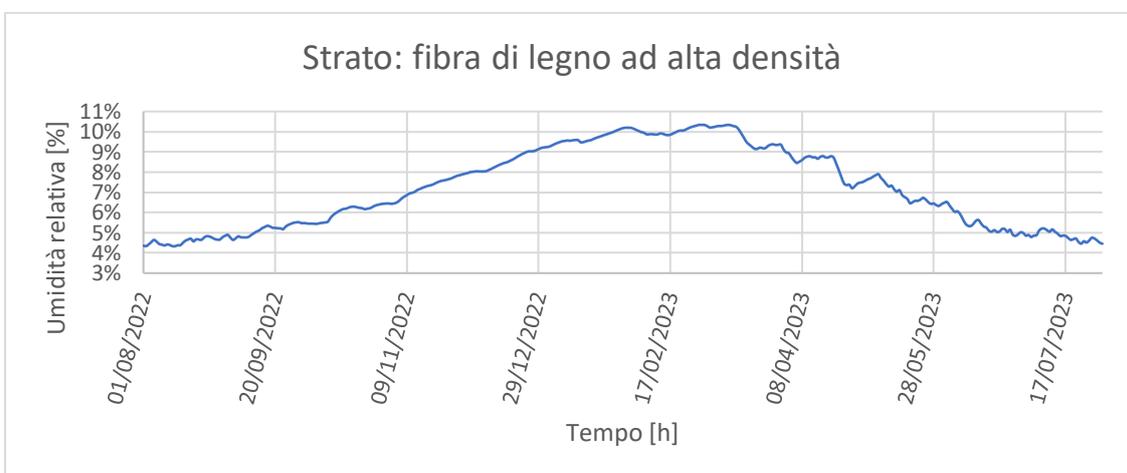


Grafico 2.32 Andamento dell'umidità relativa interna allo strato di fibra di legno

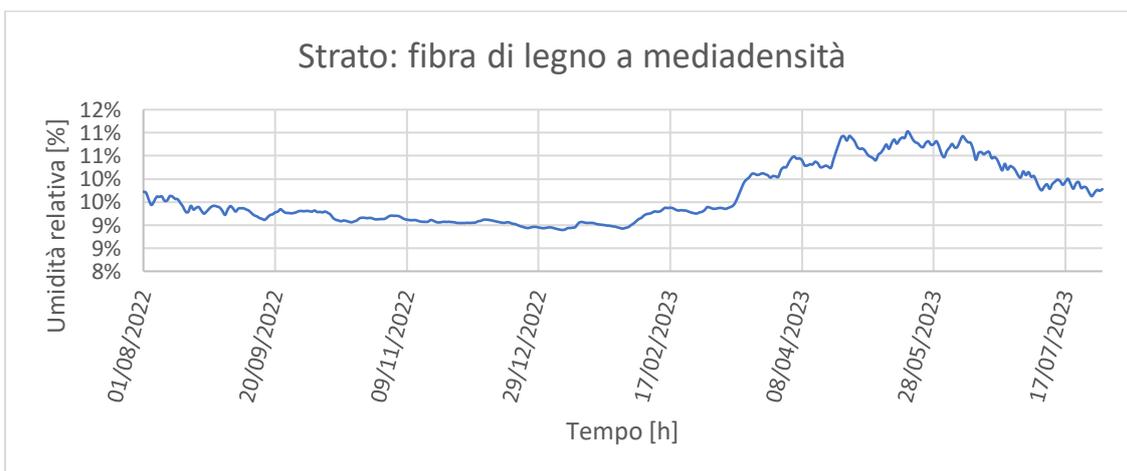


Grafico 2.33 Andamento dell'umidità relativa interna allo strato di fibra di legno

Questa configurazione è stata analizzata per garantire la continuità costruttiva della copertura “Variante 1” della zona abitativa.

Il pannello da 4 cm di spessore di fibra di legno a media densità è stato sostituito con uno sempre in fibra di legno ma legato a cemento, per aumentare l’inerzia della struttura.

## 2.5 Risultati e commenti

Nella seguente sezione sono esposti ed analizzati i risultati relativi alle diverse stratigrafie delle pareti e delle coperture.

Il periodo di tempo analizzato è quello compreso tra il 1° agosto 2022 e il 31 luglio 2023, in modo da poter analizzare i parametri lungo un intero anno e la scelta di cominciare l'analisi in agosto si basa sull'esigenza di avere un'umidità di partenza bassa e soprattutto costante, allo scopo di ottenere risultati non falsati da condizioni esterne quali lunghi rovesci e umidità troppo elevate.

Per poter confrontare tra loro le differenti opzioni costruttive, tutti i risultati sono riferiti alla soluzione di progetto.

### 2.5.1 Pareti portanti

Di seguito sono esposti e confrontati i risultati inerenti all'analisi delle pareti portanti esterne della zona abitativa.

Non vengono qui riportate le soluzioni con fibrogesso strutturale poiché esulano dall'analisi in corso; queste, infatti, presentano soprattutto vantaggi principalmente nella fase “cantieristica”, senza offrire significativi miglioramenti di durabilità dei materiali e/o di prestazioni energetiche.

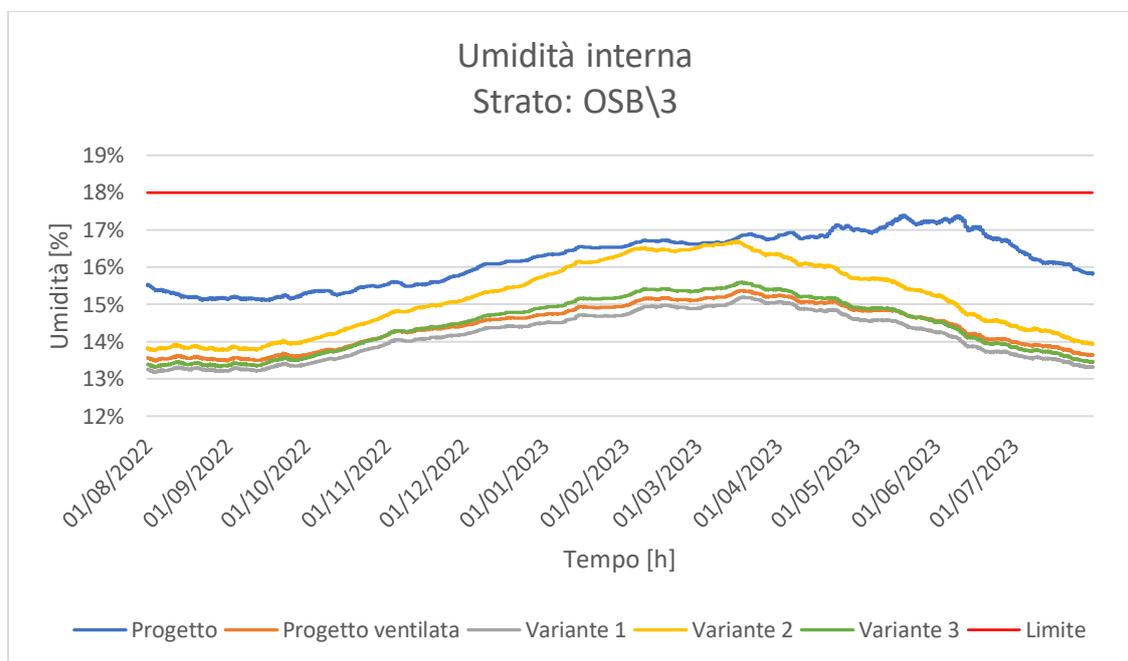


Grafico 2.34 Andamento dell'umidità relativa interna nello strato di OSB\3, pareti

Il grafico sopra raffigurato mostra le soluzioni analizzate, confrontando gli andamenti della quantità di umidità, come percentuale in massa, presente nello strato di OSB\3 più

esterno, valutato come il componente più critico dell'intera struttura poiché più degradabile essendo di matrice legnosa e perciò utilizzato come indicatore.

Si nota come la soluzione di progetto, benché risulti sempre al di sotto del valore limite, nei mesi primaverili presenti un livello di umidità interna allo strato di OSB\3 alquanto elevato.

La prima ipotesi presa in considerazione è rappresentata dalla curva "Progetto con ventilazione", nella quale viene utilizzata una struttura ventilata, mantenendo comunque la stratigrafia di progetto.

Si può osservare come la soluzione rappresentata dalla "Progetto con ventilazione", con valori di umidità compresi nel range 13% 16%, possa essere considerata un miglioramento notevole dal punto di vista igrometrico, con una maggiore esportazione di umidità presente in parete dovuta alla ventilazione di facciata.

Riducendo la quantità di acqua all'interno del materiale se ne allunga la vita utile sia dal punto di vista strutturale, evitando rigonfiamenti e deperimento stesso del materiale, sia da quello energetico.

D'altro canto, la parete ventilata, garantendo già un ottimo comfort invernale dovuto alla bassa trasmittanza termica, migliora ulteriormente le prestazioni in regime di raffrescamento, poiché una parte dell'energia solare convergente sulle pareti viene esportata dall'intercapedine ventilata, riducendo così il carico termico gravante sull'edificio.

L'analisi è stata focalizzata ad ottenere nuove varianti di stratigrafie caratterizzate da performance igrometriche confrontabili, con spessori del pacchetto isolante decrescenti, mantenendo come elemento cardine la ventilazione in facciata e garantendo, al contempo, trasmittanze delle strutture sempre decisamente inferiori a quelle indicate dalla normativa vigente.

La prima variante analizzata, "Variante 1", rappresenta una stratigrafia senza isolamento sulla contro-parete interna (utilizzata quindi come cavedio per impianti e valutata come una intercapedine non ventilata).

Questa operazione ha migliorato la traspirazione dell'umidità interna verso l'esterno, riducendo drasticamente i contenuti di umidità all'interno dello strato di OSB\3 in esame, senza alterare in maniera apprezzabile il comportamento termico della struttura.

La seconda variante analizzata, "Variante 2", mantiene la controparete isolata interna ma viene ridotto lo spessore del cappotto esterno in fibra di vetro da 10 cm a 6 cm.

Questa operazione garantisce da un lato una migliore traspirazione della struttura ma, tuttavia, mostra delle criticità nei mesi invernali, non proteggendo in maniera adeguata la struttura dalla temperatura esterna e provocando, pertanto, lo spostamento della temperatura di rugiada in uno strato più interno. Inoltre, risulta più difficoltoso isolare correttamente i numerosi ponti termici presenti nella struttura, dovuti a chiodi, viti passanti, componenti tipici di una struttura in legno.

Questa soluzione non può quindi rappresentare una possibile alternativa alla soluzione di progetto in quanto non garantisce un miglioramento dal punto di vista igrometrico. Non è qui riportata quella relativa ad una diminuzione di soli 2 cm dello spessore isolante del cappotto esterno poiché il miglioramento complessivo non sarebbe significativo rispetto alla soluzione ventilata “Progetto con ventilazione”.

È possibile però ottenere risultati apprezzabili sommando le due soluzioni precedenti.

La proposta della “Variante 3” rappresenta infatti questa situazione: contro-parete non isolata e cappotto esterno in fibra di vetro da 8 cm, così da garantire la protezione della struttura dall'esterno, per quanto riguarda la temperatura di rugiada, e il corretto isolamento dei ponti termici.

Dato di notevole interesse è lo spostamento dei massimi valori di umidità in tutte le varianti nel periodo invernale, rispetto alla soluzione di progetto che li presentava nei primi mesi primaverili.

Questo è dovuta all'incidenza della pioggia battente sulla parete: infatti nelle varianti la camera ventilata offre una protezione aggiuntiva per la stratigrafia, tenendola al riparo dagli agenti atmosferici.

<b>Riepilogo generale pareti</b>			
<b>Parete</b>	<b>Riduzione umidità massima (riferito al progetto)</b>	<b>Delta costo % (riferito al progetto)</b>	<b>Trasmittanza [W/(m²K)]</b>
<b>Progetto</b>	0%	0%	0,113
<b>Progetto con ventilazione</b>	-13%	5%	0,108
<b>Variante 1</b>	-14%	2%	0,124
<b>Variante 2</b>	-4%	0%	0,121
<b>Variante 3</b>	-11%	-1%	0,127

Tabella 2.9 Riepilogo generale pareti

La tabella 2.9 presenta il riepilogo delle diverse soluzioni di parete portante esterna per la zona “abitazione”, permettendo di focalizzare i principali parametri caratterizzanti le differenti strutture, umidità e costi. Il lavoro svolto è infatti un’analisi finalizzata ad una situazione reale, per la quale l’aspetto economico inerente alle diverse strutture assume un ruolo importante.

Se da un punto di vista termico le diverse strutture in esame sono tutte altamente performanti, quindi pienamente confrontabili. La soluzione migliore è però rappresentata dalla “Variante 1” con una riduzione del 14% di umidità massima.

Escludendo la “Variante 2” per le ragioni tecniche citate in precedenza, la scelta ottimale ricade tra le soluzioni “Progetto con ventilazione”, “Variante 1” e “Variante 3”.

L’analisi economica relativa alle pareti è stata effettuata riportando la diminuzione percentuale dei costi, riferiti al  $m^2$ , rispetto al costo della parete di progetto, prescindendo così dalla forma e dalla dimensione dell’edificio.

Le prime due varianti garantiscono un miglioramento igrometrico notevole presentando però un costo maggiore della struttura.

D’altro canto sulla “Variante 3” si osserva un delta costi negativo, quindi un risparmio sulla struttura ed un miglioramento igrometrico, quest’ultimo ridotto rispetto alle prime due varianti ma sempre comunque notevole rispetto alla soluzione di progetto.

La “Variante 3” è stata ritenuta, infine, quella più soddisfacente, in quanto garantisce un notevole miglioramento igrometrico (oltre 11% di umidità in massa in meno all’interno dello strato critico) ed addirittura una riduzione, anche se minima, dei costi di costruzione del componente.

Al contrario le altre due soluzioni si presentano più costose rispetto alla soluzione di progetto, a causa dei maggiori costi dei materiali richiesti e della posa in opera della struttura ventilata.

Anche nel caso della “Variante 3” i costi di posa in opera ovviamente aumentano, ma sono bilanciati dal risparmio sui materiali eliminati.

Da un punto di vista puramente commerciale quindi non sono valorizzabili le due soluzioni “Progetto con ventilazione” e “Variante 1” in quanto il miglioramento igrometrico non è supportato da un fattore economico adeguato, sempre rispetto alla “Variante 3”.

Verrà dunque utilizzata quest’ultima soluzione di parete portante come alternativa, nelle analisi seguenti, alla struttura di progetto.

In questa analisi non sono state prese in considerazione le pareti portanti del garage perché rappresentano la struttura di un locale non climatizzato, e a riguardo, è stata valutata solamente la non-criticità igrometrica durante la descrizione delle differenti startigrafie. È stata inoltre scelta la soluzione conforme al resto della struttura in quanto non prevede differenze tecnico/economiche apprezzabili.

## 2.5.2 Coperture

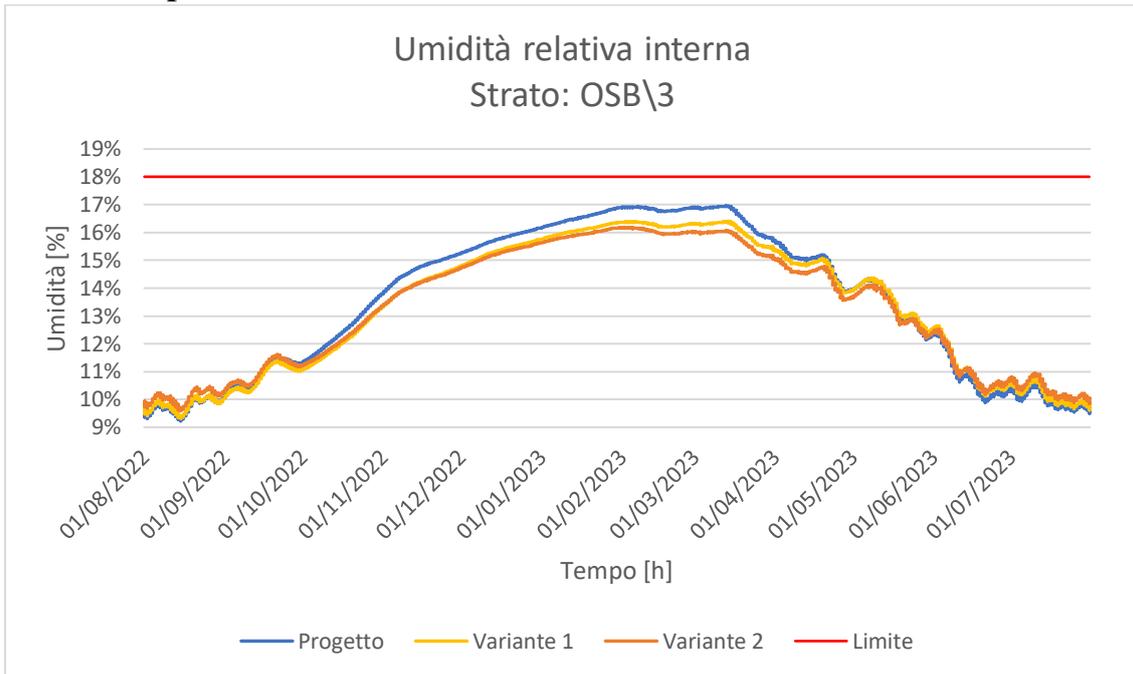


Grafico 2.35 Andamento dell'umidità relativa interna nello strato di OSB\3, copertura

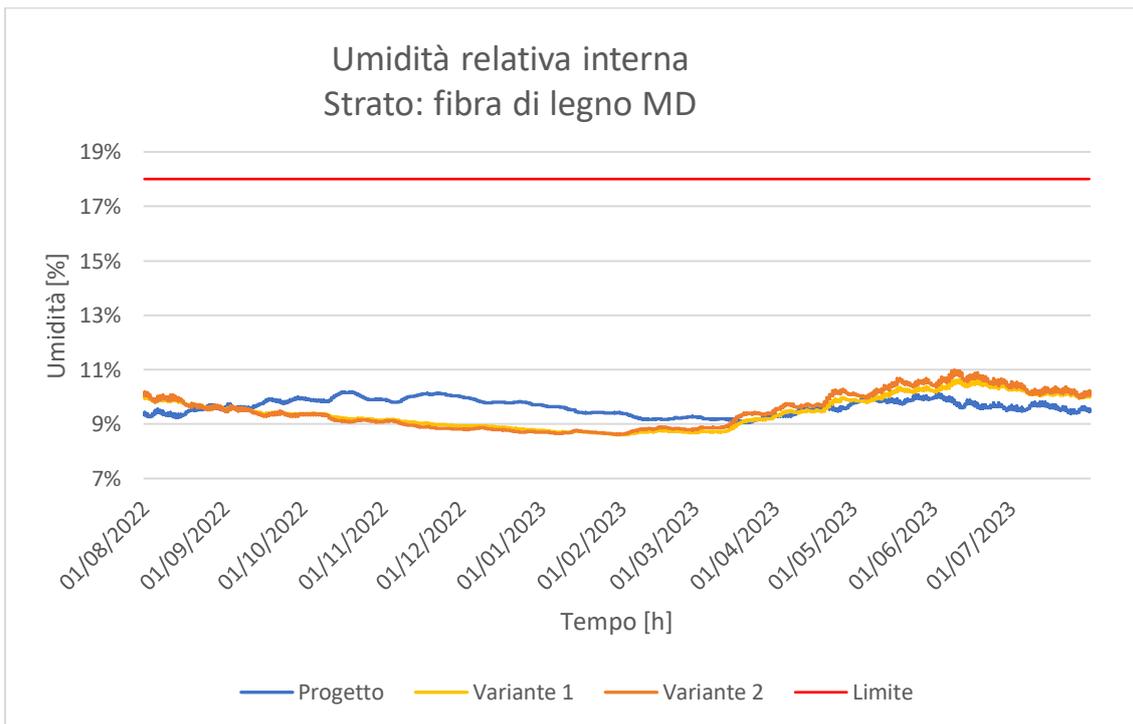


Grafico 2.36 Andamento dell'umidità relativa interna nello strato di fibra di legno a media densità, copertura

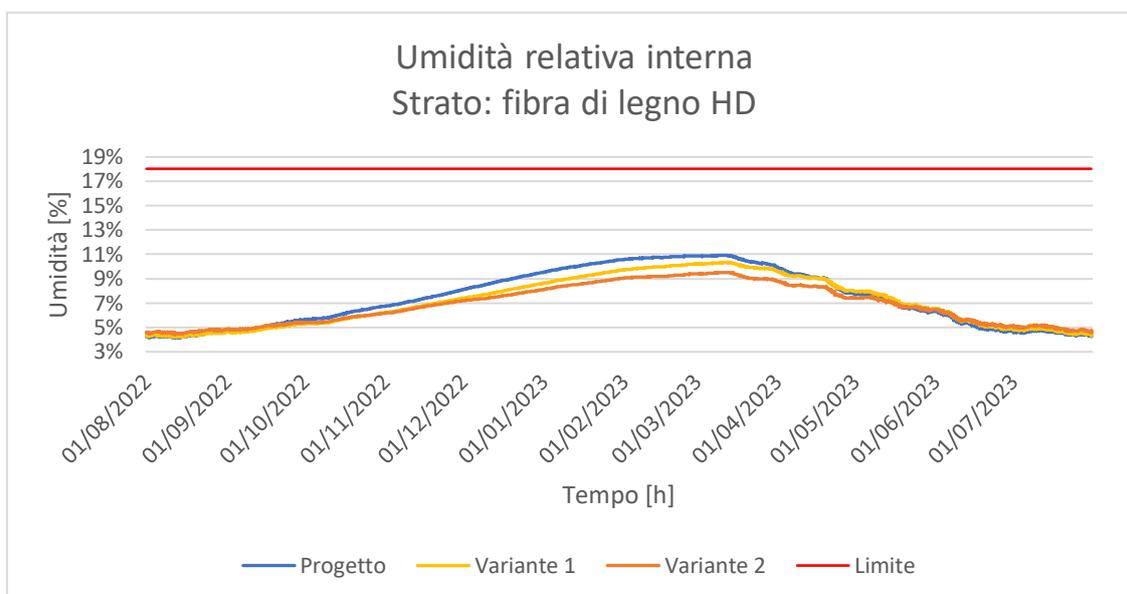


Grafico 2.37 Andamento dell'umidità relativa interna nello strato di fibra di legno ad alta densità, copertura

I grafici precedenti mostrano gli andamenti delle quantità di umidità presenti nei vari strati della copertura.

Lo strato più critico è rappresentato sempre dall'OSB\3, posto sopra gli isolanti.

Come detto in precedenza si tratta di coperture leggere, molto performanti dal punto di vista termico in regime di riscaldamento, ma che presentano lo svantaggio, durante il periodo estivo, di avere un'inerzia termica ridotta.

Per questo motivo le due varianti qui analizzate sono state ideate e progettate come alternative più "pesanti" al fine di garantire uno sfasamento termico migliore nella stagione calda.

Da un punto di vista igrometrico, infatti, non sono presenti problemi, poiché tutti i valori sono inferiori a quello limite e, sebbene nello strato di OSB\3 si raggiungano valori di umidità massima attorno al 17% (nella soluzione di progetto), non risulta essere problematico poiché questo è un elemento non strutturale, utilizzato principalmente per uniformare il piano di appoggio per la listellatura.

In ogni caso, le due varianti presentate, garantiscono un notevole miglioramento del comportamento igrometrico anche in quest'ultimo strato.

Nella prima, "Variante 1", lo strato di isolante in fibra di legno a media densità da 4 cm è stato sostituito con un pannello isolante in fibra di legno, legato con cemento per aumentarne la massa superficiale.

Sono state sostituite inoltre le perline con lastre di gesso fibro-rinforzato per aumentare sia la massa superficiale sia lo scambio termico tra la struttura e l'ambiente interno, in previsione di una ventilazione programmata.

Nell'ultima soluzione proposta, la "Variante 2", si è ulteriormente aumentato lo strato in fibra di legno legata a cemento ad 8 cm, eliminando ulteriori 4 cm di fibra di legno a media densità, al fine di massimizzare l'aumento della massa superficiale, mantenendo sempre le lastre di gesso fibro-rinforzato al posto delle perline.

Le relative stratigrafie sono riportate nella sezione precedente.

In entrambe le varianti è possibile apprezzare una notevole riduzione dell'umidità all'interno dello strato di isolante in fibra di legno ad alta densità (Fibra HD), già notevolmente inferiore al limite anche nella soluzione di progetto, il quale non altera le caratteristiche termiche del materiale.

Ciò è dovuto all'inserimento, alla base del pacchetto isolante, di un materiale meno traspirante e più denso.

Riepilogo generale coperture							
Copertura	Strato	Riduzione umidità relativa	Massa superficiale [kg/m <sup>2</sup> ]	Aumento massa superficiale [%]	Delta costo [%]	Trasmittanza [W/(m <sup>2</sup> K)]	Sfasamento termico
<b>Progetto</b>	OSB3	0%	73,47	0%	0%	0,172	11h 12'
	Fibra HD	0%					
	Fibra MD	0%					
<b>Variante 1</b>	OSB3	16,4%	99,07	35%	1%	0,179	13h 01'
	Fibra HD	10,3%					
	Fibra MD	10,6%					
<b>Variante 2</b>	OSB3	16,2%	115,07	57%	2%	0,184	13h 43'
	Fibra HD	9,5%					
	Fibra MD	11,0%					

Tabella 2.10 Riepilogo generale coperture

La tabella 2.10 riporta i principali valori caratterizzanti le coperture in esame.

Si possono osservare notevoli miglioramenti dal punto di vista igrometrico in entrambe le soluzioni.

Tutti gli strati in esame presentano una riduzione dell'umidità, dovuta all'utilizzo di un materiale meno traspirante in prossimità dell'ambiente interno, e un aumento notevole del valore di sfasamento termico.

Tuttavia, come ipotizzato in precedenza, i risultati ottenuti dalla simulazione della Variante 2 mostrano un comportamento del tutto simile a quello della Variante 1.

Per questo motivo, visto anche la differenza di costo non giustificabile rispetto alla Variante 1, questa soluzione viene scartata.

Anche in questo caso, la copertura del garage non è stata valutata in questa sede, poiché non essendo una zona climatizzata, tutte le migliorie riguardanti la massa della struttura che comportino un aumento del costo non potrebbero essere giustificate. Pertanto, la copertura del garage, nelle successive analisi, è quella di progetto.

### 2.5.3 Materiali isolanti

Nelle stratigrafie sono presenti anche altri materiali a matrice legnosa, gli isolanti in fibra di legno, e anch'essi sono strettamente legati alla quantità di umidità presente.

Tuttavia, non essendo materiali strutturali e, di conseguenza, non potendone osservare direttamente una modifica proprietà meccaniche, è stata valutata la dipendenza della conduttività termica in funzione del contenuto di umidità.

Dati relativi a questa funzione riguardano solamente il materiale in condizioni asciutto e imbevuto di acqua, quindi tutti i valori utilizzati per costruire i grafici sotto riportati derivano da interpolazione lineare tra i due dati noti.

Nel caso in esame i materiali isolanti in fibra di legno presentano valori di umidità decisamente inferiori al valore limite per i materiali putrescenti 18%, ma avendo come caratteristica funzionale la conduttività termica si è ritenuto opportuno valutare come anche piccole quantità di umidità possano modificarla, incidendo quindi sulla sua capacità isolante.

Di seguito sono riportati i grafici relativi agli andamenti della conducibilità termica in funzione dell'umidità relativa per i differenti materiali isolanti utilizzati.

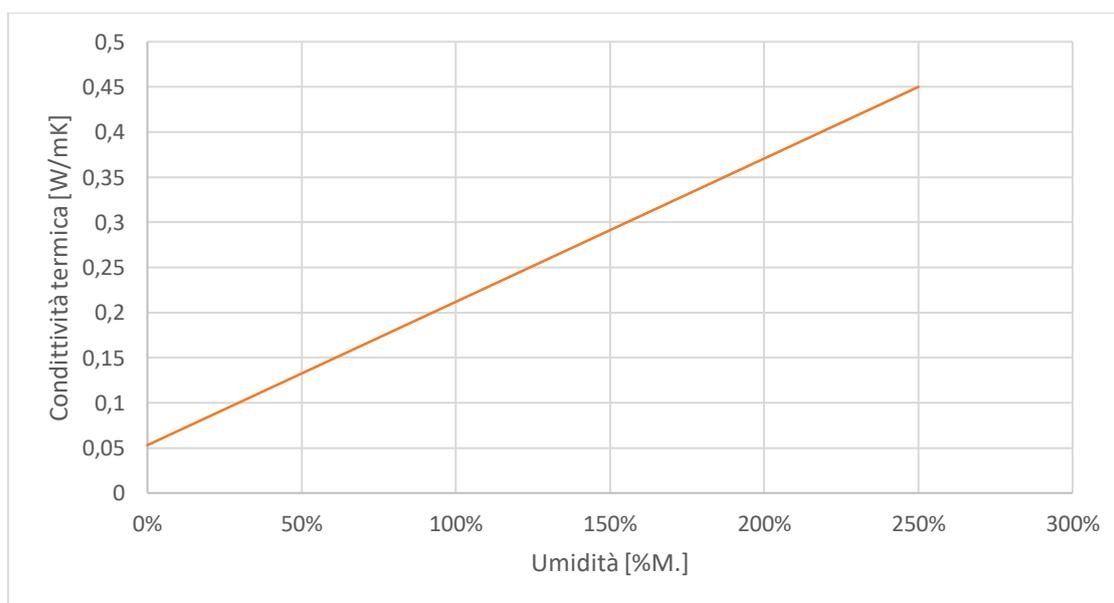


Grafico 2.38 Andamento della conducibilità termica, fibra di legno ad alta densità per la costruzione di coperture.

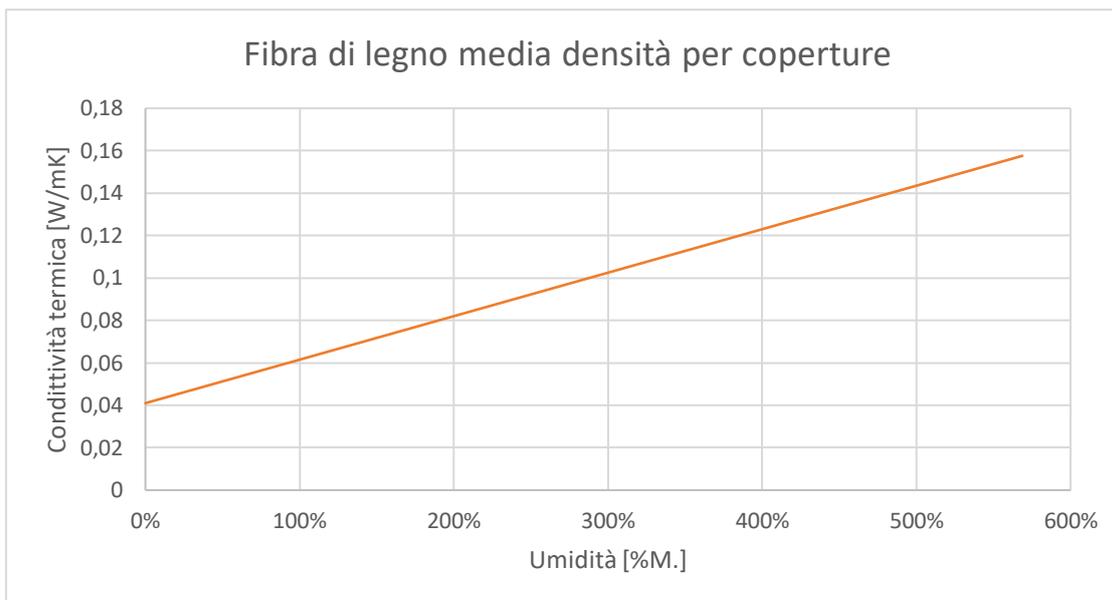


Grafico 2.39 Andamento della conducibilità termica, fibra di legno a media densità per la costruzione di coperture.

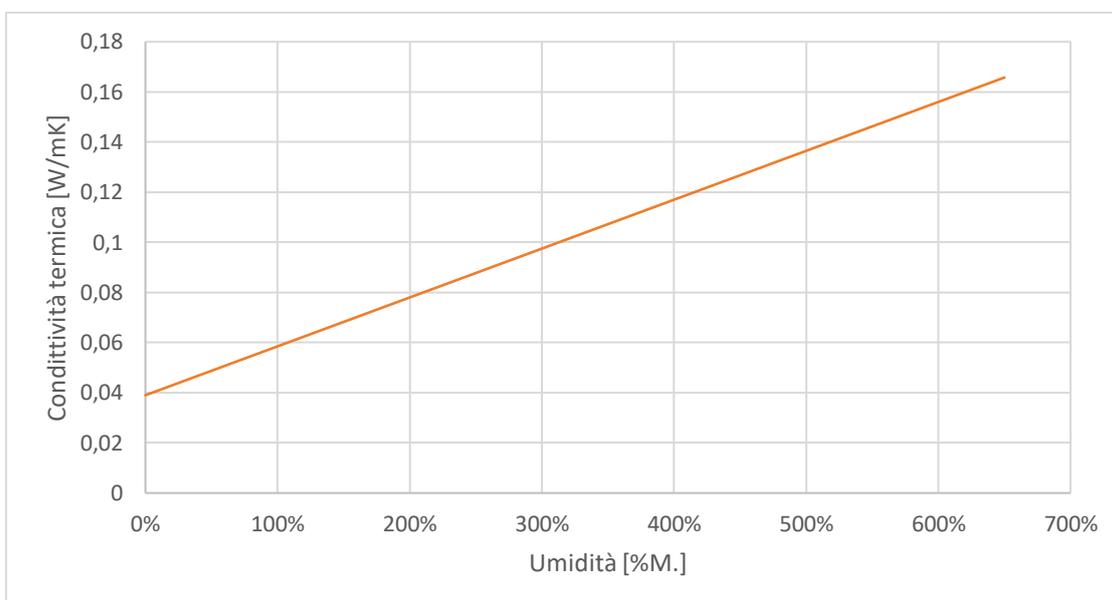


Grafico 2.40 Andamento della conducibilità termica, fibra di legno a media densità per la costruzione di pareti.

Valori sull'asse delle ascisse superiori al 100% indicano una quantità, in massa, di acqua all'interno del materiale superiore alla massa dell'isolante stesso; ciò avviene perché si tratta di materiali porosi, predisposti all'assorbimento di liquidi.

Come si può osservare nei grafici sopra riportati (grafici 2.38, 2.39, 2.40) la variazione della conduttività termica all'interno del range in esame, sempre inferiore al 18%, e perciò trascurabile, per questo motivo non costituirà una problematica per il corretto mantenimento dell'involucro opaco e delle sue caratteristiche.

## **2.6 Analisi termo-igrometrica dell'edificio**

### **2.6.1 Introduzione all'analisi**

Nel paragrafo seguente viene studiato l'edificio nel suo complesso, andando a combinare le diverse soluzioni studiate in precedenza, e analizzando come esse ne influenzino il comportamento termo-igrometrico.

Questa analisi è stata effettuata utilizzando il software Wufi PLUS, il quale permette di effettuare analisi termiche e igrometriche di edifici, simulando tutte le condizioni, sia interne che esterne, per il periodo di tempo desiderato.

L'edificio in esame è stato suddiviso in tre zone: la zona "abitazione", la zona "garage" e la zona "vespaio".

La prima è quella osservata con più attenzione poiché è un locale climatizzato all'interno del quale viene simulato il clima interno.

In questa zona è stata adottata come semplificazione la presenza di un unico ambiente, senza pareti divisorie fra i diversi locali, per garantire una maggiore velocità di calcolo e precisione del software.

Lo scopo infatti di questa analisi è lo studio dei parametri termici dell'edificio in funzione dell'involucro opaco utilizzato e, pertanto, è stata costruita solamente la "scatola esterna", senza creare variabilità dovute a divisori o parzializzazioni di impianti.

Sul lato ovest dell'abitazione è presente un garage, una zona non climatizzata utilizzata solamente come rimessa per le auto.

L'ultima zona è rappresentata dal vespaio, caratterizzato da una struttura ad igloo che garantisce una corretta areazione della pavimentazione dell'edificio, evitando così la formazione di condense e umidità eccessiva.

Anche la zona vespaio non è climatizzata e presenta solamente bocchette di areazione per una ventilazione naturale.

Utilizzando questo software sono state effettuate due tipologie di analisi differenti: una per la valutazione in "free-running", edificio senza impianti termici in funzione per valutarne solamente il comportamento termico, ed un'analisi completa con l'impianto termico in funzione, per la valutazione del fabbisogno energetico.

Nel secondo caso sono definite infatti le temperature di set-point dell'impianto di climatizzazione che ne determinano l'accensione e lo spegnimento.

## 2.6.2 Varianti in esame e parametri dell'edificio

L'analisi in esame in questo paragrafo è la continuazione dell'analisi delle singole stratigrafie esposta nella sezione precedente.

Per questa ragione, di seguito, sono confrontate due soluzioni in entrambe le modalità di studio, free-running e con impianti, con stratigrafie differenti per quanto riguarda la copertura e le pareti esterne.

Per quanto concerne infissi trasparenti, portoni di ingresso e sezionali del garage sono stati mantenuti i medesimi manufatti in entrambe le soluzioni, così come per vernici, colorazioni orientamento dell'edificio e soluzione impiantistica.

Sono state quindi elencate le soluzioni e le relative stratigrafie utilizzate (i nomi fanno riferimento alle descrizioni del capitolo precedente) e, infine, i parametri degli infissi in esame, forniti questi direttamente dal costruttore.

### - Soluzione di progetto

Elemento	Stratigrafia
Parete zona abitazione	Progetto
Copertura zona abitazione	Progetto
Parete zona garage	Progetto
Copertura zona garage	Progetto

### - Soluzione Variante

Elemento	Stratigrafia
Parete zona abitazione	Variante 3
Copertura zona abitazione	Variante 1
Parete zona garage	Variante 1
Copertura zona garage	Variante 1

Nella tabella seguente sono riportati i parametri degli elementi trasparenti:

Valori	
Superficie [m <sup>2</sup> ]	26,83
Inclinazione [°]	90
Orientamento [%]	30 SUD, 8 EST, 40 OVEST, 22 NORD
Parametri termici	
R <sub>si</sub> [(m <sup>2</sup> K) /W]	0,13
R <sub>se</sub> [(m <sup>2</sup> K) /W]	0,04 – in funzione del vento
U <sub>w</sub> montato [W/(m <sup>2</sup> K)]	1,76
Coeff. Di riduzione del telaio	0,70
Tipologia di schermatura	Avvolgibili in alluminio coibentati

Tabella 2.11 Riepilogo parametri elementi trasparenti

## Ponti termici

Utilizzando il software IRSI, per il calcolo agli elementi finiti, sono stati valutati tutti i ponti termici tra i diversi componenti che compongono l'involucro opaco per entrambe le soluzioni in esame.

Oltre che per il calcolo del fabbisogno, questa analisi permette di prevedere possibili formazioni di condensa e muffa nelle giunzioni tra i diversi elementi.

Sono stati quindi valutati i seguenti ponti termici:

- parete – copertura;
- parete – solaio;
- parete – infisso;
- pilastro interno alla struttura portante;

Di seguito i valori misurati.

<b>Soluzione di progetto</b>		
<b>Descrizione</b>	<b>Coefficiente lineico interno [W/(mK)]</b>	<b>Coefficiente lineico esterno [W/(mK)]</b>
Parete – copertura	0,063	0,049
Parete – solaio	0,074	0,066
Parete - infisso	0,084	0,084
Pilastro	0,007	0,007

Tabella 2.12 Ponti termici soluzione di progetto

<b>Soluzione variante</b>		
<b>Descrizione</b>	<b>Coefficiente lineico interno [W/(mK)]</b>	<b>Coefficiente lineico esterno [W/(mK)]</b>
Parete – copertura	0,063	0,062
Parete – solaio	0,065	0,090
Parete - infisso	0,083	0,083
Pilastro	0,008	0,008

Tabella 2.13 Ponti termici soluzione "Variante"

### 2.6.3 Parametri di simulazione

#### Luogo e clima

Il primo parametro di quest'analisi è il luogo in cui è situato l'edificio, che a sua volta definirà il clima.

L'edificio verrà costruito nelle campagne attorno a Chieri (TO), città metropolitana di Torino.

All'interno del database del software è presente il clima della città di Torino, e data la vicinanza con il sito in esame, è stato ritenuto appropriato utilizzare questo dato per la simulazione del clima esterno.

In questo modo sono stati inseriti di default tutti i principali parametri geografici, quali latitudine, longitudine, altitudine, fuso orario ed altri parametri aggiuntivi.

Tutti i parametri elencati in precedenza sono riassunti nella seguente tabella.

Parametri geografici e climatici	
Latitudine [°]	45,00
Longitudine [°]	7,68
Altitudine (s.l.m) [m]	267
Fuso orario [h da UTC]	1
Albedo	Erba fresca
Rifl. Terreno di onde corte [-]	0,26
Rifl. Terreno di onde lunghe [-]	0,1
Emissività terreno [-]	0,9
Grado di nuvolosità [-]	0,66
Concentrazione di CO2 [ppmv]	350

Tabella 2.14 Parametri geografici e climatici

Di seguito sono riportati gli andamenti delle temperature esterne e dell'umidità relativa per la zona in esame.

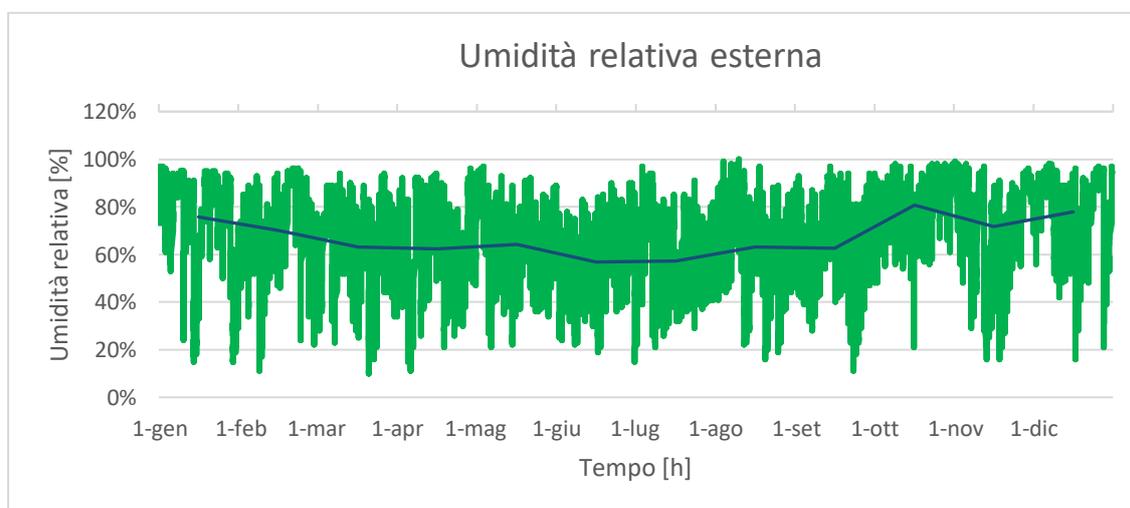
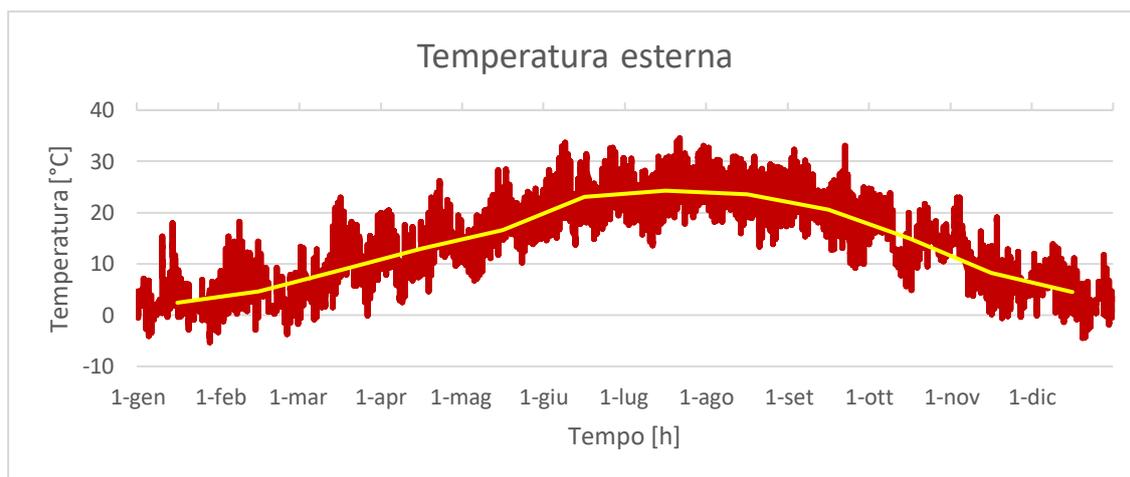


Grafico 2.41 Andamento dell'umidità relativa esterna a Torino

È stato poi creato un “clima opzionale” per simulare l’andamento della temperatura del terreno, ipotizzata circa costante e pari a 14 °C alla profondità di 1 m.

Questo clima è utilizzato per le simulazioni del clima all’interno della zona “vespaio”.

### Profilo di simulazione

È stato scelto come profilo di simulazione l’arco temporale tra il 01/01/2020 e il 01/01/2023, periodo abbastanza esteso per permettere l’esclusione della dipendenza del comportamento termico dalle condizioni iniziali.

Per questo motivo, in seguito, verranno analizzati dati relativi al solo anno 2022.

È stato inoltre un possibile carico di occupazione interna, per la valutazione di calore e umidità prodotti da azioni antropiche; si tratta di un edificio adibito a civile abitazione e, per questo motivo, è stata ipotizzata la presenza di quattro persone.

Ipotizzando una famiglia composta da due genitori lavoratori e due figli, studenti, i guadagni convettivi saranno quindi concentrati nelle prime ore del mattino e nel tardo pomeriggio-sera.

Il grafico seguente mostra i dati utilizzati, presi dalla libreria del software.

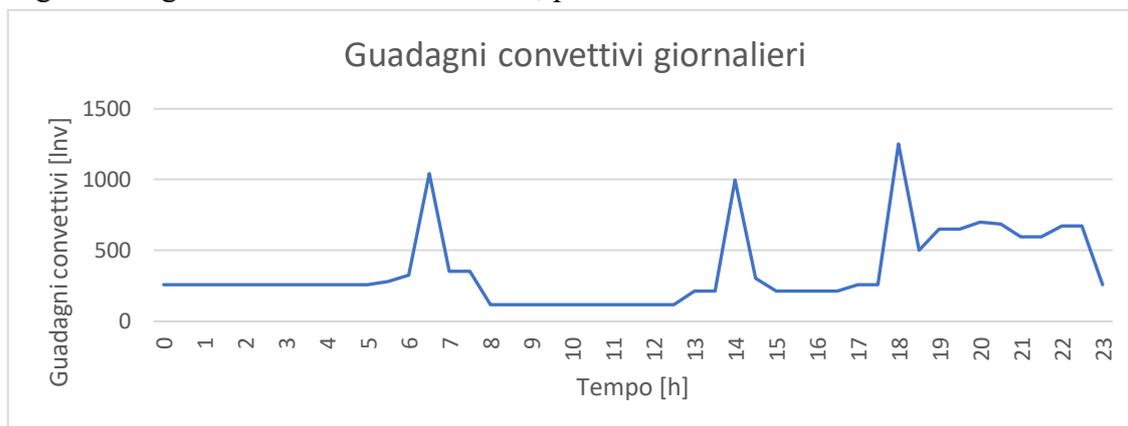


Grafico 2.42 Guadagni convettivi giornalieri

L’ultimo parametro riguarda invece la ventilazione.

Per ogni zona è possibile inserire dati riguardanti i ricambi d’aria per ventilazione e per infiltrazione; tuttavia, essendo un edificio di nuova costruzione nel quale la tenuta all’aria è un aspetto fondamentale, i valori per infiltrazioni saranno ridotti, soprattutto nella zona abitativa.

Per quanto riguarda la ventilazione questa è stata ipotizzata naturale, in quanto non si tratta di un’analisi impiantistica e, inoltre, è stata ipotizzata una maggiore areazione durante la notte nel periodo estivo, utilizzando il concetto di “free-cooling”, per raffrescare utilizzando la minor temperatura notturna.

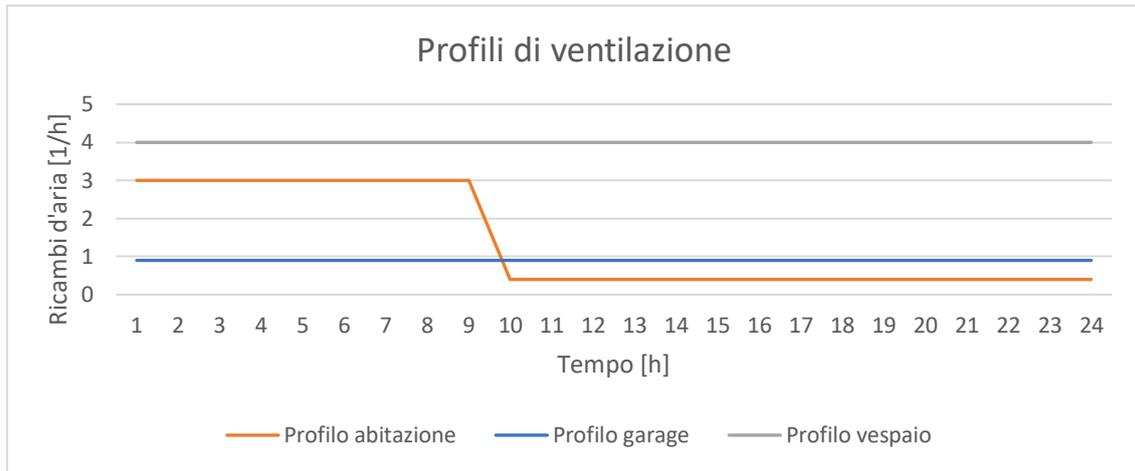


Grafico 2.43 Profili di ventilazione naturale

La ventilazione nel vespaio è essenziale per la salubrità del basamento dell'edificio, ed è garantita da bocchette di areazione opportunamente progettate; il valore di ventilazione nella zona garage è dovuto a maggiori infiltrazioni d'aria in prossimità dei due portoni sezionali.

## **2.7 Risultati analisi energetica dell'edificio**

Nella sezione seguente sono esposti risultati dell'analisi energetica dell'intero edificio.

In un primo momento è stato valutato il comportamento in condizioni di “free running”, ovvero simulando l'andamento della temperatura interna in totale assenza di impianti, in funzione quindi delle sole condizioni climatiche esterne, al fine di caratterizzare in maniera dettagliata l'involucro opaco nella sua completezza.

Successivamente è stato inserito nella simulazione lo schema impiantistico, al fine di valutare i diversi carichi energetici richiesti dall'edificio nelle diverse configurazioni prese in esame.

L'arco temporale preso in esame nella simulazione è compreso tra il 1° gennaio 2020 e il 1° gennaio 2023.

Tuttavia, per garantire l'attendibilità dei risultati ed evitare l'influenza delle condizioni iniziali, anche qui l'analisi è focalizzata sull'anno 2022.

Le due soluzioni, quella di progetto e la Variante 3, hanno caratteristiche termiche di isolamento comparabili, ma diverse scelte costruttive che ne caratterizzano il comportamento, principalmente estivo.

Per una struttura leggera, come quelle in esame, il periodo più “critico” durante l'anno è quello estivo, nel quale è necessario il raffrescamento.

Una parete leggera, come d'altro canto anche una copertura leggera, presentano inerzie termiche ridotte dovute alla massa esigua dei materiali che le compongono.

Risulta quindi necessaria la valutazione di modalità alternative per la rimozione del calore dovuto all'irraggiamento solare diretto sull'involucro.

La prima analisi effettuata è quella riguardante il comfort adattivo lungo il periodo di raffrescamento, ipotizzato dal 15 aprile 2022 al 15 ottobre 2022, seguita poi da focalizzazioni sul mese e sul giorno più caldo.

### **2.7.1 Valutazione del comfort adattivo**

Si tratta di un modello cosiddetto “psicologico”, poiché utilizza un approccio molto soggettivo e, di conseguenza, è caratterizzato dalla difficoltà nel definire parametri scientifici di riferimento.

Alla base di questo modello c'è la capacità di un essere umano di adattarsi all'ambiente circostante, modificando le proprie variabili di adattamento.

Queste si possono suddividere in tre classi di adattamento:

- Adattamento comportamentale: rappresenta le possibili azioni che un individuo può mettere in atto al fine di modificare il proprio bilancio energetico, come modificare l'abbigliamento, l'attività fisica, oppure l'interazione con l'impianto di climatizzazione.
- Adattamento fisiologico: rappresenta l'accrescere della capacità di sopportazione di un individuo a determinate condizioni climatiche, in seguito all'aumentare del tempo di permanenza in tale ambiente.
- Adattamento psicologico: rappresenta la modalità di reazione agli stimoli in conseguenza delle conoscenze ed esperienze pregresse.

Esistono diverse correlazioni dirette tra la temperatura di comfort interna e la temperatura esterna

$$T_{co} = a * T_{est} + b$$

dove

$T_{co}$  : temperatura interna di comfort [°C]

$T_{est}$  : temperatura esterna di riferimento [°C]

$a$  : costante che rappresenta la correlazione tra  $T_{co}$  e  $T_{est}$  [-]

$b$  : costante che rappresenta la temperatura minima accettabile [°C]

In questa analisi è stata utilizzata la correlazione fornita dal CEN<sup>11</sup>, e valida in tutta Europa.

Il parametro “a” fornito in questa correlazione equivale a 0,33, mentre la temperatura minima ammissibile, parametro “b”, equivale a 18,8 °C.

La temperatura esterna è stata valutata come la media delle temperature esterne durante il periodo in esame ed equivale a 24,75 °C.

Dalla correlazione descritta in precedenza si ottiene:

$$T_{co} = 0,33 * 24,75 + 18,8 = 26,97 \text{ °C}$$

Oltre a questo dato è stata tenuta in considerazione anche la massima variazione ammissibile della temperatura di comfort per questa tipologia di edificio, pari a 2°C.

Per questo motivo si è ritenuto opportuno utilizzare una temperatura di comfort adattivo uguale a 28°C.

---

<sup>11</sup> CEN: Comitato Europeo per la Normativa tecnica.

Partendo dai risultati delle temperature interne, estratti direttamente dalle simulazioni, sono state in seguito valutate le frequenze delle varie temperature, con una risoluzione di 0,5°C. Infine è stato analizzato l'andamento della frequenza cumulata.

Di seguito sono riportati i grafici relativi alla soluzione di progetto e alla variante presa in esame.

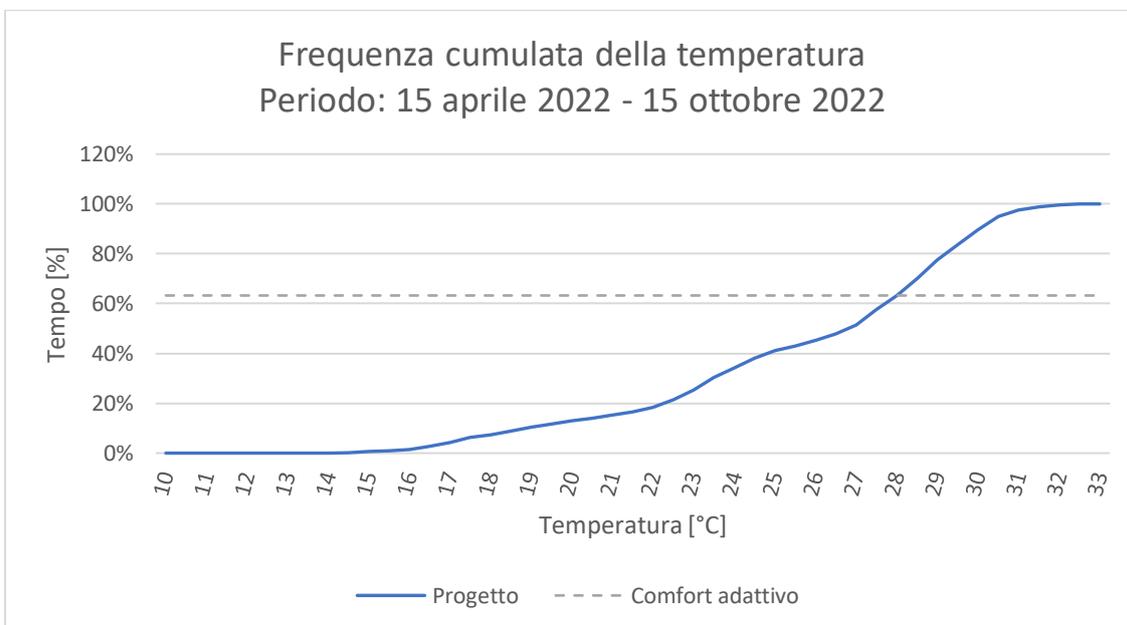


Grafico 2.44 Frequenza cumulata della temperatura

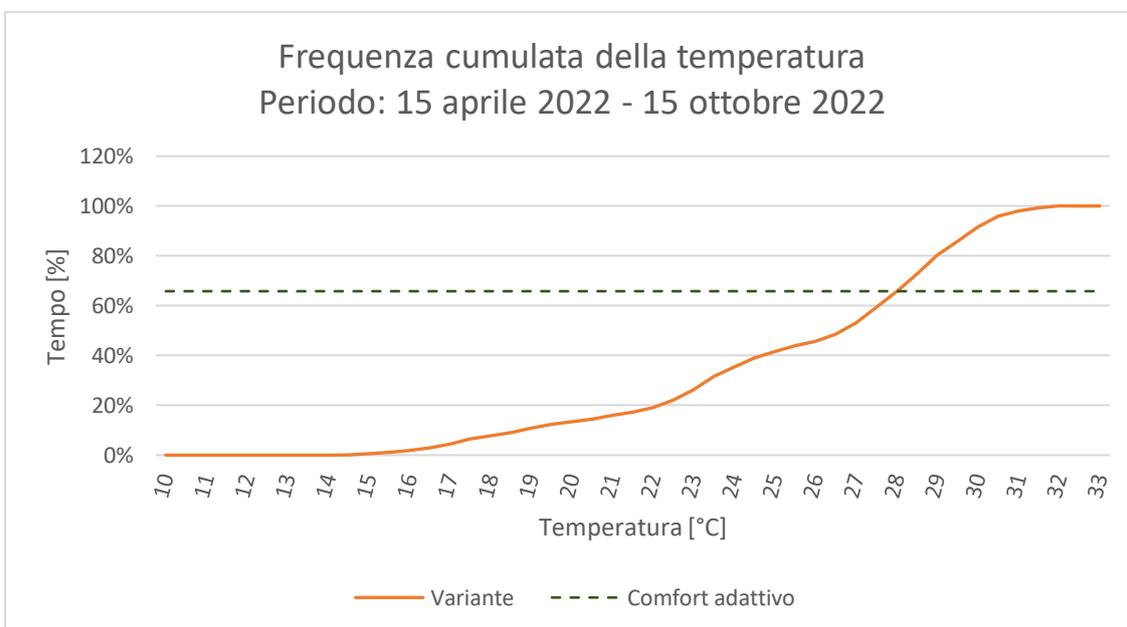


Grafico 2.45 Frequenza cumulata della temperatura

Questa analisi riporta le frequenze cumulate della temperatura interna nel caso di progetto e nella sua variante.

I dati di temperatura interna sono stati estratti dalle simulazioni in free-running, così da non avere interferenze da parte degli impianti di climatizzazione e poter valutare quindi le differenti caratteristiche dell'involucro opaco.

Come si può osservare, gli andamenti nei due casi sono confrontabili e non mostrano scostamenti significativi.

Tuttavia, si osserva nella variante una riduzione della temperatura ed un aumento percentuale del tempo in cui si rispetta la condizione di comfort adattivo.

Nella soluzione di progetto la temperatura si mantiene al di sotto dei 28°C per circa il 63% del tempo, mentre aumenta di 3 punti percentuali nella variante, fino a raggiungere circa il 66% del tempo.

Questa riduzione è da imputarsi contemporaneamente sia alla ventilazione delle pareti sia all'aumento della massa superficiale della copertura, sebbene non sia stato possibile individuare il peso di ciascuno nei risultati.

Per ottenere questo dato è stata simulata, e solamente al fine di questa valutazione, una tipologia alternativa, denominata "Variante 2", avente le pareti portanti con facciata ventilata e la stessa copertura di progetto.

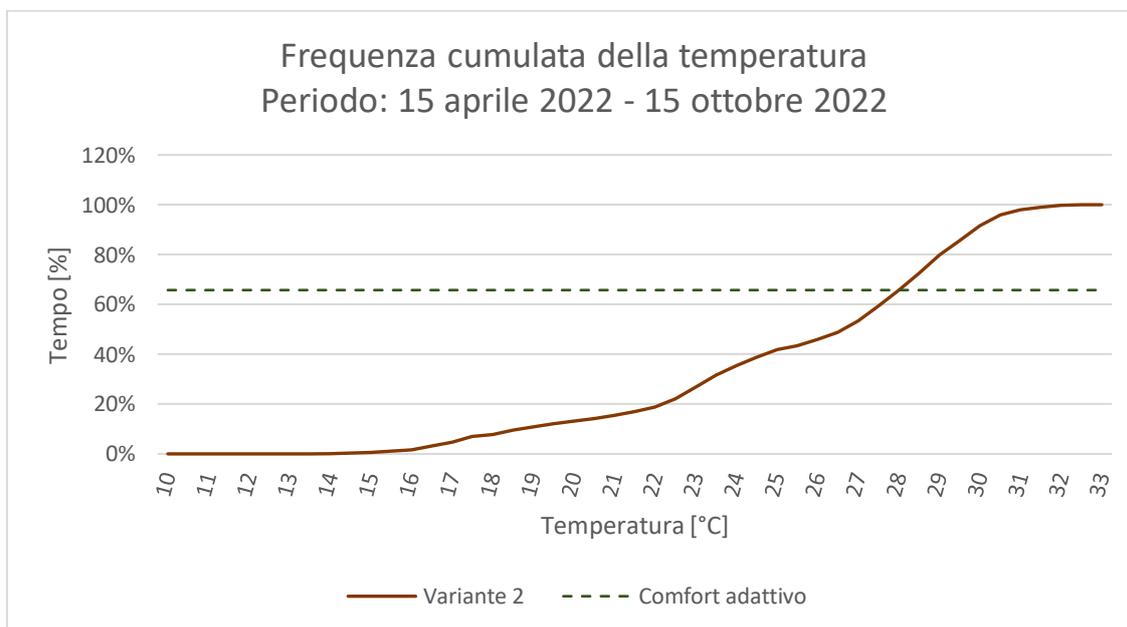


Grafico 2.46 Frequenza cumulata della temperatura

Da quest'ultima simulazione è stata ottenuta la percentuale di tempo in cui l'ambiente interno possiede una temperatura inferiore a quella del comfort adattivo, pari a 65,74 %. Questo dato mostra come la facciata ventilata, applicata alla parete portante esterna, restituisca risultati immediati riguardanti l'asportazione del calore durante il periodo di raffrescamento.

## 2.7.2 Analisi del mese di luglio

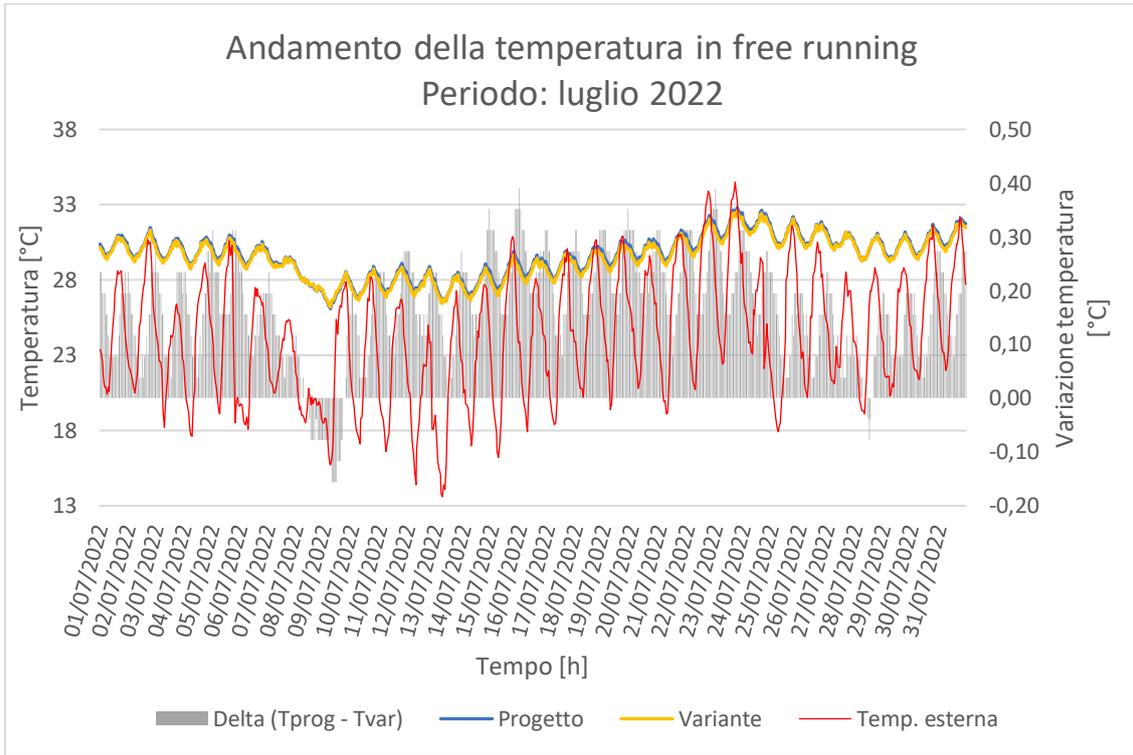


Grafico 2.47 Andamento della temperatura in condizioni di free-running

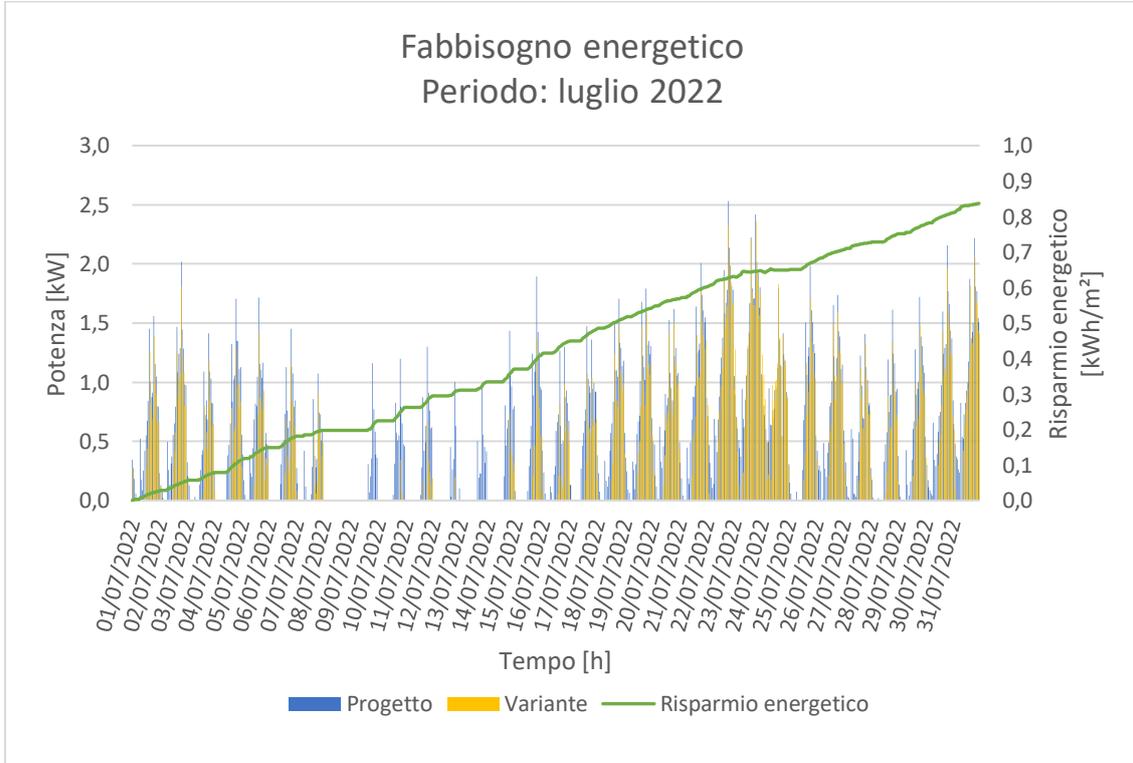


Grafico 2.48 Fabbisogno energetico dell'edificio

È stato scelto il periodo di luglio 2022 come mese di riferimento per una valutazione più dettagliata del comportamento dell'involucro opaco durante il periodo di raffrescamento. La scelta temporale è dovuta al fatto che il mese di luglio rappresenta quello più caldo durante tutto l'arco dell'anno e, di conseguenza, quello più critico per il surriscaldamento. Anche in questa situazione sono stati analizzati sia il comportamento dell'involucro opaco in condizioni di free-running sia il fabbisogno energetico richiesto dall'edificio nelle due soluzioni in esame.

Per aumentare ulteriormente il dettaglio dell'analisi è stato poi valutato singolarmente il giorno più caldo del mese.

Nel primo grafico (grafico 2.47) sono rappresentate le curve relative agli andamenti di temperatura nelle due soluzioni in esame.

Le differenze di temperatura, riportate sull'asse secondario attraverso le colonne, presentano nel giorno 22 luglio un valor medio di 0,3 °C e un valore massimo di 0,4°C. È inoltre riportata, per completezza, la temperatura dell'aria esterna durante tutto il mese. Queste differenze di temperatura possono risultare esigue se considerate singolarmente, ma diventano decisamente significative nel calcolo del fabbisogno energetico dell'edificio.

Per questo motivo, come mostrato nel grafico successivo (grafico 2.48), quest'ultimo viene valutato analizzando le potenze richieste per la climatizzazione attraverso step temporali di 1 ora.

Il grafico a colonne rappresenta i differenti carichi termici richiesti per la climatizzazione dell'ambiente abitativo; la linea verde rappresenta l'andamento del risparmio energetico cumulato lungo l'intero mese.

Dal grafico del fabbisogno energetico è possibile osservare che per la soluzione Variante sono presenti giorni in cui esso è nullo e, di conseguenza, si possa dedurre che l'intero impianto di climatizzazione rimanga spento.

Questa situazione è dovuta appunto alle differenze di temperatura osservate in precedenza, per le quali anche una piccola variazione di temperatura può garantire una temperatura interna al di sotto del set-point dell'impianto.

Durante i giorni compresi tra l'8 luglio e il 15 luglio si possono osservare temperature esterne inferiori alla media mensile; ciò porta ad una maggiore riduzione delle temperature interne in entrambe le soluzioni.

Tuttavia, nella soluzione di progetto la temperatura interna risulta ancora superiore alla temperatura di set-point dell'impianto di climatizzazione, impostata a 25°C e, per questo motivo, si avvierà l'impianto.

Nella soluzione della Variante invece, le temperature interne sono lievemente al di sotto della temperatura di set-point e, pertanto, l'impianto rimarrà spento.

Di seguito viene mostrato il dettaglio relativo ai giorni compresi tra 8 luglio e il 15 luglio.

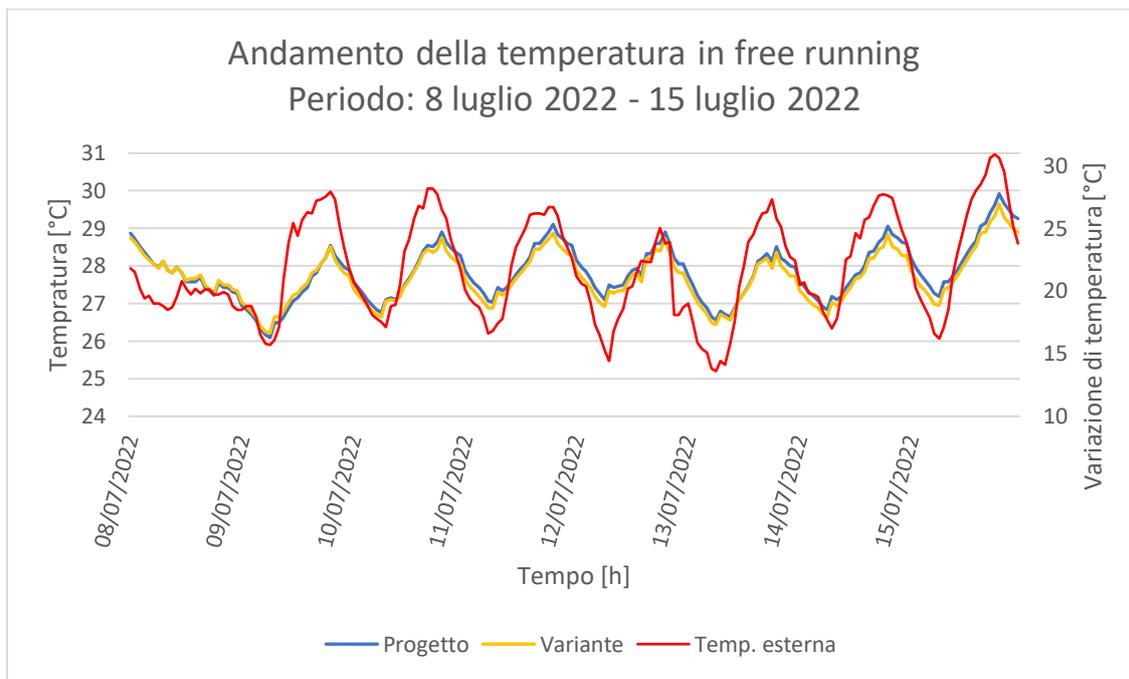


Grafico 2.49 Andamento della temperatura in condizioni di free-running

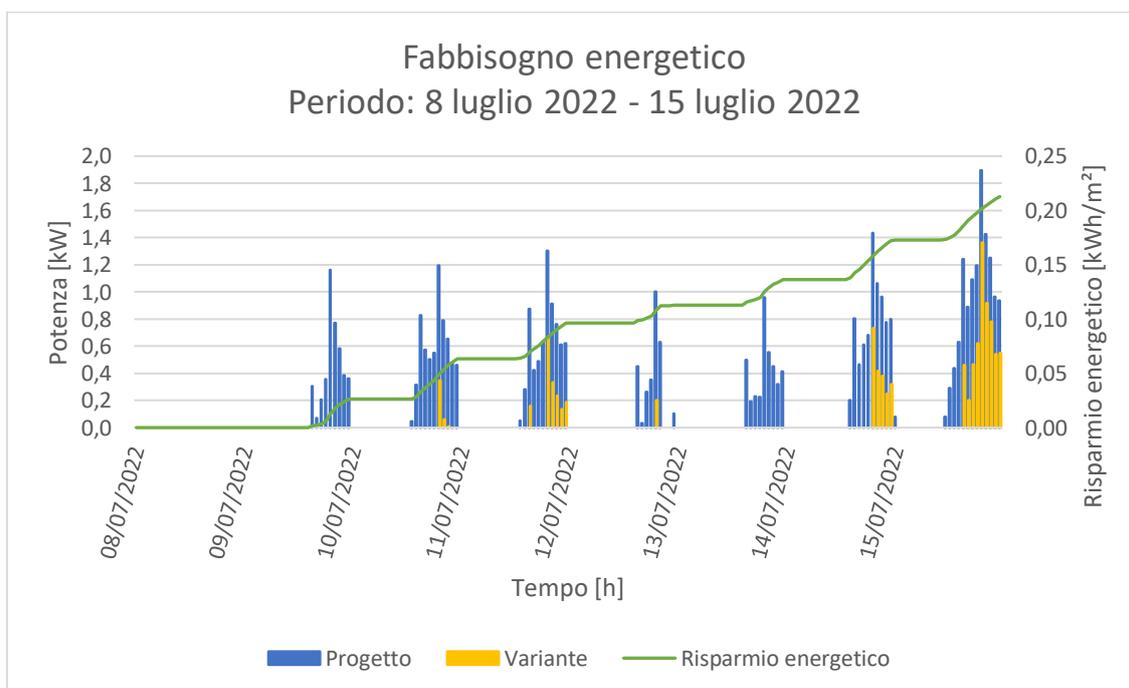


Grafico 2.50 Fabbisogno energetico dell'edificio

È possibile notare come temperature inferiori alla media mensile, soprattutto quelle notturne che in alcuni casi raggiungono i 14°C, riducano notevolmente la temperatura interna dell'edificio.

Non bisogna però farsi trarre in inganno dai valori di temperatura interna riportati nel grafico 2.49, poiché esso rappresenta l'andamento delle temperature in condizione di free-running, con la temperatura interna funzione soltanto della temperatura esterna e delle caratteristiche termiche dell'involucro.

A impianto di climatizzazione in funzione, la temperatura interna viene mantenuta in qualsiasi situazione minore o uguale alla temperatura di set-point; per questo motivo l'edificio si trova ad una temperatura inferiore rispetto al caso in condizione di free-running e, pertanto, un abbassamento consistente della temperatura esterna comporterà un abbassamento di quella interna al di sotto di quella di set-point dell'impianto di climatizzazione.

In ultima analisi è stato valutato il giorno più caldo del periodo simulato, rappresentato dal 22 luglio 2022.

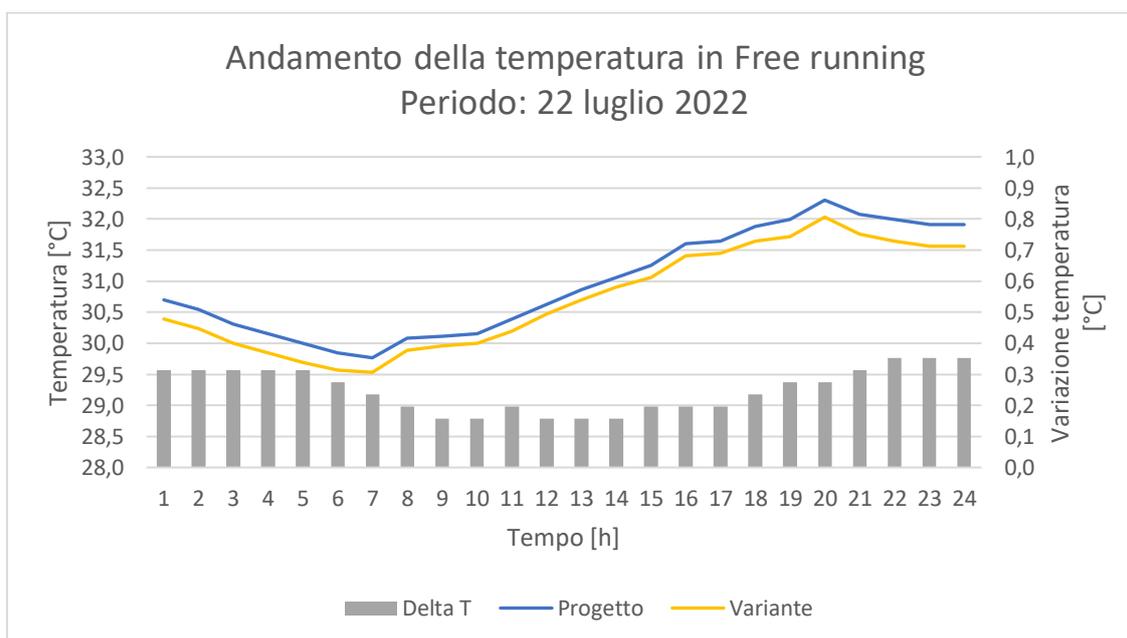


Grafico 2.51 Andamento della temperatura giornaliera in condizione di free-running

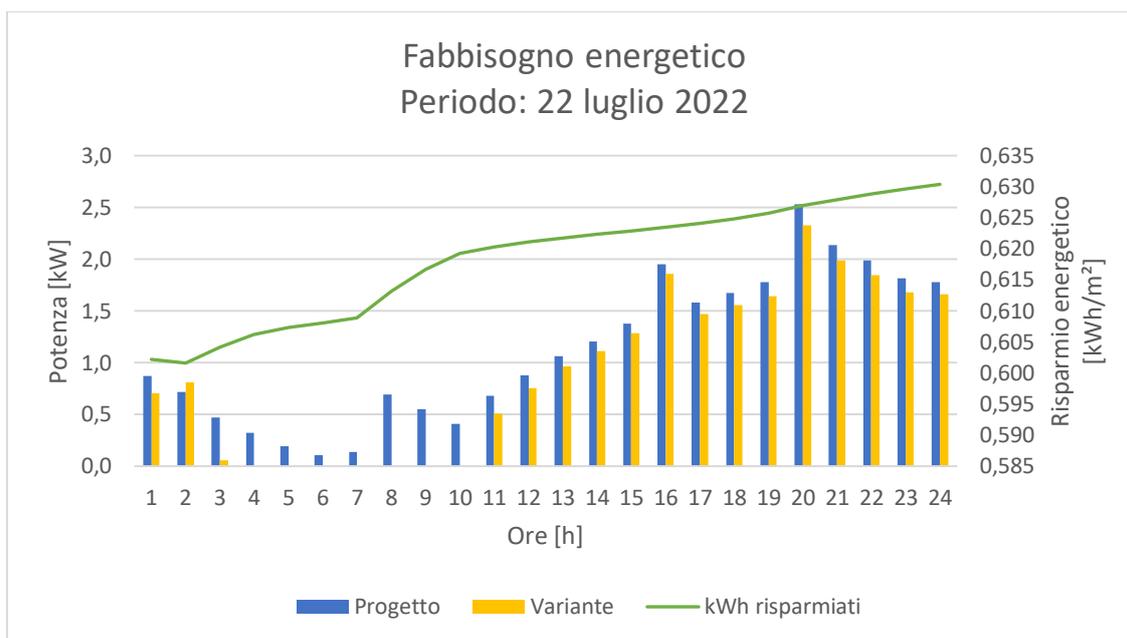


Grafico 2.52 Fabbisogno energetico giornaliero dell'edificio

Data la particolarità del giorno in esame, le differenze di comportamento termico sono più significative.

La differenza media di temperatura tra le due soluzioni è superiore alla media mensile, raggiungendo un valore superiore ai 0,3°C, e la principale conseguenza a questa situazione si verifica nelle ore notturne, quando la temperatura interna scende al di sotto del set-point provocando lo spegnimento dell'impianto.

Questo caso rappresenta la situazione particolare in cui il risparmio energetico è massimo e, per questo motivo, non può rappresentare un dato valido per la valutazione del fabbisogno energetico dell'edificio di quest'ultimo.

Per poter effettuare una valutazione del fabbisogno energetico dell'edificio è necessaria infatti un'analisi lungo un intero anno, riportata nel grafico sottostante.

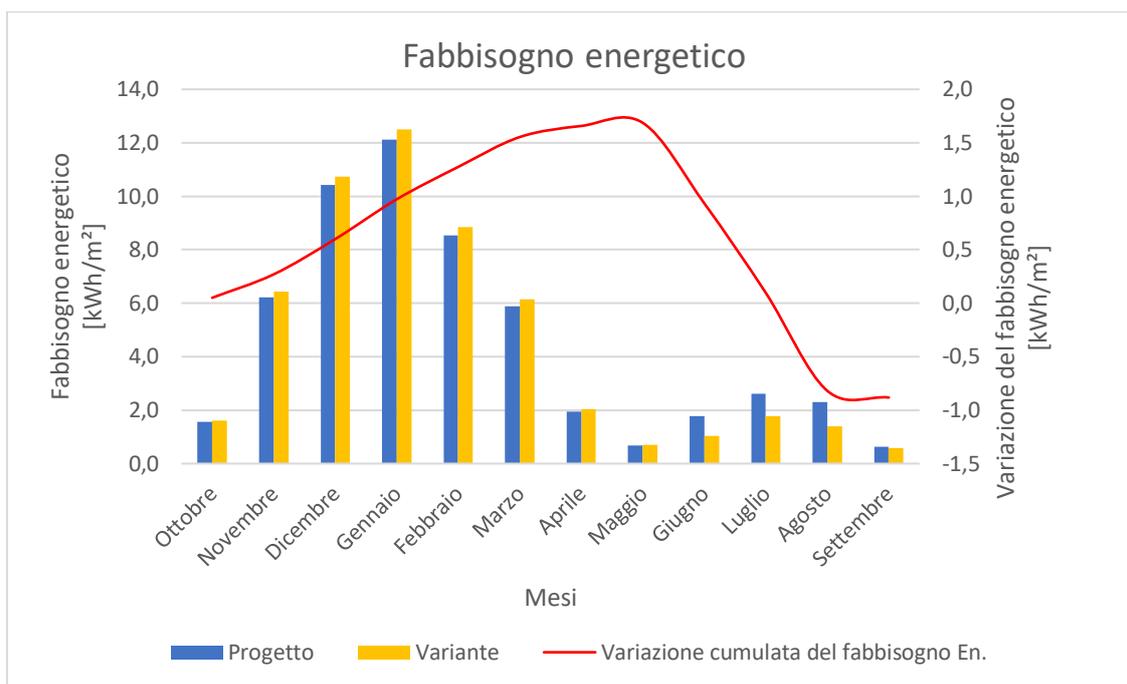


Grafico 2.53 Fabbisogno energetico annuo dell'edificio

Si possono facilmente distinguere la fase di riscaldamento, con un aumento del fabbisogno nella soluzione della variante rispetto a quella di progetto dovuto alla riduzione dello strato di isolante all'interno delle parate, e la fase di raffrescamento, nella quale si ha un risparmio energetico rispetto alla soluzione di progetto dovuto all'introduzione della parete ventilata.

Osservando la curva della variazione cumulata del fabbisogno energetico si nota come essa scenda ed assuma valori negativi, indicando così una diminuzione del fabbisogno totale dell'edificio nella soluzione variante rispetto a quella di progetto.

Si tratta comunque di variazioni di richiesta energetica molto bassi e, di conseguenza, si può affermare che le due soluzioni siano simili anche da punto di vista del consumo energetico.

## 2.8 Valutazione economica

Essendo questo un elaborato inerente ad un caso studio reale, risulta necessaria la trasposizione economica degli aspetti energetici presentati in precedenza.

La tabella seguente riassume i valori energetici mensili, suddivisi in riscaldamento e raffrescamento, convertiti, infine, nella valuta di riferimento, in questo caso euro.

Per l'elaborazione dei dati economici sono stati presi in considerazione parametri relativi al costo dell'energia e parametri caratteristici dell'impianto di generazione.

In particolare, è stato assunto 2 come valore medio del Coefficiente di Prestazione (COP) della pompa di calore ed un prezzo dell'energia pari a 0,205 €/kWh.

Come primo parametro è stato scelto un valore medio di COP non troppo elevato e ipotizzato costante lungo tutto il periodo dell'anno. In realtà, sono disponibili sul mercato pompe di calore con COP più elevati e, quindi, il risparmio annuale potrebbe ulteriormente ridursi.

Il secondo parametro è stato stimato utilizzando dati statistici dei prezzi dell'energia interpolati per il consumo annuale previsto per l'edificio.

I risultati di questa analisi economica mostrano come non ci sia una variazione significativa del fabbisogno energetico dell'edificio, in quanto circa 15 € di differenza annua non può essere considerato un risparmio significativo, ma piuttosto un equilibrio tra le due soluzioni.

Caso Studio di un edificio residenziale in legno

Mese	Progetto			Variante		
	Energia riscaldamento [kWh/m <sup>2</sup> ]	Energia raffrescamento [kWh/m <sup>2</sup> ]	Energia totale [kWh/m <sup>2</sup> ]	Energia riscaldamento [kWh/m <sup>2</sup> ]	Energia raffrescamento [kWh/m <sup>2</sup> ]	Energia totale [kWh/m <sup>2</sup> ]
Ottobre	1,56	0,00	1,56	1,61	0,00	1,61
Novembre	6,22	0,00	6,22	6,44	0,00	6,44
Dicembre	10,41	0,00	10,41	10,74	0,00	10,74
Gennaio	12,12	0,00	12,12	12,49	0,00	12,49
Febbraio	8,54	0,00	8,54	8,85	0,00	8,85
Marzo	5,88	0,00	5,88	6,16	0,00	6,16
Aprile	1,93	0,00	1,93	2,04	0,00	2,04
Maggio	0,62	0,05	0,67	0,67	0,03	0,70
Giugno	0,00	1,78	1,78	0,00	1,03	1,03
Luglio	0,00	2,61	2,61	0,00	1,77	1,77
Agosto	0,00	2,30	2,30	0,00	1,39	1,39
Settembre	0,00	0,64	0,64	0,00	0,58	0,58
<b>TOTALI</b> [kWh/m <sup>2</sup> ]	<b>47,28</b>	<b>7,38</b>	<b>54,66</b>	<b>48,99</b>	<b>4,79</b>	<b>53,78</b>
Variazione Energetica [%]				4%	-35%	-2%
<b>Totale</b> [€]	<b>775,42 €</b>	<b>121,07 €</b>	<b>896,49 €</b>	<b>803,44 €</b>	<b>78,58 €</b>	<b>882,02 €</b>
Variazione [€]				28,02 €	- 42,48 €	- 14,47 €

Tabella 2.15 Riepilogo energetico-economico dei risultati

### 3 Conclusioni

Il lavoro è un'analisi tecnico-economica, nata con l'intento di valutare in maniera critica il possibile utilizzo della parete a facciata ventilata come rimedio all'umidità interna di una struttura portante in legno in ambito edile.

In primo luogo, è stata valutata la sola stratigrafia di diverse ipotesi costruttive, in condizioni critiche di esposizione e di carico di umidità interno, simulandone il comportamento attraverso analisi in regime stazionario e dinamico, al fine di studiare le relazioni che intercorrono tra calore latente, trasporto capillare e trasmissione del vapore. In base ai primi risultati è stata scelta la soluzione alternativa migliore, che rispondesse a diverse esigenze e parametri sia termici sia economici, ed è stata quindi utilizzata come confronto nella simulazione termica dell'intero edificio rispetto alla soluzione di progetto. Trattandosi di un caso studio reale i risultati dell'analisi del fabbisogno energetico dell'edificio sono stati tradotti in termini economici, ipotizzando rendimenti di impianto e stimando i costi dell'energia primaria.

Infatti, se la realizzazione della sola facciata ventilata in un edificio tradizionale in muratura comporterebbe sia un costo aggiuntivo notevole per i materiali sia per l'aumento del tempo di posa in opera, nel caso di struttura in legno a telaio ciò si riduce poiché questa è costruita "a secco", e l'aggiunta della facciata ventilata comporta un costo aggiuntivo dovuto solamente ai materiali, i quali, grazie però alla facilità di lavorazione, garantiscono una veloce posa in opera.

Come spiegato in precedenza la parete in legno a telaio è altamente performante e, quindi, una riduzione dello strato isolante e l'utilizzo della facciata ventilata non ne influenzano in maniera significativa il comportamento termico nella stagione di raffrescamento.

La possibilità di una riduzione dello spessore della parete, utilizzando meno materiale isolante, comporta sia un risparmio sul costo del manufatto ma anche un aumento della superficie utile interna.

Nel periodo di riscaldamento, con questa soluzione, si ha una diminuzione evidente dell'umidità all'interno degli strati critici della stratigrafia, prevenendo quindi le possibili formazioni di condensa e di muffa che creerebbero fenomeni di danneggiamento della struttura, perdita delle caratteristiche termiche dei materiali costituenti l'involucro e situazioni di discomfort ambientale.

Per quanto concerne il periodo di raffrescamento la facciata ventilata garantisce una maggiore asportazione del calore proveniente dall'irraggiamento sull'involucro opaco, garantendo così una diminuzione della temperatura interna all'edificio.

Infatti, come si è potuto osservare dalle analisi, questa riduzione di temperatura, anche se minima, ha portato allo spegnimento dell'impianto di climatizzazione in alcune situazioni, poiché era stata raggiunta la temperatura di comfort.

Se si pensa inoltre, come sviluppo futuro, alla combinazione di una parete ventilata con una pompa di calore aria/aria, l'inserimento dell'aspirazione di quest'ultima nell'intercapedine ventilata porterebbe ad un significativo aumento della sua efficienza.

Infine, se si considera che il riscaldamento climatico, tema purtroppo molto serio ai nostri giorni, porterà ad un aumento della durata del periodo di raffrescamento, la facciata ventilata arriverà a ricoprire un ruolo fondamentale all'interno del bilancio energetico dell'edificio.

La Variante risulta quindi una soluzione totalmente confrontabile in termini energetici ed economici con quella di progetto, ma garantisce anche una maggiore resistenza e salubrità della struttura.

L'edificio presenta un caso limite, per geometria e dimensioni, all'applicazione delle facciate ventilate finalizzata solamente alla valutazione del risparmio energetico derivante. Per questo motivo non è possibile parlare di risparmio in termini di fabbisogno, poiché il minor consumo di energia nel periodo estivo viene compensato da una richiesta maggiore in quello invernale, dovuta alla diminuzione dello strato di isolante nella stratigrafia della parete. Sicuramente l'applicazione della facciata ventilata ad un edificio più idoneo, sia per geometria che per località, fornirebbe risultati ancora più significativi.

# Indici

## 1 Indice delle figure

<i>Figura 1.1</i> Struttura balloon frame .....	18
<i>Figura 1.2</i> Struttura platform frame.....	19
<i>Figura 1.3</i> Platea di fondazione con cordolo in C.A. ....	22
<i>Figura 1.4</i> Sezioni orizzontali della parete platform-frame.....	22
<i>Figura 1.5</i> Sezione orizzontale angolo platform-frame e sezione angolo platform-frame completa di cappotto e cartongesso .....	23
<i>Figura 1.6</i> Sezione orizzontale e verticale del serramento .....	24
<i>Figura 1.7</i> Sezione verticale nodo parete esterna e solaio .....	25
<i>Figura 1.8</i> Vista interna dell'orditura della copertura in un cantiere di proprietà VASS Technologies ...	27
<i>Figura 1.9</i> Staffe metalliche per la connessione tra parete e cordolo in C.A.....	29
<i>Figura 1.10</i> Fase di movimentazione e collocamento di una parete portante tramite camion-gru all'interno di un cantiere VASS Technologies .....	33
<i>Figura 1.11</i> Riepilogo valori di conduttività termica nei principali materiali.....	35
<i>Figura 1.12</i> Schema di una parete in legno con facciata ventilata .....	40
<i>Figura 1.13</i> Articolazione delle macro-voci di costo aggregate lungo le fasi del ciclo di vita edilizio secondo LCT.....	66
<i>Figura 2.1</i> Pianta piano terra.....	74
<i>Figura 2.2</i> Pianta della copertura.....	74
<i>Figura 2.3</i> Prospetto est .....	75
<i>Figura 2.4</i> Prospetto ovest.....	75
<i>Figura 2.5</i> Prospetto sud .....	75
<i>Figura 2.6</i> Prospetto nord .....	75
<i>Figura 2.7</i> Assonometria modello 3D, vista nord-est.....	77
<i>Figura 2.8</i> Assonometria modello 3D, vista sud-est.....	77

## 2 Indice delle tabelle

<i>Tabella 1.1 Valori delle trasmittanze di riferimento secondo Appendice A dell'All.1 del DM 26/6/15 .....</i>	<i>38</i>
<i>Tabella 1.2 Valori delle trasmittanze di riferimento secondo Appendice A dell'All.1 del DM26/6/15 .....</i>	<i>38</i>
<i>Tabella 1.3 Tabelle a, b del D.P.C.M del 5 dicembre 1997 - Requisiti acustici passivi degli edifici .....</i>	<i>41</i>
<i>Tabella 1.4 Valori di ricambio d'aria per tipologia di edificio in esame.....</i>	<i>45</i>
<i>Tabella 1.5 Riepilogo delle classi di utilizzo, secondo la norma EN335, Fonte: Federlegno.....</i>	<i>48</i>
<i>Tabella 1.6 Classificazione della durabilità naturale nei confronti dei funghi cariogeni, riferita al solo durame.....</i>	<i>49</i>
<i>Tabella 1.7 Classificazione della durabilità naturale nei confronti degli insetti, ad esclusione delle termiti ed organismi marini. ....</i>	<i>49</i>
<i>Tabella 1.8 Classificazione della durabilità nei confronti delle termiti.....</i>	<i>49</i>
<i>Tabella 1.9 Classificazione dell'impregnabilità.....</i>	<i>49</i>
<i>Tabella 1.10 Spessore dell'alburno nelle piante adulte.....</i>	<i>49</i>
<i>Tabella 1.11 Velocità di carbonizzazione di alcune specie legnose. Fonte Federlegno.....</i>	<i>50</i>
<i>Tabella 2.1 Parametri geometrici dell'edificio.....</i>	<i>76</i>
<i>Tabella 2.2 Parametri elemento costruttivo parete.....</i>	<i>79</i>
<i>Tabella 2.3 Parametri elemento costruttivo copertura.....</i>	<i>80</i>
<i>Tabella 2.4 Impostazioni di calcolo.....</i>	<i>81</i>
<i>Tabella 2.5 Condizioni climatiche.....</i>	<i>81</i>
<i>Tabella 2.6 Proprietà fisiche e termiche dei materiali che compongono le stratigrafie delle pareti portanti.....</i>	<i>83</i>
<i>Tabella 2.7 Proprietà fisiche e termiche dei materiali che compongono le stratigrafie della copertura... </i>	<i>83</i>
<i>Tabella 2.8 Riepilogo stratigrafie delle pareti portanti esterne.....</i>	<i>84</i>
<i>Tabella 2.9 Riepilogo generale pareti.....</i>	<i>123</i>
<i>Tabella 2.10 Riepilogo generale coperture.....</i>	<i>128</i>
<i>Tabella 2.11 Riepilogo parametri elementi trasparenti.....</i>	<i>132</i>
<i>Tabella 2.12 Ponti termici soluzione di progetto.....</i>	<i>133</i>
<i>Tabella 2.13 Ponti termici soluzione "Variante".....</i>	<i>133</i>
<i>Tabella 2.14 Parametri geografici e climatici.....</i>	<i>134</i>
<i>Tabella 2.15 Riepilogo energetico-economico dei risultati.....</i>	<i>148</i>

### 3 Indice dei grafici

Grafico 1.1 Andamento della produzione europea nella prefabbricazione in legno. Fonte: Eurostat .....	13
Grafico 1.2 Peso dei singoli Stati sulla produzione europea nella prefabbricazione in legno. Fonte: Eurostat .....	14
Grafico 1.3 Produzione di edifici prefabbricati in legno nei principali Stati europei. Fonte: Eurostat. ...	14
Grafico 1.4 Produzione di edifici prefabbricati in legno in Italia. Fonte: Eurostat .....	15
Grafico 1.5 Andamento delle esportazioni in Italia. Fonte: Eurostat. ....	16
Grafico 1.6 Andamento delle importazioni in Italia. Fonte: Eurostat. ....	16
Grafico 2.2 Umidità relativa esterna.....	82
Grafico 2.1 Temperatura esterna a Torino.....	82
Grafico 2.3 Andamento dell'umidità relativa interna allo strato di OSB\3 .....	86
Grafico 2.4 Andamento dell'umidità relativa interna allo strato di fibra di legno .....	86
Grafico 2.5 Andamento dell'umidità relativa interna allo strato di OSB\3.....	89
Grafico 2.6 Andamento dell'umidità relativa interna allo strato di fibra di legno .....	89
Grafico 2.7 Andamento dell'umidità relativa interna allo strato di OSB\3.....	91
Grafico 2.8 Andamento dell'umidità relativa interna allo strato di fibra di legno .....	91
Grafico 2.9 Andamento dell'umidità relativa interna allo strato di fibra di OSB\3.....	94
Grafico 2.10 Andamento dell'umidità relativa interna allo strato di fibra di legno .....	94
Grafico 2.11 Andamento dell'umidità relativa interna allo strato di OSB\3.....	97
Grafico 2.12 Andamento dell'umidità relativa interna allo strato di fibra di legno .....	97
Grafico 2.13 Andamento dell'umidità relativa interna allo strato di fibra di OSB\3.....	100
Grafico 2.14 Andamento dell'umidità relativa interna allo strato di fibra di legno .....	100
Grafico 2.15 Andamento dell'umidità relativa interna allo strato di OSB\3.....	105
Grafico 2.16 Andamento dell'umidità relativa interna allo strato di fibra di legno .....	105
Grafico 2.17 Andamento dell'umidità relativa interna allo strato di OSB\3.....	107
Grafico 2.18 Andamento dell'umidità relativa interna allo strato di fibra di legno .....	107
Grafico 2.19 Andamento dell'umidità relativa interna allo strato di OSB\3.....	109
Grafico 2.20 Andamento dell'umidità relativa interna allo strato di fibra di legno .....	109
Grafico 2.21 Andamento dell'umidità relativa interna allo strato di fibra di legno .....	109
Grafico 2.22 Andamento dell'umidità relativa interna allo strato di OSB\3.....	112
Grafico 2.23 Andamento dell'umidità relativa interna allo strato di fibra di legno .....	112
Grafico 2.24 Andamento dell'umidità relativa interna allo strato di fibra di legno .....	112
Grafico 2.25 Andamento dell'umidità relativa interna allo strato di OSB\3.....	115
Grafico 2.26 Andamento dell'umidità relativa interna allo strato di fibra di legno .....	115
Grafico 2.27 Andamento dell'umidità relativa interna allo strato di fibra di legno .....	115
Grafico 2.28 Andamento dell'umidità relativa interna allo strato di OSB\3.....	118
Grafico 2.29 Andamento dell'umidità relativa interna allo strato di fibra di legno .....	118
Grafico 2.30 Andamento dell'umidità relativa interna allo strato di fibra di legno .....	118
Grafico 2.31 Andamento dell'umidità relativa interna allo strato di OSB\3.....	120
Grafico 2.32 Andamento dell'umidità relativa interna allo strato di fibra di legno .....	120
Grafico 2.33 Andamento dell'umidità relativa interna allo strato di fibra di legno .....	120
Grafico 2.34 Andamento dell'umidità relativa interna nello strato di OSB\3, pareti .....	121
Grafico 2.35 Andamento dell'umidità relativa interna nello strato di OSB\3, copertura .....	126
Grafico 2.36 Andamento dell'umidità relativa interna nello strato di fibra di legno a media densità, copertura .....	126
Grafico 2.37 Andamento dell'umidità relativa interna nello strato di fibra di legno ad alta densità, copertura .....	127
Grafico 2.38 Andamento della conducibilità termica, fibra di legno ad alta densità per la costruzione di coperture.....	129
Grafico 2.39 Andamento della conducibilità termica, fibra di legno a media densità per la costruzione di coperture.....	130
Grafico 2.40 Andamento della conducibilità termica, fibra di legno a media densità per la costruzione di pareti. ....	130
Grafico 2.41 Andamento dell'umidità relativa esterna a Torino.....	134

<i>Grafico 2.42 Guadagni convettivi giornalieri</i> .....	135
<i>Grafico 2.43 Profili di ventilazione naturale</i> .....	136
<i>Grafico 2.44 Frequenza cumulata della temperatura</i> .....	139
<i>Grafico 2.45 Frequenza cumulata della temperatura</i> .....	139
<i>Grafico 2.46 Frequenza cumulata della temperatura</i> .....	140
<i>Grafico 2.47 Andamento della temperatura in condizioni di free-running</i> .....	141
<i>Grafico 2.48 Fabbisogno energetico dell'edificio</i> .....	141
<i>Grafico 2.49 Andamento della temperatura in condizioni di free-running</i> .....	143
<i>Grafico 2.50 Fabbisogno energetico dell'edificio</i> .....	143
<i>Grafico 2.51 Andamento della temperatura giornaliera in condizione di free-running</i> .....	144
<i>Grafico 2.52 Fabbisogno energetico giornaliero dell'edificio</i> .....	145
<i>Grafico 2.53 Fabbisogno energetico annuo dell'edificio</i> .....	146

## **Normativa utilizzata**

- 1) D.Lgs 192 - Decreto Legislativo 19 agosto 2005, n. 192, Attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia [Online] Available: <https://www.anit.it/norma/dlgs-31106-disposizioni-correttive-ed-integrative-al-dlgs-19205/>
- 2) D.Lgs 311 - Disposizioni correttive ed integrative al decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, recante attuazione della direttiva 2002/91/CE, relativa al rendimento energetico nell'edilizia. [Online] Available: <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2007/02/01/007G0007/sg>
- 3) DM 26/6/15 - Decreto interministeriale 26 giugno 2015 - Adeguamento linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici [Online] Available: <https://www.mise.gov.it/index.php/it/normativa/decreti-interministeriali/2032968-decreto-interministeriale-26-giugno-2015-adeguamento-linee-guida-nazionali-per-la-certificazione-energetica-degli-edifici>
- 4) DM 26/6/84 - Decreto del Ministero dell'interno 26 giugno 1984 - Classificazione di reazione al fuoco ed omologazione dei materiali ai fini della prevenzione incendi [Online] Available: [http://www.vigilfuoco.it/allegati/ProdottiAntincendioSicuri/Disposizioni/DM\\_26-06-1984\\_Articolato\\_Integrato.pdf](http://www.vigilfuoco.it/allegati/ProdottiAntincendioSicuri/Disposizioni/DM_26-06-1984_Articolato_Integrato.pdf)
- 5) DM 30/11/83 - Decreto del Ministero dell'interno 30 novembre 1983 - Termini, definizioni generali e simboli grafici di prevenzione incendi [Online] Available: [http://www.vigilfuoco.it/allegati/PI/DisposizioniGeneraliPI/COORD\\_DM\\_30\\_11\\_1983.pdf](http://www.vigilfuoco.it/allegati/PI/DisposizioniGeneraliPI/COORD_DM_30_11_1983.pdf)
- 6) EN 13499 - Isolanti termici per edilizia - Sistemi compositi di isolamento termico per l'esterno (ETICS) a base di polistirene espanso - Specifica, 2005
- 7) EN 13500 - Isolanti termici per edilizia - Sistemi compositi di isolamento termico per l'esterno (ETICS) a base di lana minerale - Specifica, 2005
- 8) EN 335 - Durabilità del legno e dei prodotti a base di legno - Classi di utilizzo: definizioni, applicazione al legno massiccio e prodotti a base di legno, 2013
- 9) EN 350 - Durabilità del legno e dei prodotti a base di legno - Prove e classificazione della durabilità agli agenti biologici del legno e dei materiali a base di legno, 2016

- 10) EN 460 - Durabilità del legno e dei prodotti a base di legno. Durabilità naturale del legno massiccio. Guida ai requisiti di durabilità per legno da utilizzare nelle classi di rischio, 1996.
- 11) ISO 14040/44 - Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework, 2006
- 12) ISO 15686-1 - Buildings and constructed assets — Service life planning — Part 1: General principles and framework, 2011
- 13) Legge 477/95 - Legge 26 ottobre 1995, n. 447, Legge quadro sull'inquinamento acustico
- 14) UNI 10349 - Riscaldamento e raffrescamento degli edifici - Dati climatici - Parte 1: Medie mensili per la valutazione della prestazione termo-energetica dell'edificio e metodi per ripartire l'irradianza solare nella frazione diretta e diffusa e per calcolare l'irradianza solare su di una superficie inclinata, 2016
- 15) UNI 11018 - Rivestimenti e sistemi di ancoraggio per facciate ventilate a montaggio meccanico - Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione e la manutenzione - Rivestimenti lapidei e ceramici, 2003
- 16) UNI 11367 - Acustica in edilizia - Classificazione acustica delle unità immobiliari - Procedura di valutazione e verifica in opera, 2010
- 17) UNI 9504 - Procedimento analitico per valutare la resistenza al fuoco degli elementi costruttivi di legno, 1989
- 18) UNI EN 10211 - Ponti termici in edilizia - Flussi termici e temperature superficiali - Calcoli dettagliati, 2018
- 19) UNI EN ISO 10077-1 - Prestazione termica di finestre, porte e chiusure oscuranti - Calcolo della trasmittanza termica - Parte 1: Generalità, 2018
- 20) UNI EN ISO 12354 - Acustica in edilizia - Valutazioni delle prestazioni acustiche di edifici a partire dalle prestazioni dei prodotti - Parte 1: Isolamento dal rumore per via aerea tra ambienti, 2017
- 21) UNI EN ISO 13788 - Prestazione igrotermica dei componenti e degli elementi per edilizia - Temperatura superficiale interna per evitare l'umidità superficiale critica e la condensazione interstiziale - Metodi di calcolo, 2013
- 22) UNI EN ISO 15026 - Prestazione termoigrometrica dei componenti e degli elementi di edificio - Valutazione del trasferimento di umidità mediante una simulazione numerica, 2008

- 23) UNI EN ISO 6946 - Componenti ed elementi per edilizia - Resistenza termica e trasmittanza termica - Metodi di calcolo, 2018
- 24) UNI EN ISO 9972 - Prestazione termica degli edifici - Determinazione della permeabilità all'aria degli edifici - Metodo di pressurizzazione mediante ventilatore, 2015
- 25) UNI EN 1995-1-2 - Eurocodice 5 - Progettazione delle strutture di legno - Parte 1-2: Regole generali - Progettazione strutturale contro l'incendio, 2005
- 26) UNI/TR 11175 - Acustica in edilizia - Guida alle norme serie UNI EN 12354 per la previsione delle prestazioni acustiche degli edifici - Applicazione alla tipologia costruttiva nazionale, 2005

## Bibliografia

- 1) Hunnkeler, D., Lichtenvort, K. E Rebitzer, G., Environmental Life Cycle Costing, SETAC Books, CRC Press, New York, 2008
- 2) Swarr T.E., Environmental Life Cycle Costing: A Code of Practice. Society of Environmental Toxicology and Chemistry, SETAC Books, CRC Press, New York, 2011
- 3) Fregonara E. Valutazione sostenibilità progetto. Life cycle thinking e indirizzi internazionali, Franco Angeli, 2011
- 4) Giordano R., I prodotti per l'edilizia sostenibile, Sistemi Editoriali – Esselibri, Napoli, 2010
- 5) Thiebat F., “Life Cycle design for sustainable architecture”, in TECHNE, n.5, 2013
- 6) Thiebat F., “An evaluation tool to support strategical evaluations for the reclamation and reuse of dismissed sites”, TECHNE, n.12., 2016
- 7) Thiebat F., Veglia A., Porceddu V., “Sustainability strategies for the reuse of dismissed industrial architecture: Life-cycle design in an Italian case study”. Cities, Buildings, People: Towards Regenerative Environments, PLEA16 Los Angeles 11-13/07/2016
- 8) Lavagna M., Life Cycle Assessment in edilizia, Hoepli, Milano, 2008
- 9) J. Perret, Guide de la maintenance des batiments, Le Moniteur, Paris, trad.it di C. Talamo, Guida alla manutenzione degli edifici, Maggiolini, Rimini, 2001
- 10) S. Fuller, Life cycle cost analysis (LCCA), National Institute of Building Science, February 2018
- 11) Angioletto L., Involucro edilizio e comportamento energetico, Studioemme editore, 1997
- 12) Cirillo A., Legno - criteri di calcolo e aspetti realizzativi, Wolters Kluwer, 2014
- 13) Ribera A., Legno – L'universo costruttivo di un materiale nuovo, Riberalegno Formazione, 2015
- 14) Laner F., Il legno – Materiale e tecnologia per progettare e costruire, UTET scienze tecniche, 2013

- 15) Eùbios - bene et commode vivens n.58, redazione ANIT, DCB Milano, ISSN 1825-5515, 2016
- 16) Serra V., Fantucci S., “Investigating the performance of reflective insulation and low emissivity paints for the energy retrofit of roof attics”, Elvisier B.V., 2018
- 17) Elarga H., Fantucci S., Serra V., Zecchin R., Benini E., “Experimental and numerical analyses on thermal performance of different typologies of PCMs interated in the roof space, 2017
- 18) Ing. Follesa M., Sicurezza e comfort nelle abitazioni con struttura in legno, Convegno Verona 16 giugno 2001
- 19) Ceccotti A., Follesa M., Lauriola M.P., Le strutture in legno in zona sismica, CLUT, 2007
- 20) Fracastoro G.V., Fisica tecnica ambientale parte I: Termodinamica applicata, Otto Editore, Politecnico di Torino, Dipartimento di Energetica, 2003
- 21) Fracastoro G.V., Fisica tecnica ambientale parte II: Trasporto di calore e di massa, Otto Editore, Politecnico di Torino, Dipartimento di Energetica, 2003
- 22) Fracastoro G.V., Fisica tecnica ambientale parte III: Acustica applicata, Otto Editore, Politecnico di Torino, Dipartimento di Energetica, 2003
- 23) Calì M., Gregorio P., Termodinamica, Progetto Leonardo, Società editrice Esculapio, Bologna, ISBN 88-7488-175-4, 1996
- 24) Galbusera G., Panzieri A., Salani C., Tuoni G., Leccese F., Arengi A., Scaramella I., L’isolamento termico e acustico, vol.5 Prestazioni estive degli edifici, Anit. [Online]Availabe: [https://www.anit.it/wp-content/uploads/2015/03/Indice\\_vol5.pdf](https://www.anit.it/wp-content/uploads/2015/03/Indice_vol5.pdf)
- 25) Le pareti ventilate, Polistirene espanso sinterizzato in edilizia, vol.1, AIPE, 2016. [Online] Available: <http://www.aipe.biz/mondo-eps/wp-content/uploads/sites/2/2014/11/VOL11-PARETI-VENTILATE.pdf>
- 26) [www.ilsole24ore](http://www.ilsole24ore)
- 27) [www.larepubblica.it](http://www.larepubblica.it)
- 28) [www.istat.it](http://www.istat.it)
- 29) <http://ec.europa.eu/eurostat>
- 30) <https://it.fsc.org/it-it/certificazioni>
- 31) [www.federlegnoarredo.it](http://www.federlegnoarredo.it)
- 32) [www.uni.com](http://www.uni.com)

33) [www.gazzettaufficiale.it](http://www.gazzettaufficiale.it)

34) [www.anit.it](http://www.anit.it)

35) [www.promolegno.com](http://www.promolegno.com)

36) [www.naturalia-bau.it](http://www.naturalia-bau.it)

37) [www.holztechnik.it](http://www.holztechnik.it)





## **Ringraziamenti**

Innanzitutto, ringrazio la relatrice Prof.ssa Valentina Serra e il correlatore Arch. Stefano Fantucci per il supporto fornito durante tutta la stesura dell'elaborato. Un ringraziamento speciale va al tutor aziendale Ing. Giuseppe Gianolio, che si è dimostrato sempre disponibile fornendomi le basi necessarie e i materiali per condurre la ricerca. Un doveroso ringraziamento lo rivolgo, infine, all'azienda VASS Technologies e a tutto lo staff per aver creduto in me ed avermi accompagnato durante questo percorso.