

# PERFORMANCE ASSESSMENT AND POST-OCCUPANCY MONITORING OF A POLYURETHANE-BASED BUILDING ENVELOPE

*The case of an energy-efficient kindergarten in Mediterranean climate*

*Leidy Guante Henriquez, Ing., Ph.D. Student SUPSI – Politecnico di Milano (DABC)*

*Chiara Marchionni, Ing., RTDa Università degli Studi dell'Aquila (DICEAA)*



**GRUPPO DI RICERCA:** *Prof.ssa Marianna ROTILIO, Università degli Studi dell'Aquila (DICEAA)*

*Leidy Guante Henriquez, SUPSI – Politecnico di Milano (DABC)*

*Grazia Marrone, Politecnico di Milano (DABC)*

*Chiara Marchionni, Università degli Studi dell'Aquila (DICEAA)*

Scuola universitaria professionale  
della Svizzera italiana

**SUPSI**



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DELL'AQUILA



**POLITECNICO**  
MILANO 1863

# Premessa

## *Gap di ricerca*

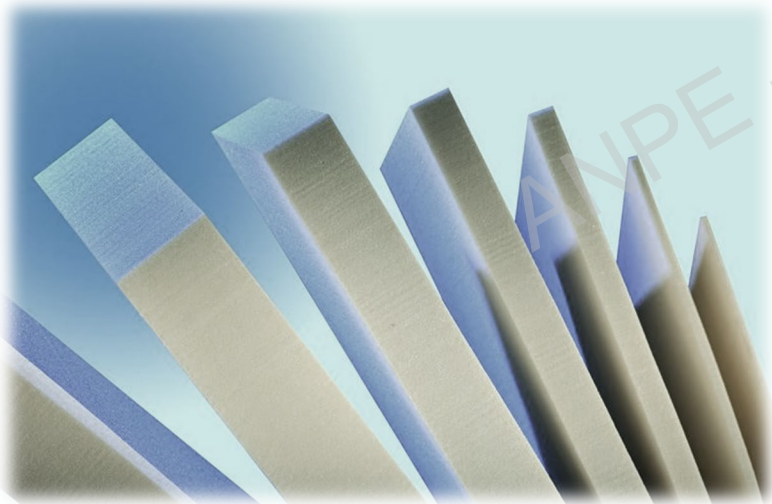
- Necessità di ridurre l'impatto ambientale delle costruzioni e dei materiali impiegati
- Assenza di conoscenza della consistenza dell'ambiente costruito (problema amplificato in caso di edifici pubblici e a destinazione scolastica)
- Mancanza di conoscenza del comportamento reale dell'ambiente costruito
- Assenza di strumenti di valutazione ex post per verificare l'efficacia delle soluzioni progettuali adottate
- Incapacità nell'identificazione dei rischi in tempo reale
- Scarso o assente coinvolgimento dell'utente e dell'ente gestore/proprietario



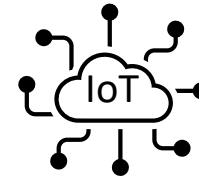
# Premessa

## Definizione obiettivi

Il presente lavoro illustra una metodologia di ricerca finalizzata alla valutazione delle prestazioni e al monitoraggio post-occupazione di un edificio scolastico progettato con criteri di alta efficienza energetica situato in un clima mediterraneo, caratterizzato da un sistema costruttivo a secco che prevede l'utilizzo di pannelli sandwich in **poliuretano espanso rigido**



FOCUS DI RICERCA:  
AMBIENTE COSTRUITO CARATTERIZZATO DALL'UTILIZZO DI  
TECNOLOGIE COSTRUTTIVE A SECCO E POLIURETANO  
ESPANSO RIGIDO



Definizione di un approccio metodologico  
per la sicurezza ed il benessere  
Dell'ambiente costruito con il supporto  
delle tecnologie emergenti

# Metodologia di ricerca

Focus sulla verifica dell'impiego di poliuretano espanso rigido per la costruzione efficiente

## FASE 1: PROCESSO DI REVERSE ENGINEERING

- Analisi elaborati di progetto
- Esecuzione eventuale campagna prove non distruttive
- Ricostruzione caratteristiche tecnologiche e costruttive dell'edificio

## FASE 2: APPLICAZIONE DEL PROTOCOLLO ACTIVE HOUSE

- Calcolo dei 9 parametri che costituiscono il protocollo
- Elaborazione del Radar prestazionale
- Analisi critica potenzialità e criticità edificio

## FASE 3: CAMPAGNA DI MONITORAGGIO CONTINUO

- Progettazione rete di sensori per la gestione mediante piattaforma
- Definizione delle modalità di alert in tempo reale
- Raccolta ed elaborazione dati

## FASE 4: FACILITY MANAGEMENT E SCENARI DI FINE VITA

- Verifica del comportamento stabile del materiale
- Protocollo finalizzato al FM
- Scenari di fine vita sostenibili



**Validazione su caso di studio**





**Fase 1: Processo di reverse engineering**



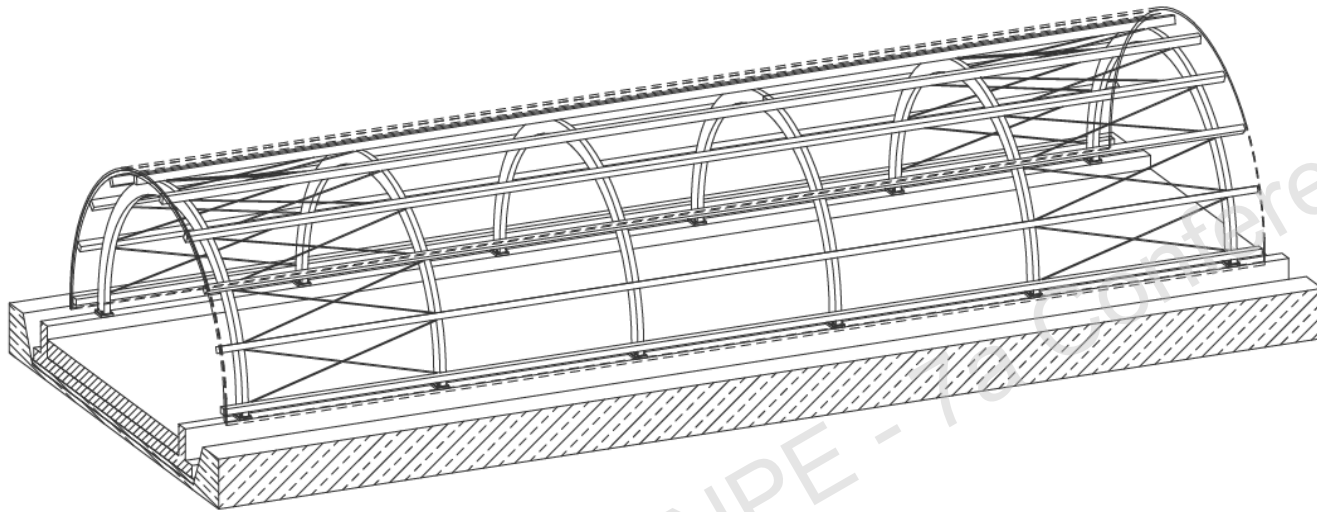
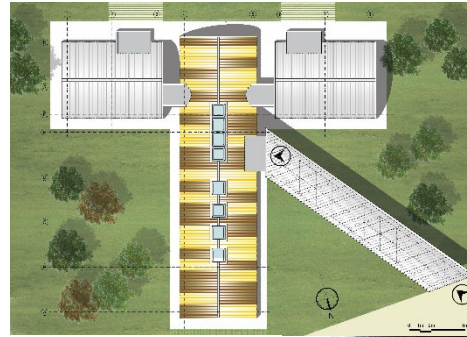
La ludoteca APE TAU è stata realizzata a L'Aquila, località Coppito, in seguito al terremoto del 2009 e rappresenta un esempio significativo dell'applicazione di tecnologie edilizie industrializzate ad alte prestazioni in contesti di emergenza. Simbolo di rinascita, è stata costruita grazie ad una serie di donazioni, in un'area precedentemente destinata a parco, utilizzata nell'emergenza post-terremoto per la costruzione di una tendopoli.



L'edificio è stato ufficialmente riaperto il 13 luglio 2023, dopo un periodo di inutilizzo, come sede di un progetto educativo e sociale che combina un asilo e un presidio sociale per bambini e famiglie. L'associazione Brucaliffo è stata leader del progetto, finanziato dal PNRR, in collaborazione con altre realtà del territorio. A conclusione del progetto, l'edificio è stato destinato a ludoteca comunale.

# Reverse engineering

## *Sistema costruttivo*



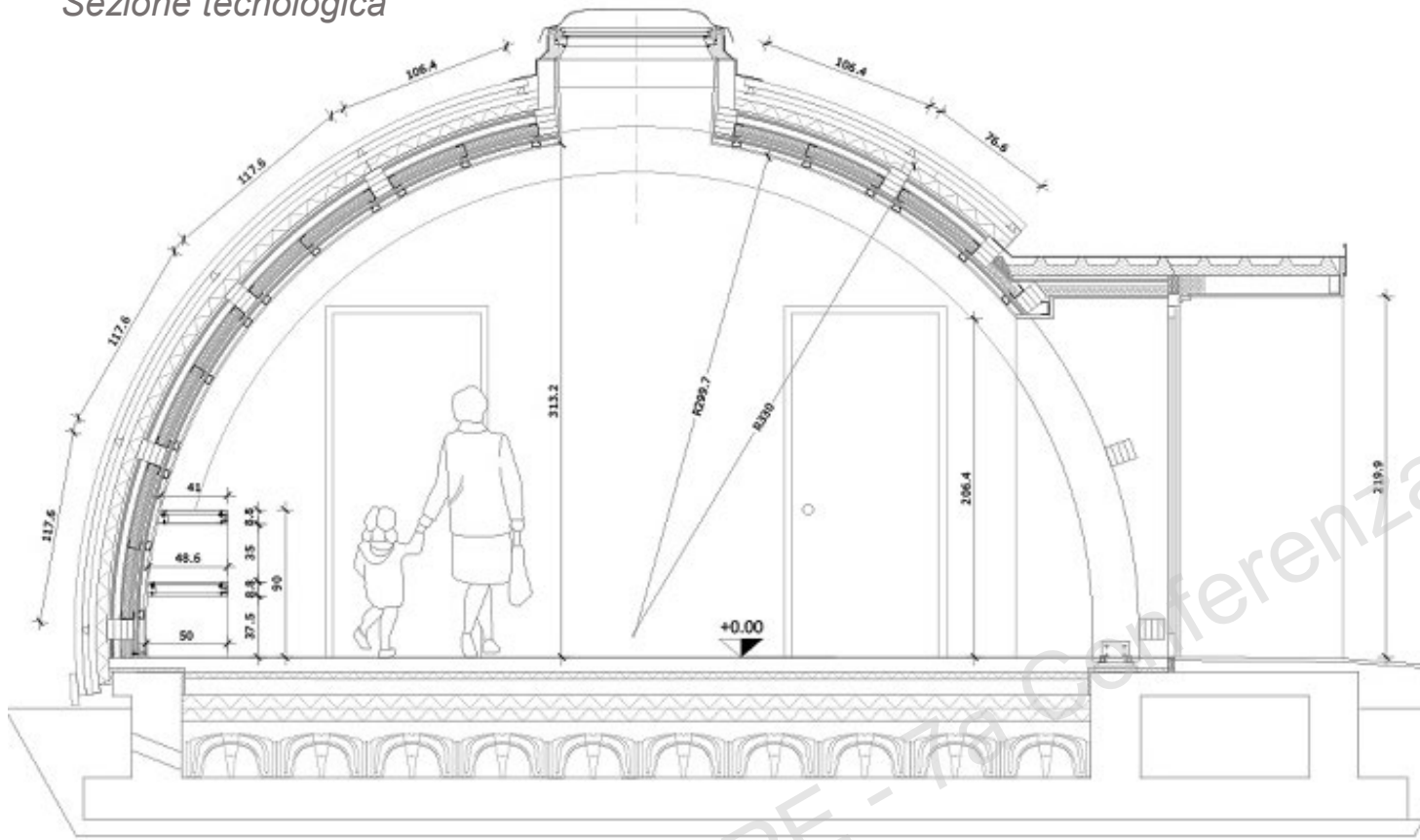
Struttura interamente realizzata a secco con centinature portanti e sottostrutture in legno e acciaio zincato. Scelta di materiali strutturali leggeri volta all'ottimizzazione del comportamento in ambito sismico.

Sistema portante differenziato:

- legno per il corpo centrale
- acciaio zincato per aule e corpi di collegamento



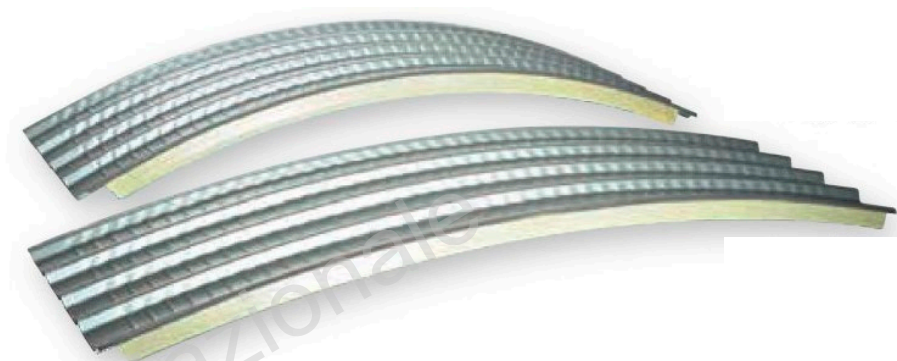
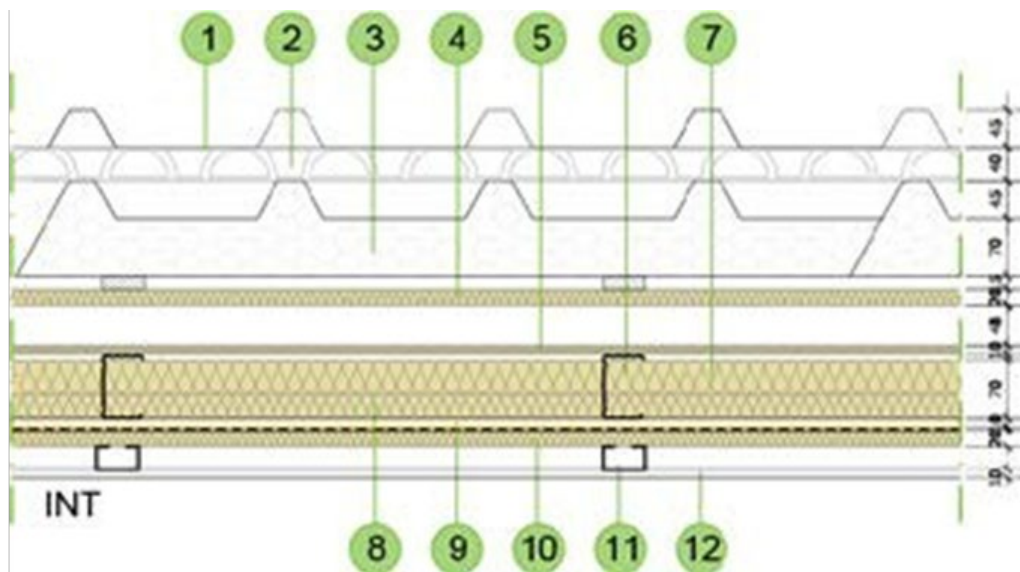
## Sezione tecnologica



Involucro realizzato con tecnologia completamente a secco e stratigrafie ad alte prestazioni termo-acustiche:

- Sistema superisolante riflettente multistrato a basso spessore.
- Trasmittanza dell'involucro pari a  $0,18 \text{ W/m}^2\text{K}$ .
- Integrazione di soluzioni fonoassorbenti per la riduzione di eco e riverbero negli ambienti interni.





- 1 Lamiera grecata in acciaio preverniciato
- 2 Profilo di fissaggio (Tipo: Isotec Parete - Brianza Plastica)
- 3 Pannello sandwich (Tipo: Elycop - Brianza Plastica) sp. 70mm+45mm
- 4 Sistema superisolante riflettente (Tipo: Actis Trisolaine) + fissato su stocchetti in legno e sigillato con apposito nastro in corrispondenza del perimetro e dei giunti
- 5 Lana di vetro spianata dens. 85kg/mc sp. 10mm
- 6 Struttura controsoffitto autoportante per grandi luci curvo (Tipo: Knaufixy) +C75mm
- 7 Lana minerale 70kg/mc sp. 40mm
- 8 Poliestere dens. 20kg/mc sp. 30mm
- 9 Lastra in gesso rivestito con barriera al vapore assoluta sp. 12.5mm
- 10 Lana minerale dens. 20kg/mc sp. 20mm
- 11 Struttura 50x27 con fissaggio univesrale
- 12 Lastra in gesso rivestito (Tipo: A-GKB o forata 8/15/20) sp. 12.5mm





## Active House Assessment

# Active House Assessment

La prima Active House de L'Aquila: Ape Tau



## I criteri del protocollo Active House

### Comfort

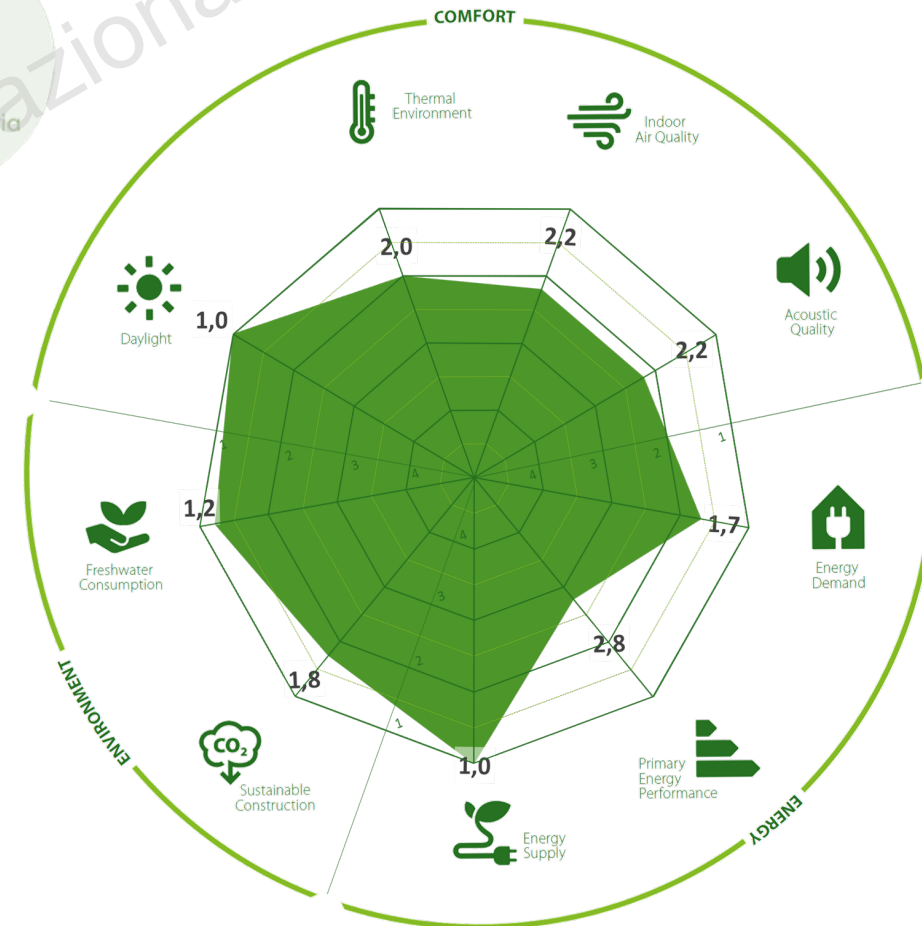
- Luce Naturale
- Temperatura degli ambienti
- Qualità dell'aria all'interno degli ambienti
- Qualità acustica

### Energia

- Domanda di energia
- Approvvigionamento energetico
- Prestazione energetica

### Ambiente

- Edilizia sostenibile, contenenti materiale riciclato e carichi ambientali
- Consumo di acqua



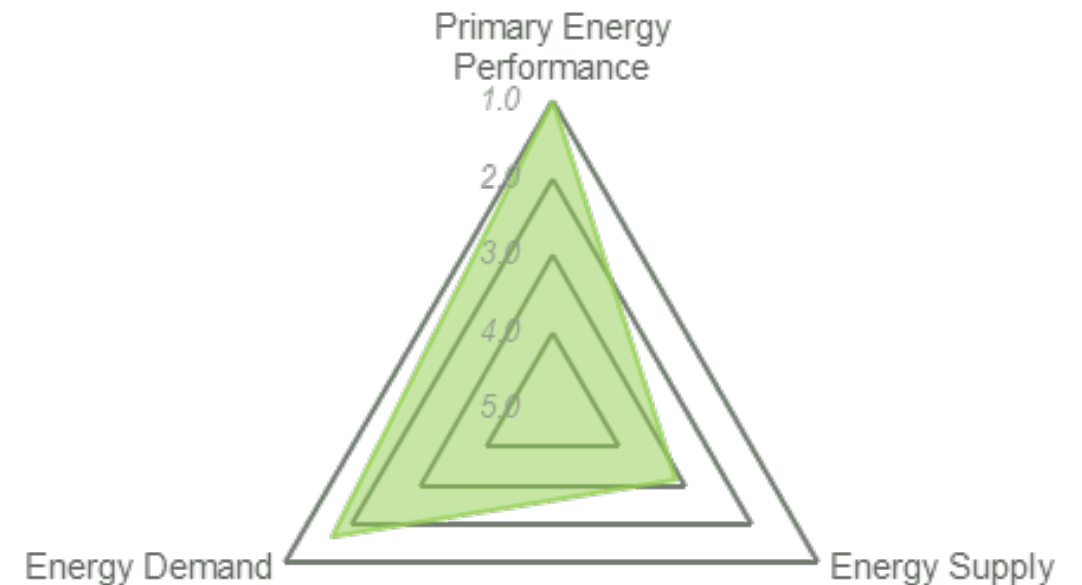
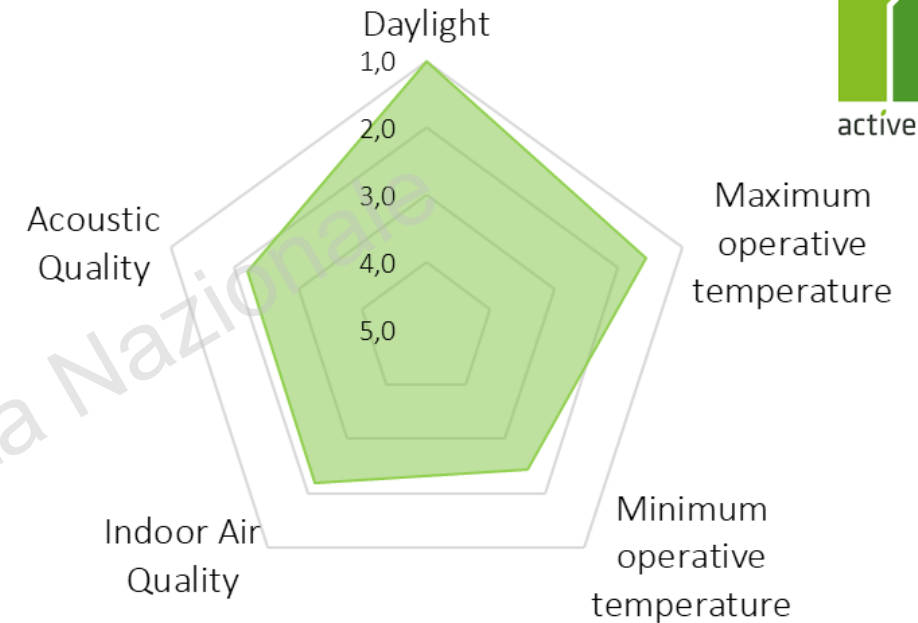
# Active House Assessment

## Comfort ed Energia

L'asilo APE TAU garantisce elevati livelli di comfort interno grazie a un'ottima illuminazione naturale, condizioni termiche stabili, buona qualità dell'aria e bassi livelli di rumorosità.



L'asilo APE TAU riduce i consumi grazie a un involucro efficiente e completa le sue prestazioni energetiche sfruttando geotermia e fonti rinnovabili locali. Una strategia che combina riduzione del fabbisogno e produzione pulita.



# Active House Assessment

## Comfort - *Luce Naturale*



L'elevato impiego di lucernari strategicamente distribuiti, garantisce una diffusione omogenea della luce naturale negli ambienti.

Il punteggio finale per la **luce diurna** della ludoteca APE TAU è pari a **1.0**.



### Risultati simulazioni luce diurna (DF) con VELUX Daylight Visualizer

Zona	Risultati simulazioni	Media DF [%]	F <sub>plane</sub> ,% [%]	Punteggio [-]
Zona riposo (sx)		3,74	98,68	1
Zona riposo (dx)		3,53	96,99	1
Aula (sx)		3,26	83,33	1
Aula (dx)		3,43	96,51	1
Sala accoglienza		3,74	3,74	1
Cucina		2,67	95,89	1

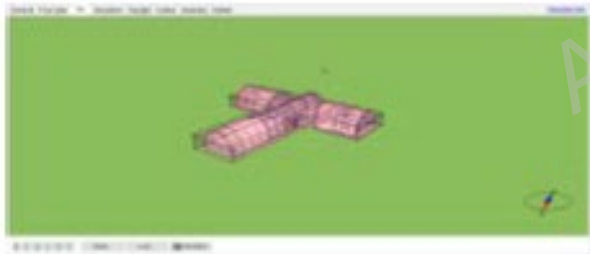
# Active House Assessment

## Comfort – *Comfort termico*

Il comfort termico, valutato tramite simulazioni dinamiche, evidenzia temperature interne generalmente comprese tra 20 e 26 °C durante l'anno. L'equilibrio tra ventilazione naturale – tramite aperture strategicamente posizionate - e sistemi impiantistici consente di limitare il surriscaldamento estivo e garantire condizioni di comfort stabile negli ambienti occupati.

Il punteggio finale per il **comfort termico** della ludoteca APE TAU è pari a **1.8**.

 IDA ICE



1. Importazione del modello e definizione delle zone calde e fredde



2. Assegnazione dei materiali alle superfici dei pavimenti, muri, elementi di ombreggiatura



# Active House Assessment

## Comfort – *Qualità dell'aria interna*

Grazie ai sistemi di ventilazione meccanica controllata e alle strategie progettuali di ventilazione naturale, è stato possibile ottenere ottimi risultati in relazione a questo criterio.

Il punteggio finale per la **qualità dell'aria interna** della ludoteca APE TAU è pari a **2.2**.

# Active House Assessment

## Energia – Fabbisogno energetico

Il punteggio finale per il **fabbisogno di energia** della ludoteca APE TAU e pari a **1.7**.

Domanda di energia	Punteggio	
Riscaldamento degli ambienti	16,6	kWh/m <sup>2</sup>
Acqua calda sanitaria	15,8	kWh/m <sup>2</sup>
Consumo di elettricità sistema di riscaldamento	0,0	kWh/m <sup>2</sup>
Ventilazione	2,2	kWh/m <sup>2</sup>
Raffreddamento	14,6	kWh/m <sup>2</sup>
Sistemi di controllo	0,0	kWh/m <sup>2</sup>
Illuminazione	4,8	kWh/m <sup>2</sup>
Consumo energetico dell'edificio	54,0	kWh/m <sup>2</sup>
PUNTEGGIO MEDIO TOTALE	1,7	



**Il fabbisogno energetico totale è di 54,0 kWh/m<sup>2</sup>**

ASPECT	VALUE	CRITERIA	SCORE
<b>Annual energy demand - building</b>		1. < 40 kWh/m <sup>2</sup> 2. < 60 kWh/m <sup>2</sup> 3. < 80 kWh/m <sup>2</sup> 4. < 100 kWh/m <sup>2</sup>	



# Active House Assessment

## Energia – Fabbisogno energetico

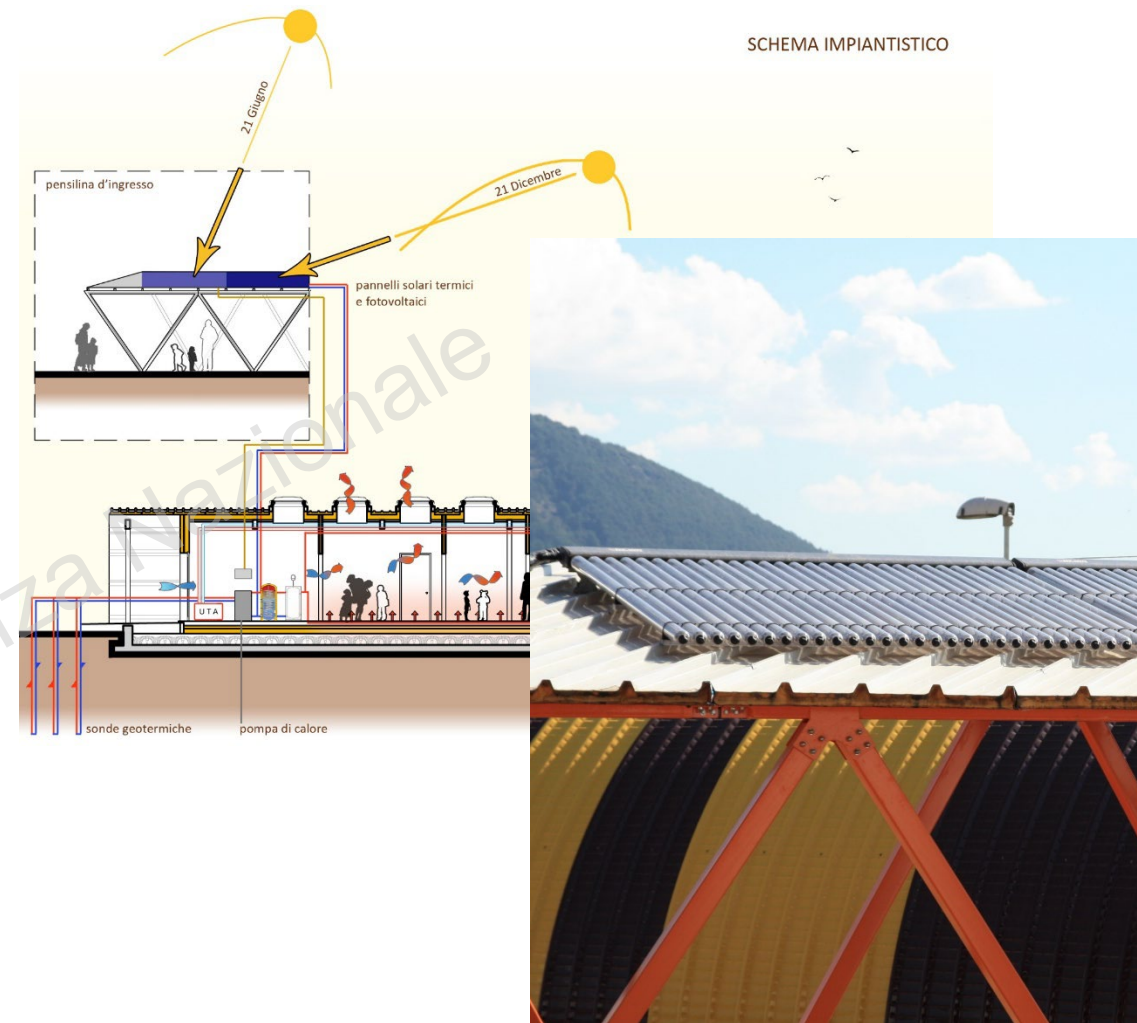
La produzione di energia:

- Riscaldamento: 3,8 kWh/m<sup>2</sup>
- Acqua calda sanitaria: 28,9 kWh/m<sup>2</sup>.

La percentuale di energia prodotta da fonti energetiche rinnovabili è pari a **60%**.

Il punteggio finale per l'**approvvigionamento di energia** della ludoteca APE TAU è pari a **2.9**.

ASPECT	VALUE	CRITERIA	SCORE
Origin of energy supply		Energy produced on the plot or in a nearby system is able to cover the total energy used in the building for: 1. > 100 % 2. > 75 % 3. > 50 % 4. > 10 %	



## Energia – Performance dell'Energia Primaria

ASPECT	VALUE	CRITERIA	SCORE
Annual non-renewable primary energy performance		1. 0 kWh/m <sup>2</sup> 2. < 50 kWh/m <sup>2</sup> 3. < 100 kWh/m <sup>2</sup> 4. < 130 kWh/m <sup>2</sup>	

Le prestazioni di energia primaria sono state calcolate combinando la domanda energetica dell'edificio con l'energia prodotta da fonti rinnovabili, secondo i fattori nazionali di conversione.

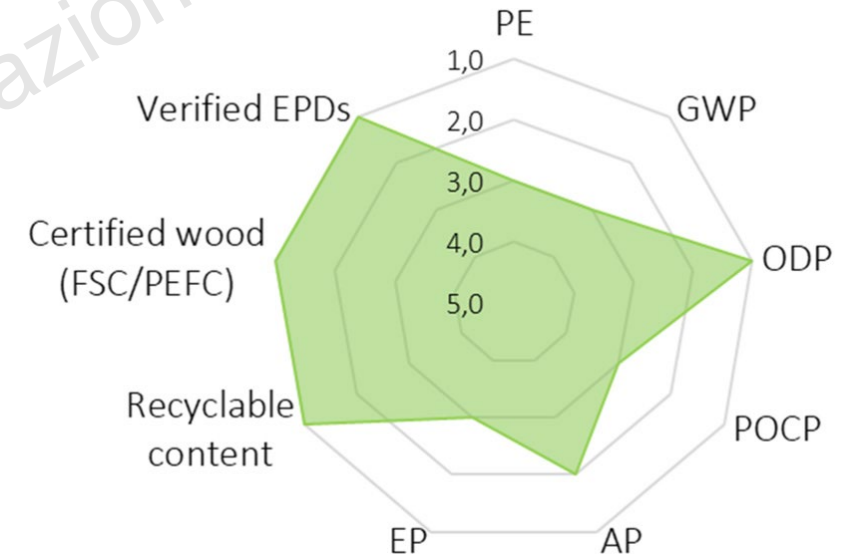
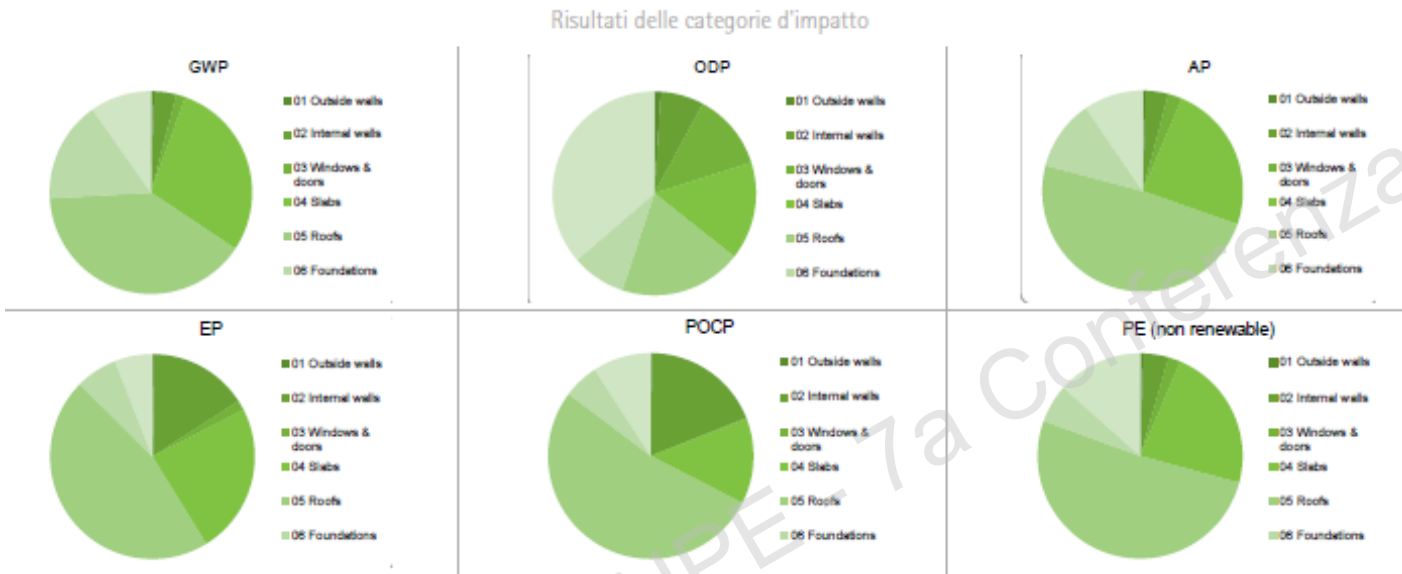
Il punteggio finale per la performance della ludoteca APE TAU in termini di **Energia Primaria** è pari a **1.0**.

# Active House Assessment

Ambiente – *Impatti ambientali e costruzione sostenibile*



Il punteggio finale per la sezione **impatti ambientali** della ludoteca APE TAU e pari, in media, a **2.7**.



- Il contenuto di riciclato è uno dei principali parametri che Active House prende in considerazione. L'analisi LCA di Ape Tau ha valutato il contenuto di riciclato dei materiali in peso come da linee guida, ottenendo buoni risultati.
- Il materiale riciclabile è valutato in peso. Si è calcolato che l'**88%** dei materiali da costruzione dell'edificio è **riciclabile**.
- Alta percentuale di materiale con EPD e proveniente da filiere certificate.

Il punteggio finale per la **costruzione sostenibile** della ludoteca APE TAU e pari a **1.0**.

A bright, modern classroom with a perforated ceiling, large windows, and child-friendly furniture. The room features a white wall with a large arched opening, a window with yellow curtains, and a white door. The ceiling is white with a pattern of small holes. Two long, rectangular light fixtures are suspended from the ceiling. A green exit sign is visible on the ceiling. The floor is covered with a patterned carpet. On the right, there is a white shelving unit with several shelves, some of which are occupied by books and a red box. In the foreground, there is a round table with a white tablecloth and several wooden chairs. On the table, there are some books and a stack of red blocks. In the background, there is a small wooden cabinet with a white oven-like compartment and a broom. A hallway is visible through the arched opening.

**Monitoraggio e verifica prestazionale**

# Analisi prestazionale involucro

## Campagna di indagini non distruttive in situ

Obiettivo generale: individuazione delle caratteristiche prestazionali dell'involucro e delle eventuali discontinuità termiche presenti.

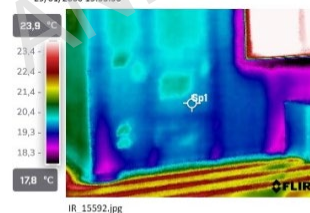
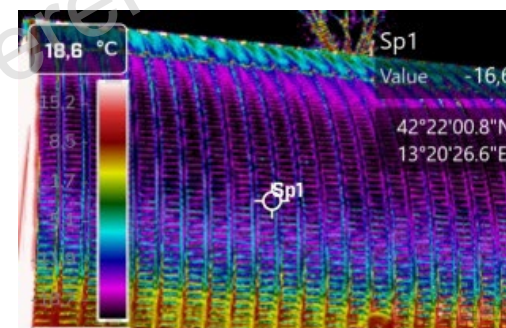
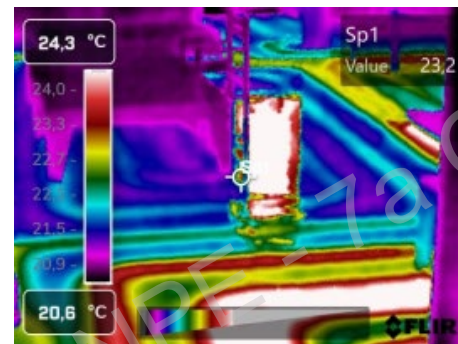
- Analisi termografica interna: individuazione dispersioni termiche, ponti termici, eventuali anomalie nella posa dei materiali isolanti, verifica impianti, ecc.
- Analisi termoigrometrica: controllo della % di umidità interna e di quella dei principali materiali che costituiscono l'involucro edilizio.



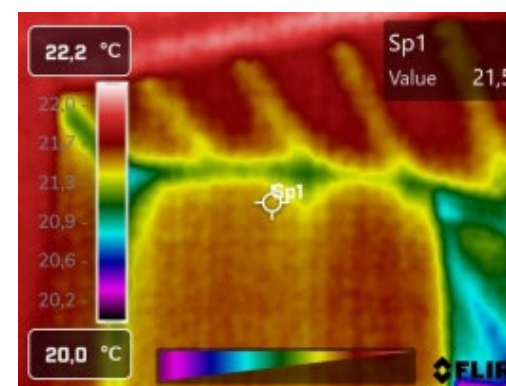
TERMOIGROMETRO:  
Marca FLIR modello MR 176



TERMOCAMERA:  
Marca FLIR modello E75



Parameters		File information		Camera information	
Emissivity	0,95	File name	IR_15592.jpg	Camera model	FLIR E75
Distance	5,10 m	File size	657 KB	Lens	FOL18
Reflected temp.	10,0 °C	Width	320	Camera serial	78505887
Atmospheric temp.	18,0 °C	Height	240	Filter	
Relative humidity	55,0%	Minimum temp.	17,5 °C	Range max.	120,0 °C
Ext. optics temp.	20,0 °C	Maximum temp.	30,1 °C	Range min.	-20,0 °C
Ext. optics trans.	1,00			Field of view	23,50



# Analisi prestazionale involucro

Campagna di indagini non distruttive in situ

DATA PROVA:  
03.03.2026

CONDIZIONI  
AMBIENTALI:

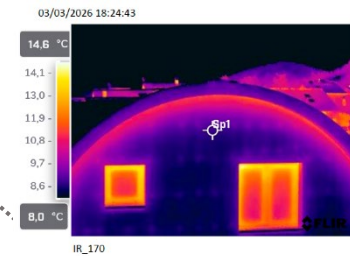
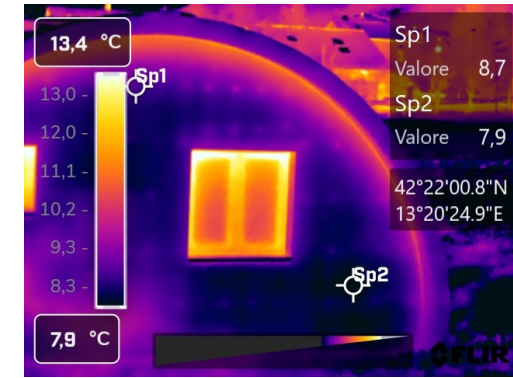
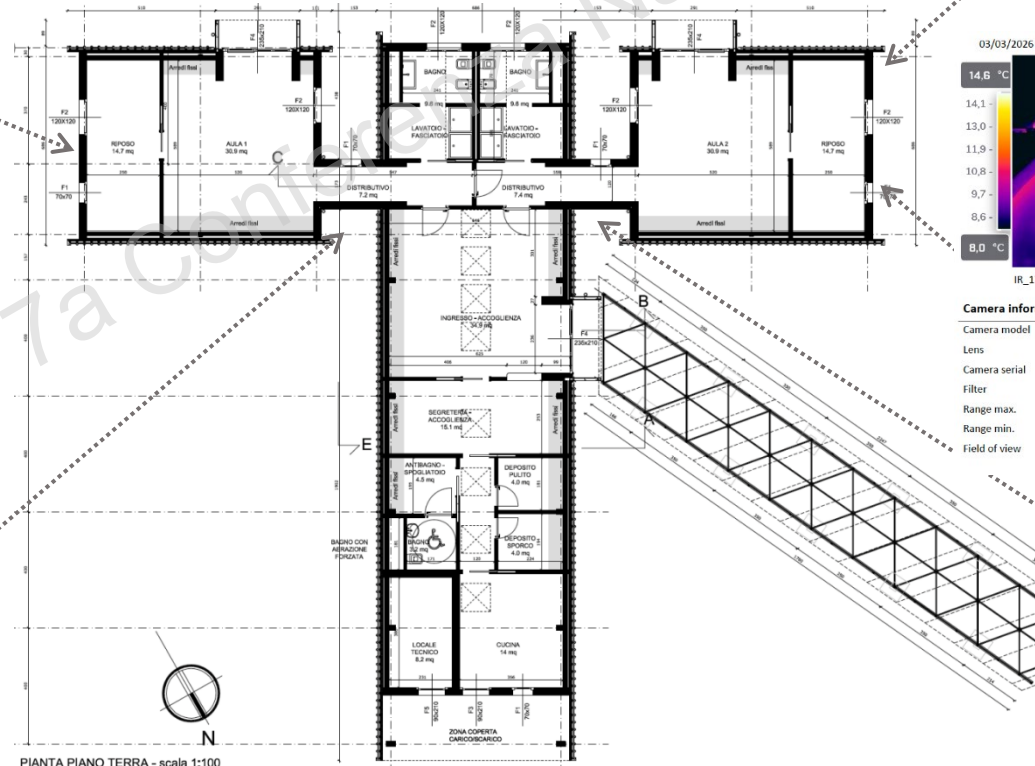
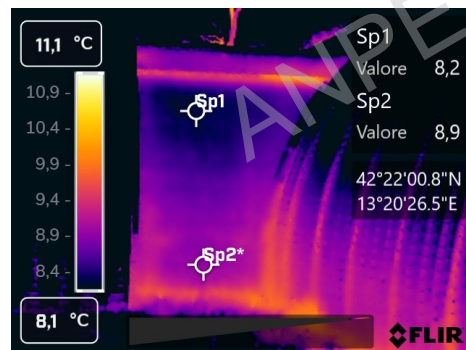
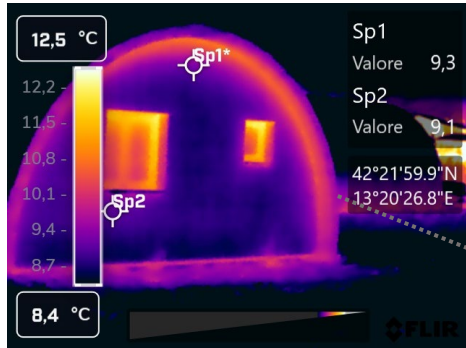


Tint= 22,0 °C  
U= 48,7 %



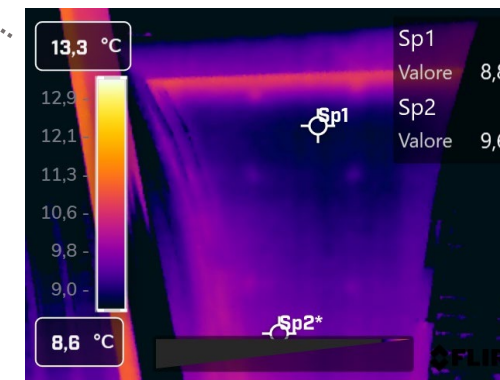
Test= 12,4 °C  
U= 63,3 %

Punti di ripresa termogrammi eseguiti all'esterno:



78505887

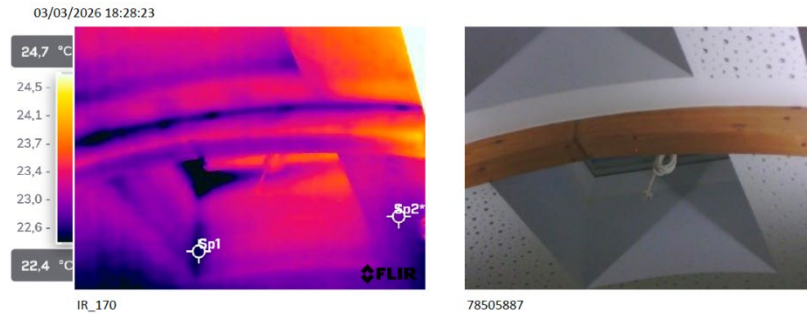
Camera information		Parameters		Measurements	
Camera model	FLIR E75	Emissivity	0,95	Sp1	8,8 °C
Lens	FOL18	Distance	11,43 m		
Camera serial	78505887	Reflected temp.	12,0 °C		
Filter		Atmospheric temp.	12,7 °C		
Range max.	120,0 °C	Relative humidity	63,5%		
Range min.	-20,0 °C	Ext. optics temp.	20,0 °C		
Field of view	23,50	Ext. optics trans.	1,00		



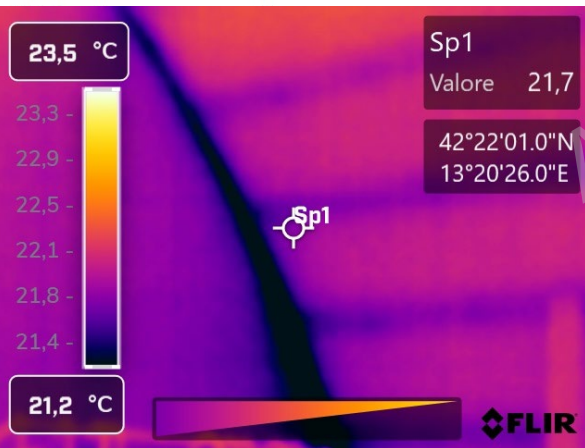
# Analisi prestazionale involucro

## Campagna di indagini non distruttive in situ

➤ Punti di ripresa termogrammi eseguiti all'interno



Camera information		Parameters		Measurements	
Camera model	FLIR E75	Emissivity	0,95	Sp1	22,5 °C
Lens	FOL18	Distance	2,65 m	Sp2	22,9 °C
Camera serial	78505887	Reflected temp.	20,0 °C		
Filter		Atmospheric temp.	22,0 °C		
Range max.	120,0 °C	Relative humidity	48,7%		
Range min.	-20,0 °C	Ext. optics temp.	20,0 °C		
Field of view	23,50	Ext. optics trans.	1,00		



Camera information		Parameters		Measurements	
Camera model	FLIR E75	Emissivity	0,95	Sp1	19,8 °C
Lens	FOL18	Distance	3,94 m		
Camera serial	78505887	Reflected temp.	20,0 °C		
Filter		Atmospheric temp.	22,0 °C		
Range max.	120,0 °C	Relative humidity	48,7%		
Range min.	-20,0 °C	Ext. optics temp.	20,0 °C		
Field of view	23,50	Ext. optics trans.	1,00		

- IRT attiva: sfruttando la fase di raffreddamento successiva all'irraggiamento solare è stato possibile verificare gli elementi di fissaggio e i giunti dei pannelli in poliuretano all'interno del sistema ETICS, confermando l'omogeneità dello strato isolante e l'assenza di difetti di posa.
- IRT passiva: l'ispezione dei nodi strutturali e degli elementi di rivestimento (ad es. infissi e giunti del rivestimento metallico) non ha evidenziato problemi significativi relativi a ponti termici o dispersioni energetiche.

➤ L'analisi ha confermato l'efficacia del **poliuretano espanso rigido** nel garantire la continuità dello schermo termico, convalidando così l'approccio diagnostico IRT come strumento essenziale per il controllo di qualità e la verifica delle prestazioni del pacchetto isolante.



# Monitoraggio ambientale

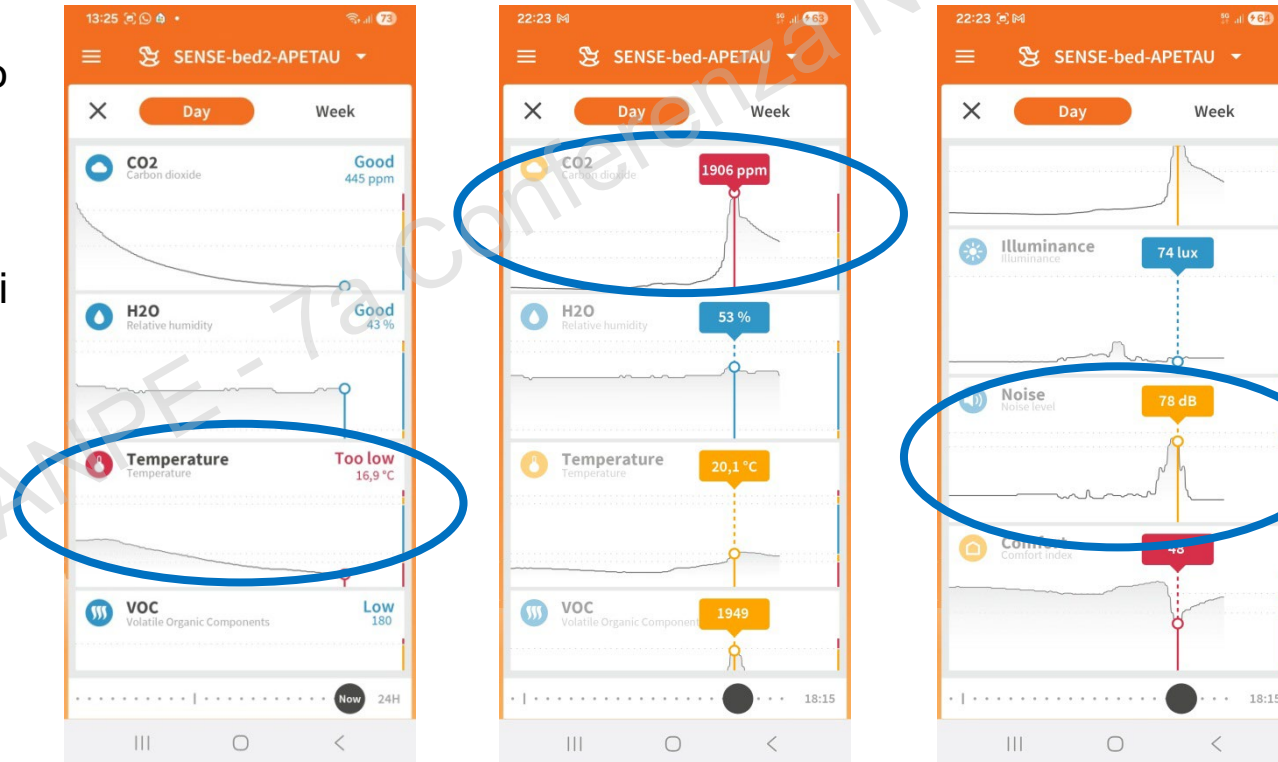
*Comfort interno e qualità dell'aria*

- Rete di monitoraggio continuo del comfort e sistema di alert

Grandezze monitorate:

- Monossido di carbonio (ppm)
- Umidità relativa (%)
- Temperatura (C)
- Composti Organici Volatili (n)
- Illuminamento (lux)
- Rumore (dB)

Controllo in tempo reale (tramite smartphone,...):



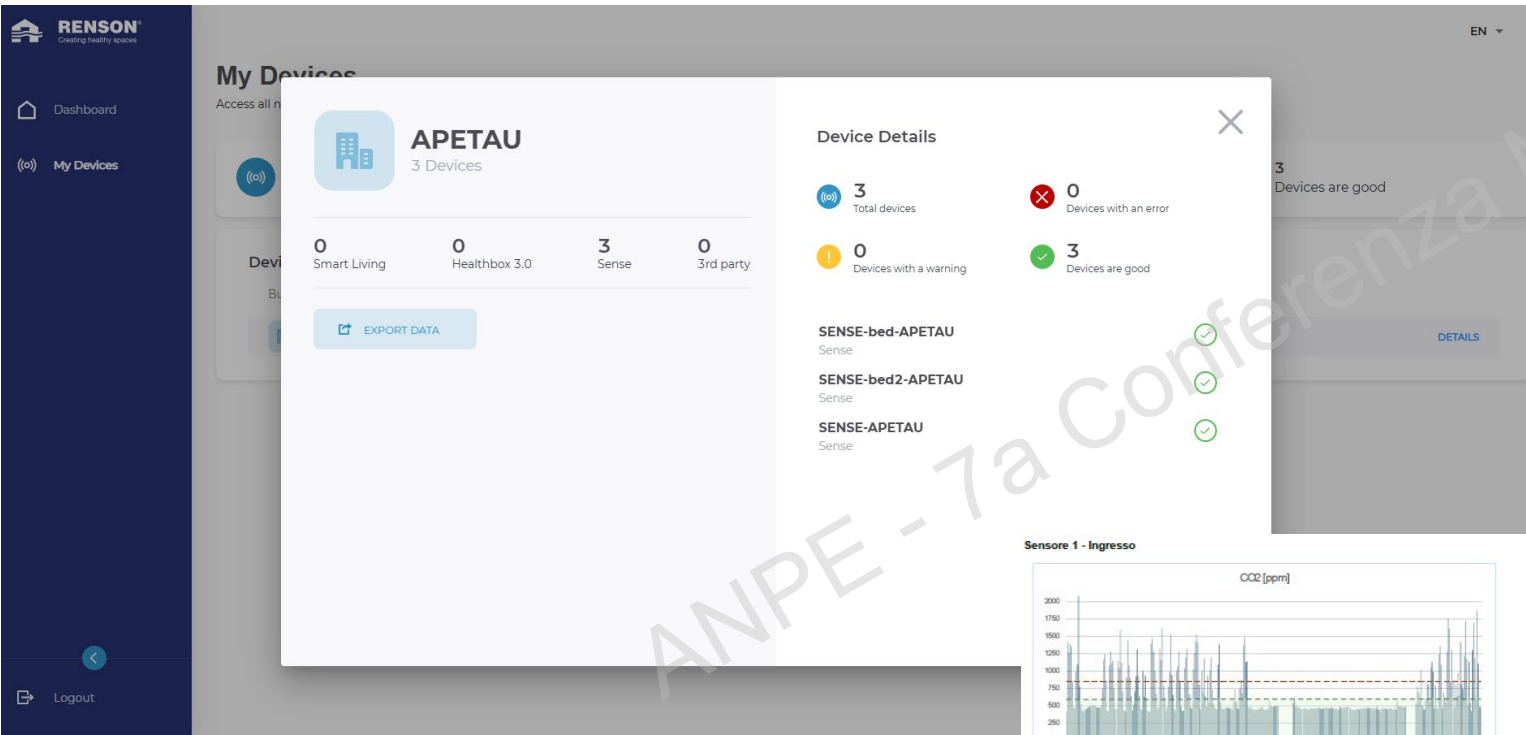
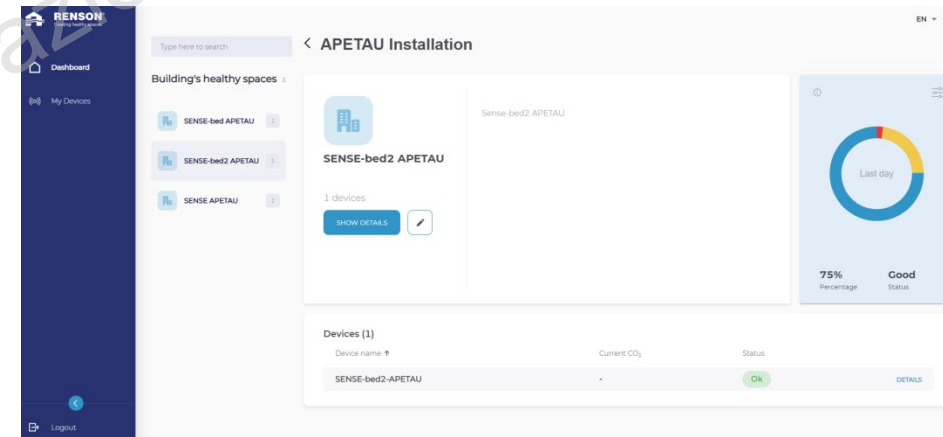
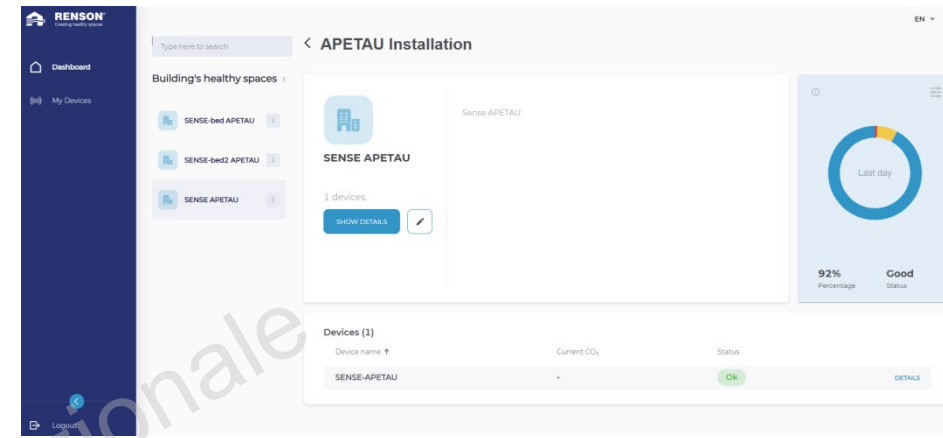
**ALERT**

Immediate  
azioni  
correttive

# Monitoraggio ambientale

## Qualità dell'ambiente interno

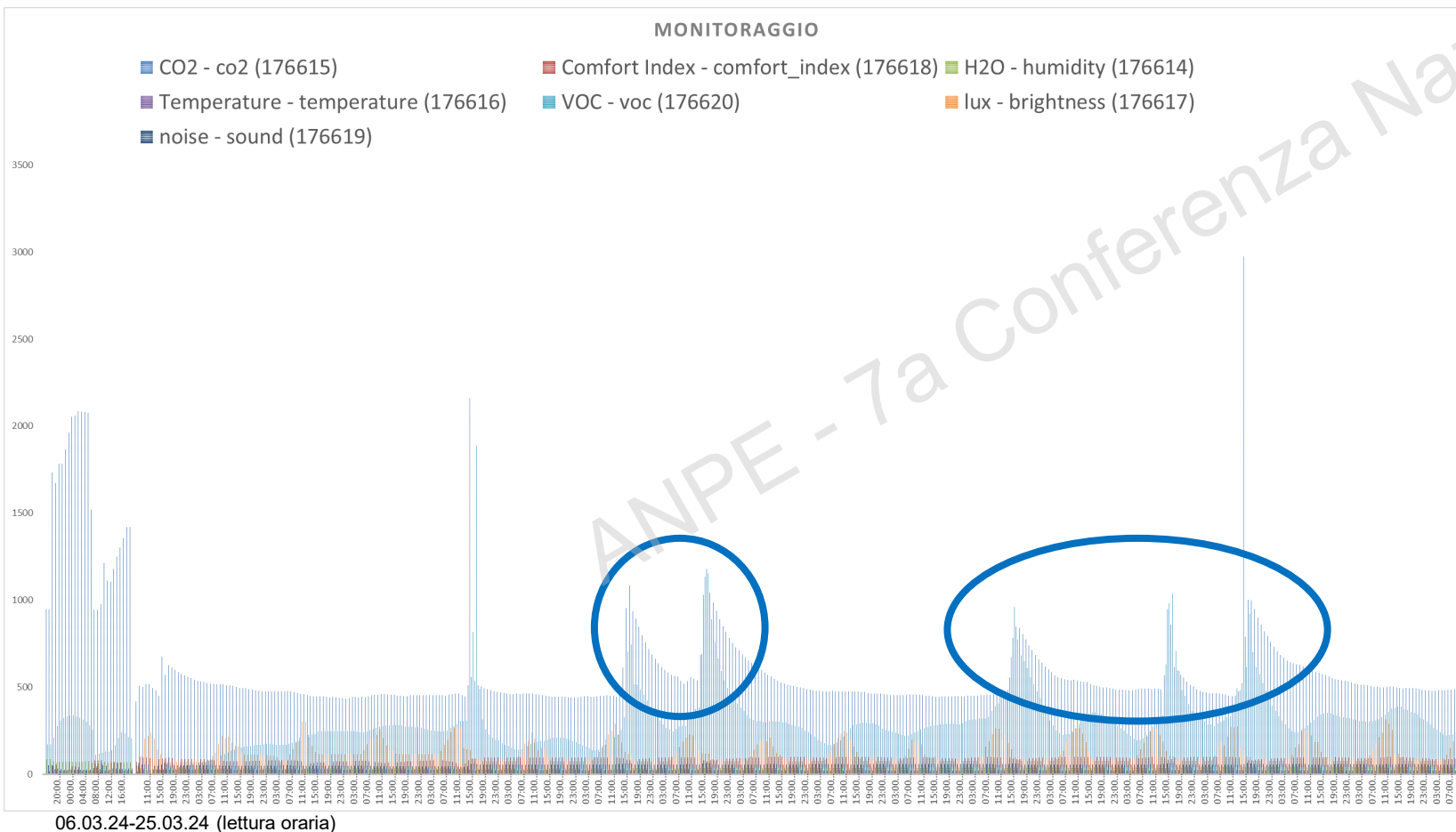
- Controllo e gestione mediante dashboard dei devices installati



# Monitoraggio ambientale

## Qualità dell'ambiente interno

- Raccolta dati ed elaborazione
- Facility management



- Analisi dei risultati ed individuazione delle cause di eventuali disallineamenti
- Definizione di un protocollo gestione, anche in ottica di FM per edifici pubblici
- Esportazione del metodo anche su altri casi di studio, in particolare edifici pubblici

# Conclusioni

## *Sviluppi futuri*

L'approccio metodologico proposto ha l'obiettivo di verificare le prestazioni in fase d'uso per edifici ad alta prestazione energetica caratterizzato dall'utilizzo di isolanti sintetici ai fini del **Facility management** e del **comfort** degli utenti.

Il **fine vita dei pannelli sandwich in poliuretano** si configura come potenziale nodo centrale nella visione in ottica di economia circolare dell'edificio.

La sfida attuale risiede nel garantire la separabilità delle componenti metalliche e isolanti, elevando il pannello da rifiuto speciale destinato al recupero energetico a risorsa per nuove filiere produttive attraverso il riciclo.

L'eventuale riuso del pannello integro emerge come potenziale strategia più efficace, in quanto preserva il valore incorporato e si integra con la logica costruttiva a secco reversibile, pur richiedendo verifiche tecniche e una gestione logistica adeguata.



**Grazie per l'attenzione!**

[leidy.guantehenriquez@supsi.ch](mailto:leidy.guantehenriquez@supsi.ch)  
[chiara.marchionni@univaq.it](mailto:chiara.marchionni@univaq.it)