



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie,  
l'energia e lo sviluppo economico sostenibile



MINISTERO DELLA TRANSIZIONE ECOLOGICA



Ricerca di Sistema elettrico

## La costruzione stratificata a secco: analisi prestazionale di soluzioni tecniche conformi

G. Salvalai, M. M. Sesana, D. Brutti, M. Imperadori



**POLITECNICO**  
MILANO 1863

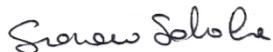
POLO TERRITORIALE DI  
LECCO

Report RdS/PTR2021/166

## LA COSTRUZIONE STRATIFICATA A SECCO: ANALISI PRESTAZIONALE DI SOLUZIONI TECNICHE CONFORMI

G. Salvalai, M.M. Sesana, D. Brutti, M. Imperadori  
(POLIMI)

Dicembre 2021



### Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico (oggi Ministero della Transizione Ecologica) - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - III annualità

Obiettivo: N.1 *Tecnologie*

Progetto: 1.6 "Efficienza energetica dei prodotti e dei processi industriali"

Work package: WP2 - Miglioramento dell'efficienza energetica di processi di produzione e di gestione dell'ambiente costruito

Linea di attività: LA2.13 - La costruzione stratificata a secco: analisi prestazionale di soluzioni tecniche conformi

Responsabile del Progetto: Miriam Benedetti, ENEA

Responsabile del Work package: Maria-Anna Segreto, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "*Sistemi a secco innovativi per edifici sostenibili e antisismici*"

Responsabile scientifico ENEA: Mattia Ricci

Responsabile scientifico POLIMI: Prof. Ing. Graziano Salvalai

## Indice

|  |    |
|--|----|
| SOMMARIO .....   | 4  |
| 1 INTRODUZIONE .....   | 5  |
| 2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI .....                            | 8  |
| 2.1 METODO DI LAVORO .....   | 9  |
| 2.2 STUDIO E DISEGNO DI SOLUZIONI D'INVOLUCRO "CONFORMI" (LA2.13.1) .....        | 10 |
| 2.2.1 <i>Chiusura Verticale (C.V.)</i> .....                                     | 11 |
| 2.2.2 <i>Chiusura Orizzontale superiore (C.O. superiore)</i> .....               | 15 |
| 2.2.3 <i>Chiusura Orizzontale su spazi esterni (C.O. su spazi esterni)</i> ..... | 19 |
| 2.2.4 <i>Partizione Orizzontale (P.O.)</i> .....                                 | 22 |
| 2.3 ANALISI TERMO-IGROMETRICA AGLI ELEMENTI FINITI (LA2.13.2) .....              | 25 |
| 2.3.1 <i>Confronto tra performance simulate e sperimentali</i> .....             | 27 |
| 2.4 POPOLAMENTO DEL CATALOGO DI SOLUZIONI "CONFORMI" (LA2.13.3) .....            | 44 |
| 3 CONCLUSIONI .....  | 65 |
| 4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....  | 66 |
| 5 SITOGRAFIA .....   | 66 |
| 6 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI .....  | 66 |
| 7 APPENDICE .....  | 66 |
| 8 ALLEGATI .....   | 67 |
| 8.1 CONTRIBUTI E CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO .....               | 67 |
| <i>Graziano Salvalai</i> .....   | 67 |
| <i>Marta Maria Sesana</i> .....  | 68 |
| <i>Diletta Brutti</i> .....  | 69 |
| <i>Marco Imperadori</i> .....  | 69 |
| 8.2 ELENCO FILE CONSEGNATI DIGITALMENTE .....                                    | 70 |

## Sommario

Il report finale del secondo anno di lavoro presenta nel dettaglio i risultati e le attività svolte nell'ambito della ricerca svolta da Politecnico di Milano nel contesto del Work Package WP2 "Miglioramento dell'efficienza energetica di processi di produzione e di gestione dell'ambiente costruito", Linea di Attività LA2.13 "La costruzione stratificata a secco: analisi prestazionale di soluzioni tecniche conformi".

In particolare, per una completa trasparenza e ripercorribilità della ricerca effettuata, il documento descrive passo a passo l'attività svolta, a partire dalla definizione delle condizioni al contorno, proseguendo con la presentazione del metodo di lavoro seguito per ciascuna delle tre sub-attività LA2.13.1 "Studio e disegno di soluzioni d'involucro "conformi"", LA2.13.2 "Analisi termo-igrometrica agli elementi finiti" e LA2.13.3 "Popolamento del catalogo di soluzioni "conformi" con dati sperimentali", fino ad arrivare all'analisi e discussione dei risultati finali.

La Linea di Attività LA2.13, che si conclude con la stesura del presente report finale (LA2.13.4), ha portato alla progettazione di soluzioni tecnologiche conformi per gli elementi tecnici caratterizzanti l'involucro: chiusura verticale, orizzontale, inclinata e di interpiano. Le soluzioni individuate sono tutte caratterizzate dalla combinazione di diversi layer, ognuno con una specifica funzione, facilmente collegabili per favorire una veloce posa in opera e un futuro smontaggio e riutilizzo. Tali soluzioni d'involucro, in particolare, sono state progettate tenendo conto della normativa di legge e al variare dei contesti climatici italiani.

## 1 Introduzione

Nel presente report viene descritto il lavoro svolto all'interno dell'Accordo di Collaborazione siglato tra ENEA e POLITECNICO DI MILANO per il secondo anno di ricerca relativo alla Linea di Attività LA2.13 intitolata "La costruzione stratificata a secco: analisi prestazionale di soluzioni tecniche conformi".



**Figura 1. Abstract grafico relativo all'intera attività di ricerca prevista dall'accordo di collaborazione ENEA - POLIMI**

Il sistema costruttivo a secco è attualmente largamente impiegato nel mondo dell'edilizia, e sta riscuotendo notevole successo anche in Italia, poiché una delle sue principali peculiarità è la forte resistenza ai sismi, grazie soprattutto alla leggerezza ed elasticità strutturale rispetto a soluzioni tradizionali. La tecnologia si presta, inoltre, a una completa progettualità in funzione dello specifico contesto climatico e in funzione dell'uso dell'edificio: la parte più esterna e quella più interna dell'involucro, denominate anche "pelli" o "gusci", realizzabili con l'alternanza di materiali capacitivi e resistivi, sono frutto di analisi prestazionali specifiche in grado di garantire elevati livelli di performance energetico-ambientale.

La tettonica dei sistemi S/R segue, infatti, un processo meccanico: gli elementi costruttivi per la quasi totalità sono prodotti in officina e in cantiere devono essere connessi gli uni agli altri, seguendo il progetto architettonico-tecnologico. Questo sistema costruttivo consente, infatti, di variare le risposte tecnologiche grazie alle possibili combinazioni tra i componenti e la scelta dei componenti stessi da impiegare. Il mercato e le sue veloci dinamiche hanno recentemente mostrato il forte avanzamento di sistemi costruttivi industrializzati, a base metallo, legno, anche materiali cementizi, oppure laterizi ma per facciate ventilate, componenti materassini isolanti, serramentistica avanzata, etc. connessi mediante un processo diverso: a secco e meccanico.

A questo processo tecnologico, di fabbricazione in cantiere per connessione piuttosto che per creazione di un manufatto, segue poi un altro fattore di sicuro stimolo all'innovazione sostenibile, oggi più che mai necessaria considerata l'influenza dei cambiamenti climatici anche nell'ambito delle costruzioni. Progettare edifici a elevata efficienza energetica ("nZEB", come definiti dalla normativa europea) e antisismici, significa progettare oggi edifici che nel futuro saranno prassi ordinaria.

In questo contesto, i sette paradigmi su cui si basa la costruzione stratificata a secco sono i seguenti:

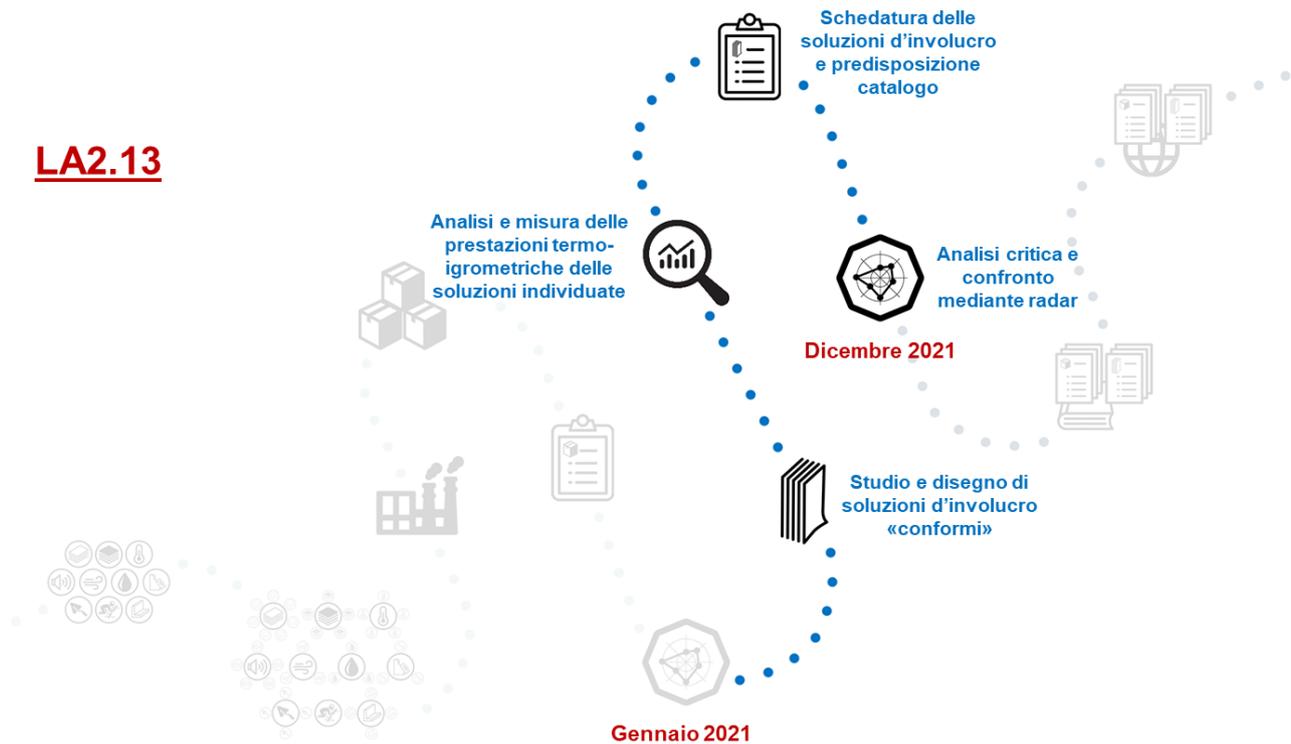
1. complessificazione delle prestazioni;
2. specializzazione dei materiali;
3. finalizzazione dei dispositivi;
4. articolazione strutturale;
5. progettabilità;
6. assemblabilità;
7. gestibilità.

A questi punti gli autori hanno integrato anche i tre seguenti: 8. comfort; 9. energia; 10. ambiente, andando a completare l'elenco dei 10 KPI su cui si sono basate le analisi delle soluzioni tecnologiche condotte nel corso dell'intera collaborazione.

La linea di attività del secondo anno di ricerca è stata strutturata nelle seguenti rispettive sub-attività:

- **LA2.13.1** - *“Studio e disegno di soluzioni d’involucro “conformi””*  
Sviluppo di soluzioni d’involucro “conformi” con particolare attenzione alla definizione dei nodi di interfaccia parete-tetto, parete-solaio, parete-serramento. Le soluzioni sono state studiate considerando processi e prodotti disponibili sul mercato (Sezione 2.2 del presente report).
- **LA2.13.2** - *“Analisi termo-igrometrica agli elementi finiti”*  
Analisi attraverso il metodo numerico agli elementi finiti per la misura delle prestazioni termo-igrometriche delle soluzioni tecniche (Sezione 0 del report).
- **LA2.13.3** - *“Popolamento del catalogo di soluzioni “conformi””*  
Popolamento del catalogo di soluzioni conformi avviato nella Linea di Attività LA2.12 (atlante), con le informazioni ricavate dalle attività di analisi condotte nelle due precedenti sub-attività, LA2.13.1 e LA2.13.2. L’atlante funzionerà come collettore di informazioni, sia di natura descrittiva che di natura tecnica, al fine di fornire dati utili e aperti alla consultazione da parte dell’utente finale. L’atlante, inoltre, sarà inteso come uno strumento aperto implementabile nel tempo sia in termini di numero di soluzioni tecniche che di informazioni per ogni soluzione (Sezione 0).
- **LA2.13.4** - *“Report annuale”*  
Redazione del presente report finale, come messa a sistema dell’intera linea di attività LA2.13.

**LA2.13**



**Figura 2. Abstract grafico, dettaglio anno 2021**

## 2 Descrizione delle attività svolte e risultati

Nelle seguenti sezioni vengono descritte nel dettaglio le attività svolte relativamente alla linea di attività LA2.13, presentandole in successione temporale con riferimento al GANTT di progetto riportato in Figura 3. Come già accennato nel capitolo introduttivo, si ricorda che l'attività LA2.13 è costituita dalle seguenti sub-attività:

- **LA2.13.1** - "Studio e disegno di soluzioni d'involucro "conformi""
- **LA2.13.2** - "Analisi termo-igrometrica agli elementi finiti"
- **LA2.13.3** - "Popolamento del catalogo di soluzioni "conformi""
- **LA2.13.4** - "Report annuale"

2021

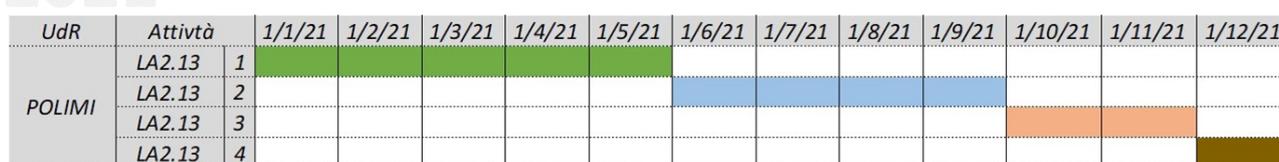


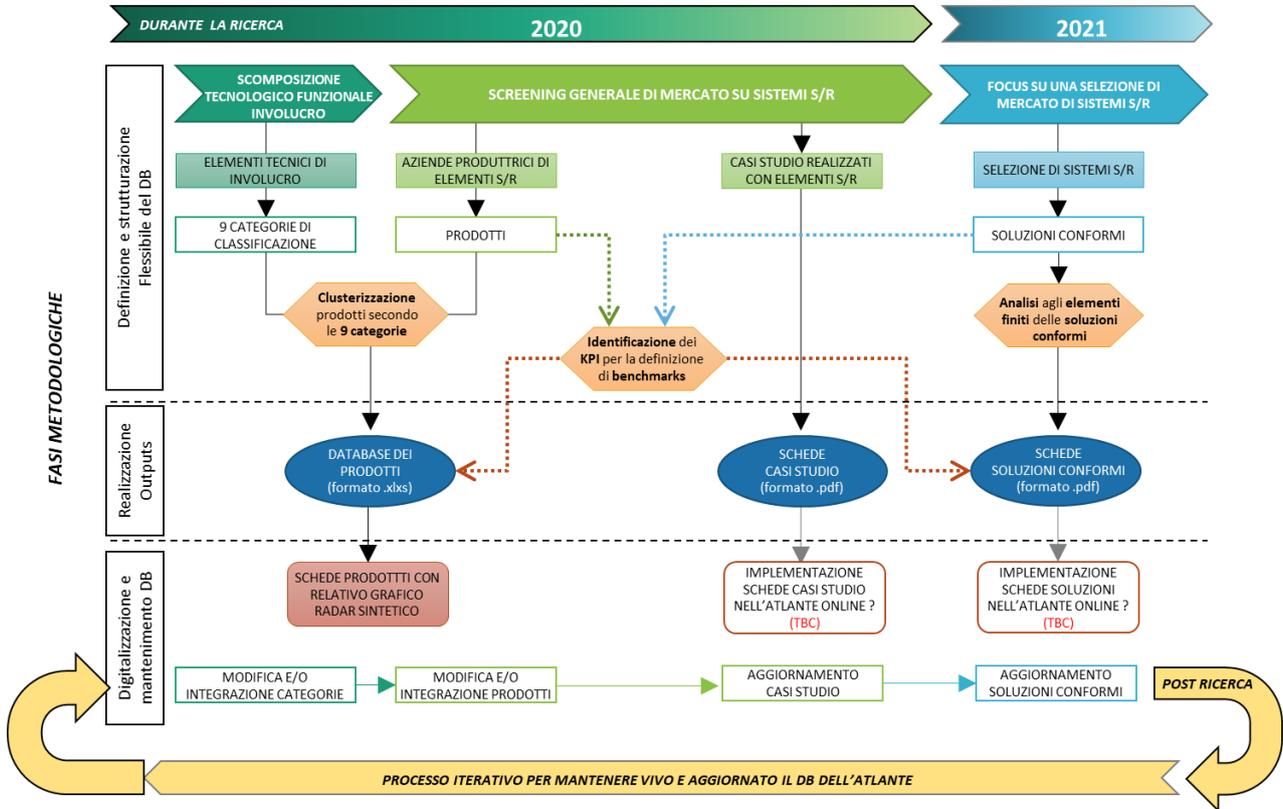
Figura 3. GANTT di progetto, dettaglio anno 2021

In Tabella 1 sono stati invece ricostruiti gli step evolutivi delle attività svolte e i vari risultati ottenuti da un costante scambio e confronto con i partner interessati e coinvolti.

Tabella 1. Sintesi riunioni, step e risultati ottenuti, dettaglio anno 2021

| DATA              | TIPOLOGIA RIUNIONE  | PARTNER PARTECIPANTI | ATTIVITA' CONCORDATE E RISULTATI OTTENUTI   |
|-------------------|---|----------------------|---|
| 10 Maggio 2021    | Conference call   | POLIMI - ENEA        | Condivisione stato di avanzamento in vista della fine della sub-attività LA2.13.1 relativa allo studio e disegno di soluzioni d'involucro "conformi"  |
| 31 Maggio 2021    | Consegna stato di avanzamento (box condiviso ENEA - POLIMI) | POLIMI - ENEA        | Consegna lavoro svolto per chiusura della sub-attività LA2.13.1 con condivisione dei file di disegno delle soluzioni individuate e rappresentate  |
| 30 Settembre 2021 | Consegna stato di avanzamento (box condiviso ENEA - POLIMI) | POLIMI - ENEA        | Consegna lavoro svolto per chiusura della sub-attività LA2.13.2 con condivisione dei file di analisi delle soluzioni individuate  |
| 06 Ottobre 2021   | Conference call   | POLIMI - ENEA        | Condivisione stato di avanzamento in seguito alla fine della sub-attività LA2.13.2, relativa all'analisi delle soluzioni conformi individuate, e per l'impostazione della sub-attività LA2.13.3, relativa alla schedatura delle soluzioni individuate |
| 30 Novembre 2021  | Consegna stato di avanzamento (box condiviso ENEA - POLIMI) | POLIMI - ENEA        | Consegna lavoro svolto per chiusura della sub-attività LA2.13.3 con condivisione dell'atlante implementato successivamente alla schedatura delle soluzioni individuate  |
| 23 Dicembre 2021  | Consegna finale (box condiviso ENEA - POLIMI)               | POLIMI - ENEA        | Consegna lavoro svolto per chiusura della sub-attività LA2.13.4 e dell'intera linea di attività LA2.13, con condivisione del report finale e di tutti i risultati prodotti nell'annualità 2021  |

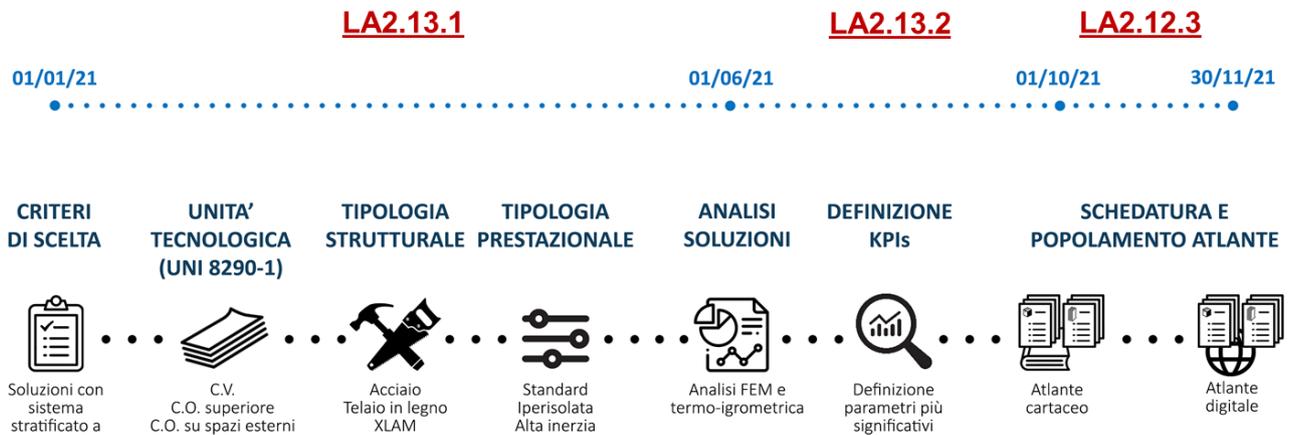
## 2.1 Metodo di lavoro



**Figura 4. Schema metodologico per fasi successive relativo all'intera attività di ricerca prevista dall'accordo di collaborazione ENEA - POLIMI**

Le fasi metodologiche principali in cui è stato organizzato complessivamente il lavoro di ricerca (Figura 4) prevedevano come risultato finale per l'anno 2021 l'implementazione dell'atlante della tecnologia S/R che era stato prodotto come output delle attività dell'annualità precedente.

Sin dall'inizio dell'attività di ricerca, dall'analisi dei primi dati si è evidenziata fin da subito una problematica in termini di archiviazione e catalogazione delle informazioni, dal punto di vista sia quantitativo che qualitativo; pertanto, per l'avvio delle attività della LA2.13 il team di ricerca ha definito delle condizioni al contorno di riferimento fin dalla fase iniziale di studio e analisi delle soluzioni conformi, che sono state schematizzate in Figura 5 e che verranno presentate nel dettaglio nelle sezioni seguenti.



**Figura 5. Identificazione delle condizioni al contorno e delle principali fasi di lavoro relative alla LA2.13**

## 2.2 Studio e disegno di soluzioni d’involucro “conformi” (LA2.13.1)

A partire dall’approfondita analisi dello stato dell’arte del sistema costruttivo stratificato a secco, effettuata nel corso della prima annualità di ricerca, la sub-attività LA2.13.1 si è concentrata sullo studio e progetto di soluzioni d’involucro conformi con sistema S/R.

In particolare, come introdotto in Figura 5, l’attività è stata svolta partendo da una scomposizione tecnologico-funzionale dell’involucro secondo la norma UNI 8290-1, e distinguendo di conseguenza quattro unità tecnologiche oggetto di studio: Chiusura Verticale (C.V.), Chiusura Orizzontale superiore (C.O. superiore), Chiusura Orizzontale su spazi esterni (C.O. su spazi esterni), e Partizione Orizzontale (P.O.). Oltre al disegno delle sezioni correnti di ciascun elemento di involucro, è stata posta particolare attenzione alla definizione dei nodi di interfaccia parete-tetto, parete-solaio e parete-serramento.

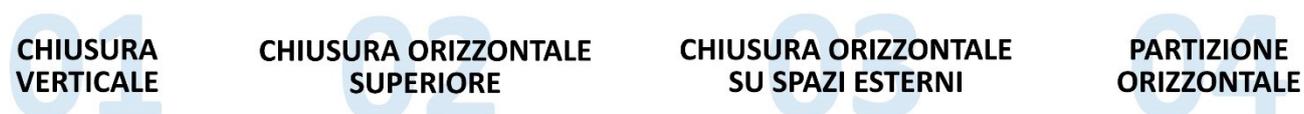


Figura 6. Individuazione delle unità tecnologiche oggetto di studio, secondo la norma UNI 8290-1

A valle della scomposizione tecnologico-funzionale dell’involucro, sono stati introdotti ulteriori cluster di riferimento per le soluzioni di involucro facendo riferimento alle classi di elementi tecnici definite ancora una volta dalla UNI 8290-1, come schematizzato in Figura 7. All’interno di ciascuna classe, si è scelto di prendere in considerazione in particolare tre differenti tipologie di struttura portante (acciaio, telaio in legno, XLAM) e, per ciascuna, tre varianti prestazionali (standard, iperisolata, alta inerzia), per un totale di 111 differenti soluzioni di involucro.

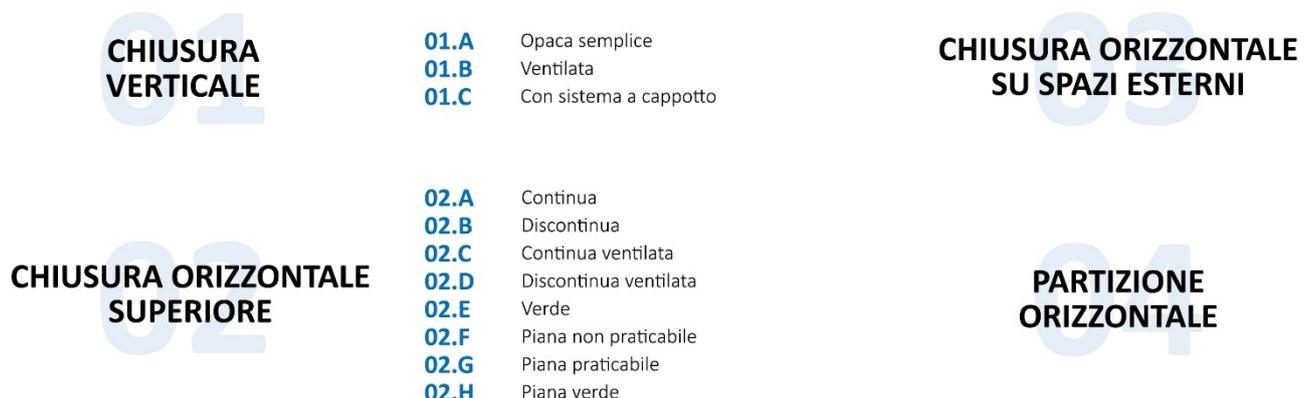


Figura 7. Ulteriore suddivisione delle unità tecnologiche in classi di elementi tecnici, secondo la norma UNI 8290-1

Le sezioni seguenti analizzano e approfondiscono, per ciascuna unità tecnologica, le soluzioni di involucro che sono state individuate. Considerato l’elevato numero di elementi studiati e rappresentati, si rimanda ai file Excel (LA2.13.1\_Soluzioni\_20210531.xlsx, aggiornato alla data 31 Maggio 2021) e DWG delle differenti soluzioni S/R per una consultazione completa di ciascuna unità tecnologica.

### 2.2.1 Chiusura Verticale (C.V.)

La prima unità tecnologica che è stata selezionata a valle della scomposizione tecnologico-funzionale dell'involucro secondo la UNI 8290-1 riguarda le chiusure verticali. Per tale categoria, seguendo le indicazioni date dalla medesima norma, sono state individuate tre differenti classi di elementi tecnici di interesse per l'attività di ricerca: (i) opaca semplice, (ii) ventilata, e (iii) con sistema a cappotto.

All'interno di ciascuna classe, come introdotto nella Sezione 2.2 del presente report e presentato in Figura 8, si è scelto di studiare tre varianti prestazionali (standard, iperisolata, alta inerzia) e, per ciascuna, tre differenti tipologie di struttura portante (acciaio, telaio in legno, XLAM).



**Figura 8. Identificazione grafica delle differenti tipologie prestazionali e strutturali studiate**

Per la categoria delle Chiusure Verticali (C.V.), sono state dunque complessivamente studiate, progettate e rappresentate 27 differenti soluzioni con sistema S/R, come dettagliato in Tabella 2. Si ricorda che il lavoro è stato strutturato secondo un'impostazione appositamente aperta e replicabile, in modo da renderlo implementabile nel tempo per garantire una continua integrazione dei contenuti.

**Tabella 2. Lista delle soluzioni di Chiusura Verticale (C.V.)**

| ID     | UNITA' TECNOLOGICA | CLASSE DI ELEMENTO TECNICO | TIPOLOGIA PRESTAZIONALE | TIPOLOGIA STRUTTURALE |
|--------|--------------------|----------------------------|-------------------------|-----------------------|
| C.V.01 | Chiusura Verticale | Opaca semplice             | Standard                | Acciaio               |
| C.V.02 | Chiusura Verticale | Opaca semplice             | Standard                | Telaio in legno       |
| C.V.03 | Chiusura Verticale | Opaca semplice             | Standard                | XLAM                  |
| C.V.04 | Chiusura Verticale | Opaca semplice             | Iperisolata             | Acciaio               |
| C.V.05 | Chiusura Verticale | Opaca semplice             | Iperisolata             | Telaio in legno       |
| C.V.06 | Chiusura Verticale | Opaca semplice             | Iperisolata             | XLAM                  |
| C.V.07 | Chiusura Verticale | Opaca semplice             | Alta inerzia            | Acciaio               |
| C.V.08 | Chiusura Verticale | Opaca semplice             | Alta inerzia            | Telaio in legno       |
| C.V.09 | Chiusura Verticale | Opaca semplice             | Alta inerzia            | XLAM                  |
| C.V.10 | Chiusura Verticale | Ventilata                  | Standard                | Acciaio               |
| C.V.11 | Chiusura Verticale | Ventilata                  | Standard                | Telaio in legno       |
| C.V.12 | Chiusura Verticale | Ventilata                  | Standard                | XLAM                  |
| C.V.13 | Chiusura Verticale | Ventilata                  | Iperisolata             | Acciaio               |
| C.V.14 | Chiusura Verticale | Ventilata                  | Iperisolata             | Telaio in legno       |
| C.V.15 | Chiusura Verticale | Ventilata                  | Iperisolata             | XLAM                  |
| C.V.16 | Chiusura Verticale | Ventilata                  | Alta inerzia            | Acciaio               |
| C.V.17 | Chiusura Verticale | Ventilata                  | Alta inerzia            | Telaio in legno       |
| C.V.18 | Chiusura Verticale | Ventilata                  | Alta inerzia            | XLAM                  |
| C.V.19 | Chiusura Verticale | Con sistema a cappotto     | Standard                | Acciaio               |

|        |                    |                        |              |                 |
|--------|--------------------|------------------------|--------------|-----------------|
| C.V.20 | Chiusura Verticale | Con sistema a cappotto | Standard     | Telaio in legno |
| C.V.21 | Chiusura Verticale | Con sistema a cappotto | Standard     | XLAM            |
| C.V.22 | Chiusura Verticale | Con sistema a cappotto | Iperisolata  | Acciaio         |
| C.V.23 | Chiusura Verticale | Con sistema a cappotto | Iperisolata  | Telaio in legno |
| C.V.24 | Chiusura Verticale | Con sistema a cappotto | Iperisolata  | XLAM            |
| C.V.25 | Chiusura Verticale | Con sistema a cappotto | Alta inerzia | Acciaio         |
| C.V.26 | Chiusura Verticale | Con sistema a cappotto | Alta inerzia | Telaio in legno |
| C.V.27 | Chiusura Verticale | Con sistema a cappotto | Alta inerzia | XLAM            |

A titolo esemplificativo, in Figura 9 viene presentata la sezione corrente di una delle soluzioni che sono state studiate e rappresentate nell'ambito dell'attività di ricerca, corrispondente in particolare alla C.V.01 individuata in Tabella 2. Per completezza, in Figura 10, Figura 11 e Figura 12 vengono riportati anche i nodi di interfaccia parete-copertura, parete-solaio e parete-serramento progettati per la soluzione. Si ricorda che, come anticipato nella sezione introduttiva 2.2, per una consultazione completa delle soluzioni studiate si può fare riferimento ai file Excel e DWG consegnati in digitale insieme al presente report.

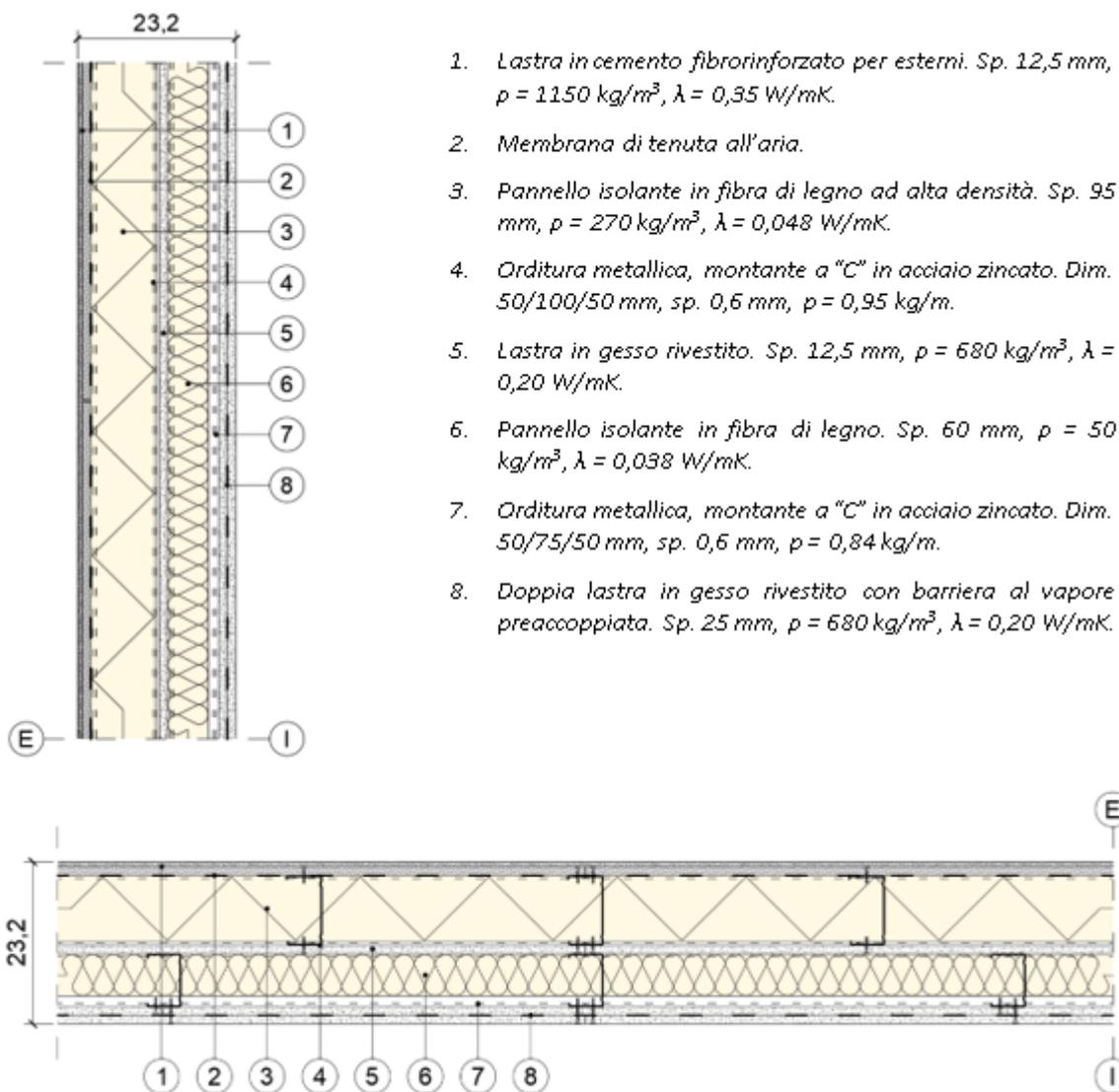
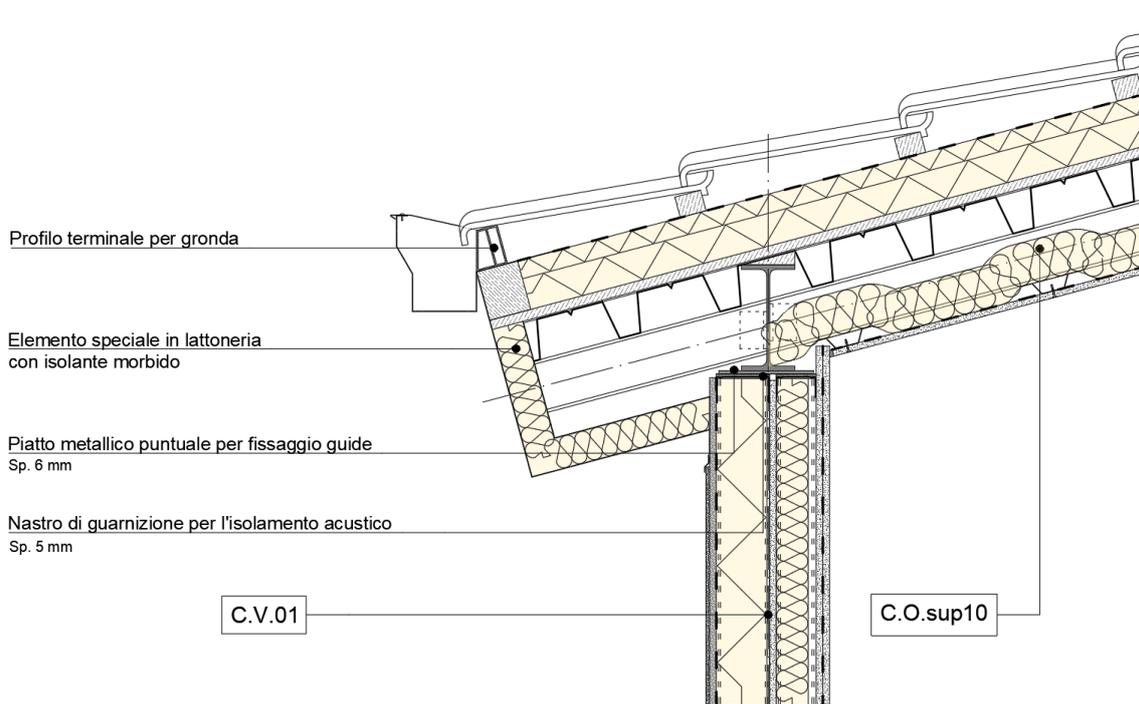
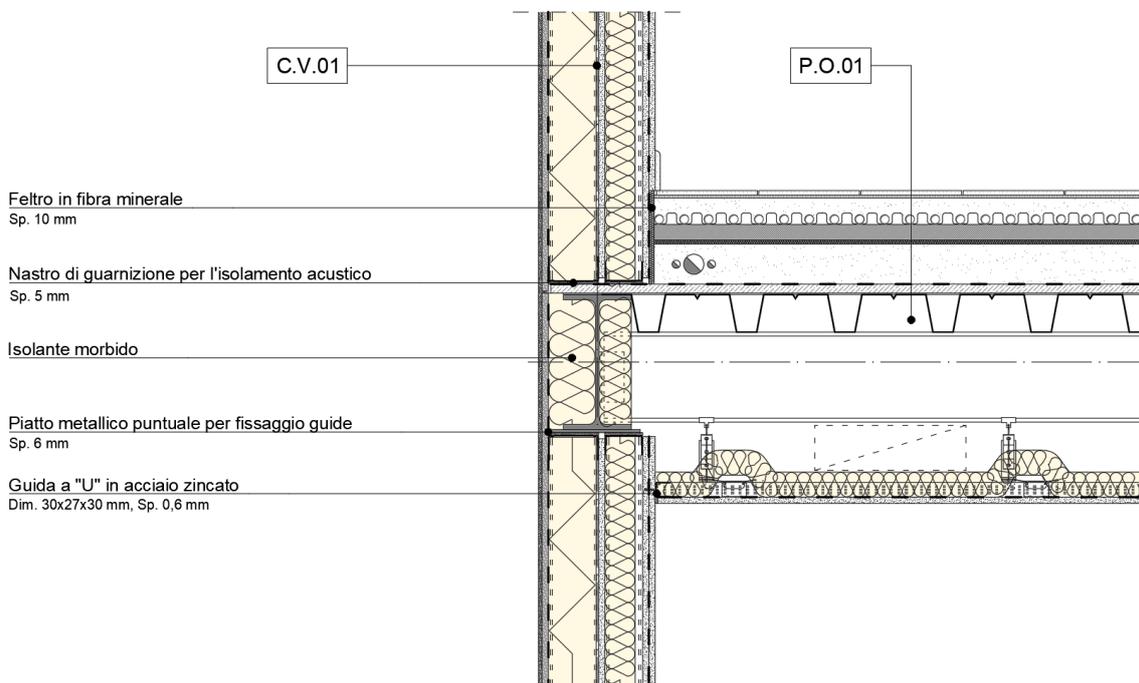


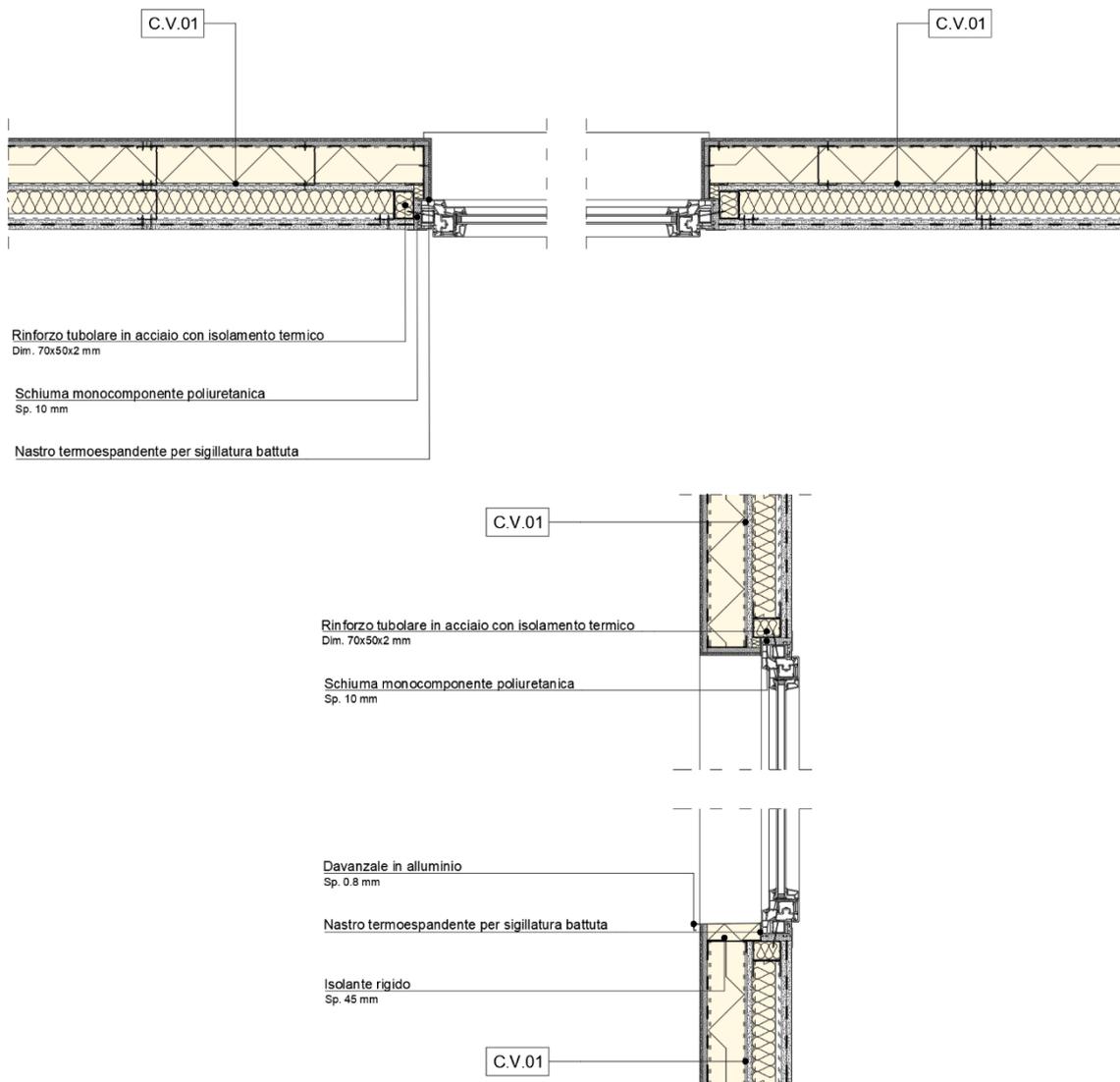
Figura 9. C.V.01: Chiusura Verticale opaca semplice, prestazione standard e struttura in acciaio



**Figura 10. C.V.01: Chiusura Verticale opaca semplice, prestazione standard e struttura in acciaio - Nodo di interfaccia parete-copertura**



**Figura 11. C.V.01: Chiusura Verticale opaca semplice, prestazione standard e struttura in acciaio - Nodo di interfaccia parete-solaio**



**Figura 12. C.V.01: Chiusura Verticale opaca semplice, prestazione standard e struttura in acciaio - Nodi di interfaccia parete-serramento**

### 2.2.2 Chiusura Orizzontale superiore (C.O. superiore)

La seconda unità tecnologica che è stata selezionata a valle della scomposizione tecnologico-funzionale dell'involucro secondo la UNI 8290-1 riguarda le chiusure orizzontali superiori. Anche per tale categoria, seguendo le indicazioni date dalla medesima norma, sono state individuate otto differenti classi di elementi tecnici di interesse per l'attività di ricerca: (i) continua, (ii) discontinua, (iii) continua ventilata, (iv) discontinua ventilata, (v) verde, (vi) piana non praticabile, (vii) piana praticabile, e (viii) piana verde.

All'interno di ciascuna classe, come introdotto nella Sezione 2.2 del presente report e presentato in Figura 8, si è scelto di studiare tre varianti prestazionali (standard, iperisolata, alta inerzia) e, per ciascuna, tre differenti tipologie di struttura portante (acciaio, telaio in legno, XLAM).

Per la categoria delle Chiusure Orizzontali superiori (C.O.sup), sono state dunque complessivamente studiate, progettate e rappresentate 72 differenti soluzioni con sistema S/R, come dettagliato in Tabella 3. Si ricorda che il lavoro è stato strutturato secondo un'impostazione appositamente aperta e replicabile, in modo da renderlo implementabile nel tempo per garantire una continua integrazione dei contenuti.

**Tabella 3. Lista delle soluzioni di Chiusura Orizzontale superiore (C.O.sup)**

| ID        | UNITA' TECNOLOGICA             | CLASSE DI ELEMENTO TECNICO | TIPOLOGIA PRESTAZIONALE | TIPOLOGIA STRUTTURALE |
|-----------|--------------------------------|----------------------------|-------------------------|-----------------------|
| C.O.sup01 | Chiusura Orizzontale superiore | Continua                   | Standard                | Acciaio               |
| C.O.sup02 | Chiusura Orizzontale superiore | Continua                   | Standard                | Telaio in legno       |
| C.O.sup03 | Chiusura Orizzontale superiore | Continua                   | Standard                | XLAM                  |
| C.O.sup04 | Chiusura Orizzontale superiore | Continua                   | Iperisolata             | Acciaio               |
| C.O.sup05 | Chiusura Orizzontale superiore | Continua                   | Iperisolata             | Telaio in legno       |
| C.O.sup06 | Chiusura Orizzontale superiore | Continua                   | Iperisolata             | XLAM                  |
| C.O.sup07 | Chiusura Orizzontale superiore | Continua                   | Alta inerzia            | Acciaio               |
| C.O.sup08 | Chiusura Orizzontale superiore | Continua                   | Alta inerzia            | Telaio in legno       |
| C.O.sup09 | Chiusura Orizzontale superiore | Continua                   | Alta inerzia            | XLAM                  |
| C.O.sup10 | Chiusura Orizzontale superiore | Discontinua                | Standard                | Acciaio               |
| C.O.sup11 | Chiusura Orizzontale superiore | Discontinua                | Standard                | Telaio in legno       |
| C.O.sup12 | Chiusura Orizzontale superiore | Discontinua                | Standard                | XLAM                  |
| C.O.sup13 | Chiusura Orizzontale superiore | Discontinua                | Iperisolata             | Acciaio               |
| C.O.sup14 | Chiusura Orizzontale superiore | Discontinua                | Iperisolata             | Telaio in legno       |
| C.O.sup15 | Chiusura Orizzontale superiore | Discontinua                | Iperisolata             | XLAM                  |
| C.O.sup16 | Chiusura Orizzontale superiore | Discontinua                | Alta inerzia            | Acciaio               |
| C.O.sup17 | Chiusura Orizzontale superiore | Discontinua                | Alta inerzia            | Telaio in legno       |
| C.O.sup18 | Chiusura Orizzontale superiore | Discontinua                | Alta inerzia            | XLAM                  |
| C.O.sup19 | Chiusura Orizzontale superiore | Continua ventilata         | Standard                | Acciaio               |
| C.O.sup20 | Chiusura Orizzontale superiore | Continua ventilata         | Standard                | Telaio in legno       |
| C.O.sup21 | Chiusura Orizzontale superiore | Continua ventilata         | Standard                | XLAM                  |
| C.O.sup22 | Chiusura Orizzontale superiore | Continua ventilata         | Iperisolata             | Acciaio               |
| C.O.sup23 | Chiusura Orizzontale superiore | Continua ventilata         | Iperisolata             | Telaio in legno       |
| C.O.sup24 | Chiusura Orizzontale superiore | Continua ventilata         | Iperisolata             | XLAM                  |
| C.O.sup25 | Chiusura Orizzontale superiore | Continua ventilata         | Alta inerzia            | Acciaio               |
| C.O.sup26 | Chiusura Orizzontale superiore | Continua ventilata         | Alta inerzia            | Telaio in legno       |
| C.O.sup27 | Chiusura Orizzontale superiore | Continua ventilata         | Alta inerzia            | XLAM                  |

|           |                                |                       |              |                 |
|-----------|--------------------------------|-----------------------|--------------|-----------------|
| C.O.sup28 | Chiusura Orizzontale superiore | Discontinua ventilata | Standard     | Acciaio         |
| C.O.sup29 | Chiusura Orizzontale superiore | Discontinua ventilata | Standard     | Telaio in legno |
| C.O.sup30 | Chiusura Orizzontale superiore | Discontinua ventilata | Standard     | XLAM            |
| C.O.sup31 | Chiusura Orizzontale superiore | Discontinua ventilata | Iperisolata  | Acciaio         |
| C.O.sup32 | Chiusura Orizzontale superiore | Discontinua ventilata | Iperisolata  | Telaio in legno |
| C.O.sup33 | Chiusura Orizzontale superiore | Discontinua ventilata | Iperisolata  | XLAM            |
| C.O.sup34 | Chiusura Orizzontale superiore | Discontinua ventilata | Alta inerzia | Acciaio         |
| C.O.sup35 | Chiusura Orizzontale superiore | Discontinua ventilata | Alta inerzia | Telaio in legno |
| C.O.sup36 | Chiusura Orizzontale superiore | Discontinua ventilata | Alta inerzia | XLAM            |
| C.O.sup37 | Chiusura Orizzontale superiore | Verde                 | Standard     | Acciaio         |
| C.O.sup38 | Chiusura Orizzontale superiore | Verde                 | Standard     | Telaio in legno |
| C.O.sup39 | Chiusura Orizzontale superiore | Verde                 | Standard     | XLAM            |
| C.O.sup40 | Chiusura Orizzontale superiore | Verde                 | Iperisolata  | Acciaio         |
| C.O.sup41 | Chiusura Orizzontale superiore | Verde                 | Iperisolata  | Telaio in legno |
| C.O.sup42 | Chiusura Orizzontale superiore | Verde                 | Iperisolata  | XLAM            |
| C.O.sup43 | Chiusura Orizzontale superiore | Verde                 | Alta inerzia | Acciaio         |
| C.O.sup44 | Chiusura Orizzontale superiore | Verde                 | Alta inerzia | Telaio in legno |
| C.O.sup45 | Chiusura Orizzontale superiore | Verde                 | Alta inerzia | XLAM            |
| C.O.sup46 | Chiusura Orizzontale superiore | Piana non praticabile | Standard     | Acciaio         |
| C.O.sup47 | Chiusura Orizzontale superiore | Piana non praticabile | Standard     | Telaio in legno |
| C.O.sup48 | Chiusura Orizzontale superiore | Piana non praticabile | Standard     | XLAM            |
| C.O.sup49 | Chiusura Orizzontale superiore | Piana non praticabile | Iperisolata  | Acciaio         |
| C.O.sup50 | Chiusura Orizzontale superiore | Piana non praticabile | Iperisolata  | Telaio in legno |
| C.O.sup51 | Chiusura Orizzontale superiore | Piana non praticabile | Iperisolata  | XLAM            |
| C.O.sup52 | Chiusura Orizzontale superiore | Piana non praticabile | Alta inerzia | Acciaio         |
| C.O.sup53 | Chiusura Orizzontale superiore | Piana non praticabile | Alta inerzia | Telaio in legno |
| C.O.sup54 | Chiusura Orizzontale superiore | Piana non praticabile | Alta inerzia | XLAM            |
| C.O.sup55 | Chiusura Orizzontale superiore | Piana praticabile     | Standard     | Acciaio         |
| C.O.sup56 | Chiusura Orizzontale superiore | Piana praticabile     | Standard     | Telaio in legno |
| C.O.sup57 | Chiusura Orizzontale superiore | Piana praticabile     | Standard     | XLAM            |
| C.O.sup58 | Chiusura Orizzontale superiore | Piana praticabile     | Iperisolata  | Acciaio         |
| C.O.sup59 | Chiusura Orizzontale superiore | Piana praticabile     | Iperisolata  | Telaio in legno |
| C.O.sup60 | Chiusura Orizzontale superiore | Piana praticabile     | Iperisolata  | XLAM            |
| C.O.sup61 | Chiusura Orizzontale superiore | Piana praticabile     | Alta inerzia | Acciaio         |
| C.O.sup62 | Chiusura Orizzontale superiore | Piana praticabile     | Alta inerzia | Telaio in legno |
| C.O.sup63 | Chiusura Orizzontale superiore | Piana praticabile     | Alta inerzia | XLAM            |
| C.O.sup64 | Chiusura Orizzontale superiore | Piana verde           | Standard     | Acciaio         |
| C.O.sup65 | Chiusura Orizzontale superiore | Piana verde           | Standard     | Telaio in legno |
| C.O.sup66 | Chiusura Orizzontale superiore | Piana verde           | Standard     | XLAM            |
| C.O.sup67 | Chiusura Orizzontale superiore | Piana verde           | Iperisolata  | Acciaio         |
| C.O.sup68 | Chiusura Orizzontale superiore | Piana verde           | Iperisolata  | Telaio in legno |
| C.O.sup69 | Chiusura Orizzontale superiore | Piana verde           | Iperisolata  | XLAM            |

|           |                                |             |              |                 |
|-----------|--------------------------------|-------------|--------------|-----------------|
| C.O.sup70 | Chiusura Orizzontale superiore | Piana verde | Alta inerzia | Acciaio         |
| C.O.sup71 | Chiusura Orizzontale superiore | Piana verde | Alta inerzia | Telaio in legno |
| C.O.sup72 | Chiusura Orizzontale superiore | Piana verde | Alta inerzia | XLAM            |

A titolo esemplificativo, in Figura 13 viene presentata la sezione corrente di una delle soluzioni che sono state studiate e rappresentate nell'ambito dell'attività di ricerca, corrispondente in particolare alla C.O.sup01 individuata in Tabella 3. Per completezza, in Figura 14 e Figura 15 vengono riportati anche i nodi di interfaccia copertura-parete e copertura-serramento progettati per la soluzione. Si ricorda che, come anticipato nella sezione introduttiva 2.2, per una consultazione completa delle soluzioni studiate si può fare riferimento ai file Excel e DWG consegnati in digitale insieme al presente report.

1. Rivestimento esterno in lamiera zincata con doppia aggraffatura.
2. Assito di supporto al rivestimento. Sp. 25 mm.
3. Orditura in listelli di legno. Dim. 30x60 mm.
4. Membrana impermeabilizzante.
5. Pannello isolante in XPS. Sp. 80 mm,  $\rho = 35 \text{ kg/m}^3$ ,  $\lambda = 0,035 \text{ W/mK}$ .
6. Pannello di irrigidimento in OSB. Sp. 18 mm,  $\rho = 600 \text{ kg/m}^3$ ,  $\lambda = 0,13 \text{ W/mK}$ .
7. Impalcato in lamiera grecata in acciaio galvanizzato. Sp. 75 mm. Strato di separazione in membrana traspirante.
8. Pannello isolante in lana di roccia. Sp. 60 mm,  $\rho = 70 \text{ kg/m}^3$ ,  $\lambda = 0,033 \text{ W/mK}$ .
9. Lastra in gesso rivestito con barriera al vapore. Sp. 12,5 mm,  $\rho = 680 \text{ kg/m}^3$ ,  $\lambda = 0,20 \text{ W/mK}$ .
10. Struttura secondaria a supporto dell'impalcato in lamiera grecata, IPE 100.
11. Struttura di controsoffitto con profili a omega.

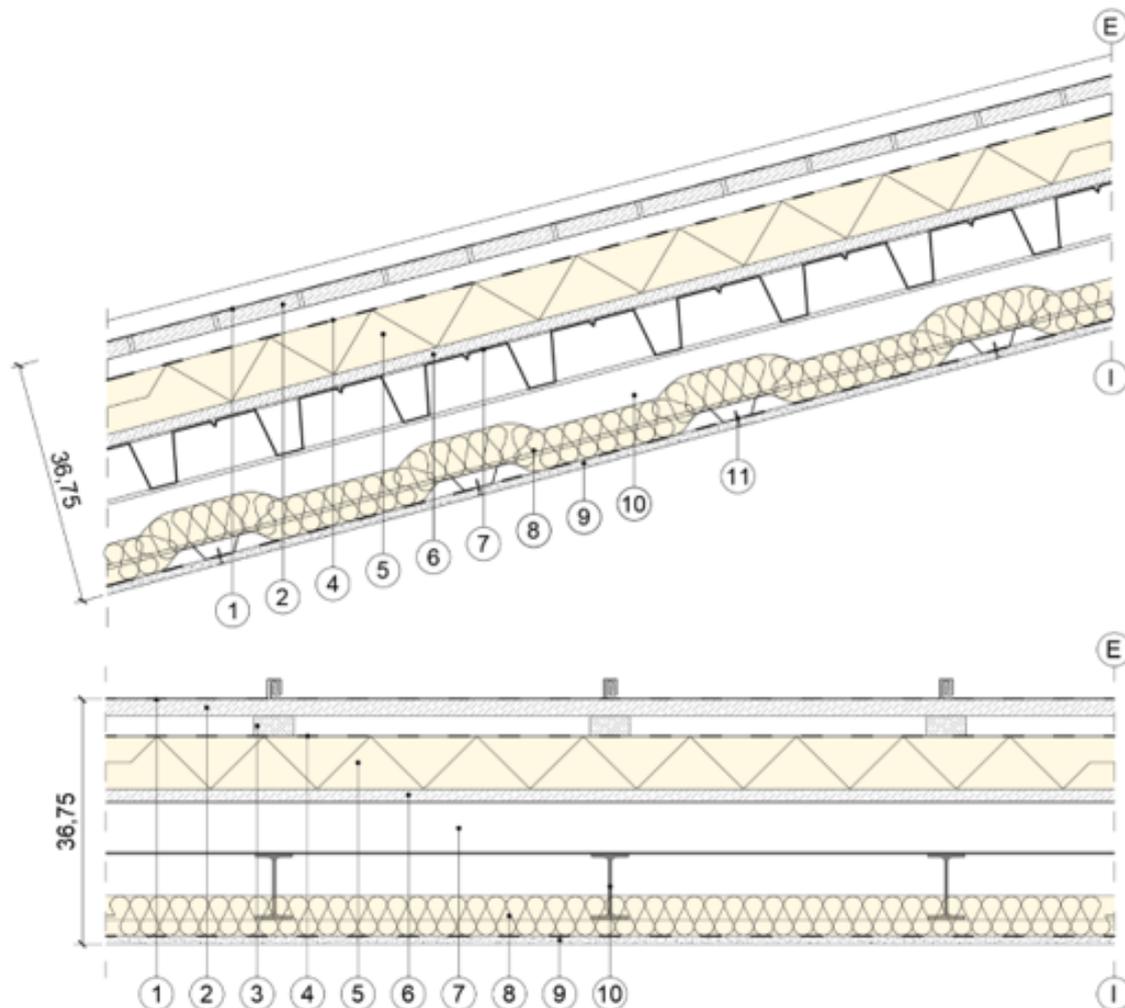
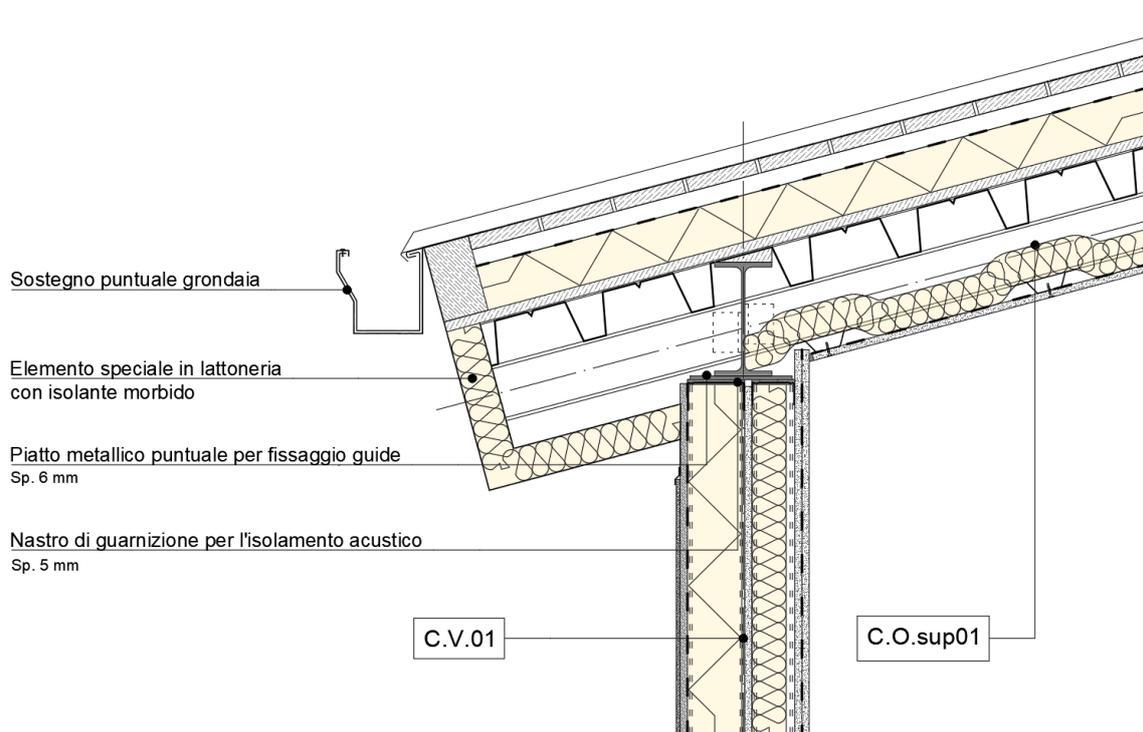
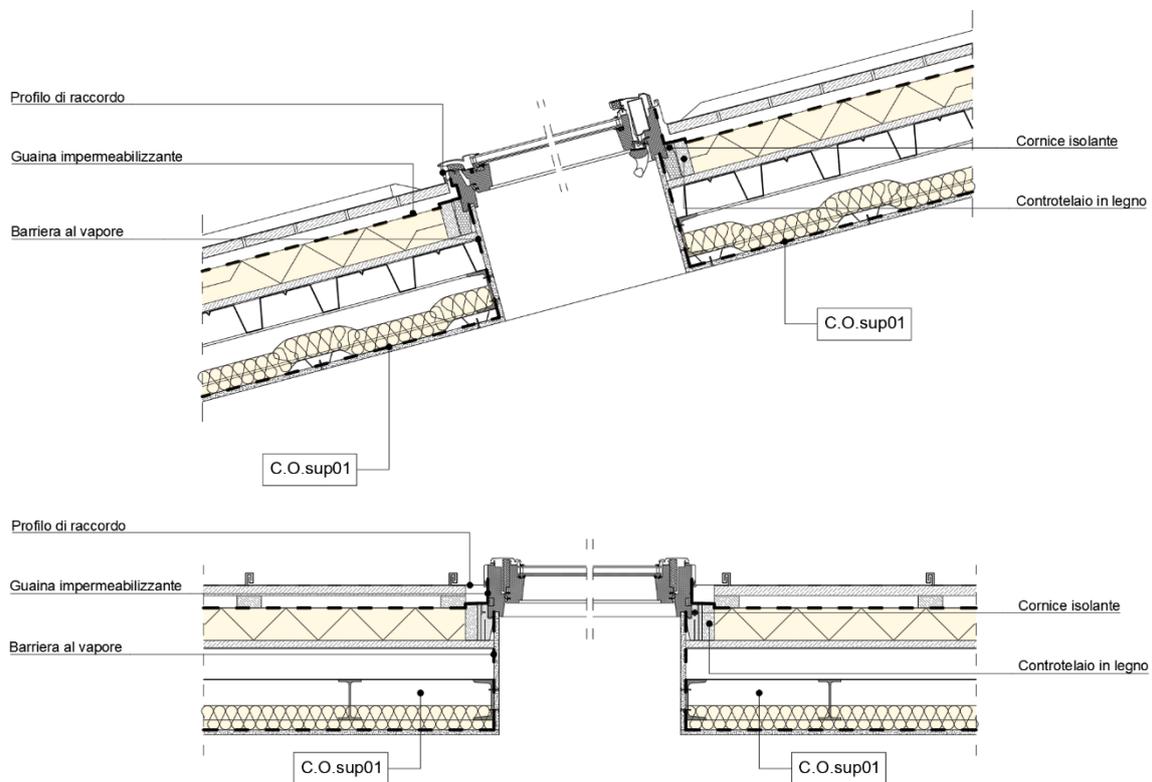


Figura 13. C.O.sup01: Chiusura Orizzontale superiore continua, prestazione standard e struttura in acciaio



**Figura 14. C.O.sup01: Chiusura Orizzontale superiore continua, prestazione standard e struttura in acciaio - Nodo di interfaccia copertura-parete**



**Figura 15. C.O.sup01: Chiusura Orizzontale superiore continua, prestazione standard e struttura in acciaio - Nodi di interfaccia copertura-serramento**

### 2.2.3 Chiusura Orizzontale su spazi esterni (C.O. su spazi esterni)

La terza unità tecnologica che è stata selezionata a valle della scomposizione tecnologico-funzionale dell'involucro secondo la UNI 8290-1 riguarda le chiusure orizzontali su spazi esterni. Anche per tale categoria, come introdotto nella Sezione 2.2 del presente report e presentato in Figura 8, si è scelto di studiare tre varianti prestazionali (standard, iperisolata, alta inerzia) e, per ciascuna, tre differenti tipologie di struttura portante (acciaio, telaio in legno, XLAM).

Per la categoria delle Chiusure Orizzontali su spazi esterni (C.O.est), sono state dunque complessivamente studiate, progettate e rappresentate 9 differenti soluzioni con sistema S/R, come dettagliato in Tabella 4. Si ricorda che il lavoro è stato strutturato secondo un'impostazione appositamente aperta e replicabile, in modo da renderlo implementabile nel tempo per garantire una continua integrazione dei contenuti.

**Tabella 4. Lista delle soluzioni di Chiusura Orizzontale su spazi esterni (C.O.est)**

| ID        | UNITA' TECNOLOGICA                    | CLASSE DI ELEMENTO TECNICO | TIPOLOGIA PRESTAZIONALE | TIPOLOGIA STRUTTURALE |
|-----------|---------------------------------------|----------------------------|-------------------------|-----------------------|
| C.O.est01 | Chiusura Orizzontale su spazi esterni |                            | Standard                | Acciaio               |
| C.O.est02 | Chiusura Orizzontale su spazi esterni |                            | Standard                | Telaio in legno       |
| C.O.est03 | Chiusura Orizzontale su spazi esterni |                            | Standard                | XLAM                  |
| C.O.est04 | Chiusura Orizzontale su spazi esterni |                            | Iperisolata             | Acciaio               |
| C.O.est05 | Chiusura Orizzontale su spazi esterni |                            | Iperisolata             | Telaio in legno       |
| C.O.est06 | Chiusura Orizzontale su spazi esterni |                            | Iperisolata             | XLAM                  |
| C.O.est07 | Chiusura Orizzontale su spazi esterni |                            | Alta inerzia            | Acciaio               |
| C.O.est08 | Chiusura Orizzontale su spazi esterni |                            | Alta inerzia            | Telaio in legno       |
| C.O.est09 | Chiusura Orizzontale su spazi esterni |                            | Alta inerzia            | XLAM                  |

A titolo esemplificativo, in Figura 16 viene presentata la sezione corrente di una delle soluzioni che sono state studiate e rappresentate nell'ambito dell'attività di ricerca, corrispondente in particolare alla C.O.est01 individuata in Tabella 4. Per completezza, in Figura 17 viene riportato anche il nodo di interfaccia solaio-parete progettato per la soluzione. Si ricorda che, come anticipato nella sezione introduttiva 2.2, per una consultazione completa delle soluzioni studiate si può fare riferimento ai file Excel e DWG consegnati in digitale insieme al presente report.

1. Pavimentazione interna in gres. Sp. 15 mm.
2. Strato impiantistico con massetto premiscelato ad alta conducibilità, sp. 30 mm, pannelli radianti, sp. 54 mm, e materassino anticalpestio, sp. 8 mm.
3. Sottofondo a secco in soaglie di legno mineralizzato, sp. 80 mm, con membrana di protezione.
4. Pannello di irrigidimento in OSB. Sp. 18 mm,  $\rho = 600 \text{ kg/m}^3$ ,  $\lambda = 0,13 \text{ W/mK}$ .
5. Impalcato in lamiera grecata in acciaio galvanizzato. Sp. 75 mm. Strato di separazione in membrana traspirante.
6. Pannello isolante in lana di roccia. Sp. 60 mm,  $\rho = 70 \text{ kg/m}^3$ ,  $\lambda = 0,033 \text{ W/mK}$ .
7. Lastra in cemento fibrorinforzato per esterni. Sp. 12,5 mm,  $\rho = 1150 \text{ kg/m}^3$ ,  $\lambda = 0,35 \text{ W/mK}$ .
8. Pannello isolante in EPS. Sp. 20 mm,  $\rho = 18 \text{ kg/m}^3$ ,  $\lambda = 0,036 \text{ W/mK}$ .
9. Controsoffitto autoportante in acciaio per esterni.

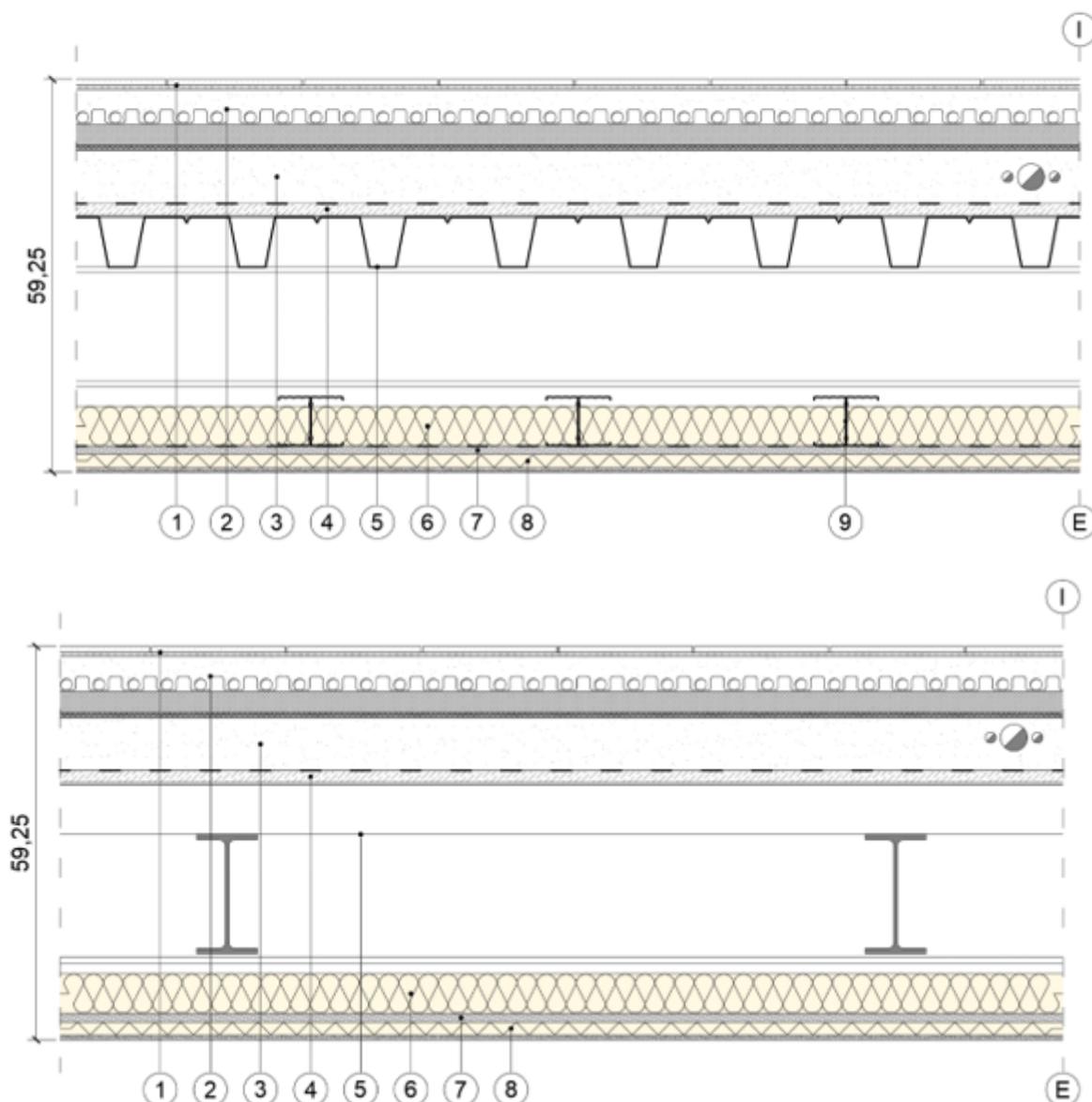
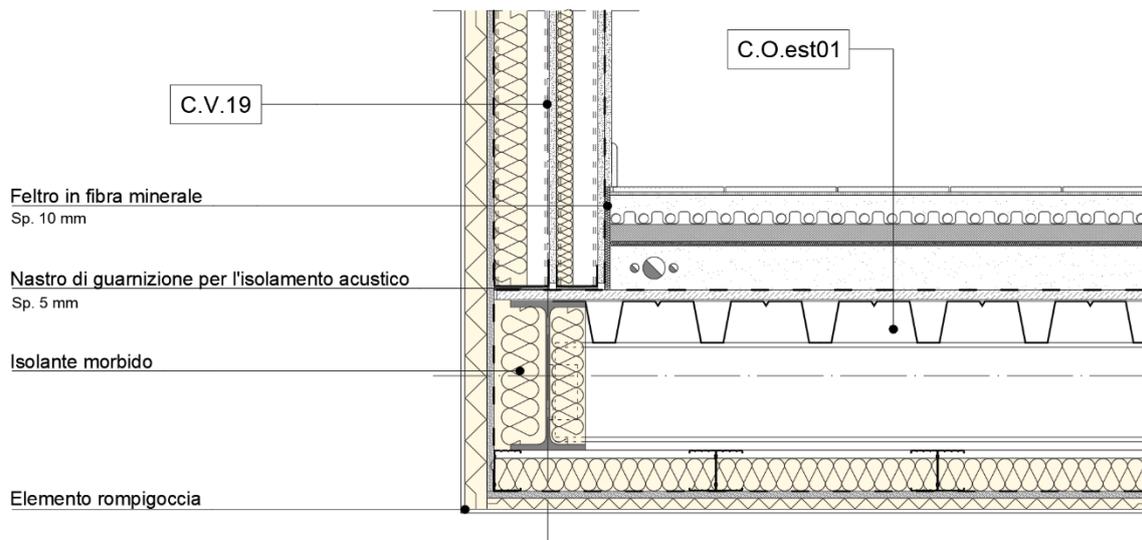


Figura 16. C.O.est01: Chiusura Orizzontale su spazi esterni, prestazione standard e struttura in acciaio



**Figura 17. C.O.est01: Chiusura Orizzontale su spazi esterni, prestazione standard e struttura in acciaio - Nodo di interfaccia solaio-parete**

#### 2.2.4 Partizione Orizzontale (P.O.)

La quarta e ultima unità tecnologica che è stata selezionata a valle della scomposizione tecnologico-funzionale dell’involucro secondo la UNI 8290-1 riguarda le partizioni orizzontali interne. Per tale categoria, come introdotto nella Sezione 2.2 del presente report e presentato in Figura 8, si è scelto di studiare una sola variante prestazionale (standard) e tre differenti tipologie di struttura portante (acciaio, telaio in legno, XLAM).

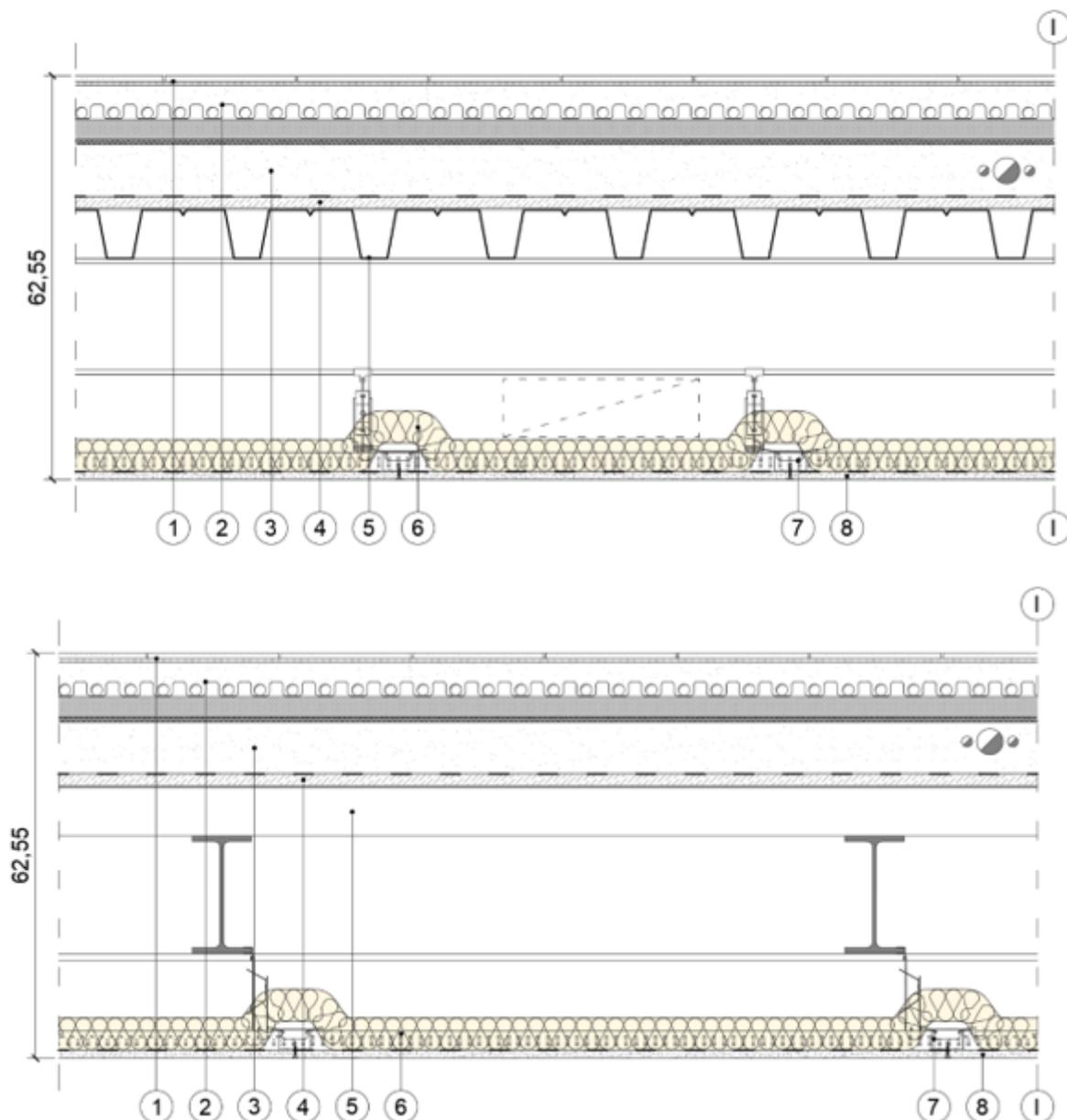
Per la categoria delle Partizioni Orizzontali (P.O.), sono state dunque complessivamente studiate, progettate e rappresentate 3 differenti soluzioni con sistema S/R, come dettagliato in Tabella 5. Si ricorda che il lavoro è stato strutturato secondo un’impostazione appositamente aperta e replicabile, in modo da renderlo implementabile nel tempo per garantire una continua integrazione dei contenuti.

**Tabella 5. Lista delle soluzioni di Partizione Orizzontale (P.O.)**

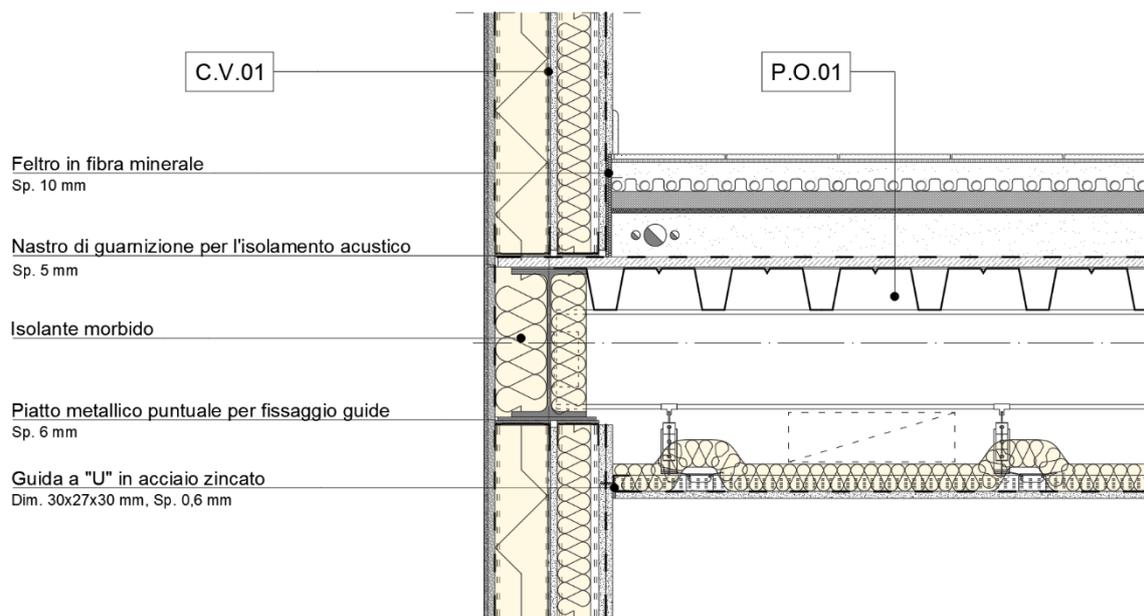
| ID     | UNITA' TECNOLOGICA             | CLASSE DI ELEMENTO TECNICO | TIPOLOGIA PRESTAZIONALE | TIPOLOGIA STRUTTURALE |
|--------|--------------------------------|----------------------------|-------------------------|-----------------------|
| P.O.01 | Partizione Interna Orizzontale |                            | Standard                | Acciaio               |
| P.O.02 | Partizione Interna Orizzontale |                            | Standard                | Telaio in legno       |
| P.O.03 | Partizione Interna Orizzontale |                            | Standard                | XLAM                  |

A titolo esemplificativo, in Figura 18 viene presentata la sezione corrente di una delle soluzioni che sono state studiate e rappresentate nell’ambito dell’attività di ricerca, corrispondente in particolare alla P.O.01 individuata in Tabella 5. Per completezza, in Figura 19 viene riportato anche il nodo di interfaccia solaio-parete progettato per la soluzione. Si ricorda che, come anticipato nella sezione introduttiva 2.2, per una consultazione completa delle soluzioni studiate si può fare riferimento ai file Excel e DWG consegnati in digitale insieme al presente report.

1. Pavimentazione interna in gres. Sp. 15 mm.
2. Strato impiantistico con massetto premiscelato ad alta conducibilità, sp. 30 mm, pannelli radianti, sp. 54 mm, e materassino anticalpestio, sp. 8 mm.
3. Sottofondo a secco in scaglie di legno mineralizzato, sp. 80 mm, con membrana di protezione.
4. Pannello di irrigidimento in OSB. Sp. 18 mm,  $p = 600 \text{ kg/m}^3$ ,  $\lambda = 0,13 \text{ W/mK}$ .
5. Impalcato in lamiera grecata in acciai galvanizzati. Sp. 75 mm. Strato di separazione e membrana traspirante.
6. Pannello isolante in lana di roccia. Sp. 50 mm,  $p = 70 \text{ kg/m}^3$ ,  $\lambda = 0,033 \text{ W/mK}$ .
7. Controsoffitto pendinato con gancio a molla, doppia orditura metallica non sovrapposta fissaggio a clip.
8. Lastra in gesso rivestito con barriera al vapore. Sp. 12,5 mm,  $p = 680 \text{ kg/m}^3$ ,  $\lambda = 0,20 \text{ W/mK}$ .



**Figura 18. P.O.01: Partizione Orizzontale, prestazione standard e struttura in acciaio**



**Figura 19. P.O.01: Partizione Orizzontale, prestazione standard e struttura in acciaio - Nodo di interfaccia solaio-parete**

### 2.3 Analisi termo-igrometrica agli elementi finiti (LA2.13.2)

La sezione corrente presenta e descrive le analisi agli elementi finiti effettuate sulle differenti soluzioni conformi per la determinazione di trasmittanza termica media, flusso termico medio e temperature superficiali interne minime.

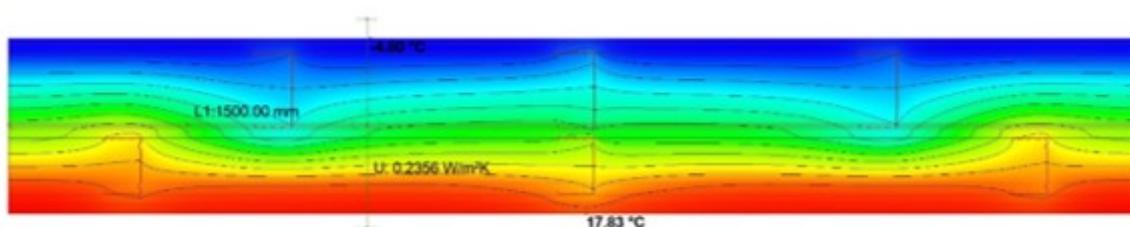
L'attività è stata eseguita utilizzando il software Dartwin Mold 5 Dynamic 3D PRO ([www.dartwin.it](http://www.dartwin.it)). Il tool è un software commerciale in grado di eseguire l'analisi termica e igrometrica di componenti e sistemi edili in rispetto della norma vigente in materia (ISO 10211:2008, ISO 13788:2013). Una volta inserita la geometria da analizzare e applicati i materiali componenti il sistema, il software calcola secondo il metodo agli elementi finiti la trasmissione di energia tra due diverse situazioni al contorno, permettendo di derivare l'andamento dei flussi termici, la distribuzione della temperatura, le trasmittanze termiche media e lineare di qualsiasi elemento tecnico costituente l'edificio.

Le caratteristiche geometriche delle soluzioni di involucro e le proprietà dei materiali che le compongono sono le stesse definite nel corso della LA2.13.1, mentre le condizioni al contorno impostate per il calcolo della trasmittanza termica media sono riportate in Tabella 6.

**Tabella 6. Condizioni al contorno impostate per l'analisi agli elementi finiti delle soluzioni conformi**

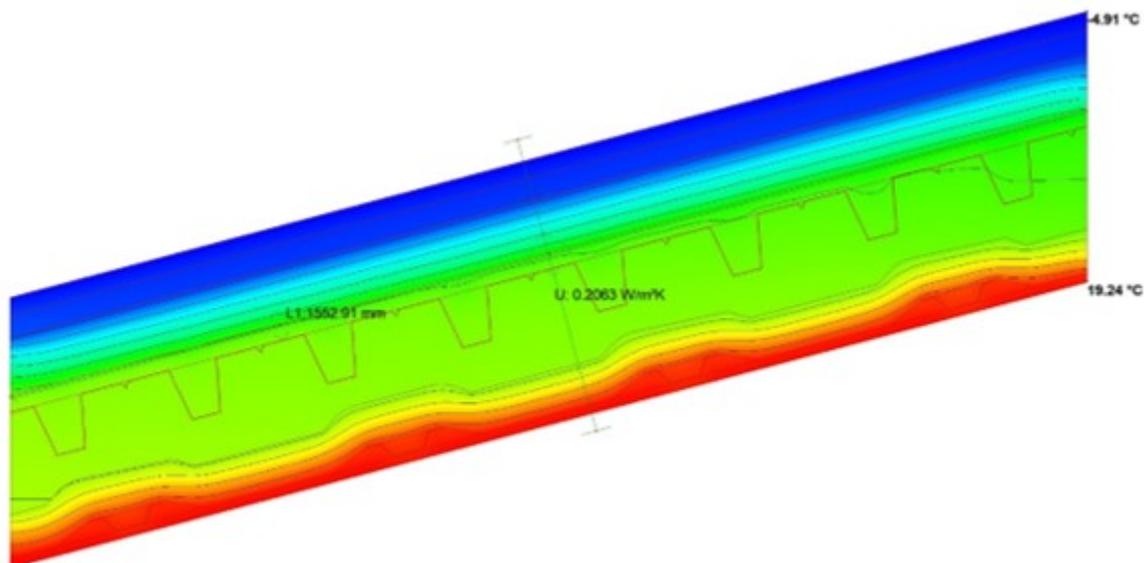
| PARAMETRO  | VALORE DI RIFERIMENTO   |
|--|-------------------------|
| Sviluppo   | 1500 mm                 |
| Temperatura esterna                                    | -5 °C                   |
| Temperatura interna                                    | 20 °C                   |
| Resistenza esterna                                     | 0,04 m <sup>2</sup> K/W |
| Resistenza interna (elementi di involucro orizzontale) | 0,10 m <sup>2</sup> K/W |
| Resistenza interna (elementi di involucro verticale)   | 0,13 m <sup>2</sup> K/W |

A titolo esemplificativo, in Figura 20, Figura 21 e Figura 22 vengono presentati i risultati dell'analisi agli elementi finiti condotta, rispettivamente, sulle soluzioni: C.V.01, individuata in Tabella 2; C.O.sup01, individuata in Tabella 3; C.O.est01, individuata in Tabella 4. Si ricorda che, come anticipato nella sezione introduttiva 2.2, per una consultazione completa delle soluzioni studiate si può fare riferimento ai file consegnati in digitale insieme al presente report.



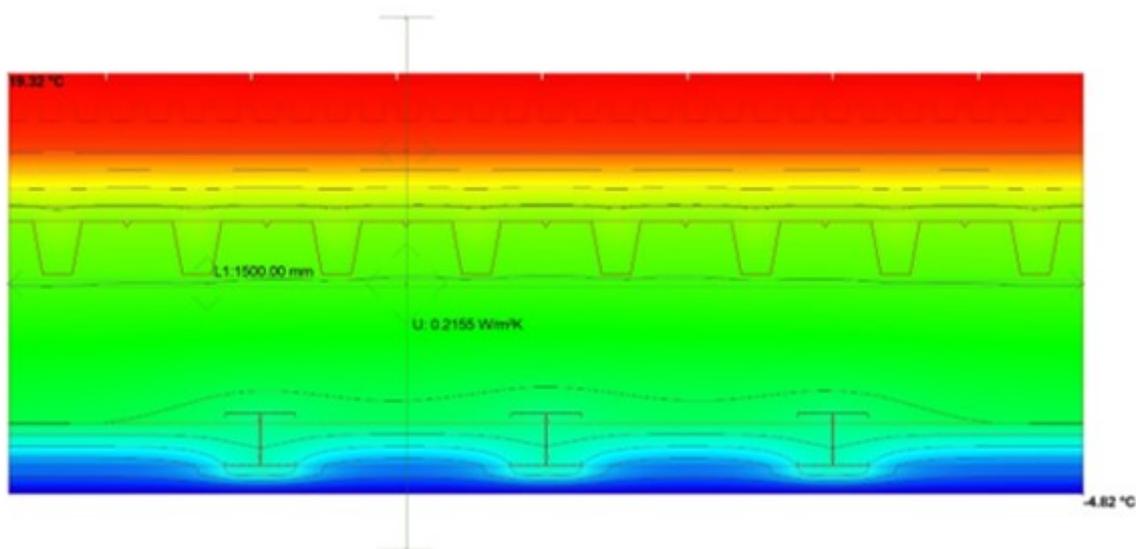
**Trasmittanza termica media**      0,351 W/m<sup>2</sup>K      **Flusso termico medio**      13,179 W/m

**Figura 20. C.V.01: Chiusura Verticale opaca semplice, prestazione standard e struttura in acciaio – Analisi FEM, distribuzione isoterme**



**Trasmittanza termica media** 0,212 W/m<sup>2</sup>K **Flusso termico medio** 7,941 W/m

Figura 21. C.O.sup01: Chiusura Orizzontale superiore continua, prestazione standard e struttura in acciaio – Analisi FEM, distribuzione isoterme



**Trasmittanza termica media** 0,285 W/m<sup>2</sup>K **Flusso termico medio** 10,678 W/m

Figura 22. C.O.est01: Chiusura Orizzontale su spazi esterni, prestazione standard e struttura in acciaio – Analisi FEM, distribuzione isoterme

### 2.3.1 Confronto tra performance simulate e sperimentali

A valle delle analisi numeriche e agli elementi finiti condotte sulle differenti soluzioni conformi, la presente sezione ha l'obiettivo di mettere a confronto i risultati derivanti da tali operazioni di simulazione con i valori ottenuti tramite specifiche campagne di misurazione su campioni reali di soluzioni d'involucro S/R.

In particolare, nell'ambito di una campagna di monitoraggio eseguita per conto dell'azienda Brianza Plastica, sono state studiate, realizzate e monitorate sette differenti soluzioni di involucro come esempio di analisi comparativa, come mostrato tramite la restituzione delle rispettive sezioni correnti riportata in Figura 23.

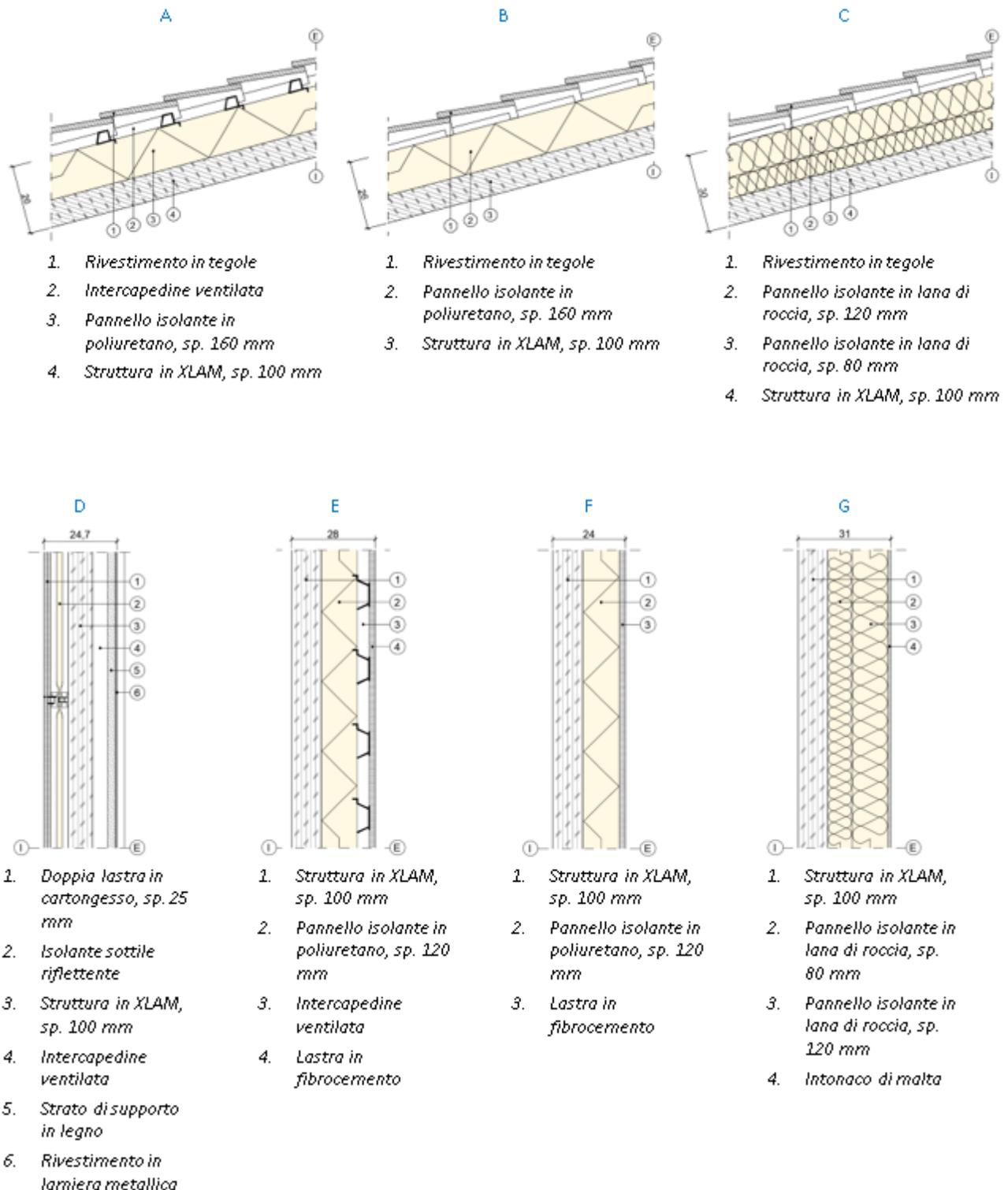


Figura 23. Sezioni correnti delle differenti soluzioni oggetto di analisi comparativa

Come sintetizzato in Tabella 7, tenendo conto dei differenti parametri oggetto di monitoraggio per ciascuna soluzione, nonché delle differenti stagioni prese come riferimento, sono stati ipotizzati quattro prevalenti livelli di confronto: (i) temperature superficiali ( $T_{sup}$ ), paragonando i risultati dell'analisi FEM con quelli rilevati sui campioni reali; (ii) trasmittanza termica ( $U$ ), confrontando calcolo numerico, analisi FEM, e rilevazioni in regime invernale; (iii) flusso termico ( $\Phi$ ), paragonando valori derivanti dall'analisi FEM e valori reali; e (iv) sfasamento dell'onda termica ( $\varphi$ ), valutando graficamente la differenza tra valori di calcolo e risultati reali.

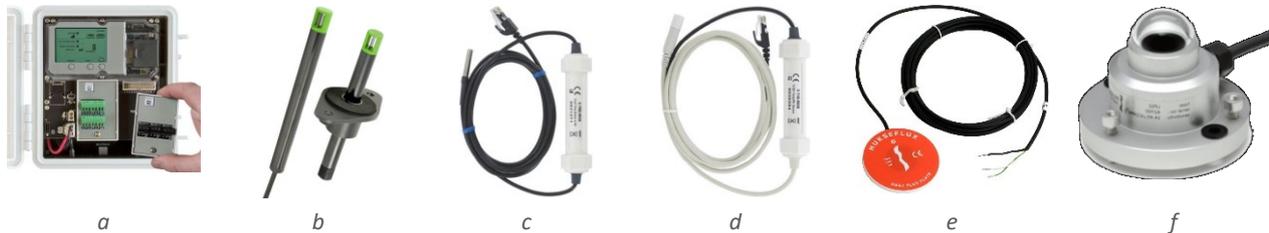
**Tabella 7. Lista delle soluzioni monitorate a scopo comparativo simulazione-misurazione**

| ID | UNITA' TECNOLOGICA             | CLASSE DI ELEMENTO TECNICO | PARAMETRI MONITORATI      | STAGIONE DI RIFERIMENTO | CONFRONTO  |
|----|--------------------------------|----------------------------|---------------------------|-------------------------|--|
| A  | Chiusura Orizzontale superiore | Discontinua ventilata      | T, $T_{sup}$ , RH, $\Phi$ | Inverno                 | $T_{sup}$ : FEM/Reale<br>$U$ : Calcolo/FEM/Reale<br>$\Phi$ : FEM/Reale |
|    |                                |                            |                           | Estate                  | $\varphi$ : Calcolo/Reale  |
| B  | Chiusura Orizzontale superiore | Continua                   | T, $T_{sup}$ , RH, $\Phi$ | Inverno                 | $T_{sup}$ : FEM/Reale<br>$U$ : Calcolo/FEM/Reale<br>$\Phi$ : FEM/Reale |
|    |                                |                            |                           | Estate                  | $\varphi$ : Calcolo/Reale  |
| C  | Chiusura Orizzontale superiore | Discontinua                | T, $T_{sup}$ , RH, $\Phi$ | Estate                  | $\varphi$ : Calcolo/Reale  |
| D  | Chiusura Verticale             | Opaca semplice             | T, $T_{sup}$ , RH, $\Phi$ | Primavera               | $T_{sup}$ : FEM/Reale<br>$U$ : Calcolo/FEM/Reale<br>$\Phi$ : FEM/Reale |
| E  | Chiusura Verticale             | Ventilata                  | T, $T_{sup}$ , RH         | Inverno                 | $T_{sup}$ : FEM/Reale  |
|    |                                |                            |                           | Estate                  | $\varphi$ : Calcolo/Reale  |
| F  | Chiusura Verticale             | Con sistema a cappotto     | T, $T_{sup}$ , RH         | Inverno                 | $T_{sup}$ : FEM/Reale  |
|    |                                |                            |                           | Estate                  | $\varphi$ : Calcolo/Reale  |
| G  | Chiusura Verticale             | Con sistema a cappotto     | T, $T_{sup}$ , RH         | Inverno                 | $T_{sup}$ : FEM/Reale  |
|    |                                |                            |                           | Estate                  | $\varphi$ : Calcolo/Reale  |

La misura in opera delle prestazioni delle differenti soluzioni è stata condotta attraverso strumenti e sensori certificati in grado di rilevare le condizioni puntuali di temperatura e flusso termico dei materiali impiegati nonché delle condizioni ambientali interne ed esterne. Nello specifico, il set di sensori utilizzato per l'indagine è stato connesso attraverso plugs o fili liberi al data logger ed è composto dai seguenti strumenti:

- Data logger HOBO RX3000 (Figura 24.a), la centrale di raccolta ed elaborazione dei dati a cui sono collegati i diversi sensori di acquisizione delle grandezze fisiche. Lo strumento memorizza i dati dai sensori connessi e li invia a un server online, l'accesso ai dati avviene attraverso un portale con accesso via web.
- Anemometro a filo caldo (Figura 24.b), una sonda per velocità dell'aria compatta progettata per essere resistente agli agenti inquinanti, assicurando elevata precisione e stabilità nel tempo. L'elemento sensibile è ad altissima tecnologia e funziona con il principio del filo caldo, per cui non vi sono parti in movimento soggette a usura meccanica. È caratterizzata da un range di misura compreso tra 0 e 5 m/s, e una precisione di 0,2-0,4 m/s in base alla scala.
- Sensore di temperatura superficiale (Figura 24.c), costituito da una piccola termocoppia montata su un elemento metallico e collegata alla superficie del provino mediante pasta adesiva conduttiva; ha una risoluzione di 0,01 °C e può essere isolato termicamente verso l'esterno con materiale isolante.
- Sensore termoigrometrico (Figura 24.d), costituito da un sensore di temperatura, con range di misura tra -40 °C e 75 °C e risoluzione 0,02 °C, e da un sensore capacitivo per la misura dell'umidità relativa, con range di misura 0-100% e risoluzione 0,1%. Se usato in esterno è accoppiato a un apposito schermo antiradiante.

- Sensore di flusso (Figura 24.e), per la misura del flusso termico in transito nelle soluzioni tecnologiche.
- Piranometro (Figura 24.f), un sensore a termopila per la misura della radiazione solare globale. Misura la sola componente diffusa della luce solare nello spettro 0,3-3  $\mu\text{m}$  con un campo di misura 0-2000  $\text{W}/\text{m}^2$ .



**Figura 24. Set di strumenti utilizzati per la misura in opera delle prestazioni**

Prima di procedere con l'effettiva attività di raffronto con i dati di monitoraggio, sono stati innanzitutto calcolati in regime statico i principali parametri relativi alle soluzioni individuate, numericamente e mediante analisi agli elementi finiti (come precedentemente descritto in Sezione 2.3). I paragrafi seguenti riportano in particolare i risultati di tale attività per ciascuna delle soluzioni oggetto di analisi, presentando per ognuna anche il rispettivo confronto con i dati sperimentali rilevati (secondo quanto riassunto in Tabella 7) nell'ambito di una campagna di monitoraggio eseguita per conto dell'azienda Brianza Plastica, che con l'occasione si ringrazia per il contributo al progetto e per avere concesso l'utilizzo di alcuni dati sperimentali frutto di test eseguiti su proprie configurazioni di copertura e parete.

#### A. Chiusura Orizzontale superiore discontinua ventilata

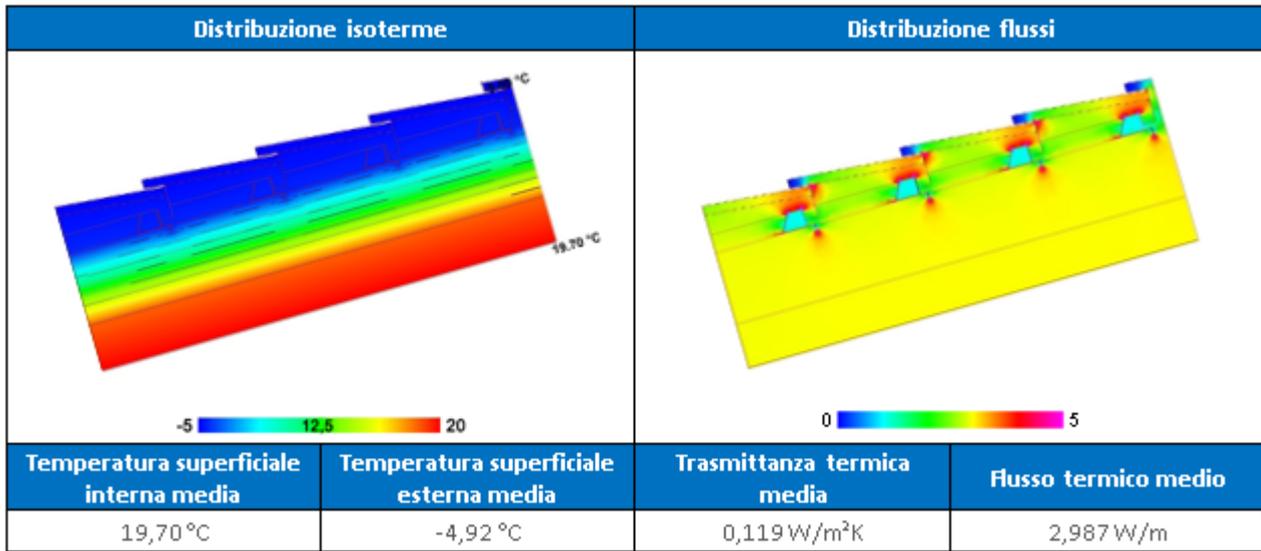
La valutazione dei principali parametri estivi e invernali in regime statico è stata effettuata mediante apposito foglio di calcolo conforme allo standard EN ISO 13786. I risultati relativi alla soluzione A sono riassunti in Tabella 8.

**Tabella 8. Risultati del calcolo numerico in regime statico relativo alla soluzione A**

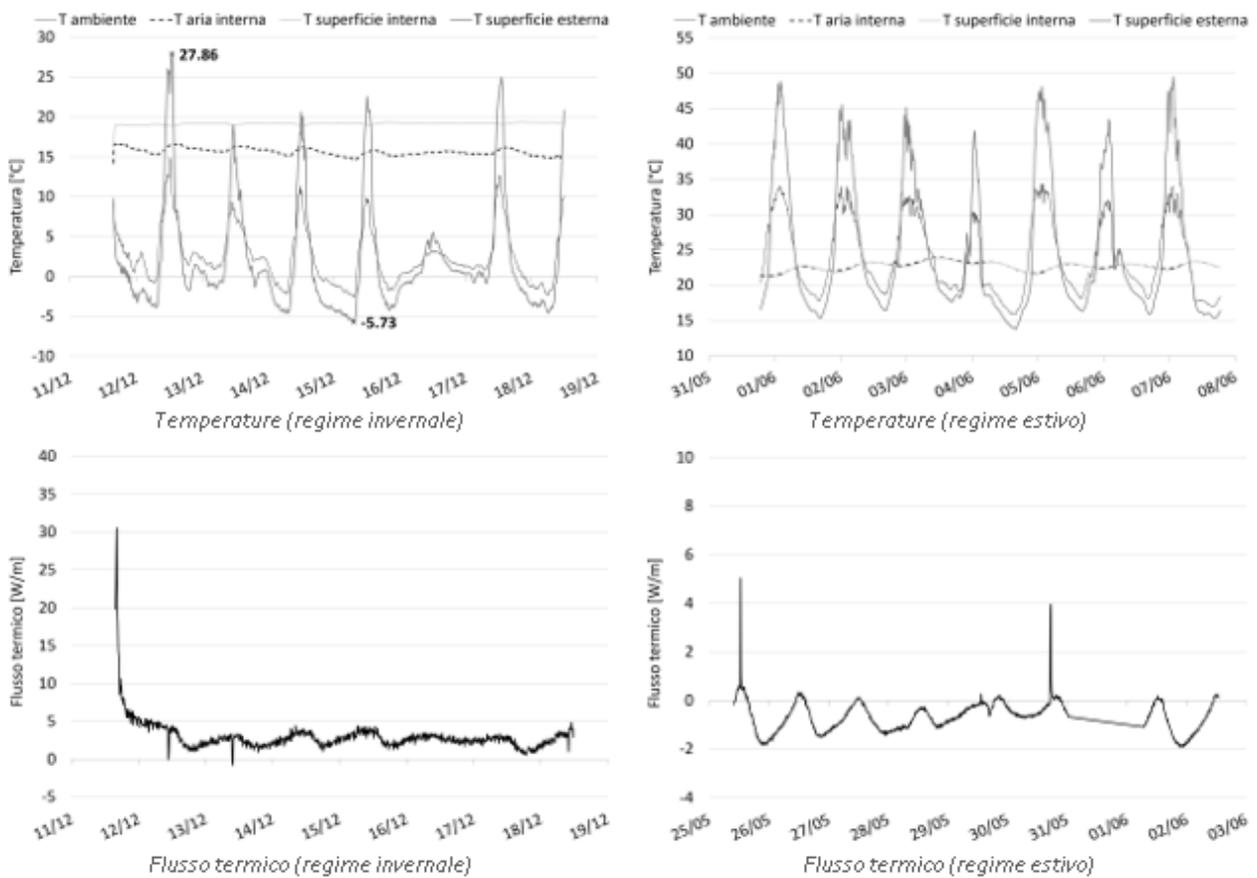
| Trasmittanza termica (U)            | Trasmittanza termica periodica ( $Y_{ie}$ ) | Capacità termica (C)         | Sfasamento termico ( $\varphi$ ) | Fattore di attenuazione (f) |
|-------------------------------------|---|------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|
| 0,122 $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ | 0,045 $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$         | 33,425 $\text{J}/\text{kgK}$ | 8,94 h                           | 0,368                       |

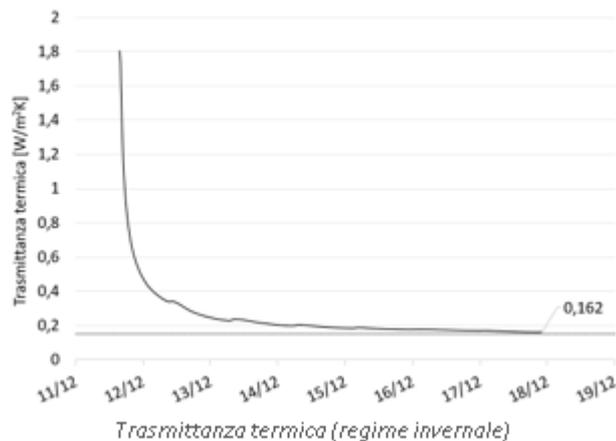
Come introdotto al capitolo 2.3, l'analisi agli elementi finiti è stata eseguita utilizzando il software Dartwin Mold 5 Dynamic 3D PRO ([www.dartwin.it](http://www.dartwin.it)), un software commerciale in grado di eseguire l'analisi termica e igrometrica di componenti e sistemi edili in rispetto della norma vigente in materia (ISO 10211:2008, ISO 13788:2013). In particolare, la soluzione è stata simulata su uno sviluppo di 1500 mm e sono state impostate condizioni al contorno in termini di temperatura e resistenza pari a  $-5\text{ }^\circ\text{C}$  e  $0,04\text{ m}^2\text{K}/\text{W}$  per l'esterno e  $20\text{ }^\circ\text{C}$  e  $0,10\text{ m}^2\text{K}/\text{W}$  per l'interno. I risultati relativi alla soluzione A sono presentati in Tabella 9.

Tabella 9. Risultati dell'analisi agli elementi finiti relativa alla soluzione A



Relativamente alla campagna di monitoraggio condotta sulla soluzione A, in Figura 25 sono mostrati alcuni dei risultati di tale attività, in particolare in termini di temperature, flussi termici e valutazione della rispettiva trasmittanza termica.



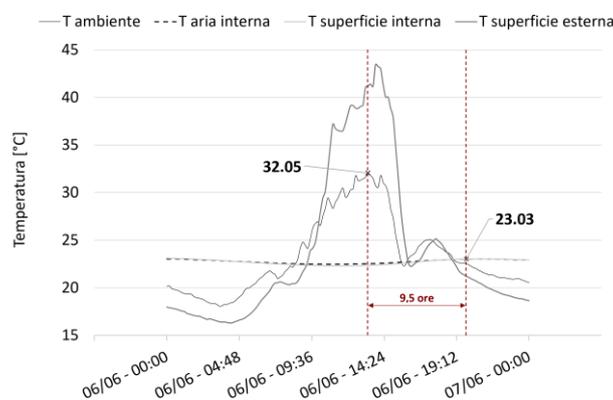


**Figura 25. Risultato della campagna di monitoraggio relativa alla soluzione A, rispettivamente in regime invernale (sulla sinistra) ed estivo (sulla destra); dall'alto: temperature, flussi termici, e trasmittanza termica**

Come introdotto in Tabella 7, per quanto riguarda la soluzione A l'attività di confronto si è concentrata in particolare su 4 parametri: temperature superficiali e trasmittanza termica, in inverno, sfasamento dell'onda termica, in estate, e flusso termico, in entrambe le stagioni.

In riferimento alle temperature superficiali simulate e rilevate, è utile precisare innanzitutto che – al contrario della campagna di monitoraggio – le temperature superficiali ottenute tramite analisi agli elementi finiti (FEM) sono simulate in regime statico, e i risultati sono di conseguenza vincolati alle condizioni al contorno impostate, corrispondenti in particolare a  $-5\text{ °C}$  e  $20\text{ °C}$ , rispettivamente per ambiente esterno e interno. Di conseguenza, mentre la simulazione FEM presentata in Tabella 9 ha restituito temperature medie pari a  $-4,92\text{ °C}$  e  $19,70\text{ °C}$ , rispettivamente per superficie esterna e interna, in condizioni reali in regime invernale la soluzione raggiunge picchi di temperatura sulla superficie esterna di circa  $-5,73\text{ °C}$ , mentre le temperature interne risultano essere mediamente stabili grazie al sistema di condizionamento dell'aria interna.

In particolare, confrontando i valori di sfasamento dell'onda termica calcolati e riportati in Tabella 8 (8,94 ore) con quelli rilevati durante la campagna di monitoraggio nella stagione estiva (Figura 26), si evidenzia che in condizioni reali la soluzione di involucro garantisce circa 9,5 ore di sfasamento, rispettando piuttosto fedelmente l'ordine di grandezza atteso dai risultati di calcolo.



**Figura 26. Focus sui valori di temperatura rilevati in regime estivo, per la valutazione delle proprietà di sfasamento dell'onda termica della soluzione A**

Da un primo parziale confronto tra i risultati del calcolo numerico e dell'analisi agli elementi finiti, inoltre, si nota che i due valori di trasmittanza termica ( $0,122\text{ W/m}^2\text{K}$  da calcolo e  $0,119\text{ W/m}^2\text{K}$  da analisi FEM) sono praticamente sovrapponibili. Estendendo il confronto anche ai dati derivanti dal monitoraggio, si evidenzia

che la performance reale della soluzione A si distacca in maniera piuttosto importante da tali valori, raggiungendo in maniera asintotica una trasmittanza termica pari a 0,162 W/m<sup>2</sup>K.

Relativamente al flusso termico, infine, il comportamento della soluzione in condizioni reali in regime invernale risulta essere molto simile al valore medio ottenuto da analisi FEM (2,987 W/m), muovendosi infatti in un range compreso tra circa 1 e 5 W/m.

**B. Chiusura Orizzontale superiore continua**

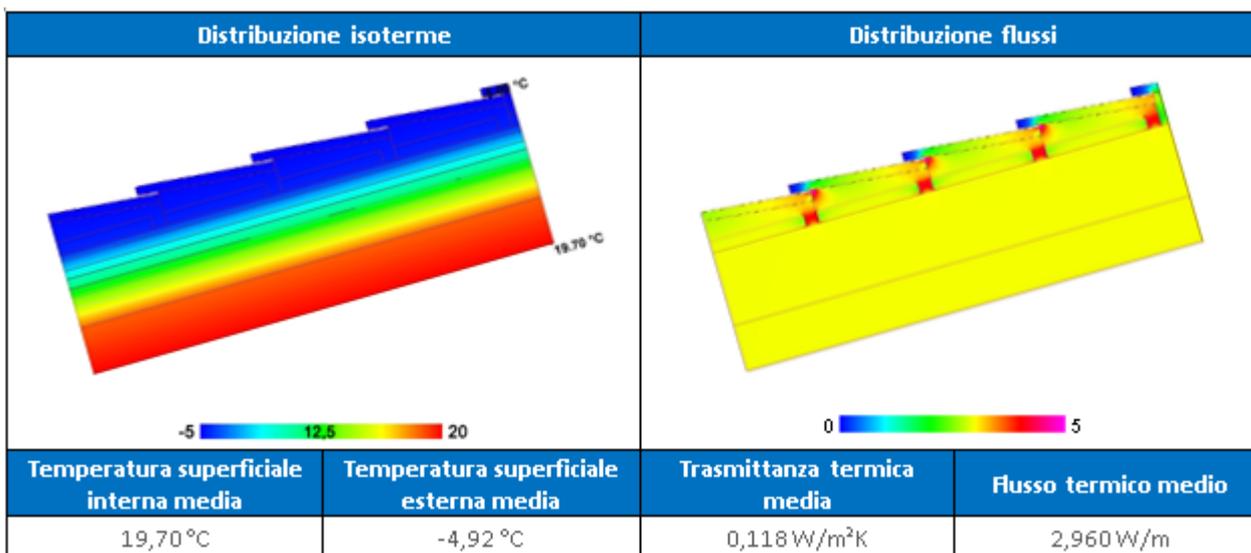
La valutazione dei principali parametri estivi e invernali in regime statico è stata effettuata mediante apposito foglio di calcolo conforme allo standard EN ISO 13786. I risultati relativi alla soluzione B sono riassunti in Tabella 10.

**Tabella 10. Risultati del calcolo numerico in regime statico relativo alla soluzione B**

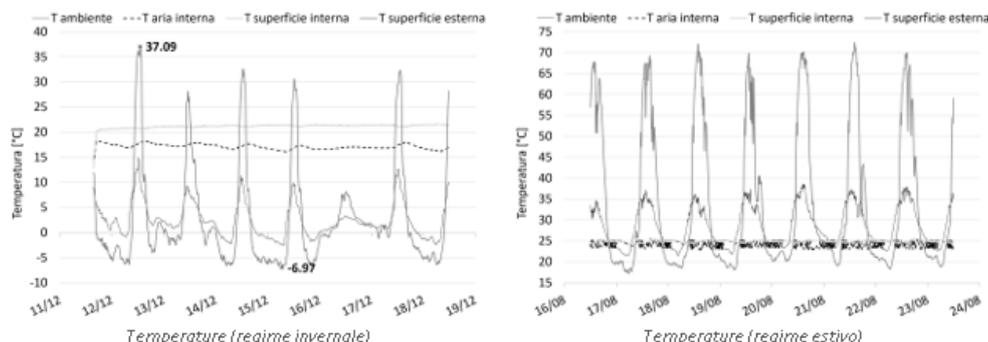
| Trasmittanza termica (U) | Trasmittanza termica periodica (Y <sub>ie</sub> ) | Capacità termica (C) | Sfasamento termico (φ) | Fattore di attenuazione (f) |
|--------------------------|---|----------------------|------------------------|-----------------------------|
| 0,122 W/m <sup>2</sup> K | 0,045 W/m <sup>2</sup> K                          | 33,425 J/kgK         | 8,94 h                 | 0,368                       |

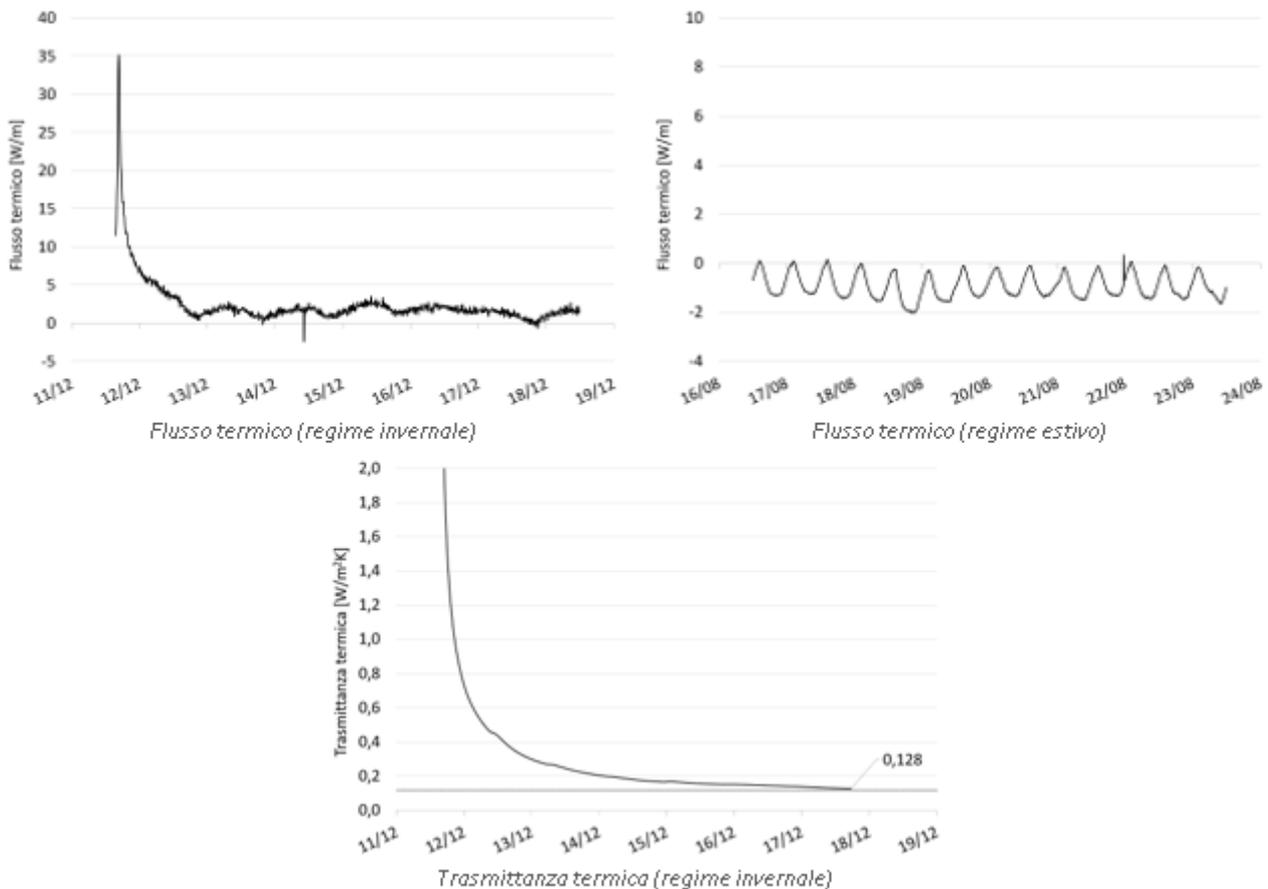
Come introdotto al capitolo 2.3, la soluzione seguente è stata simulata su uno sviluppo di 1500 mm e sono state impostate condizioni al contorno in termini di temperatura e resistenza pari a -5 °C e 0,04 m<sup>2</sup>K/W per l'esterno e 20 °C e 0,10 m<sup>2</sup>K/W per l'interno. I risultati relativi alla soluzione B sono presentati in Tabella 11.

**Tabella 11. Risultati dell'analisi agli elementi finiti relativa alla soluzione B**



Relativamente alla campagna di monitoraggio condotta sulla soluzione B, in Figura 27 sono mostrati alcuni dei risultati di tale attività, in particolare in termini di temperature, flussi termici e valutazione della rispettiva trasmittanza termica.



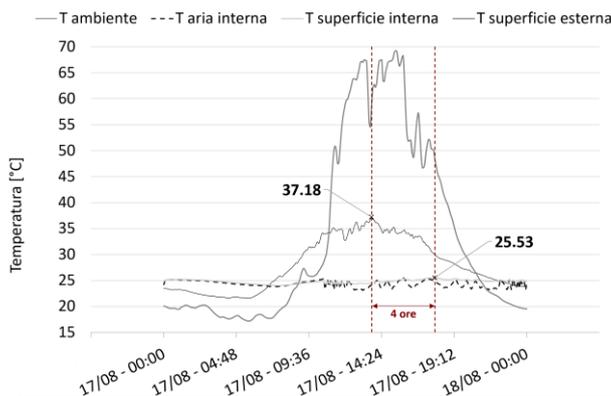


**Figura 27. Risultato della campagna di monitoraggio relativa alla soluzione B, rispettivamente in regime invernale (sulla sinistra) ed estivo (sulla destra); dall'alto: temperature, flussi termici, e trasmittanza termica**

Come introdotto in Tabella 7, anche per quanto riguarda la soluzione B l'attività di confronto si è concentrata in particolare su 4 parametri: temperature superficiali e trasmittanza termica, in inverno, sfasamento dell'onda termica, in estate, e flusso termico, in entrambe le stagioni.

In riferimento alle temperature superficiali simulate e rilevate, è utile precisare ancora una volta che – al contrario della campagna di monitoraggio – le temperature superficiali ottenute tramite analisi agli elementi finiti (FEM) sono simulate in regime statico, e i risultati sono di conseguenza vincolati alle condizioni al contorno impostate, corrispondenti in particolare a  $-5\text{ °C}$  e  $20\text{ °C}$ , rispettivamente per ambiente esterno e interno. Di conseguenza, mentre la simulazione FEM presentata in Tabella 11 ha restituito temperature medie pari a  $-4,92\text{ °C}$  e  $19,70\text{ °C}$ , rispettivamente per superficie esterna e interna, in condizioni reali in regime invernale la soluzione raggiunge picchi di temperatura sulla superficie esterna di circa  $-6,97\text{ °C}$ , mentre le temperature interne risultano essere mediamente stabili grazie al sistema di condizionamento dell'aria interna.

In particolare, confrontando i valori di sfasamento dell'onda termica calcolati e riportati in Tabella 10 (8,94 ore) con quelli rilevati durante la campagna di monitoraggio nella stagione estiva (Figura 28), si evidenzia che in condizioni reali la soluzione di involucro garantisce circa 4 ore di sfasamento, circa la metà di quanto atteso dai risultati di calcolo.



**Figura 28. Focus sui valori di temperatura rilevati in regime estivo, per la valutazione delle proprietà di sfasamento dell’onda termica della soluzione B**

Da un primo parziale confronto tra i risultati del calcolo numerico e dell’analisi agli elementi finiti, inoltre, si nota che i due valori di trasmittanza termica (0,122 W/m<sup>2</sup>K da calcolo e 0,118 W/m<sup>2</sup>K da analisi FEM) sono praticamente sovrapponibili. Estendendo il confronto anche ai dati derivanti dal monitoraggio, si evidenzia che la performance reale della soluzione B è piuttosto in linea con tali valori, raggiungendo in maniera asintotica una trasmittanza termica pari a 0,128 W/m<sup>2</sup>K.

Relativamente al flusso termico, infine, il comportamento della soluzione in condizioni reali in regime invernale risulta essere piuttosto in linea con il valore medio ottenuto da analisi FEM (2,960 W/m), muovendosi infatti in un range compreso tra circa 0 e 3 W/m.

**C. Chiusura Orizzontale superiore discontinua**

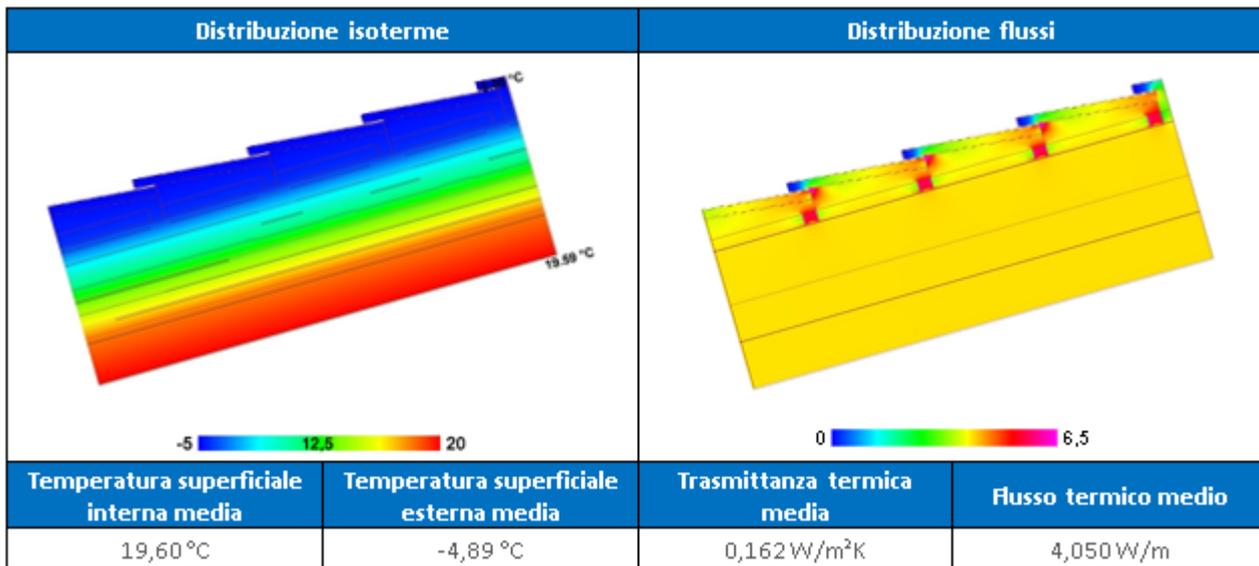
La valutazione dei principali parametri estivi e invernali in regime statico è stata effettuata mediante apposito foglio di calcolo conforme allo standard EN ISO 13786. I risultati relativi alla soluzione C sono riassunti in Tabella 12.

**Tabella 12. Risultati del calcolo numerico in regime statico relativo alla soluzione C**

| Trasmittanza termica (U) | Trasmittanza termica periodica (Y <sub>ie</sub> ) | Capacità termica (C) | Sfasamento termico (φ) | Fattore di attenuazione (f) |
|--------------------------|---|----------------------|------------------------|-----------------------------|
| 0,169 W/m <sup>2</sup> K | 0,037 W/m <sup>2</sup> K                          | 32,500 J/kgK         | 12,56 h                | 0,220                       |

Come introdotto al capitolo 2.3, la seguente soluzione è stata simulata su uno sviluppo di 1500 mm e sono state impostate condizioni al contorno in termini di temperatura e resistenza pari a -5 °C e 0,04 m<sup>2</sup>K/W per l’esterno e 20 °C e 0,10 m<sup>2</sup>K/W per l’interno. I risultati relativi alla soluzione C sono presentati in Tabella 13.

Tabella 13. Risultati dell'analisi agli elementi finiti relativa alla soluzione C



Relativamente alla campagna di monitoraggio condotta sulla soluzione C, in Figura 29 di seguito sono mostrati alcuni dei risultati di tale attività, in particolare in termini di temperature e flussi termici.

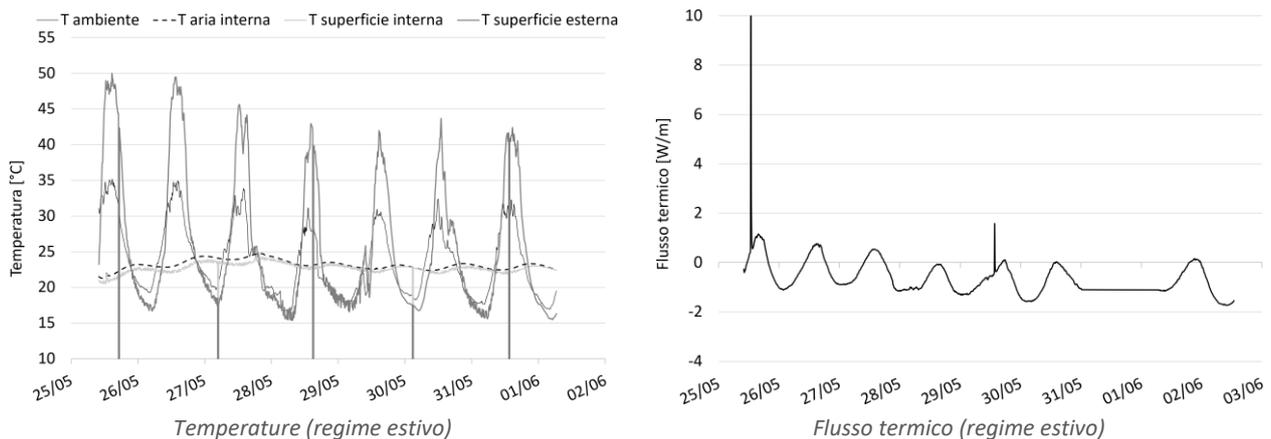
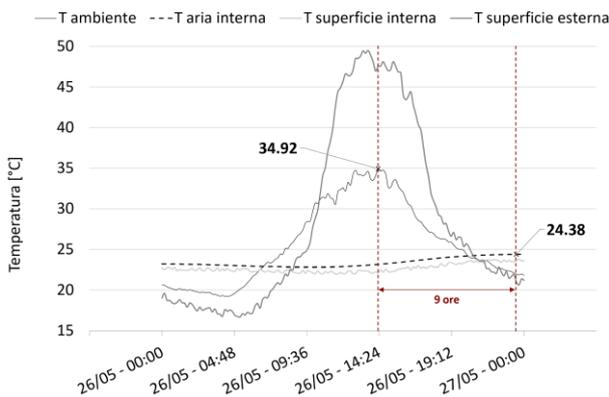


Figura 29. Risultato della campagna di monitoraggio relativa alla soluzione C, rispettivamente in termini di temperature (sulla sinistra) e flussi termici (sulla destra)

Come introdotto in Tabella 7, infatti, per quanto riguarda la soluzione C l'attività di confronto si è concentrata in particolare sulla valutazione dello sfasamento dell'onda termica in regime estivo.

In riferimento alle temperature superficiali rilevate, nonché ai valori di sfasamento che ne derivano, è utile precisare ancora una volta che – al contrario della campagna di monitoraggio – i valori ottenuti tramite analisi numerica sono frutto di calcolo in regime statico, e i risultati sono di conseguenza vincolati alle condizioni al contorno impostate e al metodo di calcolo. In particolare, confrontando i valori di sfasamento dell'onda termica calcolati e riportati in Tabella 12 (12,56 ore) con quelli rilevati durante la campagna di monitoraggio nella stagione estiva (Figura 30), si evidenzia che in condizioni reali la soluzione di involucro garantisce circa 9 ore di sfasamento, leggermente inferiori a quanto atteso dai risultati di calcolo.



**Figura 30. Focus sui valori di temperatura rilevati in regime estivo, per la valutazione delle proprietà di sfasamento dell’onda termica della soluzione C**

**D. Chiusura Verticale opaca semplice**

La valutazione dei principali parametri estivi e invernali in regime statico è stata effettuata mediante apposito foglio di calcolo conforme allo standard EN ISO 13786. I risultati relativi alla soluzione D sono riassunti in Tabella 14.

**Tabella 14. Risultati del calcolo numerico in regime statico relativo alla soluzione D**

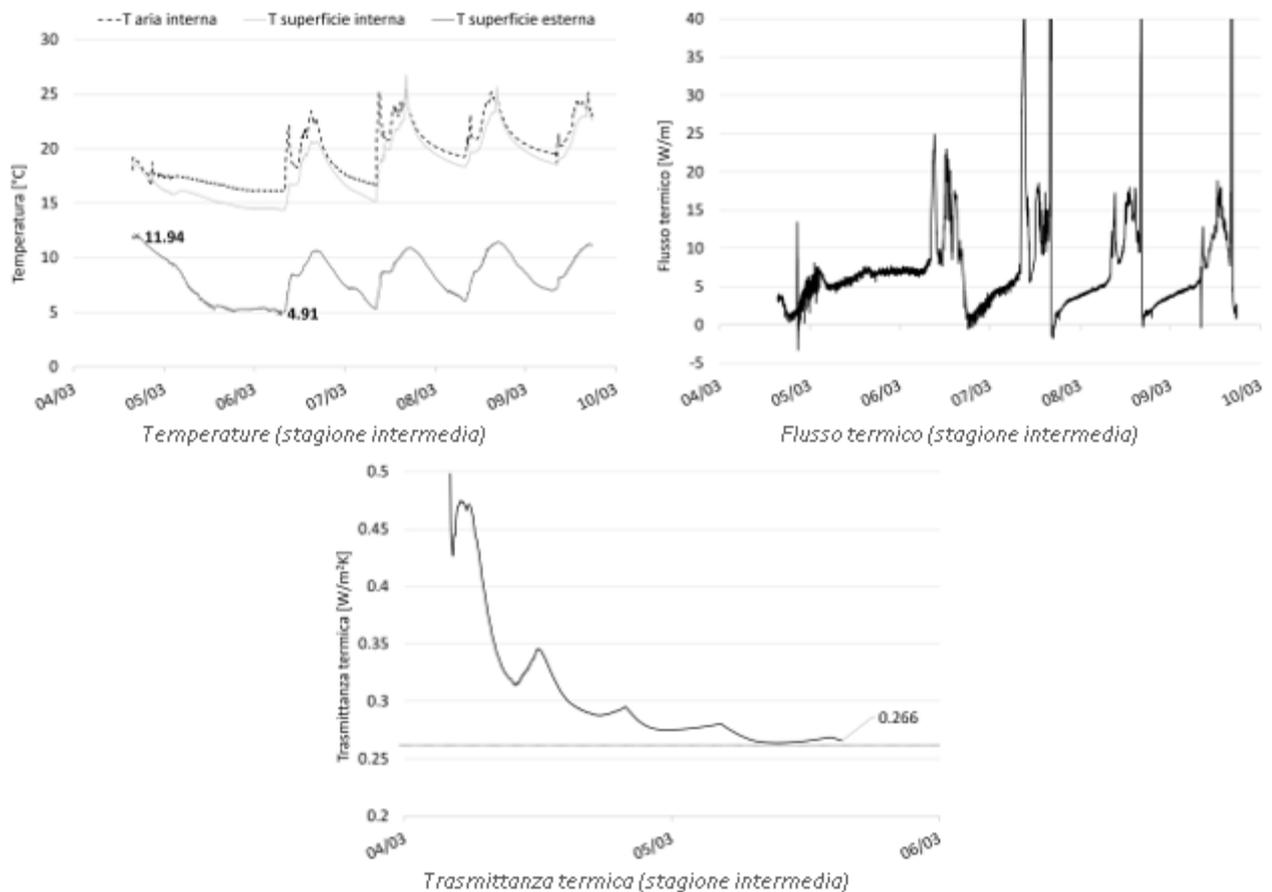
| Trasmittanza termica (U) | Trasmittanza termica periodica (Y <sub>ie</sub> ) | Capacità termica (C) | Sfasamento termico (φ) | Fattore di attenuazione (f) |
|--------------------------|---|----------------------|------------------------|-----------------------------|
| 0,158 W/m <sup>2</sup> K | 0,077 W/m <sup>2</sup> K                          | 17,805 J/kgK         | 6,49 h                 | 0,485                       |

Come introdotto al capitolo 2.3, la soluzione è stata simulata su uno sviluppo di 1500 mm e sono state impostate condizioni al contorno in termini di temperatura e resistenza pari a -5 °C e 0,04 m<sup>2</sup>K/W per l’esterno e 20 °C e 0,13 m<sup>2</sup>K/W per l’interno. I risultati relativi alla soluzione D sono presentati in Tabella 15.

**Tabella 15. Risultati dell’analisi agli elementi finiti relativa alla soluzione D**

| Distribuzione isoterme                 |  | Distribuzione flussi       |                      |
|--|--|----------------------------|----------------------|
|  |  |                            |                      |
| Temperatura superficiale interna media | Temperatura superficiale esterna media | Trasmittanza termica media | Flusso termico medio |
| 19,35 °C                               | -4,80 °C                               | 0,199 W/m <sup>2</sup> K   | 4,982 W/m            |

Relativamente alla campagna di monitoraggio condotta sulla soluzione D, in Figura 31 sono mostrati alcuni dei risultati di tale attività, in particolare in termini di temperature, flussi termici e valutazione della rispettiva trasmittanza termica.



**Figura 31. Risultato della campagna di monitoraggio relativa alla soluzione D, rispettivamente in termini di temperature (in alto a sinistra), flussi termici (in alto a destra), e trasmittanza termica (in basso)**

Come introdotto in Tabella 7, per quanto riguarda la soluzione D l'attività di confronto si è concentrata in particolare su 3 parametri: temperature superficiali, trasmittanza termica e flusso termico, in particolare durante la stagione intermedia.

In riferimento alle temperature superficiali simulate e rilevate, è utile precisare innanzitutto che – al contrario della campagna di monitoraggio – le temperature superficiali ottenute tramite analisi agli elementi finiti (FEM) sono simulate in regime statico, e i risultati sono di conseguenza vincolati alle condizioni al contorno impostate, corrispondenti in particolare a -5 °C e 20 °C, rispettivamente per ambiente esterno e interno. Di conseguenza, mentre la simulazione FEM presentata in Tabella 15 ha restituito temperature medie pari a -4,80 °C e 19,35 °C, rispettivamente per superficie esterna e interna, in condizioni reali durante la stagione intermedia la soluzione raggiunge picchi di temperatura sulla superficie esterna di soli circa 4,91 °C.

Da un primo parziale confronto tra i risultati del calcolo numerico e dell'analisi agli elementi finiti, inoltre, si nota che i due valori di trasmittanza termica (0,158 W/m²K da calcolo e 0,199 W/m²K da analisi FEM) differiscono di circa 0,041 W/m²K. Estendendo il confronto anche ai dati derivanti dal monitoraggio, si evidenzia che la performance reale della soluzione D, durante la stagione intermedia, si distacca in maniera piuttosto importante da tali valori, raggiungendo in maniera asintotica una trasmittanza termica pari a 0,266 W/m²K.

Relativamente al flusso termico, infine, il comportamento medio della soluzione in condizioni reali durante la stagione intermedia risulta essere piuttosto simile al valore medio ottenuto da analisi FEM (4,982 W/m), muovendosi infatti per la gran parte delle ore in un range compreso tra circa 0 e 10 W/m.

**E. Chiusura Verticale ventilata**

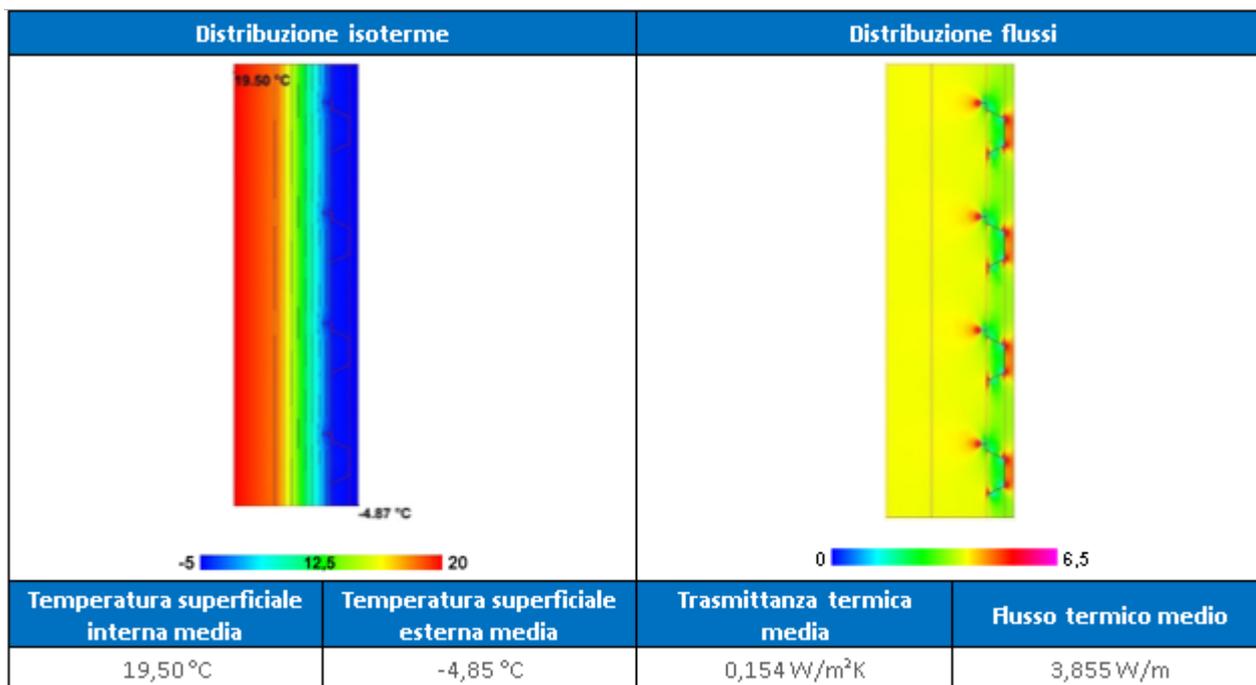
La valutazione dei principali parametri estivi e invernali in regime statico è stata effettuata mediante apposito foglio di calcolo conforme allo standard EN ISO 13786. I risultati relativi alla soluzione E sono riassunti in Tabella 16.

**Tabella 16. Risultati del calcolo numerico in regime statico relativo alla soluzione E**

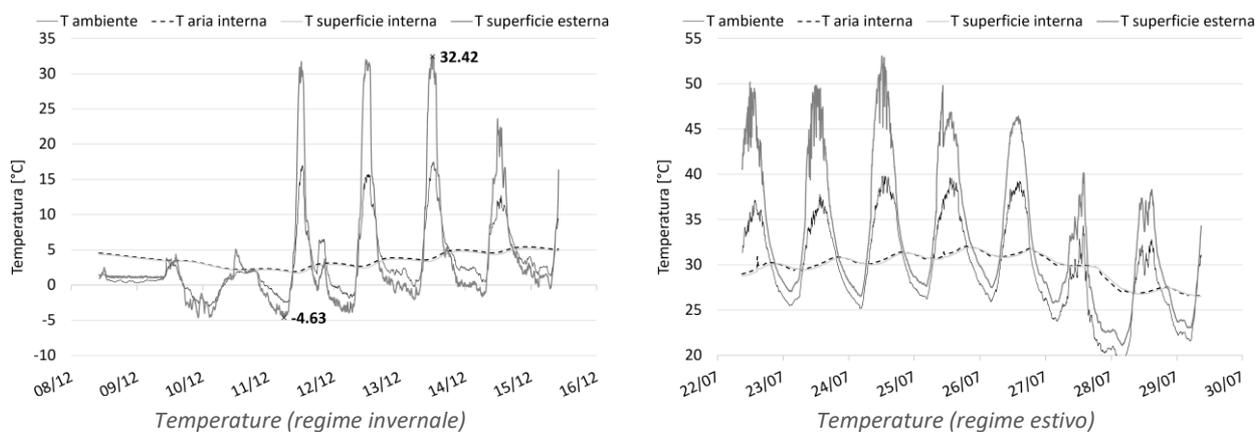
| Trasmittanza termica (U) | Trasmittanza termica periodica (Y <sub>ie</sub> ) | Capacità termica (C) | Sfasamento termico (φ) | Fattore di attenuazione (f) |
|--------------------------|---|----------------------|------------------------|-----------------------------|
| 0,156 W/m <sup>2</sup> K | 0,061 W/m <sup>2</sup> K                          | 31,762 J/kgK         | 7,87 h                 | 0,390                       |

Come introdotto al capitolo 2.3, la soluzione seguente è stata simulata su uno sviluppo di 1500 mm e sono state impostate condizioni al contorno in termini di temperatura e resistenza pari a -5 °C e 0,04 m<sup>2</sup>K/W per l'esterno e 20 °C e 0,13 m<sup>2</sup>K/W per l'interno. I risultati relativi alla soluzione E sono presentati in Tabella 17.

**Tabella 17. Risultati dell'analisi agli elementi finiti relativa alla soluzione E**



Relativamente alla campagna di monitoraggio condotta sulla soluzione E, in Figura 32 sono mostrati alcuni dei risultati di tale attività, in particolare in termini di temperature.

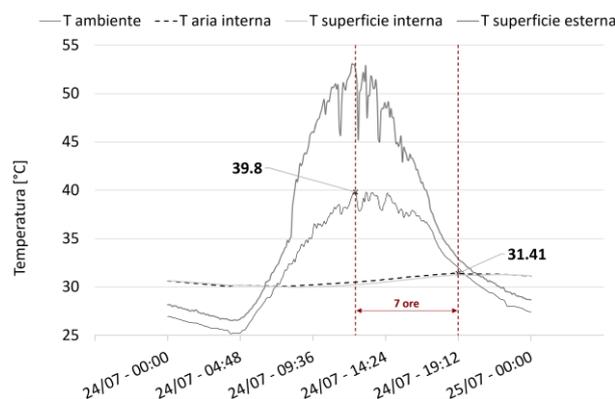


**Figura 32. Risultato della campagna di monitoraggio relativa alla soluzione E, rispettivamente in regime invernale (sulla sinistra) ed estivo (sulla destra)**

Come introdotto in Tabella 7, infatti, per quanto riguarda la soluzione E l'attività di confronto si è concentrata in particolare su 2 parametri: temperature superficiali, in inverno, e sfasamento dell'onda termica, in estate.

In riferimento alle temperature superficiali simulate e rilevate, è utile precisare ancora una volta che – al contrario della campagna di monitoraggio – le temperature superficiali ottenute tramite analisi agli elementi finiti (FEM) sono simulate in regime statico, e i risultati sono di conseguenza vincolati alle condizioni al contorno impostate, corrispondenti in particolare a -5 °C e 20 °C, rispettivamente per ambiente esterno e interno. Di conseguenza, mentre la simulazione FEM presentata in Tabella 17 ha restituito temperature medie pari a -4,85 °C e 19,50 °C, rispettivamente per superficie esterna e interna, in condizioni reali in regime invernale la soluzione raggiunge picchi di temperatura sulla superficie esterna di circa -4,63 °C, mentre le temperature interne risultano essere mediamente stabili grazie al sistema di condizionamento dell'aria interna.

In particolare, confrontando i valori di sfasamento dell'onda termica calcolati e riportati in Tabella 16 (7,87 ore) con quelli rilevati durante la campagna di monitoraggio nella stagione estiva (Figura 33), si evidenzia che in condizioni reali la soluzione di involucro garantisce circa 7 ore di sfasamento, in linea con quanto atteso dai risultati di calcolo.



**Figura 33. Focus sui valori di temperatura rilevati in regime estivo, per la valutazione delle proprietà di sfasamento dell'onda termica della soluzione E**

#### F. Chiusura Verticale con sistema a cappotto

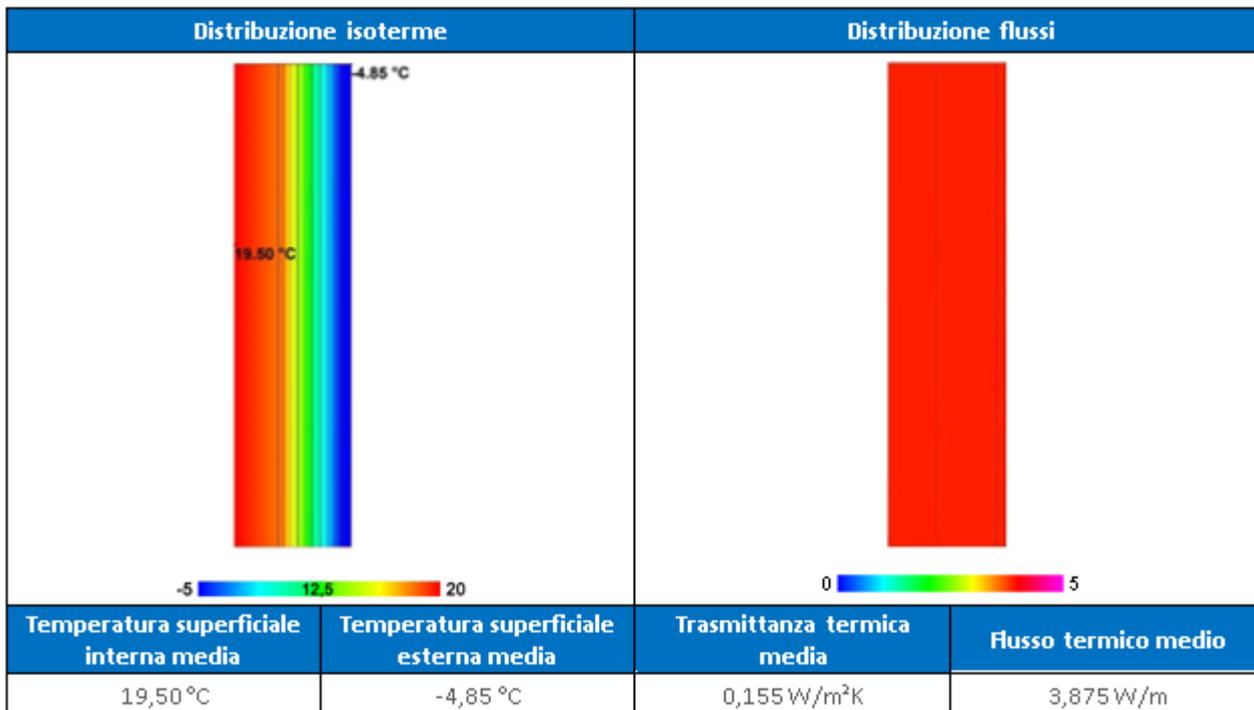
La valutazione dei principali parametri estivi e invernali in regime statico è stata effettuata mediante apposito foglio di calcolo conforme allo standard EN ISO 13786. I risultati relativi alla soluzione F sono riassunti in Tabella 18.

**Tabella 18. Risultati del calcolo numerico in regime statico relativo alla soluzione F**

| Trasmittanza termica (U) | Trasmittanza termica periodica ( $\gamma_{ie}$ ) | Capacità termica (C) | Sfasamento termico ( $\varphi$ ) | Fattore di attenuazione (f) |
|--------------------------|--|----------------------|----------------------------------|-----------------------------|
| 0,156 W/m <sup>2</sup> K | 0,060 W/m <sup>2</sup> K                         | 31,778 J/kgK         | 8,12 h                           | 0,388                       |

Come introdotto al capitolo 2.3, la soluzione è stata simulata su uno sviluppo di 1500 mm e sono state impostate condizioni al contorno in termini di temperatura e resistenza pari a -5 °C e 0,04 m<sup>2</sup>K/W per l'esterno e 20 °C e 0,13 m<sup>2</sup>K/W per l'interno. I risultati relativi alla soluzione F sono presentati in Tabella 19.

Tabella 19. Risultati dell'analisi agli elementi finiti relativa alla soluzione F



Relativamente alla campagna di monitoraggio condotta sulla soluzione F, in Figura 34 sono mostrati alcuni dei risultati di tale attività, in particolare in termini di temperature.

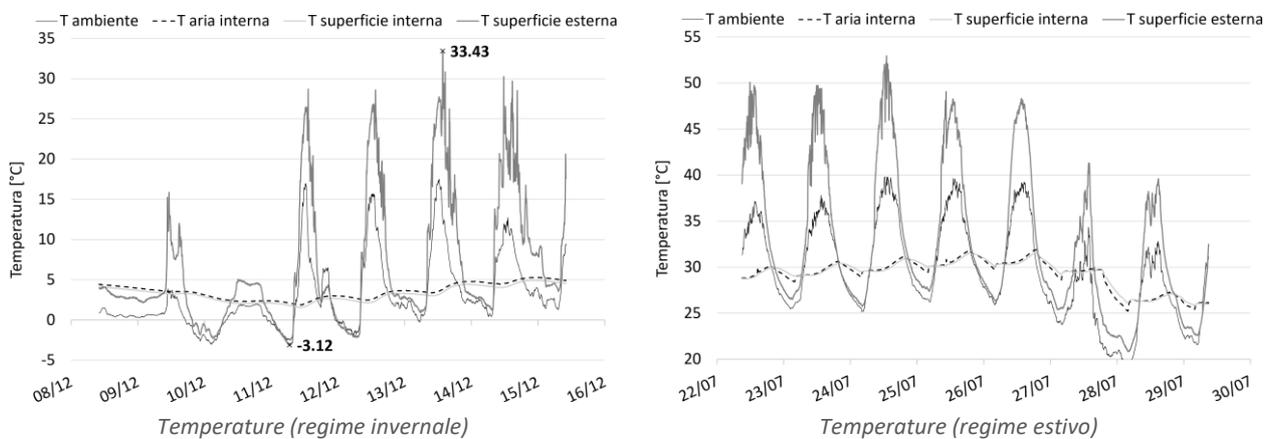


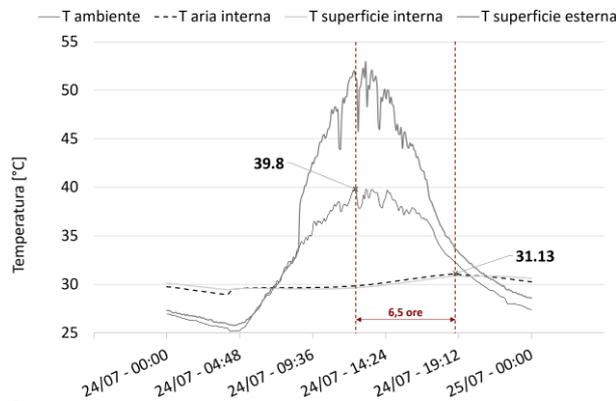
Figura 34. Risultato della campagna di monitoraggio relativa alla soluzione F, rispettivamente in regime invernale (sulla sinistra) ed estivo (sulla destra)

Come introdotto in Tabella 7, infatti, anche per quanto riguarda la soluzione F l'attività di confronto si è concentrata in particolare su 2 parametri: temperature superficiali, in inverno, e sfasamento dell'onda termica, in estate.

In riferimento alle temperature superficiali simulate e rilevate, è utile precisare ancora una volta che – al contrario della campagna di monitoraggio – le temperature superficiali ottenute tramite analisi agli elementi finiti (FEM) sono simulate in regime statico, e i risultati sono di conseguenza vincolati alle condizioni al contorno impostate, corrispondenti in particolare a -5 °C e 20 °C, rispettivamente per ambiente esterno e interno. Di conseguenza, mentre la simulazione FEM presentata in Tabella 19 ha restituito temperature medie pari a -4,85 °C e 19,50 °C, rispettivamente per superficie esterna e interna, in condizioni reali in regime invernale la soluzione raggiunge picchi di temperatura sulla superficie esterna di circa -3,12 °C, mentre le

temperature interne risultano essere mediamente stabili grazie al sistema di condizionamento dell'aria interna.

In particolare, confrontando i valori di sfasamento dell'onda termica calcolati e riportati in Tabella 18 (8,12 ore) con quelli rilevati durante la campagna di monitoraggio nella stagione estiva (Figura 35), si evidenzia che in condizioni reali la soluzione di involucro garantisce circa 6,5 ore di sfasamento, leggermente inferiori a quanto atteso dai risultati di calcolo.



**Figura 35. Focus sui valori di temperatura rilevati in regime estivo, per la valutazione delle proprietà di sfasamento dell'onda termica della soluzione F**

#### G. Chiusura Verticale con sistema a cappotto

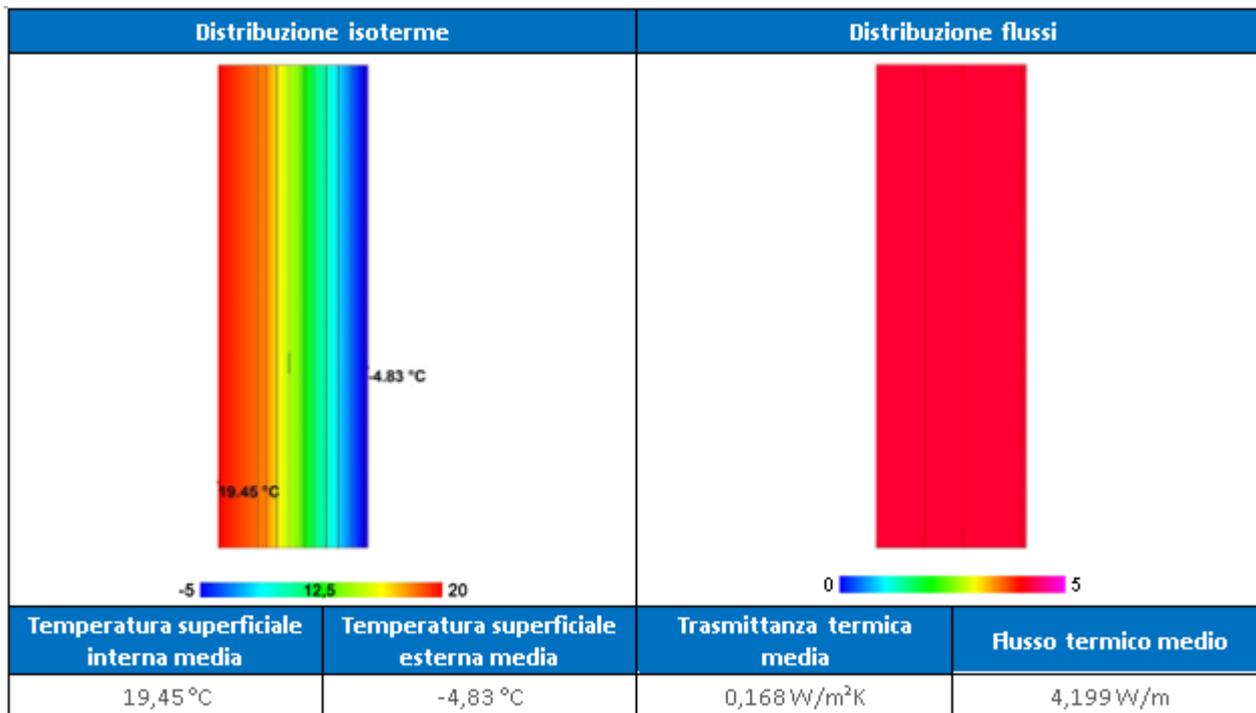
La valutazione dei principali parametri estivi e invernali in regime statico è stata effettuata mediante apposito foglio di calcolo conforme allo standard EN ISO 13786. I risultati relativi alla soluzione G sono riassunti in Tabella 20.

**Tabella 20. Risultati del calcolo numerico in regime statico relativo alla soluzione G**

| Trasmittanza termica (U) | Trasmittanza termica periodica ( $Y_{ie}$ ) | Capacità termica (C) | Sfasamento termico ( $\varphi$ ) | Fattore di attenuazione (f) |
|--------------------------|---|----------------------|----------------------------------|-----------------------------|
| 0,168 W/m <sup>2</sup> K | 0,035 W/m <sup>2</sup> K                    | 30,715 J/kgK         | 12,92 h                          | 0,207                       |

Come introdotto al capitolo 2.3, la seguente soluzione è stata simulata su uno sviluppo di 1500 mm e sono state impostate condizioni al contorno in termini di temperatura e resistenza pari a -5 °C e 0,04 m<sup>2</sup>K/W per l'esterno e 20 °C e 0,13 m<sup>2</sup>K/W per l'interno. I risultati relativi alla soluzione G sono presentati in Tabella 21.

Tabella 21. Risultati dell'analisi agli elementi finiti relativa alla soluzione G



Relativamente alla campagna di monitoraggio condotta sulla soluzione G, in Figura 36 sono mostrati alcuni dei risultati di tale attività, in particolare in termini di temperature.

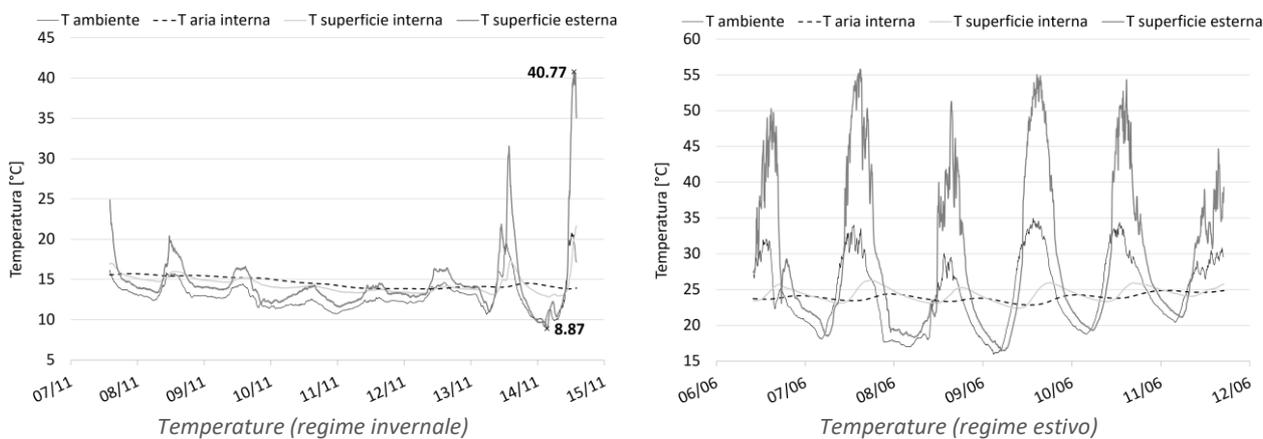


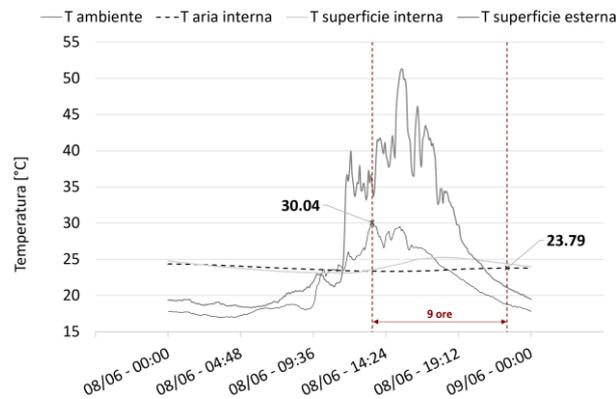
Figura 36. Risultato della campagna di monitoraggio relativa alla soluzione G, rispettivamente in regime invernale (sulla sinistra) ed estivo (sulla destra)

Come introdotto in Tabella 7, infatti, anche per quanto riguarda la soluzione G l'attività di confronto si è concentrata in particolare su 2 parametri: temperature superficiali, in inverno, e sfasamento dell'onda termica, in estate.

In riferimento alle temperature superficiali simulate e rilevate, è utile precisare ancora una volta che – al contrario della campagna di monitoraggio – le temperature superficiali ottenute tramite analisi agli elementi finiti (FEM) sono simulate in regime statico, e i risultati sono di conseguenza vincolati alle condizioni al contorno impostate, corrispondenti in particolare a -5 °C e 20 °C, rispettivamente per ambiente esterno e interno. Di conseguenza, mentre la simulazione FEM presentata in Tabella 21 ha restituito temperature medie pari a -4,83 °C e 19,45 °C, rispettivamente per superficie esterna e interna, in condizioni reali in regime invernale la soluzione raggiunge picchi di temperatura sulla superficie esterna di circa 8,87 °C, mentre le

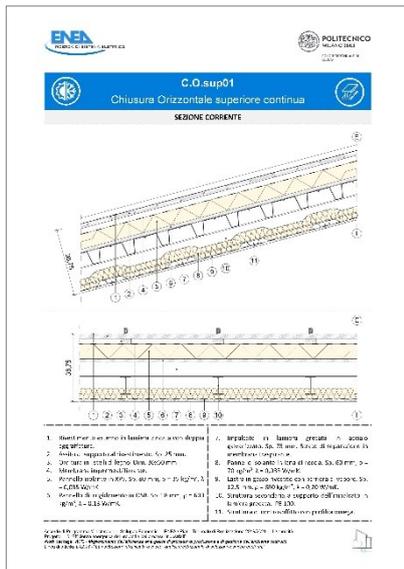
temperature interne risultano essere mediamente stabili grazie al sistema di condizionamento dell'aria interna.

In particolare, confrontando i valori di sfasamento dell'onda termica calcolati e riportati in Tabella 20 (12,92 ore) con quelli rilevati durante la campagna di monitoraggio nella stagione estiva (Figura 37), si evidenzia che in condizioni reali la soluzione di involucro garantisce circa 9 ore di sfasamento, leggermente inferiori a quanto atteso dai risultati di calcolo.

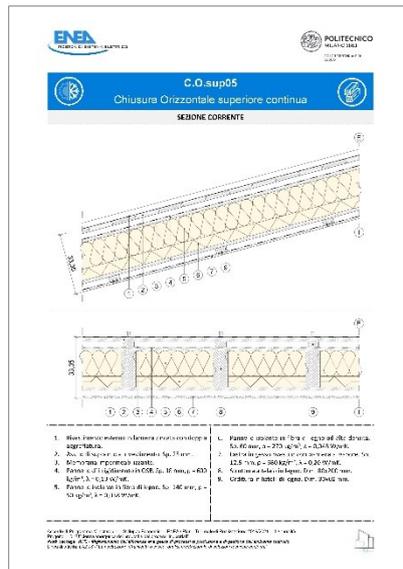


**Figura 37. Focus sui valori di temperatura rilevati in regime estivo, per la valutazione delle proprietà di sfasamento dell'onda termica della soluzione G**

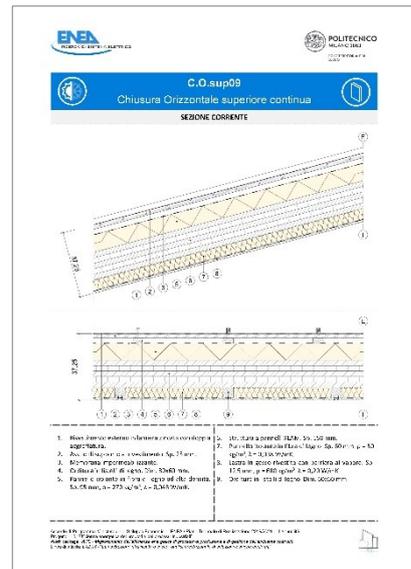




**C.O.sup01**

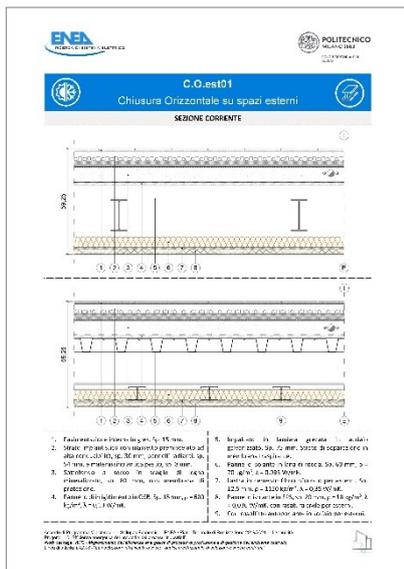


**C.O.sup05**

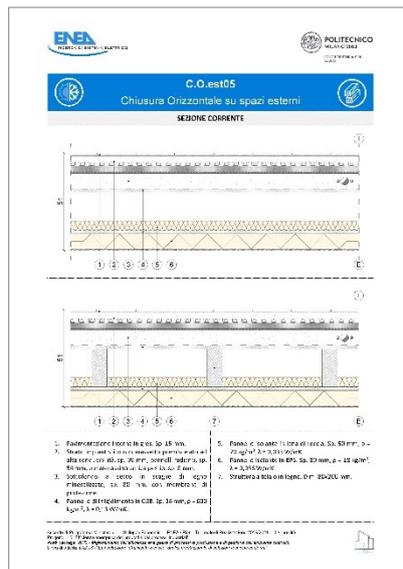


**C.O.sup09**

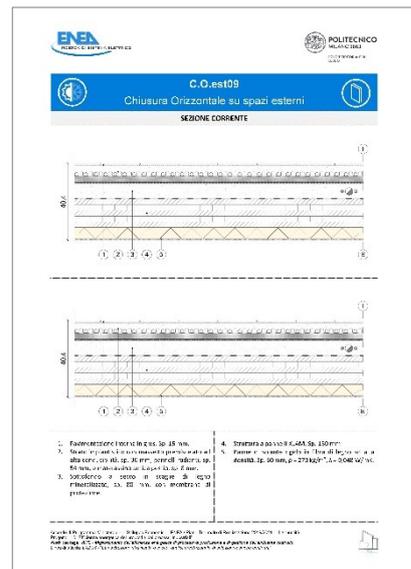
**Figura 39. Chiusura Orizzontale superiore: prima pagina delle schede relative alle soluzioni C.O.sup01, C.O.sup05 e C.O.sup09**



**C.O.est01**



**C.O.est05**



**C.O.est09**

**Figura 40. Chiusura Orizzontale su spazi esterni: prima pagina delle schede relative alle soluzioni C.O.est01, C.O.est05 e C.O.est09**

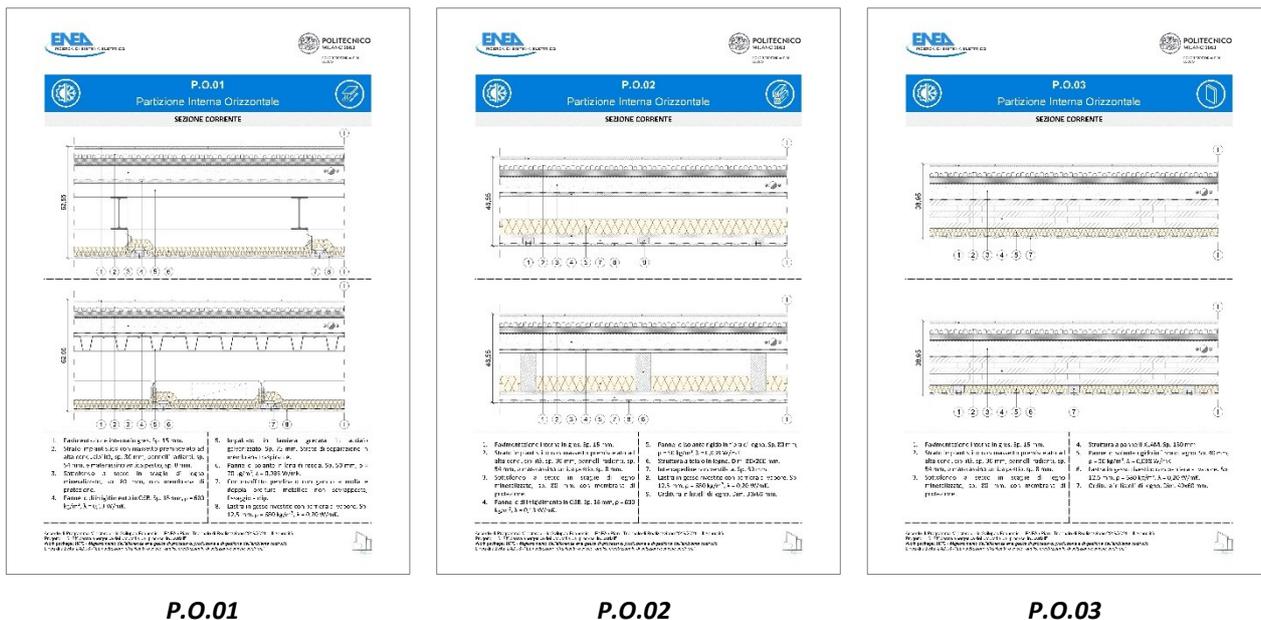


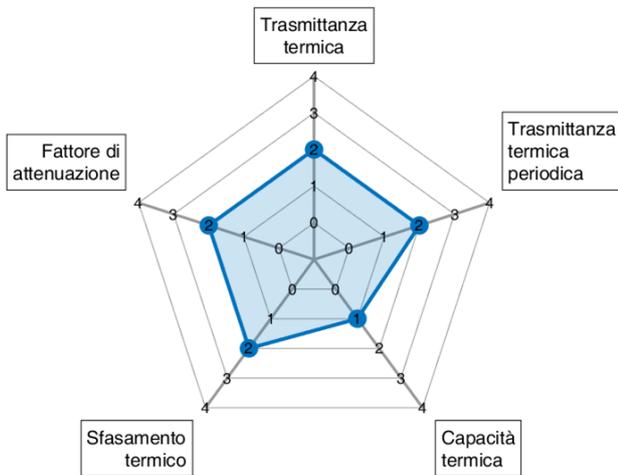
Figura 41. Partizione Orizzontale: prima pagina delle schede relative alle soluzioni P.O.01, P.O.02 e P.O.03

Nella pagina successiva della scheda vengono elencate le principali caratteristiche e proprietà della soluzione studiata, e per ciascuna soluzione viene proposta una rappresentazione grafica, mediante grafico “radar”, delle prestazioni ottenute dalla soluzione stessa negli indicatori che sono stati selezionati come più rappresentativi (Tabella 22); ciò che accomuna tutti i grafici radar è anche la scala di valutazione, con punteggio sempre variabile da 0 a 4 in relazione all’unità tecnologica di riferimento.

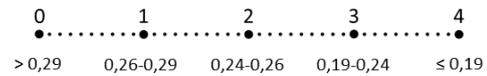
Tabella 22. Lista degli indicatori più significativi selezionati per la rappresentazione grafica (“radar”) delle soluzioni di involucro

| # | INDICATORE              | # | INDICATORE                     |
|---|-------------------------|---|--------------------------------|
| A | Trasmittanza termica    | B | Trasmittanza termica periodica |
| C | Capacità termica        | D | Sfasamento termico             |
| E | Fattore di attenuazione |   |                                |

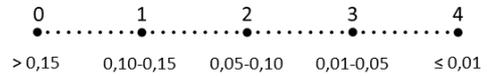
I valori limite che definiscono il punteggio assegnato a ciascun indicatore sul rispettivo asse del grafico sono invece riportati in Figura 42 (per C.V., C.O.est e P.O.) e Figura 43 (per C.O.sup.).



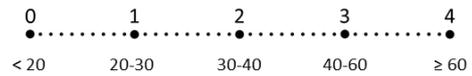
**A) TRASMITTANZA TERMICA [W/m<sup>2</sup>K]**



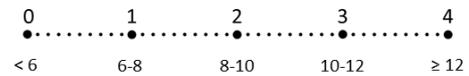
**B) TRASMITTANZA TERMICA PERIODICA [W/m<sup>2</sup>K]**



**C) CAPACITÀ TERMICA [kJ/m<sup>2</sup>K]**



**D) SFASAMENTO TERMICO [h]**



**E) FATTORE DI ATTENUAZIONE [-]**

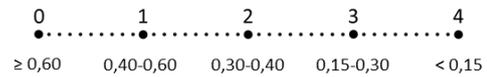
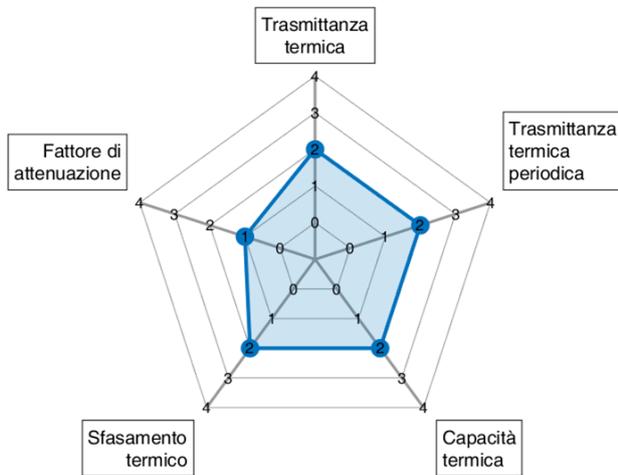


Figura 42. Valori limite per l'assegnazione del punteggio ai vari indicatori individuati (C.V., C.O.est e P.O.)



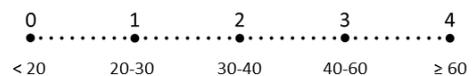
**A) TRASMITTANZA TERMICA [W/m<sup>2</sup>K]**



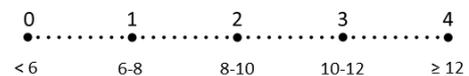
**B) TRASMITTANZA TERMICA PERIODICA [W/m<sup>2</sup>K]**



**C) CAPACITÀ TERMICA [kJ/m<sup>2</sup>K]**



**D) SFASAMENTO TERMICO [h]**



**E) FATTORE DI ATTENUAZIONE [-]**



Figura 43. Valori limite per l'assegnazione del punteggio ai vari indicatori individuati (C.O.sup)

Come mostrato in Figura 44, alla fine della seconda pagina viene inoltre presentata la valutazione del rispetto normativo di ciascuna soluzione, in termini di prestazioni sia invernali (associando la trasmittanza termica dell'involucro alla zona climatica di riferimento, come definito nel D.M. 26/06/15) che estive (stimando la qualità dell'involucro in riferimento ai valori di sfasamento e attenuazione ottenuti, come definito dal D.M. 26/06/15).

| RISPETTO NORMATIVO NELLE DIVERSE ZONE CLIMATICHE (D.M. 26/06/15 - Prestazioni invernali) |  |  |  |   |   |
|--|--|--|--|---|---|
| Zona A<br>( $U \leq 0,43 \text{ W/m}^2\text{K}$ )  | Zona B<br>( $U \leq 0,43 \text{ W/m}^2\text{K}$ )                        | Zona C<br>( $U \leq 0,34 \text{ W/m}^2\text{K}$ )                        | Zona D<br>( $U \leq 0,29 \text{ W/m}^2\text{K}$ )                            | Zona E<br>( $U \leq 0,26 \text{ W/m}^2\text{K}$ )             | Zona F<br>( $U \leq 0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) |
| ✔  | ✔  | ✔  | ✔  | ✔   | ✘   |
| RISPETTO NORMATIVO DELLA QUALITÀ DELL'INVOLUCRO (D.M. 26/06/15 - Prestazioni estive)     |  |  |  |   |   |
| I - Ottimo<br>( $\varphi > 12 \text{ h}$ ;<br>$f_s < 0,15$ )                             | II - Buono<br>( $12 > \varphi > 10 \text{ h}$ ;<br>$0,15 < f_s < 0,30$ ) | III - Medio<br>( $10 > \varphi > 8 \text{ h}$ ;<br>$0,30 < f_s < 0,40$ ) | IV - Sufficiente<br>( $8 > \varphi > 6 \text{ h}$ ;<br>$0,40 < f_s < 0,60$ ) | V - Mediocre<br>( $\varphi < 6 \text{ h}$ ;<br>$f_s > 0,60$ ) |   |

Figura 44. Ingrandimento della valutazione del rispetto normativo presente nella seconda pagina delle schede soluzione S/R

Relativamente al metodo di valutazione, si riporta in Figura 45 e Figura 46 un estratto dei criteri stabiliti dal D.M. 26/06/15, rispettivamente in riferimento alle prestazioni invernali ed estive dell'involucro opaco.

Tabella 1- Trasmittanza termica U delle strutture opache verticali, verso l'esterno, gli ambienti non climatizzati o contro terra

| Zona climatica | U ( $\text{W/m}^2\text{K}$ ) |                          |
|----------------|------------------------------|--------------------------|
|                | 2015 <sup>(1)</sup>          | 2019/2021 <sup>(2)</sup> |
| A e B          | 0,45                         | 0,43                     |
| C              | 0,38                         | 0,34                     |
| D              | 0,34                         | 0,29                     |
| E              | 0,30                         | 0,26                     |
| F              | 0,28                         | 0,24                     |

Tabella 2 - Trasmittanza termica U delle strutture opache orizzontali o inclinate di copertura, verso l'esterno e gli ambienti non climatizzati

| Zona climatica | U ( $\text{W/m}^2\text{K}$ ) |                          |
|----------------|------------------------------|--------------------------|
|                | 2015 <sup>(1)</sup>          | 2019/2021 <sup>(2)</sup> |
| A e B          | 0,38                         | 0,35                     |
| C              | 0,36                         | 0,33                     |
| D              | 0,30                         | 0,26                     |
| E              | 0,25                         | 0,22                     |
| F              | 0,23                         | 0,20                     |

Tabella 3 - Trasmittanza termica U delle opache orizzontali di pavimento, verso l'esterno, gli ambienti non climatizzati o contro terra

| Zona climatica | U ( $\text{W/m}^2\text{K}$ ) |                          |
|----------------|------------------------------|--------------------------|
|                | 2015 <sup>(1)</sup>          | 2019/2021 <sup>(2)</sup> |
| A e B          | 0,46                         | 0,44                     |
| C              | 0,40                         | 0,38                     |
| D              | 0,32                         | 0,29                     |
| E              | 0,30                         | 0,26                     |
| F              | 0,28                         | 0,24                     |

Figura 45. Criteri di valutazione delle prestazioni invernali dell'involucro opaco, a seconda dell'unità tecnologica di riferimento (D.M. 26/06/15, Appendice B)

| Sfasamento (ore) | Attenuazione       | Prestazioni | Qualità prestazionale |
|------------------|--------------------|-------------|-----------------------|
| $S > 12$         | $Fa < 0,15$        | ottime      | I                     |
| $12 > S > 10$    | $0,15 < fa < 0,30$ | buone       | II                    |
| $10 > S > 8$     | $0,30 < fa < 0,40$ | medie       | III                   |
| $8 > S > 6$      | $0,40 < fa < 0,60$ | sufficienti | IV                    |
| $6 > S$          | $0,60 < fa$        | mediocri    | V                     |

Figura 46. Criteri di valutazione delle prestazioni estive dell'involucro opaco (D.M. 26/06/15, Allegato A)

A titolo esemplificativo, in Figura 47, Figura 48, Figura 49 e Figura 50 viene presentata la seconda pagina delle differenti tipologie prestazionali e strutturali di soluzioni appartenenti alle quattro unità tecnologiche individuate, rispettivamente: Chiusura Verticale, Chiusura Orizzontale superiore, Chiusura Orizzontale su spazi esterni e Partizione Orizzontale.

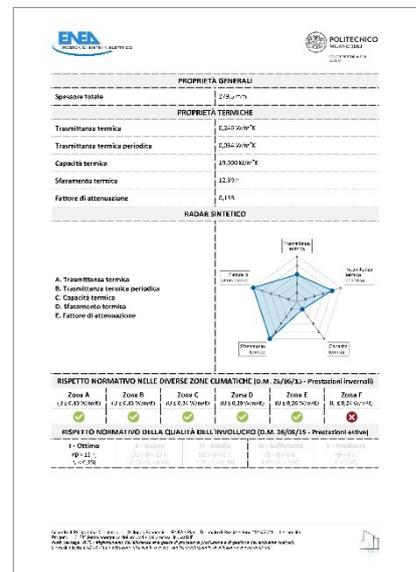
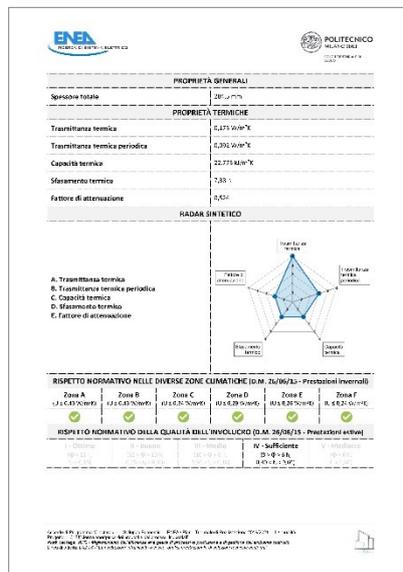
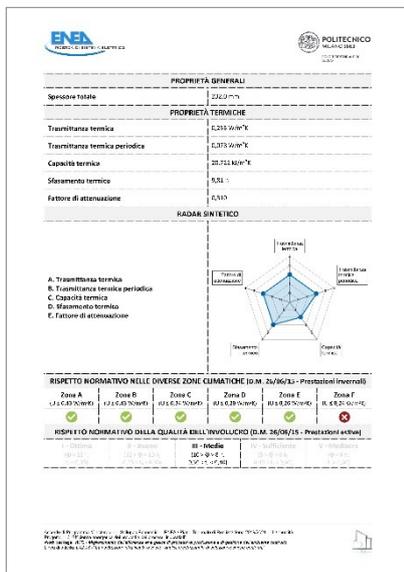


Figura 47. Chiusura Verticale: seconda pagina delle schede relative alle soluzioni C.V.01, C.V.05 e C.V.09

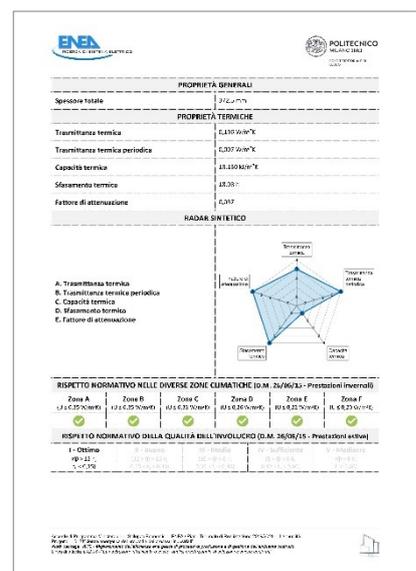
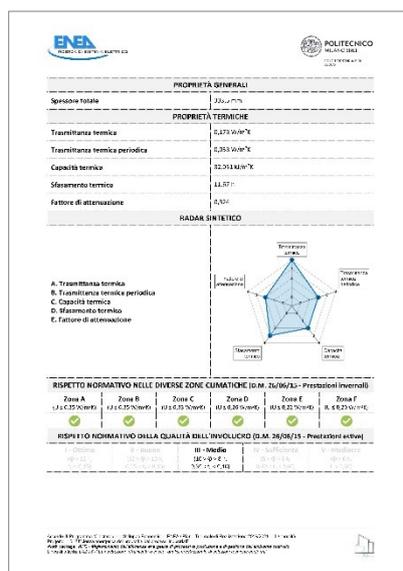
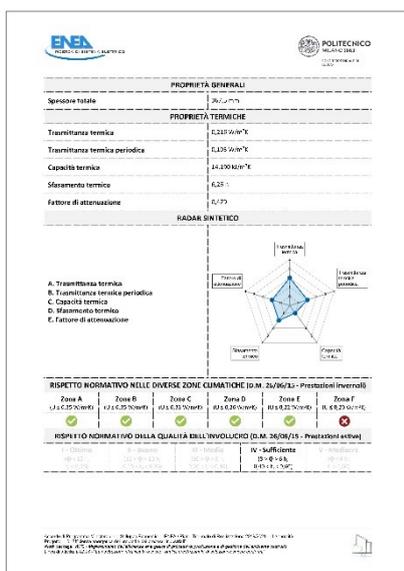


Figura 48. Chiusura Orizzontale superiore: seconda pagina delle schede relative alle soluzioni C.O.sup01, C.O.sup05 e C.O.sup09

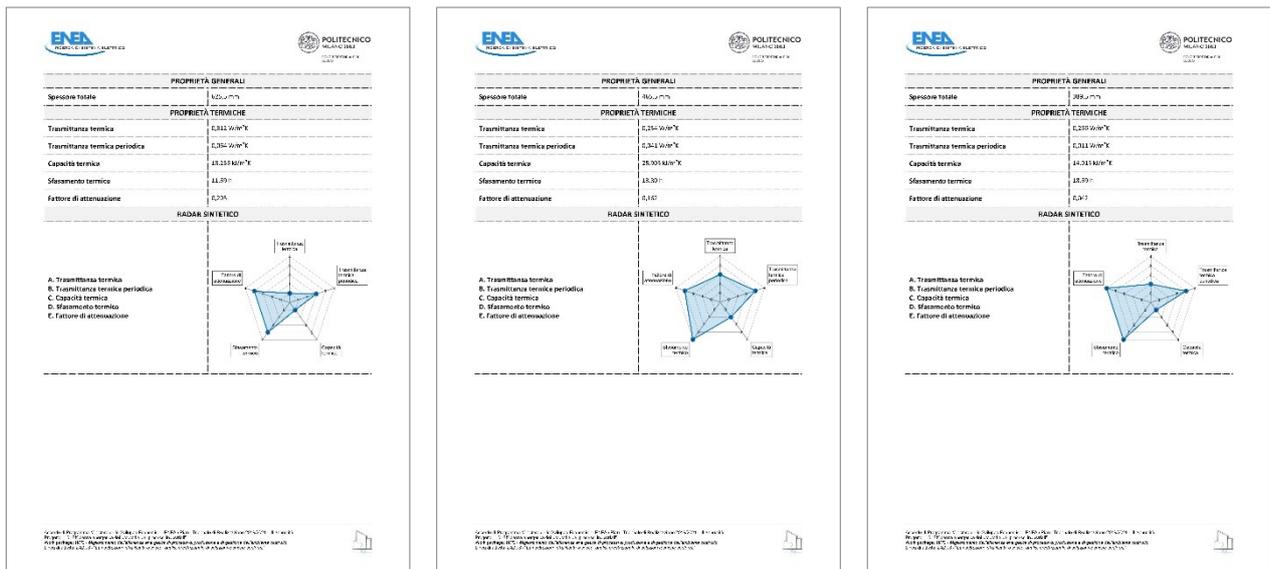


C.O.est01

C.O.est05

C.O.est09

Figura 49. Chiusura Orizzontale su spazi esterni: seconda pagina delle schede relative alle soluzioni C.O.est01, C.O.est05 e C.O.est09



P.O.01

P.O.02

P.O.03

Figura 50. Partizione Orizzontale: seconda pagina delle schede relative alle soluzioni P.O.01, P.O.02 e P.O.03

A scopo comparativo, in Tabella 23 viene presentata una sintesi delle valutazioni di rispetto normativo di tutte le soluzioni conformi S/R studiate e analizzate nel corso dell'attività di ricerca, e catalogate nel rispettivo atlante.

Tabella 23. Sintesi delle valutazioni di rispetto normativo delle soluzioni conformi studiate in termini di prestazioni invernali ed estive (D.M. 26/06/15)

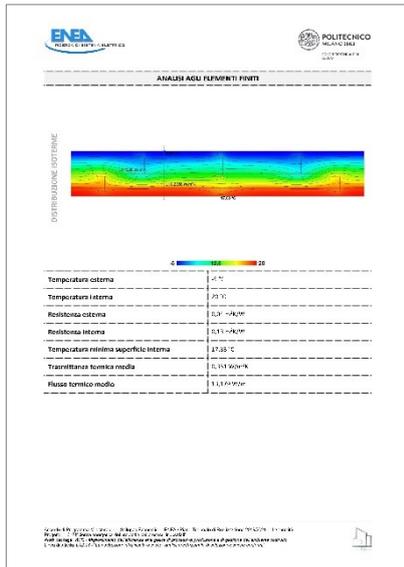
| SOLUZIONE | PRESTAZIONE INVERNALE<br>(zona climatica di riferimento) |   |   |   |   |   | PRESTAZIONE ESTIVA<br>(qualità dell'involucro) |    |     |    |   |
|-----------|--|---|---|---|---|---|--|----|-----|----|---|
|           | A  | B | C | D | E | F | I  | II | III | IV | V |
| C.V.01    | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ |  |    | ✓   |    |   |
| C.V.02    | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ |  |    |     | ✓  |   |
| C.V.03    | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ |  | ✓  |     |    |   |
| C.V.04    | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |  |    |     | ✓  |   |
| C.V.05    | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |  |    |     | ✓  |   |
| C.V.06    | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓  |    |     |    |   |
| C.V.07    | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓  |    |     |    |   |
| C.V.08    | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓  |    |     |    |   |
| C.V.09    | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | ✓  |    |     |    |   |
| C.V.10    | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ |  |    |     | ✓  |   |
| C.V.11    | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ |  |    |     | ✓  |   |
| C.V.12    | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ |  | ✓  |     |    |   |
| C.V.13    | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |  |    |     | ✓  |   |
| C.V.14    | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |  |    |     | ✓  |   |
| C.V.15    | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |  | ✓  |     |    |   |
| C.V.16    | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓  |    |     |    |   |
| C.V.17    | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓  |    |     |    |   |
| C.V.18    | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | ✗ | ✓  |    |     |    |   |
| C.V.19    | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ |  |    |     | ✓  |   |
| C.V.20    | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ |  |    |     | ✓  |   |
| C.V.21    | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ |  |    | ✓   |    |   |
| C.V.22    | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |  |    | ✓   |    |   |
| C.V.23    | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |  |    |     | ✓  |   |
| C.V.24    | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |  |    | ✓   |    |   |
| C.V.25    | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓  |    |     |    |   |
| C.V.26    | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓  |    |     |    |   |

| SOLUZIONE | PRESTAZIONE INVERNALE<br>(zona climatica di riferimento) |   |   |   |   |   | PRESTAZIONE ESTIVA<br>(qualità dell'involucro) |    |     |    |   |  |
|-----------|--|---|---|---|---|---|--|----|-----|----|---|--|
|           | A  | B | C | D | E | F | I  | II | III | IV | V |  |
| C.V.27    | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | ✓  |    |     |    |   |  |
| C.O.sup01 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ |  |    |     |    | ✓ |  |
| C.O.sup02 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ |  |    |     | ✓  |   |  |
| C.O.sup03 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | ✓  |    |     |    |   |  |
| C.O.sup04 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |  |    |     |    | ✓ |  |
| C.O.sup05 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |  |    |     | ✓  |   |  |
| C.O.sup06 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓  |    |     |    |   |  |
| C.O.sup07 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓  |    |     |    |   |  |
| C.O.sup08 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | ✓  |    |     |    |   |  |
| C.O.sup09 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓  |    |     |    |   |  |
| C.O.sup10 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ |  |    |     | ✓  |   |  |
| C.O.sup11 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ |  |    |     |    | ✓ |  |
| C.O.sup12 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ |  | ✓  |     |    |   |  |
| C.O.sup13 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |  |    |     |    | ✓ |  |
| C.O.sup14 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |  |    |     |    | ✓ |  |
| C.O.sup15 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓  |    |     |    |   |  |
| C.O.sup16 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓  |    |     |    |   |  |
| C.O.sup17 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓  |    |     |    |   |  |
| C.O.sup18 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | ✓  |    |     |    |   |  |
| C.O.sup19 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ |  |    |     | ✓  |   |  |
| C.O.sup20 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ |  |    |     |    | ✓ |  |
| C.O.sup21 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ |  | ✓  |     |    |   |  |
| C.O.sup22 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |  |    |     |    | ✓ |  |
| C.O.sup23 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |  |    |     |    | ✓ |  |
| C.O.sup24 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓  |    |     |    |   |  |
| C.O.sup25 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |  |    |     |    |   |  |
| C.O.sup26 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓  |    |     |    |   |  |
| C.O.sup27 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |  |    |     |    |   |  |

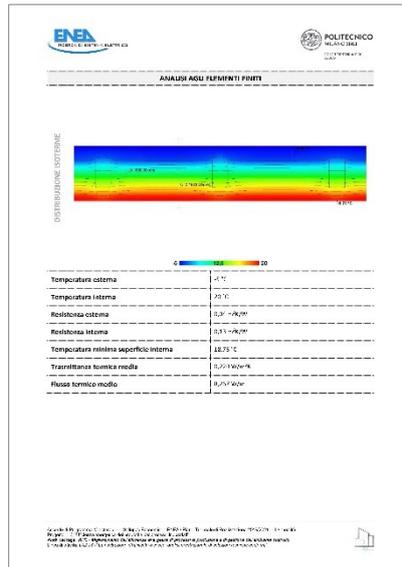
| SOLUZIONE | PRESTAZIONE INVERNALE<br>(zona climatica di riferimento) |   |   |   |   |   | PRESTAZIONE ESTIVA<br>(qualità dell'involucro) |    |     |    |   |
|-----------|--|---|---|---|---|---|--|----|-----|----|---|
|           | A  | B | C | D | E | F | I  | II | III | IV | V |
| C.O.sup28 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ |  |    | ✓   |    |   |
| C.O.sup29 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ |  |    |     | ✓  |   |
| C.O.sup30 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ |  | ✓  |     |    |   |
| C.O.sup31 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |  |    |     | ✓  |   |
| C.O.sup32 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |  |    |     | ✓  |   |
| C.O.sup33 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓  |    |     |    |   |
| C.O.sup34 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓  |    |     |    |   |
| C.O.sup35 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓  |    |     |    |   |
| C.O.sup36 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | ✓  |    |     |    |   |
| C.O.sup37 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ |  |    | ✓   |    |   |
| C.O.sup38 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ |  |    | ✓   |    |   |
| C.O.sup39 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | ✓  |    |     |    |   |
| C.O.sup40 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |  |    | ✓   |    |   |
| C.O.sup41 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |  | ✓  |     |    |   |
| C.O.sup42 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓  |    |     |    |   |
| C.O.sup43 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓  |    |     |    |   |
| C.O.sup44 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓  |    |     |    |   |
| C.O.sup45 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓  |    |     |    |   |
| C.O.sup46 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ |  |    | ✓   |    |   |
| C.O.sup47 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ |  |    | ✓   |    |   |
| C.O.sup48 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | ✓  |    |     |    |   |
| C.O.sup49 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |  | ✓  |     |    |   |
| C.O.sup50 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |  |    | ✓   |    |   |
| C.O.sup51 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓  |    |     |    |   |
| C.O.sup52 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓  |    |     |    |   |
| C.O.sup53 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓  |    |     |    |   |
| C.O.sup54 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓  |    |     |    |   |
| C.O.sup55 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ |  |    |     | ✓  |   |

| SOLUZIONE | PRESTAZIONE INVERNALE<br>(zona climatica di riferimento) |   |   |   |   |   | PRESTAZIONE ESTIVA<br>(qualità dell'involucro) |    |     |    |   |
|-----------|--|---|---|---|---|---|--|----|-----|----|---|
|           | A  | B | C | D | E | F | I  | II | III | IV | V |
| C.O.sup56 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ |  |    |     | ✓  |   |
| C.O.sup57 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | ✓  |    |     |    |   |
| C.O.sup58 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |  |    |     | ✓  |   |
| C.O.sup59 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |  |    | ✓   |    |   |
| C.O.sup60 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓  |    |     |    |   |
| C.O.sup61 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓  |    |     |    |   |
| C.O.sup62 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓  |    |     |    |   |
| C.O.sup63 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓  |    |     |    |   |
| C.O.sup64 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ |  |    | ✓   |    |   |
| C.O.sup65 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ |  |    | ✓   |    |   |
| C.O.sup66 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | ✓  |    |     |    |   |
| C.O.sup67 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |  |    | ✓   |    |   |
| C.O.sup68 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |  | ✓  |     |    |   |
| C.O.sup69 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓  |    |     |    |   |
| C.O.sup70 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓  |    |     |    |   |
| C.O.sup71 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓  |    |     |    |   |
| C.O.sup72 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓  |    |     |    |   |
| C.O.est01 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ |  | ✓  |     |    |   |
| C.O.est02 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ |  | ✓  |     |    |   |
| C.O.est03 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | ✓  |    |     |    |   |
| C.O.est04 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓  |    |     |    |   |
| C.O.est05 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓  |    |     |    |   |
| C.O.est06 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓  |    |     |    |   |
| C.O.est07 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | ✗ | ✓  |    |     |    |   |
| C.O.est08 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | ✗ | ✓  |    |     |    |   |
| C.O.est09 | ✓  | ✓ | ✓ | ✓ | ✗ | ✗ | ✓  |    |     |    |   |

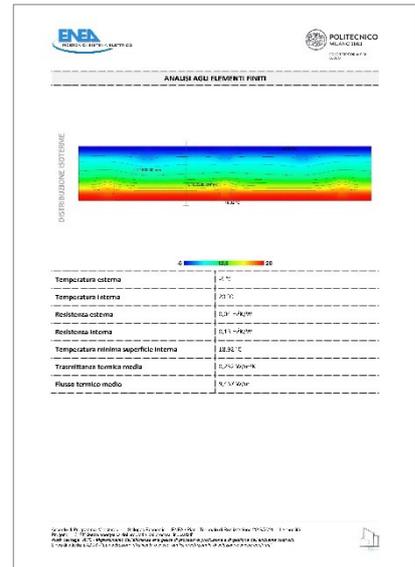
In Figura 51, Figura 52 e Figura 53 viene presentata a titolo esemplificativo la terza pagina (principali risultati dell'analisi termo-igrometrica agli elementi finiti, Sezione 2.3) delle differenti tipologie prestazionali e strutturali di soluzioni appartenenti a tre unità tecnologiche individuate, rispettivamente: Chiusura Verticale, Chiusura Orizzontale superiore e Chiusura Orizzontale su spazi esterni.



**C.V.01**

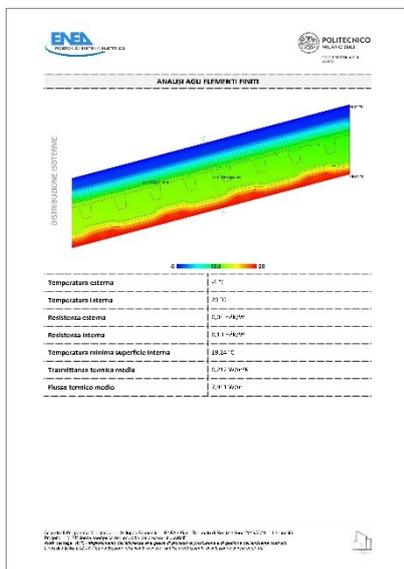


**C.V.05**

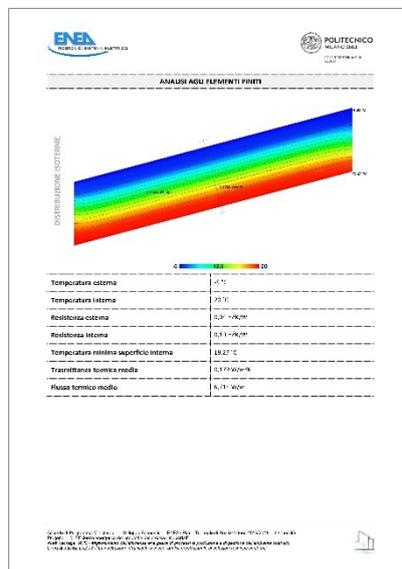


**C.V.09**

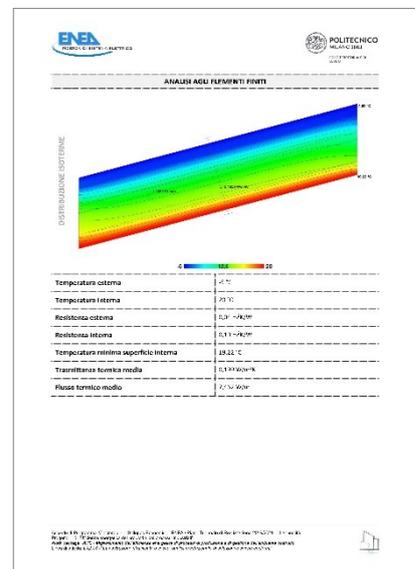
**Figura 51. Chiusura Verticale: terza pagina delle schede relative alle soluzioni C.V.01, C.V.05 e C.V.09**



**C.O.sup01**

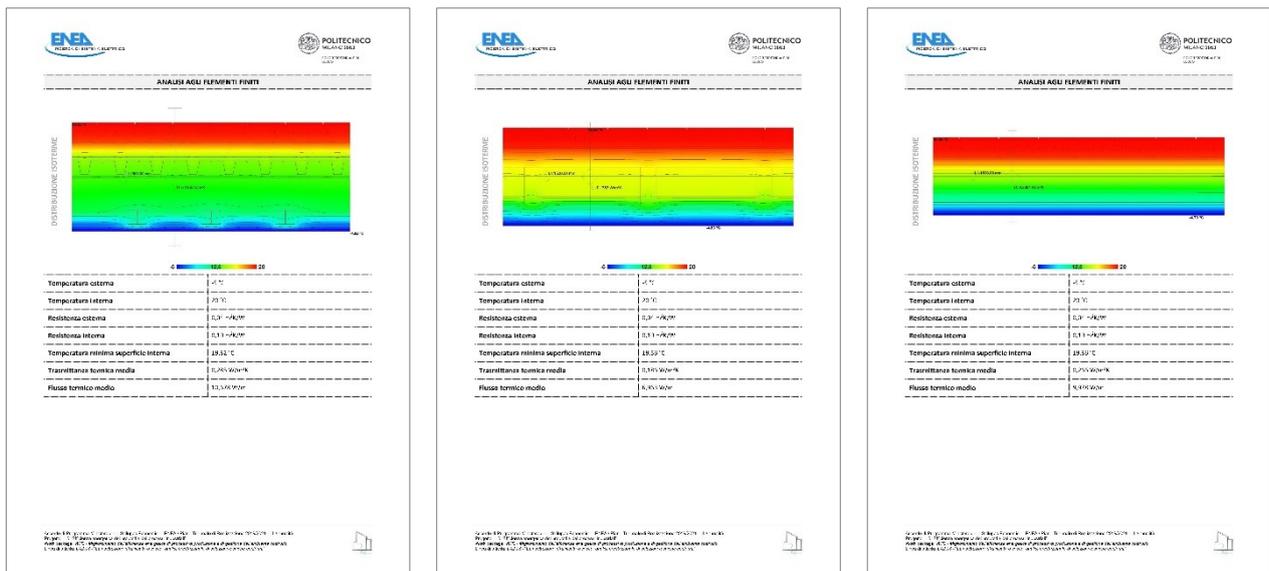


**C.O.sup05**



**C.O.sup09**

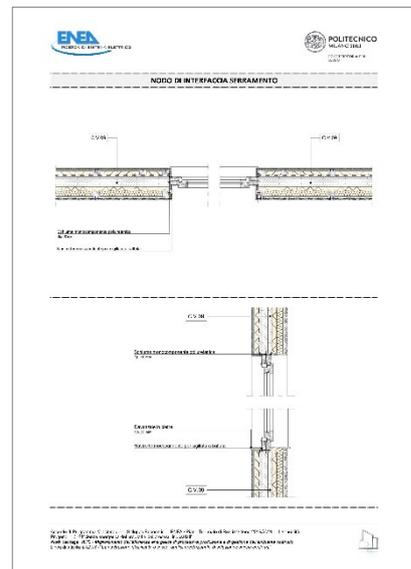
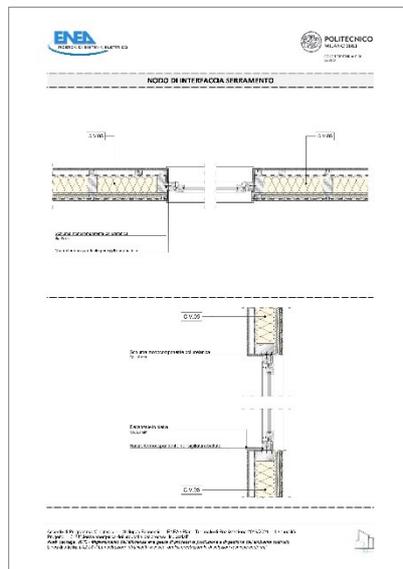
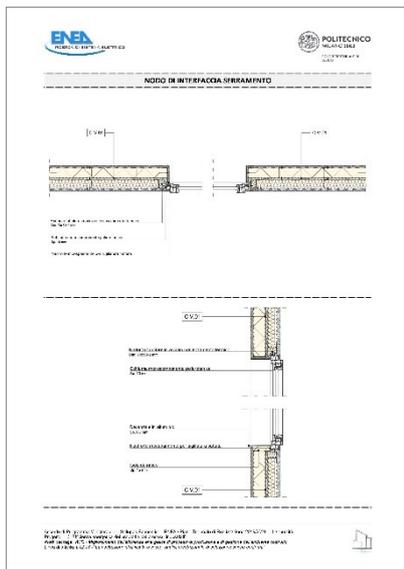
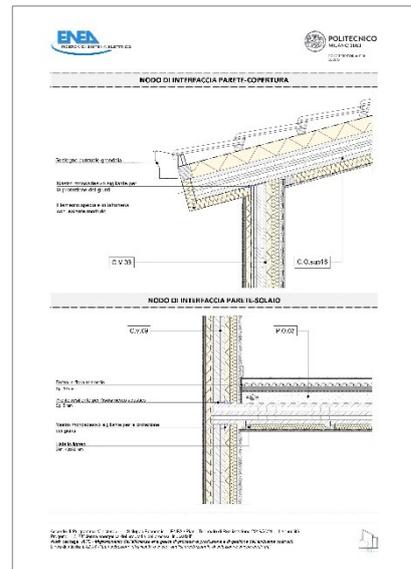
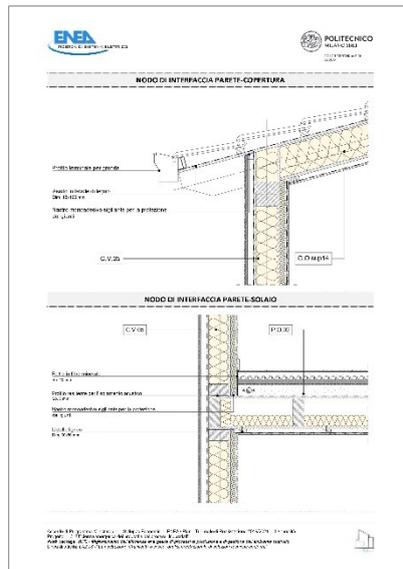
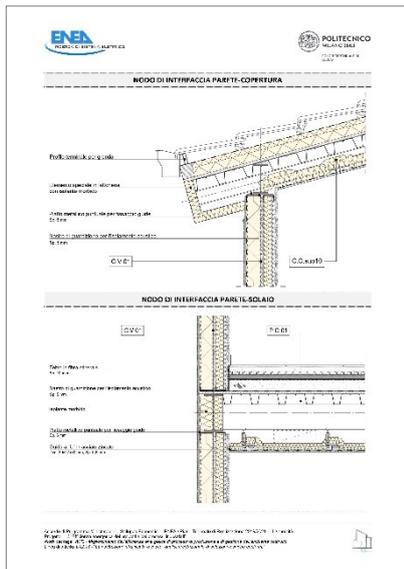
**Figura 52. Chiusura Orizzontale superiore: terza pagina delle schede relative alle soluzioni C.O.sup01, C.O.sup05 e C.O.sup09**



**C.O.est01** **C.O.est05** **C.O.est09**

**Figura 53. Chiusura Orizzontale su spazi esterni: terza pagina delle schede relative alle soluzioni C.O.est01, C.O.est05 e C.O.est09**

Le pagine successive, invece, approfondiscono il disegno delle soluzioni individuate, presentando in particolare la definizione dei nodi di interfaccia più rilevanti per ciascuna soluzione di involucro. A titolo esemplificativo, in Figura 54, Figura 55, Figura 56 e Figura 57 vengono presentate le ultime pagine delle differenti tipologie prestazionali e strutturali di soluzioni appartenenti alle quattro unità tecnologiche individuate, rispettivamente: Chiusura Verticale, Chiusura Orizzontale superiore, Chiusura Orizzontale su spazi esterni e Partizione Orizzontale.

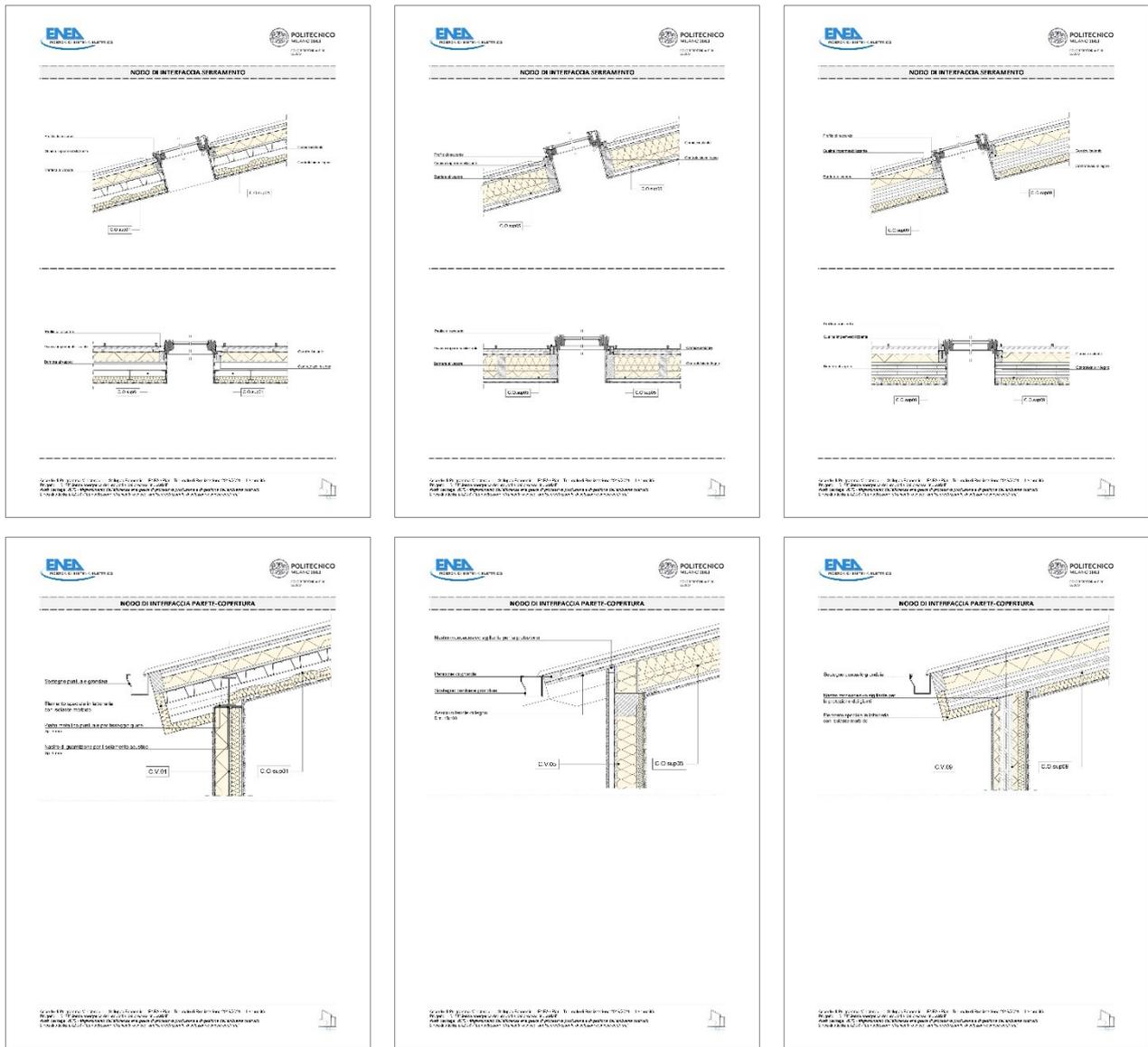


**C.V.01**

**C.V.05**

**C.V.09**

**Figura 54. Chiusura Verticale: ultime pagine delle schede relative alle soluzioni C.V.01, C.V.05 e C.V.09**

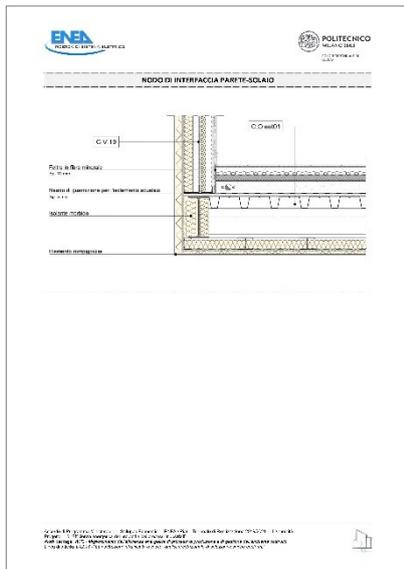


**C.O.sup01**

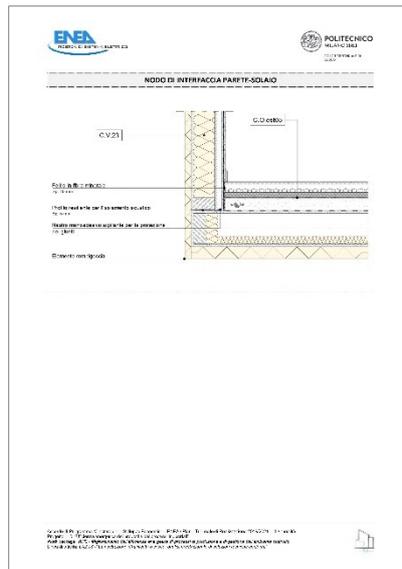
**C.O.sup05**

**C.O.sup09**

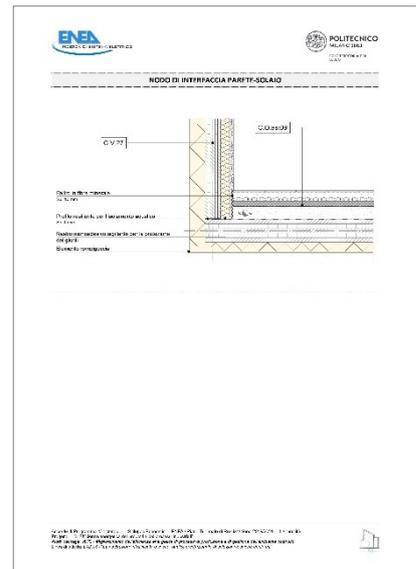
**Figura 55. Chiusura Orizzontale superiore: ultime pagine delle schede relative alle soluzioni C.O.sup01, C.O.sup05 e C.O.sup09**



**C.O.est01**

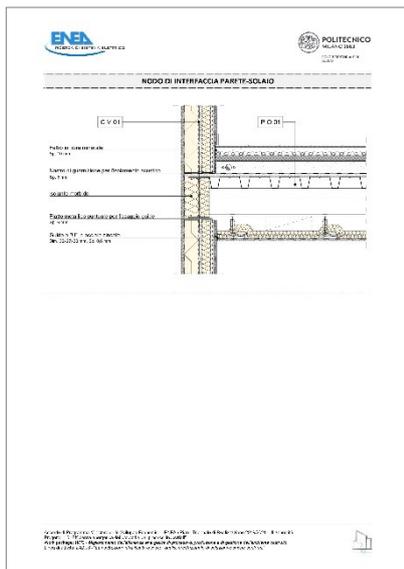


**C.O.est05**

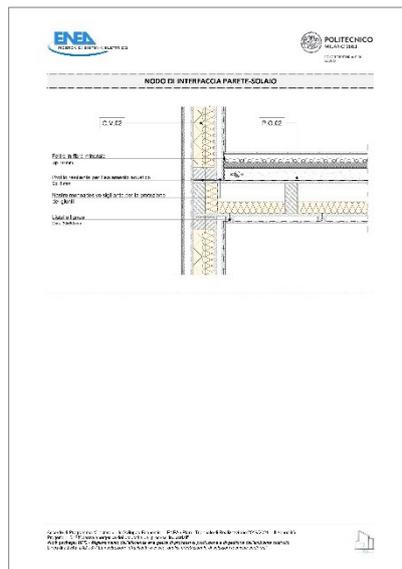


**C.O.est09**

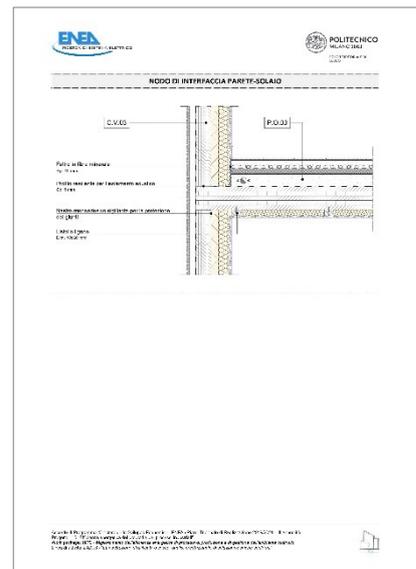
**Figura 56. Chiusura Orizzontale su spazi esterni: ultime pagine delle schede relative alle soluzioni C.O.est01, C.O.est05 e C.O.est09**



**P.O.01**



**P.O.02**



**P.O.03**

**Figura 57. Partizione Orizzontale: ultime pagine delle schede relative alle soluzioni P.O.01, P.O.02 e P.O.03**

A titolo esemplificativo, nelle pagine seguenti si riporta un esempio completo di scheda atlante relativa alla soluzione C.V.01. Si ricorda che, come anticipato nella sezione introduttiva 2.2, considerato l'elevato numero di schede prodotte, per una consultazione completa si può fare riferimento ai file PDF dell'atlante prodotto (20211130\_LA2.13.3\_Schede\_Soluzione\_XXX.pdf, aggiornati alla data 30 Novembre 2021).

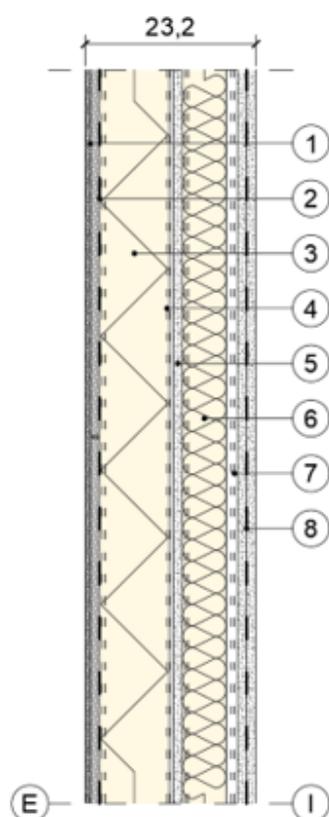
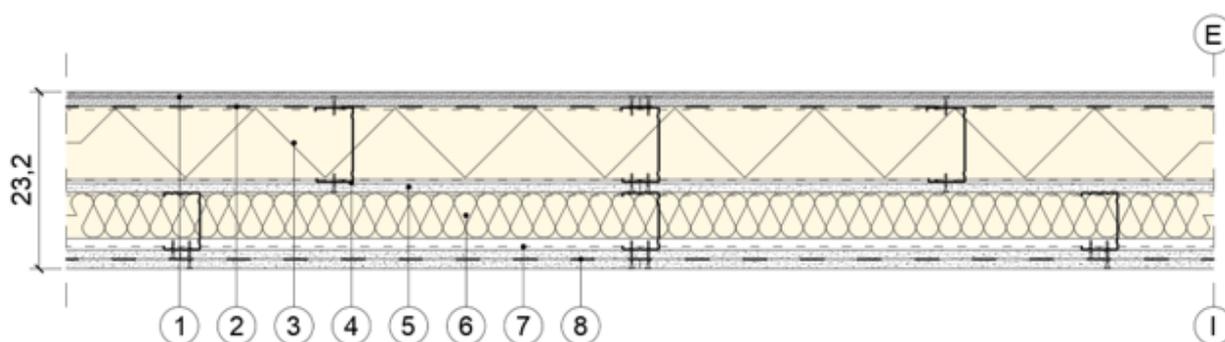


C.V.01

Chiusura Verticale opaca semplice



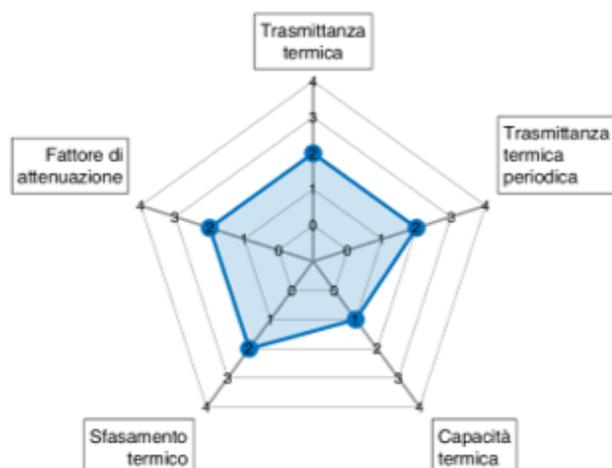
SEZIONE CORRENTE



1. Lastra in cemento fibrorinforzato per esterni. Sp. 12,5 mm,  $\rho = 1150 \text{ kg/m}^3$ ,  $\lambda = 0,35 \text{ W/mK}$ .
2. Membrana di tenuta all'aria.
3. Pannello isolante in fibra di legno ad alta densità. Sp. 95 mm,  $\rho = 270 \text{ kg/m}^3$ ,  $\lambda = 0,048 \text{ W/mK}$ .
4. Orditura metallica, montante a "C" in acciaio zincato. Dim. 50/100/50 mm, sp. 0,6 mm,  $\rho = 0,95 \text{ kg/m}$ .
5. Lastra in gesso rivestito. Sp. 12,5 mm,  $\rho = 680 \text{ kg/m}^3$ ,  $\lambda = 0,20 \text{ W/mK}$ .
6. Pannello isolante in fibra di legno. Sp. 60 mm,  $\rho = 50 \text{ kg/m}^3$ ,  $\lambda = 0,038 \text{ W/mK}$ .
7. Orditura metallica, montante a "C" in acciaio zincato. Dim. 50/75/50 mm, sp. 0,6 mm,  $\rho = 0,84 \text{ kg/m}$ .
8. Doppia lastra in gesso rivestito con barriera al vapore preaccoppiata. Sp. 25 mm,  $\rho = 680 \text{ kg/m}^3$ ,  $\lambda = 0,20 \text{ W/mK}$ .

| PROPRIETÀ GENERALI             |                            |
|--------------------------------|----------------------------|
| Spessore totale                | 232,0 mm                   |
| PROPRIETÀ TERMICHE             |                            |
| Trasmittanza termica           | 0,253 W/m <sup>2</sup> K   |
| Trasmittanza termica periodica | 0,078 W/m <sup>2</sup> K   |
| Capacità termica               | 20,722 kJ/m <sup>2</sup> K |
| Sfasamento termico             | 9,81 h                     |
| Fattore di attenuazione        | 0,310                      |
| RADAR SINTETICO                |                            |

- A. Trasmittanza termica  
 B. Trasmittanza termica periodica  
 C. Capacità termica  
 D. Sfasamento termico  
 E. Fattore di attenuazione



**RISPETTO NORMATIVO NELLE DIVERSE ZONE CLIMATICHE (D.M. 26/06/15 - Prestazioni invernali)**

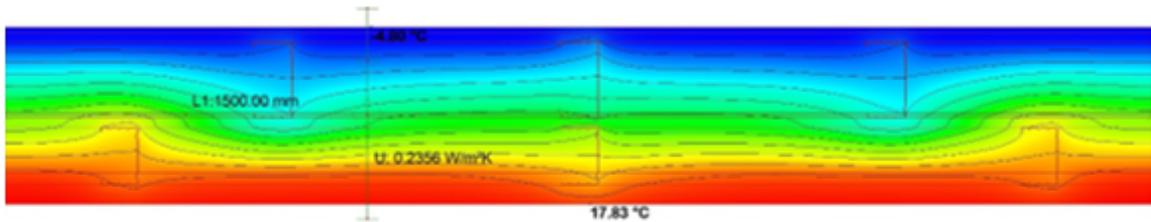
| Zona A<br>( $U \leq 0,43$ W/m <sup>2</sup> K) | Zona B<br>( $U \leq 0,43$ W/m <sup>2</sup> K) | Zona C<br>( $U \leq 0,34$ W/m <sup>2</sup> K) | Zona D<br>( $U \leq 0,29$ W/m <sup>2</sup> K) | Zona E<br>( $U \leq 0,26$ W/m <sup>2</sup> K) | Zona F<br>( $U \leq 0,24$ W/m <sup>2</sup> K) |
|---|---|---|---|---|---|
| ✓   | ✓   | ✓   | ✓   | ✓   | ✗   |

**RISPETTO NORMATIVO DELLA QUALITÀ DELL'INVOLUCRO (D.M. 26/06/15 - Prestazioni estive)**

| I - Ottimo<br>( $\phi > 12$ h;<br>$f_s < 0,15$ ) | II - Buono<br>( $12 > \phi > 10$ h;<br>$0,15 < f_s < 0,30$ ) | III - Medio<br>( $10 > \phi > 8$ h;<br>$0,30 < f_s < 0,40$ ) | IV - Sufficiente<br>( $8 > \phi > 6$ h;<br>$0,40 < f_s < 0,60$ ) | V - Mediocre<br>( $\phi < 6$ h;<br>$f_s > 0,60$ ) |
|--|--|--|--|---|
|--|--|--|--|---|

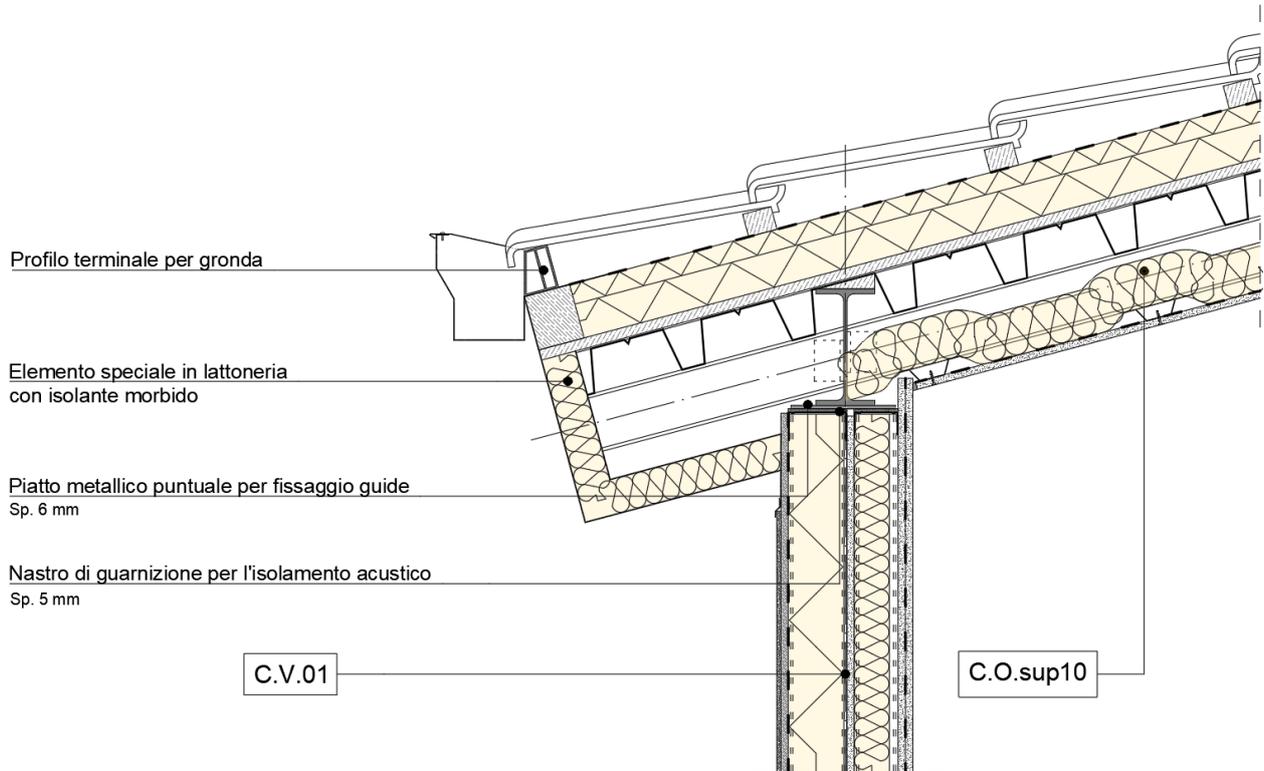
**ANALISI AGLI ELEMENTI FINITI**

DISTRIBUZIONE ISOTERME

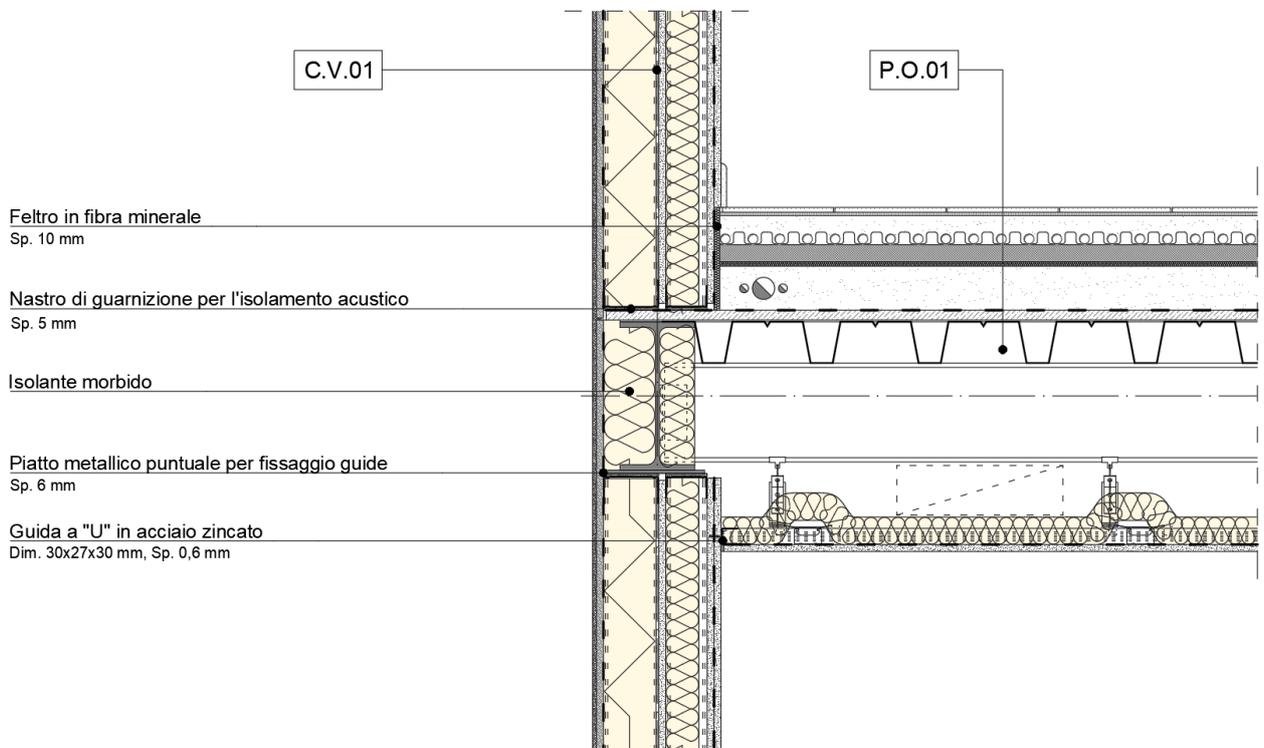


|  |                          |
|--|--------------------------|
| <b>Temperatura esterna</b>                   | -5 °C                    |
| <b>Temperatura interna</b>                   | 20 °C                    |
| <b>Resistenza esterna</b>                    | 0,04 m <sup>2</sup> K/W  |
| <b>Resistenza interna</b>                    | 0,13 m <sup>2</sup> K/W  |
| <b>Temperatura minima superficie interna</b> | 17,83 °C                 |
| <b>Trasmittanza termica media</b>            | 0,351 W/m <sup>2</sup> K |
| <b>Flusso termico medio</b>                  | 13,179 W/m               |

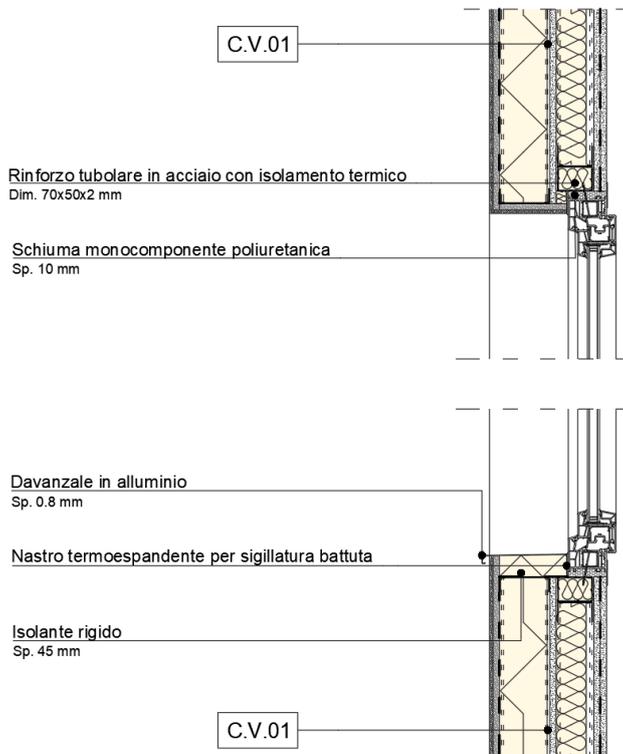
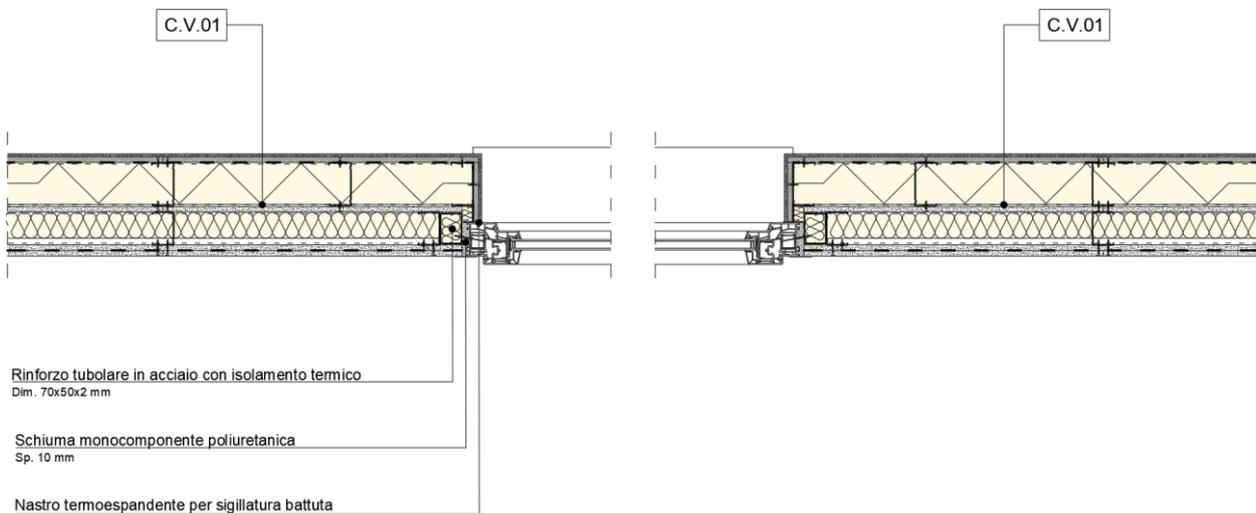
### NODO DI INTERFACCIA PARETE-COPERTURA



### NODO DI INTERFACCIA PARETE-SOLAIO



**NODO DI INTERFACCIA SERRAMENTO**



### 3 Conclusioni

A conclusione di questo secondo anno di lavoro, le principali osservazioni e punti di ulteriore sviluppo da tener in considerazione riguardano principalmente le tematiche di seguito contestualizzate.

- L'attività di studio e disegno di soluzioni conformi per le costruzioni stratificate a secco (LA2.13.1) ha confermato che il progetto di elementi di involucro con tale sistema costruttivo, rispetto a soluzioni tradizionali che sono ormai affermate e diffuse in maniera uniforme tra progettisti e costruttori, richiede conoscenze e competenze più specifiche, sia per la scelta e lo studio di dettaglio dei differenti layer che compongono ciascuna soluzione, che per il disegno e progetto dei vari nodi di interfaccia. Inoltre, data la variabilità degli strati funzionali, ai fini della presente attività di ricerca è stata necessaria una selezione delle soluzioni conformi da integrare nell'Atlante, in vista tuttavia della continua implementabilità di tale raccolta.
- Per quanto riguarda l'analisi termo-igrometrica agli elementi finiti delle varie soluzioni (LA2.13.2), tale attività ha dimostrato che l'attento studio e progetto degli elementi di involucro con sistema S/R, in particolare in termini di scelta e posizionamento consapevoli dei singoli materiali costituenti, consente di ottenere livelli prestazionali molto elevati, nel rispetto della normativa vigente a livello nazionale e in contesti climatici variabili.
- L'Atlante della tecnologia stratificata a secco, realizzato nell'ambito della LA2.12 e integrato con le schede prodotte per ciascuna soluzione nel corso dell'attuale LA2.13, è uno strumento con grande potenziale sia dal punto di vista progettuale (l'utente prevalente potrebbe essere dunque in generale il progettista) che formativo (es. studenti, progettisti, corsi universitari, corsi di formazione per professionisti).

Si ritiene che l'obiettivo finale della LA2.13, come previsto dall'Accordo di Collaborazione con ENEA, di realizzare un catalogo esaustivo, organizzato per macroaree con open data, per la comprensione e diffusione della conoscenza dei sistemi a secco innovativi sia stato raggiunto. Tutto il materiale prodotto è stato condiviso e consegnato a ENEA e, con il supporto di UNIME, verrà reso fruibile tramite Atlante digitale ospitato su spazio web di ENEA e implementabile nel tempo.

## 4 Riferimenti bibliografici

1. Decreto interministeriale 26 giugno 2015, n. 412. Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici. Consultabile al seguente link: <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2015/07/15/15A05198/sg>

## 5 Sitografia

DARTWIN, [www.dartwin.it](http://www.dartwin.it) (Ultima consultazione: 08/09/2021)

BRIANZA PLASTICA, [www.brianzaplastica.it](http://www.brianzaplastica.it) (Ultima consultazione: 21/12/2021)

## 6 Abbreviazioni ed acronimi

DM - Decreto Ministeriale

KPI - Key Performance Indicator

LA - Linea di Attività

S/R - Struttura/Rivestimento

WP - Work Package

## 7 Appendice

Si riporta nella seguente sezione un elenco di riferimenti bibliografici consultati nell'ambito dell'attività di ricerca, ritenuti particolarmente degni di nota nonostante non siano stati specificatamente citati nel presente report.

M. Berizzi, "Sistemi costruttivi a secco", *azero*, 19 (2016), pp. 78-87.

L. Feifer, M. Imperadori, G. Salvalai, A. Brambilla, F. Brunone, "Active House: Smart Nearly Zero Energy Buildings", 2018, Springer.

G. Salvalai, "2020 Edifici ad energia quasi zero (nZEB). La simulazione energetica dinamica come strumento di controllo e ottimizzazione del comfort termico e del fabbisogno di energia", 2015, Maggioli Editore.

M. Imperadori, A. Brambilla, F. Brunone, L. Feifer, G. Salvalai, A. Vanossi, "ACTIVE HOUSE. Progettazione e innovazione con tecnologie di costruzione stratificata a secco", 2019, Maggioli Editore.

M. Imperadori, "La meccanica dell'architettura. La progettazione con tecnologia stratificata a secco", 2010, Il Sole 24 Ore.

M. Imperadori, "Le procedure Struttura/Rivestimento per l'edilizia sostenibile. Tecnologie dell'innovazione", 1999, Maggioli Editore.

## 8 Allegati

### 8.1 *Contributi e Curriculum scientifico del gruppo di lavoro*

Graziano Salvalai



Laureato in Ingegneria Edile e Architettura presso il Politecnico di Milano, nel 2006. Ottiene il dottorato nel 2010 con una tesi sulle strategie di raffreddamento passivo per l'edilizia non residenziale nel clima mediterraneo. È stato visiting scientist presso il Fraunhofer Institute for Solar Energy System di Friburgo (Germania) presso il Solar Building Department nel 2009 e visiting scientist presso il Power System Design and Studies Group del National Renewable Energy Laboratory (NREL) Colorado, USA nel 2017. È stato visiting professor alla Colorado University a Boulder - Colorado, USA nel 2019. È professore associato al Politecnico di Milano - Dipartimento di Architettura, ambiente costruito e ingegneria delle costruzioni dal 2019, e insegna Edifici a risparmio energetico e Tecnologia di componenti e Sistemi edilizi e impiantistici.

È coordinatore locale di diverse ricerche nazionali come BE S2ecure (Rendere l'ambiente costruito più sicuro in condizioni di rallentamento e di emergenza attraverso soluzioni comportamentali valutate/progettate resilienti - MIUR) e Ricerca di Sistema - Efficienza energetica dei prodotti e dei processi industriali (MISE/ENEA 2019-2021), ed è responsabile scientifico dei seguenti progetti europei H2020 in corso: ALDREN (Alliance for Deep Renovation in buildings - 2017/2020), EEnvest (Risk reduction for Building Energy Efficiency investments - 2018/2022), EPC RECAST (Energy performance certificate recast - 2020/2023), e MEZeroE (Measuring Envelope products and systems contributing to next generation of healthy nearly Zero Energy Buildings - 2021/2026).

Le sue attività di ricerca e didattica si concentrano sull'innovazione delle tecniche costruttive concentrandosi sull'integrazione del sistema-edificio e il suo controllo attraverso programmi di simulazione energetica. L'esito delle ricerche è spesso testato su edifici reali e sperimentali. È autore di diversi articoli su riviste peer review e responsabile scientifico di varie consulenze in materia di tecnologie ad alta efficienza energetica per edifici a basso consumo energetico.

Nell'ambito dell'attività di Ricerca di Sistema Elettrico in oggetto, ha seguito sin dall'accordo iniziale con ENEA, la strutturazione dei contenuti e degli obiettivi del lavoro di ricerca. Come responsabile scientifico, coadiuvato dal prof. Marco Imperadori, ha avviato e suddiviso il lavoro con il team di ricerca, verificando periodicamente con esso il proseguimento delle attività e la preparazione degli elaborati. Nello specifico per il seguente report annuale, a valle della bozza concordata sia con ENEA che con il team, è stato il revisore e validatore globale del documento.

## Marta Maria Sesana



Dopo la laurea nel 2006 in Ingegneria Edile e Architettura (110 e lode) presso il Politecnico di Milano, consegue sempre presso lo stesso ateneo il dottorato di ricerca nel 2011 con una tesi dal titolo “Net Zero Energy Houses in Temperate Climate Toolbox for an integrated design approach”, sviluppata in parte presso il Fraunhofer Institute (ISE) dove è stata visiting tra il 2008 e il 2010.

Nel 2017 è stata invitata per l'avviamento di un programma di scambio internazionale tra docenti e studenti di ingegneria presso la Colorado University of Boulder (CU Boulder - Engineering and Applied Science Department). Ha collaborato attivamente durante il suo Post-doc presso il dipartimento ABC del Politecnico di Milano, sia per la parte di management che di sviluppo tecnico delle attività dei seguenti progetti europei finanziati dal programma FP7 su tematiche legate all'efficienza energetica, alle tecnologie costruttive e alle metodologie di recupero del patrimonio edilizio esistente.

È autrice di diverse pubblicazioni, articoli e contributi in conferenze legate ai suoi temi di ricerca. I suoi ambiti principali di ricerca riguardano: l'analisi e il rilievo di edifici esistenti per la determinazione di soluzioni di recupero sostenibile, normative, standard e strumenti legati al recupero efficiente degli edifici e modellazione energetica degli edifici.

Al momento fa parte del Building Energy Efficiency Team coordinato dal prof. Salvalai ed è responsabile dell'ufficio supporto alla ricerca del Polo Territoriale di Lecco. È inoltre project manager dei seguenti progetti europei: ALDREN H2020 - Alliance for Deep RENovation in buildings 2017-2020; EEnvest H2020 - Risk reduction for Building Energy Efficiency investments 2019-2022; PMI Network Interreg Italia-Svizzera 2019-2022; Ricerca di Sistema - Efficienza energetica dei prodotti e dei processi industriali, WP2 Miglioramento dell'efficienza energetica di processi di produzione e di gestione dell'ambiente costruito MISE/ENEA 2019-2021; EPC RECAST H2020 - Energy Performance Certificate Recast 2020-2023; MEZeroE H2020 project 2021-2026.

Nell'ambito dell'attività di Ricerca di Sistema Elettrico in oggetto, ha seguito sin dall'accordo iniziale con ENEA, la pianificazione e organizzazione del lavoro di ricerca e degli aspetti amministrativi legati alla rendicontazione delle attività del team. Ha contribuito nello svolgimento delle attività come previste da Gantt collaborando in modo attivo con l'assegnista dedicata al progetto nel primo anno di ricerca. Ha supervisionato il proseguo delle attività tenendo i rapporti con il responsabile ENEA per la calendarizzazione delle riunioni periodiche e dei relativi verbali. Nello specifico per il seguente report annuale, ha contribuito al popolamento delle varie sezioni supportando e revisionando risultati e format.

## Diletta Brutti



Laureata presso il Politecnico di Milano in Progettazione Architettonica, nel 2014, e in Ingegneria Edile-Architettura, nel 2019, con una tesi dal titolo “Centre Tournesol - Progetto di un villaggio rurale clever-tech a Pô, in Burkina Faso”.

Al momento fa parte del Building Energy Efficiency Team coordinato dal prof. Graziano Salvalai, svolge attività di supporto alla didattica presso il Politecnico di Milano, ed è dottoranda al Dipartimento ABC (Architettura, ambiente costruito e ingegneria delle costruzioni) del Politecnico di Milano, con attività di ricerca che si concentrano prevalentemente su efficienza energetica, tecnologie costruttive innovative, e modellazione e simulazione energetica degli edifici.

Collabora inoltre a varie consulenze in materia di tecnologie ad alta efficienza energetica per edifici a basso consumo, e a progetti di ricerca nazionali ed europei, quali: Ricerca di Sistema MISE/ENEA (Efficienza energetica dei prodotti e dei processi industriali), 2019-2021; EEnvest H2020 (Risk reduction for Building Energy Efficiency investments), 2019-2022; ALDREN H2020 (Alliance for Deep RENovation in buildings), 2017-2020; EPC RECAST H2020 (Energy Performance Certificate Recast), 2020-2023; MEZeroE H2020 (Measuring Envelope products and systems contributing to next generation of healthy nearly Zero Energy Buildings), 2021-2026.

Nell’ambito dell’attività di Ricerca di Sistema Elettrico in oggetto, è stata per il primo anno di lavoro assegnista di ricerca dedicata al 100% su tale progetto, e ha proseguito anche nell’annualità successiva sviluppando le attività in modo operativo seguendo le indicazioni e le modalità tecnico scientifiche delineate dai docenti responsabili e interfacciandosi quotidianamente con il team di lavoro per verificarne lo sviluppo. Ha svolto in modo completo lo studio e l’analisi delle soluzioni conformi secondo una schedatura concordata con il responsabile scientifico. Nello specifico per il seguente report annuale, ha completato il documento integrando i risultati ottenuti dallo sviluppo delle attività di lavoro secondo le indicazioni concordate con il team.

## Marco Imperadori



Marco Imperadori è Professore Ordinario presso il Politecnico di Milano, titolare della cattedra di Progettazione e Innovazione Tecnologica presso la Scuola di Architettura Urbanistica Ingegneria delle Costruzioni. È delegato del Rettore del Politecnico per l’Estremo Oriente.

Svolge attività di ricerca e ha pubblicato libri e articoli su riviste di settore in Italia e all'estero, dove viene invitato per convegni e conferenze sui temi della sostenibilità e del risparmio energetico.

È stato membro del Comitato Scientifico Internazionale dell'Agenzia Casa Clima di Bolzano e ha rappresentato il Politecnico di Milano per il network Android.

È membro della Commissione Costruzioni Sostenibili di Promozione Acciaio e fa parte del board scientifico del network internazionale dell'Active House Alliance e del comitato scientifico della Fondazione Angelo Mangiarotti. Dal 2016 è membro del CDA della Fondazione Pesenti e del Comitato Scientifico di SOU - Scuola di Architettura per bambini presso FARM Cultural Park di Favara. Dal 1999 al 2016 è stato titolare dello studio Atelier2 (Valentina Gallotti e Marco Imperadori Associati) di Milano. Ha vinto diversi premi e menzioni sia nazionali che internazionali.

Nell'ambito dell'attività di Ricerca di Sistema Elettrico in oggetto, ha seguito sin dall'accordo iniziale con ENEA, la definizione del lavoro di ricerca e congiuntamente con il prof. Salvalai ha identificato le linee di sviluppo del lavoro. Ha supervisionato il proseguo delle attività confrontandosi periodicamente con il team in particolar modo nei primi mesi di avvio delle attività. Nello specifico per il seguente report annuale, ha revisionato la versione finale del documento per validarne i contenuti.

## 8.2 *Elenco file consegnati digitalmente*

- *POLIMI\_ENEA\_LA2.13.1\_COest.dwg | POLIMI\_ENEA\_LA2.13.1\_COest.dxf*
- *POLIMI\_ENEA\_LA2.13.1\_COsup.dwg | POLIMI\_ENEA\_LA2.13.1\_COsup.dxf*
- *POLIMI\_ENEA\_LA2.13.1\_CV.dwg | POLIMI\_ENEA\_LA2.13.1\_CV.dxf*
- *POLIMI\_ENEA\_LA2.13.1\_PO.dwg | POLIMI\_ENEA\_LA2.13.1\_PO.dxf*
- *POLIMI\_ENEA\_LA2.13.2\_COest.pdf*
- *POLIMI\_ENEA\_LA2.13.2\_COsup.pdf*
- *POLIMI\_ENEA\_LA2.13.2\_CV.pdf*
- *POLIMI\_ENEA\_LA2.13.2\_Soluzioni.xlsx*
- *POLIMI\_ENEA\_LA2.13.3\_COest.pdf*
- *POLIMI\_ENEA\_LA2.13.3\_COsup.pdf*
- *POLIMI\_ENEA\_LA2.13.3\_CV.pdf*
- *POLIMI\_ENEA\_LA2.13.3\_PO.pdf*