



**Politecnico  
di Torino**

## Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale  
In Architettura Costruzione Città  
A. A. 2021/2022  
Sessione di Laurea Mese Anno

# **L'integrazione di tecnologie e soluzioni IoT negli edifici multipiano in legno per la manutenzione predittiva, la sicurezza e la qualità della costruzione.**

Analisi della sperimentazione di sistemi e processi in ambito  
internazionale

Relatori:

Prof. Guido Callegari  
Prof. Paolo Simeone

Candidato:

Chiara De Bellis – s274222



## ABSTRACT

Con l'utilizzo sempre più ampio del legno per le costruzioni e con il raggiungimento di nuovi record di altezza e ampiezza, si sono sviluppati sistemi di monitoraggio che cercano di verificare il comportamento degli edifici in relazione a uno degli elementi naturali che più influisce su questo materiale sostenibile, l'acqua.

Questa tesi ha lo scopo di capire cosa è lo Structural Health Monitoring e quali sono gli obiettivi che questo si pone. Analizzando come è composto un sistema di monitoraggio, cosa controlla e quali sono i sistemi che vengono commercializzati. Si è cercato di comprendere quali sono i fattori che influenzano la precisione dei sensori, come la posizione, ma anche cosa può aiutare a ridurre il contenuto di umidità nei componenti prefabbricati che vengono prodotti e poi trasportati in cantiere per l'assemblaggio dell'edificio.

Tutto ciò è stato svolto tramite l'individualizzazione di alcuni casi studio a livello internazionale, emblematici per le costruzioni in legno, ed il coinvolgimento di alcune aziende leader del settore che si sono resi disponibili.

With the increasing use of wood for construction and with the achievement of new records of height and width, monitoring systems have been developed in order to verify the behavior of buildings effected by the influence of the natural elements which threatens this sustainable material the most: water.

This thesis aims to understand what Structural Health Monitoring is and what its objectives are. Analyzing what a monitoring system consist of/is made up of, what it controls and which systems are on the market. The research tries to understand what the factors influencing the accuracy of the sensors are, such as position for example, and also what can help reduce the moisture content of the prefabricated components that are produced and transported on site for the building assembly. All of this was done through the individualization of some international case studies, fundamental in the wooden construction scope, and with the participation of some leading companies in the sector that have shared their data.



# INDICE

<b>1. INTRODUZIONE</b>	9
<b>2. STRUCTURAL HEALTH MONITORING – SHM</b>	12
<b>2.1 SHM e l'ingegneria civile</b>	12
<b>2.2 Gli obiettivi del monitoraggio</b>	13
<b>2.3 La periodicità</b>	14
<b>2.4 Le reti di sensori</b>	15
2.4.1 I sensori e i relativi parametri di interesse	15
2.4.2 Sistema di acquisizione	17
2.4.3 Sistema di comunicazione	17
2.4.4 Sistema di archiviazione	18
2.4.5 Sistema di elaborazione	18
2.4.5 Analisi dei dati	18
<b>2.5 I sensori igrometrici</b>	19
2.5.1 I metodi di misurazione	19
2.5.2 I sensori in commercio: Logica H&S, Omnisense, SMT, Wiiste, WoodControl, Woodsense.	20
<b>2.6 Il posizionamento</b>	25
<b>3. CASI STUDIO</b>	27
<b>3.1 Mappe dei casi studio</b>	28
3.1.1 Mappa dei casi studio in Europa	28
3.1.2 Mappa dei casi studio in Nord America	29
<b>3.2 Limnologen</b>	30
3.2.1 L'edificio	31
3.2.2 La Gibson Tower	32
3.2.3 La struttura	33
3.2.4 Gli imprevisti in cantiere	36
3.2.5 Il monitoraggio e i risultati	37
<b>3.3 House of Natural Resources</b>	38
3.3.1 L'edificio	38
3.3.2 La struttura	39
3.3.3 Il monitoraggio	40
3.3.4 I risultati	40
<b>3.4 Brock Commons Tallwood House</b>	41
3.4.1 L'edificio	42
3.4.2 La struttura	44

3.4.3 Il monitoraggio	49
3.4.4 Gli imprevisti in cantiere	49
3.4.5 I risultati	49
<b>3.5 Carbon 12</b>	50
3.5.1 L'edificio	51
3.5.2 La struttura	52
3.5.3 Il monitoraggio	54
3.5.4 Gli imprevisti in cantiere	55
3.5.5 I risultati	55
<b>3.6 Peavy Hall</b>	56
3.6.1 L'edificio	56
3.6.2 La struttura	58
3.6.3 Il monitoraggio	61
3.6.4 I risultati	63
3.6.4.1 Il contenuto di umidità nella parete di taglio	63
3.6.4.2 Il contenuto di umidità nel solaio	63
<b>3.7 Adohi Hall</b>	64
3.7.1 L'edificio	65
3.7.2 La struttura	68
3.7.3 Il monitoraggio	71
3.7.4 I risultati	72
<b>3.8 Helsinki</b>	73
3.8.1 L'edificio	73
<b>3.9 Cross Light House</b>	76
3.9.1 L'edificio	77
3.9.2 La struttura	79
3.9.3 Gli impianti	85
3.9.4 Il monitoraggio	86
3.9.5 Le misurazioni	88
3.9.5.1 Appartamento 2	88
3.9.5.2 Appartamento 3	91
3.9.5.3 Piano primo - Appartamento 4 e 5	94
3.9.5.4 Piano secondo - Appartamento 6 e 7	97
3.9.5.5 Piano terzo - Appartamento 8 e 9	100
3.9.6 I risultati	103
<b>4. CONCLUSIONI</b>	
<b>4.1 Comparazione degli aspetti caratteristici dei casi studio</b>	104
<b>4.2 Prassi post-produzione</b>	107
4.2.1 Lo stoccaggio indoors	107
4.2.2 Lo stoccaggio outdoors	107
4.2.3 Il trasporto	108

4.2.4 Gli accorgimenti on site	109
<b>4.3 Prospettive</b>	111
<b>BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA</b>	115
<b>RINGRAZIAMENTI</b>	121



# 1. INTRODUZIONE

Il legno è un materiale che è stato utilizzato per le costruzioni già dal periodo Neolitico. Grazie alle sue proprietà fisiche (leggerezza; rapporto peso-forza; resistenza a deformazione, compressione e trazione; comportamento prevedibile; resistenza al fuoco) è sempre stato utilizzato sia per le piccole strutture, come le abitazioni, che per le grandi strutture, come ponti, templi e torri. Alcuni esempi di opere architettoniche rilevanti erette in Asia ed in Europa dal 500 d.c. sono rappresentate in Figura 1.

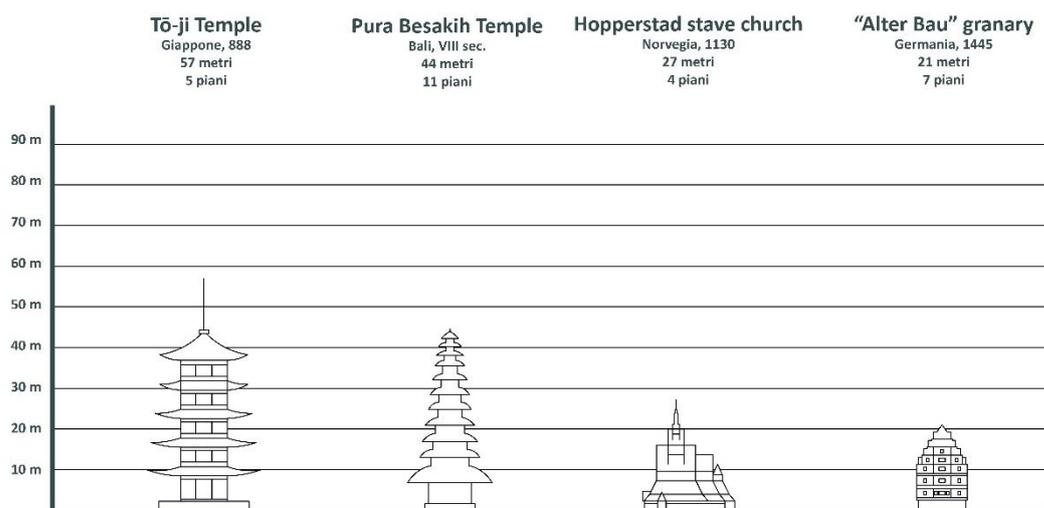


Figura 1. Disegni di alcuni edifici storici in legno.

L'eccessivo sfruttamento di questa risorsa, utilizzata anche come combustibile, ha portato al decremento delle foreste tra il XVII e il XVIII secolo. In questo periodo però un particolare evento, il Grande Incendio di Londra del 1666, ha portato alla sostituzione di questo materiale negli edifici. La normativa londinese introdusse il London Building Act secondo il quale le nuove costruzioni dovevano essere in mattoni e pietra e non era più possibile costruire edifici in legno.

Con la rivoluzione industriale si aggiunsero altri materiali edili che ebbero un enorme successo, il cemento e l'acciaio, ritenuti anch'essi più sicuri perché non combustibili. Questi materiali lasciarono un ruolo marginale al legno che veniva a quel punto utilizzato per le capriate o per le casseforme. Dopo la Seconda Guerra Mondiale la necessità di ricostruire edifici residenziali e non, a basso costo ed eretti velocemente, portò allo sviluppo di una nuova pratica americana: la prefabbricazione degli elementi costruttivi. Nonostante la popolarità di tale prassi, l'interesse si spense gradualmente negli anni Settanta.

Solo all'inizio degli anni Novanta grazie all'invenzione del CLT e quindi alla produzione in fabbrica di elementi lignei di dimensioni più ampie e con una maggiore resistenza, il legno ha visto una nuova rinascita e un vasto utilizzo nelle grandi strutture.

È grazie al continuo evolversi delle tecnologie e alla prefabbricazione che negli ultimi due decenni abbiamo assistito alla costruzione di strutture in legno che hanno superato un record dopo l'altro (Fig. 2).

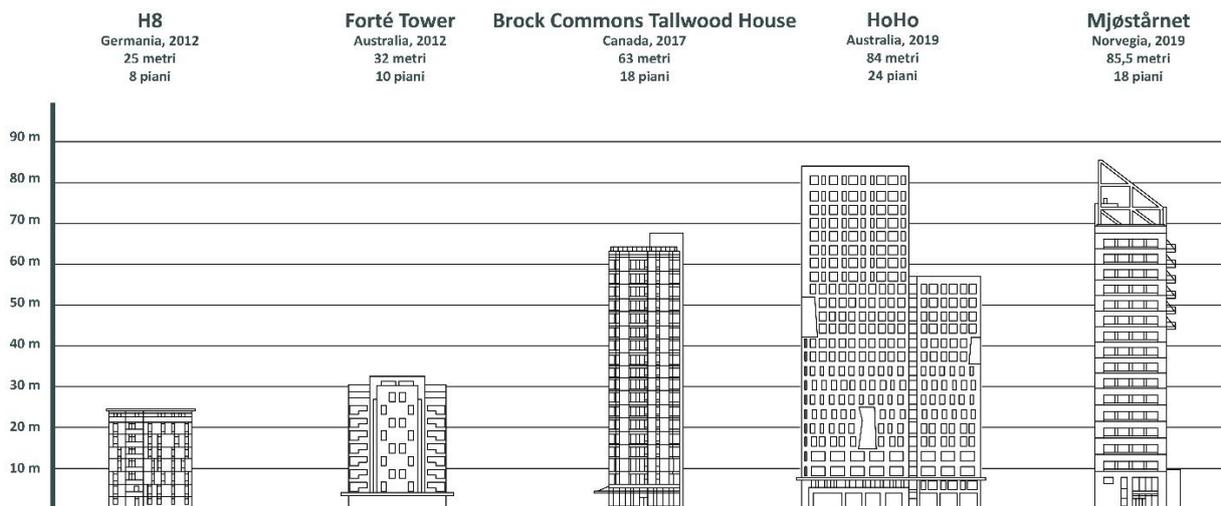


Figura 2. Disegni di alcuni edifici in legno che hanno detenuto il record di altezza.

La diffusione di nuove tipologie di materiali in legno, come LVL, e la produzione di strutture ibride hanno portato alla realizzazione di opere che sono state considerate impraticabili fino a poco tempo fa. Questi edifici hanno portato un cambiamento nella percezione pubblica di tali strutture.

Oltre a ciò, l'attuale crisi climatica ha diffuso l'interesse sull'utilizzo di materie sostenibili e locali. L'edilizia, responsabile della produzione del 36% del gas serra totale e del 33% dei rifiuti, non è esente da questo interesse.

Il legno ha la capacità di ridurre le emissioni di CO<sub>2</sub> estraendole tramite la fotosintesi, quando la pianta è in vita, e di immagazzinarne grandi quantità fino allo smaltimento del componente. È per questo che lo sviluppo di foreste come ecosistemi coltivati possono allo stesso tempo fornire materie prime e ridurre la CO<sub>2</sub> in ambiente. La raccolta per fini commerciali di tale materiale può mantenere un livello costante di domanda ed offerta, evitando di causare la perdita di aree verdi e quindi disboscamento.

In questo momento storico, con l'aumento dell'urbanizzazione, non si tende più a creare molteplici strutture basse, ma a produrre edifici che si sviluppano in altezza. L'uso di materiale da costruzione rinnovabile come il legno può ridurre sensibilmente l'utilizzo del calcestruzzo necessario per la costruzione di edifici medio-alti<sup>1</sup> e ridurre così gli impatti ambientali dovuti all'edilizia.

**NOTE:**

<sup>1</sup>: Definizione dei tipi di edificio in legno per numero di piano

- Bassi: ≤4 piani
- Medi: 5-7 piani
- Alti: ≥8 piani

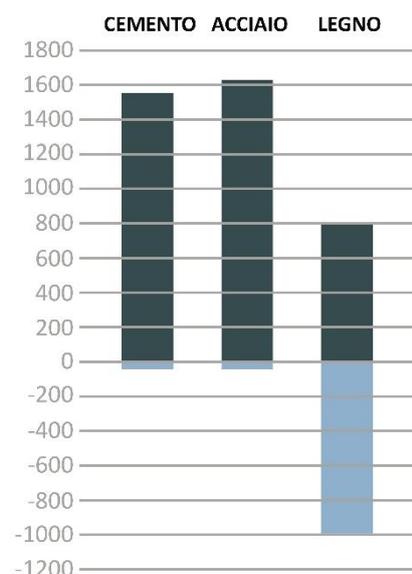


Figura 3. Grafico a barre in cui vengono rappresentate la CO<sub>2</sub> emessa (in blu) e quella sequestrata (in celeste) da tre materiali edili: cemento, acciaio e legno. Si può notare che l'unico ad essere considerato "positivo" perché sequestra più di quello che produce è il legno. (fonte: A. Iqbal, *Developments in tall wood and hybrid buildings and environmental impacts*, Sustainability, 2021, 13 (21). DOI: 10.3390/su132111881.)

Negli ultimi decenni si stanno sviluppando molti edifici di questo tipo grazie all' "industria 4.0" che ha portato sensibili cambiamenti nella qualità del materiale edile. L'utilizzo di macchine a controllo numerico, l'automazione, la possibilità di scambiarsi informazioni in tempo reale tramite cloud ed i nuovi sistemi BIM, ottimizza la precisione riducendo gli scarti e risparmiando tempo e denaro.

La formazione di pianificatori e tecnici che si concentrano sugli aspetti ambientali e sulla progettazione di edifici efficienti dal punto di vista energetico e la riduzione di emissioni di gas durante tutta la vita dell'edificio ha portato ad un miglioramento delle competenze del settore.

Nonostante le caratteristiche che rendono il legno preferibile ad altri materiali, per esempio il rapporto resistenza-peso superiore a quello dell'acciaio, ci sono ancora alcuni fattori che preoccupano gli ingegneri e gli architetti che utilizzano questo materiale nelle strutture.

L'igroscopicità, quindi la proprietà di variare il proprio contenuto di umidità (moisture content, MC) assorbendola e rilasciandola in relazione all'umidità relativa presente in ambiente e di conseguenza la possibilità che si possano sviluppare muffe e forme di marcescenza in caso il suo valore sia troppo alto è una delle principali preoccupazioni.

È in questo ambito che si sviluppa questa tesi, nella volontà di ricercare le radici dello Structural Health Monitoring (SHM) e quindi del monitoraggio dell'umidità negli edifici in legno effettuato tramite una rete di sensori. Questi dispositivi vengono installati permanentemente nelle strutture e facilitano sensibilmente il controllo dei componenti, soprattutto in punti difficili da raggiungere come può essere, ad esempio, un nodo parete-solaio che può essere finito con cartongesso e quindi non raggiungibile con facilità per eventuali misurazioni.

Sono stati rintracciati ed analizzati alcuni casi studio a livello internazionale di edifici multipiano in legno per individuare tipologie, posizioni comuni di monitoraggio, motivazioni delle alterazioni dei livelli di umidità in determinati punti e il loro legame con la posa in opera di massetti o chiusure. Al fine di poter definire delle prassi di cantiere che possano aiutare ad evitare errori legati al contenuto di umidità del materiale, che può influenzare la vita utile della struttura, e le pratiche di monitoraggio che si stanno sviluppando su queste tecnologie in continua evoluzione e miglioramento.

## 2. STRUCTURAL HEALTH MONITORING



### 2.1 SHM E L'INGEGNERIA CIVILE

Il monitoraggio della salute strutturale (SHM) è un sistema sviluppato dall'industria aerospaziale e da quella aeronautica per verificare eventuali danni nei velivoli. Si basa sull'installazione di sensori che monitorano e verificano le capacità fisiche e meccaniche del componente su cui vengono applicati.

In seguito, questa tecnologia è stata applicata nell'ingegneria civile per la supervisione e il mantenimento della salute strutturale degli edifici.

La definizione di SHM secondo Radulescu et al.<sup>2</sup> è:

*“Il monitoraggio della salute strutturale è il rilevamento non-distruttivo in situ e un metodo valutativo che utilizza una varietà di sensori collegati o incorporati ad una struttura per monitorare la risposta strutturale, per analizzare le caratteristiche strutturali al fine di stimare la gravità del danno o deterioramento e valutarne le conseguenze sulla struttura in termini di risposta, capacità e durata di servizio.”*

Con l'avanzamento tecnologico e l'utilizzo di reti di comunicazione *wireless*, in alternativa alla tecnologia cablata, nonché con la dimensione dei sensori sempre più piccola, è possibile ora integrare i sensori negli elementi strutturali durante la produzione, in modo da poter controllare le condizioni dei componenti sin dall'inizio. Così i sistemi SHM sono stati applicati anche negli edifici residenziali, introducendo quelli che vengono definiti “monitoraggi con sistemi intelligenti” in aggiunta alla domotica, di cui si parla già dalla metà degli anni Settanta.

#### NOTE:

<sup>2</sup>: Gheorghe Radulescu, Mihai Radulescu, Adrian Radulescu, Sanda Na, 2014. "The Role of Structural Health Monitoring for the Design of the Life Cycle of Constructions," Mathematical Modelling with Application in Economics 1408, Technical University of Cluj Napoca, Department of Economics and Physics.

## 2.2 GLI OBIETTIVI DEL MONITORAGGIO



I sistemi di monitoraggio vengono installati negli edifici per una migliore gestione del fabbricato e con il fine di verificarne l'efficienza e il comportamento durante la vita utile di progetto.

Tramite la raccolta dei dati e la possibilità di impostare dei valori limite, questa tecnologia permette di individuare e prevenire eventuali degradi o valutare l'entità di danni già esistenti, per programmare un eventuale manutenzione o, in casi gravi, la demolizione e sostituzione dei componenti danneggiati.

Nelle strutture lignee è molto efficace per verificare la corretta efficienza dei pacchetti costruttivi e dei nodi difficilmente raggiungibili durante le operazioni di manutenzione. Vengono infatti principalmente installati sensori che controllano l'umidità (sonde igrometriche) e gli spostamenti verticali e orizzontali (sonde inclinometriche) dei componenti strutturali.

Un utilizzo più ampio viene effettuato nelle grandi opere in cemento soprattutto di tipo civile come ponti o palazzetti. Infatti, oltre alle tecnologie appena indicate, vengono utilizzati anche: accelerometri per valutare eventuali danni da spostamento in zone a rischio sismico o caratterizzate da forti venti (es. Trieste, Genova); dispositivi come gli sprinkler o sensori termosensibili come protezione al fuoco. Queste tipologie trovano scarso utilizzo nell'edilizia privata a causa degli alti costi e la scarsa utilità. In letteratura si trovano articoli in cui vengono riportati i risultati di applicazioni effettuate su edifici residenziali che utilizzano materiali o sistemi strutturali innovativi, in cui il sistema di monitoraggio viene utilizzato a fini di ricerca.

## 2.3 LA PERIODICITÀ

In base al fine e alla disponibilità economica della committenza si può effettuare il monitoraggio con diversa periodicità:



- Il monitoraggio di breve durata: viene utilizzato quando è stato riscontrato un degrado che può causare una debolezza strutturale o se una manutenzione straordinaria programmata non viene effettuata e si vuole controllare un particolare elemento o nodo strutturale. Viene quindi effettuato un controllo occasionale che va a verificare la gravità del danno o l'integrità della struttura e che può essere maggiormente approfondito con un'indagine conoscitiva tradizionale. Tale controllo ha un arco temporale molto breve che può durare da qualche giorno fino a qualche settimana.



- Il monitoraggio periodico: quando in una struttura devono essere effettuati dei controlli che si ripetono nel tempo per fenomeni o degradi specifici, come ad esempio l'umidità. Vengono installati dei sensori temporanei da cui vengono raccolte le misurazioni periodiche tramite apparecchi di lettura. Questi controlli vengono effettuati per alcune ore o giorni e ripetuti per diversi anni.



- Il monitoraggio continuo: viene installato dopo un attento studio in edifici con sistemi strutturali complessi in modo permanente, così da poter controllare l'intera vita dell'opera. Nello studio si individuano i nodi critici della struttura in cui verranno installati dei sensori facilmente raggiungibili per un eventuale manutenzione. Questi compongono una rete collegata ad un data center ed acquisiscono dati con un'alta frequenza. L'acquisizione continua e la possibilità di impostare delle soglie di valori sopra i quali non salire o scendere, rende questo monitoraggio il più completo rispetto agli altri due appena visti. Le eventuali anomalie vengono rilevate in tempo reale e segnalate tramite un software che permette un intervento tempestivo.

## 2.4 LE RETI DI SENSORI

In questo paragrafo verranno analizzati i metodi di monitoraggio in base ai parametri di interesse e le componenti che formano una rete di sensori e quindi un sistema di SHM.

La scelta dei sensori per il monitoraggio, come detto precedentemente, avviene secondo alcuni criteri: i parametri di interesse, la periodicità, i vincoli economici, ambientali ed operativi.

Le reti possono avere complessità diverse: dal monitoraggio passivo di un singolo parametro ad un sistema attivo, ad esempio un generatore di vibrazioni e un sensore ricevente.

Il fine ultimo di tutto il processo deve essere sempre la sicurezza e la salute delle persone e della struttura.

### 2.4.1 I SENSORI E I RELATIVI PARAMETRI DI INTERESSE

I parametri che vengono monitorati nelle strutture in legno sono principalmente cinque: accelerazione, deformazione, spostamento, temperatura, umidità. Gli ultimi due verranno trattati nel paragrafo 2.5.

In base a cosa si vuole monitorare, ai fini del sistema di SHM, si possono utilizzare vari sensori che utilizzano a loro volta vari metodi di monitoraggio.

#### SENSORI ACUSTICI

I sensori acustici si basano sul principio di propagazione delle onde sonore all'interno del materiale. Vengono utilizzati per identificare e valutare eventuali difetti, condizioni di danno o variazioni nelle proprietà meccaniche del materiale. La strumentazione è composta da un sensore che emette onde di stress indotte e da uno che rileva e valuta le eventuali disomogeneità.

Principalmente ci sono due tipologie di sensori: ultrasuoni ed emissioni acustiche. Entrambe possono creare un'immagine per localizzare il difetto, ma queste ultime non sono spesso compatibili con i sistemi di SHM.

Le onde possono essere create dall'impatto meccanico di un martello sulla superficie o da attuatori ultrasonici a banda larga. Il sensore ricevente è solitamente un accelerometro. I due sensori possono essere posizionati sia su due superfici diverse, sia su una superficie unica, in questo caso i sensori dovranno essere calibrati anticipatamente.

Recentemente sono stati sviluppati due sistemi innovativi che vengono utilizzati nella fabbricazione di pannelli in legno: il primo è un metodo ultrasonico senza contatto in cui si utilizza l'aria come materiale trasmittente; il secondo è un sistema che utilizza ultrasuoni a 120Hz per scansioni computerizzate senza contatto.

I vantaggi di questa metodologia di monitoraggio sono la possibilità di individuare anche danni interni al materiale e la facilità d'uso delle apparecchiature. Gli svantaggi sono la difficoltà di interpretazione dei risultati e le possibili distorsioni dovute ad elementi irregolari o superfici non omogenee.

#### SENSORI OTTICI

I sensori che si basano sui metodi ottici, come laser o analisi visiva, consentono di individuare gli spostamenti, le deformazioni e anche le vibrazioni, inoltre danno la possibilità di individuare eventuali danni o cedimenti globali (come il cedimento dei supporti) o locali (come le crepe).

I metodi topografici classici sono il punto di partenza da cui si sono sviluppate nuove tecnologie. Si basano su la misurazione di angoli e distanze da punti selezionati e sono utili per individuare gli spostamenti relativi. La strumentazione è composta da una stazione totale, uno strumento elettronico-ottico, che determina le coordinate del punto selezionato e tramite rilievi ripetuti della struttura ne misura lo spostamento.

La scansione laser terrestre si basa su questo procedimento, ma utilizza laser che possono raccogliere grandi nuvole di punti con intervalli di tempo variabili, dalle quali si può creare un'immagine 3D. I vantaggi di tale metodo sono l'indipendenza dalle sorgenti di luce naturale e l'accesso alla struttura non richiesto, ma le apparecchiature risultano costose e poco precise.

Oltre alle immagini 3D si possono utilizzare anche quelle 2D, estrapolando le misure geometriche da foto e utilizzando algoritmi di analisi delle immagini per estrarre le misurazioni delle deformazioni e degli spostamenti. Questi metodi fotogrammetrici sono vantaggiosi per la grande quantità di informazioni raccolte ed il basso costo, ma d'altro canto hanno una minore accuratezza rispetto ai metodi classici. Sono inoltre necessari i sopralluoghi per reperire le immagini.

#### SENSORI CHE UTILIZZANO LE VIBRAZIONI

Il principio su cui si basa questa tipologia di sensori è che nel caso in cui ci sia un cambiamento nelle caratteristiche fisiche e meccaniche del materiale, ci sarà anche un cambiamento nella trasmissione delle vibrazioni; quindi, si potranno riscontrare eventuali danni e cambiamenti di rigidità.

Questa tipologia di metodi è una delle poche che riesce a monitorare i cambiamenti globali nelle strutture.

I sensori più comuni sono gli accelerometri che possono essere piezoelettrici, piezoresistivi, capacitivi o a bilanciamento di forza. I primi sono resistenti e possono essere utilizzati per lungo tempo; quelli piezoresistivi e capacitivi sono utilizzati in strutture flessibili ed utilizzano vibrazioni di basso livello; gli ultimi possono misurare le accelerazioni a bassa frequenza e a bassa ampiezza, ma sono ingombranti e molto costosi. Gli attuatori, ovvero la parte del sistema che produce le vibrazioni, più utilizzati sono gli scuotitori di massa rotanti, gli elettrodinamici o gli elettroidraulici. Oltre a questo tipo di generatori "artificiali" si possono utilizzare anche fonti "naturali" di vibrazioni come il vento, il traffico o le attività umane. Questi sono i modi migliori di eccitare una struttura poiché ovviamente non hanno bisogno di nessuna installazione, ma allo stesso tempo sono anche più soggetti a rumore perché sono meno identificabili dai sensori riceventi rispetto a quelli appena elencati.

Con ogni strumentazione il numero di sensori necessari è elevato e ciò può avere delle conseguenze sulle proprietà dinamiche della struttura e sul budget.

#### SENSORI CHE UTILIZZANO LE PROPRIETÀ ELETTRICHE

Di questo metodo parleremo più ampiamente nel paragrafo successivo (par. 2.5). In questo frangente ci limiteremo a dire che tali sensori si basano sulle proprietà fisiche del legno e del rapporto tra il materiale e l'acqua. Vengono utilizzati principalmente al fine di calcolare il contenuto di umidità del legno.

La seguente tabella schematizza alcuni dei metodi appena visti ed altri conosciuti.

METODO DI MONITORAGGIO	PARAMETRI DI INTERESSE								
	DENSITÀ	UMIDITÀ	DISOMOGENEITÀ	DELAMINAZIONE E CREPE	DECAMENTO	CROLLO	DEFORMAZIONE	RIGIDITÀ	PROPRIETÀ DINAMICHE
ULTRASUONI	●		●	●	●			●	
EMISSIONE ACUSTICA			●	●		●			
RAGGI X	●	●	●	●	●				
TERMOGRAFIA			●	●	●	●			
IGROMETRICO		●			●				
RESISTENZA ELETTRICA		●							
CONDUTTANZA ELETTRICA	●	●	●						
DIELETTRICO		●			●				
OTTICO LASER							●		
VISIVO			●	●	●	●	●		
FORATURA	●		●		●				
PROVA QUASI STATICA								●	●
VIBRAZIONE AMBIENTALE								●	●
VIBRAZIONE FORZATA								●	●

Tabella 1. Tabella con alcuni metodi di monitoraggio e la loro applicazione per determinare parametri fisici, stati materiali e danni.

### 2.4.2 SISTEMA DI ACQUISIZIONE (DAS)

I sensori sono collegati alla centrale di acquisizione dati che comunica quando effettuare le misurazioni, la durata della raccolta dei dati e la frequenza. La centrale è posizionata all'interno della struttura ed è connessa ai sensori tramite cavo o connessione *wireless*. Nel primo caso gli svantaggi sono: la possibilità di interferenze elettromagnetiche, risolvibili con l'utilizzo di cavi schermati o a fibra ottica; l'alto costo, se la connessione viene utilizzata in grandi strutture o gallerie; la possibilità di danni accidentali ai cavi. Il secondo tipo di connessione, quello *wireless*, è utilizzato nelle grandi strutture dove la connessione cablata è sconsigliata. Lo svantaggio è la possibilità di rumore ed interferenze che possono influenzare i dati ed il costo più alto.

### 2.4.3 SISTEMA DI COMUNICAZIONE (CS)

Questo sistema collega il DAS al sistema di archiviazione. Può essere un collegamento cablato (fibra ottica, linea telefonica, ecc.) oppure tramite wireless utilizzando onde radio o il 3G per trasferire i dati.

Ciò permette di avere un sistema di archiviazione anche fuori dall'edificio monitorato ed evitare di impiegare un ambiente come locale di sorveglianza.

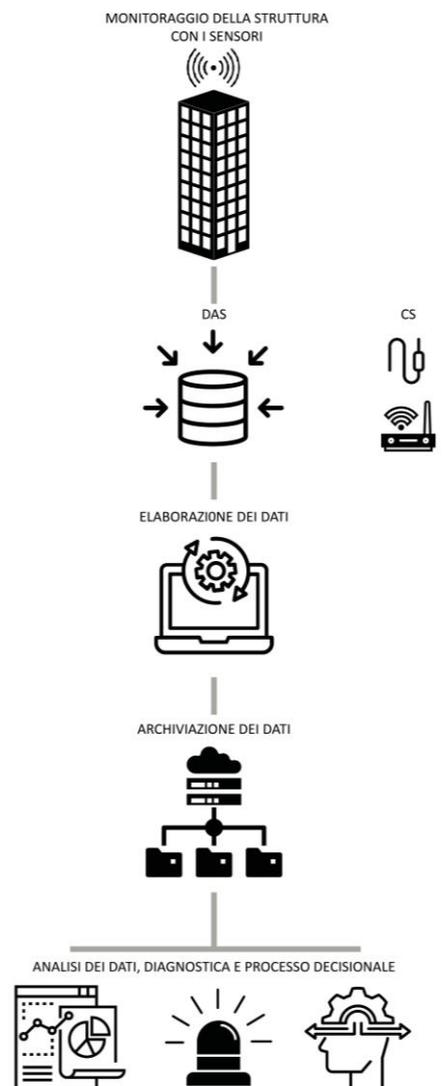


Figura 4. Schema dei componenti di un sistema SHM.

#### **2.4.4 SISTEMA DI ELABORAZIONE**

I dati raccolti, come visto in precedenza, possono contenere errori o rumori. Per questo motivo prima di essere archiviati vanno puliti da un software che applicando degli algoritmi in base ai parametri di interesse valuta e corregge eventuali incongruenze.

#### **2.4.5 SISTEMA DI ARCHIVIAZIONE**

I dati puliti vengono organizzati e archiviati in modo comprensibile. Infatti, quest'operazione è molto importante per la salute strutturale dell'edificio poiché sono diversi gli *stakeholders* che possono accedere alle informazioni contenute nel *data storage*. Inoltre, in base alla tipologia di dati raccolti si dovrà avere una capacità di memoria capiente per poterli contenere per un periodo lungo, in modo da poter avere uno storico accessibile. L'utilizzo di sistemi di archiviazione online (cloud) ha facilitato molto la condivisione del materiale e la possibilità di implementazione della memoria senza la possibilità di perdere il materiale.

#### **2.4.5 ANALISI DEI DATI**

L'attività più importante in un sistema SHM è l'analisi dei dati raccolti, ovvero dare un significato a tutte le informazioni raccolte. L'interpretazione dei valori è affidata a tecnici esperti con una conoscenza strutturale in modo da poter capire il comportamento della struttura e l'influenza che potrebbero avere eventuali danni o alterazioni dello stato di salute. Con questo fine vengono creati dei modelli di simulazione dei fenomeni misurati.

A questa fase ne segue un'altra, sempre attuata da professionisti del settore, che è quella di prendere decisioni e individuare soluzioni ai problemi che vengono riscontrati in base agli allarmi.

## 2.5 I SENSORI IGROMETRICI

I maggiori danni nelle strutture lignee sono legati all'umidità e al contenuto di questa nel materiale. Infatti, quando vi è un  $MC \geq 20\%$  per periodi prolungati si possono innescare dei meccanismi di decadimento che possono essere legati ad un attacco biologico, o nel caso inverso quando l'MC risulta troppo basso si possono formare crepe o episodi di delaminazione del materiale. Per questo la misurazione di questo parametro è molto importante.

I metodi di acquisizione dei dati possono essere basati anche su altri parametri, come la resistenza elettrica, che dipendono anche dal contenuto di umidità.

Di seguito verranno analizzati i sensori igrometrici, che più ci interessano ai fini della trattazione, e ne verranno esaminati alcuni in commercio che poi ritroveremo nei casi studio individuati nel capitolo 3.

### 2.5.1 I METODI DI MISURAZIONE

#### METODO IGROSCOPOCO

Alla base di questo metodo di misurazione c'è il rapporto tra umidità di equilibrio del legno e umidità relativa dell'ambiente e le isoterme individuate per la specie di legname utilizzato.

Gli strumenti che utilizzano questo sistema sono composti da un sensore che misura la temperatura dell'ambiente ed uno che ne misura l'umidità relativa. Una volta ottenuti i dati viene stimato un valore di MC in base all'isoterma corrispondente, questo valore sarà il contenuto di umidità di equilibrio.

I sensori, in plastica o metallo, di dimensioni notevoli, vengono installati in una cavità sigillata per diminuire la superficie del legno a contatto con l'aria, in modo da poter scambiare meno umidità. Difatti, se posizionati troppo superficialmente o con un eccessivo contatto con l'ambiente i valori raccolti potrebbero non essere corretti. In aggiunta l'aria presente nella cavità potrebbe essere influenzata da fattori, come il calore emesso dalla sonda, che possono portare a risultati non rappresentativi del reale contenuto di umidità del legno. Si tende ad eseguire una calibrazione, in condizioni controllate, antecedente alla messa in funzione dei sensori per minimizzare tali rischi.

Gli svantaggi di questo sistema, come appena visto, possono essere il posizionamento, la grandezza dei sensori, l'alto rischio di influenzabilità.

Il grande vantaggio è la possibilità di installare questa tipologia di sensore su tutti i tipi di legname, anche se trattato.

#### METODO DELLA RESISTENZA/CONDUTTANZA ELETTRICA

Questo metodo di monitoraggio si basa sul principio di conducibilità e resistenza elettrica del legno. Questi parametri sono influenzati direttamente dal contenuto di umidità del materiale e quindi danno la possibilità di misurarlo indirettamente. Ad esempio, la resistività elettrica del pino o dell'abete rosso è:  $10.000\Omega m$  se l'MC è 9-10%;  $10-100\Omega m$  se l'MC è  $15 < x < 20\%$ .

La strumentazione è composta da due elettrodi che vengono inseriti nel legno ad una profondità variabile, scelta dal progettista. La resistenza viene misurata sul percorso di resistenza minima, ovvero con un contenuto di umidità maggiore. Per evitare una misurazione sbagliata è consigliato

inserire gli elettrodi allineati con la grana del legno, poiché con il restringersi e il dilatarsi del legno in base al contenuto di umidità si potrebbero creare delle microfessurazioni in cui si può infiltrare l'acqua. Oltre a questo possibile inconveniente, uno degli svantaggi del metodo della resistenza è che fornisce solo misurazioni localizzate e sono necessari molti sensori per mappare un edificio. Nonostante ciò, le implementazioni di una eventuale rete di sensori sono molto facili e il loro utilizzo è consigliato per contenuti di umidità  $8 < x < 24\%$ , in questo intervallo la precisione delle misurazioni è  $\pm 2-5\%$ .

#### METODO DIELETTRICO

Questo metodo si basa sulla capacità dielettrica del legno e sulla sua permittività, questa aumenta all'aumentare della densità della specie legnosa e della temperatura, ma quando il contenuto di umidità del materiale supera un certo valore la relazione può cambiare e diventare inversamente proporzionale.

I sensori che lo utilizzano possono essere di tipo capacitivo o di tipo *power-loss*. Il primo si basa sulla relazione tra contenuto di umidità e permittività del legno, il secondo sull'MC e il fattore di perdita dielettrica del legno.

I sensori utilizzano elettrodi da contatto posizionati sulla superficie, per cui la misurazione in profondità è limitata a causa della perdita di campo elettrico.

Uno dei grandi svantaggi di tale metodo è l'influenza dello strato esterno sulle misurazioni, come ad esempio una possibile superficie bagnata, in quanto viene fornito solo un valore di contenuto di umidità superficiale e le possibili influenze derivanti da sali idrosolubili o altre sostanze nel materiale.

I vantaggi sono la semplicità di utilizzo e il grande range di valori,  $5 < x < 30\%$ , in cui si ha una precisione del  $\pm 3-5\%$ .

### **2.5.2 I SENSORI IN COMMERCIO: Logica H&S, Omnisense, SMT, Wiiste, WoodControl, Woodsense.**

#### LOGICA H&S

L'azienda, attiva dal 1991, è conosciuta per operare nel settore dell'elettronica e dei controlli sui processi industriali, in particolare per la produzione di sistemi di controllo per forni di essiccazione e misuratori di umidità. Logica H&S lavora con FederlegnoArredo e Conlegno, con i quali hanno sviluppato dei sensori per il controllo ambientale, inoltre le due associazioni sono gli unici distributori in Italia e utilizzano i sensori nell'ambito del Protocollo S.A.L.E.

I sensori disponibili, sia cablati che *wireless*, possono misurare:

- Umidità relativa;
- Temperatura dell'aria;
- Temperatura solidi/liquidi;
- Pressione assoluta dell'aria;
- Contenuto di umidità dei materiali da costruzione a diverse profondità.

I due software disponibili, HumiControl e EnviSurv, tramite un'interfaccia utente semplice permettono di controllare i parametri critici e la corretta funzionalità dei sensori, inoltre è possibile definire le soglie limite e la durata degli allarmi. EnviSurv ha anche la capacità di intraprendere automaticamente azioni correttive dopo aver identificato eventuali criticità, ad esempio regolando il clima interno dell'edificio o della stanza identificata come zona a rischio.

L'azienda ha sviluppato una tipologia di sensori wireless, Wireless Sensor System, che utilizza onde radio a bassa potenza per comunicare i dati al software, e che ha la possibilità di essere utilizzata anche all'interno dei forni di essiccazione o di trattamento termico, controllando così contenuto di umidità e temperatura del materiale durante la lavorazione.

## OMNISENSE

L'azienda statunitense offre dispositivi di monitoraggio remoto basate su un cloud che mette a disposizione i dati in tempo reale, i prodotti sono certificati FCC e CE e sono attualmente installati in edifici nordamericani ed europei. Lo scopo che si pone l'azienda è quello di ridurre al minimo i danni e le malattie legati all'umidità e alla muffa e di prolungare la vita utile degli edifici in legno.

I sensori wireless monitorano:

- Umidità relativa;
- Temperatura dell'aria;
- Temperatura superficiale;
- Contenuto di umidità all'interno del legno;
- Punto di rugiada;
- Pressione differenziale;
- Consumo di energia;
- Portate dei liquidi;
- Livello di pressione sonora;
- Vibrazioni;
- ecc.

I sensori sono studiati per essere permanentemente incorporati nelle strutture, anche in luoghi non più accessibili dopo l'ultimazione, per evitare qualsiasi manutenzione. A questo fine le batterie al litio utilizzate hanno una vita media di circa 15 anni.

Una delle loro tipologie di sensori, gli OmniSense FMS, sono miniaturizzati, dando così la possibilità di creare grandi reti di sensori. Questi trasmettono i dati tramite una ricetrasmittente radio *wireless* a un *gateway* connesso ad internet, i dati sono poi raccolti in un sito web che li riporta in tempo reale, creando così degli storici consultabili dai tecnici addetti. Quando i dispositivi non raccolgono dati, sono in uno stato di sospensione a bassissima potenza in modo da risparmiare e far durare maggiormente la batteria.

I sensori vengono installati durante o dopo la costruzione per monitorare l'integrità della struttura durante le operazioni di assemblaggio e chiusura della stessa.

Tramite l'impostazione di determinati range di valori c'è la possibilità di venire avvisati sia telefonicamente sia via e-mail di eventuali anomalie o superamento delle soglie limite.

## SMT – STRUCTURE MONITORING TECHNOLOGY

Fondata a Vancouver nel 2006, l'azienda SMT produce e installa tecnologie per il monitoraggio delle strutture, tramite l'utilizzo dell'IoT (Internet of Things) offrono la raccolta di dati a distanza per produrre edifici più efficienti e durevoli. Uno dei progetti più famosi in cui sono stati installati i sensori è il Brock Commons Tallwood House (vedi par. 3.4), edificio che ha mantenuto il record di costruzione in legno più alta del mondo (18 piani) per diversi anni.

Le soluzioni che producono sono specializzate per il legno massiccio e monitorano molti parametri in base alla tipologia di edificio. Nel residenziale viene principalmente monitorato:

- Umidità del suolo;
- Umidità del gas;
- Umidità relativa;
- Temperatura dell'aria;
- CO<sub>2</sub>;
- Spostamento;
- Alterazioni dell'involucro edilizio.

I valori registrati durante il trasporto, la costruzione e la vita della struttura sono disponibili su diversi dispositivi tramite app e mostrano gli allarmi attivati, le informazioni sui sensori, le possibili note di progetto e i grafici interattivi per una lettura facilitata.

## WIISTE

L'azienda finlandese è stata fondata nel 2012 per creare sistemi tecnologici che aumentino l'efficienza globale di gestione e dei costi di edifici con una qualità molto alta. Attualmente collabora con l'azienda internazionale Stora Enso.

Sono state sviluppate perciò delle apparecchiature per il controllo dell'umidità nelle strutture lignee in modo da poter determinare eventuali danni in maniera preventiva e così intervenire tempestivamente.

I sensori sviluppati possono essere applicati su due materiali: il calcestruzzo e il legno. Il secondo materiale è quello che ci interessa ai fini della tesi.

I sensori WM1-WAN misurano il contenuto di umidità, umidità relativa e la temperatura dell'aria in materiali come il CLT e il LVL. Vengono infatti installati una coppia di sensori che misurano la resistenza elettrica del materiale, i dati vengono poi raccolti su un cloud tramite rete wireless rendendoli disponibili su un sito web e consultabili da ogni dispositivo mobile o computer.

I dispositivi possono essere installati nella fabbrica di produzioni, nel cantiere o nell'edificio ultimato, in questo modo è possibile controllare l'intera filiera.

## WOODCONTROL

L'azienda WoodControl, rispettando le norme NTC 2018, ha posto una grande attenzione alla durabilità degli edifici in legno e ai danni derivanti dall'umidità, per questo ha sviluppato un sistema di monitoraggio permanente delle strutture in legno: MyMeter.

Questa tecnologia è installabile su tutti i sistemi costruttivi e tutti i materiali lignei, creando una rete a cui si possono collegare fino a 400 sensori.

L'interfaccia è molto semplice e definisce lo stato di salute della struttura tramite tre emoticon in base alla percentuale del contenuto di umidità:



- 10-18%: situazione ottimale.



- 18-20%: situazione da monitorare.



- 20-32%: situazione di rischio.

I sensori raccolgono dati ogni circa 40 minuti e sono poi visibili a tutti gli *stakeholders* interessati (progettisti, produttori, proprietario, ecc.) da remoto o in loco, sono così utilizzati sia a fini diagnostici che statistici con storici in formato .xls.

Nel caso di edifici complessi e/o multipiano per ogni piano viene rappresentata una pianta in cui localizzare i sensori. In questi casi vengono individuati i punti più vulnerabili della struttura (come attacchi a terra, solaio interpiano e coperture, soglie di terrazze, ecc.) per minimizzare i costi dei sensori che comunicano tramite onde radio o tramite cavo.

## WOODSENSE

L'azienda danese opera dal 2019 nel nord Europa con il fine di garantire la qualità delle strutture il legno che sono largamente utilizzate nei paesi in cui lavorano. Credendo che le costruzioni lignee possono essere una delle soluzioni per ridurre l'impatto ambientale del settore edile, hanno sviluppato dei sensori per misurare l'umidità così da sviluppare un approccio proattivo per garantire la sicurezza di chi vi abita.

I sensori intelligenti misurano contenuto di umidità, temperatura dell'ambiente ed umidità relativa, inoltre sono collegati alle stazioni meteorologiche locali per integrare i dati di precipitazioni, umidità e temperatura del luogo in cui l'edificio è collocato.

Il monitoraggio costante della struttura e la creazione di avvisi automatici forniscono informazioni sulle condizioni degli elementi. I dati sono visualizzabili su una piattaforma aziendale in cui sono rappresentate mappe e informazioni sui sensori, come il livello di batteria che può durare fino a 10 anni, e grafici sulle misurazioni raccolte. La piattaforma dà anche la possibilità di creare dei rapporti su intervalli di tempo selezionati che possono essere utilizzati nella documentazione di garanzia e qualità dell'edificio.

I sensori sono molto semplici da installare, tramite due viti, e da collegare alla piattaforma, tramite QR code, in seguito tramite poche operazioni vengono resi operativi. Sono tipicamente posizionati in punti sensibili della struttura durante la costruzione.

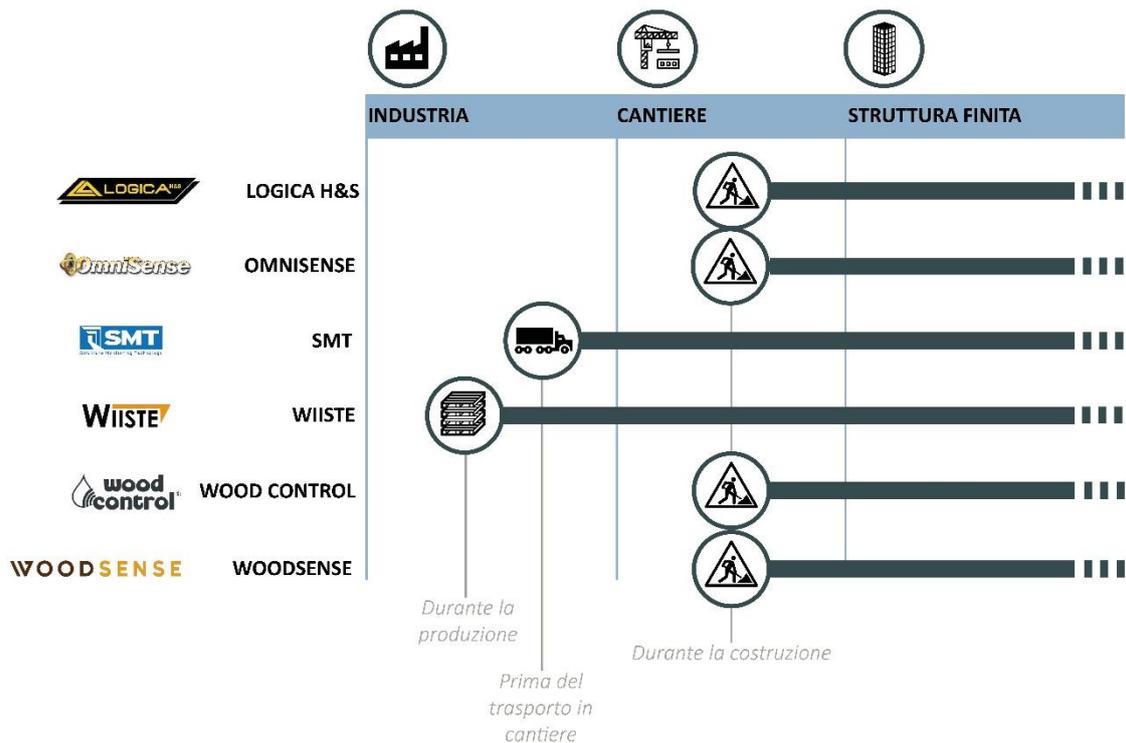


Tabella 2. Confronto tra le aziende: per ognuna viene rappresentato il momento in cui vengono solitamente installati i sensori e il periodo in cui rimangono attivi. Come si può vedere solo SMT e Wiiste installano i propri sensori nelle fabbriche di produzione del legname, creando un reale collegamento tra le due aziende produttrici. Le imprese che installano i propri dispositivi di controllo in cantiere hanno per lo più un rapporto con gli studi di progettazione che inserisce i prodotti all'interno dei progetti.

## 2.6 IL POSIZIONAMENTO

Il numero e la posizione dei sensori sono aspetti fondamentale di un efficace sistema di monitoraggio e diversi sono i fattori che li influenzano.

In primo luogo, l'edificio in sé. La tipologia della struttura e le superfici piane di cui essa è composta, come la copertura, possono essere luoghi di accumulo dell'acqua e ciò può portare a degrado meccanico e biotico/abiotico. Questo può essere facilitato da alcuni fattori collegati alla posizione dell'edificio: l'esposizione del fabbricato e i venti dominanti. Infatti, la prima può prolungare i processi di asciugatura, mentre i secondi possono facilitare il processo di bagnatura e la condensa interstiziale.

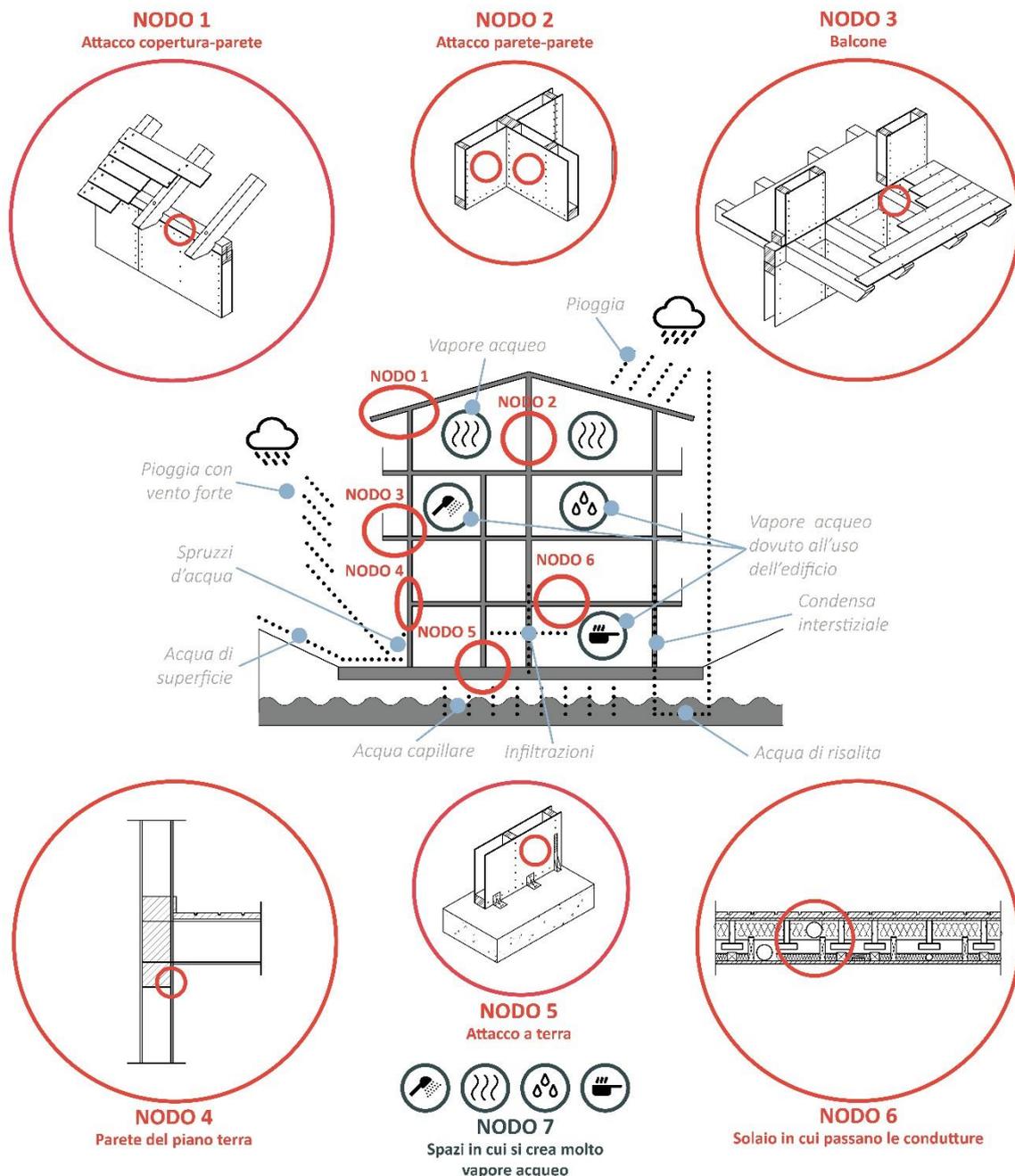


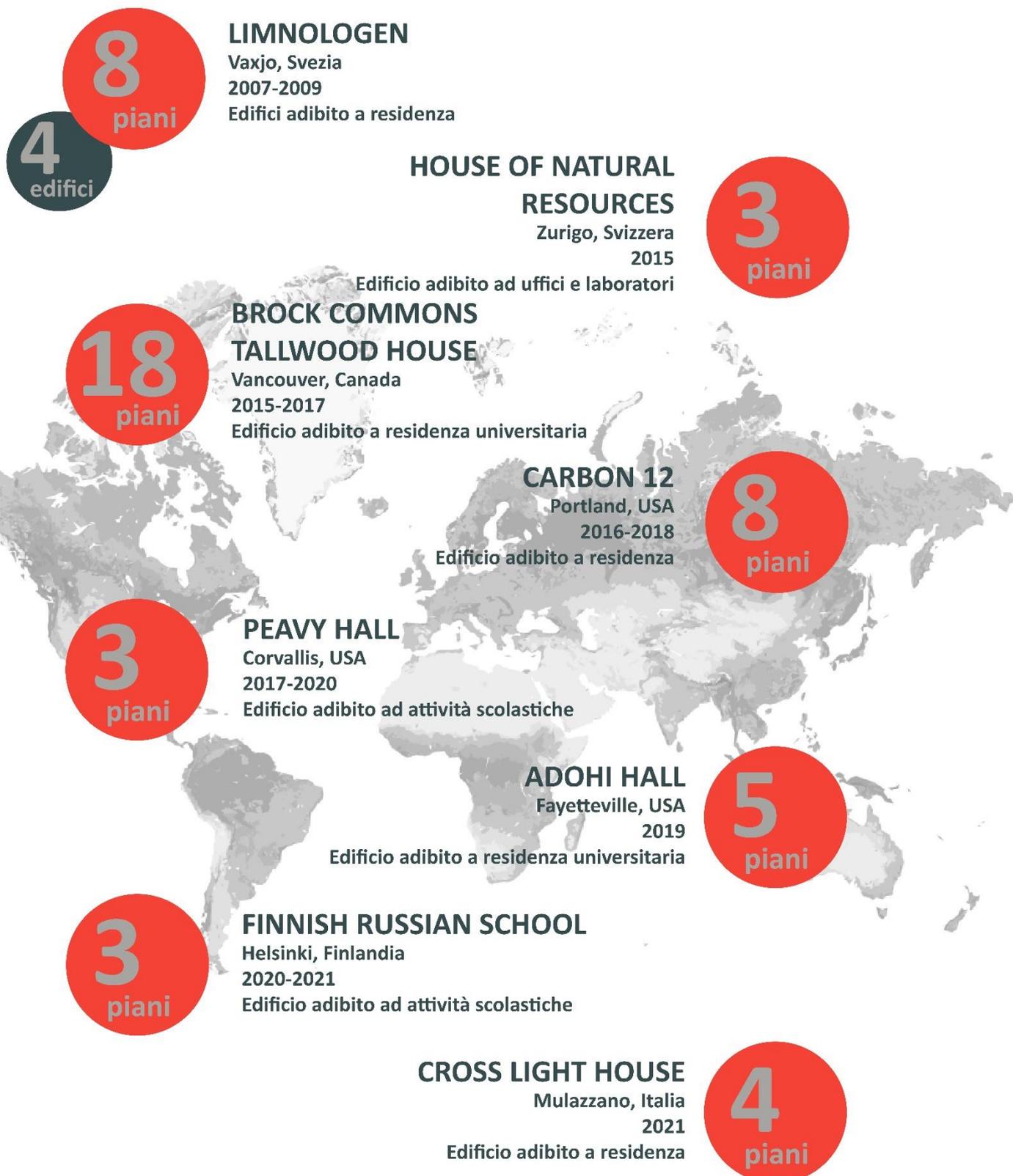
Figura 5. Schema di un edificio multipiano con la localizzazione dei sensori nelle posizioni che vengono tipicamente monitorate.

In secondo luogo, gli obiettivi del monitoraggio e la tipologia della strumentazione influenzano direttamente il numero e la posizione dei sensori.

Inoltre, ci sono alcuni nodi che sono più a rischio di degrado di altri e che sono tipicamente monitorati (illustrati nella figura sopra):

- NODO 1 – attacco copertura-parete: i sensori che monitorano questo nodo sono da posizionare sotto l'altezza di gronda.
- NODO 2 – attacco parete-parete: in questo caso possono essere posizionate due sonde speculari sulle pareti che compongono l'attacco per poterle misurare entrambe, è consigliato posizionarle alla stessa altezza e a 50 cm dall'angolo di intersezione.
- NODO 3 – balcone: i sensori devono essere posizionati sulla parte a sbalzo esterna il più vicino possibile al setto verticale, inoltre bisogna tener conto della possibilità che il posizionamento dei parapetti possa creare punti di accumulo d'acqua e devono essere considerati in fase di progetto.
- NODO 4 – parete del piano terra: la parete in prossimità del solaio del primo piano è uno dei punti tipicamente monitorati.
- NODO 5 – l'attacco a terra: le sonde sono posizionate il più vicino possibile al cemento armato in modo da poter segnalare eventuali infiltrazioni di acqua a causa della posizione sbagliata della guaina.
- NODO 6 – solaio in cui passano le condutture: i punti della struttura in cui sono presenti gli impianti di carico/scarico delle acque possono essere soggetti a degrado dovuto a possibili perdite delle condutture.
- NODO 7 – spazi in cui si crea molto vapore acqueo: i bagni, le lavanderie e le cucine, in cui l'utilizzo degli ambienti crea grandi quantità di vapore acqueo, sono monitorati per tenere sotto controllo la possibile condensa.

## 3. CASI STUDIO



# MAPPA DEI CASI STUDIO IN EUROPA



## 1. LIMNOLOGEN

(fonte: [https://twitter.com/h2020\\_nero](https://twitter.com/h2020_nero))



## 2. HOUSE OF NATURAL RESEARCH

(fonte: <https://honr.ethz.ch/en/fotogalerie.html>)



## 3. FINNISH RUSSIAN SCHOOL

(fonte: <https://ala.fi/work/finnish-russian-school/>)



## 3. CROSS LIGHT HOUSE

(fonte: <https://www.gardeniasrl.com/cantieri/appartamenti-crosslighthouse/>)



## NAVIGATORE



# MAPPA DEI CASI STUDIO IN NORD AMERICA



## 2. CARBON 12

(fonte: <https://buildingcarbon12.com/design-and-approval/>)



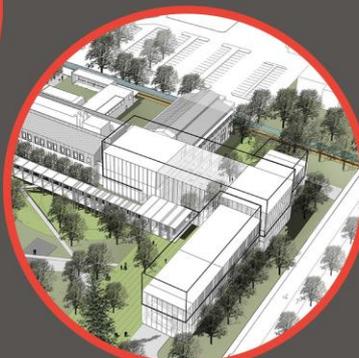
## 4. ADOHI HALL

(fonte: <https://www.lwa-architects.com/project/university-arkansas-stadium-drive-residence-halls/>)



## 1. BROCK COMMONS TALLWOOD HOUSE

(fonte: <https://vancouver.housing.ubc.ca/residences/brock-commons/>)



## 3. PEAVY HALL

(fonte: <https://www.forestry.oregonstate.edu/research-old>)



## NAVIGATORE



## 3.2 LIMNOLOGEN

Luogo: Växjö, Svezia.  
Progettista: Arkitektbolaget<sup>3</sup>  
Anno: 2007-2009  
Tipologia: edificio residenziale  
Numero piani: 8  
Tecnologia: CLT (by Martinsons  
Byggsystem<sup>4</sup>)



Figura 6. Fotografia del complesso Limnologen vista dall'altra parte del lago Trummen  
(fonte: <https://arkitektbolaget.se/projekt/limnologen/>)

### NOTE:

<sup>3</sup>: Arkitektbolaget è uno studio importante della zona meridionale della Svezia. Progetta da un quarto di secolo edifici in legno locale, cercando di essere il più possibile ecologico e sostenibile. Creano edifici pubblici, residenziali, multipiano, ma anche arredamento e ambienti esterni che rispecchino i loro valori.

<sup>4</sup>: L'azienda Martinsons produce legname dagli anni Venti. Negli anni Sessanta con il crescente interesse per il legno lamellare iniziano una nuova produzione che li porterà ad essere specializzati nell'edilizia sostenibile che utilizza queste tecnologie. Nel 2020 l'azienda che è sempre stata a conduzione familiare è stata acquisita dalla Holmen Group, azienda fondata nel 1875 a Stoccolma che opera nell'industria del legname.

### 3.2.1 L'EDIFICIO

Limnologen è un progetto che nasce a Växjö, nella zona di nuova costruzione della Välle Broar<sup>5</sup>, ed è un complesso di 4 edifici di 8 piani ciascuno, di cui il primo è in cemento armato e quelli superiori sono in CLT.

I proprietari del lotto, la Midroc Property Development, hanno indetto un concorso tra due studi di architettura: il Möller Arkitekter e Arkitektbolaget.

Sono stati valutati: economia del progetto; applicazione del legno; design dell'architettura; fattibilità.

La proposta vincente è stata quella del secondo studio. Il team di progetto era composto da architetti, ingegnerie, elettricisti, consulenti del territorio e del paesaggio, fornitori del calcestruzzo e del legno.

Rispetto al disegno iniziale sono state apportate delle modifiche: il numero degli edifici è passato da 5 a 4 e il numero dei piani da 5 a 7. Ciò per avere degli edifici con cortili più ampi e maggiormente inseriti nel parco circostante. La costruzione è stata ideata in due fasi con due edifici per ogni fase, per un totale di 134 appartamenti.

Gli edifici sono stati i primi nel loro genere in Svezia e questo ha portato all'individuazione di vari obiettivi:

- Documentare il processo costruttivo e contribuire a creare una garanzia di qualità dei progetti relativi;
- Documentare decisioni, errori, aspetti tecnici, energetici ed ambientali;
- Diffondere risultati ed idee per ampliare le conoscenze sulle costruzioni in legno multipiano;
- Monitorare i valori igrotermici e statici per valutare le prestazioni durante la vita di servizio degli edifici.

#### NOTE:

<sup>5</sup>: Il comune di Växjö già a partire dagli anni Ottanta ha cercato di ridurre le proprie emissioni di carbonio per essere "la città più verde d'Europa" entro il 2030. A partire dal 2002 ha sviluppato una strategia urbanistica innovativa per la nuova zona suburbana dalla Välle Broar, compresa tra i laghi Trummen e Växjösjön. Secondo il piano, le costruzioni che sarebbero sorte in quell'area dovevano essere costruite in legno. Lo scopo di ciò era quello di promuovere l'industria del legname locale, molto presente per le vaste regioni forestali nel sud della Svezia, ed aumentare la ricerca dei prodotti a base di legno utilizzati nella costruzione. Il programma "Più legno nelle costruzioni" è partito nel 2005 ed è stata prevista la costruzione di circa 1500 appartamenti (100.000 m<sup>2</sup>) in un arco di tempo di 10-15 anni. Tra i vari progetti Limnologen, Building M, Söndra e la Climate Arena.



Figura 7. Fotografia della facciata nord-ovest di uno degli edifici del complesso di Limnologen. (fonte: <https://arkitektbolaget.se/projekt/limnologen/>)



Figura 8. Fotografia della facciata sud-ovest di uno degli edifici del complesso di Limnologen. (fonte: <https://arkitektbolaget.se/projekt/limnologen/>)

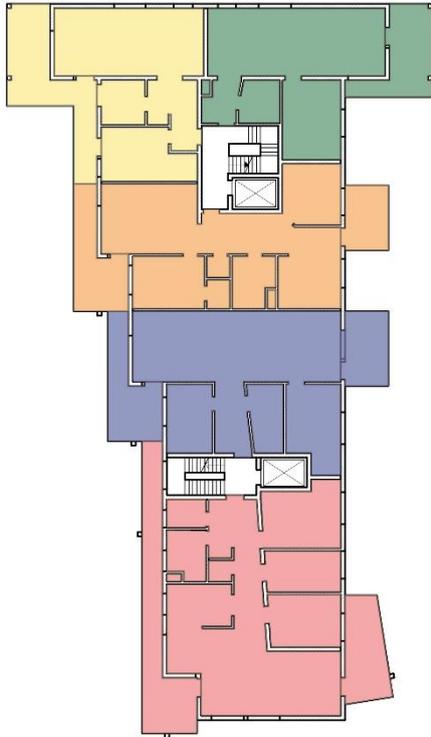


Figura 9. Pianta tipo di un edificio con la divisione tipo degli appartamenti. Fuori scala.



Figura 10. Fotografia degli interni di un appartamento. (fonte: <https://arkitektbolaget.se/projekt/limnologen/>)



Figura 11. Fotografia del dettaglio dei balconi. (fonte: <https://arkitektbolaget.se/projekt/limnologen/>)

### 3.2.2 GIBSON TOWER

Uno dei primi casi di protezione dalle intemperie è stato utilizzato in questo cantiere. Prima della costruzione degli edifici è stata installata una struttura a tenda, costituita da 5 coppie di tralicci con motori sincronizzati, come protezione dalle intemperie. Il binario trasversale che scorre longitudinalmente sulla struttura è stato dotato di una gru che solleva direttamente i materiali, fino a 3,2 tonnellate, che arrivano con i camion dalla fabbrica di produzione. La tenda è stata alzata di 1,5 m sopra il piano di montaggio per avere un'altezza sufficiente al sollevamento. Il tempo per lo spostamento della struttura dall'edificio completato a quello da realizzare è stato di 9 giorni.

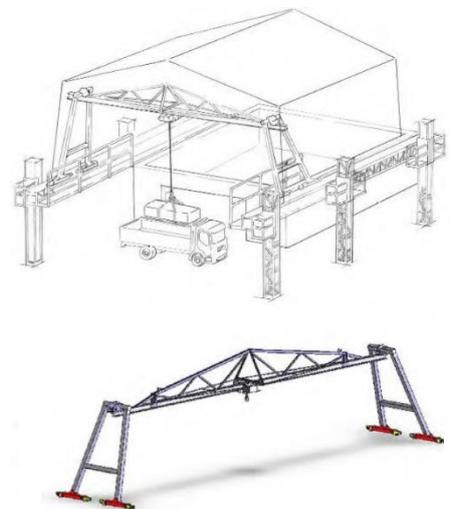


Figura 12. Rappresentazione della struttura della tenda protettiva. (fonte: E. Serrano, Overview and Summaries of Sub Projects Results. Växjö University, 2008.)



Figura 13. Fotografia delle opere di costruzione del primo edificio. (fonte: E. Serrano, Limnologen-Experiences from an 8-storey timber building, International Houlzbau – forum, 2009.)



Figura 14. Fotografia delle opere di costruzione del secondo edificio. (fonte: <https://blog.jtbworld.com/2010/10/8-levels-wood-buildings.html>)

### 3.2.3 LA STRUTTURA

Il piano terra è in cemento armato per favorire l'ancoraggio dei piani lignei superiori. La struttura portante è un telaio di travi e pilastri in CLT e pareti perimetrali e divisorie interne che aiutano a distribuire i carichi verticali. La resistenza ai carichi del vento è gestita da 48 controventi ancorati al cemento.

Sono stati prodotti 3 tipi di pannelli utilizzati come chiusure verticali:

- Pareti esterne: a 3 strati di CLT con facciate esterne intonacate o con rivestimento in legno a vista, un telaio metallico, uno strato di isolante, un pannello di cartongesso interno;
- Pareti divisorie interne: composte da due metà di parete con telaio ligneo, separate da un'intercapedine d'aria, con uno strato di isolante e finiture in cartongesso;
- Pareti interne: in CLT a 3 strati con rivestimento in cartongesso.

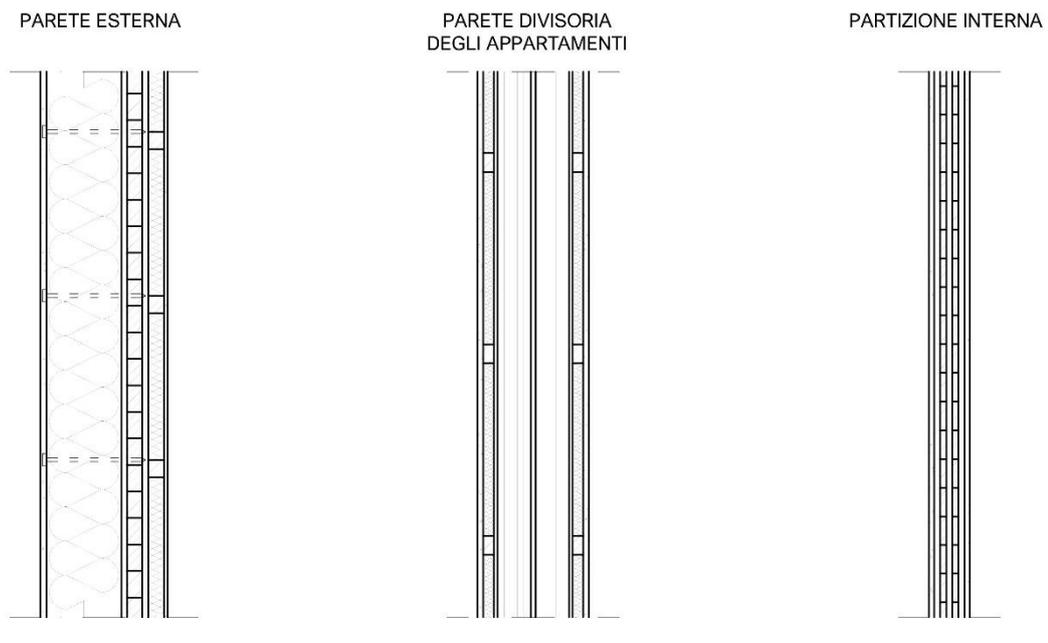


Figura 15. Disegni della stratigrafia delle pareti.  
Fuori scala.

I solai prefabbricati sono composti da: una soletta portante in CLT rinforzata da travi a forma di “T” in legno lamellare, isolante in lana minerale e controsoffitto. Gli impianti di ventilazione, riscaldamento (a pavimento), acqua, elettricità e gli sprinkler passano all’interno dei solai e sono già inseriti in fabbrica. Sopra la soletta è stata inserita una barriera al vapore e il rivestimento in legno.

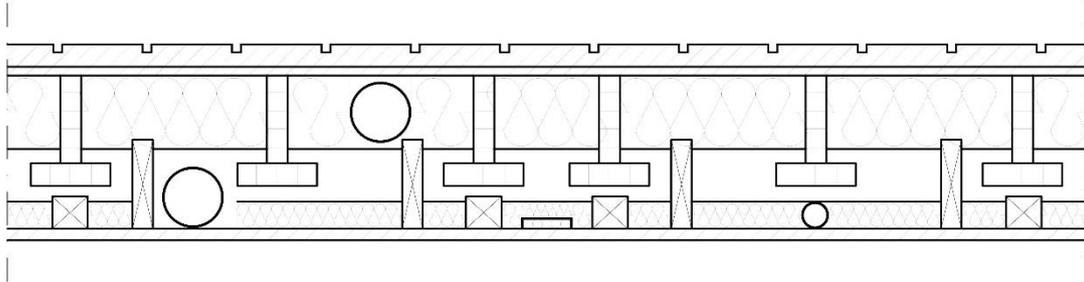


Figura 16. Stratigrafia dei solai.  
Fuori scala.

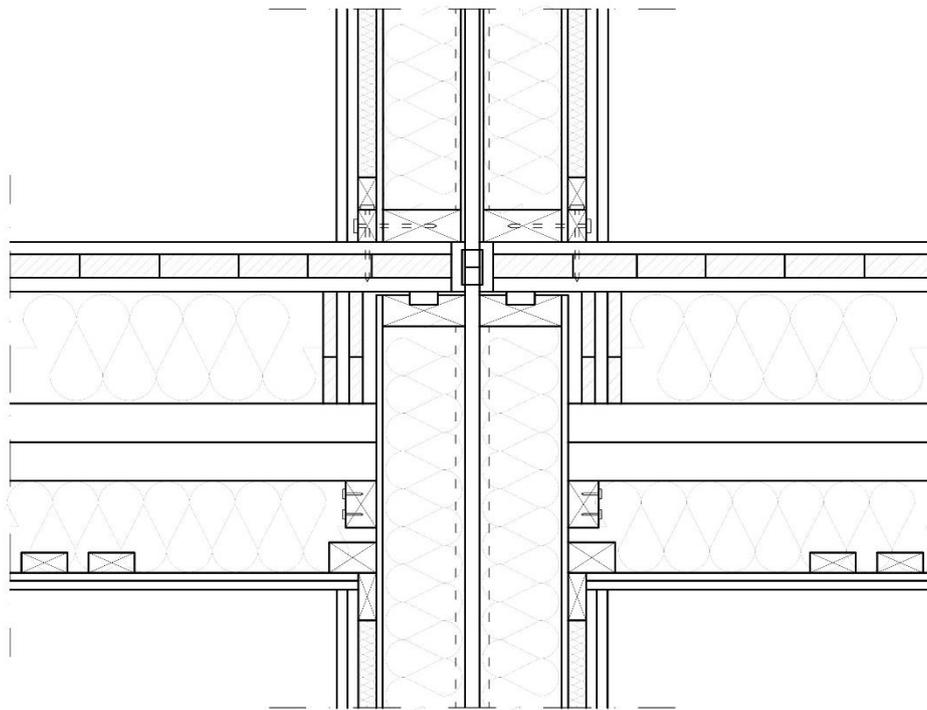


Figura 17. Nodo parete-solaio.  
Fuori scala.

Ogni piano è composto da 30 elementi. Per proteggere la struttura da eventuali perdite di acqua nei bagni sotto le piastrelle è stato inserito un ulteriore tappetino di plastica, mentre sotto al riscaldamento a pavimento è stato inserito un tappetino di rinforzo. Tutti i componenti sono usciti dalla fabbrica avvolti in un film plastico, sono stati trasportati su camion coperti in cantiere nel momento in cui dovevano essere assemblati.

I balconi sono composti da travi in legno lamellare, con uno strato di guaina protettiva in Axonite<sup>4</sup> e rivestiti da tavole in legno massello a vista. Sono sorretti da pilastri in legno lamellare e tiranti in acciaio. I parapetti sono in vetro e metallo nero e le finiture sono in legno smaltato nero.

I vani ascensori sono costruiti in CLT a 5 strati, di 95 mm l'uno, e ancorati ai vari piani tramite piastre chiodate. Le scale hanno piani di sosta in legno lamellare e gradini in cemento, i corrimani in legno e i parapetti in metallo. Le parti inferiori dei componenti lignei sono rivestite di materiale fonoassorbente che funge anche da protezione antincendio.

Grande attenzione è stata data alla protezione al fuoco proprio per i vani scala lignei e l'altezza degli edifici. Secondo la normativa svedese tutti gli elementi strutturali devono avere una resistenza al fuoco superiore a 90 minuti e gli appartamenti devono essere dotati di un impianto antincendio con segnalatori di fumo e irrigatori. Il progetto prevedeva inoltre l'utilizzo di barriere antifumo, cartongesso per una maggiore sicurezza contro gli incendi, un distanziamento minimo di tra le finestre per evitare la diffusione del fuoco e l'utilizzo dei balconi come tagliafuoco.

Per evitare la trasmissione del rumore, sia laterale che da calpestio, tutti i componenti sono elementi discontinui, e tra di essi sono state inserite delle guarnizioni elastomeriche. Inoltre, tutte le connessioni a vite, utilizzate per l'assemblaggio a secco, sono state rivestite da isolante per impedire la trasmissione del suono. I primi due edifici sono stati ultimati all'inizio dell'estate del 2008, mentre gli altri due nell'estate del 2009.

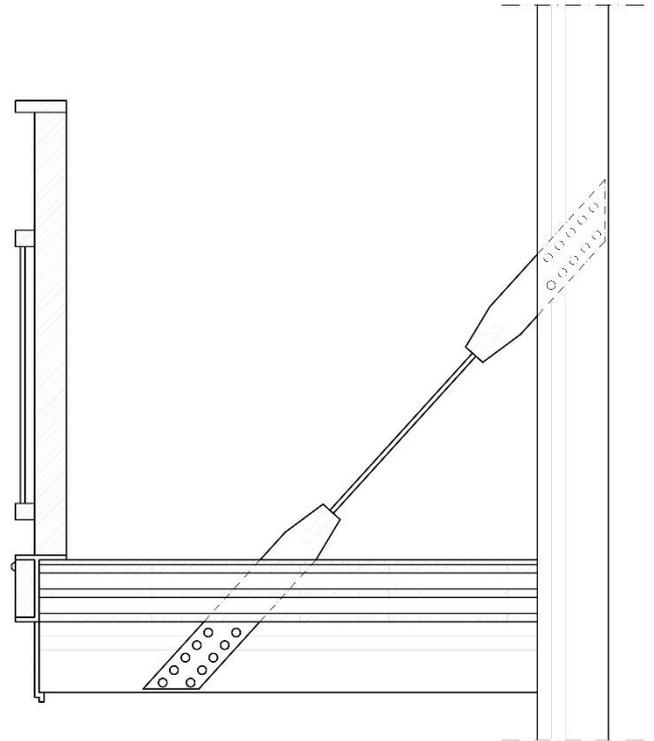


Figura 18. Sezione tipo del balcone.  
Fuori scala.



Figura 19. Fotografia delle opere di costruzione del primo edificio. (fonte: A. Rosenkilde, K. Jarnero, M. Axelson, Flervåningshus med trästomme– Uppföljning av Kv Limnologen och Kv Rya, Rydebäck, SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, Rapport 2018.)

### 3.2.4 GLI IMPREVISTI IN CANTIERE

Ad inizio progetto, per il coordinamento e la condivisione, è stato creato un server online contenente i file dwg, le descrizioni, gli appunti ed i disegni in pdf. Purtroppo, ci sono state difficoltà per la mancanza di aggiornamenti dei materiali o non cancellazione di quelli obsoleti, questo è dovuto in parte al sistema di condivisione non abituale in quel periodo, in parte alla difficoltà di pubblicare documenti non completi da parte degli *stakeholders*.

I problemi maggiori sono stati riscontrati nella fase di assemblaggio *on site*. Alcuni pannelli del solaio sono stati prodotti con errori di fabbricazione, principalmente dimensionali, causando un mal posizionamento del pannello stesso e degli impianti, che sono stati riposizionati.

Un mal dimensionamento di diverse pareti divisorie ha riguardato l'isolante. Infatti, la ditta produttrice ha sbagliato lo spessore del materiale da inserire nell'intercapedine di 7mm, che ha portato ad una sezione trasversale maggiore e ad un maggiore ingombro. Inoltre, le stesse pareti avevano anche un'altezza superiore alle altre, ciò ha creato complicazioni durante il posizionamento del controsoffitto.

Per le pareti perimetrali era stato previsto un isolamento la lana di roccia da inserire prima della finitura esterna in fabbrica. Purtroppo, a causa dei ritardi dovuti ai fornitori, i pannelli con il rivestimento in intonaco sono arrivati in cantiere senza questi componenti, che sono stati inseriti dopo il posizionamento dei pannelli. Per proteggerli dall'umidità sono stati temporaneamente coperti da una pellicola di plastica, rimossa quando è stato poi inserito il pannello in lana di roccia. Anche negli impianti sono stati riscontrati degli errori di fabbricazione. Gli scarichi dell'acqua sono stati regolati con difficoltà per una mancata convergenza sia orizzontale che verticale.

Le scanalature in cui doveva essere posizionato il riscaldamento a pavimento si erano riempite di polvere e materiale di scarto della produzione e hanno richiesto maggior tempo per la pulizia prima dell'istallazione dell'impianto.

I rivestimenti dei balconi sono arrivati in cantiere già danneggiati per il trasporto e riportavano alcune crepe.

Per il posizionamento della pavimentazione del primo edificio costruito è stato creato un livello di stucco ulteriore per rendere i pavimenti orizzontali a causa di un dislivello di  $\pm 2$  mm.

### 3.2.5 IL MONITORAGGIO E I RISULTATI

Per documentare il comportamento delle strutture in servizio sono stati installati vari sensori che misurano lo spostamento verticale dei piani, l'umidità relativa e la temperatura della superficie dei pannelli.

I sensori sono stati posizionati permanentemente sulla parete perimetrale in CLT del lato nord-ovest dell'edificio, installando un sensore per lo spostamento su ogni piano e quelli igrotermici sul secondo e settimo piano.

Le misurazioni dello spostamento sono state effettuate più volte al giorno, per poi calcolarne la media, con una precisione del  $\pm 0,12$  mm, per tenere conto delle dilatazioni termiche della barra di supporto dei sensori. Mentre il data collector è alimentato a batteria, i sensori



Figura 20. Fotografia con il posizionamento dei sensori esterni. (fonte: E. Serrano, Overview and Summaries of Sub Projects Results. Växjö University, 2008.)

sono alimentati dalla rete elettrica dell'edificio, questo ha causato la mancata raccolta di dati durante i periodi di interruzione della corrente.

I dati di spostamento raccolti possono essere raccolti in 3 fasi:

1. Durante i primi mesi le misurazioni sono state irregolari, probabilmente per i lavori ancora in corso negli edifici;
2. Un forte incremento durante il primo anno di costruzione;
3. Un rallentamento durante gli altri anni di misurazione.

I valori di umidità relativa e temperatura sono stati misurati anch'essi diverse volte al giorno e oltre ai sensori posizionati sulle pareti perimetrali nell'edificio numero 3, sono stati inseriti dei sensori all'interno di alcuni ambienti (una parete intonacata di una camera da letto; una parete in legno a vista in un bagno, su una parete in legno a vista di una camera da letto) su tutti i piani.

I valori dell'umidità sono stati raccolti per monitorare l'influenza della vicinanza al lago Trummen sulla struttura.

Inoltre, grazie a questi valori è stato possibile calcolare il contenuto di umidità di equilibrio delle pareti esterne durante una giornata.

Grazie a questi dati è stato possibile verificare il rapporto tra lo spostamento e il contenuto di umidità del materiale ligneo. Dalle conclusioni tratte da Xiong Yu, Z.<sup>6</sup> lo spostamento e l'MC hanno un rapporto inversamente proporzionale e che il primo valore è influenzato dal secondo ma anche da altri fattori come lo scorrimento.

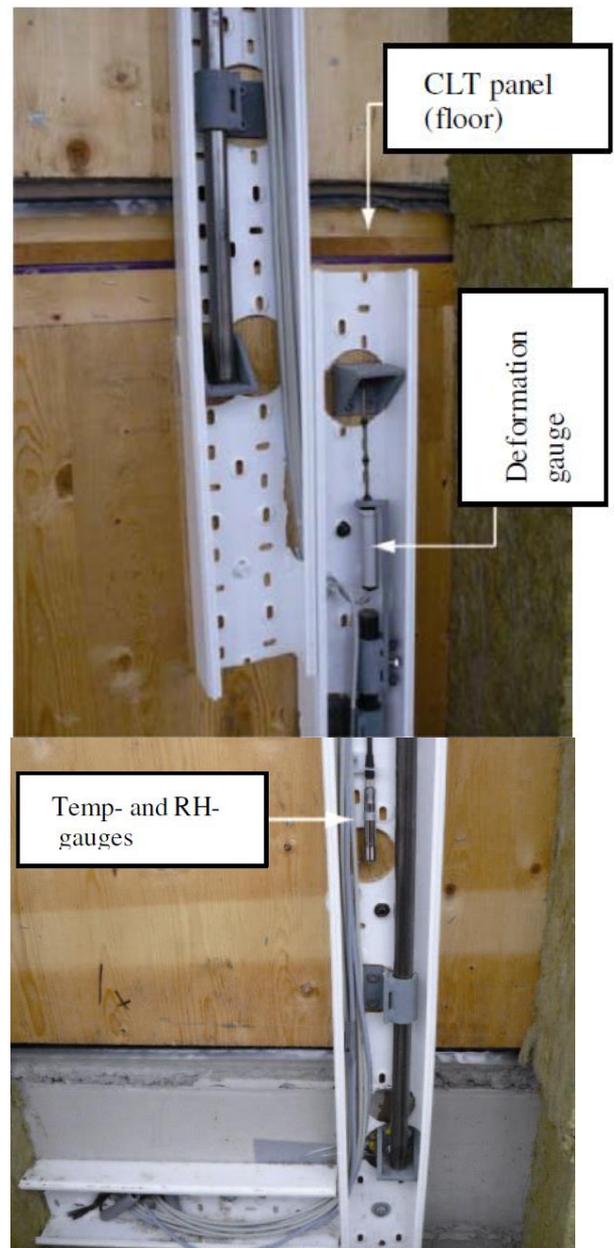


Figura 21. Fotografie dei sensori di spostamento, temperatura e umidità relativa installati. (fonte: E. Serrano, Overview and Summaries of Sub Projects Results. Växjö University, 2008.)

**NOTE:**

<sup>6</sup>: Xiong Yu, Z., Su Xin, R. and Sabri, O. *Vertical Displacements in Medium-rise Timber Buildings*, tesi di magistrale in "Technology and Design", Växjö University 2009, TD 061/2009.

# 3.3 HOUSE OF NATURAL RESOURCES

Politecnico Federale  
di Zurigo

Luogo: Zurigo, Svizzera  
Progettista: ETH di Zurigo

Anno: 2015

Tipologia: edificio per uffici e laboratori

Numero piani: 3

Tecnologia: telaio in legno post-teso; pavimenti ibridi legno-calcestruzzo; pavimento con sistema biassiale (by Haring & Co.AG)



Figura 22. Fotografia dell'House of Natural Resources  
(fonte: <https://honr.ethz.ch/>)

## 3.3.1 L'EDIFICIO

L'edificio di 3 piani è stato progettato e realizzato dal Politecnico Federale di Zurigo (ETH) all'interno del suo campus di Honggerberg come edificio per uffici e Laboratorio di idraulica, idrologia e glaciologia (VAW). L'ideazione del progetto ha coinvolto vari istituti dell'università quali: Ingegneria Civile, Ambientale, Geomatica, Architettura e sistemi edilizi.

L'obiettivo che si sono posti è quello di studiare come i vari sistemi, che utilizzano tecnologie in legno innovative, interagiscono tra loro:



Figura 23. Fotografia dell'interno di un ufficio d'angolo  
(fonte: <https://honr.ethz.ch/>)

È stata installata una rete di sensori che monitorano temperatura, umidità relativa, ritiro e scorrimento per valutare la perdita di post-tensione e il contenuto di umidità all'interno del legno.



Figura 24. Fotografia del telaio post-teso.  
(fonte: <https://honr.ethz.ch/>)



Figura 25. Fotografia della parte superiore del solaio biassiale.  
(fonte: <https://honr.ethz.ch/>)

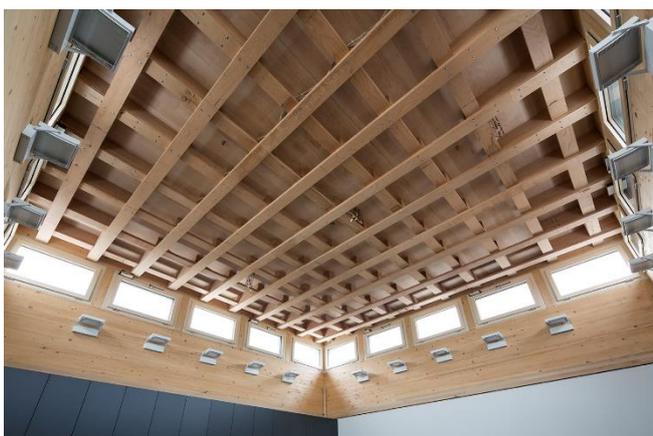


Figura 26. Fotografia della parte inferiore del solaio utilizzato per la copertura.  
(fonte: <https://ethz.ch/en/news-and-events/eth-news/news/2014/07/forschungslabor-aus-laubholz.html>)

### 3.3.2 LA STRUTTURA

La struttura è composta da:

- Un piano interrato e un piano terra in cemento armato;
- I piani superiori sono composti da: un telaio post-teso in legno lamellare di frassino; un solaio ibrido con lastre in LVL (legno lamellare impiallacciato) di faggio e calcestruzzo; un solaio biassiale nel quadrante centrale della struttura; una soletta composta da lastre in legno di faggio ed elementi prefabbricati in calcestruzzo per la copertura.

I componenti in CLT del telaio post-teso sono stati sviluppati con un alto grado di prefabbricazione in modo da essere facilmente montati in loco, con un post-tensionamento di 700kN.

Per il solaio composto da LVL e calcestruzzo ha uno spessore di 200mm (160mm cemento, 40mm legno). È stato scelto del legno di faggio, più resistente dell'abete, che funge da armatura alla soletta in calcestruzzo gettato in opera.

Il solaio in legno biassiale in faggio è stato progettato per sviluppare una tecnologia che sfrutti il legno duro che negli ultimi anni sta aumentando il suo volume nelle foreste svizzere. La soletta ha una dimensione di 6,5x6,5 m ed è composta da una lastra con uno spessore di 120 mm (20 mm - 30mm - 20 mm - 30 mm - 20mm), pali rettangolari in LVL con un'altezza 170mm e lamelle trasversali di faggio spesse 40mm.

Il solaio utilizzato come copertura è costituito da elementi alveolari con travi e tavolati nella parte inferiore ed elementi in calcestruzzo prefabbricati nella parte superiore.

L'involucro edilizio è stato progettato dal Dipartimento di Architettura ed è composto da

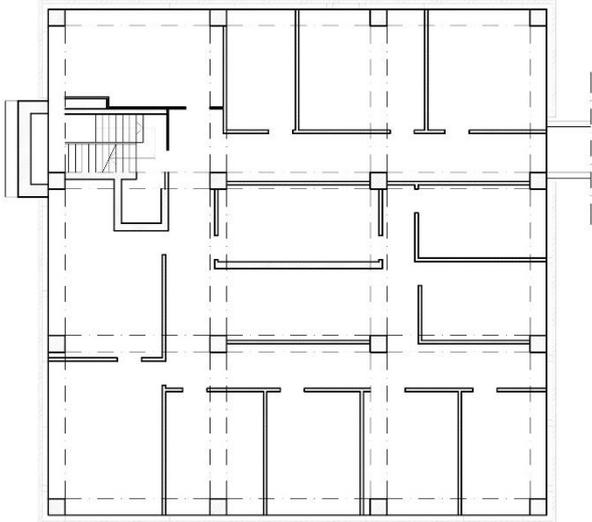


Figura 27. Pianta del piano primo.  
Fuori scala.

una facciata solare adattiva per ridurre i carichi di riscaldamento e raffrescamento e raccogliere energia solare. I singoli moduli della facciata sono azionati da attuatori robotici controllati dagli utenti in modo da poter garantire un ambiente confortevole.

### 3.3.3 IL MONITORAGGIO

La rete di sensori per il monitoraggio è stata ampliata man mano che i lavori di costruzione avanzavano.

La configurazione prevede 16 celle di carico, sensori che misurano temperatura, umidità relativa, in 20 punti della struttura, e contenuto di umidità, tramite resistenza elettrica, inoltre è stata posizionata una stazione climatica nel cantiere per registrare UR e T esterna. Alla fine dei lavori in 12 stanze sono stati installati altrettanti sensori combinati (T e UR) per valutare i microclimi. Mentre i sensori delle celle di carico, temperatura e umidità relativa sono automatizzati, quelle che misurano il contenuto di umidità sono manuali.

### 3.3.4 I RISULTATI

Le misurazioni dei primi periodi hanno mostrato un contenuto di umidità alta poiché la membrana di protezione dalle intemperie non era completamente impermeabile e la struttura è stata esposta alla pioggia. Nonostante ciò, il contenuto di umidità in tutte le parti in legno si è stabilizzato tra l'8 e il 12% rimanendo costante nel tempo.

Le conclusioni riportate da Leyder (2016) definiscono la relazione tra l'aumento contenuto di umidità nel legno e la perdita della forza di post-tensionamento dei cavi in acciaio della struttura.



Figura 28. Fotografia dei sensori sul soffitto.  
(fonte: <https://honr.ethz.ch/>)



Figura 29. Fotografia dei sensori su una colonna.  
(fonte: <https://honr.ethz.ch/>)

## 3.4 BROCK COMMONS TALLWOOD HOUSE Università della British Columbia

Luogo: Vancouver, Canada.  
Progettista: Acton Ostry Architects<sup>7</sup>;  
Fast+Epp<sup>8</sup>  
Anno: 2015-2017  
Tipologia: residenza universitaria  
Numero piani: 18  
Tecnologia: CLT; GLT; PSL (by  
Structurlam Products Ltd<sup>9</sup>)



Figura 30. Fotografia dell'edificio dal lato est.  
(fonte: <https://www.koroo.it/i-6-edifici-in-legno-piu-alti-del-mondo/>)



Figura 31. Fotografia dell'edificio dal lato sud.  
(fonte: <https://archello.com/it/project/brock-commons-tallwood-house>)

### NOTE:

<sup>7</sup>: Lo studio canadese Acton Ostry Architects progetta edifici pubblici, residenziali e ad uso misto dal 1992. Crea edifici che rispondono alle esigenze contemporanee di sostenibilità e comunità, imparando dal passato per cercare di sfruttare al meglio le nuove tecnologie.

<sup>8</sup>: Fast+EPP è un'azienda di ingegneria strutturale che opera in tutto il mondo per progettare edifici sia pubblici che privati. Grazie al suo organico molto vario riesce ad operare su tutti i materiali che vengono utilizzati per un sistema strutturale, riuscendo a combinarli tra loro.

<sup>9</sup>: Structurlam è un'azienda produttrice di legno ingegnerizzato, CLT e glulam, di alta qualità che ha gli stabilimenti produttivi in Columbia Britannica e in Arkansas. I prodotti utilizzano legno proveniente da foreste certificate e sostenibili, inoltre le fibre di scarto vengono riutilizzate come biocarburante.

### 3.4.1 L'EDIFICIO

L'University of British Columbia si è sempre impegnata nella promozione del legno, di provenienza locale, per la costruzione di edifici nel suo campus di Vancouver. L'unione di questo impegno e una domanda sempre crescente di alloggi per studenti, è culminato nella progettazione del Brock Commons Tallwood House. La sua costruzione è stata possibile grazie a dei finanziamenti federali ottenuti attraverso la Tall Wood Building Demonstration Initiative (TWBDI), che ha partecipato a un concorso indetto dalla Natural Resources Canada per le sfide tecniche inerenti al design indetto nel 2013.

Per la costruzione è stato necessario creare un Regolamento Specifico (SSR) poiché la costruzione di edifici in legno alti nel campus aveva un limite di 6 piani. Per la stesura dell'SSR sono stati coinvolti gruppi di esperti in diversi ambiti: architetti, ingegneri, vigili del fuoco, scienziati edili.

Al team di progettazione dei due studi Acton Ostry Architects e Fast+EPP è stato aggiunto un modellatore di progettazione e costruzione virtuale. Quest'ultimo aveva il compito di creare un modello 3D con un alto grado di dettaglio per coordinare i vari sistemi edilizi e identificare i possibili conflitti prima della costruzione. In questo modo il posizionamento dei tubi e dei pozzi è stato più facile e quando veniva riscontrato un problema il gruppo di progettazione lo risolveva.

Il Brock Commons Tallwood House è stato l'edificio in legno più alto del mondo per due anni dopo la sua ultimazione, per questo durante la sua costruzione è stato deciso di eseguire il monitoraggio del CLT utilizzato dal sito di produzione fino all'assemblaggio in cantiere ed in seguito di monitorare il contenuto di umidità e il movimento dell'edificio.

Il monitoraggio ha, inoltre, i fini di:

- Diffondere risultati e idee per ampliare le conoscenze sulle costruzioni in legno multipiano;
- Documentare il processo edilizio e contribuire a creare una garanzia di qualità dei progetti relativi;
- Documentare decisioni, errori, aspetti tecnici, energetici ed ambientali.

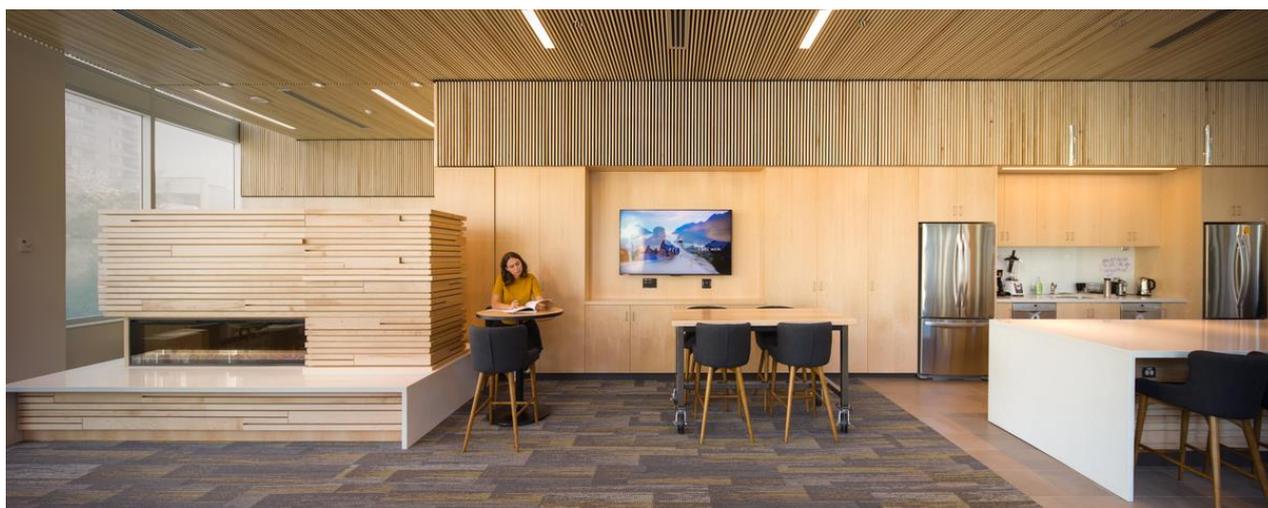


Figura 32. Fotografia degli interni del piano terra.

(fonte: <https://www.naturallywood.com/resource/brock-commons-tallwood-house-construction-overview-case-study/>)



Figura 33. Fotografia degli interni di un appartamento.  
(fonte: <https://archello.com/it/project/brock-commons-tallwood-house>)



Figura 34. Fotografia della tettoia esterna sul lato nord dell'edificio e di un'aula studio interna.  
(fonte: <https://www.actonstry.ca/project/brock-commons-tallwood-house/>)

## TIMELINE

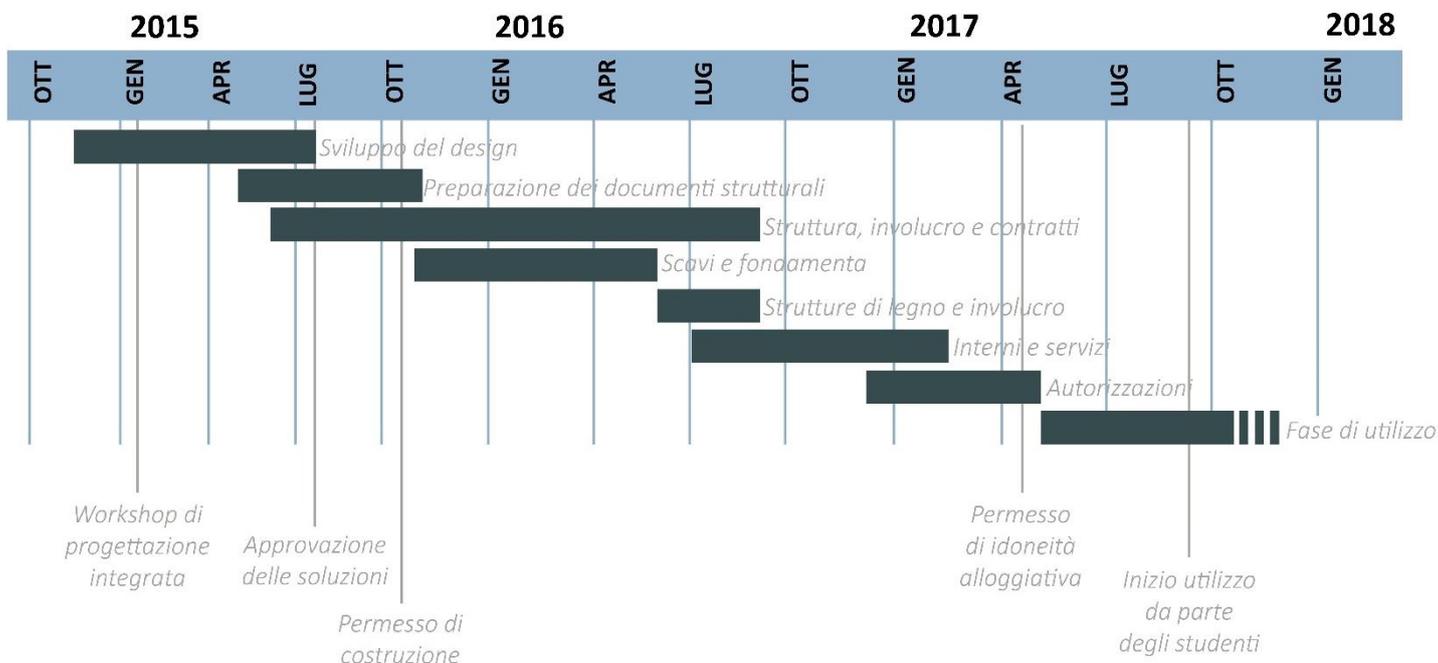


Figura 35. Timeline dei lavori eseguiti per la costruzione del Brock Commons Tallwood House.

### 3.4.2 LA STRUTTURA

Il Brock Commons Tallwood House è un edificio ibrido composto da cemento armato e CLT di forma rettangolare di circa 15x56 m.

Il piano terra, il solaio del primo piano e i due nuclei che contengono i vani scala sono in cemento armato, questo per dare una maggiore rigidità alla struttura.

La parte lignea della struttura, dai piani 2 a 18, è composta da colonne, travi e pannelli prodotti da Structurlam Products Ltd.

Le colonne in glulam hanno sezione diversa in base alla posizione 270x270 mm, ai piani da 2 a 9, e 270x215mm, ai piani da 10 a 18. Inoltre, ai piani 2 a 5, sono state utilizzate colonne in legno a fili paralleli (PSL), legno composito strutturale ad alta resistenza formato da fili di legno paralleli incollati con adesivo a pressione.

I pannelli in CLT a 5 strati hanno uno spessore di 170mm e sono composti da pannelli in abete rosso negli strati esterni e in SPF (abete rosso-pino-abete) negli strati interni. I pannelli sono stati sigillati all'acqua con un rivestimento in cera sulle teste e in resina uretanica sulle facce.

Le chiusure perimetrali, con un alto grado di prefabbricazione, hanno un rivestimento esterno in laminato composto per il 70% da fibre di legno e resina, un isolamento esterno in lana di roccia, una membrana che isola da acqua e aria e un pannello in gesso fissato su montanti in acciaio.

I pannelli sono stati inviati dall'azienda produttrice al cantiere nel giorno in cui dovevano essere installati. Il contenuto di umidità nel legno doveva essere



Figura 36. Fotografia dei lavori di assemblaggio dei piani bassi.

(fonte: <https://www.archdaily.com/879625/inside-vancouvers-brock-commons-the-worlds-tallest-timber-structured-building>)

mantenuto al 12% ( $\pm 3\%$ ). Fino al momento del posizionamento i componenti sono stati imballati in una plastica protettiva per non essere esposti a pioggia e sole.

Il piano terra l'edificio è caratterizzato da una facciata continua vetrata sormontata da una tettoia in CLT a vista. L'edificio è coronato da una cornice metallica.

L'assemblaggio della struttura è stato effettuato molto rapidamente, ci sono voluti circa 3 giorni per ogni piano, e con una mano d'opera molto limitata che ha richiesto solo l'impiego di 9 lavoratori.



Figura 37. Fotografia del posizionamento di un pannello. (fonte: <https://www.constructioncanada.net/b-c-city-to-not-allow-12-storey-tall-wood-buildings/>)



Figura 38. Fotografia di un piano durante i lavori di costruzione. (fonte: <https://www.thinkwood.com/projects/brock-commons-tallwood-house>)

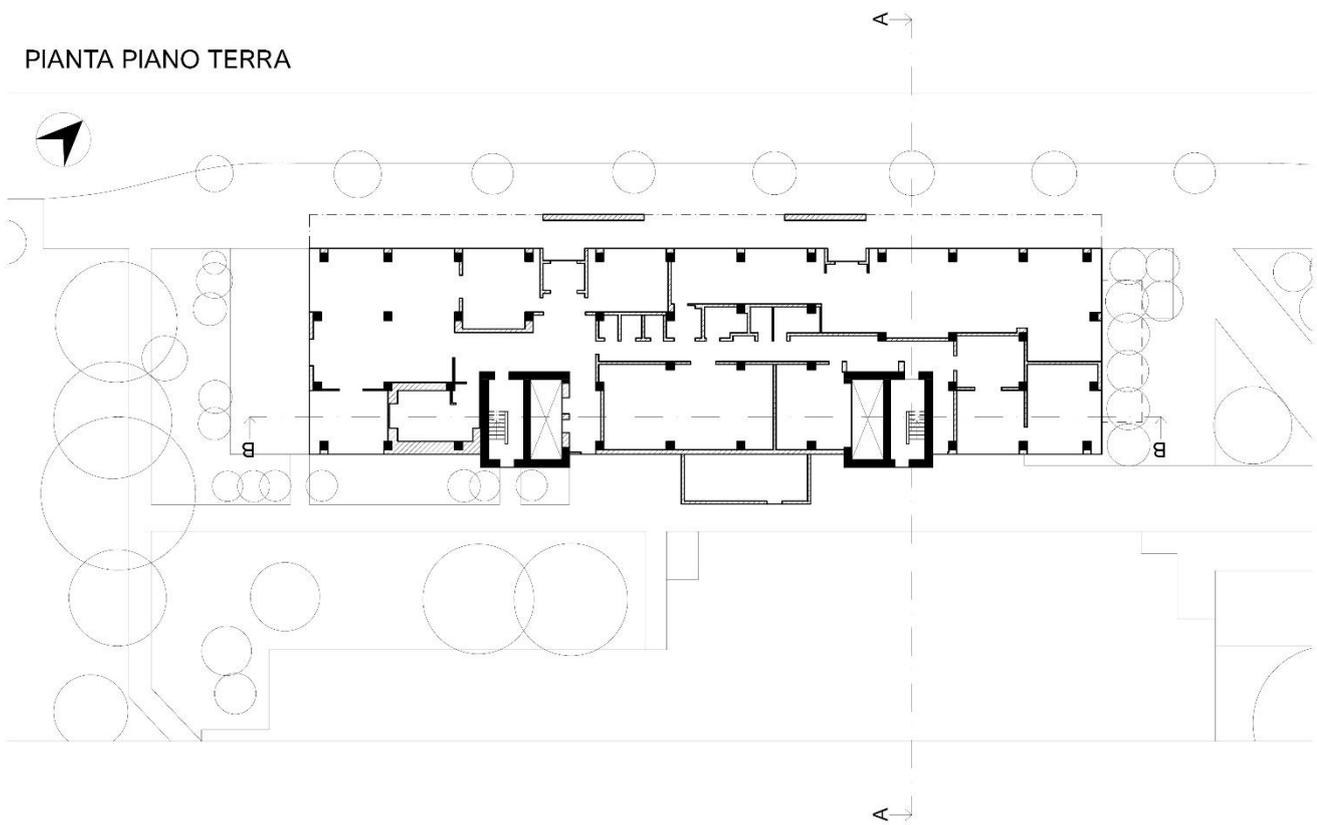


Figura 39. Fotografia del posizionamento di una parete angolare. (fonte: <https://canada.constructconnect.com/joc/news/projects/2018/10/groundbreaking-brock-commons-blazes-new-construction-trail>)



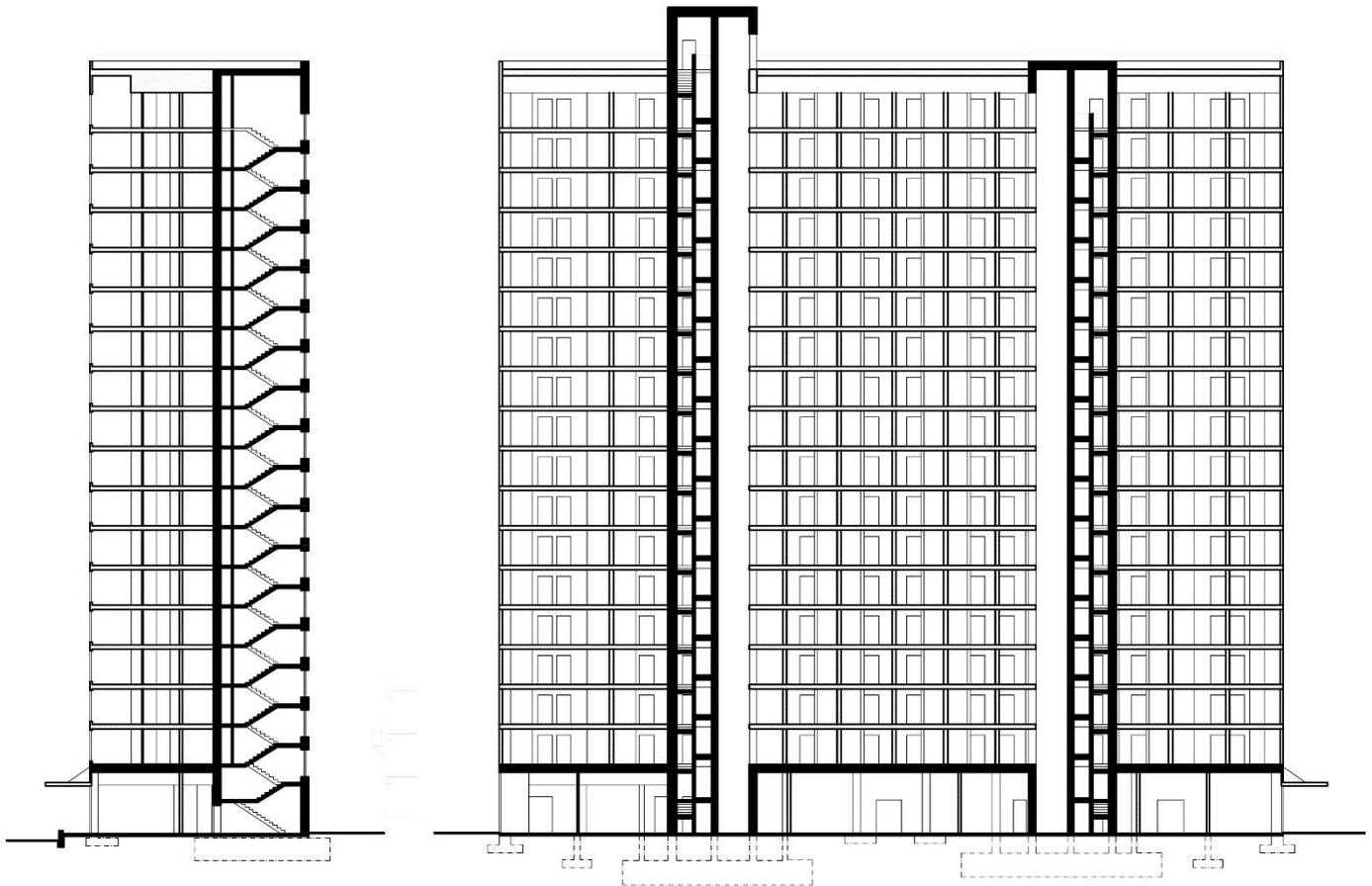
Figura 40. Fotografia del posizionamento di una parete perimetrale. (fonte: <https://www.thinkwood.com/projects/brock-commons-tallwood-house>)

PIANTA PIANO TERRA



SEZIONE A-A

SEZIONE B-B



SCALA 1:500



Figura 41. Pianta del piano terra, sezione A-A' e B-B'.  
Scala 1:500.

# NODO PANNELLO-PARETE

SCALA 1:10

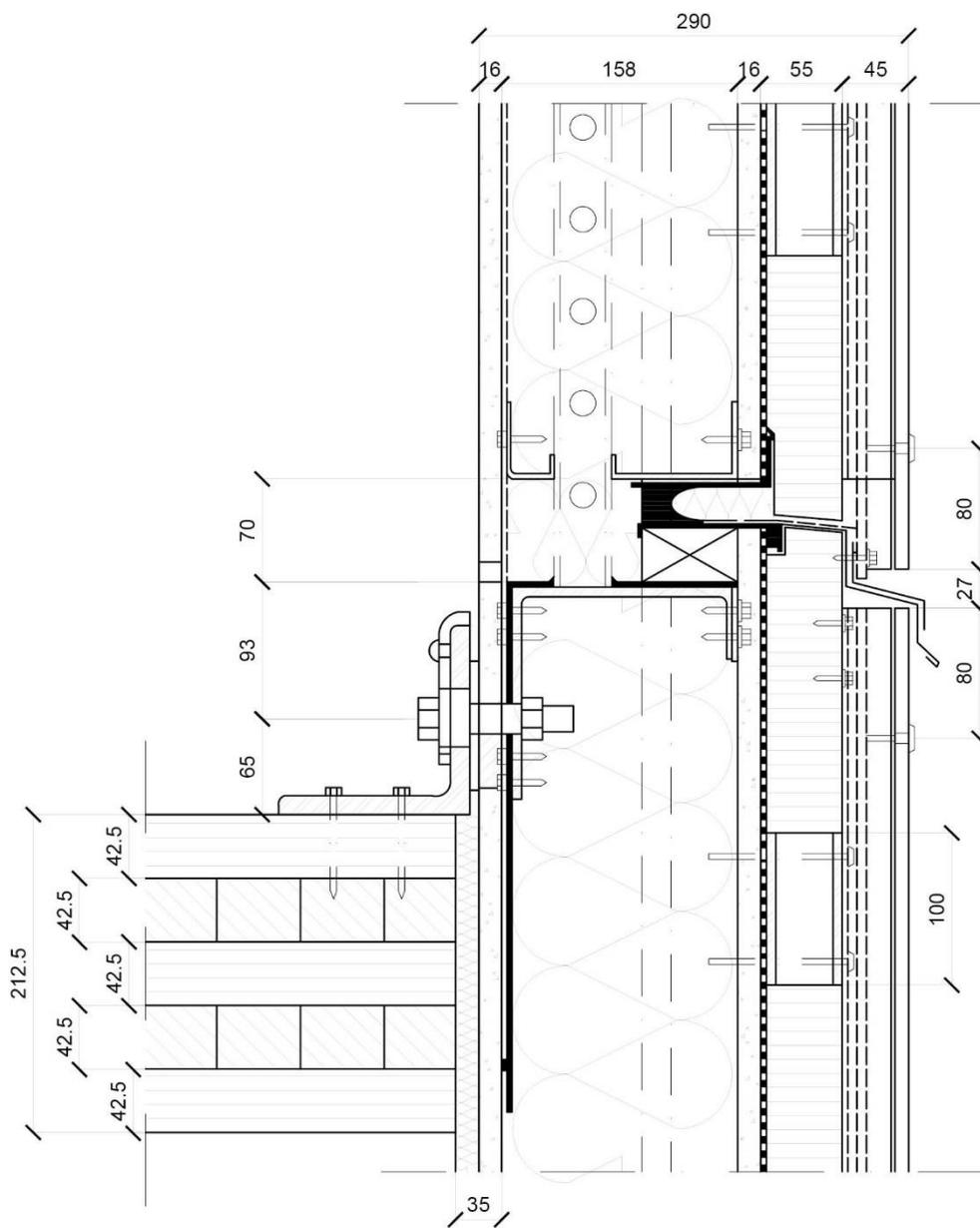


Figura 42. Nodo pannello-parete.  
Scala 1:10.

# NODO TRAVE-COLONNA

SCALA 1:10

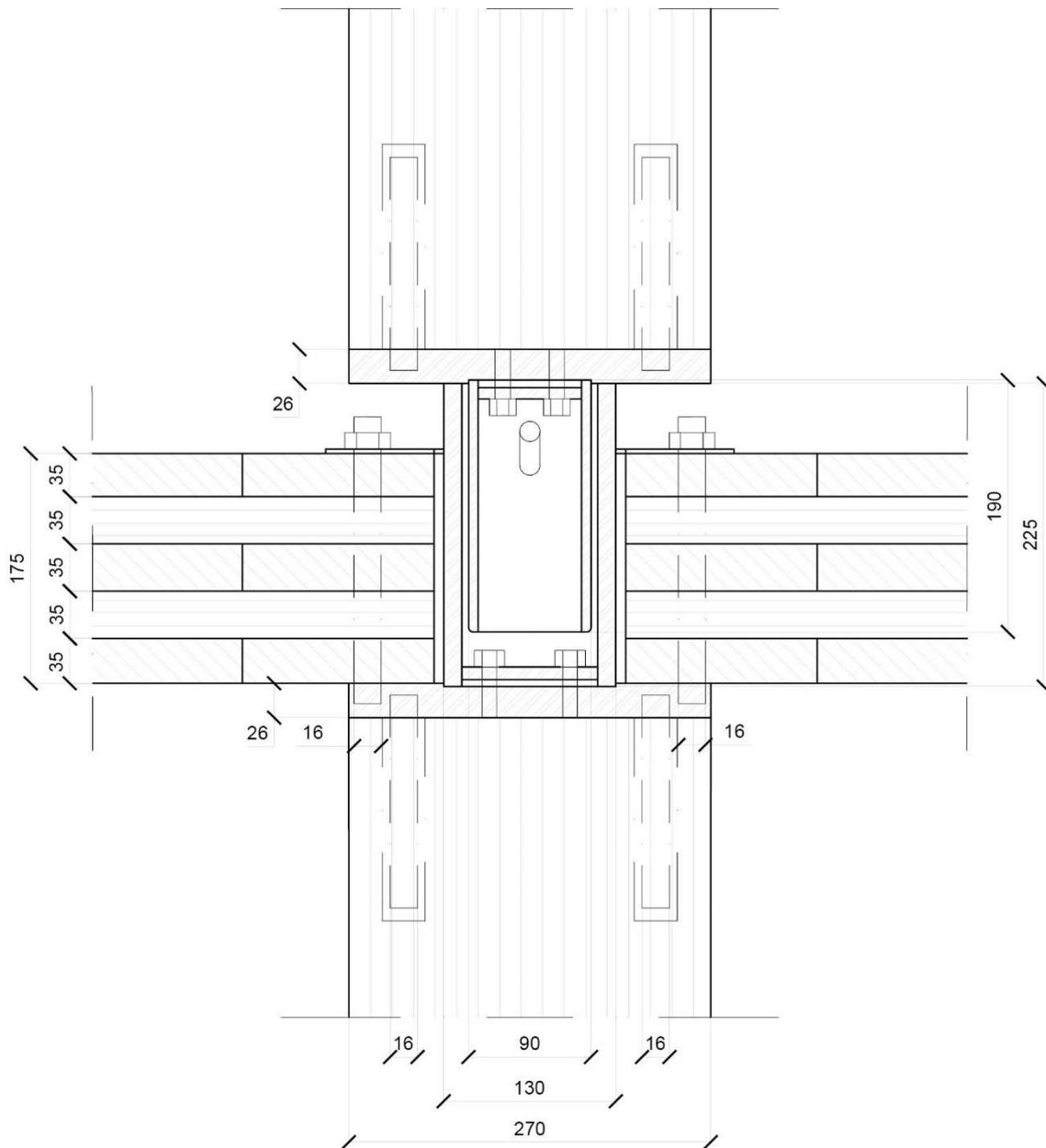


Figura 43. Nodo trave-colonna.  
Scala 1:10.

### 3.4.3 IL MONITORAGGIO

Il monitoraggio dei componenti è iniziato nell'impianto di produzione. I ritagli dei pannelli in CLT sono stati dotati di sensori per essere utilizzati come campioni di controllo e sono stati trasportati in cantiere insieme a quelli utilizzati per la costruzione. Questo è stato fatto per verificare e confrontare i valori presi.

Il contenuto di umidità misurato in stabilimento era inferiore al 15%.

Sono stati installati 6 sensori che misurano il contenuto di umidità e 2 sensori di temperatura su piani alternati: nella posizione nord-sud ai piani 4, 8, 12, 16; nella posizione est-ovest nei piani 3, 6, 10, 14.

Le posizioni sono state scelte per avere una rappresentazione della maggior parte degli ambienti della struttura. I sensori sono stati installati nella parte inferiore dei pannelli utilizzati come solaio e i dati sono stati raccolti giornalmente da settembre 2017 ad agosto 2019.

### 3.4.4 GLI IMPREVISTI IN CANTIERE

Durante la posa in opera la squadra di costruzione aveva notato, grazie alle misurazioni effettuate, un MC maggiore nei piani inferiori e che alcuni incapsulamenti di cartongesso danneggiati a causa dell'acqua piovana, inoltre si erano verificate penetrazioni all'interno delle giunture dei pannelli.

Per questo sono state installate delle canaline di drenaggio temporanee a chiusura delle connessioni per eliminare l'acqua liquida ed è stato sfruttato il rivestimento acustico in cemento per evitare ulteriori infiltrazioni. Per facilitare il processo di asciugatura sono stati installati ventilatori per favorire la circolazione dell'aria. A causa di questi problemi l'installazione dei pannelli in cartongesso è stata posticipata fino a quando l'MC non fosse sceso sotto al 15%.

### 3.4.5 I RISULTATI

I risultati dell'analisi dei dati raccolti riporta il contenuto di umidità dei pannelli intorno al 10-20%, con una tendenza all'essiccazione durante l'occupazione, che ha portato i valori all'8-15%, come consigliato dal produttore.

Lo studio svolto dall'UBC ha sottolineato un contenuto di umidità maggiore nei piani superiori. Inoltre, il posizionamento dei sensori sui pannelli orientati secondo i punti cardinali ha dimostrato un contenuto di umidità maggiore in quelli a sud e a nord, ma con un'essiccazione costante nel periodo monitorato.

Le temperature interne misurate hanno mostrato una fluttuazione maggiore nei valori rilevati a sud rispetto agli altri.

Gli andamenti osservati nell'edificio sono stati coerenti con quelli dei campioni di controllo inviati dallo stabilimento.

PIANO TIPO

● Sensori per il monitoraggio dell'umidità

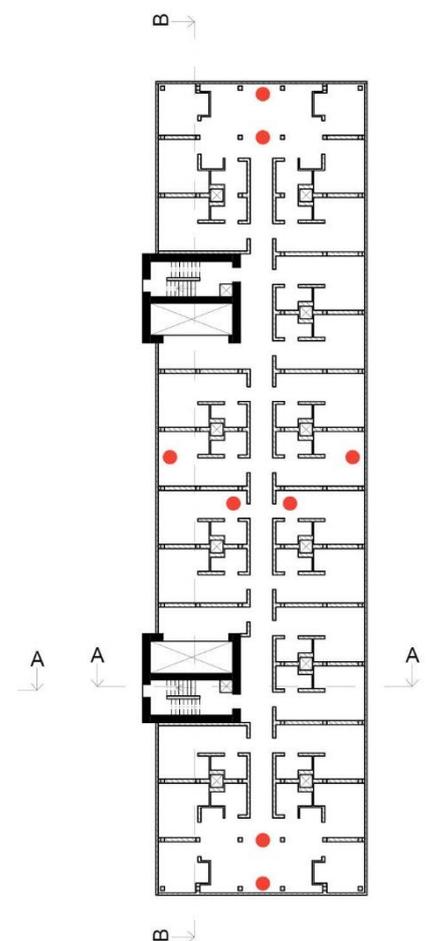


Figura 44. Pianta tipo dell'edificio con la posizione dei sensori. Fuori scala.

## 3.5 CARBON 12

Luogo: Portland, Oregon, USA

Progettista: Kaiser+PATH<sup>10</sup>

Anno: 2016-2018

Tipologia: residenziale-commerciale

Numero piani: 8

Tecnologia: CLT (by Structurlam Products Ltd<sup>11</sup>)



Figura 45. Fotografia dell'edificio dal lato nord-ovest.  
(fonte: <https://www.carbon12pdx.com/>)

### NOTE:

<sup>10</sup>: Lo studio è l'unione dei due studi: il Kaiser Group e il Path Architecture, offre la progettazione di edifici che possono soddisfare le esigenze della crescita della popolazione urbana e del cambiamento globale utilizzando il CLT per costruire edifici alti nella parte nord-ovest del Pacifico.

<sup>11</sup>: Structurlam è un'azienda produttrice di legno ingegnerizzato, CLT e glulam, di alta qualità che ha gli stabilimenti produttivi in Columbia Britannica e in Arkansas. I prodotti utilizzano legno proveniente da foreste certificate e sostenibili, inoltre le fibre di scarto vengono riutilizzate come biocarburante.

### 3.5.1 L'EDIFICIO

L'edificio di 8 piani ideato da Kaiser+PATH è l'edificio più alto degli Stati Uniti ed è stato ideato come uno stabile di lusso. La progettazione di questa struttura ha spinto il Comitato dell'ICC a revisionare il Codice Edilizio 2021 e a consentire la costruzione di edifici in legno alti fino a 18 piani. È stato costruito a Portland, città situata nella regione nord-occidentale del Pacifico che è una delle più umide del paese a causa delle molte precipitazioni.

Il progetto è stato utilizzato per una campagna di monitoraggio che si era posta diversi fini:

- Monitoraggio della temperatura e dell'umidità relativa agente sulla struttura portante;
- Documentare il processo edilizio e contribuire a creare una garanzia di qualità dei progetti relativi;
- Documentare decisioni, errori, aspetti tecnici, energetici ed ambientali;
- Diffondere risultati e idee per ampliare le conoscenze sulle costruzioni in legno multipiano;
- Necessità di un monitoraggio per verificare le ipotesi di progetto;
- Monitoraggio del materiale ligneo prefabbricato dallo stabilimento di produzione, proseguendo con il trasporto, lo stoccaggio, fino alla costruzione e all'uso attivo della struttura finita.



Figura 46. Fotografia degli interni di un appartamento.  
(fonte: <https://www.kaiserpath.com/carbon12>)

#### TIMELINE

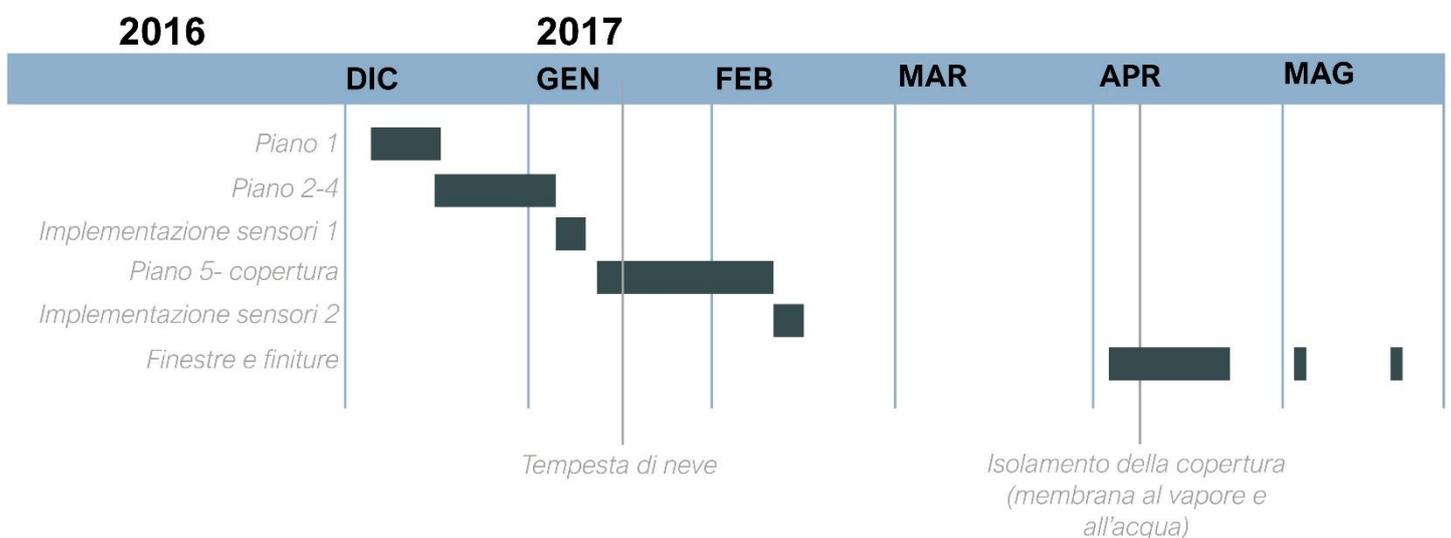


Figura 47. Timeline dei lavori di costruzione dell'edificio Carbon 12.

### 3.5.2 LA STRUTTURA

La struttura si basa su un sistema a colonne e travi in glulam e solai in CLT. Questa poggia su un basamento in cemento armato, per permettere la costruzione di un parcheggio sotterraneo, ed è rinforzata da un telaio in acciaio per resistere meglio a sismi laterali e ai carichi del vento.

I pannelli in CLT sono composti da cinque strati: lo strato inferiore è in abete Douglas lasciato a vista con una mano di rivestimento in poliuretano acrilico per scopi estetici, mentre gli altri sono composti da abete-pino-abete (SPF) provenienti dal Canada occidentale.

I pannelli della pavimentazione sono stati rivestiti da isolante rigido, un topping di cemento alleggerito, smorzamento acustico e pavimentazione.

Invece i pannelli utilizzati per la copertura piana sono ricoperti da barriera al vapore, isolamento rigido, guaina e membrana impermeabile all'acqua.

La struttura è stata chiusa con pareti perimetrali in vetro e dall'esterno è la rappresentazione dell'idea di progetto: uno scrigno.

Inizialmente è stata montata la struttura in acciaio sul basamento in cemento; poi sono state installate le colonne e le travi prima sul lato est e poi sugli altri tramite viti diagonali; dopodiché sono stati posizionati i pannelli in CLT; dopo la collocazione della parte lignea del terzo piano sono stati aggiunti gli altri piani della parte in acciaio ed è stato completato l'edificio. I componenti sono stati sollevati direttamente dal semirimorchio tramite una gru e collocati al proprio posto.



Figura 48. Rappresentazione del sistema strutturale e delle fondazioni (fonte: <https://www.carbon12pdx.com/about>)

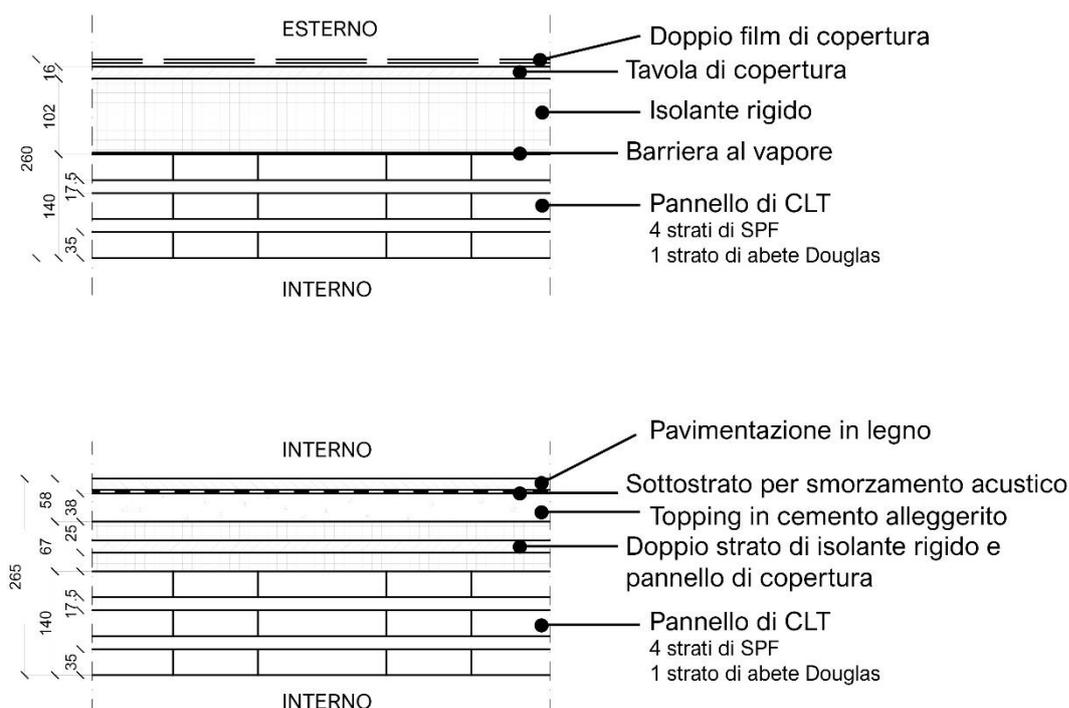


Figura 49. Stratigrafia dei solai.  
Scala 1:10.

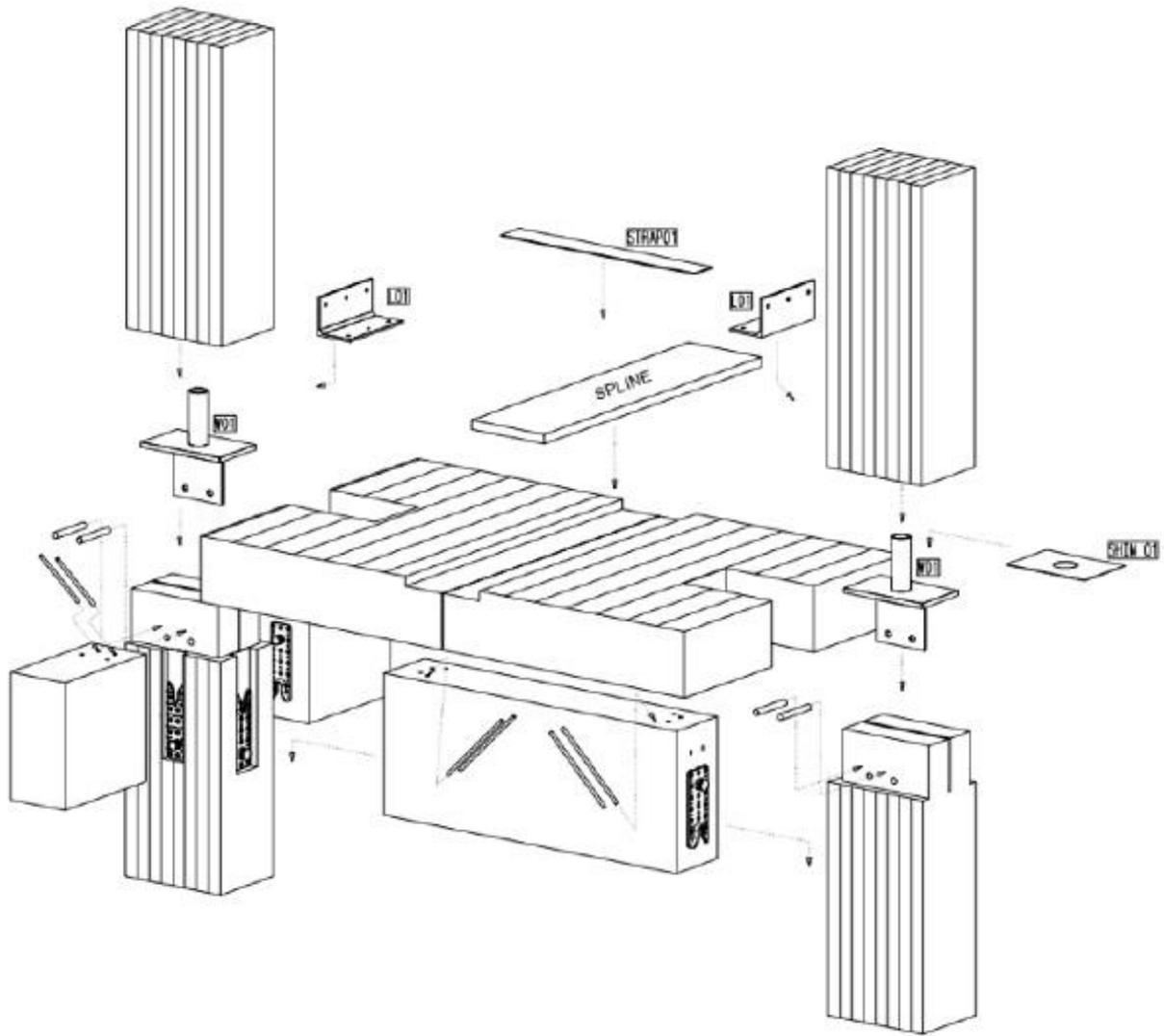


Figura 50. Esploso dello schema strutturale tipico.  
 (fonte: <https://buildingcarbon12.com/design-and-approval/>)

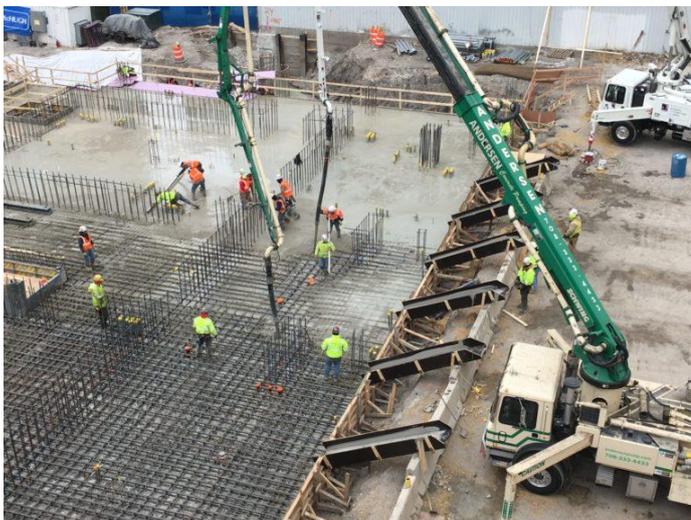


Figura 51. Fotografia dei lavori di gettata cemento del piano terra.  
 (fonte: <https://buildingcarbon12.com/wood/>)



Figura 52. Fotografia delle operazioni di montaggio.  
 (fonte: <https://www.carbon12pdx.com/about>)

### 3.5.3 IL MONITORAGGIO

Per il monitoraggio alcuni sensori sono stati installati in cantiere e poi la rete è stata ampliata durante la costruzione. Sono state effettuate tre installazioni:

- Venti sensori sono stati installati nell'impianto di produzione nel novembre 2016;
- La prima installazione di sensori in cantiere è avvenuta il 6 gennaio 2017 con il completamento del quarto piano, i misuratori sono stati chiusi con nastro adesivo e sigillati;
- La seconda installazione ai piani 2, 4, 8 è stata effettuata dopo il posizionamento della copertura, il 10 febbraio 2017, i sensori sono stati ricoperti con una piastra in alluminio e sigillanti con una guarnizione di gomma e mastice.

I sensori in acciaio utilizzati sono i modelli S-2 e S-16<sup>12</sup>, dell'azienda Omnisense LL, che misurano la conduttanza elettrica tra due perni nel legno, per un totale di 83 sensori. Sono state individuate cinque posizioni dell'edificio:

- Nelle colonne del primo piano dove c'è l'interfaccia legno/calcestruzzo;
- Nel CLT a tutta profondità e a metà profondità;
- Nella laminazione interna del CLT;
- Nei montanti trattati delle pareti ignifughe.

I sensori sono stati inseriti nella parte superiore dei pannelli e in appositi ritagli ricavati negli elementi per aspetti estetici. I dati raccolti vengono trasmessi tramite data logger wireless tramite internet in tempo reale. Le misurazioni dell'umidità relativa sono accurate al  $\pm 2\%$ , mentre quelle della temperatura al  $\pm 3^\circ\text{C}$ .

I sensori sono stati posizionati in tasche, create tramite fresatura del legno, sia orizzontali che verticali in modo da non danneggiare l'aspetto estetico degli appartamenti.



Figura 53. Tipologie dei sensori utilizzati prodotti dalla Omnisense LL (fonte: S. Kordziel, Study of moisture conditions in a multi-story mass timber building through the use of sensors and wufi hygrothermal modeling, tesi magistrale, Colorado School of Mines, 2018, relatore: Dr. Shiling Pei.)

#### NOTE:

<sup>12</sup>: I sensori S2 e S16 sono prodotti dalla Omnisense LLC, monitorano temperatura e umidità relativa e contenuto di umidità tramite una morsettiera a vite e registra i valori su una memoria interna, in seguito questi vengono archiviati su un gateway tramite rete wireless. I sensori utilizzano una batteria al litio a lunga durata che può durare fino a 15 anni.

#### PIANTE CON POSIZIONE DEI SENSORI

##### FUORI SCALA

Nomenclatura dei sensori:

AB.X

Numero identificativo del sensore

€) colonna in glulam P) pannello il CLT T) trave in glulam W) parete

Numero del piano (1-8; roof)

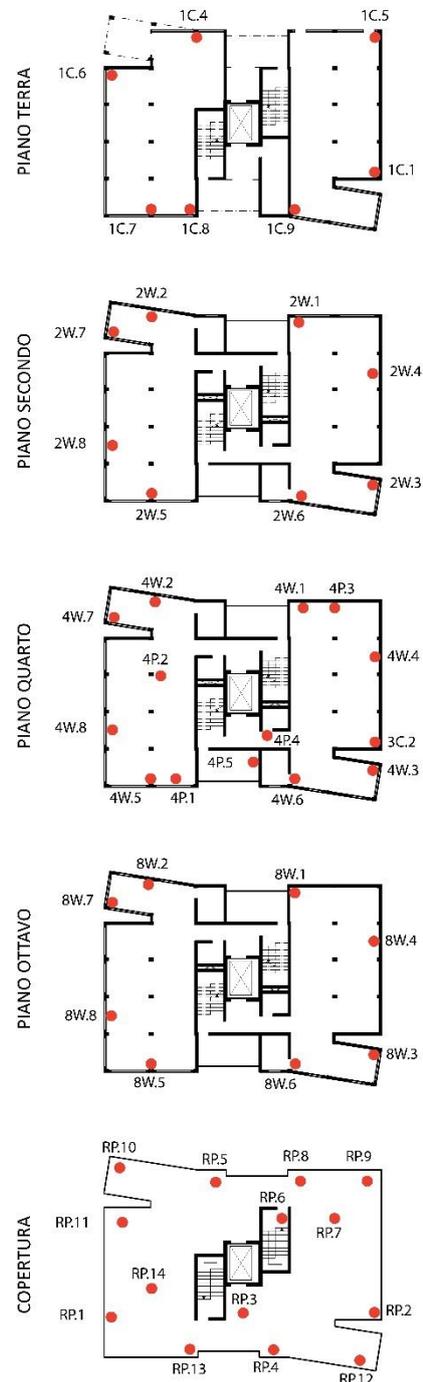


Figura 54. Pianta con la posizione dei sensori. Fuori scala.

### 3.5.4 GLI IMPREVISTI IN CANTIERE

Durante la costruzione dell'edificio, a metà gennaio, le piogge e una nevicata straordinaria hanno causato l'esposizione dei sensori all'acqua liquida e la stagnazione nelle intercapedini, causando il cortocircuito dei sensori e la sostituzione di 35 di essi. Per evitare altri malfunzionamenti il costruttore ha creato una copertura protettiva provvisoria e ha azionato ventilatori per favorire l'asciugatura del legno.

### 3.4.5 I RISULTATI

I risultati della misurazione mostrano che, fino all'arrivo in cantiere, il contenuto di umidità nel legno rimaneva in un intervallo tra il 10 e il 15%. Questo periodo è stato seguito dalle precipitazioni e quindi è stato misurato un picco di umidità, segnalando una saturazione delle fibre.

È stato utilizzato il software WUFI<sup>13</sup> per prevedere il comportamento igrometrico della struttura e paragonarlo a quello reale. I tempi di asciugatura del programma risultano più lenti di quelli reali; infatti, è stato misurato un tempo di asciugatura di una settimana in seguito a una bagnatura di due settimane. L'uso di barriere al vapore è risultato ambiguo perché se da un lato protegge dall'umidità, dall'altro allunga i tempi di asciugatura.



Figure 55. Fotografie del cantiere dopo la bufera di neve di Gennaio 2017 (fonte: <https://buildingcarbon12.com/construction/>)



Figura 56. Fotografia di alcuni sensori danneggiati dal mal tempo (fonte: S. Kordziel, Study of moisture conditions in a multi-story mass timber building through the use of sensors and wufi hygrothermal modeling, tesi magistrale, Colorado School of Mines, 2018, relatore: Dr. Shiling Pei.)

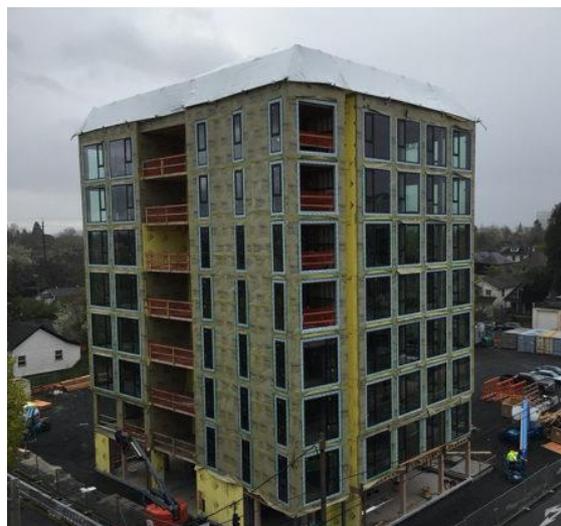


Figura 57. Fotografia della struttura temporanea di copertura utilizzata tra Marzo e Aprile 2017 (fonte: <https://buildingcarbon12.com/construction/>)

#### NOTE:

<sup>13</sup>: Il software WUFI permette la simulazione in modo dinamico del comportamento energetico e igrotermico di strutture e componenti edili per individuare punti di condensa interstiziale e pericolo di muffa, secondo le normative UNI EN 15026 e UNI EN 13790.

## 3.6 PEAVY HALL

### Università Statale dell'Oregon

Luogo: Corvallis, Oregon, USA.

Progettista: Michael Green  
Architecture<sup>14</sup>

Anno: 2017-2020

Tipologia: struttura universitaria

Numero piani: 3

Tecnologia: CLT (by Structurecraft<sup>15</sup>)



Figura 58. Rendering dell'Oregon Forest Science Complex.

(fonte: <https://www.world-architects.com/en/architecture-news/works/oregon-forest-science-complex>)

### 3.6.1 L'EDIFICIO

L'Oregon State University (OSU) ha deciso di ampliare il suo campus all'interno dell'Oregon Forest Science Complex (OFSC) inserendo due nuovi edifici adibiti ad aule e laboratori, per effettuare ricerche sulla gestione e il sostegno degli ecosistemi forestali. Sono state costruite la George W. Peavy Forest Science Center (Peavy Hall) e la AA "Red" Emerson Advanced Wood Products

#### NOTE:

<sup>14</sup>: Michael Green è un architetto pluripremiato e famoso per il suo utilizzo del legno di massa per costruire edifici innovativi e sostenibili. L'architetto ha fondato nel 2012 uno studio di architettura situato a Vancouver, che opera nel Nord America. I loro progetti, di edifici nuovi e ristrutturazioni, puntano ad affrontare il problema del cambiamento climatico. Infatti, offrono un'ampia gamma di servizi che va dalla progettazione del paesaggio, al design interno alla struttura.

<sup>15</sup>: L'azienda Structurecraft ha nel suo organico ingegneri, progettisti, falegnami e operatori provenienti da tutto il mondo per riuscire a fabbricare edifici e ponti in vari materiali, tra cui il legno ingegnerizzato di loro produzione. Grazie al suo team offre un'ampia gamma di servizi, che vanno dalla progettazione, alla produzione, all'installazione.

Laboratory (AWP), queste sono interconnesse tra loro e al preesistente Richardson Hall tramite spazi ausiliari e un arboreto esterno.

Dato il crescente utilizzo del legno ingegnerizzato per la costruzione di edifici di scala medio-alta e la scarsa presenza di linee guida e standard per la protezione, l'OSU ha deciso di installare una rete di monitoraggio del Peavy Hall per:

- Il monitoraggio della temperatura e dell'umidità relativa agente sulla struttura portante e dei microclimi esistenti in cantiere;
- Diffondere risultati ed idee per ampliare le conoscenze sulle costruzioni in legno multipiano;
- Sviluppare modelli di previsione della manutenzione e della vita utile dei nuovi sistemi edilizi;
- Sostenere lo sviluppo di pratiche e progetti di monitoraggio.



Figura 59. Fotografie delle facciate del Peavy Hall (sinistra) e dell'AWP (destra).  
(fonte: <https://www.archdaily.com/958332/oregon-forest-science-complex-michael-green-architecture>)



Figura 60. Facciata nord del Peavy Hall.  
(fonte: <https://www.archdaily.com/958332/oregon-forest-science-complex-michael-green-architecture>)



Figura 61. Fotografia degli ambienti interni che danno sulla facciata vetrata ad est del Peavy Hall, l'atrio e la sala comune al secondo piano.

(fonte: <https://www.archdaily.com/958332/oregon-forest-science-complex-michael-green-architecture>)

### 3.6.2 LA STRUTTURA

Gli edifici sono costruiti in CLT a 7 strati, questo è stato prodotto in Oregon per favorire l'industria locale. Il AWP ha una pianta rettangolare, è stato progettato per essere un hub per il National Center for Advanced Wood Products Manufacturing and Design.

Invece il Peavy Hall ha una pianta a forma di "T" con un'ala orientata a nord-sud, di 18x40 metri in cui è inserito l'atrio, e una a ovest-est, di 76x22 metri.

La struttura è composta da:

- Un sistema di travi, montanti e pannelli in CLT;
- Diaframmi ibridi in legno-calcestruzzo;
- Pareti di taglio post-tese;
- Una copertura è composta da pannelli in MPP (Mass Ply Panel) che poggiano direttamente sulle colonne dell'atrio.

Le facciate sono continue, nell'atrio è stata posizionata una vetrata supportata da telai metallici, mentre le altre sono in CLT.

La struttura è stata suddivisa in 3 zone per l'erezione, i componenti in legno sono arrivati a lotti in base alla loro posizione, sono stati eretti avvolti nella pellicola protettiva e sguainati in seguito. I lavori sono iniziati il 30 novembre 2017, ci sono voluti circa 73 giorni per ultimare ogni zona e poco meno di un mese per creare la copertura meteorologica del tetto.

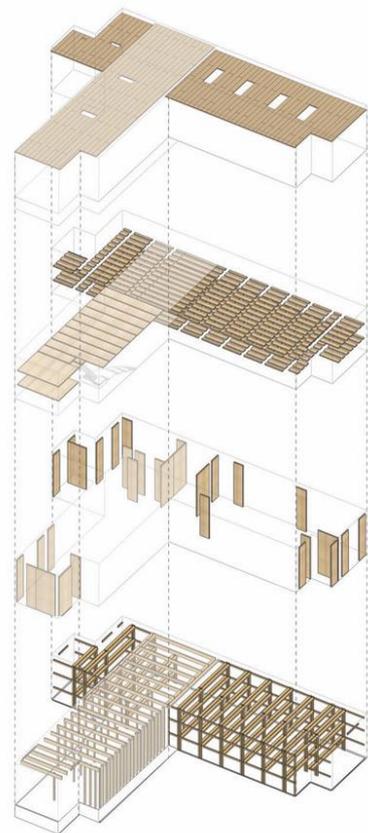
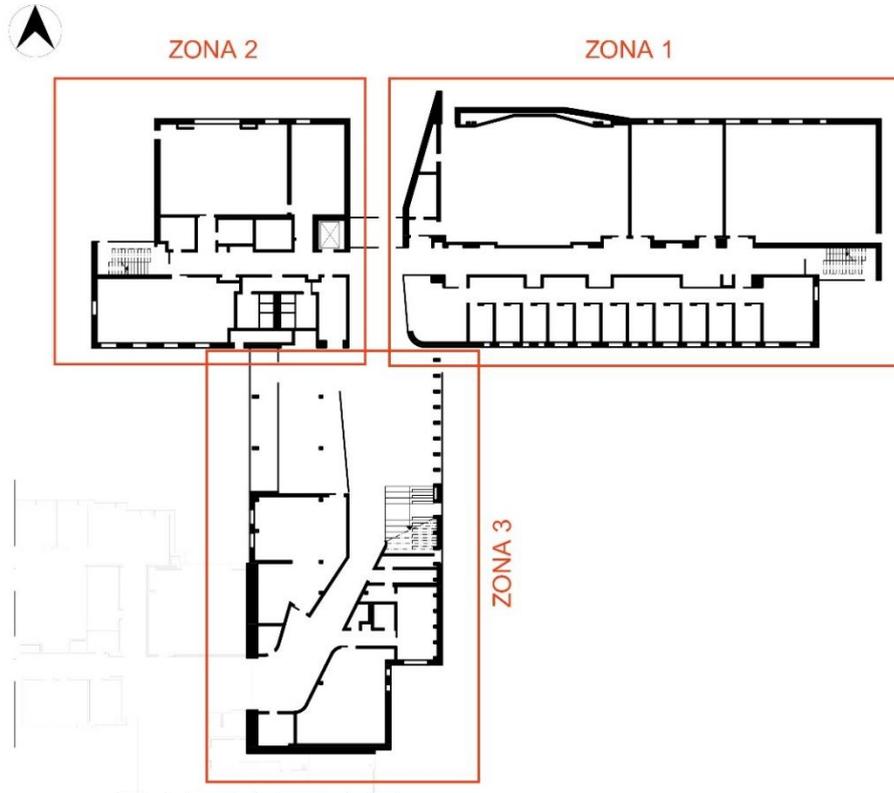


Figura 62. Esploso dei componenti della struttura lignea del Peavy Hall. (fonte: <https://www.archdaily.com/958332/oregon-forest-science-complex-michael-green-architecture>)

PIANTA PIANO TERRA  
FUORI SCALA

LEGENDA:

■ Suddivisione delle zone di erezione



PIANTA PIANO PRIMO

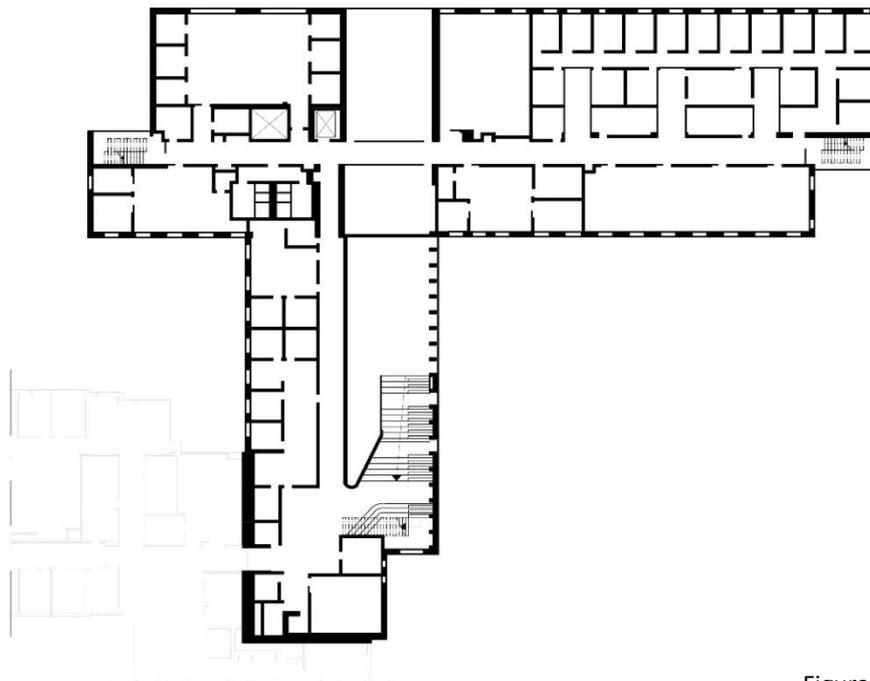


Figura 63. Piante dei piani terra e primo con la suddivisione delle zone di erezione.

PIANTA SECONDO PIANO  
FUORI SCALA

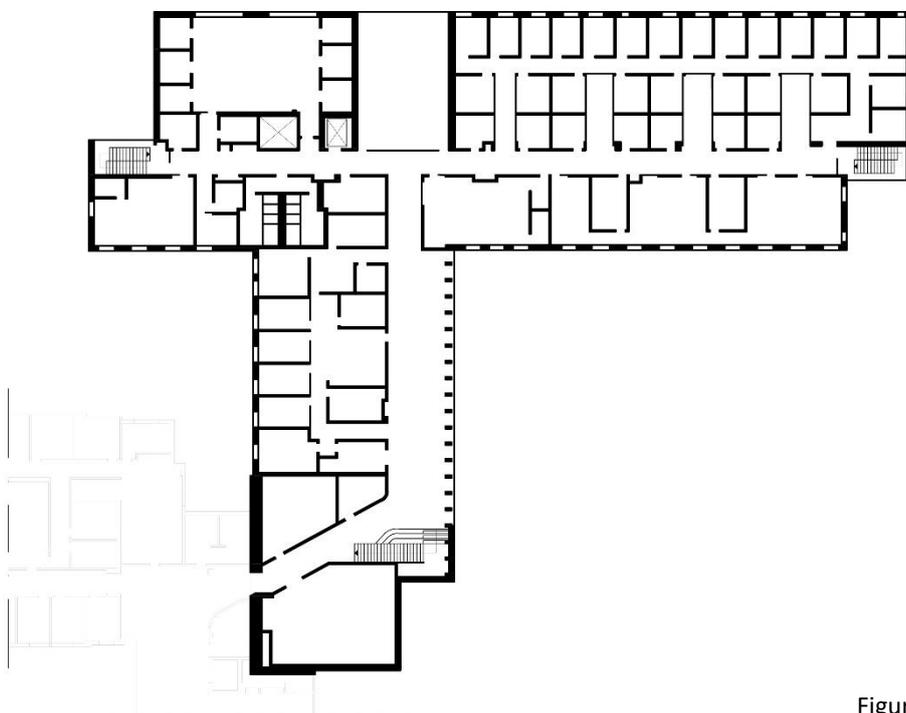


Figura 64. Pianta del piano secondo.



Figura 65. Fotografia dell'istallazione dei pannelli e della carpenteria metallica di collegamento dei componenti.  
(fonte: <https://www.world-architects.com/en/architecture-news/works/oregon-forest-science-complex>)

Le pareti di taglio, a tutta altezza, sono state lasciate fino alla fine con un cappello impermeabile sul bordo superiore. I lavori sono stati sospesi tra fine marzo e inizio agosto 2018 a causa di difetti di fabbrica del materiale, gli operatori hanno riscontrato delaminazione della copertura.

### 3.6.3 IL MONITORAGGIO

La posizione dei sensori per il monitoraggio è stata scelta in base ad alcuni criteri:

- La vulnerabilità del luogo ad ingresso ed intrappolamento dell'umidità;
- La necessità di comparare i dati di posizioni simili;
- La necessità di unire dati igrotermici a dati statici e dinamici al fine di avere un quadro completo della salute strutturale dell'edificio.
- Le limitazioni dovute a fattori economici, come il numero di sensori, e tecnologici, come la sensibilità dei sensori al ristagno dell'acqua.

I dati raccolti sono stati letti su tre scale diverse:

- L'edificio: per valutare durata di esposizione; microclimi dell'edificio; programma di erezione; ecc. In questa scala la zona della struttura che è risultata più vulnerabile è stata la 1, a causa delle piogge che hanno colpito la struttura durante il montaggio dei componenti.
- Dell'assemblaggio e del dettaglio: per valutare complessità del dettaglio; impermeabilità ed intrappolamento dell'umidità; orientamento nello spazio; ecc. Secondo questo aspetto le pareti orientate a sud sono quelle che dovrebbero essere maggiormente monitorate a causa dell'alto sbalzo di temperatura, dovuto a una radiazione solare elevata e una maggiore esposizione alle intemperie per i venti meridionali prevalenti, inoltre sono stati individuati punti vulnerabili le connessioni solaio-solaio che poggiano su travi in CLT, per possibili ristagni d'acqua, e le teste delle pareti di taglio.
- Del materiale: per valutare la tecnologia lignea; lo strato di profondità; la stratigrafia; ecc. Sono stati considerati più a rischio gli strati superiori dei componenti orizzontali, e quelli esterni degli elementi utilizzati come chiusure perimetrali.



Figura 66. Fotografia dei vari sensori installati nel Peavy Hall.

(fonte: E. J. Baas, M. Riggio, A. R. Barbosa, *Structural health monitoring data collected during construction of mass-timber building with a data platform for analysis*, Construction and Building Materials, Volume 268, 25 January 2021, Pages 121153, DOI:10.1061/j.dib.2021.106845)

I sensori igrometrici, che misurano tramite resistenza, sono stati installati già durante la costruzione della struttura e posizionati secondo le specifiche del produttore (parallelamente alla grana del materiale, non in imperfezioni del legno, lontano da apparecchiature elettriche per evitare mal funzionamenti). I valori igrotermici degli ambienti interni sono raccolti da 23 misuratori della temperatura e 19 sensori per l'umidità relativa, la posizione è stata scelta per rappresentare al meglio la varietà di microclimi che si creano all'interno della vasta struttura.

Insieme a questi sono stati installati sensori di flessione, spostamento, movimento e rotazione, celle di carico e accelerometri, per raccogliere dati sul comportamento meccanico dell'edificio. All'interno del cantiere è stata inoltre posizionata una stazione meteorologica che misura temperatura, umidità relativa, pioggia, velocità e direzione del vento.

La rete di sensori è stata pensata per essere permanente, per questo tutti i dispositivi sono collegati alla rete elettrica e a Internet per trasmettere continuamente i dati.

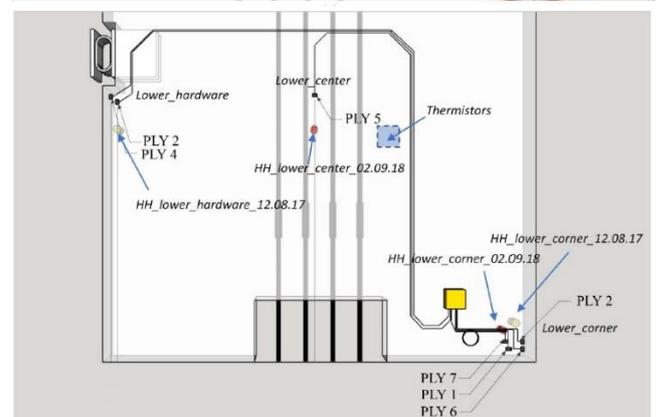
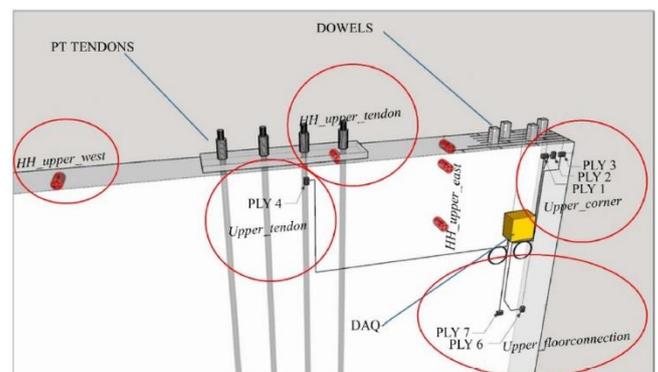
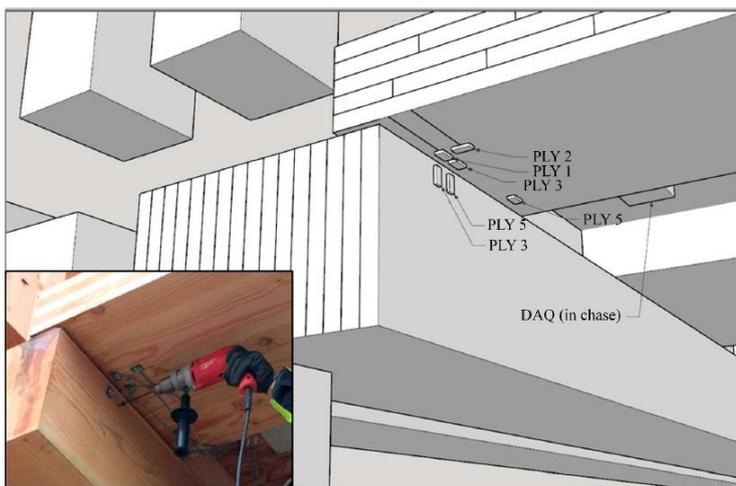
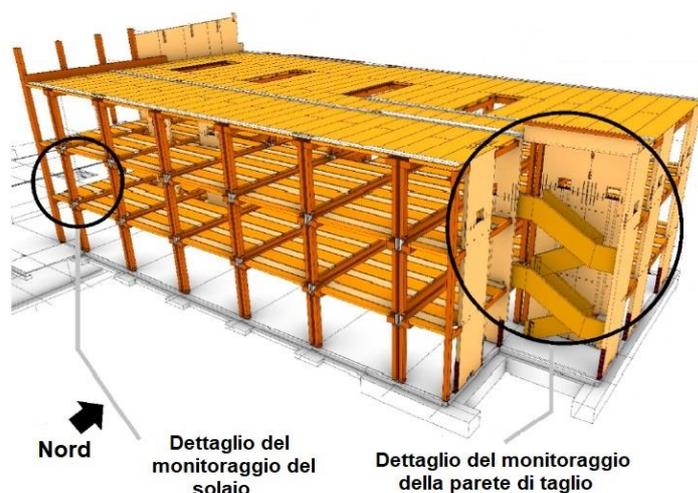


Figura 67. Sistema strutturale della zona 1 con la localizzazione del sistema di monitoraggio (in alto).  
 Dettaglio dei sensori di monitoraggio del solaio e foto dell'installazione (in basso a sinistra).  
 Dettaglio dei sensori di monitoraggio della parete di taglio in alto e in basso (in basso a destra).  
 (fonte: E. Schmidt, M. Riggio, *Monitoring moisture performance of cross-laminated timber building elements during construction*, Buildings, 2019, 9, 144; DOI:10.3390/buildings9060144)

### **3.6.4 I RISULTATI**

I dati grezzi raccolti e immagazzinati in un server, puliti e convertiti in unità ingegneristiche, per esempio la resistenza elettrica, è stata convertita in contenuto di umidità e le temperature del legno interno sono state corrette in base alla specie lignea, abete Douglas. In questo modo i valori sono stati analizzati secondo correlazioni ed algoritmi.

Il risultato dei primi 6 mesi di monitoraggio della parete di taglio e del solaio della zona 1, mostrati nella figura precedente, sono descritti da Schmidt e Riggio<sup>16</sup>. In questo periodo solo 19 posizioni su 250 finali erano montate ed attive.

#### **3.6.4.1 IL CONTENUTO DI UMIDITÀ NELLA PARETE DI TAGLIO**

Nella parete sono stati rilevati dei contenuti di umidità alti con picchi fino al 21% per la mancanza di una protezione alle intemperie. Il lato esposto a nord è stato progressivamente riparato dall'installazione dei solai interni, mentre quello a sud no. L'esposizione alle piogge e alla luce solare, che ha causato in alcuni casi la saturazione delle fibre del legno, che si è protratta fino al posizionamento dei cappucci impermeabili. Questa protezione ha favorito l'essiccazione dei pannelli, portando l'MC a valori tra il 10 e il 14% in un lasso di tempo medio di circa 3 settimane, ma allo stesso tempo ha causato fenomeni di condensa ed intrappolamento dell'umidità nella parte superiore dei pannelli.

Alcuni dei sensori hanno registrato misurazioni errate o ampie fluttuazioni che hanno fatto pensare ad un cortocircuito, facendo escludere i dati raccolti dalle analisi effettuate.

#### **3.6.4.2 IL CONTENUTO DI UMIDITÀ NEL SOLAIO**

I sensori posizionati nella faccia inferiore del solaio hanno misurato un comportamento stabile del contenuto di umidità fino ad un evento eccezionale di pioggia, tra il terzo e il quarto mese di monitoraggio, che ha causato la saturazione delle fibre e fenomeni di ristagno d'acqua, ciò ha indotto un cortocircuito di alcuni sensori.

Nei pannelli di CLT utilizzati lo strato più basso ha sempre avuto un MC  $\geq 16\%$ , mentre gli altri strati, che hanno comunque raggiunto tali valori, sono tornati a un livello di contenuto di umidità accettabile in un periodo di tempo breve.

#### **NOTE:**

<sup>16</sup>: E. Schmidt, M. Riggio, *Monitoring moisture performance of cross-laminated timber building elements during construction*, Buildings, 2019, 9, 144; DOI: 10.3390/buildings9060144

## 3.7 ADOHI HALL

### Università dell'Arkansas

Luogo: Fayetteville, Arkansas, USA.

Progettista: Leers Weinzapfel Associates<sup>17</sup>; Modus Studio<sup>18</sup>; Mackey Mitchell Architects<sup>19</sup>; OLIN<sup>20</sup>

Anno: 2019

Tipologia: residenza universitaria

Numero piani: 5

Tecnologia: CLT



Figura 68. Vista del complesso dell'Adohi Hall.

(fonte: <https://www.lwa-architects.com/project/university-arkansas-stadium-drive-residence-halls/>)

#### NOTE:

<sup>17</sup>: Nato a Boston, lo studio Leers Weinzapfel Associates, opera da quasi 30 anni per realizzare architetture audaci e raffinate. Realizzano in tutto il mondo progetti che uniscono architettura, paesaggio, progettazione urbana e infrastrutture. LWA cerca di fornire spazi significativi per l'interazione umana ed il benessere sociale.

<sup>18</sup>: Modus Studio lavora principalmente nella zona nord-ovest dell'Arkansas e crea architetture per un futuro sostenibile che spaziano da edifici industriali, a quelli residenziali, a edifici scolastici, fino a bar e ristoranti.

<sup>19</sup>: Lo studio di architettura Mackey Mitchell di St. Louis si fonda su alcuni valori fondamentali quali collaborazione, flessibilità, creatività e innovazione. Lavorano su diverse aree di competenza quali: alloggi per studenti, edifici culturali, spazi di apprendimento e ambienti per il lavoro.

<sup>20</sup>: OLIN è uno studio di design urbano e paesaggistico con sede a Philadelphia, che opera in tutto il mondo. I progetti sono caratterizzati da spazi multifunzionali, rispettosi dell'ambiente e dell'aspetto storico del sito. Utilizzano l'artigianato e le possibili soluzioni di design per cercare di creare ambienti ecologici con un potenziale aggregativo.

### 3.7.1 L'EDIFICIO

Il complesso dell'Adohi Hall è composto da due edifici di cinque piani interconnessi tra loro da un terzo edificio di un piano fuori terra, in cui è situata un'area comune. Al loro interno sono presenti alloggi per studenti e docenti, aule studio, cucine, lavanderie e spazi adibiti a laboratorio per il tempo libero.

Gli studi di design che si sono occupati del progetto sono molto attenti a creare una sinergia tra il luogo e la struttura. Il nome "Adohi" ("a-doe-hee") proviene dalla lingua Cherokee e significa bosco, questo per onorare il passaggio dei nativi americani nella zona, l'importanza della silvicoltura sostenibile per la regione e del materiale ligneo nel complesso di edifici. Inoltre, la progettazione paesaggistica ideata dallo studio OLIN ha cercato di sfruttare a pieno i boschi preesistenti di querce e le forme sinuose del terreno, utilizzando una fitta rete di percorsi per creare una varietà di spazi comuni dove gli studenti si possano incontrare, ricreando il paesaggio tipico dell'altopiano di Ozark. Alla conclusione dei lavori, l'Adohi Hall è risultata la struttura costruita in CLT più grande d'America. Il complesso sorge in una zona climatica subtropicale umida che tende ad avere un clima caldo con precipitazioni elevate.

Per questo motivo è stato installato un sistema di monitoraggio che si è posto l'obiettivo di comprendere meglio la sensibilità del materiale in questo clima e capire se ci sono punti della struttura più sensibili, come bagni, lavanderie, corridoi e zone vicine all'involucro esterno. Oltre a questo, gli edifici precedentemente monitorati sono situati nella zona nord-ovest del Pacifico, climaticamente differente da quella dell'Arkansas, con estati secche.



Figura 69. Concept di progetto dello studio Leers Weinzapfel Associates.

(fonte: <https://www.theplan.it/award-2020-housing/adohi-hall-a-live-learn-community-for-700-students-leers-weinzapfel-associates>)

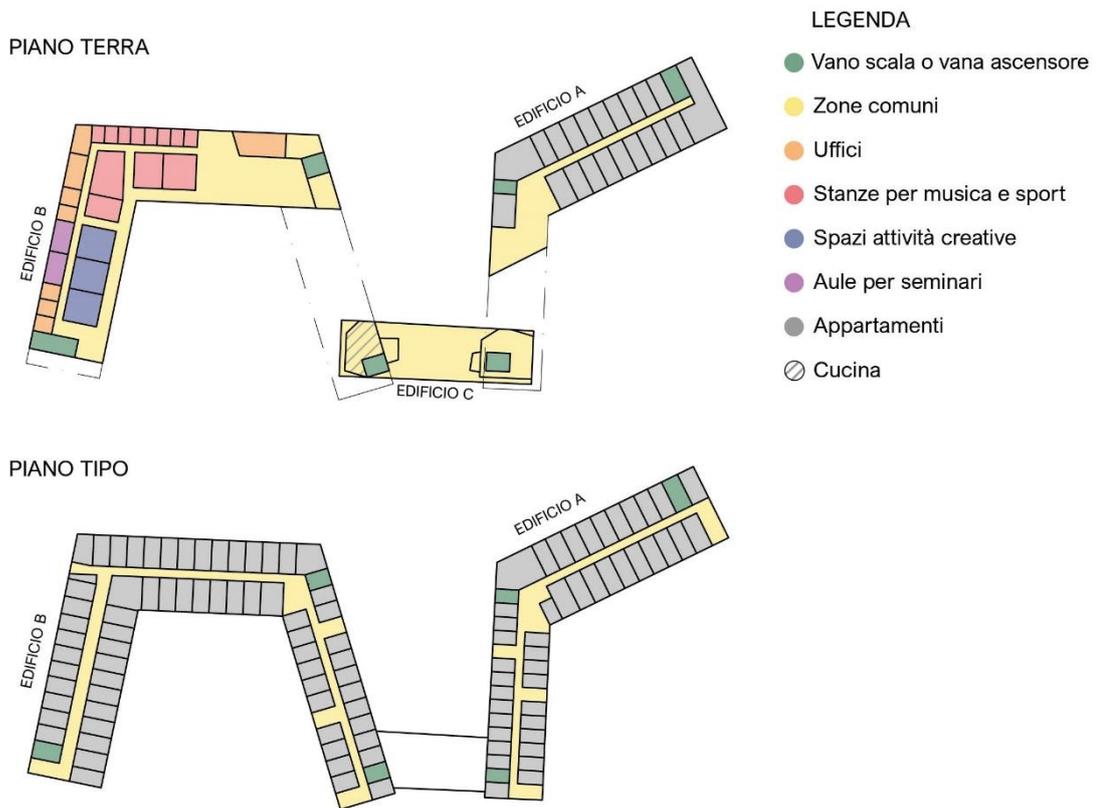


Figura 70. Schema della suddivisione degli ambienti in base al loro utilizzo del piano terra e del piano tipo.



Figura 71. Vista del complesso dell'Adohi Hall di notte.  
 (fonte: <https://www.lwa-architects.com/project/university-arkansas-stadium-drive-residence-halls/>)



Figura 72. Render del piano terra con il contesto.  
 (fonte: <https://www.theolinstudio.com/university-of-arkansas-adohi-hall>)



Figura 73. Vista del complesso dell'Adohi Hall dal parco. (fonte: <https://www.lwa-architects.com/project/university-arkansas-stadium-drive-residence-halls/>)



Figura 74. Vista della zona comune al piano terra. (fonte: <https://www.lwa-architects.com/project/university-arkansas-stadium-drive-residence-halls/>)



Figura 75. Vista dell'interno della sala studio al piano terra. (fonte: <https://www.lwa-architects.com/project/university-arkansas-stadium-drive-residence-halls/>)

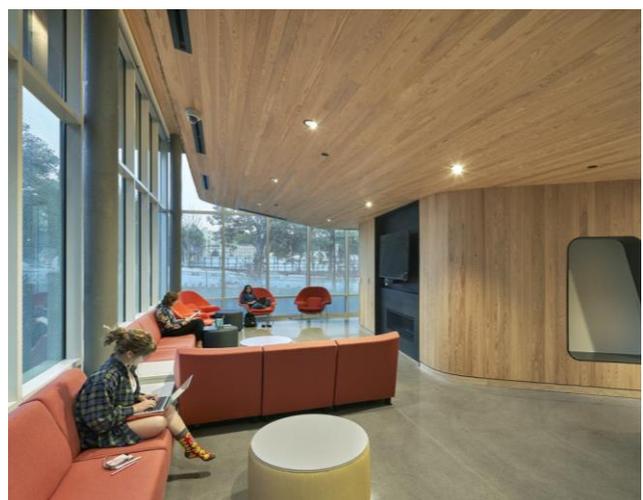


Figura 76. Vista della zona comune al piano terra. (fonte: <https://www.lwa-architects.com/project/university-arkansas-stadium-drive-residence-halls/>)

### 3.7.2 LA STRUTTURA

Gli edifici hanno una struttura composta da travi, colonne e pannelli in CLT in abete rosso provenienti dall'Europa, mentre i vani scala e i vani ascensore sono in cemento armato.

Il produttore ha consegnato i componenti con un'umidità del 10% ( $\pm 2\%$ ), ricoperti con teli protettivi che sono stati rimossi prima dell'assemblaggio.

I pannelli, composti da 5 strati, sono stati lasciati a vista nella parte inferiore nelle zone comuni e negli appartamenti, mentre nei bagni, lavanderie e corridoi sono stati rivestiti in cartongesso. Nella parte superiore sono stati coperti da un tappetino fonoisolante, per attutire il rumore da calpestio, e da una pavimentazione a base di gesso.

Nella copertura è stata data molta importanza all'isolamento, infatti è stata inserita una barriera al vapore, una membrana e un pannello di copertura in poliolefina termoplastica, che garantisce il controllo igrotermico e la rimozione dell'acqua liquida.

Mentre il piano terra è completamente vetrato, i piani superiori sono caratterizzati da una rigorosa geometria creata dalle chiusure trasparenti e da quelle opache. Le finiture esterne sono state realizzate con pannelli in metallo color zinco e in rame, per riprendere le tonalità rossastre del cipresso tipico della zona, ancorate ai pannelli dei solai con staffe di supporto. L'isolamento è garantito da uno strato in lana di roccia e uno in ovatta più interno, separati da una barriera al vapore e una lastra di gesso.



Figura 77. Vista del telaio ligneo e delle solette delle coperture.  
(fonte: <https://www.theolinstudio.com/university-of-arkansas-adohi-hall>)



Figura 78. Vista della struttura portante dell'edificio, composta da pannelli, travi e colonne in CLT e vani ascensori e vani scala in cemento. (fonte: <https://www.theolinstudio.com/university-of-arkansas-adohi-hall>)



Figura 79. Vista del telaio e durante la fase di costruzione. (fonte: <https://www.theolinstudio.com/university-of-arkansas-adohi-hall>)



Figura 80. Fotografia della carpenteria metallica. (fonte: <https://www.theplan.it/eng/award-2021-housing/adohi-hall-university-of-arkansas-a-pioneering-use-of-clt-and-an-innovative-approach-to-live-learn-communities-leers-weinzapfel-associates>)

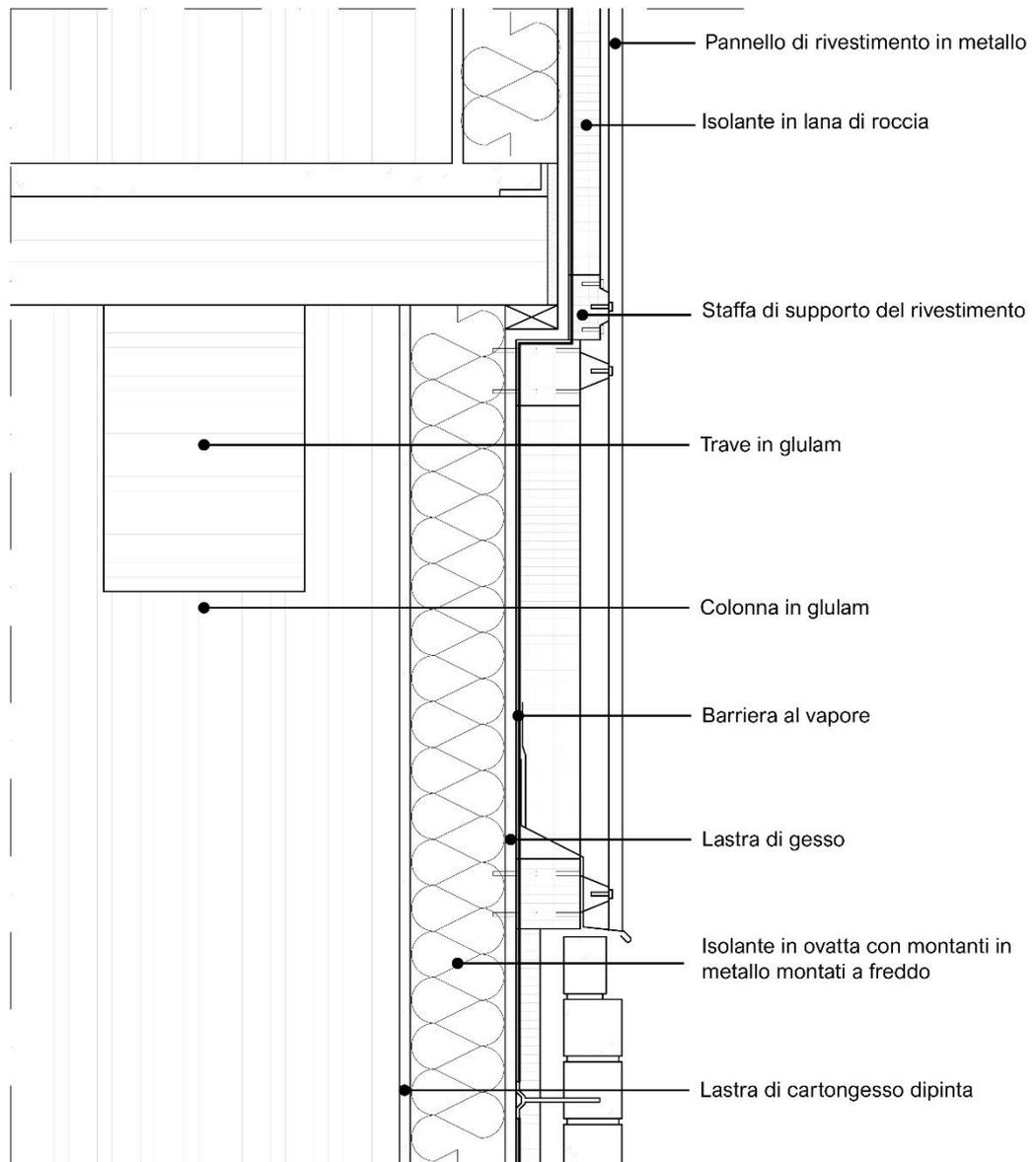


Figura 81. Stratigrafia del nodo parete-solaio.  
Scala 1:10.

### 3.7.3 IL MONITORAGGIO

Per monitorare l'umidità sono stati installati gruppi di 3 sensori, per monitorare il primo, il terzo e il quinto strato dei pannelli, in 45 posizioni in tutti gli edifici, in modo da garantire una copertura completa della struttura. Sono stati monitorati i bagni, le lavanderie, i soffitti accanto alle finestre e agli impianti, i corridoi interni e le zone più vicine all'involucro edilizio. Le posizioni dei sensori variano da piano a piano, solo un appartamento è stato monitorato in tutti i piani.

Il terzo piano è stato considerato quello maggiormente isolato, mentre il primo e la copertura quelli più sensibili per la maggiore presenza di impianti idrici, una configurazione diversa del perimetro e l'esposizione alle intemperie.

I sensori sono stati prodotti dalla Omnisense e misurano i valori igrometrici ogni 30 minuti. I dati sono stati raccolti ed elaborati dalla casa produttrice il primo anno, mentre negli anni successivi sono stati analizzati da dei ricercatori dell'Università dell'Arkansas.

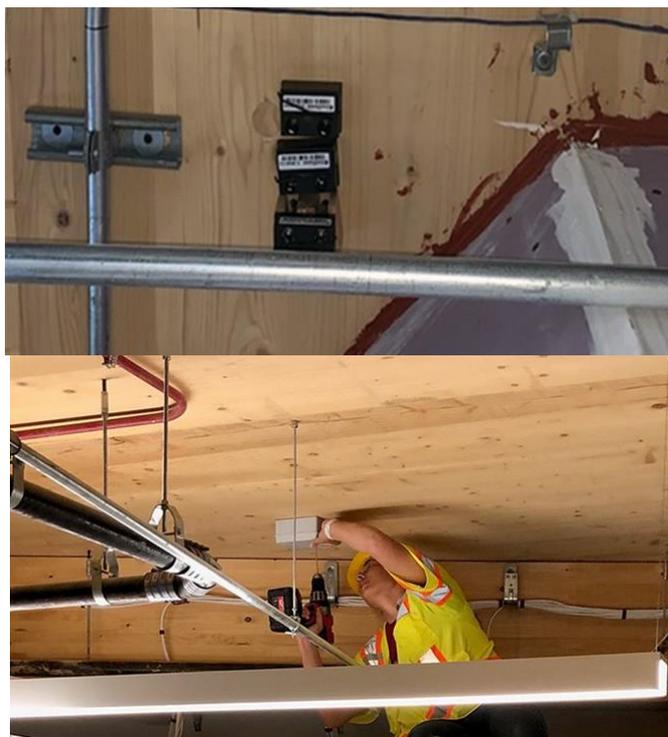


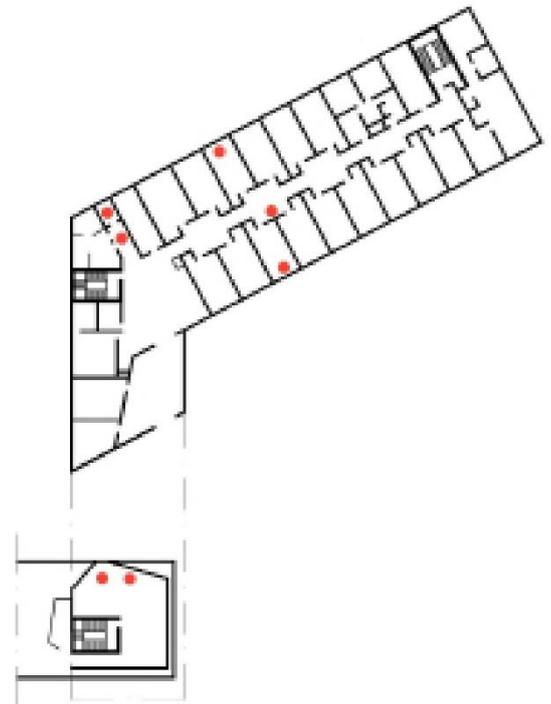
Figura 82. Fotografia dei sensori prodotti dalla Omnisense e del loro posizionamento sul soffitto.

(fonte: <https://www.theplan.it/eng/award-2021-housing/adohi-hall-university-of-arkansas-a-pioneering-use-of-clt-and-an-innovative-approach-to-live-learn-communities-leers-weinzapfel-associates>)

EDIFICIO A  
PIANO TERRA

LEGENDA:

● POSIZIONE DEI SENSORI



PIANO TIPO

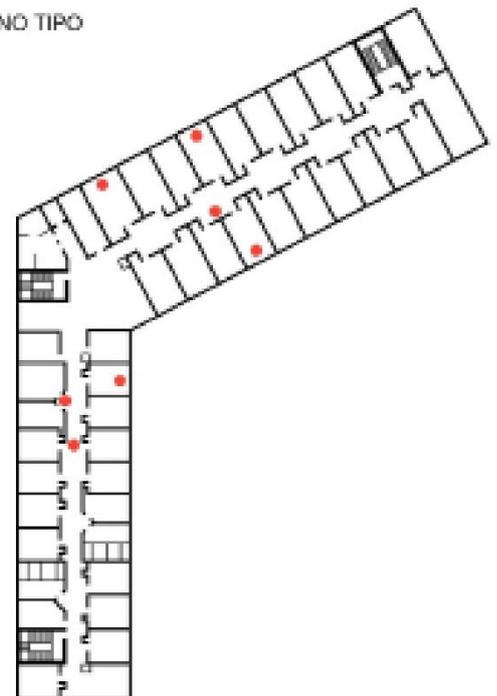


Figura 83. Pianta dell'edificio A con la posizione dei sensori.  
Fuori scala.

### 3.7.4 I RISULTATI

Il solaio delle coperture ha avuto un contenuto di umidità elevato a causa dell'esposizione alle intemperie durante la costruzione e al posizionamento dell'impermeabilizzante prima della completa asciugatura dei pannelli. Per questo motivo l'essiccazione dei componenti è stata lenta e ci è voluto circa un anno prima di riportare l'MC<16%, rendendolo accettabile.

Il primo e il terzo piano hanno mantenuto un contenuto di umidità costante nel primo anno di raccolta dei dati, rimanendo nelle condizioni di servizio a secco, e avvicinandosi a un MC del 5% circa.

Lo strato che è risultato maggiormente umido è stato il quinto (quello superiore) a causa di una possibile esposizione alla pioggia prima della costruzione.

Secondo Poblete (2020)<sup>21</sup> l'installazione di barriere al vapore sui solai ha da parte impedito l'entrata dell'umidità, ma dall'altra ha reso difficile la fuoriuscita dell'umidità accumulata precedentemente. Durante il primo anno di servizio è stata riscontrata un'essiccazione lenta ma costante nel tempo e non ci sono state prove dell'aumento dell'umidità all'interno dell'edificio.

**NOTE:**

<sup>21</sup>: E. Poblete (2020), *Moisture monitoring of a CLT structure in a Southern Climate*, tesi di magistrale in Science in Civil Engineering, da (<https://scholarworks.uark.edu/etd/3873>)

## 3.8 FINNISH RUSSIAN SCHOOL

Luogo: Helsinki, Finlandia  
Progettista: Arkkitechdit Frondelius +  
Keppo + Salmenpera<sup>22</sup>  
Anno: 2020-2021  
Tipologia: edificio scolastico  
Numero piani: 3  
Tecnologia: CLT (by Stora Enso<sup>23</sup>)



Figura 84. Render a volo di uccello del progetto.  
(fonte: <https://ala.fi/work/finnish-russian-school/>)

### 3.8.1 L'EDIFICIO

Il complesso è stato costruito al posto di uno preesistente ed è composto da un nuovo edificio scolastico e da un palazzetto dello sport. La posizione dei due fabbricati creerà uno spazio verde protetto dal rumore e dall'inquinamento provenienti dalla autostrada vicina. Qui saranno presenti orti, spazi per lo sport e una zona adibita a bosco. Le aule della scuola sono costruite attorno ad un cortile interno coperto a tutta altezza. Al piano terra saranno presenti le classi per gli alunni più piccoli, mentre ai piani superiori per quelli più grandi.

Il materiale da costruzione sarà fornito da Stora Enso, che doterà in oltre la struttura di uno strumento digitale per facilitare la progettazione: CLT360+<sup>2</sup>.

Nella struttura è stato installato un sistema di monitoraggio dell'umidità Wiiste, che utilizza sensori che misurano il contenuto di umidità tramite resistenza elettrica.

#### NOTE:

<sup>22</sup>: Lo studio AFKS è attivo da circa vent'anni in Finlandia dove hanno sviluppato diverse scuole e edifici culturali. Il loro lavoro si basa sull'idea di sostenibilità e originalità, cercando di progettare organicamente l'edificio e l'ambiente in cui è inserito.

<sup>23</sup>: CLT360+ è una app mobile che facilita l'installazione dei componenti prodotti dalla azienda Stora Enso. Il software fornisce una panoramica del progetto tramite un modello 3D ed aiuta ad individuare i singoli elementi e vedere gli avanzamenti del cantiere.



Figura 85. Render della vista dell'interno cortile.  
(fonte: <https://ala.fi/work/finnish-russian-school/>)



Figura 86. Prospetto nord-est della struttura.  
(fonte: <https://ala.fi/work/finnish-russian-school/>)



Figura 87. Prospetto nord-ovest della struttura.  
(fonte: <https://ala.fi/work/finnish-russian-school/>)



Figura 88. Prospetto sud-est della struttura.  
(fonte: <https://ala.fi/work/finnish-russian-school/>)



Figura 89. Prospetto sud-ovest della struttura.  
(fonte: <https://ala.fi/work/finnish-russian-school/>)



Figura 90. Fotografie degli interni della scuola.  
(fonte: <https://afks.fi/projects/finnish-russian-school-2/#>)

## 3.9 CROSS LIGHT HOUSE

Luogo: Mulazzano, Italia.  
Progettista: Gardenia<sup>24</sup>, Next Wood<sup>25</sup>  
Anno: 2020-2021  
Tipologia: edificio residenziale  
Numero piani: 4  
Tecnologia: CLT (Artuso Legnami<sup>26</sup>)



Figura 91. Render di progetto dal lato sud-est del lotto.  
(fonte: <https://www.gardeniasrl.com/cantieri/>)

### NOTE:

<sup>24</sup>: Il gruppo immobiliare ha un'esperienza trentennale nella costruzione di soluzioni abitative e negli ultimi anni si è concentrato molto sull'aspetto ecosostenibile degli edifici per ridurre gli impatti ambientali. Lavora in collaborazione con dei consulenti Casa Clima in modo da certificare l'efficienza dell'involucro e la sostenibilità della costruzione.

<sup>25</sup>: La società italiana Next Wood è stata una tra le prime in Italia che si è occupata della gestione dei processi progettuali e costruttivi per le strutture in legno. Collegano la realizzazione dei progetti alla produzione del materiale per massimizzare le risorse e il controllo dei costi, affiancando imprese, clienti privati e investitori. Si occupano principalmente della parte energetica ed acustica e dell'integrazione degli impianti nelle strutture tramite l'intervento di imprese specialistiche.

<sup>26</sup>: La ditta è stata fondata nel 1989 come falegnameria produttrice di serramenti e mobili, solo nel 2010 ha iniziato a produrre sistemi costruttivi per la realizzazione di strutture in legno certificate CE dall'ente austriaco Holzcert. Principalmente fornisce segati e XLAM in abete proveniente da Austria e Germania con macchine a controllo numerico.

### 3.9.1 L'EDIFICIO

L'edificio nasce a Mulazzano, in provincia di Lodi, a pochi metri da un nuovo quartiere interamente costruito in legno ideato dalla stessa Gardenia ed è situato vicino ad un grosso parco di proprietà comunale. La struttura ospita al suo interno 16 appartamenti distribuiti su 4 piani e serviti da due vani scala. L'edificio è stato pensato e progettato per rispettare i canoni della certificazione CasaClima Nature Gold<sup>27</sup> e per questo l'intero involucro è realizzato da materiali naturali in modo da essere il più possibile ecologico e non essere nocivo per gli abitanti.

Per garantire tale qualità durante tutta la vita utile dell'edificio e verificare che l'umidità sia a livelli accettabili in tutta la struttura (tra il 10 e il 18%) è stata installata una rete di sensori per misurare il contenuto di umidità del legno e la temperatura. Grazie alla collaborazione con Wood Control (vedi par. 2.5.2) infatti tutti gli appartamenti sono stati dotati di un sistema MyMeter e in seguito verranno analizzati gli appartamenti che sono posizionati sulla scala A (appartamenti dal 2 al 9) e le relative misurazioni.

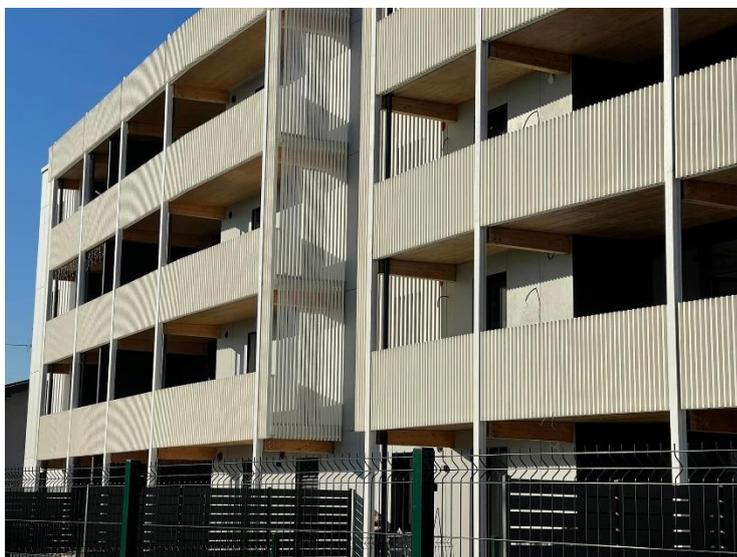


Figura 92. Foto della facciata sud-est dell'edificio.  
(fonte: <https://www.facebook.com/gardeniasrl/photos/a.318416678550296/1654444268280857>)



Figura 93. Render dell'edificio dal lato nord-est.  
(fonte: <https://www.facebook.com/gardeniasrl/photos/a.318416678550296/1654444268280857>)

#### NOTE:

<sup>27</sup>: L'Agenzia CasaClima è un ente pubblico ed indipendente che emette certificati energetici validi per 10 anni, attestando la sostenibilità e la qualità di un edificio e tutelando gli interessi di chi costruisce o acquista un'abitazione. Il processo che porta a tale certificazione parte già dalla fase di progettazione, infatti, i progettisti devono pensare ad un edificio che rispetti i canoni della certificazione. La documentazione tecnica viene presentata all'ente e dopo di che vengono effettuati dei sopralluoghi in cantiere per verificare l'esecuzione dei lavori in conformità al progetto presentato. A chiusura dei lavori viene eseguito il controllo finale da parte dell'Agenzia e se i requisiti di qualità sono soddisfatti viene emesso il certificato CasaClima. Gli edifici con tale certificazione sono: dotati di un involucro compatto e correttamente orientato; coibentati ottimamente e senza ponti termici; con ottima tenuta all'aria; dotati di un sistema di ventilazione meccanica; ottimale dal punto di vista della produzione del fabbisogno energetico rimanente.

L'edificio Cross Light House è certificato CasaClima Nature che garantisce una valutazione dell'ecocompatibilità dei materiali, l'impatto idrico dell'edificio, il comfort acustico e visivo, la qualità dell'aria, l'efficienza dei sistemi installati. Valuta anche l'efficienza energetica complessiva oltre a quella dell'involucro.



Figura 94. Render dell'edificio dal lato sud-ovest con dettaglio dei balconi e di parte dei giardini.  
(fonte: <https://www.gardeniasrl.com/cantieri/>)



Figura 95. Render dell'edificio dal lato est.  
(fonte: <https://www.gardeniasrl.com/cantieri/>)

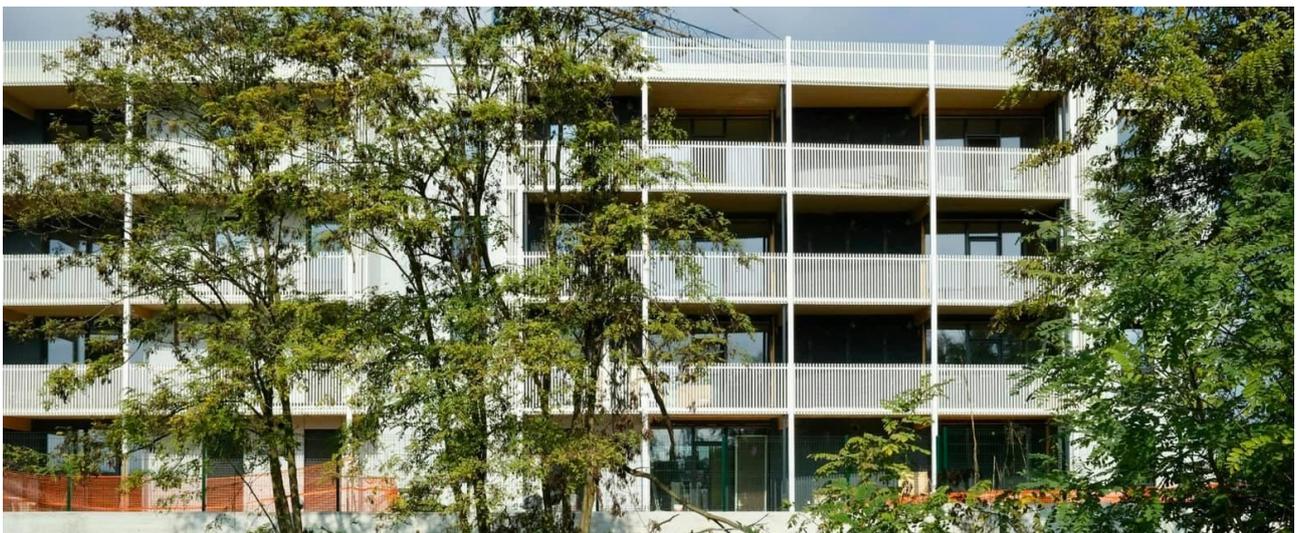


Figura 96. Foto della facciata sud-est dell'edificio.  
(fonte: <https://www.facebook.com/gardeniasrl/photos/a.318416678550296/1616696148722336>)

## TIMELINE

2020

2021

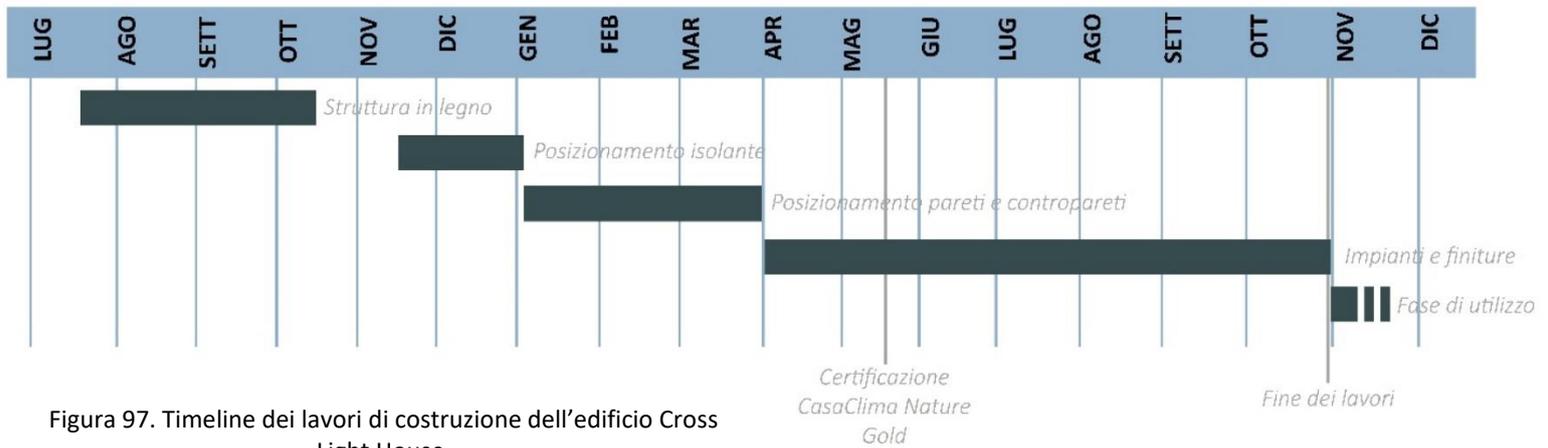


Figura 97. Timeline dei lavori di costruzione dell'edificio Cross Light House.

### 3.9.2 LA STRUTTURA

L'edificio è composto da una parte in cemento armato e una in legno. La prima è il piano interrato in cui sono collocati i garage, che funge da ancoraggio per la seconda; questa è basata su un sistema a pannelli in CLT a 5 strati di abete C24 incollati con colla poliuretanic.

Le pareti hanno spessori diversi in base all'uso che si fa di esse e variano tra i 16 e i 54 cm. Quelle perimetrali sono composte da pannelli coperti esternamente da uno strato di lana di roccia di 20 cm, un telo traspirante e una copertura a cappotto formata da un'intercapedine di 10 cm e pannelli di fibrocemento verniciati color antracite, grigio o bianco oppure da legno termotrattato. Quelle interne possono essere di diverso tipo come si vedrà in seguito.

I solai sono composti da pannelli in CLT spessi 15 cm lasciati a vista nell'intradosso. Mentre l'estradosso è coperto da un sottofondo alleggerito, uno strato di lana di vetro e un massetto alleggerito, il tutto è completato dalla pavimentazione. L'isolamento del pavimento è stato pensato per il massimo comfort acustico e isolare il legno dall'umidità del cemento. A questo scopo è stata utilizzata una lamina sottomassetto e l'isolante per il rumore da calpestio.

Il solaio del tetto, anche questo in CLT di 5 strati, è formato da un freno al vapore, un isolante di fibra di legno di 30 cm, un telo per la tenuta al vento, una camera ventilata e un tavolato in legno. La copertura è una guaina in PVC su cui è stata posizionata della ghiaia.



Figura 98. Foto dell'edificio durante la costruzione. (fonte: <https://www.gardeniasrl.com/category/aggiornamenti-dai-cantieri/>)



Figura 99. Foto dell'interno dell'edificio durante i lavori. (fonte: <https://www.gardeniasrl.com/category/aggiornamenti-dai-cantieri/>)

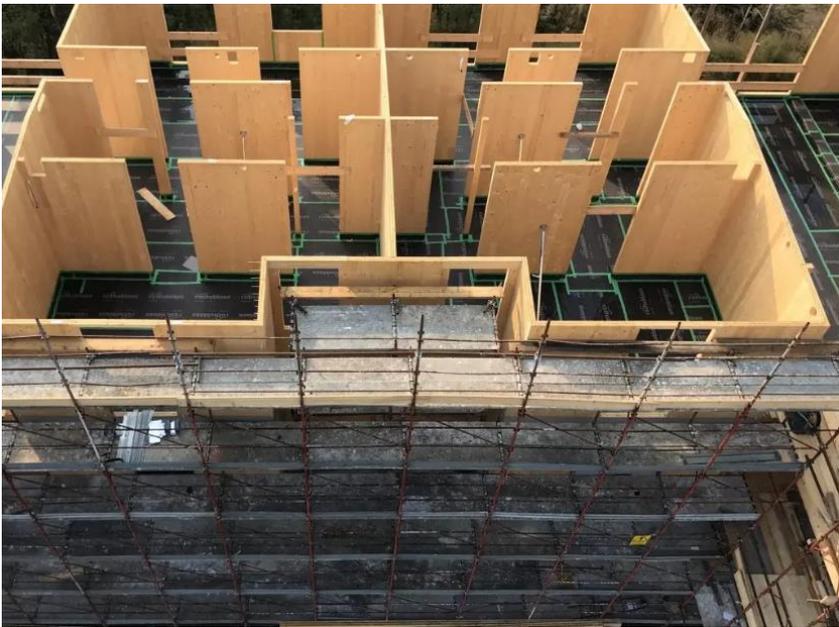


Figura 100. Foto dall'alto dell'edificio durante la posa dell'isolante nella pavimentazione. (fonte: <https://www.gardeniasrl.com/category/aggiornamenti-dai-cantieri/>)



Figura 101. Foto dell'interno dell'edificio durante i lavori. (fonte: <https://www.gardeniasrl.com/category/aggiornamenti-dai-cantieri/>)

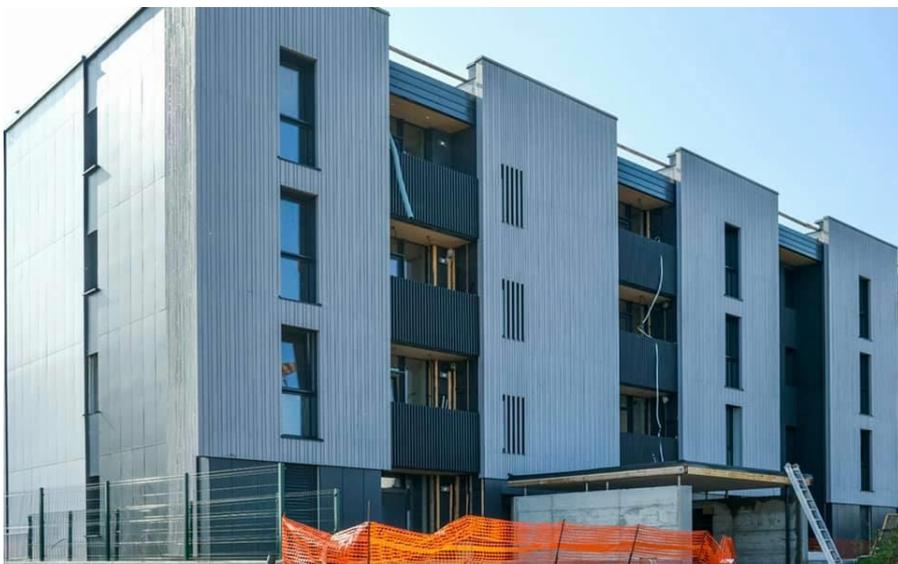
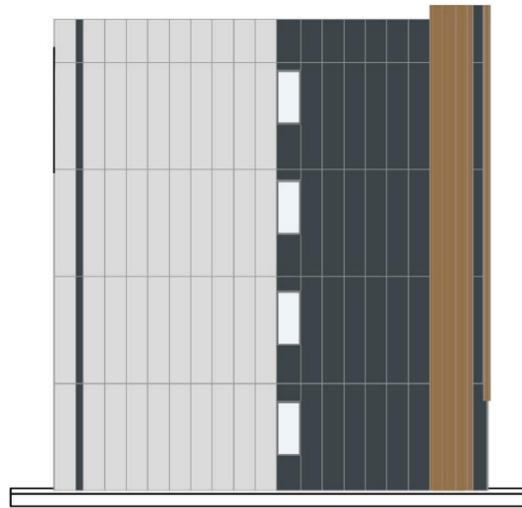


Figura 102. Foto della facciata dell'edificio durante l'ultimazione dei lavori. (fonte: <https://www.gardeniasrl.com/category/aggiornamenti-dai-cantieri/>)

# PROSPETTI

scala 1:200

Prospetto est

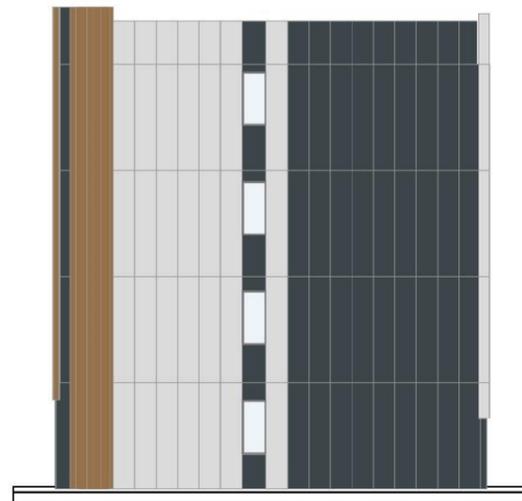


0 5 10 15 m

Prospetto sud



Prospetto ovest

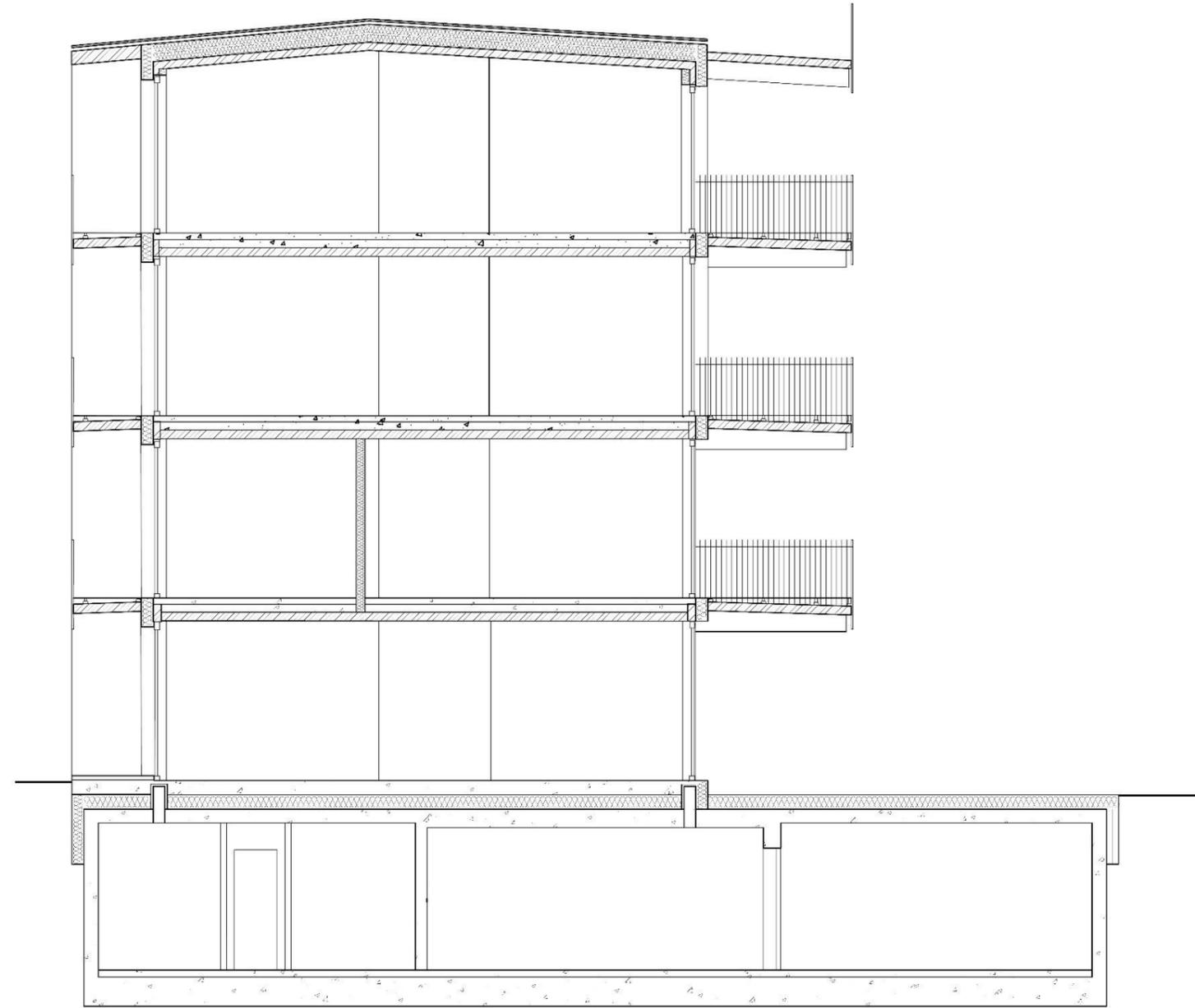
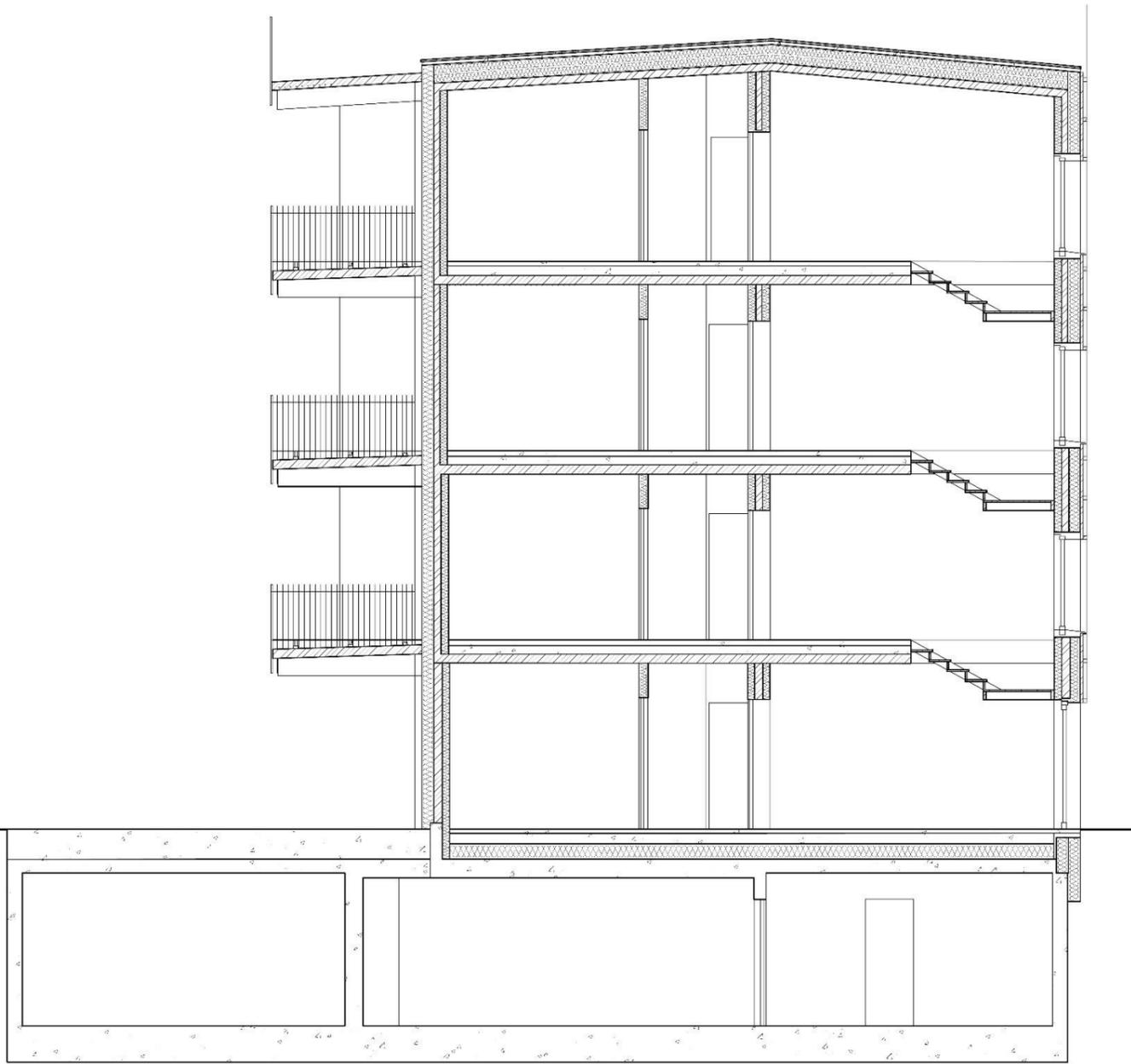


Prospetto nord



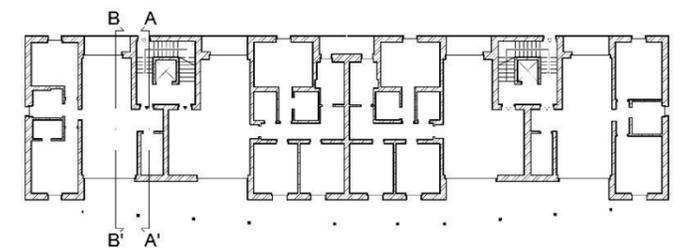
# SEZIONI

scala 1:100



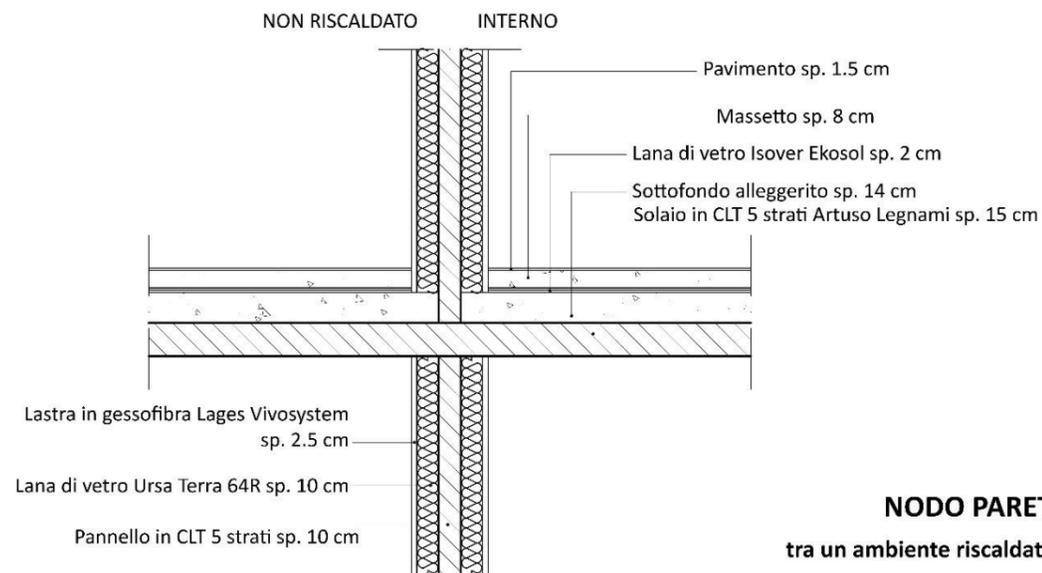
# NAVIGATORE

fuori scala



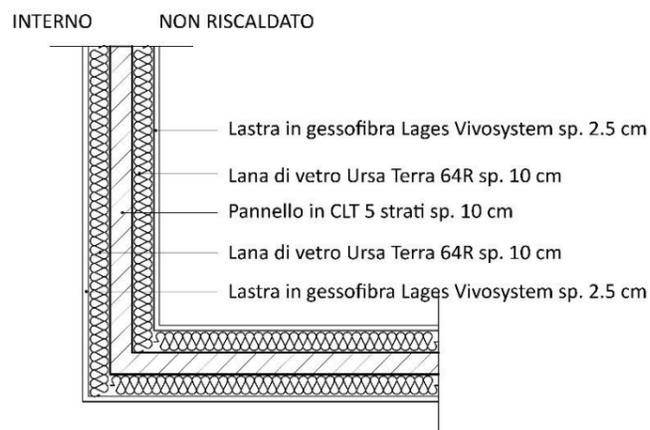
**NODO PARETE-SOLAIO**

tra parete in CLT e solaio in CLT



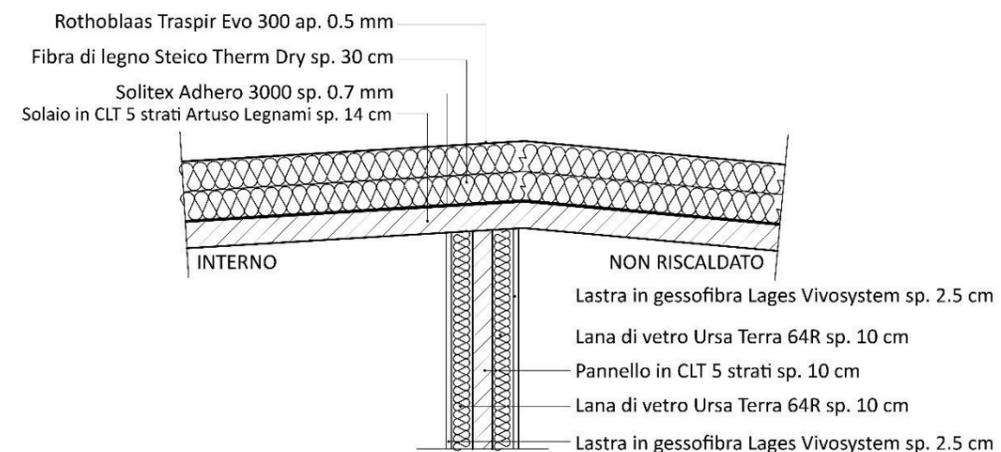
**NODO PARETE-PARETE**

tra un ambiente riscaldato e uno non riscaldato



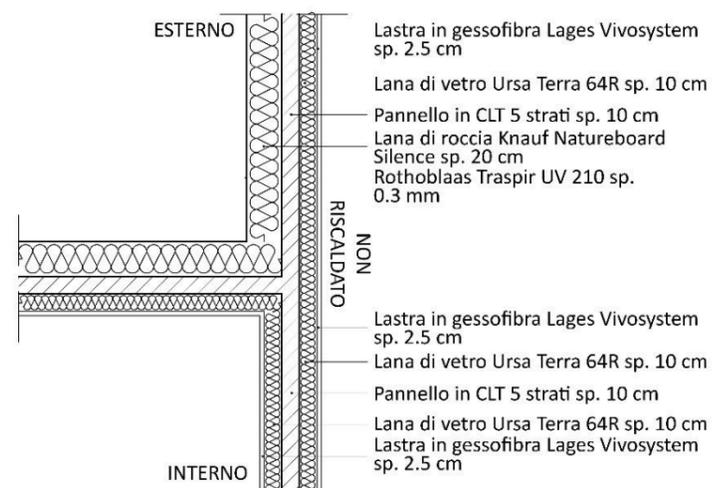
**NODO PARETE-COPERTURA**

tra parete interna in CLT e copertura in CLT



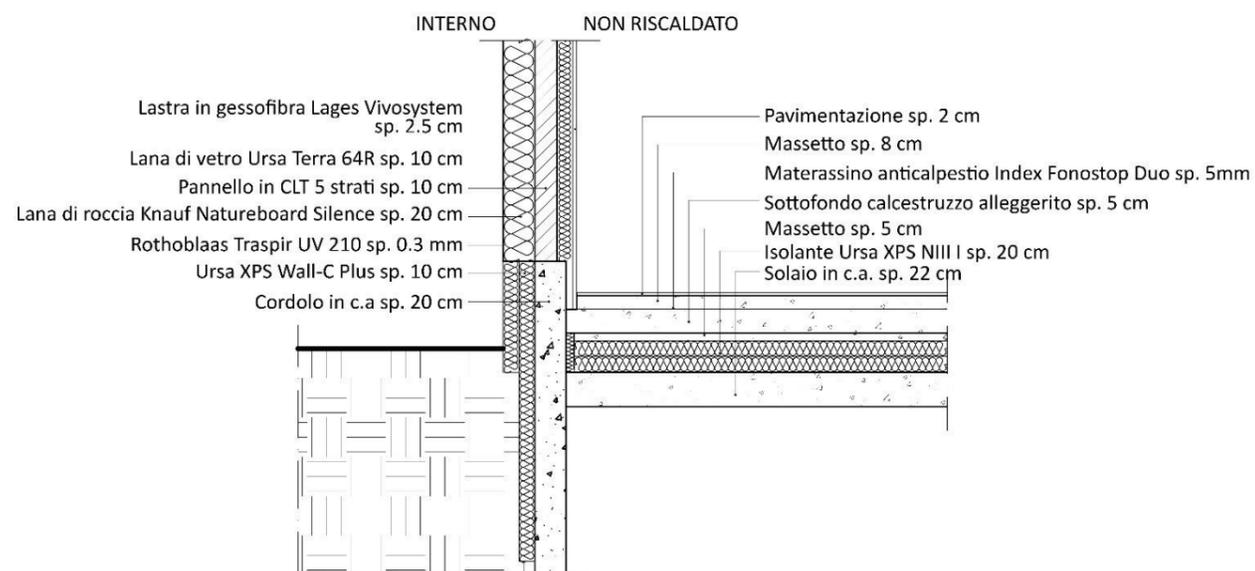
**NODO PARETE-PARETE**

tra ambiente esterno, non riscaldato ed interno



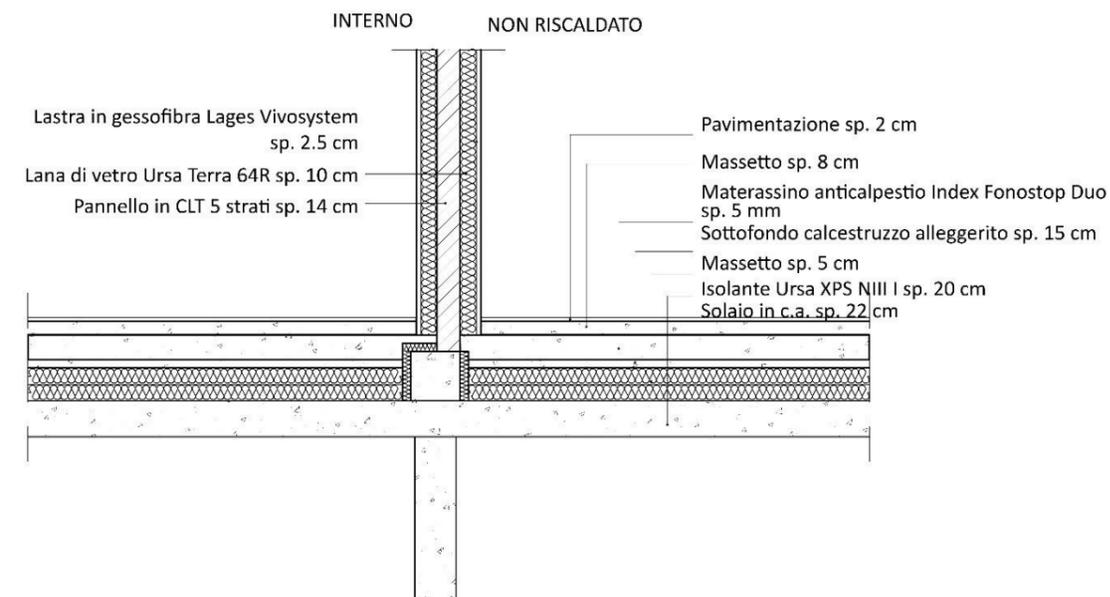
**NODO PARETE-SOLAIO**

tra parete perimetrale in CLT, cordolo di contenimento in c.a. e solaio in c.a.



**NODO PARETE-SOLAIO**

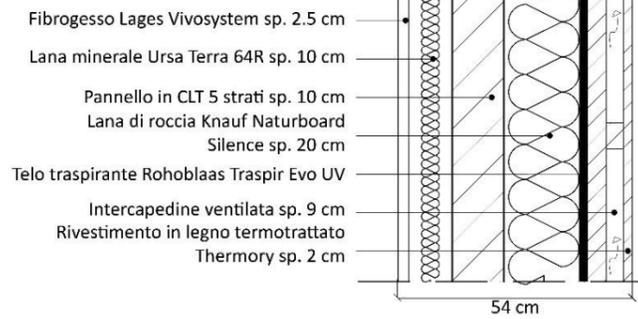
tra parete interna in CLT, e solaio in c.a. e parete in c.a.



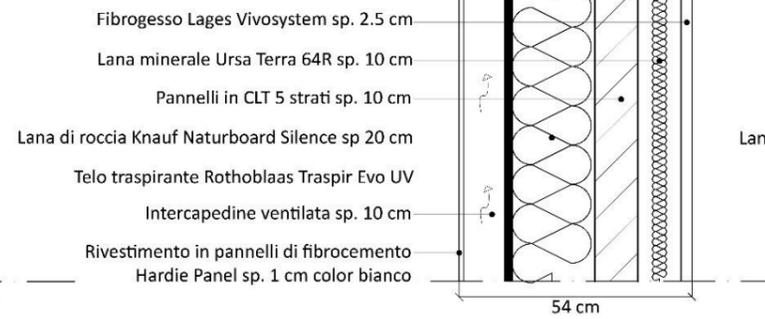
## STRATIGRAFIE DELLE PARETI

scala 1:20

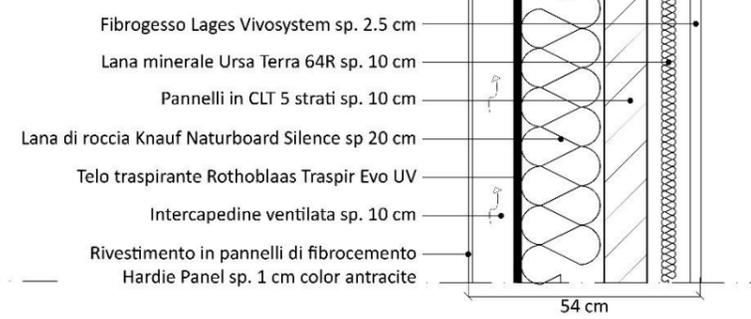
PARETE A



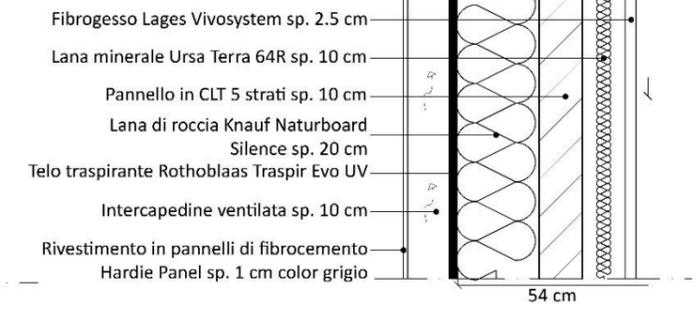
PARETE B



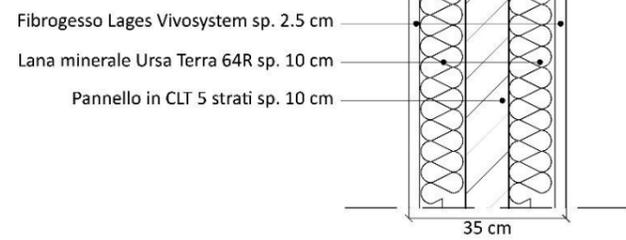
PARETE C



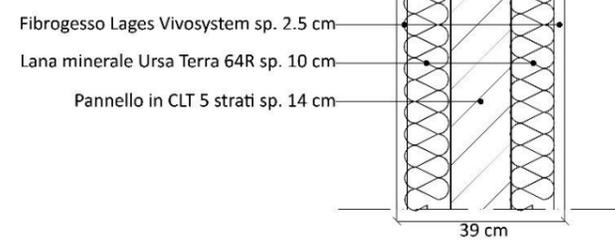
PARETE D



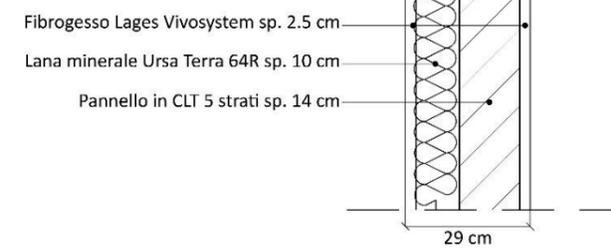
PARETE E



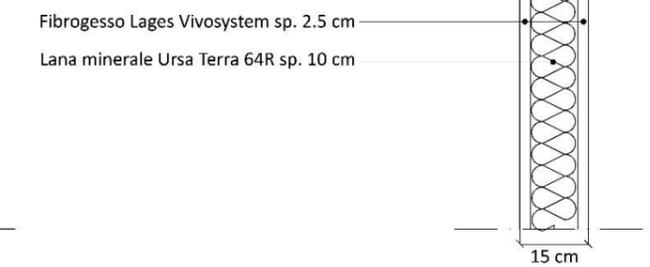
PARETE F



PARETE G



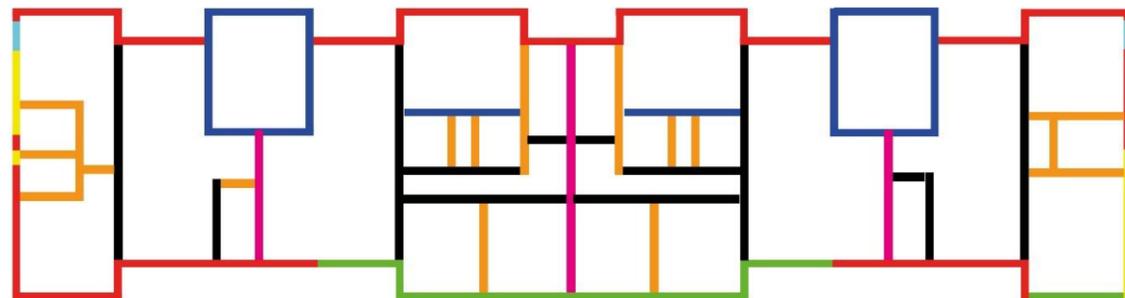
PARETE H



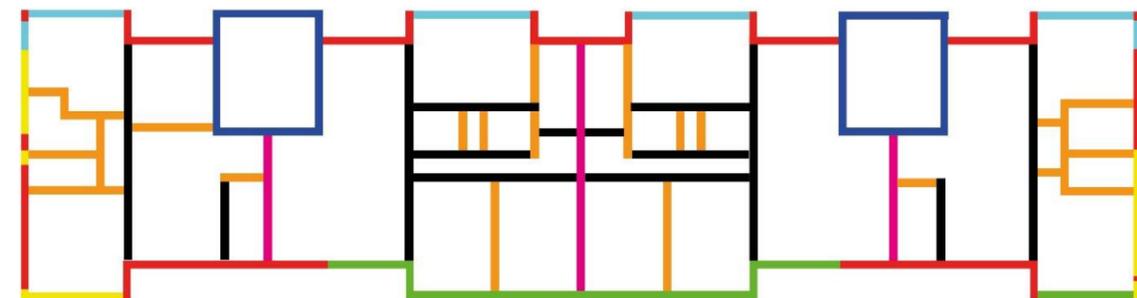
## COLLOCAZIONE DELLE PARETI NEI PIANI DELL'EDIFICIO

fuori scala

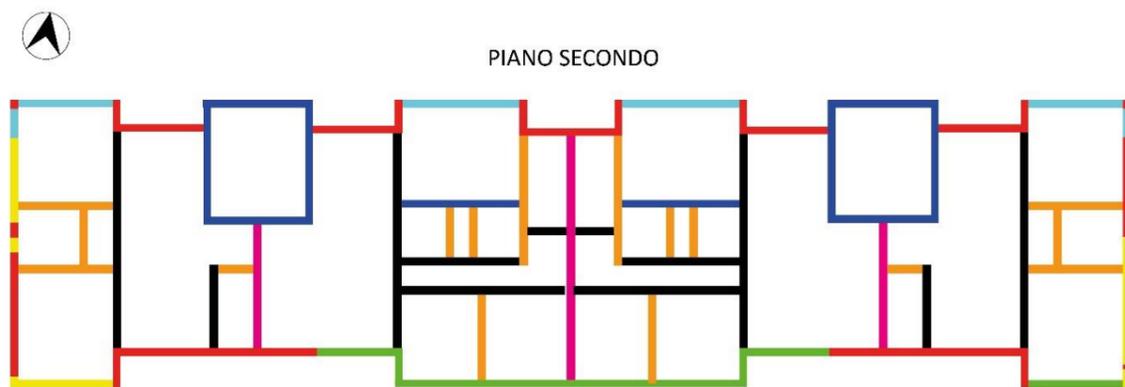
PIANO TERRA



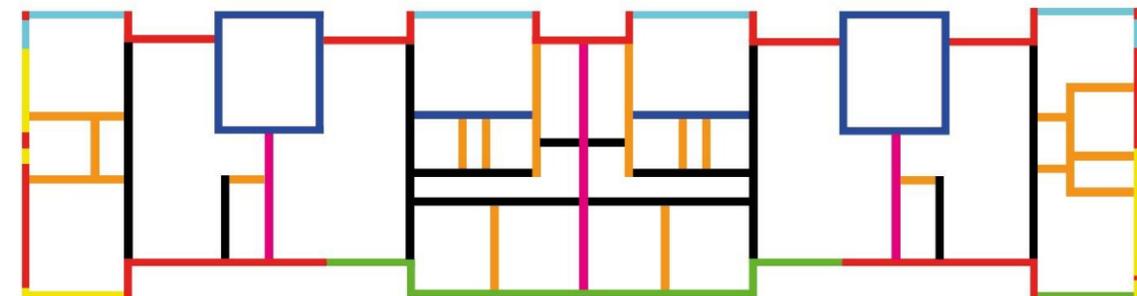
PIANO PRIMO



PIANO SECONDO



PIANO TERZO



Le pareti perimetrali sono principalmente di due tipi: la parte A e la parete B. La seconda si differenzia dalle pareti C e D per i pannelli di rivestimento che chiudono l'intercapedine ventilata, che variano di colore per l'estetica dell'edificio. La parete E è utilizzata maggiormente nei vani scala. Mentre le pareti utilizzate come partizioni interne sono di 3 tipi e sono disposte in base all'ambiente che separano, ad esempio le pareti di tipologia F sono utilizzate per separare gli appartamenti e sono infatti dotate di due strati di isolante per un maggiore comfort acustico.

### 3.9.3 GLI IMPIANTI

Alcuni degli standard necessari per la certificazione CasaClima riguardano gli impianti e la qualità dell'aria interna agli ambienti, per cui è sembrato necessario un approfondimento sugli stistemi installati all'interno dell'edificio.

Gli impianti elettrici ed idraulici sono stati posizionati prima della posa del massetto alleggerito. Durante la posa dei primi sono stati collocati anche i sensori per il monitoraggio della temperatura e dell'umidità.

Inoltre, sono stati disposti pannelli fotovoltaici, pompe di calore per il raffrescamento/riscaldamento e la produzione di acqua sanitaria.

Per ottimizzare l'uso delle risorse energetiche ogni appartamento è dotato di un sistema di controllo e gestione domotico che permette di visualizzare gli storici dei consumi di corrente elettrica, produzione di acqua calda, dei consumi degli elettrodomestici collegati al sistema, della produzione dell'impianto fotovoltaico, ecc.

Nell'edificio sono installati elementi per la ventilazione meccanica controllata (VMC). Questo tipo di impianto elimina l'umidità prodotta dall'utilizzo dell'edificio (vapore proveniente dalla cottura, delle docce, respirazione, ecc.) che può creare condensa e causare la crescita di muffa, funghi, acari e deterioramento strutturale; e filtra l'aria eliminando i possibili gas nocivi per la salute, come il monossido di carbonio, che sono prodotti da alcuni elettrodomestici.

Oltre a ciò, un sistema di ventilazione VMC garantisce il comfort termico recuperando il calore grazie a un sistema di scambio dell'aria in uscita per riscaldare l'aria in entrata. Così facendo si riesce a recuperare fino al 90% del calore, riducendo l'uso del riscaldamento.

Questo tipo di sistema è utilizzato solo in edifici sigillati correttamente e con un'ottima tenuta all'aria e dove è necessario inserire tale impianto per renderlo abitabile.

All'interno di Cross Light House è stato installato una soluzione della Panasonic che utilizza una tecnologia Nanoe X che garantisce un'aria salubre all'interno dell'appartamento tramite radicali ossidrilici. Questi sono delle molecole instabili che hanno la potenzialità naturale di inibire lo sviluppo di diversi inquinanti come batteri, virus, muffe e odori (secondo i test il 99.9% di determinati batteri viene inibito).



Figura 103. Foto dell'interno dell'edificio durante i lavori di posa degli impianti.  
(fonte: <https://www.gardeniasrl.com/category/aggiornamenti-dai-cantieri/>)

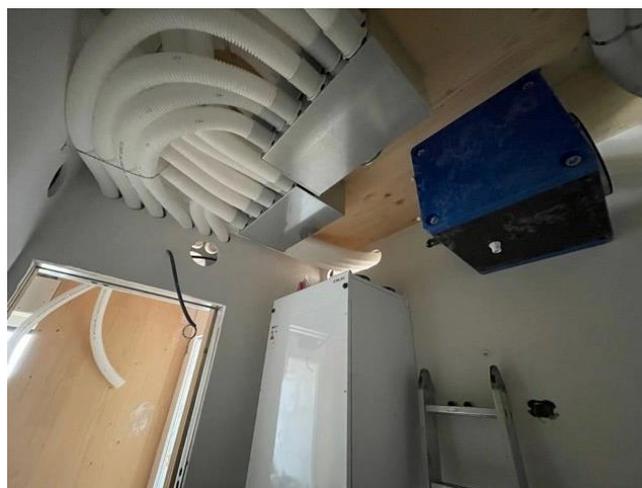


Figura 104. Foto dell'interno dell'edificio durante i lavori di posa degli impianti.  
(fonte: <https://www.gardeniasrl.com/category/aggiornamenti-dai-cantieri/>)

### 3.9.4 IL MONITORAGGIO

Il sistema di monitoraggio MyMeter, ideato da WoodControl (vedi par. 2.5.2), è stato installato in cantiere durante la posa dell'impianto elettrico nei vari piani direttamente dall'elettricista. Il sistema è composto da: una centralina di controllo MyCPU100 che raccoglie i dati provenienti tramite rete wireless da tutta la struttura, questa è collegata alla rete WiFi così da essere gestibile da qualsiasi dispositivo; da 8 ricevitori situati su ogni pianerottolo vicino alle porte di entrata degli appartamenti monitorati che raccolgono i dati dei sensori tramite cavo; dai sensori cablati MySenseBus posizionati negli appartamenti.

I MySenseBus sono composti da una scatola da incasso, simile a quelle utilizzate negli impianti elettrici, chiusa esternamente da una placca removibile in modo da poter intervenire in caso di malfunzionamento. Al suo interno vengono posizionati i sensori, uno per la temperatura e due per il contenuto di umidità. Quest'ultimi sono formati da sonde in acciaio, con due viti inserite all'interno del pannello di CLT che misurano tutte le lamelle, e da cavi, che hanno una lunghezza massima di 3 m che le collegano alle scatole da incasso. Le sonde risultano così orientabili e posizionabili nei punti più sensibili della struttura senza dover installare più sensori.

I sensori di temperatura hanno un range che va dai 0 ai 60°C, mentre quelli di MC dal 10 al 32%. Per quest'ultimo i valori ottimali stabiliti sono tra il 10 e il 18%.

Le posizioni e il numero di sensori sono diversi in ogni piano:

- Nel piano terra (appartamento 2 e 3) sono stati posizionati sulle pareti perimetrali per verificare gli attacchi a terra.
- Nei piani superiori (appartamento dal 4 al 9) sono stati posizionati sotto i piatti doccia dei bagni, incassati nel massetto.

I sensori sono stati attivati il 21 ottobre 2021 e sono stati installati per rimanere attivi durante tutta la vita utile dell'edificio. Subito dopo l'installazione dei sensori, a causa dell'elevato contenuto di umidità nella struttura, è stato acceso l'impianto di ventilazione meccanica che ha riportato l'MC a valori accettabili.



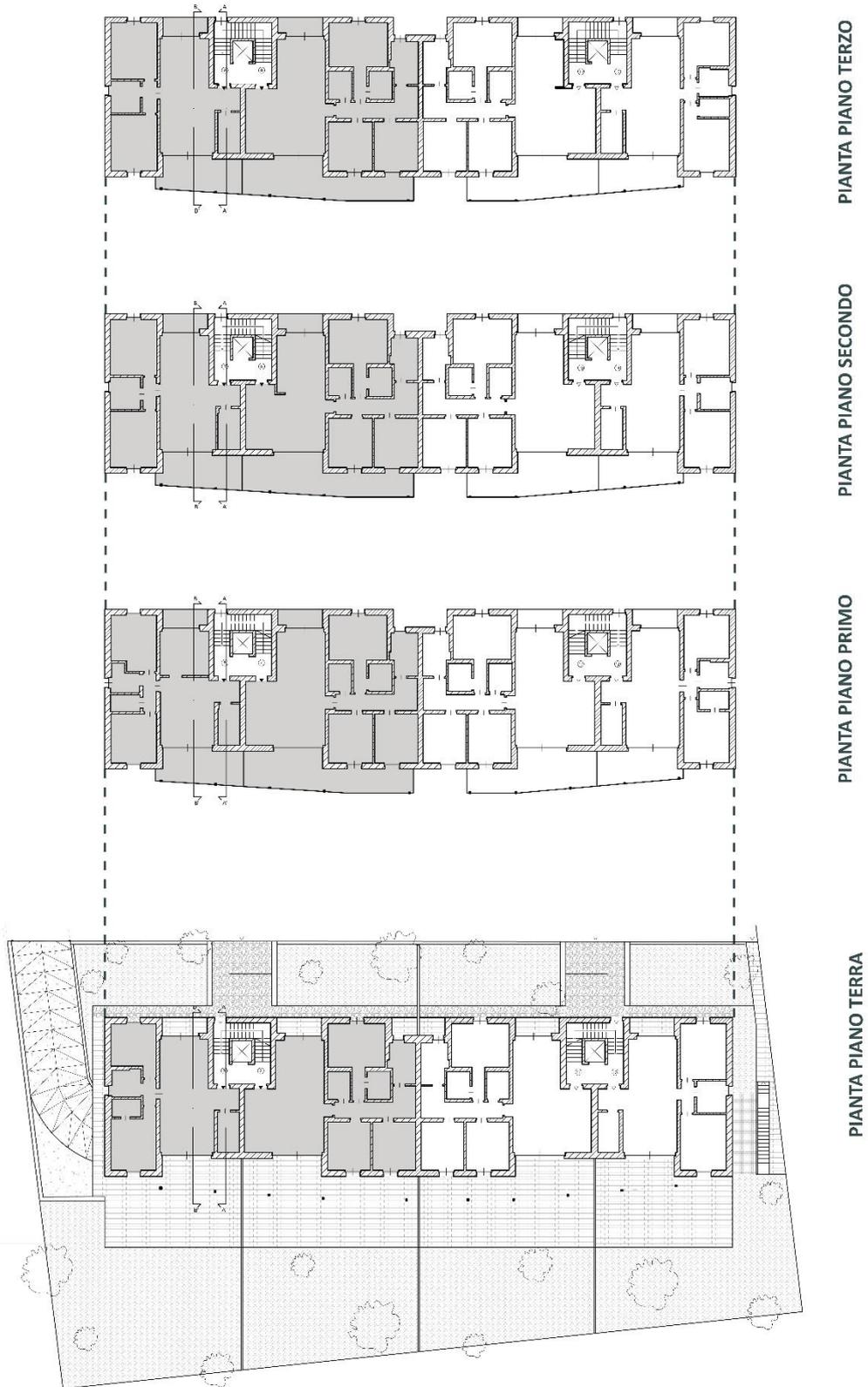
Figura 105. Le immagini riportano il posizionamento di un sensore MySenseBus in una parete in CLT. I sensori vengono posizionati ad un'altezza di 6 cm al centro della tavola. Le viti possono essere inserite ad una profondità variabile in base allo spessore del pannello. (fonte: immagini elaborate da Diego Savio, responsabile commerciale di Wood Control)



Figura 106. Foto di un MySenseBus installato su una parete. (fonte: <https://woodcontrol.eu/documentazione/>)

# PIANTE DELL'EDIFICIO CON POSIZIONAMENTO DELLA SCALA A

scala 1:500



### 3.9.5 LE MISURAZIONI

#### 3.9.5.1 APPARTAMENTO 2

Nell'appartamento 2 sono stati posizionati 5 sensori, dal 15 al 19, e quindi 10 per misurare il contenuto di umidità e 5 per la temperatura.

NUMERO DEL SENSORE PER L'MC	POSIZIONE DELLA SONDA
15.1	Camera da letto sinistra, a sinistra della finestra
15.2	Camera da letto sinistra, a destra della finestra
16.1	Camera da letto destra, a sinistra della finestra
16.2	Camera da letto destra, a destra della finestra
17.1	Bagno zona notte, a sinistra della finestra
17.2	Bagno zona notte, a destra della finestra
18.1	Camera matrimoniale, parete a nord, a destra della finestra
18.2	Camera matrimoniale, parete a nord est
19.1	Camera matrimoniale, parete a nord, a sinistra della finestra
19.2	Camera matrimoniale, parete a nord ovest

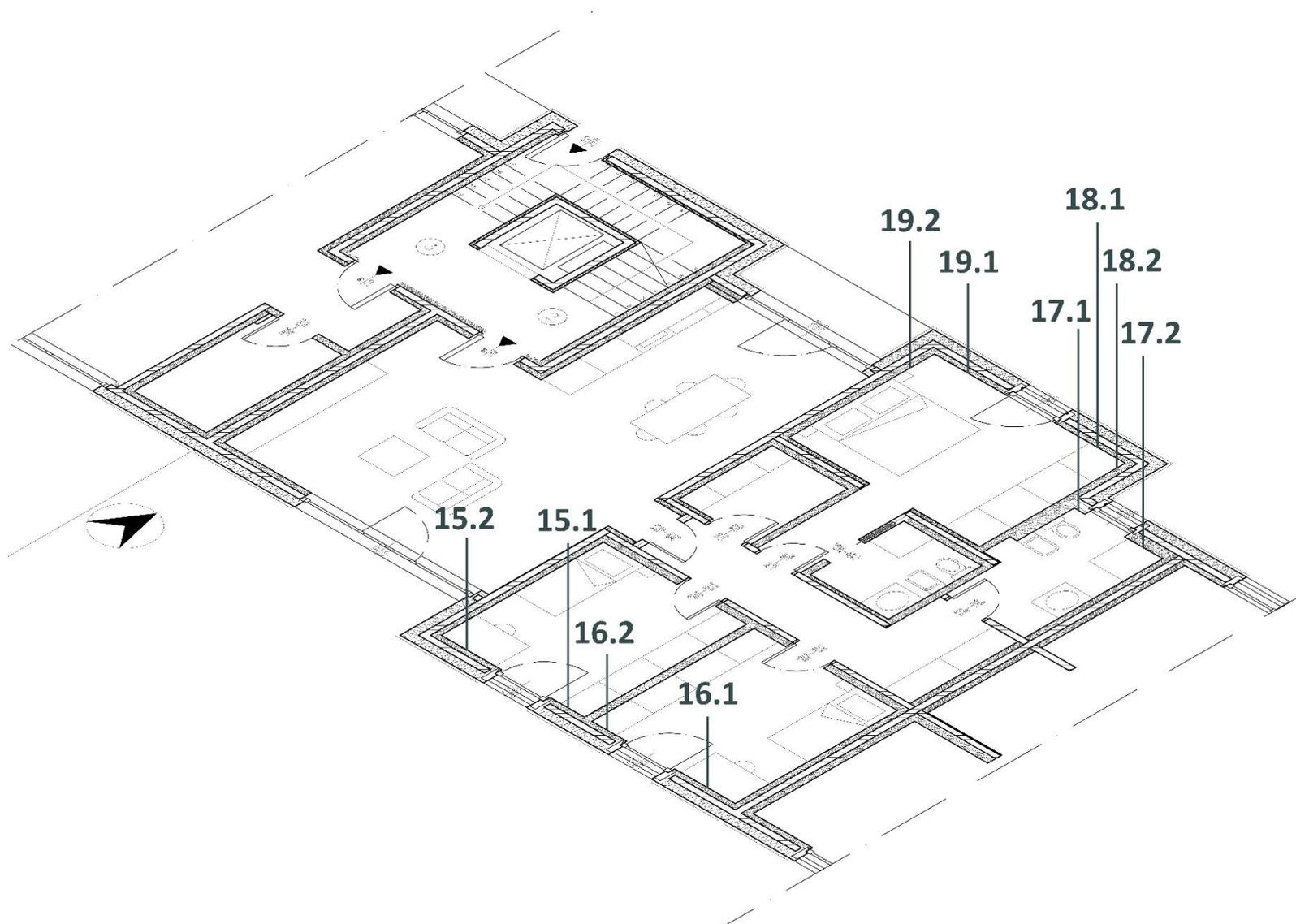


Figura 107. Pianta dell'appartamento 2 in scala 1:100 con la posizione dei sensori che misurano il contenuto di umidità.

## TEMPERATURE MEDIE DEI SENSORI DELL'APPARTAMENTO 2

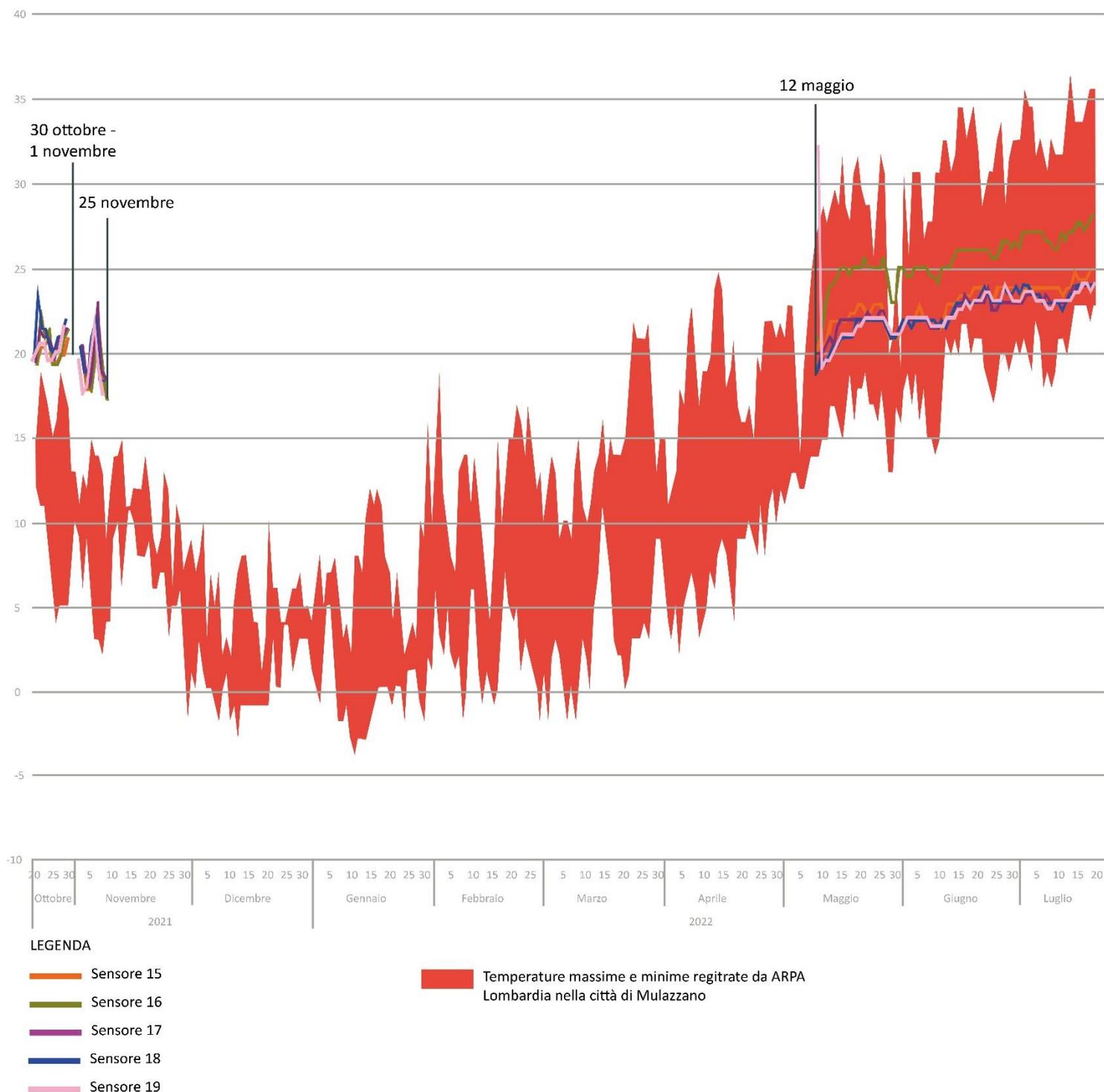


Figura 108. Nel grafico sono messe in relazione le temperature massime e minime misurate nel comune di Mulazzano e le medie delle temperature misurate all'interno dell'appartamento 2 per verificare la corretta coibentazione degli ambienti.

Nei dati dei sensori dell'appartamento 2 risulta l'assenza di misurazioni nel periodo che va dal 25 novembre 2021 al 10 maggio 2022, per cui è stato difficile capire il comportamento dell'edificio. Si nota un possibile malfunzionamento del sensore 19 che ha registrato una temperatura di 32°C l'11 maggio, anomala rispetto agli altri, per poi tornare a temperature più nella norma il giorno successivo. Si nota anche che il sensore che ha misurato le temperature medie più alte è il numero 16, posizionato nella camera da letto destra esposta a sud, e che tali misurazioni sono superiori di 2-3°C rispetto all'altra camera da letto confinante (sensore 15).

## CONTENUTO DI UMIDITA' MEDIO DEI SENSORI DELL'APPARTAMENTO 2

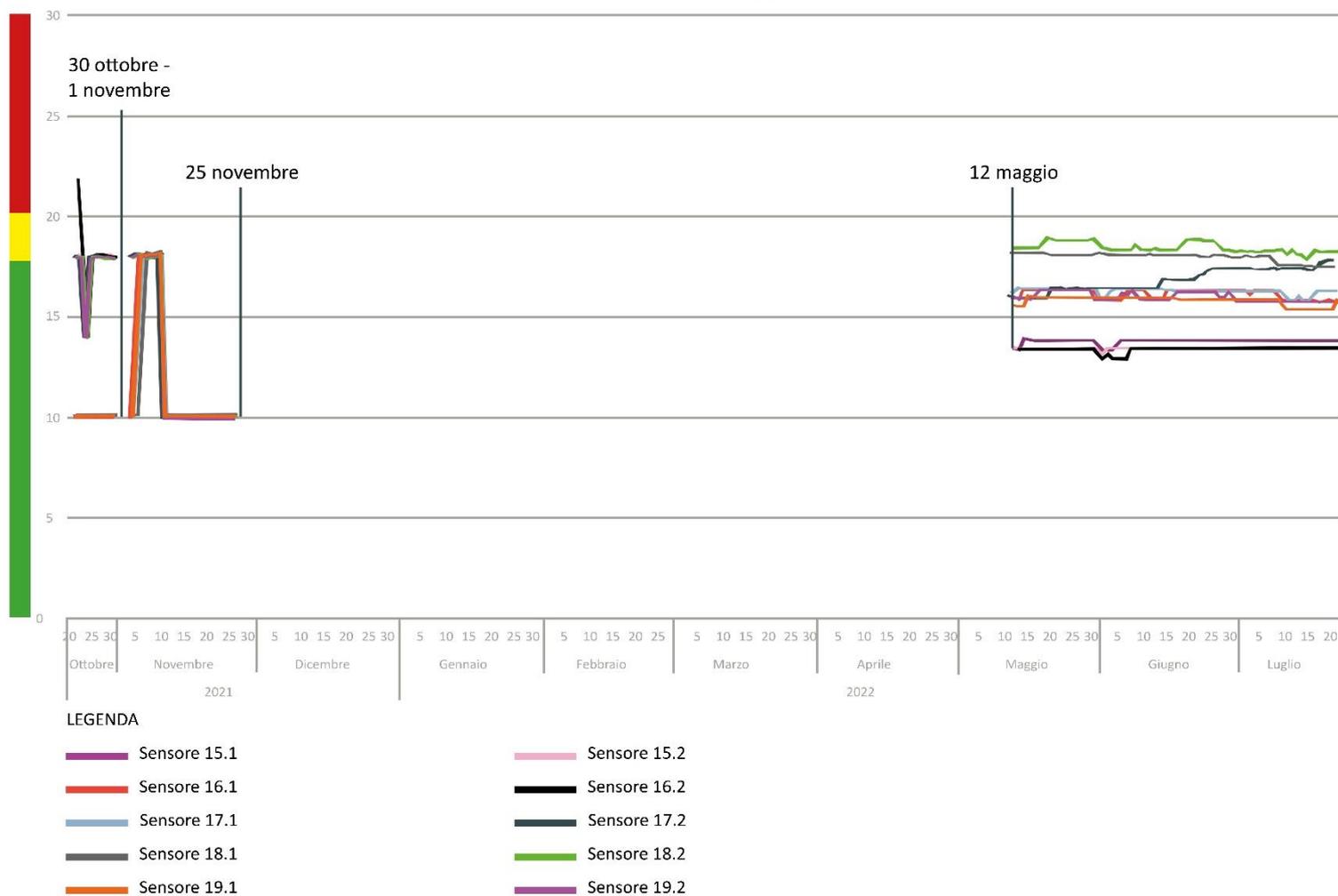


Figura 109. Nel grafico sono riportati i contenuti di umidità medi misurati dai sensori installati nell'appartamento 2.

Dal grafico si evince che la parte lignea della struttura ha un contenuto di umidità ottimale. Solo pochi valori nel periodo iniziale risultano superiori a quelli consigliati (10-18%), ma data la mancanza di dati, come detto precedentemente, risulta difficile capire il comportamento effettivo dell'edificio.

### 3.9.5.2 APPARTAMENTO 3

Nell'appartamento 3 è quello in cui sono stati installati più sensori, 6, dall'1 al 6, e quindi 12 per misurare il contenuto di umidità e 6 per la temperatura.

NUMERO DEL SENSORE PER L'MC	POSIZIONE DELLA SONDA
1.1	Cucina, parete nord, a destra della finestra
1.2	Cucina, parete est
2.1	Locale tecnico, parete est
2.2	Locale tecnico, parete sud
3.1	Camera matrimoniale a sud, parete a sud-est
3.2	Camera matrimoniale a sud, parete a sud, a destra della finestra
4.1	Camera matrimoniale a sud, parete a sud, a sinistra della finestra
4.2	Camera matrimoniale a sud, parete a ovest
5.1	Camera matrimoniale a nord, parete a ovest
5.2	Camera matrimoniale a nord, parete a nord, a sinistra della finestra
6.1	Camera matrimoniale a nord, parete a nord est
6.2	Camera matrimoniale a nord, parete a nord, a destra della finestra

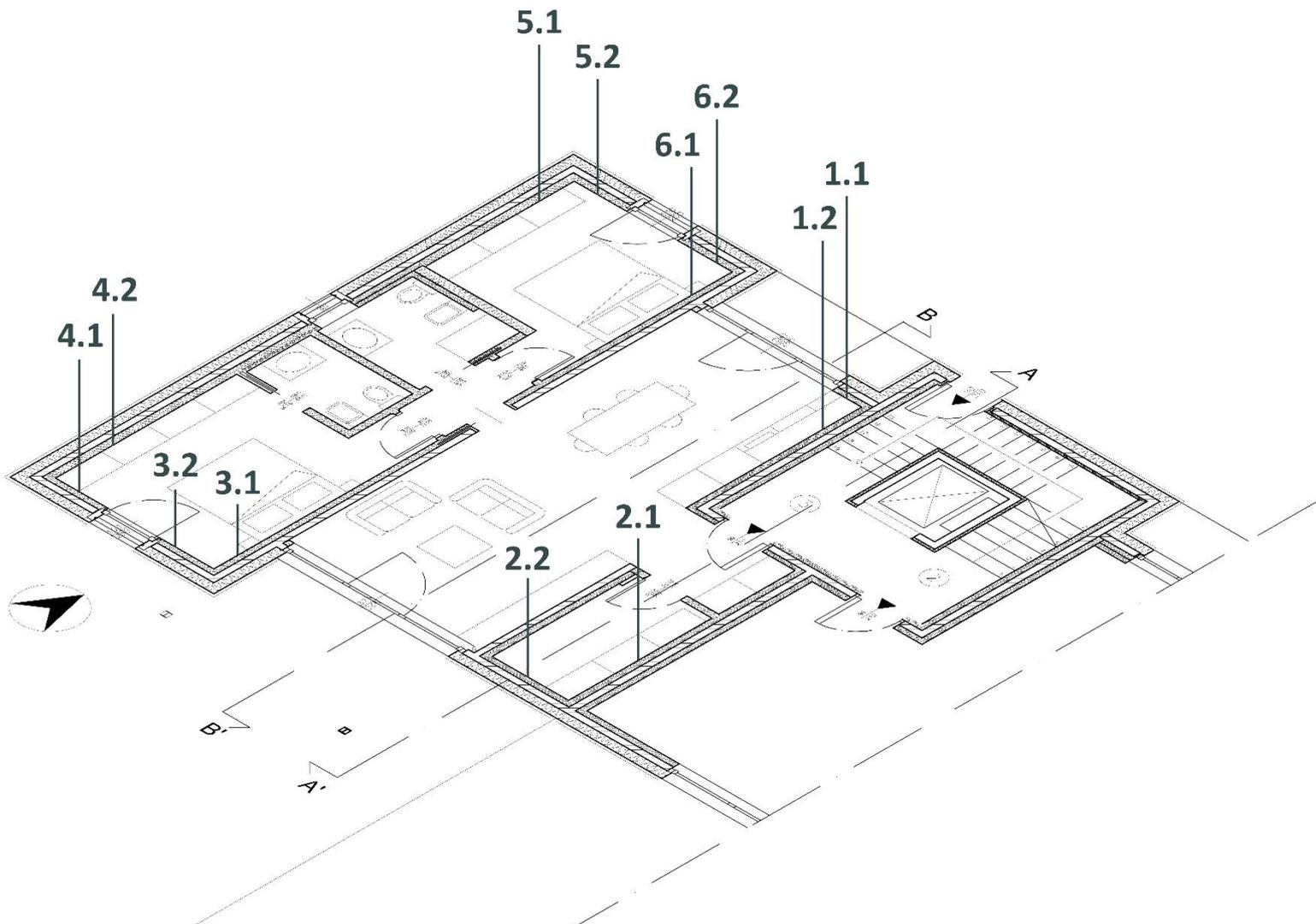
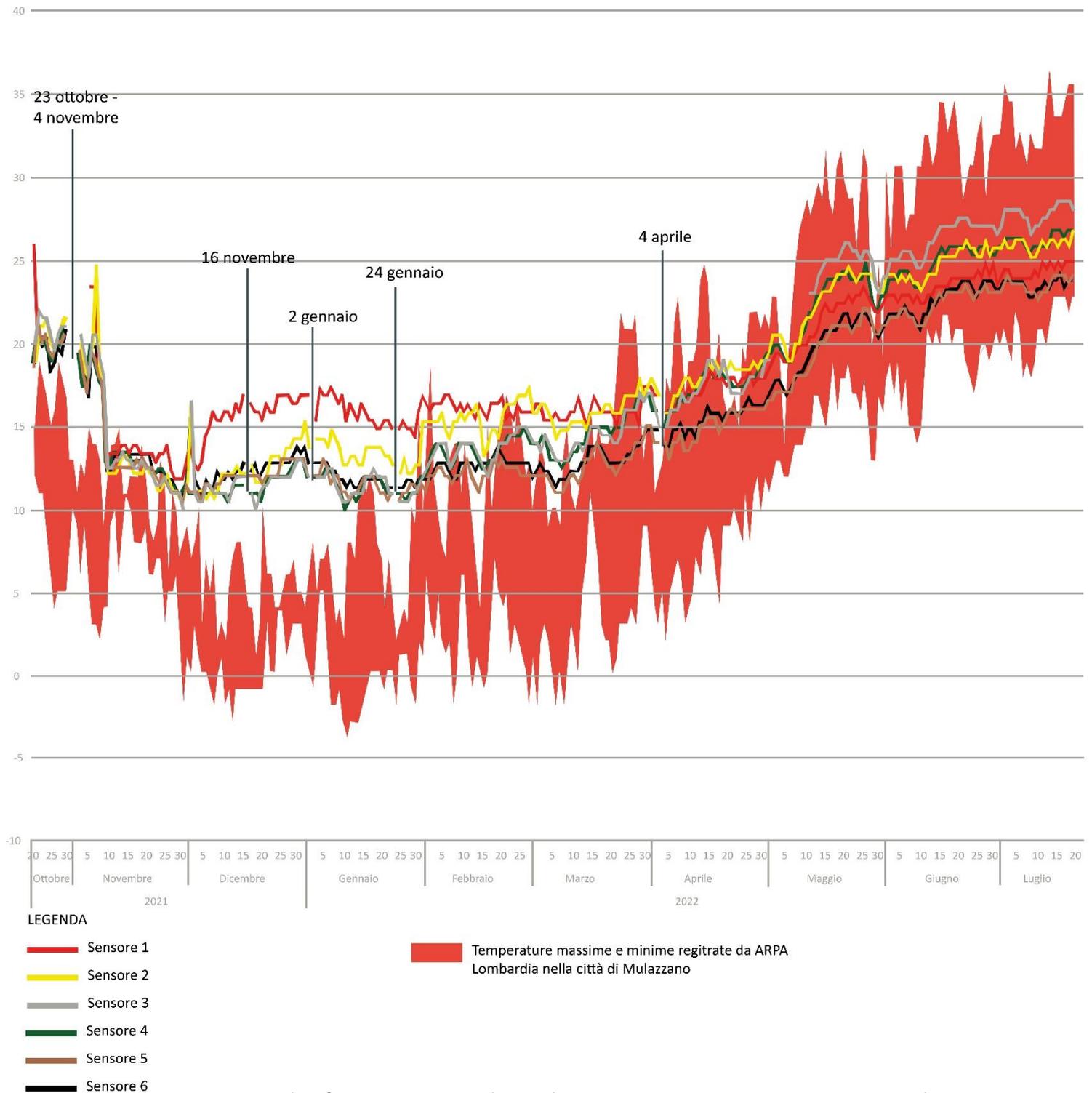


Figura 110. Pianta dell'appartamento 3 in scala 1:100 con la posizione dei sensori.

## TEMPERATURE MEDIE DEI SENSORI DELL'APPARTAMENTO 3



Rispetto all'appartamento 2, questo ha una completezza di dati maggiore, risultano mancanti solo alcuni periodi brevi o giornate:

- 23 ottobre – 4 novembre;
- 16 dicembre;
- 2 gennaio;
- 24 gennaio;
- 4 aprile.

Questi periodi sono stati riscontrati in quasi tutti i sensori della struttura, facendo pensare allo spegnimento dell'intero sistema di monitoraggio.

Le temperature medie rilevate nell'appartamento hanno quasi tutte lo stesso andamento che è simile a quello della T esterna, a parte il periodo invernale in cui risultano più alte grazie al sistema di riscaldamento.

Si nota che il sensore 2, posizionato nel locale tecnico in cui non è stato installato un impianto di riscaldamento/raffrescamento, ha misurato dei valori che si posizionano nella media di quelli stimati nell'appartamento, facendo pensare ad un'ottima coibentazione dell'ambiente.

Inoltre, i sensori 3 e 4 (posizionati nella camera matrimoniale a sud) rispetto ai numeri 5 e 6 (posizionati nella camera matrimoniale a nord) riportano delle temperature maggiori rispetto alle altre, si ipotizza essere dovuto all'esposizione a sud.

### CONTENUTO DI UMIDITA' MEDIO DEI SENSORI DELL'APPARTAMENTO 3

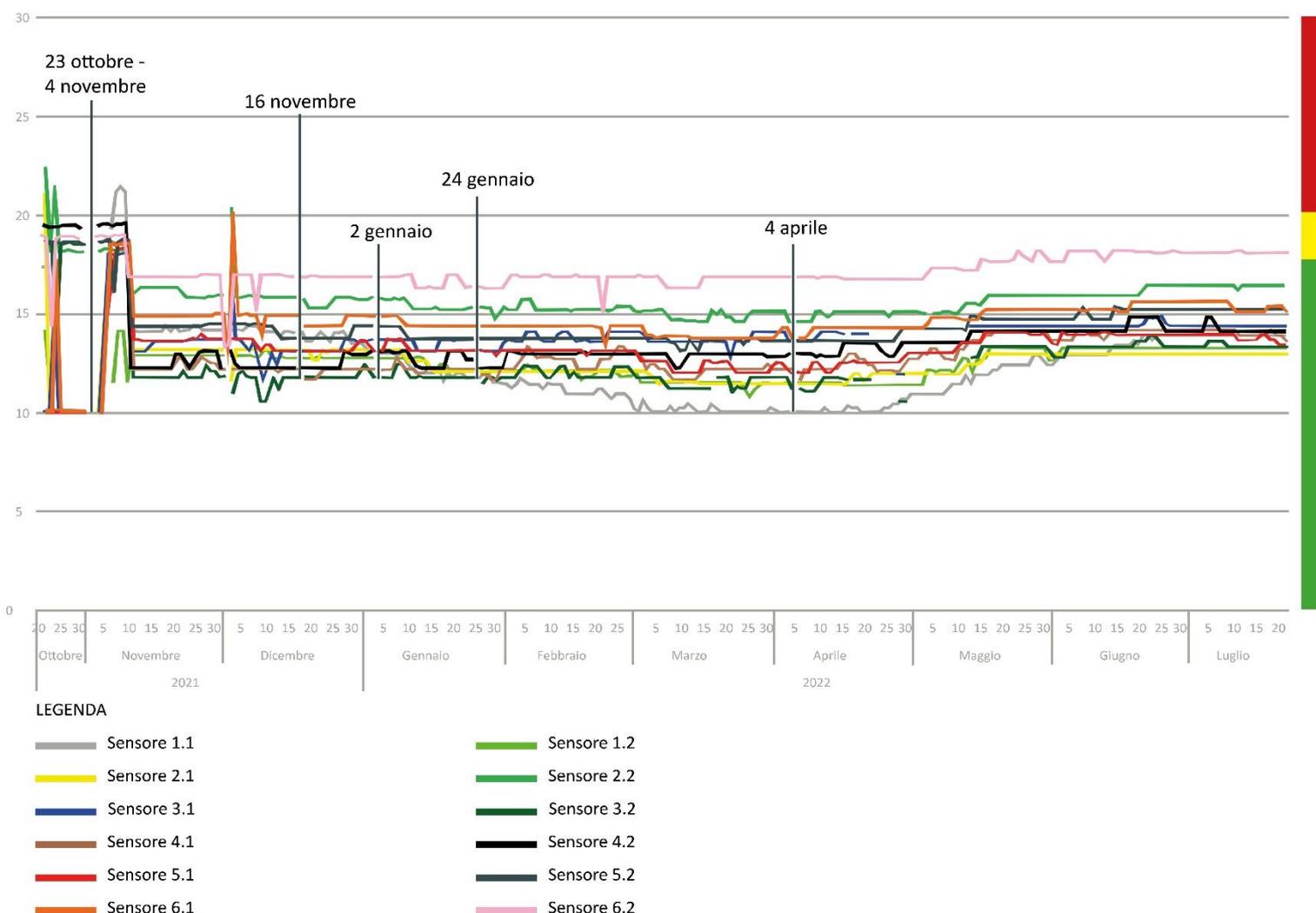


Figura 112. Nel grafico sono riportati i contenuti di umidità medi misurati dai sensori installati nell'appartamento 3.

Come precedentemente detto, nel grafico si possono notare i periodi in cui c'è un'assenza di dati e un primo periodo di attività dei sensori, fino all'11 novembre, in cui i valori misurati presentano dei dislivelli ampi anche di 15 punti percentili. Dopo di che il contenuto di umidità si è stabilizzato a livelli ottimali favorendo la durabilità del materiale.

### 3.9.5.3 PIANO PRIMO – APPARTAMENTI 4 E 5

Nel primo piano sono stati posizionati 4 sensori, 2 per appartamento. Tutti sono stati posizionati sotto i piatti doccia, incassati nel massetto. Questi sono stati identificati come le posizioni più sensibili del piano.

APP.	NUMERO DEL SENSORE PER L'MC	POSIZIONE DEL SENSORE
5	7.1	Bagno cieco, sotto il piatto doccia
5	8.1	Bagno principale, sotto il piatto doccia
4	12.1	Bagno zona notte, sotto il piatto doccia
4	13.1	Bagno della matrimoniale, sotto il piatto doccia

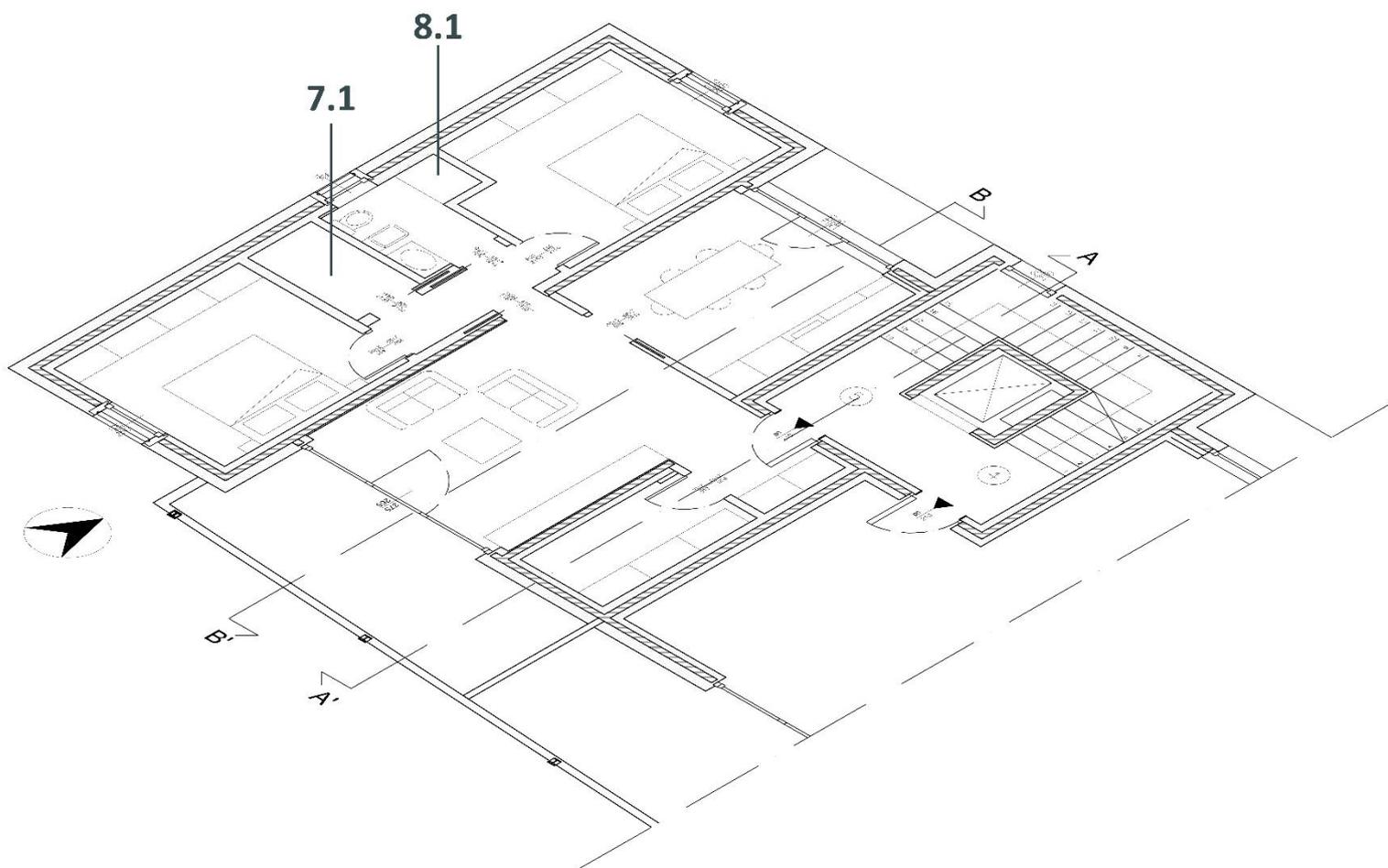


Figura 113. Pianta dell'appartamento 5 in scala 1:100 con la posizione dei sensori.

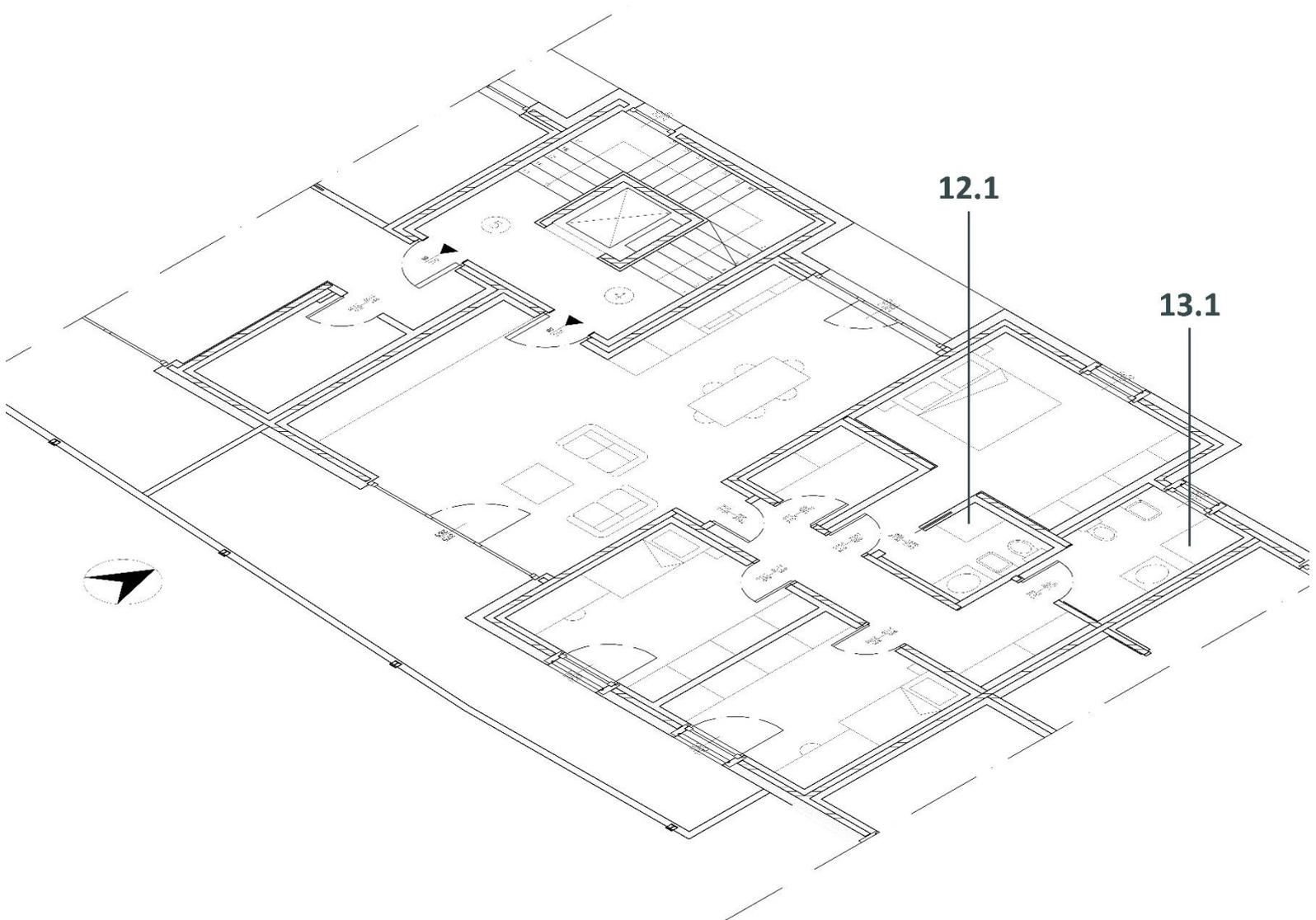
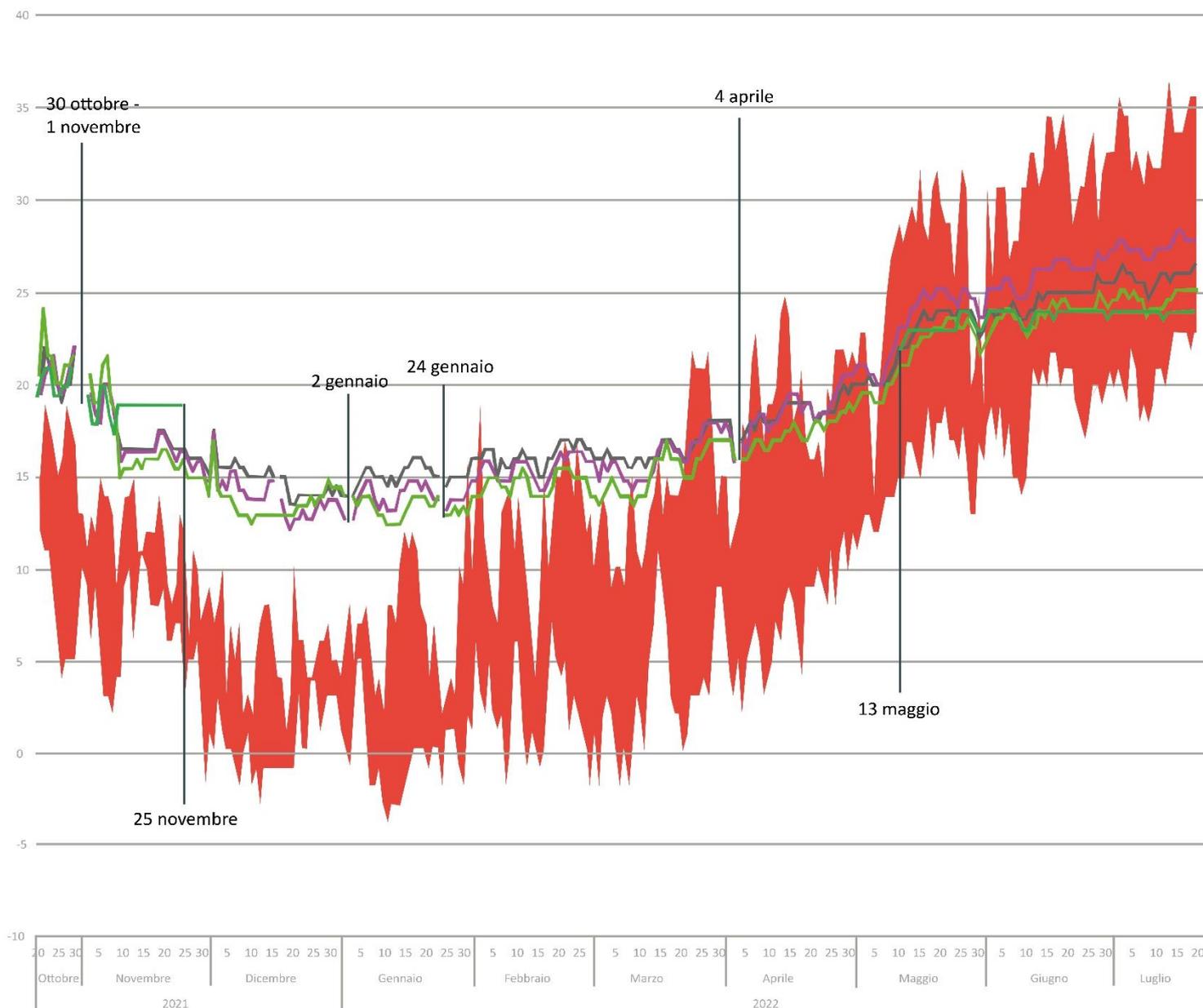


Figura 114. Pianta dell'appartamento 4 in scala 1:100 con la posizione dei sensori.

## TEMPERATURE MEDIE DEI SENSORI DEL PIANO PRIMO



### LEGENDA

- Sensore 7 (appartamento 5)
- Sensore 8 (appartamento 5)
- Sensore 12 (appartamento 4)
- Sensore 13 (appartamento 4)

Temperature massime e minime registrate da ARPA Lombardia nella città di Mulazzano

Figura 115. Nel grafico sono messe in relazione le temperature massime e minime misurate nel comune di Mulazzano e le medie delle temperature misurate all'interno degli appartamenti 4 e 5 per verificare la corretta coibentazione degli ambienti.

Le temperature rilevate nei massetti sotto i piatti doccia sono simili alle altre rilevate nell'edificio. Il sensore 13 (posizionato nell'appartamento 4, nel bagno della zona notte) ha registrato i dati solo nei periodi che vanno dal 21 ottobre al 24 novembre 2021 e dal 13 maggio al 21 luglio 2022.

## CONTENUTO DI UMIDITA' MEDIO DEI SENSORI DEL PIANO PRIMO

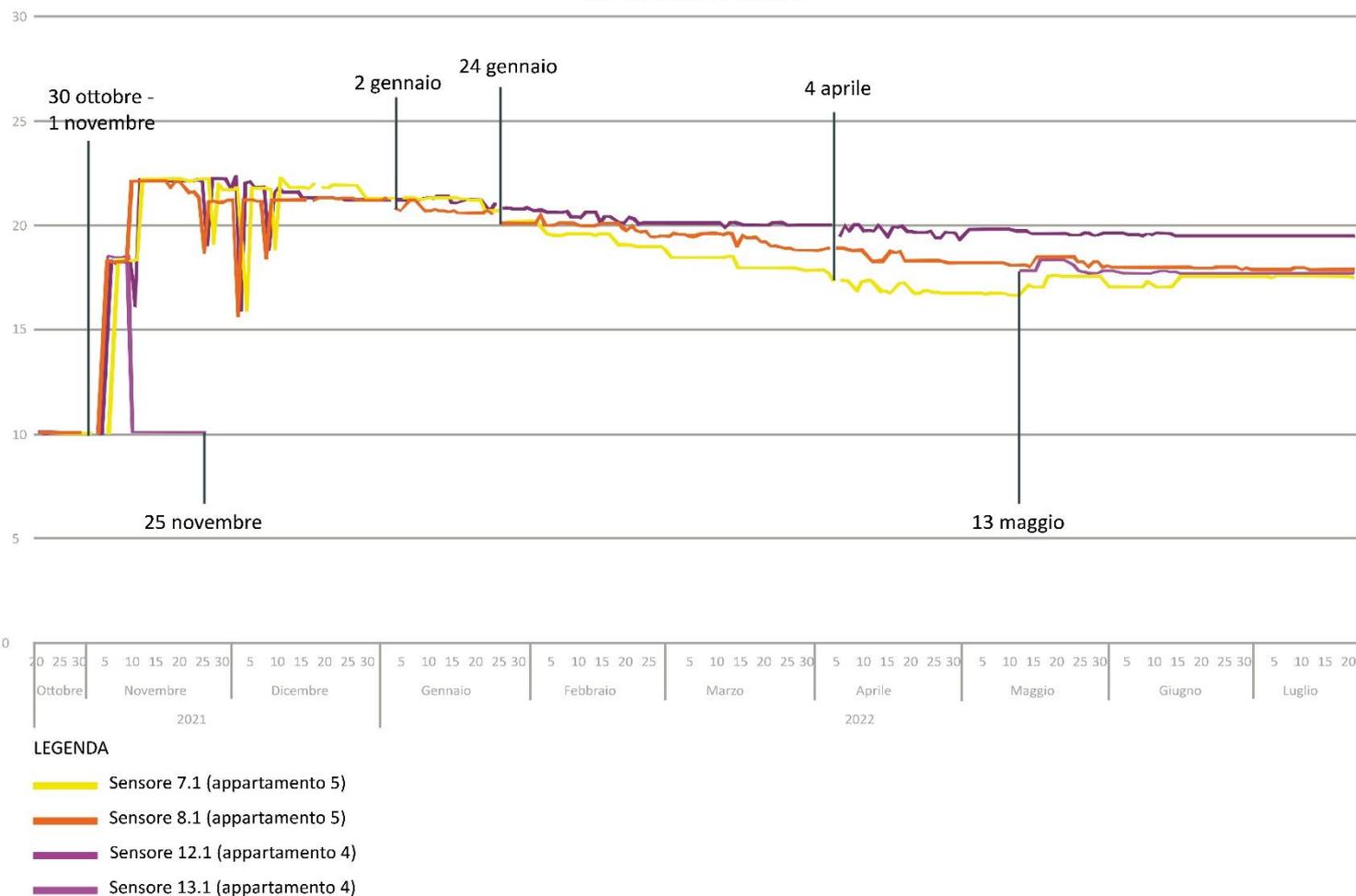


Figura 116. Nel grafico sono riportati i contenuti di umidità medi misurati dai sensori installati nel primo piano.

Inizialmente tutti i sensori hanno rilevato un MC del 10,1%, per poi avere un incremento dell'8% nei primi dieci giorni di novembre. In seguito, c'è stato un periodo in cui i valori risultano altalenanti e poco realistici, anche con 11 punti percentuali di differenza nell'arco di una giornata. A questo periodo ne è seguito un altro con valori più stabili e decrescenti.

I contenuti di umidità rilevati nei massetti erano inizialmente elevati, ma come si può osservare dal grafico (figura 3.110) stanno decrescendo lentamente e hanno raggiunto dei valori medi accettabili.

### 3.9.5.4 PIANO SECONDO – APPARTAMENTI 6 E 7

Nel secondo piano sono stati posizionati 2 sensori, 1 nel sesto e 1 nel settimo appartamento. Tutti sono stati posizionati sotto i piatti doccia dei bagni. Questi sono stati identificati come le posizioni più sensibili del piano.

NUMERO DEL SENSORE PER L'MC	POSIZIONE DEL SENSORE
9.1	Bagno, sotto il piatto doccia
14.1	Bagno della matrimoniale, sotto il piatto doccia
14.2	Bagno zona notte, sotto il piatto doccia

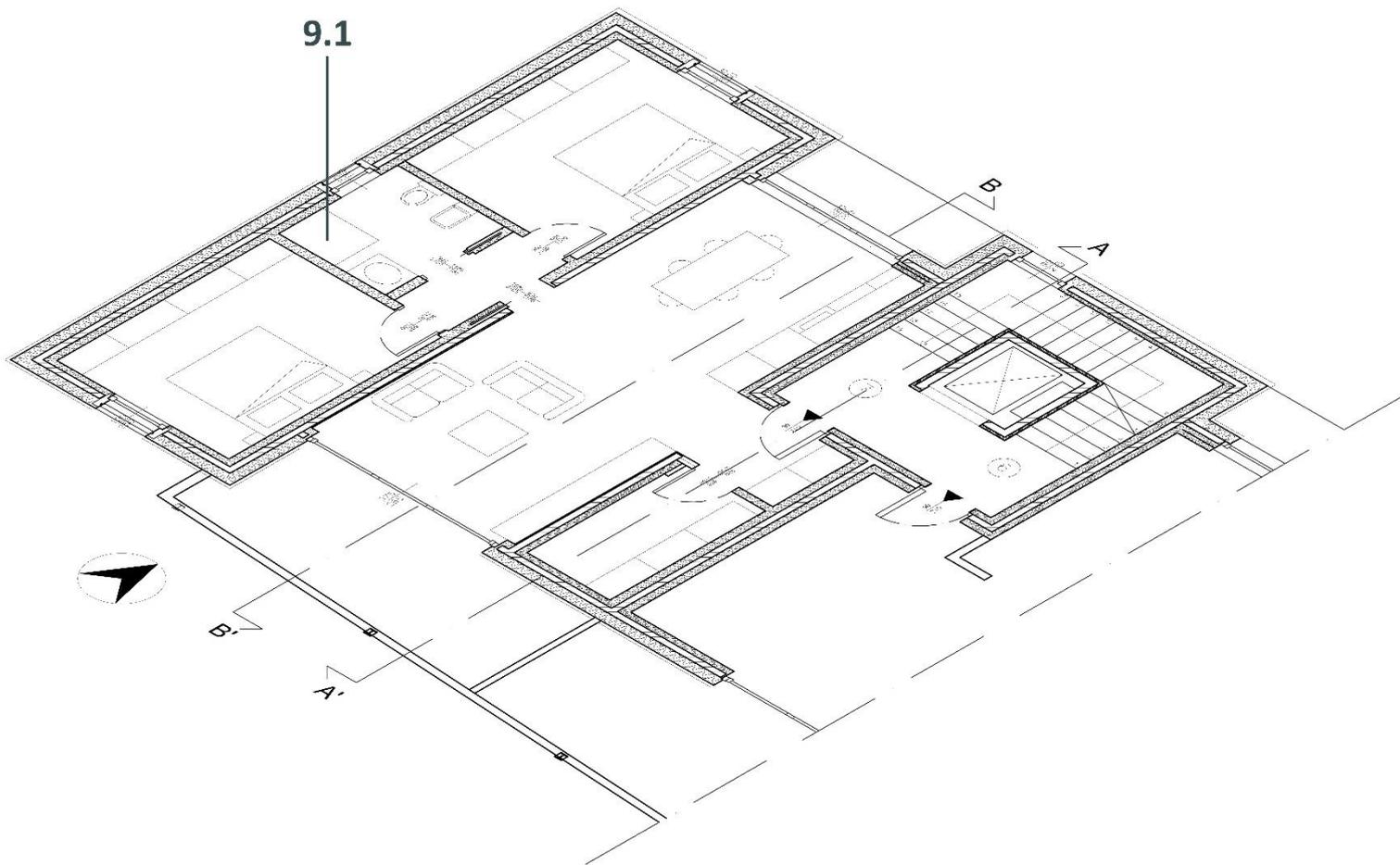


Figura 117. Pianta dell'appartamento 7 in scala 1:100 con la posizione dei sensori.

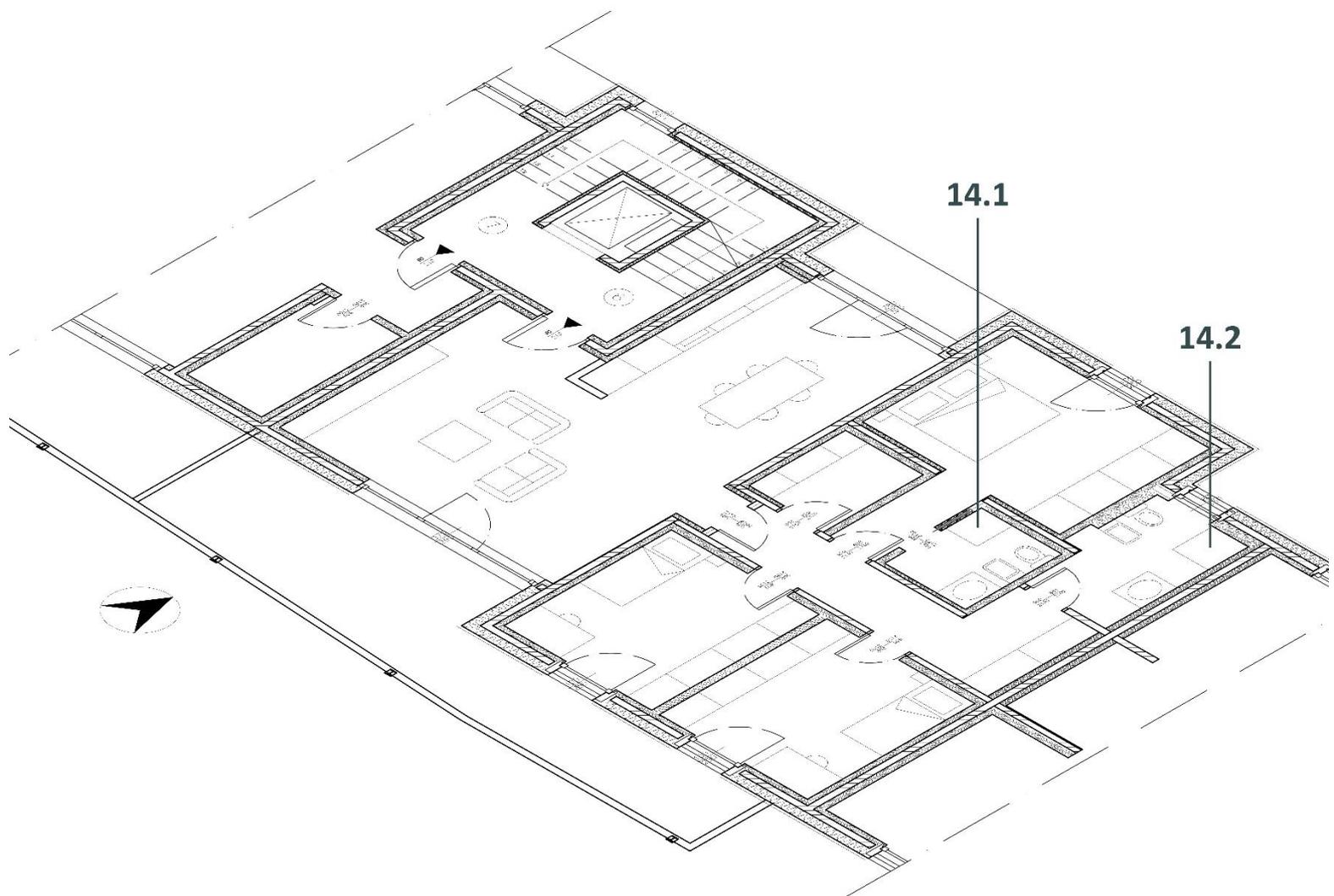


Figura 118. Pianta dell'appartamento 6 in scala 1:100 con la posizione dei sensori.

## TEMPERATURE MEDIE DEI SENSORI DEL PIANO SECONDO

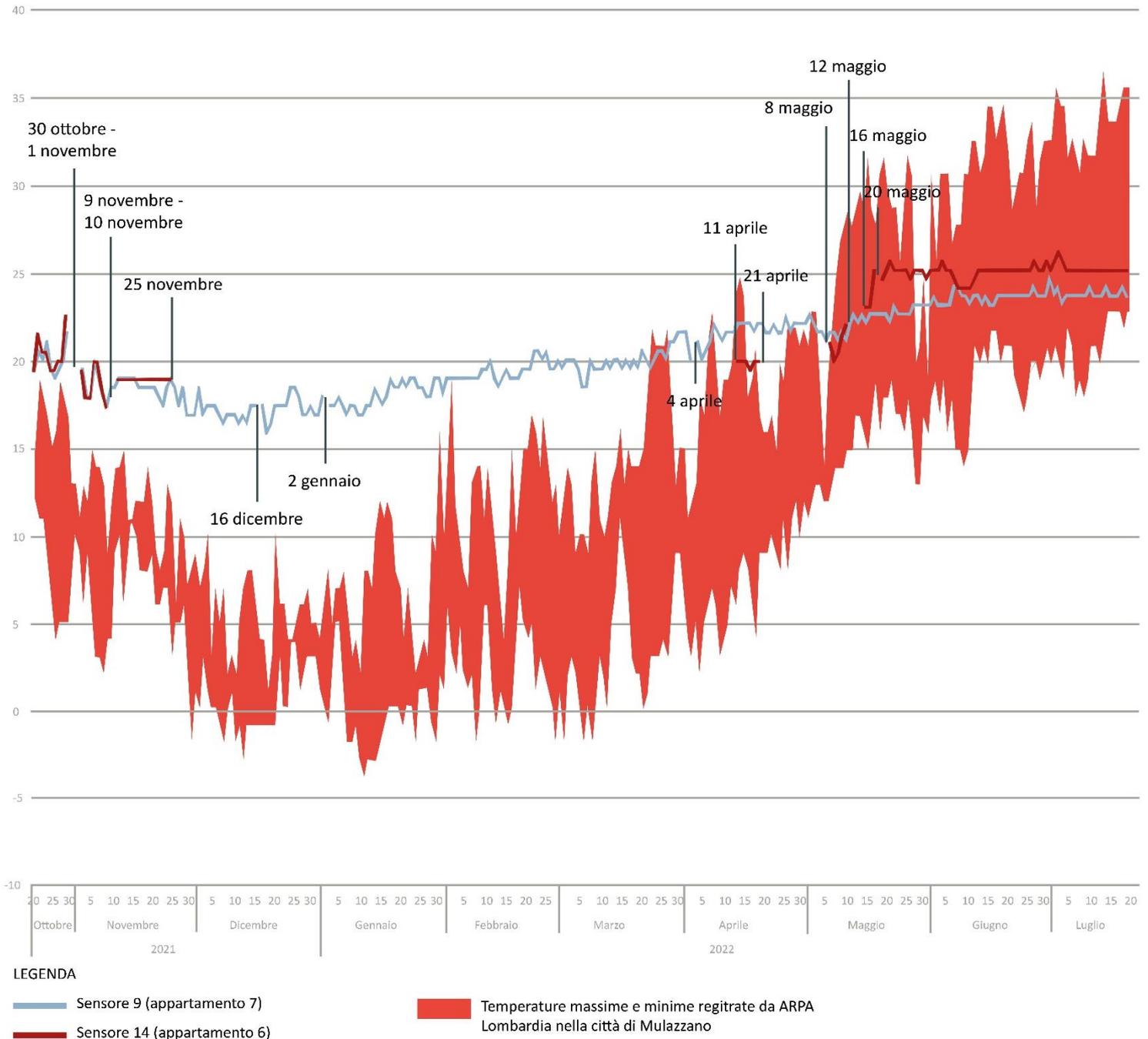


Figura 119. Nel grafico sono messe in relazione le temperature massime e minime misurate nel comune di Mulazzano e le medie delle temperature misurate all'interno della struttura per verificare la corretta coibentazione degli ambienti.

Il sensore installato nell'appartamento 6 ha funzionato in maniera molto discontinua, fornendo pochi dati e rendendoli poco utili.

Invece, il MySenseBus posizionato nel massetto del bagno dell'appartamento 7 ha registrato dei valori medi tra i più stabili dell'intero edificio, con la temperatura più bassa a 16,5°C e quella più alta a 24,5°C.

## CONTENUTO DI UMIDITA' MEDIO DEI SENSORI DEL PIANO SECONDO

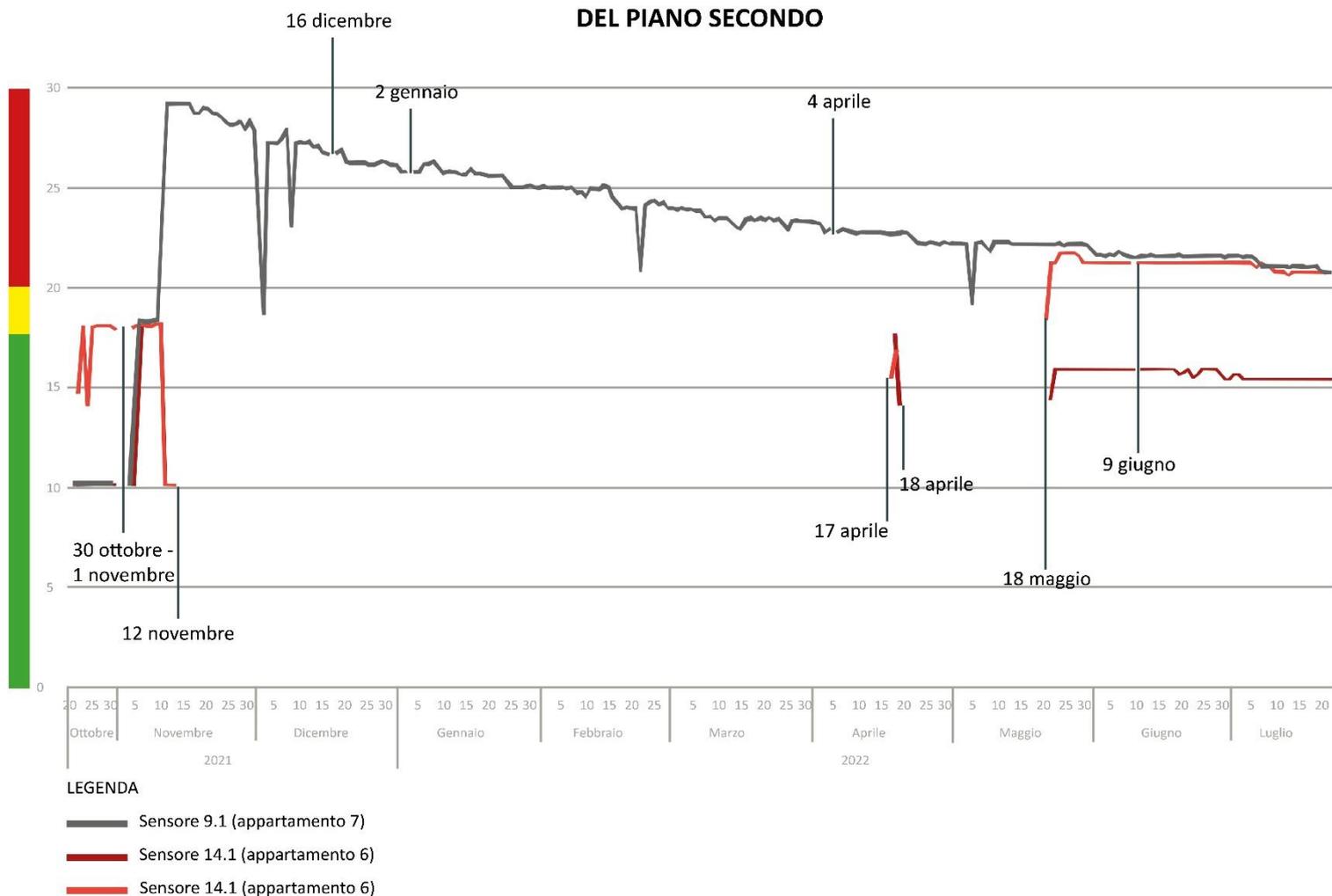


Figura 120. Nel grafico sono riportati i contenuti di umidità medi misurati dai sensori installati nel primo secondo.

Il contenuto di umidità del sensore 9.1 ha registrato un primo periodo, la prima settimana di funzionamento, un valore fisso al 10,1%. In seguito, l'MC registrato un'ascesa rapida che l'ha portato a raggiungere anche il 29,2%. Dopo di che, è iniziato un lento decremento, già visto nei sensori degli appartamenti al primo piano, ma molto più veloce, che dimostra che il massetto si sta asciugando correttamente e che i valori stanno diventando ottimali, lasciando il range di valori della soglia critica.

### 3.9.5.5 PIANO TERZO – APPARTAMENTI 8 E 9

Nel terzo piano sono stati posizionati 2 sensori, 1 nell'ottavo e 1 nel nono, entrambi sono stati collocati nei massetti dei bagni. In particolare, il sensore 11 grazie alla possibilità di posizionare le sonde in un raggio di 3 m dal sensore riesce a raggiungere sia la doccia del bagno della zona notte, sia quello del bagno nella camera matrimoniale.

NUMERO DEL SENSORE PER L'MC	POSIZIONE DEL SENSORE
10.1	Bagno, sotto il piatto doccia
11.1	Bagno della matrimoniale, sotto il piatto doccia
11.2	Bagno zona notte, sotto il piatto doccia

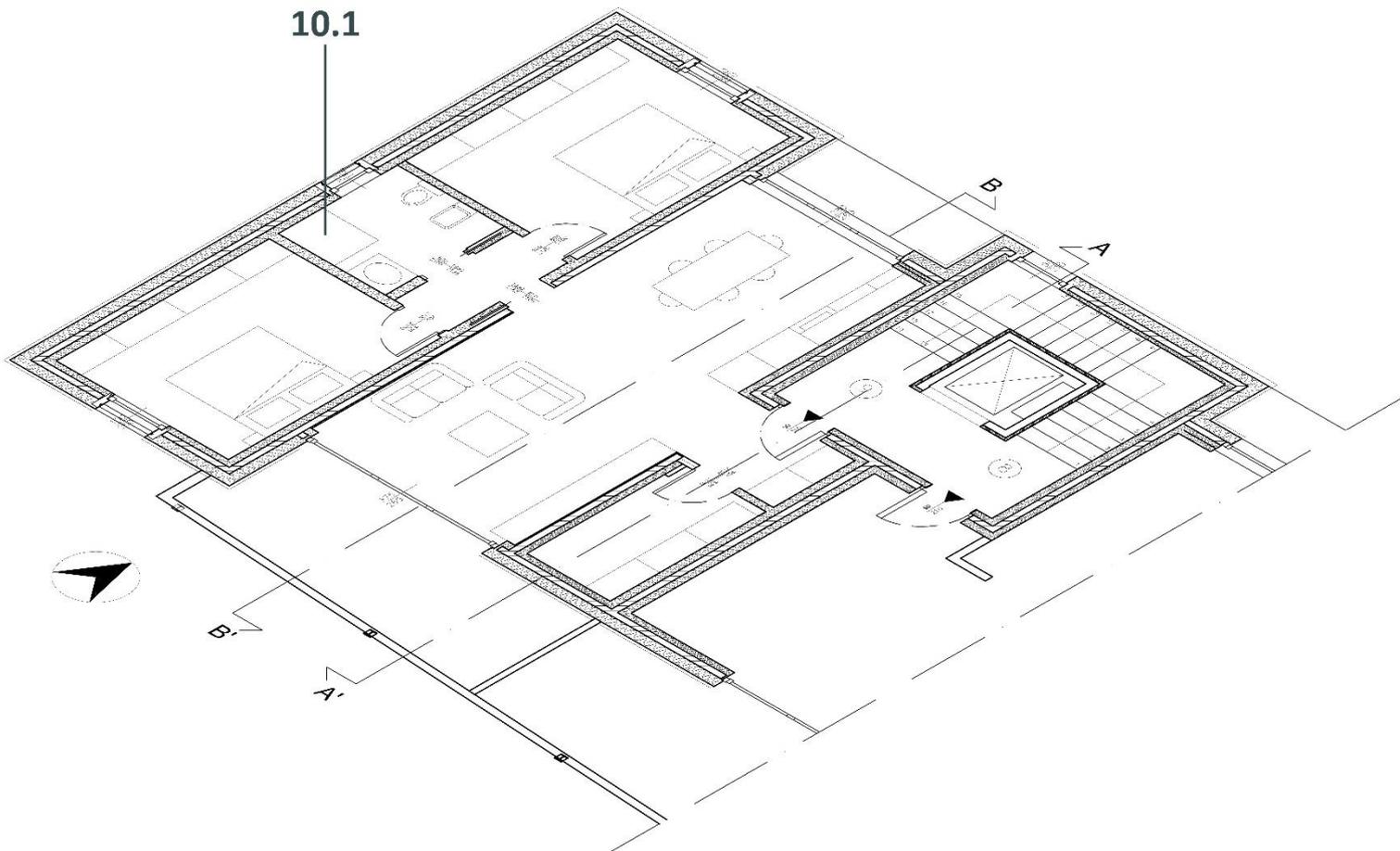


Figura 121. Pianta dell'appartamento 9 in scala 1:100 con la posizione dei sensori.

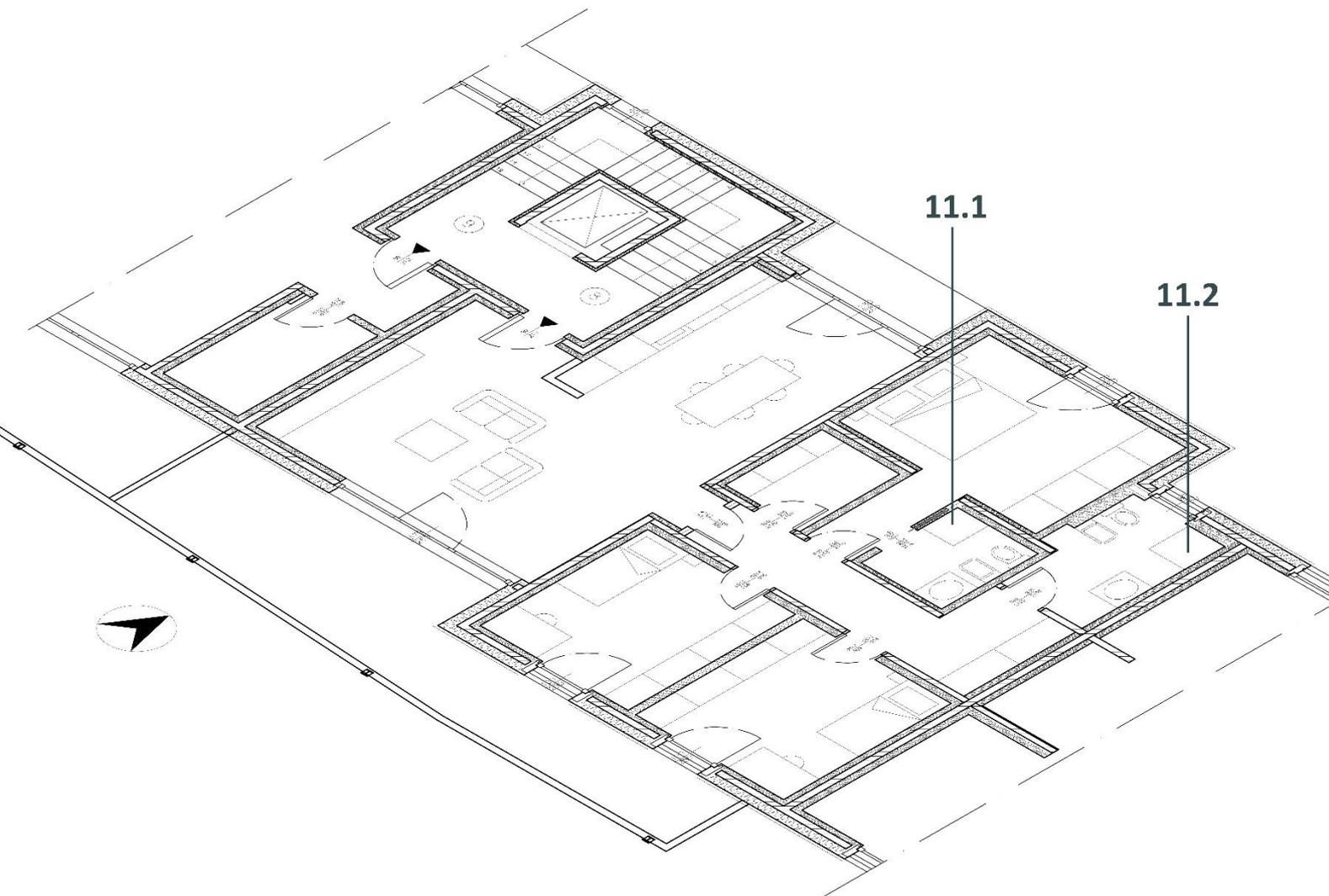


Figura 122. Pianta dell'appartamento 8 in scala 1:100 con la posizione dei sensori.

## TEMPERATURE MEDIE DEI SENSORI DEL PIANO TERZO

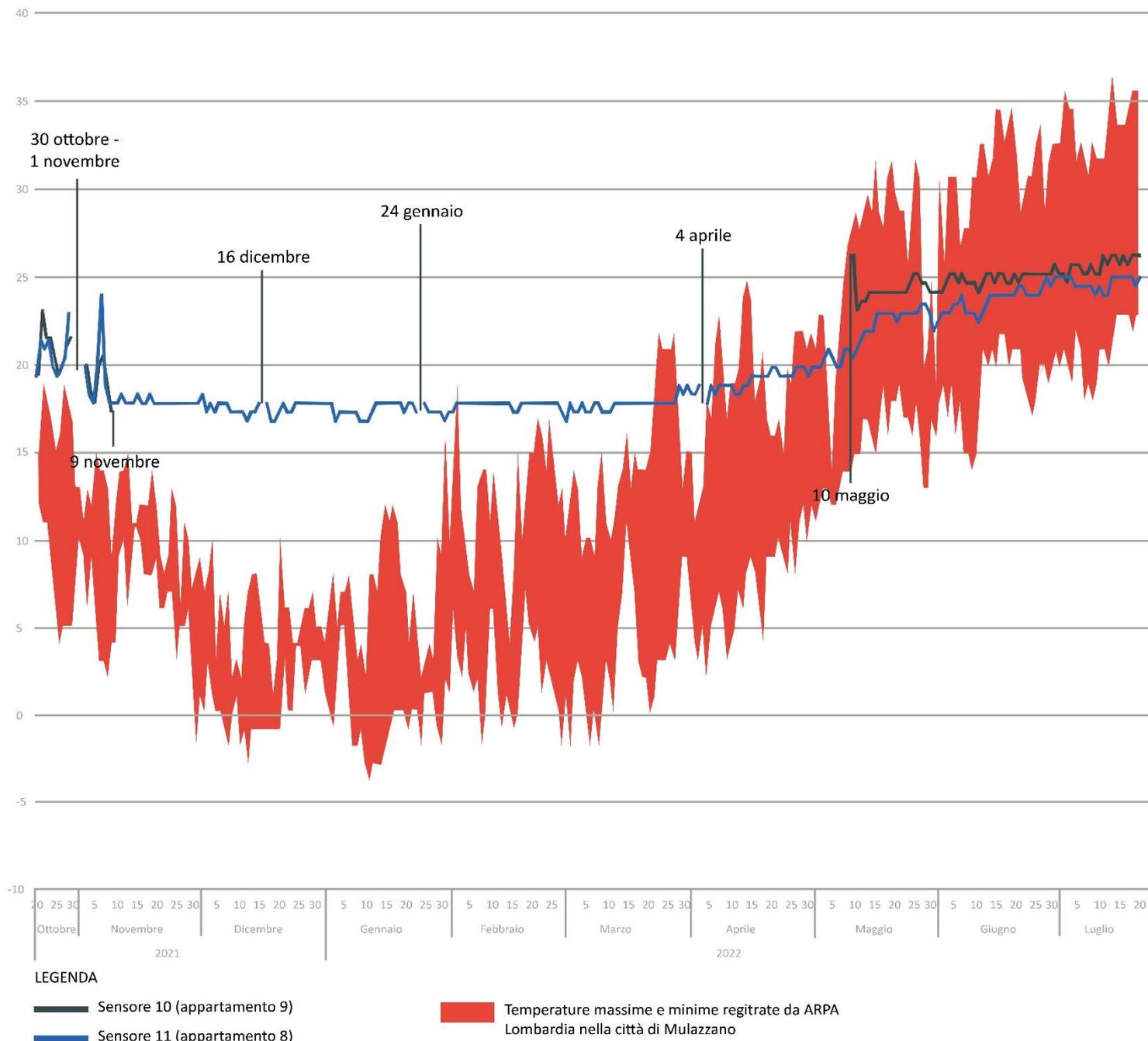


Figura 123. Nel grafico sono messe in relazione le temperature massime e minime misurate nel comune di Mulazzano e le medie delle temperature misurate all'interno degli appartamenti 8 e 9 per verificare la corretta coibentazione degli ambienti.

Il sensore 10 presenta gli stessi problemi riscontrati nel sensore 9 al piano inferiore, ovvero la mancanza di dati registrati nel periodo tra i primi giorni di novembre e i primi giorni di maggio. Questo porta a non poter giungere a conclusioni sulla temperatura rilevata nell'appartamento 9. Invece, il sensore 11, come il sensore 9, ha rilevato delle temperature stabili dai 17°C ai 25°C, di 0.5°C maggiori rispetto a quelle del piano inferiore.

## CONTENUTO DI UMIDITA' MEDIO DEI SENSORI DEL PIANO TERZO

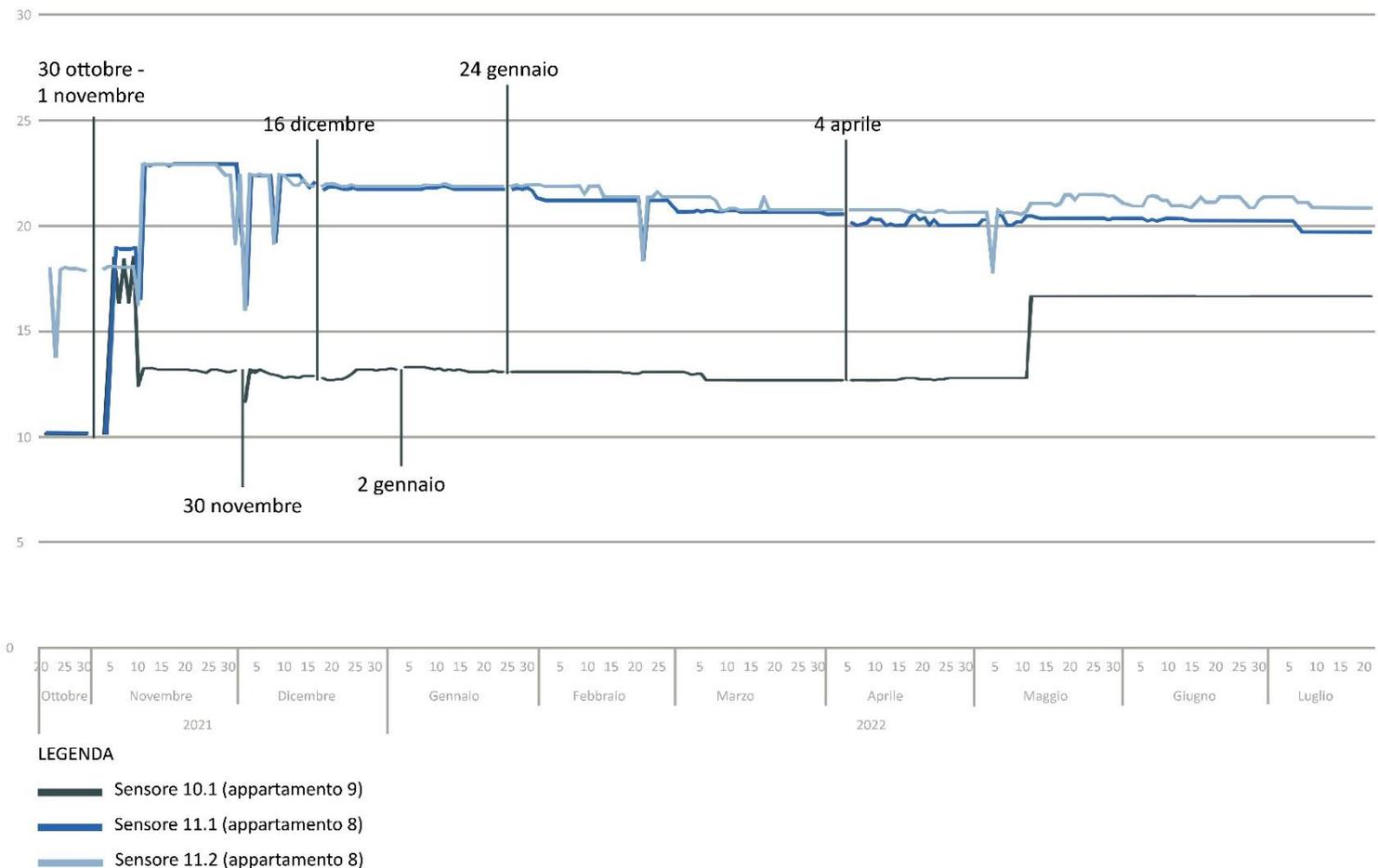


Figura 124. Nel grafico sono riportati i contenuti di umidità medi misurati dai sensori installati nel primo terzo.

Per quanto riguarda il contenuto di umidità il sensore 10.1 ha avuto un andamento molto altalenante, con crescite/decescite improvvise. Invece, il sensore dell'appartamento 8, che registra i valori dei massetti di due docce, è partito da un periodo in cui i valori erano fissi al 10,1%, ha avuto un innalzamento dell'MC fino al 22% e poi è iniziato il periodo più lungo in cui c'è stato un decremento dei valori molto lento che ha portato alla perdita di 2-3 punti percentili.

### 3.9.6 I RISULTATI

Nonostante alcune lacune nelle misurazioni e alcuni valori che sembrano erronei, si può dire che i valori registrati dai sensori termici sono ottimali al fine di mantenere il giusto confort termico nell'ambiente interno, anche negli spazi non dotati di un sistema di riscaldamento/raffrescamento. Inoltre, il contenuto di umidità dei componenti che sono stati monitorati risulta ottimale nella maggior parte dei casi. Anche nei massetti dei bagni, elementi gettati ad umido che potrebbero compromettere la qualità dei pannelli inseriti nei solai, il contenuto di umidità sta decrescendo, arrivando a livelli accettabili. Ciò fa pensare che l'edificio sia stato progettato correttamente e che nel prossimo anno tutti i componenti arriveranno ad un livello di MC che permetta di mantenere gli standard qualitativi imposti dalla certificazione CasaClima per tutta la vita utile dell'edificio.

# 4 CONCLUSIONI

## 4.1 COMPARAZIONE DEGLI ASPETTI CARATTERISTICI DEI CASI STUDIO

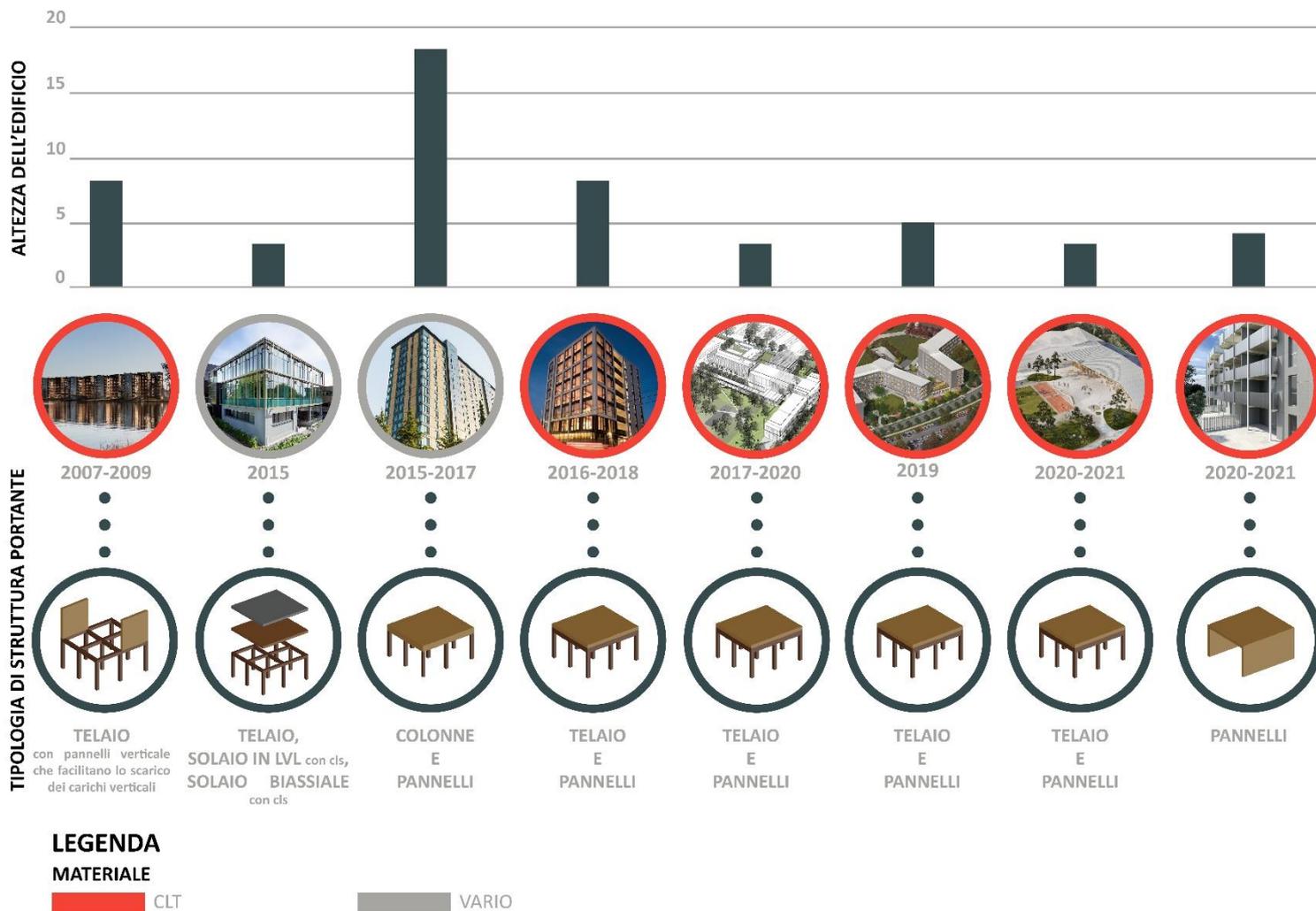


Figura 125. Nell'immagine è rappresentato uno schema comparativo degli edifici.

I casi studio indentificati a livello internazionale hanno caratteristiche diverse (altezze variabili, strutture portanti differenti, ecc.) ma in quasi tutti si può identificare un aspetto innovativo:

- Il progetto Limnologen, ultimato nel 2009, che è stato pioneristico nell'utilizzo di elementi di protezione dalle intemperie, la Gibson Tower. Questa prassi di cantiere ha dimostrato che se una struttura il legno viene riparata dall'acqua durante la fase di erezione, avrà meno possibilità di incorrere in degradi dovuti all'umidità. Gli studi effettuati su questo edificio hanno reso questa pratica di uso comune nei paesi dell'Europa settentrionale (vedi par. 4.2.4).
- Il progetto sviluppato dal Politecnico Federale di Zurigo, House of Natural Resources, è stato ideato e costruito per lo studio di materiali innovativi (il telaio post-teso, i pavimenti ibridi, il solaio con sistema biassiale) e per capire l'interazione che essi hanno tra di loro al variare delle condizioni ambientali.

- I progetti Brock Commons Tallwood House e Carbon 12, per la loro altezza, hanno portato alla revisione dei codici edilizi delle strutture lignee del nord America, aprendo così la strada alla costruzione di edifici alti in legno e dimostrando che questo materiale è un ottimo sostituto del cemento per tali costruzioni.
- L'Adohi Hall alla conclusione dei lavori è stato definito l'edificio in CLT più ampio mai costruito fino a quel momento, segnando un altro record per le dimensioni di una struttura lignea nel continente nordamericano. Infatti, negli anni precedenti il Brock Commons Tallwood House era stato segnalato come edificio più alto del mondo e il Carbon 12 come edificio americano più alto.

All'innovazione della struttura in sé si è aggiunta la sperimentazione di nuovi sistemi di monitoraggio che hanno portato al miglioramento di questa tecnologia e alla sua diffusione.

L'obiettivo comune che ha portato all'installazione di questi sistemi in tutti i casi studio è quello di controllare la qualità dei materiali al fine di garantire la durata della vita utile dell'edificio. A questo si è aggiunto il fine di ricerca scientifica e di documentazione dei processi decisionali e costruttivi.

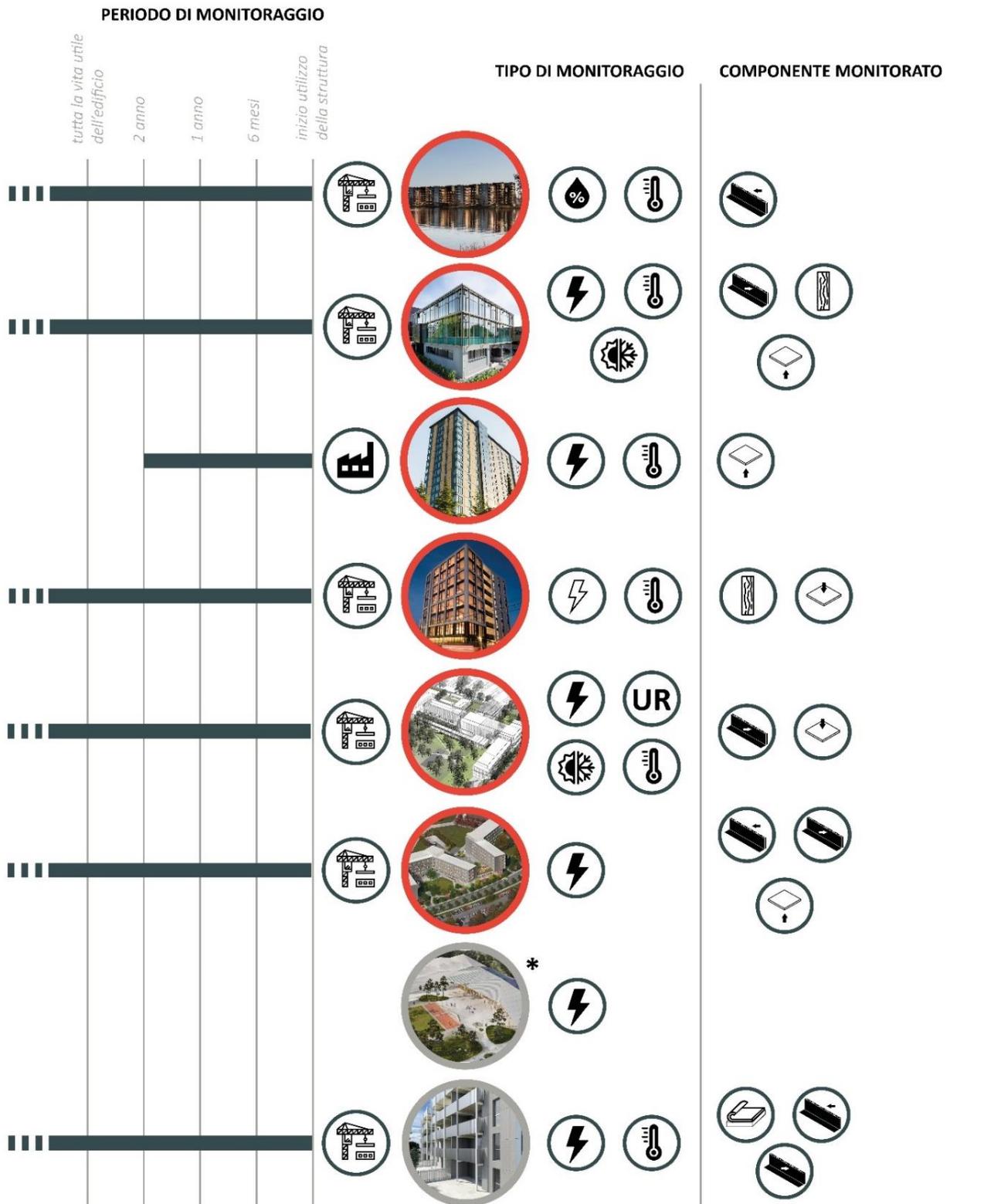
La maggior parte dei sensori installati utilizza un metodo di misurazione a resistenza/conduzzanza elettrica (vedi par. 2.5) che è spesso associato a un sensore termico e in alcuni casi anche ad una stazione meteorologica esterna per una raccolta dei dati completa.

Negli edifici americani, infatti, si può anche individuare la volontà di monitorare gli elementi che risultano più esposti agli agenti atmosferici (non solo alla pioggia, ma anche al vento e all'irraggiamento solare) oltre che a quelli interni dovuti all'utilizzo dell'edificio. Questo può essere riconducibile anche al luogo in cui sorgono le strutture. Queste zone, ovvero quella tra Portland e Vancouver e l'Arkansas (situato nella Tornado Alley), sono notoriamente conosciute per avere un clima impervio. Ad esempio, nello studio delle posizioni da controllare del Peavy Hall è stato deciso di monitorare una parete di taglio settentrionale a causa della direzione del vento, che soffia da nord a sud, poiché in caso di forti piogge ci potrebbero essere eventi di bagnatura della parete verticale (vedi par. 3.6.3).

Nonostante la possibilità di monitorare i componenti edilizi già dalla fabbrica, solo nel caso di Brock Commons Tallwood House questo è stato fatto. In tutti gli altri casi il sistema è stato applicato in cantiere.

Gli elementi strutturali più monitorati sono le pareti perimetrali, le partizioni interne e l'intradosso dei solai. In alcuni edifici i sensori sono stati posizionati nell'estradosso di quest'ultimo componente, ma come nel caso del Carbon 12 in questa posizione può crearsi ristagno d'acqua e malfunzionamento del sensore.

Si possono individuare due tipologie di viti nei sensori installati: quelle isolate e quelle non isolate. Le prime misurano solo dalla punta e compongono quei sensori, di piccole dimensioni, che vengono usati per fini di ricerca come nel caso del Brock Commons Tallwood House. I secondi, utilizzati dall'azienda Wood Control, rilevano il contenuto di umidità da tutta la lunghezza della vite in modo da utilizzare un solo sensore, più grande rispetto ai primi, per monitorare tutte le lamelle della parete. Questi sensori sono più resistenti e facili da installare e come nel caso di Cross Light House possono essere collocati e messi in funzione da tecnici non specializzati.



**LEGENDA**

**MATERIALE**

- █ RICERCA SCIENTIFICA
- █ CONTROLLO DELLA QUALITA' DELLA STRUTTURA

**METODO DI MISURAZIONE DEGLI IGROMETRI**

- RESISTENZA ELETTRICA
- CONDUTTANZA ELETTRICA
- IGROMETRICO

**COMPONENTE MONITORATO**

- PARETE PERIMETRALE
- PARTIZIONE INTERNA
- COLONNA

**APPLICAZIONE DEL SISTEMA DI MONIOTRAGGIO**

- IN FABBRICA
- IN CANTIERE

**ALTRI SENSORI**

- STAZIONE METEOROLOGICA ESTERNA
- SENSORE TERMICO
- MISURATORE UMIDITA' RELATIVA
- PARTE INFERIORE DEL SOLAIO
- PARTE SUPERIORE DEL SOLAIO
- MASSETTO

\*: presenza di un sistema di monitoraggio, ma non sono state reperite altre informazioni.

Figura 126. Nell'immagine è rappresentato uno schema comparativo dei sistemi di monitoraggio installati negli edifici individuati come casi studio.

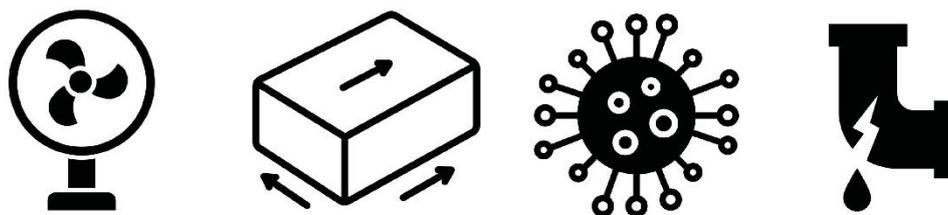
## 4.2 PRASSI POST-PRODUZIONE

Dagli imprevisti individuati in alcuni cantieri, dagli accorgimenti che sono stati presi in altri e dagli elaborati che sono stati condivisi dall'azienda Stora Enso si può estrapolare una prassi da attuare dopo la produzione in fabbrica degli elementi in legno in modo da mantenerli asciutti.

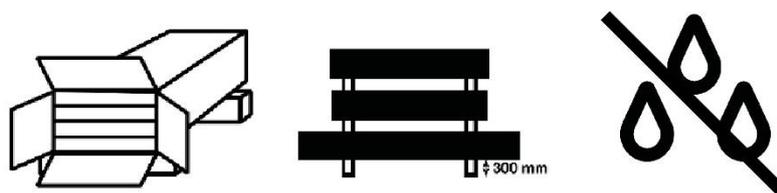
Quando viene prodotto, il materiale ha un contenuto di umidità del 12% ( $\pm 2$ ), questo varia a seconda della specie legnosa e del produttore, ma durante lo stoccaggio, che può essere indoors o outdoors, e il trasporto questo valore può variare e portare a degrado. In questo paragrafo vedremo le buone pratiche da attuare nella post-produzione.

### 4.2.1 LO STOCCAGGIO INDOORS

Per effettuare questa tipologia di stoccaggio è necessario avere a disposizione ambienti molto ampi, per poter contenere i componenti che possono superare i 10m, e ben ventilati per favorire il ricircolo dell'aria. Inoltre, bisogna verificare che negli spazi non sia presente muffa o perdite e che l'umidità relativa non sia troppo alta per non influenzare l'umidità di equilibrio del materiale.



I componenti in legno che vengono stoccati in attesa del montaggio in sito sono impacchettati in un involucro di plastica, lasciando i lati corti aperti per favorire la circolazione ed evitare la formazione di condensa. I pacchetti devono essere conservati lontano da eventuali perdite, ristagni d'acqua ed eccessiva umidità e devono essere rialzati da terra di almeno 300mm in modo da evitare il contatto con la pavimentazione. Inoltre, possono essere impilati uno sull'altro. In entrambi i casi si utilizzano supporti che vengono posizionati in linea retta per evitare la deformazione dei pannelli.

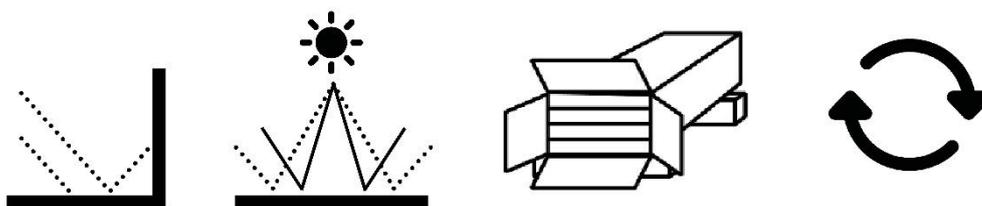


### 4.2.2 LO STOCCAGGIO OUTDOORS

Lo stoccaggio all'aperto è molto diffuso nei cantieri delle costruzioni in legno, a causa delle grandi dimensioni delle componenti utilizzate. È infatti difficile trovare all'interno del lotto uno spazio da poter recintare o chiudere in cui posizionare gli elementi. Questa tipologia di stoccaggio implica una grande capacità organizzativa per evitare di lasciare i pacchetti costruttivi alle intemperie per lunghi periodi.

I componenti devono essere posizionati in luoghi lontani dall'acqua stagnante e dall'umidità del suolo, infatti è preferibile posizionarli su cemento, ghiaia o macadam, ed il terreno deve avere una pendenza massima di 2°. Come per lo stoccaggio al chiuso devono essere rialzati dal suolo di almeno 300mm per evitare umidità di risalita.

Il materiale viene coperto da una pellicola per l'imballaggio in modo da proteggerlo da pioggia ed eventuali schizzi d'acqua, per non variare la percentuale di contenuto di umidità, possono essere posizionate anche grondaie per la protezione della pioggia. Inoltre, tale protezione ripara le superfici dai raggi UV che possono causare scolorimento e variazioni del colore. I teli vengono lasciati aperti sui lati corti in modo da favorire la circolazione dell'aria e sono posizionati in modo da poter essere ispezionati giornalmente per assicurare l'integrità dei pacchetti.



#### 4.2.3 TRASPORTO

Il materiale da costruzione viene trasportato in cantiere da camion spesso dotati di gru per facilitare lo scarico e ricollocamento. Possono essere praticati dei fori sui pannelli ai quali vengono collegate delle cinghie per il sollevamento per facilitarne lo spostamento.

Il materiale deve essere caricato longitudinalmente rispetto al camion per non farlo sporgere di lato. Oltre a ciò, per evitare le cadute non si impila mai il materiale e questo deve essere saldamente legato durante il trasporto. Si può inoltre aggiungere un ulteriore telo protettivo per evitare possibili infiltrazioni d'acqua dovute alla pioggia.

Il trasporto dei componenti che spesso hanno grandi dimensioni ha un grande impatto sul budget del progetto in quanto necessita di grandi mezzi di locomozione e permessi speciali per il transito su strade pubbliche.

Un altro mezzo può essere la barca se il trasporto su strada è impraticabile o pericoloso, questo metodo ha costi più bassi ma necessita di fornitori che dispongono di tali mezzi.

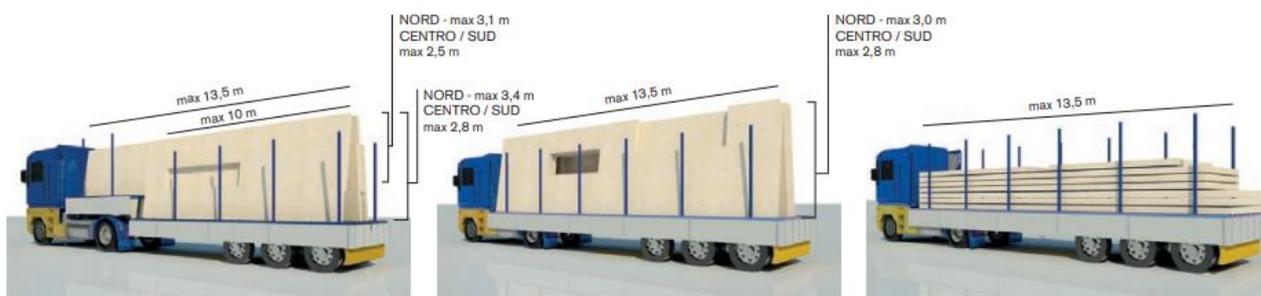


Figura 127. Rappresentazioni di un camion che trasporta elementi prefabbricati con le dimensioni massime.

(fonte: XLAM Dolomiti production, *The wood building r-evolution*,

[https://www.xlamdolomiti.it/assets/site/doc/Xlam\\_Dolomiti\\_Production.pdf](https://www.xlamdolomiti.it/assets/site/doc/Xlam_Dolomiti_Production.pdf))

#### 4.2.4 ACCORGIMENTI ON SITE

*“Be pro-active, not re-active. Protecting the CLT from getting wet in the first place, will contribute to an efficient build process.”<sup>28</sup>*

Diversi sono gli accorgimenti e i materiali che si possono utilizzare per impedire l’infiltrazione dell’acqua negli elementi e proteggerli.

Sicuramente la prima cosa da fare in caso di bagnatura è rimuovere l’acqua stagnante, poiché più tempo questa rimane su una superficie più verrà assorbita e tenderà a colare nelle giunzioni.

Avere un piano di controllo giornaliero dell’umidità che verifichi proprio la presenza di acqua liquida e di perdite è necessario quando si parla di edifici in legno. Infatti, il contenuto di umidità può variare a distanza di pochi giorni, le operazioni devono essere tempestive per non portare a conseguenze. In caso di bagnatura è necessario lasciare respirare il materiale in modo che si asciughi, quindi evitare di posizionare membrane impermeabili che possono trattenere l’umidità all’interno dell’elemento.

Nel caso in cui le condizioni ambientali non favoriscano l’asciugatura naturale si possono posizionare ventilatori che aiutino tale processo. In circostanze opposte, se l’ambiente in cui il materiale è posizionato è secco e caldo si possono formare delle crepe, in queste situazioni si possono posizionare degli umidificatori per regolare l’umidità interna.

Per entrambi gli apparecchi il getto d’aria non deve essere puntato direttamente sugli elementi lignei per non causare spaccature o condensa superficiale.

Sui pannelli in legno prefabbricati vengono utilizzati dei materiali che impediscono l’interazione con l’acqua, l’utilizzo di membrane, autoadesivi traspiranti e idrorepellenti è comune sulle superfici.

In particolare, sui bordi, che vengono definiti aree critiche perché assorbono l’acqua molto in fretta, vengono utilizzati sigillanti che sono un’ottima protezione durante la costruzione. Durante la vita utile dell’edificio proprio i giunti sono la parte dove si può maggiormente infiltrare l’acqua, per impedire ciò si possono utilizzare dei giunti nastrati, applicabili sia sul materiale secco che su bagnato.

Come già detto gli elementi umidi devono asciugarsi prima della chiusura. È consigliato comunque monitorare a diverse profondità il contenuto di umidità per verificare l’effettiva asciugatura del materiale poiché le tempistiche variano a seconda di specie legnosa, spessore del materiale ed ambiente.

Il progetto svedese Limnologen (vedi par. 3.2) è stato uno dei primi ad utilizzare tende per la protezione dagli agenti atmosferici. Infatti, la pioggia in cantiere è una delle principali cause di bagnatura del legno da costruzione.

Questa tipologia di prassi ha avuto un’alta diffusione nei paesi nordici, come Finlandia e Svezia, dove i costruttori dimostrano una particolare attenzione all’umidità on site.

**NOTE:**

<sup>28</sup>: StoraEnso, *Guide note – Moisture: Moisture management and storage on site*, 2021.

Le strutture temporanee, che vengono montate prima della costruzione dell'edificio, sono composte da tralicci in acciaio e una tenda che forma una copertura apribile. Può essere anche montata una gru interna che facilita lo spostamento dei componenti dell'edificio senza dover muovere la struttura per ogni operazione.



Figura 128. Fotografie delle strutture di copertura temporanee utilizzate in alcuni cantieri svedesi: A) Limnolgen (2009); B) Strandparken (2013); C) Åsbovägen (2015).  
(fonte: P. Landel, *Swedish Technical Benchmarking of Tall Timber Buildings*, RISE: Report 2018:67, 2018.)



## 4.3 PROSPETTIVE

L'aumento delle costruzioni in legno ha portato alla necessità di installare al loro interno un sistema di monitoraggio che garantisca l'integrità per tutta la vita utile dell'edificio.

Quando i componenti vengono monitorati dal momento in cui sono prodotti fino alla loro dismissione si può ridurre al minimo la possibilità di incorrere nel deterioramento del materiale dovuto all'aumento del contenuto di umidità, che può avere conseguenze non solo sulla salute strutturale ma anche su quella di chi utilizza tali spazi.

Nonostante la grande attenzione che si sta dando alla domotica e ai sistemi IoT, le tecnologie utilizzate per la sicurezza degli edifici sono ancora in fase sperimentale. Le lacune nei sistemi di monitoraggio odierni sono diverse:

- Le possibili interferenze sulle misurazioni: i sistemi che si basano sulle misurazioni tramite le proprietà elettriche e le onde sonore, possono registrare dei valori erronei per l'influenza di onde elettromagnetiche provenienti da altre fonti o di onde sonore e vibrazioni provenienti dall'ambiente esterno. È quindi necessario utilizzare cavi o sensori isolati correttamente per evitare possibili interferenze.
- L'alimentazione dei sensori: i sistemi possono ricevere corrente elettrica dall'impianto della casa o da una batteria. Nel primo caso ci possono essere registrazioni mancanti a causa dell'assenza di corrente nella struttura. Nel secondo è importante considerare la durata della batteria e il posizionamento dei sensori. È vero che le batterie odierne durano in media 10 anni e sono sostituibili, ma le sonde sono spesso installate in posti difficili da raggiungere, come nodi strutturali chiusi dalle finiture o nei massetti. Quando sono in queste posizioni la sostituzione della batteria diventa un'operazione invasiva e quindi è possibile che il proprietario dell'edificio preferisca non sostituirla. Questo implica lo spegnimento del sistema e che la struttura non sarà monitorata fino al termine di vita utile. Questo ragionamento può essere fatto anche per i possibili malfunzionamenti dei sensori.
- L'integrazione dei sensori nel processo produttivo: anche se è chiaro che l'installazione dei sensori in fabbrica porta dei notevoli vantaggi sul controllo qualitativo dei componenti lignei, solo alcuni grandi produttori si sono adoperati per integrare un sistema di monitoraggio sulla propria merce in modo da poter garantire le caratteristiche di fabbrica degli elementi per tutta la vita utile dell'edificio. Le aziende medio-piccole non hanno ancora integrato tali sistemi, ma sono i progettisti che fungono da anello di collegamento tra le aziende che producono il legname e quelle che producono i dispositivi di controllo. Data la fase sperimentale in cui ci troviamo, soprattutto in Italia, e l'andamento del mercato internazionale che si sta aprendo sempre di più a tali tecnologie, si prospetta una diffusione sempre più ampia.

Ai sistemi di monitoraggio interni sono a volte uniti alle stazioni meteorologiche che rilevano la temperatura esterna del lotto, l'umidità relativa e la direzione e la velocità del vento. L'associazione di questi dati può portare a comprendere il comportamento dell'edificio e scoprire se ci sono lacune nella progettazione.

Ragionamenti effettuati per l'edificio Cross Light House (vedi par. 3.9) e quelli che Wood Control sta effettuando in questo periodo su alcuni edifici, in cui è installato il sistema MyMeter, riguardano proprio gli indici che caratterizzano l'ambiente interno, quello esterno e il loro rapporto.

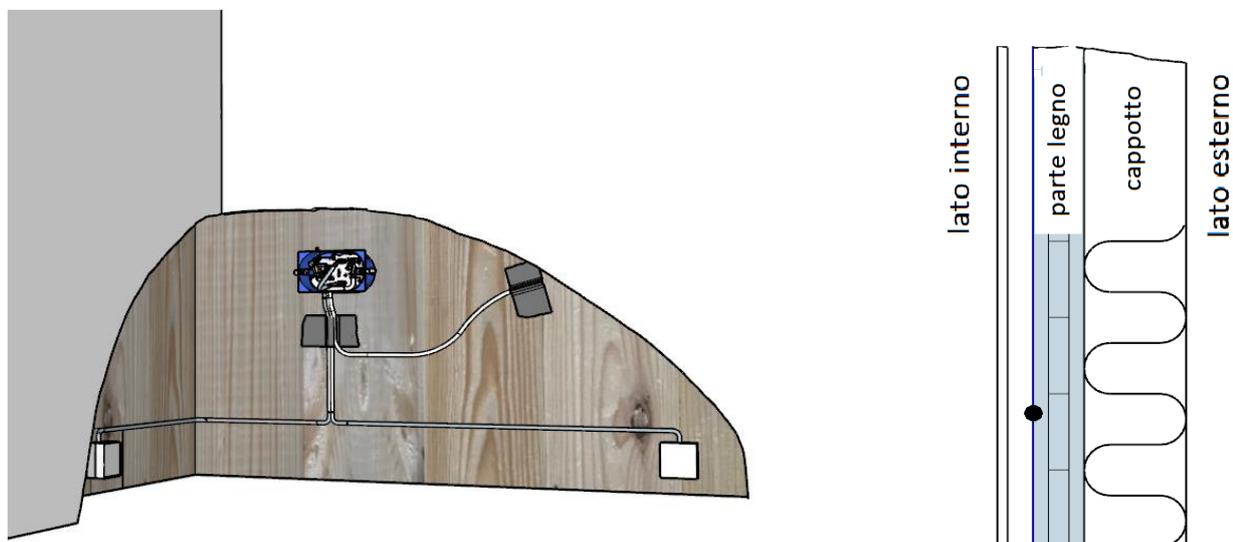


Figura 129. Render e stratigrafia in cui si vede dove sono stati installati i sensori in un edificio che utilizza MyMeter a Padova. Immagini elaborate da Diego Savio (responsabile commerciale di Wood Control)

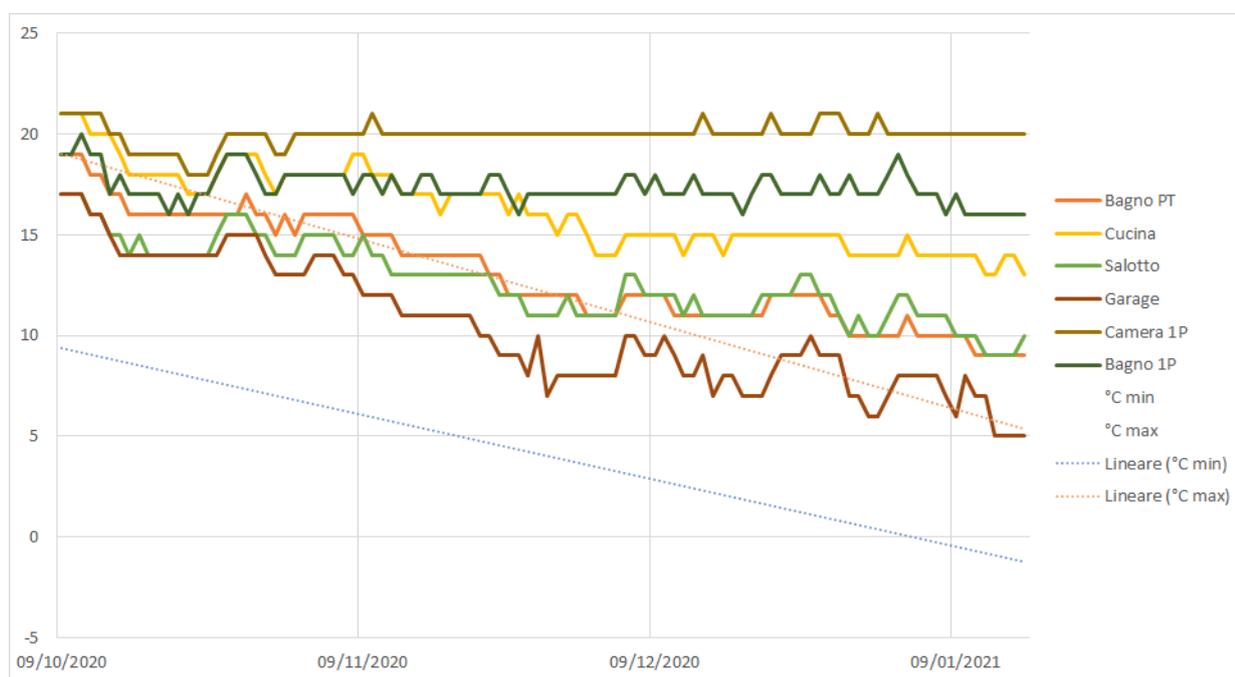


Figura 130. Grafico elaborato da Diego Savio (responsabile commerciale di Wood Control) in cui sono riportati i valori della temperatura misurata dai sensori installati in una struttura a Padova e delle temperature massime e minime esterne all'edificio nel periodo che va dal 09/10/2020 al 15/01/2021.

Si può notare che la T degli ambienti al piano primo rimane costante, mentre quella degli ambienti al piano terra decresce proporzionalmente all'abbassarsi delle temperature esterne. Secondo studi sul campo effettuati dall'azienda il comfort termico in tali ambienti (in cui  $T < 15^{\circ}\text{C}$  e  $T > 27^{\circ}\text{C}$ ) non è garantito a causa di una mal progettazione o un'errata posa degli elementi.

Appurato che il monitoraggio della temperatura e dell'umidità sono parametri che verificano il livello prestazionale nel tempo degli edifici si può dire che: un MC che dopo l'ultimazione della struttura in un primo periodo decresce e in seguito si stabilizza, e una T che rimane in un range costante tra i 15 e i 27°C nonostante le temperature esterne, sono il segnale di un edificio progettato correttamente.

In conclusione, con il concetto di qualità che in questo periodo sta diventando sempre più importante e l'implementazione dei marchi che garantiscono gli standard degli edifici, sta aumentando anche la necessità di installare tecnologie IoT per garantire le caratteristiche e la sicurezza delle strutture, riducendo al minimo i rischi dovuti alla marcescenza dei componenti.

L'incremento della conoscenza di questi sistemi e la collaborazione tra le aziende e i professionisti che costruiscono strutture in legno, sono necessari per la diffusione di questi prodotti e il miglioramento delle proprietà e degli impianti. Ma è altrettanto necessaria la stesura di un programma a livello europeo che illustri una prassi da attuare durante il trasporto e il cantiere, per eliminare il problema delle infiltrazioni e delle bagnature alla base. Il lavoro è ancora lungo, ma il fine di tale ricerca è necessario per garantire la salute delle abitazioni e di chi vi risiede.



## BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

### CAPITOLO 2

#### BIBLIOGRAFIA:

L. M. Hernandez Ramos, (2019), *Structural Health Monitoring through the Building Information Modelling*, tesi di laurea magistrale in Ingegneria Civile, Politecnico di Torino, Torino.

M. A. Mahmud, K. Bates, T. Wood, A. Abdelgawad and K. Yelamarthi, *A complete Internet of Things (IoT) platform for Structural Health Monitoring (SHM)*, IEEE 4th World Forum on Internet of Things (WF-IoT), 2018, pp. 275-279, doi: 10.1109/WF-IoT.2018.8355094.

Pedro Palma, René Steiger, *Structural health monitoring of timber structures – Review of available methods and case studies*, Construction and Building Materials, 2020, Volume 248, 118528, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118528>.

S.A.L.E. (a cura di), *Linee guida per il monitoraggio strutturale degli edifici in legno*, 2016.

A. Sofi, J. Jane Regita, Bhagyesh Rane, Hieng Ho Lau, *Structural health monitoring using wireless smart sensor network – An overview*, Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, Volume 163, 108113, ISSN 0888-3270, <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2021.108113>.

Jieying Wang, Senior Scientist, Advanced Building Systems, *Guide for On-site Moisture Management of Wood Construction*, in BC Housing, Marzo 2016.

#### SITOGRAFIA:

Logica H&S: Sistemi di controllo (<https://www.logica-hs.it/sistemidicontrollo>)

Omnisens: Homepage (<https://www.omnisense.com/>)

SMT: Homepage (<https://www.smtresearch.ca/>)

Wiste: Homepage (<https://www.wiiste.com/en>)

Woodcontrol: Homepage (<https://woodcontrol.eu/>)

Woodsense: Homepage (<https://www.woodsense.com/>)

### CAPITOLO 3

#### LIMNOLOGEN

#### BIBLIOGRAFIA:

T. Reynolds, R. Harris, Chang, *Ambient Vibration Testing and Modal Analysis of Multi-Storey Cross-Laminated Timber Buildings*. in World Conference on Timber Engineering (WTCE), Quebec City, Canada, 10-14 agosto 2014.

A. Rosenkilde, K. Jarnero, M. Axelson, *Flervåningshus med trästomme – Uppföljning av Kv Limnologen och Kv Rya, Rydebäck*, SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, Rapport 2018.

E. Serrano, *Limnologen- Experiences from an 8-storey timber building*, International Houlzbau – forum, 2009.

E. Serrano, *Overview and Summaries of Sub Projects Results*. Växjö University, 2008.

Xiong Yu, Z., Su Xin, R. and Sabri, O. *Vertical Displacements in Medium-rise Timber Buildings*, tesi di magistrale in “Technology and Design”, Växjö University 2009, TD 061/2009.

#### SITOGRAFIA:

Arkitektbolaget: Limnologen (<https://arkitektbolaget.se/projekt/limnologen/>)

Limnologen: Homepage (<https://limnologen.se/>)

Martinsons: Limnologen – Vaxjo (<https://martinsons.se/project/limnologen-va%cc%88xjo%cc%88/>)

JTB World: 8 levels wood buildings (<https://blog.jtbworld.com/2010/10/8-levels-wood-buildings.html>)

## HOUSE OF NATURAL RESOURCES

### BIBLIOGRAFIA:

C. Leyder, E. Chatzi, A. Frangi, a. (2016), *Structural health monitoring of an innovative timber building*, in International Conference on Performance-based and Life-cycle Structural Engineering, Brisbane, QLD, Australia, 9-11 december 2015, DOI: 10.14264/uql.2016.299.

### SITOGRAFIA:

ETH Zurich: House of Natural Resources (<https://honr.ethz.ch/>)

ETH Zurich: Research lab made of hard-wood (<https://ethz.ch/en/news-and-events/eth-news/news/2014/07/forschungslabor-aus-laubholz.html>)

## BROCK COMMONS TALLWOOD HOUSE

### BIBLIOGRAFIA:

F. Calderon (2018), *Quality control and quality assurance in hybrid mass timber high-rise construction: a case study of th Brock Commons*, tesi di laurea magistrale in Civil Engineering, University of British Columbia, Vancouver.

G. Mustapha, K. Khondoker, J. Higgins, *Moisture performance and vertical movement monitoring of pre-fabricated cross laminated timber – featured case study: UBC Tallwood House*, in 15° Canadian Conference on Building Science and Technology (CCBST), 6-8 november 2017.

E. Poirier, M. Moudgil, A. Fallahi, S. Staub-French, T. Tannert, *Design and construction of a 53-meter-tall timber building at the University of British Columbia*, in World Conference on Timber Engineering 2016 (WCTE), 22-25 august 2016, Vienna, Austria.

UBC, *Operational performance of cross laminated timber: Brock Commons Tallwood House*, (2020) (<https://sustain.ubc.ca/sites/default/files/UBC%20Brock%20Commons%20Structural%20Performance%20Report%20Sept%202020.pdf>).

Wood Works, *Brock Commons Tallwood House: a case study*, 2019, ([https://cwc.ca/wp-content/uploads/2019/03/CS-BrockCommon.Study\\_.23.pdf](https://cwc.ca/wp-content/uploads/2019/03/CS-BrockCommon.Study_.23.pdf))

Wood Works, *Brock Commons Tallwood House: construction overview*, 2018 ([https://wood-works.ca/wp-content/uploads/brock\\_commons\\_-\\_construction\\_overview.pdf](https://wood-works.ca/wp-content/uploads/brock_commons_-_construction_overview.pdf)).

V. Zegarac Leskovar, M. Premrov, *A review of architectural and structural design typologies of multi-storey timber buildings in Europe*, in Forest (2021), 12, 757, (<https://doi.org/10.3390/f12060757>).

### SITOGRAFIA:

Acton Ostry Architects Inc: Brock Commons Tallwood House (<https://www.actonostry.ca/project/brock-commons-tallwood-house/>)

Archdaily: Inside Vancouver's Brock Commons, the World's Tallest Mass Timber Building (<https://www.archdaily.com/879625/inside-vancouvers-brock-commons-the-worlds-tallest-timber-structured-building>)

Archello: Brock Commons Tallwood House (<https://archello.com/it/project/brock-commons-tallwood-house>)

Canadian Architect: Standing Tall: Brock Commons Tallwood House, University of British Columbia, Vancouver (<https://www.canadianarchitect.com/brock-commons-acton-ostry-standing-tall/>)

HK Architekten: Student Residence at Brock Commons (<https://www.hkarchitekten.at/en/project/student-residence-at-brock-commons/>)

Naturally Wood: Brock Commons Tallwood House: Construction Overview Case Study (<https://www.naturallywood.com/resource/brock-commons-tallwood-house-construction-overview-case-study/>).

Think Wood: Brock Commons Tallwood House (<https://www.thinkwood.com/projects/brock-commons-tallwood-house>).

## CARBON 12

### BIBLIOGRAFIA:

Presentazione al concorso US Tall Wood Building Prize 2014 dell'azienda Kaiser+PATH, 2014.

S. Kordziel, S. V. Glass, S. Pei, S. L. Zelinka, P.C. Tabares-Velasco, *Moisture monitoring and modeling of mass timber building systems*, in World Conference of Timber Engineering (WTCE), Seoul, Republic of Korea, 20-23 August 2018.

S. Kordziel, *Study of moisture conditions in a multi-story mass timber building through the use of sensors and wufi hygrothermal modeling*, tesi magistrale, Colorado School of Mines, 2018, relatore: Dr. Shiling Pei.

S. L. Zelinka, S. Kordziel, S. Pei, S. V. Glass, P.C. Tabares-Velasco, *Moisture monitoring throughout the construction and occupancy of mass timber buildings*, in Proceedings of the 1st International Conference on New Horizons in Green Civil Engineering, Victoria, BC, Canada, 25-27 April 2018; No. 3 pp. 25-28.

### SITOGRAFIA:

Building Carbon 12: A Leap Into the Unknown (<https://buildingcarbon12.com/design-and-approval/>).

Carbon 12: Homepage (<https://www.carbon12pdx.com/>).

KAISER+PATH: Carbon 12 (<https://www.kaiserpath.com/carbon12>).

Munzing: Carbon12 (<https://www.mstructural.com/portfolio/carbon12/>).

Next Portland: Design approved for first tall cross-laminated timber building in America (images) (<https://www.nextportland.com/2016/01/27/carbon12-approved/>).

Think Wood: Carbon 12 (<https://www.thinkwood.com/projects/carbon12>).

## PEAVY HALL

### BIBLIOGRAFIA:

E. J. Baas, (2020), *A methodological approach for structural health monitoring of mass-timber buildings under construction*, tesi di laurea magistrale in "Civil Engineering and Wood Science, Oregon State University, Corvallis, Oregon, USA.

E. J. Baas, M. Riggio, A. R. Barbosa, *Structural health monitoring data collected during construction of mass-timber building with a data platform for analysis*, Construction and Building Materials, Volume 268, 25 January 2021, Pages 121153, DOI: 10.1061/j.dib.2021.106845

E. J. Baas, M. Riggio, A. R. Barbosa, I. Mugabo, E. Schmidt, *Living lab at Peavy Hall: structural health monitoring of mass timber buildings*, in 5° International Conference on Structural Health Assessment of Timber Structures (SHATIS), 25-27 settembre 2019, Gulmaraes, Portogallo.

M. Riggio, E. Schmidt, G. Mustapha, *Moisture monitoring data of mass timber elements during prolonged construction exposure: The case of the Forest Science Complex (Peavy Hall) at Oregon State University*, Built Environ, 2019, 5, 98, DOI: 10.3389/fbuil.2019.00098

E. Schmidt, M. Riggio, *Monitoring moisture performance of cross-laminated timber building elements during construction*, Buildings, 2019, 9, 144; DOI: 10.3390/buildings9060144

### SITOGRAFIA:

ArcHello: Oregon Forest Science Complex (<https://archello.com/it/project/oregon-forest-science-complex>)

ArchDaily: Oregon Forest Science Complex / Michael Green Architecture (<https://www.archdaily.com/958332/oregon-forest-science-complex-michael-green-architecture>)

Michael Green Architecture: OSU College of Forestry (<http://mg-architecture.ca/work/osu-forest-science-complex/>)

Oregon State University: College of Forestry – Oregon Forest Science Complex (<https://www.forestry.oregonstate.edu/ofsc/homepage>)

Passione Design: L'Oregon Forest Science Complex di Michael Green Architecture (<https://www.passionedesign.it/news-design/2021/03/18/loregon-forest-science-complex-di-michael-green-architecture/>)

Today Oregon State: Public invited to groundbreaking celebration for Oregon Forest Science Complex (<https://today.oregonstate.edu/archives/2016/oct/public-invited-groundbreaking-celebration-oregon-forest-science-complex>)

Wood Works: Oregon State University Forest Science Complex (<https://www.woodworks.org/project/oregon-state-university-forest-science-complex/>)

World Architects: Oregon Forest Science Complex (<https://www.world-architects.com/en/architecture-news/works/oregon-forest-science-complex>)

## ADOHI HALL

### BIBLIOGRAFIA:

E. Poblete (2020), *Moisture monitoring of a CLT structure in a Southern Climate*, tesi di magistrale in Science in Civil Engineering, da (<https://scholarworks.uark.edu/etd/3873>).

### SITOGRAFIA:

Archdaily: Leers Weinzapfel Associates + Modus Studio + Mackey Mitchell Architects + OLIN (<https://www.archdaily.com/931692/adohi-hall-leers-weinzapfel-associates-plus-modus-studio-plus-mackey-mitchell-architects-plus-olin>).

Archello: Adohi Hall (<https://archello.com/it/project/adohi-hall>).

Architect Magazine: Timber abounds at the University of Arkansas Adohi Hall ([https://www.architectmagazine.com/technology/architectural-detail/timber-abounds-at-the-university-of-arkansas-adohi-hall\\_o](https://www.architectmagazine.com/technology/architectural-detail/timber-abounds-at-the-university-of-arkansas-adohi-hall_o)).

Leerc Weinzapfel Associates: Adohi Hall (<https://www.lwa-architects.com/project/university-arkansas-stadium-drive-residence-halls/>).

Modus Studio: Adohi Hall (<http://www.modusstudio.com/projects/adohi-hall>).

OLIN Studio: University of Arkansas Adohi Hall (<https://www.theolinstudio.com/university-of-arkansas-adohi-hall>).

The Plan: Adohi Hall, University of Arkansas, a pioneering use of CLT and an innovative approach to live-learn communities (<https://www.theplan.it/award-2021-housing/adohi-hall-university-of-arkansas-a-pioneering-use-of-clt-and-an-innovative-approach-to-live-learn-communities-leers-weinzapfel-associates>).

University of Arkansas: Adohi Hall (<https://housing.uark.edu/halls/adohi-hall.php>).

University of Arkansas: Researchers Study Behavior of Cross-Laminated Timber Panels in New Hall (<https://news.uark.edu/articles/49879/researchers-study-behavior-of-cross-laminated-timber-panels-in-new-hall>).

## FINNISH RUSSIAN SCHOOL

### SITOGRAFIA:

AFKS: Finnish-Russian School (<https://afks.fi/projects/finnish-russian-school-2/#>)

ALA: Finnish-Russian School (<https://ala.fi/work/finnish-russian-school/>)

StoraEnso: News: Wood construction developing through cooperation (<https://www.storaenso.com/en/newsroom/news/2020/2/wood-construction-is-developing-through-cooperation>)

CROSS LIGHT HOUSE

SITOGRAFIA

CasaClima: Home (<https://www.agenziacasaclima.it/it/home-1.html>)

Gardenia: Home (<https://www.gardeniasrl.com/>)

Gardenia: Aggiornamenti dai cantieri (<https://www.gardeniasrl.com/category/aggiornamenti-dai-cantieri/>)

Gardenia: Cantieri: Appartamenti CrossLightHouse  
(<https://www.gardeniasrl.com/cantieri/appartamenti-crosslighthouse/>)

Panasonic: Crosslight House ([https://www.aircon.panasonic.eu/IT\\_it/cases/case/crosslight-house/](https://www.aircon.panasonic.eu/IT_it/cases/case/crosslight-house/))

## CAPITOLO 4

IFRC (a cura di), *Timber: A guide to the planning, use, procurement and logistics of timber as a construction material in humanitarian relief*, 2010.

P. Landel, *Swedish Technical Benchmarking of Tall Timber Buildings*, RISE: Report 2018:67, 2018.

StoraEnso, *Guide note – Moisture: Moisture management and storage on site*, 2021.

XLAM Dolomiti production, *The wood building r-evolution*,  
([https://www.xlamdolomiti.it/assets/site/doc/Xlam\\_Dolomiti\\_Production.pdf](https://www.xlamdolomiti.it/assets/site/doc/Xlam_Dolomiti_Production.pdf)).

Per approfondimenti sul legno e sulla durabilità del materiale si consigliano alcune letture:

Ufficio Tecnico Assolegno (a cura di), *Appunti per le costruzioni in legno: normative, progettazione e buone pratiche di cantiere*, 2017.

A. Bernasconi, G. Schickhofer, G. Traetta, *I prodotti di legno per la costruzione*, Promo Legno, 2005.

M. Follesa, M. P. Lauriola, M. Moschi, *Durabilità e manutenzione delle strutture di legno*, Ticom, Milano, 2011.

G. Giordano, Cerotti, Ario, L. Uzielli, *Tecnica delle costruzioni in legno*, Milano, Hoepli, 1999.

H. Kaufmann, S. Krotsch, S. Winter, *Manual of multi-storey timber construction*, Munich, Detail, 2018.

F. Laner, *Durabilità e manutenzione delle strutture in legno*, Milano, Promo Legno, 2005.

F. Laner, *Il legno: materiale e tecnologia per progettare e costruire*, Torino, UTET scienze tecniche, 2013.



## RINGRAZIAMENTI

Vorrei dedicare questo spazio a chi ha contribuito alla realizzazione di questo elaborato e a chi mi ha accompagnato in questo percorso.

Un ringraziamento particolare al mio relatore Giudo Callegari per il supporto e la disponibilità fin dalla scelta dell'argomento.

Grazie anche al mio correlatore Paolo Simeone per i consigli e suggerimenti sulle giuste modifiche da apportare alla mia tesi.

Ringrazio i professionisti che mi hanno aiutato nel reperimento dei materiali, Diego Savio di Wood Control, Claudio Bellocchio e Lorenzo Zamagni di Gardenia e Maria Milita di Stora Enso. Grazie per la vostra disponibilità, la cortesia e per avermi trasmesso le conoscenze utili alla stesura dell'elaborato.

Ringrazio infinitamente mia madre e mio padre che mi hanno permesso di frequentare l'università, di vivere lontano da casa e di arrivare fin qui. Li ringrazio per il conforto, l'amore, le litigate e le immancabili chiamate serali. Per avermi trasmesso la loro forza e per esserci sempre stati.

Ringrazio la mia famiglia, mio fratello Matteo, mia suocera Gianna, le mie cugine Nicla e Denise, le mie zie e i nonni, che mi sono sempre stati vicini e mi hanno ascoltato e supportato. Avere una famiglia unita è sempre stato un grande vanto per me.

Ringrazio le mie compagne di viaggio: Claudia e Rachele per il supporto morale, i consigli e le risate. Cristina che nel periodo del lockdown è stata la mia coinquilina virtuale e compagna di ansia anche durante le nottate al computer.

I miei amici, in particolare Paola, Alina, Silvia e Alessandra, per gli aperitivi, i brindisi, i balli e le ore di spensieratezza passate insieme.

Grazie a Marco, il mio compagno di vita, che mi ha aiutato, amato e confortato in questo periodo che tra lo studio e il Covid è stato difficile ed impegnativo. Grazie per non avermi ucciso nel sonno, ma di avermi sopportato in questa partenza col botto.

Infine, dedico questa tesi a me stessa, per un corso di laurea fatto tra le mura di casa, su un divano che ha preso la mia forma, per la testardaggine e la cervicale, per non aver mollato e per essere arrivata a questo traguardo.

Grazie.

