UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

LAUREA MAGISTRALE

in Ingegneria Edile

CONFRONTO DELLE PRESTAZIONI TERMICHE DI SISTEMI SIP (STRUCTURAL INSULATED PANELS) E INTELAIATI IN LEGNO (PLATFORM FRAME).

Analisi numeriche e prove sperimentali in regime stazionario e dinamico.

COMPARISON OF THE THERMAL PERFORMANCE OF SIP (STRUCTURAL INSULATED PANELS) AND WOODEN FRAMED SYSTEM (PLATFORM FRAME).

Numerical analysis and experimental tests in stationary and dynamic regime.

Relatrice:
Prof.ssa Francesca Stazi

Laureando:
Giulia Romagnoli

Correlatore:
Prof. Costanzo Di Perna

Anno Accademico 2020/2021

INDICE

ABSTRACT **4**

1 INTRODUZIONE **5**

1.1 MOTIVAZIONE DELLA TESI 5

1.2 OBIETTIVO DELLA TESI 6

2 STATO DELL'ARTE **7**

2.1 SISTEMA COSTRUTTIVO SIP 8

2.1.1 Storia dei SIP 8

2.2 STRUCTURAL INSULATED PANELS 10

2.2.1 Componenti SIP 12

2.2.1.1 Rivestimento Esterno 12

2.2.1.2 Nucleo Interno 14

2.2.1.3 Adesivo strutturale 15

2.2.2 Connessioni SIP 16

2.2.3 Finiture SIP 19

2.2.3.1 Finiture Esterne 19

2.2.3.2 Finiture Interne 21

2.2.4 Costruzione e montaggio SIP 24

2.2.5 Vantaggi e svantaggi SIP 29

2.3 SISTEMA COSTRUTTIVO PLATFORM FRAME 32

2.3.1 Storia del Platform Frame 32

2.4 PLATFORM FRAME 34

2.4.1 Componenti Platform Frame 35

2.4.1.1 Rivestimento Esterno 35

2.4.1.2 Nucleo Isolante 38

2.4.2.3 Telaio in Legno 39

2.4.2.4 Fissaggi 40

2.4.2 Finiture Platform Frame 41

2.4.2.1 Finiture Esterne 41

2.4.2.1 Finiture Interne 43

2.4.3 Costruzione e montaggio Platform Frame 44

2.4.4 Vantaggi e svantaggi Platform Frame 50

3 CAMPIONI DI INDAGINE **52**

3.1 SIP 52

3.1.1 SIP senza finiture 54

3.1.1.1 Pannello ISOSANDWICH 2K 57
3.1.1.2 Telaio in legno 62
3.1.1.3 Fissaggi 63
3.1.2 SIP con le finiture 65
3.1.2.1 Finitura esterna 69
3.1.2.2 Finitura interna 75
3.2 PLATFORM FRAME 78
3.2.1 Platform Frame senza finiture 79
3.2.1.1 Rivestimento esterno OSB/3 80
3.2.1.2 Nucleo isolante in lana di roccia 81
3.2.1.3 Telaio in legno 82
3.2.1.5 Membrane 83
3.2.2 Platform Frame con le finiture 85
3.2.2.1 Finitura esterna 86
3.2.2.2 Finitura interna 88
4 METODI DI ANALISI 89
4.1 ANALISI NUMERICA 89
4.1.1 Regime stazionario 89
4.1.1.1 Trasmittanza termica 90
4.1.1.2 Ponti termici 95
4.1.2 Regime dinamico 106
4.1.2.1 Parametri termici dinamici 109
4.2 ANALISI SPERIMENTALE 114
4.2.1 Set-up delle prove 116
4.2.2.1 Strumenti utilizzati 116
4.2.2 Regime stazionario 120
4.2.2.1 Trasmittanza termica in opera 121
4.2.3 Regime dinamico 127
4.2.3.1 Temperatura sole-aria 128
5 RISULTATI 131
5.1 ANALISI NUMERICA 131
5.1.1 Regime Stazionario 131
5.1.1.1 Trasmittanza termica 131
5.1.1.2 Trasmittanza termica lineica 146
5.1.2 Regime Dinamico 175
5.1.2.1 Parametri dinamici 175
5.2 ANALISI SPERIMENTALE 178

5.2.1 Regime stazionario 179
5.2.1.1 Campioni senza finiture NF 180
5.2.1.2 Campioni con le finiture F 189
5.2.2 Regime dinamico 197
5.2.2.1 Campioni senza finiture NF 198
5.2.2.2 Campioni con le finiture F 209

6 DISCUSSIONE 221

6.1 REGIME STAZIONARIO 221
6.1.1 Campioni senza finiture NF 221
6.1.2 Campioni con le finiture F 225
6.2 REGIME DINAMICO 230
6.2.1 Campioni senza finiture NF 230
6.2.2 Campioni con le finiture F 232
6.2.3 Campioni con e senza finiture 235

7 CONCLUSIONI 242

BIBLIOGRAFIA 243

ALLEGATI 249

ABSTRACT

La presente tesi nasce con l'obiettivo di valutare il comportamento termico di pannelli strutturali SIP (Structural Insulted Panel) e della tecnologia Platform Frame, mettendoli a confronto.
Lo studio effettuato si incentra sull'importanza del valore di trasmittanza U che continua ad essere il principale parametro di riferimento per descrivere le prestazioni termiche delle pareti in edilizia.

Lo studio ha riguardato analisi numeriche e sperimentali su prototipi di dimensioni ridotte delle due tecnologie, con test di natura stazionaria e dinamica per determinare, attraverso l'uso di una camera climatica, le effettive prestazioni di un insieme di pareti a diversa tecnologia costruttiva ma caratterizzati da equivalenti valori di trasmittanza termica.

1 INTRODUZIONE

1.1 Motivazione della tesi

Il raggiungimento di elevati standard energetici richiesti dalle nuove normative ha portato all'adozione di involucri leggeri e super isolati con diverse tecnologie in legno anche in climi mediterranei caldi ed umidi. L'involucro edilizio è pensato non solo per creare spazi messi a disposizione degli utenti, ma anche per fornire un adeguato isolamento termico dell'ambiente interno da quello esterno.

Recentemente sono state importate da altri paesi delle tecnologie basate sull'uso di pannelli strutturali isolanti (SIP) e soluzioni intelaiate di tipo Platform Frame. Tuttavia, ancora sono poco indagate le prestazioni termiche di tali sistemi costruttivi.

I materiali con cui un involucro edilizio è realizzato influenzano particolarmente la prestazione termica dello stesso. Utilizzando temperature e flussi di calore è possibile qualificare il comportamento di un materiale dal punto di vista termico. La presente tesi nasce per dare un contributo a tale questione aperta indagando nel dettaglio le prestazioni stazionarie e dinamiche di queste due tipologie a confronto.

1.2 Obiettivo della tesi

La campagna sperimentale effettuata ha l'obiettivo di valutare ed indagare il comportamento dei sistemi costruttivi SIP e Platform Frame sottoposti a stimoli termici. Vengono effettuate analisi numeriche mediante l'utilizzo di idonei software di calcolo ed analisi sperimentali facendo uso di una camera climatica. Le prove sperimentali sono state effettuate su sei differenti campioni, di cui 4 nella tecnologia SIP e due in Platform Frame, al fine di definirne il comportamento sotto stimoli termici stazionari e dinamici. I campioni sono stati realizzati con materiali, connessioni e dimensioni verosimili alle pareti realizzate nel territorio italiano.

I risultati ottenuti sono stati poi confrontati sia con quelli determinati analiticamente, utilizzando le procedure e le formule disponibili in letteratura, che con quelli ottenuti sperimentalmente per le due differenti tecnologie costruttive.

2 STATO DELL'ARTE

Soddisfare i requisiti per l'efficienza energetica degli edifici per le costruzioni in legno "passive" richiede strutture di involucro progressive. La ricerca su tali involucri edilizi è oggi di grande utilità importanza anche per l'ambiente e la sua tutela [1].

Gli edifici sono associati a circa un terzo del consumo globale di energia primaria e ad un terzo delle emissioni totali di gas serra legate all' energia [2]. Al fine di limitare il consumo energetico relativo agli edifici a livello europeo, la Direttiva dell'Unione Europea 2010/31/UE sulla prestazione energetica nell'edilizia (EPBD 2010) [3]ha definito obiettivi minimi per gli Stati membri dell'UE in relazione al regolamento edilizio.

Di conseguenza, le normative edilizie all'interno dei paesi dell'UE sono diventate più rigorose sul rendimento energetico degli edifici. La valutazione dell'EPBD 2010 [4] ha rivelato che questi cambiamenti hanno avuto un impatto particolarmente positivo sul miglioramento delle prestazioni energetiche degli edifici di nuova costruzione.

Quando si considera l'efficienza energetica degli edifici, dovrebbero essere presi in considerazione diversi fattori; certamente, il ruolo dell'involucro edilizio nel fornire una barriera tra gli ambienti interni ed esterni non può essere sottovalutato. Tuttavia, il primo passo necessario nel processo di ottimizzazione dell'involucro edilizio è la valutazione delle sue effettive prestazioni energetiche[5], [6].

Nel seguente capitolo verranno descritte e caratterizzate le due tipologie costruttive oggetto di indagine.

2.1 Sistema costruttivo SIP

L'edilizia modulare sta diventando sempre più popolare in tutto il mondo grazie alla sua convenienza, efficienza energetica e sostenibilità.
Il pannello coibentato strutturale (SIP) è un materiale da costruzione che può essere utilizzato come componente principale portante della costruzione; è riconosciuto come un pannello efficiente nel settore edile grazie alla sua ecosostenibilità, economicità, facilità di installazione, leggerezza.

2.1.1 Storia dei SIP

ll primo concetto di SIP come pannelli, emerse nel 1935 dagli ingegneri del Forest Products Laboratory (FPL) negli USA (SIPA, 2010). Questi pannelli erano costituiti da un "telaio" all'interno di un pannello caratterizzato da due rivestimenti esterni e nucleo isolante. Le case sperimentali realizzate con questo tipo di pannelli furono monitorate per oltre trenta anni.

Durante di anni '30, il famoso architetto Frank Lloyd Wright, costruì le prime case cosiddette "usoniane"(Figura 1). Alcuni dei pannelli con cui queste venivano realizzate erano costituiti da due di compensato insieme a due di carta catramata. Non vi era alcun isolamento per questo tipo di pannelli.

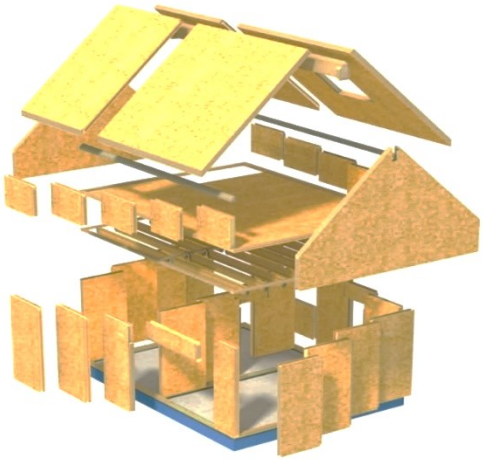


Figura 1 - Edificio SIP

Il primo SIP con nucleo in schiuma (Figura 2), nella forma simile a quella odierna, fu sviluppato nel 1952 da Alden B. Dow, uno degli studenti di Wright e figlio del fondatore dell'azienda chimica.

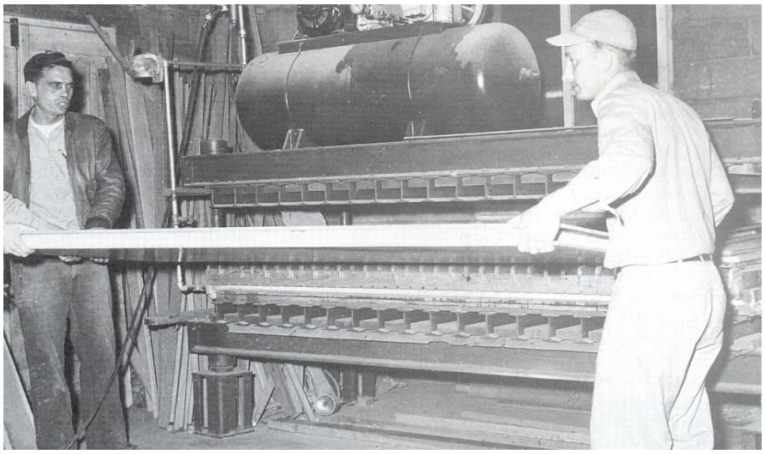


Figura 2 - Pannello coibentato sviluppato da B.Dow

Ci fu una crescente domanda nell'utilizzo di questa tecnologia per via della sua economicità ed efficienza energetica, tanto che, durante gli anni '80, il sistema SIP è stato introdotto anche nel Regno Unito importandolo dagli USA (Bregulla e Enjily, 2004)[7].

Per aumentare l'uso dei pannelli SIP e per fornire una assistenza tecnica ed informativa, nel 1990, negli Stati Uniti, è stata fondata la Structural Insulated Panels Association (SIPA). Negli stessi anni la crescita della tecnologia di produzione assistita da computer (CAM) ha un effetto positivo sulla produzione dei SIP.

Il disegno architettonico computerizzato (CAD) ha anche fornito i codici obbligatori per permettere alle macchine da taglio automatizzate di realizzare pannelli SIP. La tecnologia CAD/CAM ha permesso di risparmiare la manodopera nella realizzazione dei pannelli SIP e di produrre elementi con elevata accuratezza e precisione.

In risposta alle necessità industriali di allegare la documentazione del prodotto, la SIPA ha collaborato con il gruppo dell'American Society for Testing and Materials (ASTM) per definire un metodo di prova standard per la determinazione delle capacità strutturali dei pannelli isolati (ASTM-E7, 2002). I produttori, attenendosi al protocollo definito dall'ASTM, debbono dichiarare le specifiche del prodotto e le relative certificazioni [8].

2.2 Structural Insulated Panels

I pannelli SIP (Figura 3) sono elementi strutturali coibentati, composti da due lastre di rivestimento rigido ed un nucleo in schiuma non strutturale a base di polimenti altamente isolanti come EPS (Polistirene Espanso Sinterizzato), XPS (Schiuma di Polistirene Estruso), PUR (Schiuma Poliuretanica), PIR (Poliisocianurato).

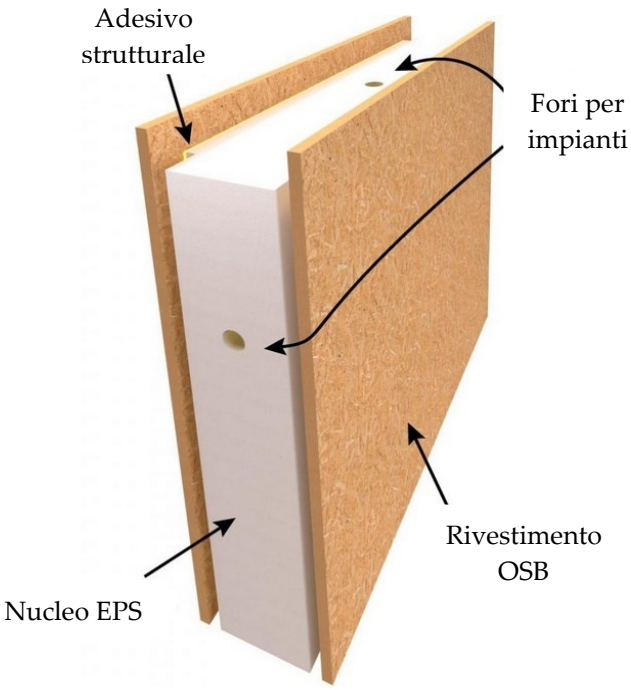


Figura 3 - Structural Insulated Panel

La schiuma PUR, rispetto all'EPS, presenta prestazioni migliori contro il fuoco e, se accoppiata al rivestimento in OSB, conferisce al SIP una notevole resistenza ai carichi assiali, flessionali e laterali.

Il pannello di rivestimento più utilizzato è per l'appunto l'OSB (Oriented Strand Board), un materiale a base di legno ottenuto comprimendo particelle di legno ad alta temperatura e pressione, nonché utilizzando una resina sintetica resistente all'umidità.

I SIP possono essere utilizzati per la realizzazione di pareti, tetti e pavimenti e sono tipicamente prefabbricati, offrendo l'opportunità di una significativa riduzione dei tempi di costruzione in loco e riducendo al minimo gli sprechi.

2.2.1 Componenti SIP

2.2.1.1 Rivestimento Esterno

Il rivestimento esterno può essere realizzato con diverse tipologie di materiale, tra cui OSB, compensato, acciaio, alluminio, pannelli di cemento, pannelli in fibra di vetro ed altri materiali compositi (Figura 4). Ogni materiale di rivestimento e tipo di schiuma ha i suoi vantaggi e svantaggi, la scelta della tipologia di SIP dipende dal tipo di edificio e dalle condizioni del sito.

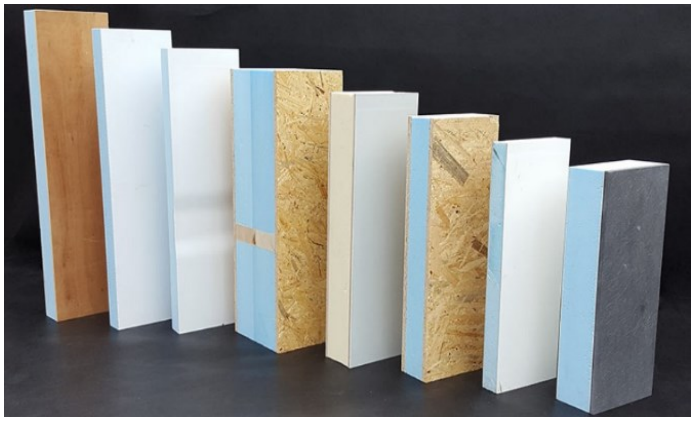


Figura 4 – Differenti rivestimenti

Kenyangi (2009) condusse un'indagine sui principali produttori di pannelli SIP nel Regno Unito e trovò che il 93% degli intervistati ha incontrato l'OSB (Oriented Strand Board) come rivestimento più comunemente utilizzato.

L'OSB è un pannello a base di legno, prodotto da risorse forestali sostenibili (Forestry, 2010), che non soffre di alcun difetto tipico dei blocchi in legno, come ad esempio nodi, smussature, torsioni (Lyons 2010).

Solitamente l'OSB è composto di tre strati di trucioli di legno, prevalentemente lunghi e stretti, che vengono legati insieme da una resina sintetica mediante pressatura a caldo per poi essere tagliati ad ottenere le dimensioni richieste (Figura 5).

Le tipiche dimensioni dell'OSB sono 2400 x 1200 mm, 3600 x 1200 mm con spessori variabili tra 6, 8, 9, 11, 15, 18, 22, 28 e 38 mm (Dinwoodie e Enjily, 2003).

Figura 5 - Oriented Strand Board

Normalmente i due strati esterni dell'OSB sono composti di trucioli orientati nella direzione del pannello, a differenza dello strato interno che può essere a trucioli casuali o orientati ortogonalmente al pannello.

I pannelli OSB non sono tutti uguali. Secondo la normativa UNI EN300:2006 ne esistono di diverse tipologie, che si differenziano per caratteristiche e impieghi:

- I *pannelli OSB/1* sono i più comuni e generici. Questi vengono utilizzati in ambienti asciutti, per realizzare prevalentemente complementi d'arredo;
- I *pannelli OSB/2*, invece, sono più resistenti e con maggiori capacità portanti. Vengono utilizzati in ambienti secchi, generalmente per allestimenti fieristici;
- I *pannelli OSB/3* sono simili ai 2 per composizione, ma a differenza loro sono adatti ad un uso strutturale in ambienti umidi;
- I *pannelli OSB/4* sono ancora più resistenti dei 3 e vengono utilizzati in ambienti umidi con funzioni strutturali.

In generale l'OSB, indipendentemente dalla tipologia, vanta delle proprietà di versatilità, resistenza, costo contenuto e sostenibilità ambientale, caratteristiche che lo rendono candidato ideale per le costruzioni in bioedilizia.

2.2.1.2 Nucleo Interno

Come già anticipato anche per il nucleo interno posso essere selezionate diverse tipologie di materiale isolante (Figura 6) come il polistirene espanso (EPS), il polistirene estruso (XPS), il poliuretano (PUR), il poliisocianurato (PIR).

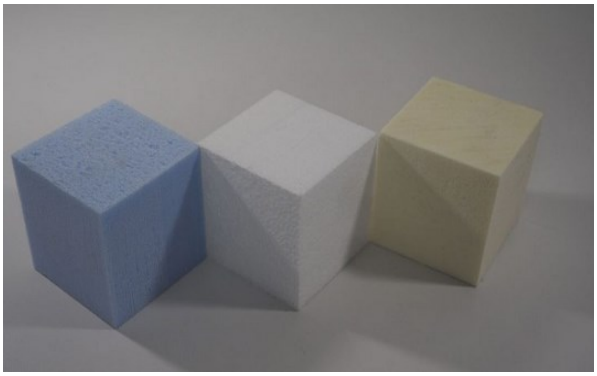


Figura 6 –XPS, EPS, PIR

Nella seguente sperimentazione verrà utilizzato un nucleo in EPS, il quale conferisce stabilità strutturale ed ha anche una elevata resistenza termica. Grazie ai suoi componenti termoplastici, tra i quali possiamo evidenziare l'ossido di silicio (SiO_2) e l'ossido di ferro (Fe_2O_3) l'EPS presenta una buona resistenza al fuoco e, le cellule chiuse che questa schiuma contiene, creano una barriera che espande il suo volume quando è esposto ad alte temperature, generando una struttura cellulare penetrabile dall'aria che non permette il passaggio del fumo [9] [10][11]. Inoltre, il suo nucleo ha notevoli proprietà meccaniche, di resistenza all'umidità ed agli agenti chimici [12] .

2.2.1.3 Adesivo strutturale

L'adesivo è un altro componente che riveste particolare importanza nei pannelli SIP. Questo deve garantire un forte legame tra nucleo e facce esterne, in maniera tale che l'integrità dell'incollaggio sia mantenuta, nella classe di servizio assegnata, per tutta la vita utile dell'elemento. Adesivi che rispettano tale requisito sono quelli regolati dalle norme UNI EN 301 (fenolici ed amminoplastici) e UNI EN 15425 (poliuretanici monocomponente).

Inoltre, dovrebbe anche essere in grado di resistere alla penetrazione dell'umidità senza perdere le proprie caratteristiche nel corso della vita utile dei SIP.

L'incollaggio del nucleo interno mediante l'utilizzo di adesivo strutturale è un processo che avviene quando si ha a che fare con isolanti come EPS ed XPS. Al contrario, non occorre utilizzare l'adesivo per nuclei isolanti in PUR o PIR grazie alla loro caratteristica di incollaggio automatico.

Tra gli adesivi adatti per i moderni compositi troviamo Poliuretano, polivinilacetato (PVA), acrilico, fenolico e adesivi epossidici[13]. I-S Manufacturing Ltd produce i sistemi di costruzione I-S e I-SIP utilizzando un adesivo poliuretanico a due parti per incollare gli OSB al nucleo interno in EPS [14]. SIP Industries Ltd (2010) utilizza la colla PVA per produrre i loro SIP.

NAHB Research Centre Inc. e Building Works Inc. (2007) afferma che l'adesivo per legare le facce esterne e il nucleo interno dei SIPs devono essere conformi ad ASTM D2559 [15] o al tipo II classe 2 secondo i criteri di accettazione ICC ES AC05 [16]. AC05 presenta i requisiti minimi di prestazione per l'adesivo rispetto all'umidità, alla temperatura, invecchiamento accelerato, creep, ossidazione o ozono, muffa e reagenti chimici e compatibilità. Inoltre, dettaglia anche vari test che un adesivo deve soddisfare.

2.2.2 Connessioni SIP

Le connessioni ed i giunti tra due elementi SIP devono essere adeguatamente realizzati per trasferire tutte le forze che agiscono parallelamente ed ortogonalmente alla superficie dei pannelli.
Morley [17] sottolinea che il collegamento di ogni elemento SIP è una parte molto importante del sistema che deve assicurare l'integrità strutturale e la durata a lungo termine, nonché evitare le perdite d'aria tra i giunti per garantire l'efficienza energetica. Esistono diverse tipologie di connessione che variano da produttore a produttore. La connessione tra pannelli avviene mediante elementi chiamati "spline". La SIP Engineering Design Guide [18] definisce spline nel seguente modo: «elementi installati, in fabbrica o in cantiere, all'interno del nucleo isolante, per interconnettere i pannelli SIP adiacenti utilizzando una dispozione maschio-femmina».

Le spline sono classificate come segue:

- *Surface Spline*: due pannelli strutturali, dello stesso materiale dei rivestimenti del SIP, vengono inseriti all'interno di scanalature appositamente tagliate nel nucleo isolato ai bordi verticali dei due pannelli SIP da collegare (Figura 7).

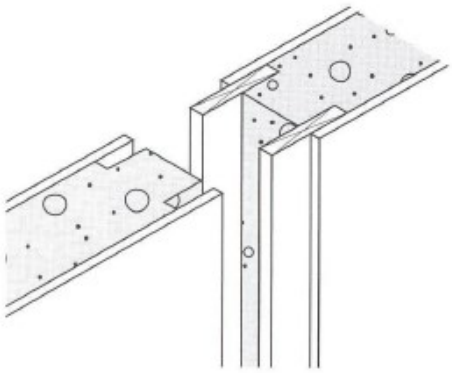


Figura 7 - Surface Spline

- *Block Spline(o mini-SIP):* spline a forma di blocco costituito dallo stesso materiale dei rivestimenti e con lo stesso nucleo isolante, con spessore complessivo uguale allo spessore del nucleo isolante dei pannelli da collegare, da inserite in una rientranza ai bordi verticali dei due pannelli. La connessione tra questi tre elementi avviene mediante incollaggio e chiodatura (Figura 8).

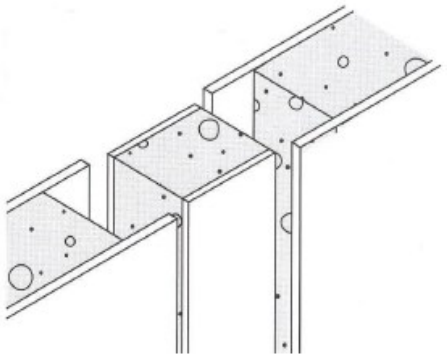


Figura 8 - Block Spline

- *Reinforcing spline* (Tipo R): questo tipo di spline presenta proprietà difinite separatamente dal pannello SIP, rinforza il pannello e fornisce una notevole resistenza e rigidezza assiale e trasversale (fuori dal piano). Esempi di spline di tipo R includono: derivati del legno (LVL,ecc..), legname segato o montanti in acciaio stampati a freddo (Figura 9).

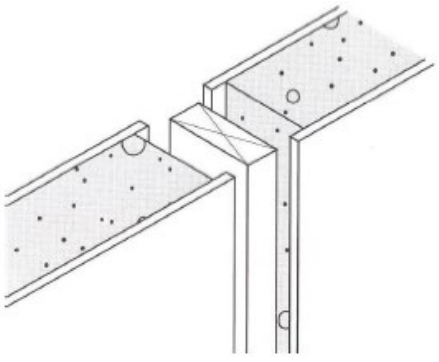


Figura 9 - Reinforcin Spline

La connessione Block Spline è la tipologia più comunemente utilizzata nell'industria per via della sua economicità e prestazione termica[17]. Insieme alla Surface Spline presentano elevate efficienze energetiche tanto da essere utilizzate preferibilmente per la realizzazione del tetto. La connessione tipo R (in legno) viene invece utilizzata maggiormente per i pavimenti [19].

2.2.3 Finiture SIP

Le pareti SIP sono composte da una parte strutturale caratterizzata dall'unione di pannelli di rivestimento in legno di tipo OSB in cui è racchiuso uno strato isolante. La parte strutturale viene completata, sia nel lato interno che esterno, accoppiando diverse tecnologie e tipologie costruttive sulla base di accurate scelte progettuali.

2.2.3.1 Finiture Esterne

Bregulla e Enjily [20] affermano che i mattoni o i rivestimenti in legno sono tipicamente utilizzati come finitura esterna nel sistema SIP. Kingspan TEK Ltd (2007) presenta alcune tipologie di rivestimenti esterni più comunemente utilizzati, specificando che qualunque sia la tipologia da adottare è bene che questa venga preceduta da una membrana impermeabile traspirante direttamente fissata ai pannelli OSB.

Di seguito si individuano i rivestimenti per esterni analizzati da Kingspan TEK Ltd:

1) Facciata in *mattoni/pietra* (Figura 10), considerando un'intercapedine di almeno 50mm tra la membrana traspirante e gli elementi di facciata;

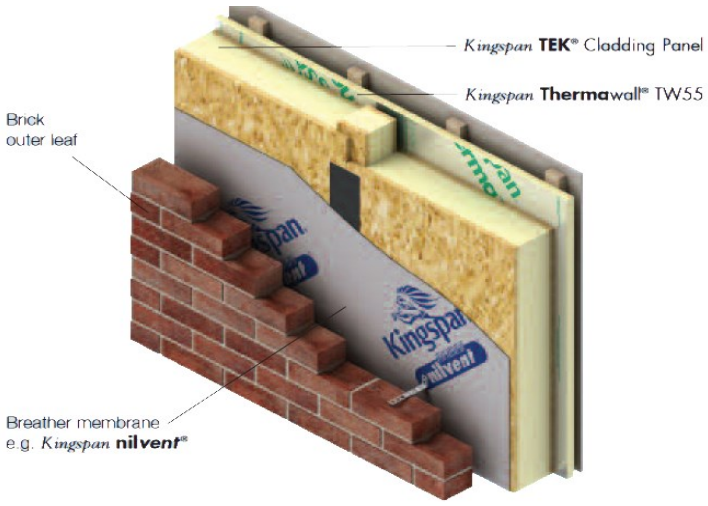


Figura 10 - Rivestimento in muratura

2) Rivestimento in *lastre antipioggia* (Figura 11) installate mediante l'utilizzo di montanti in acciaio direttamente fissati al pannello OSB;

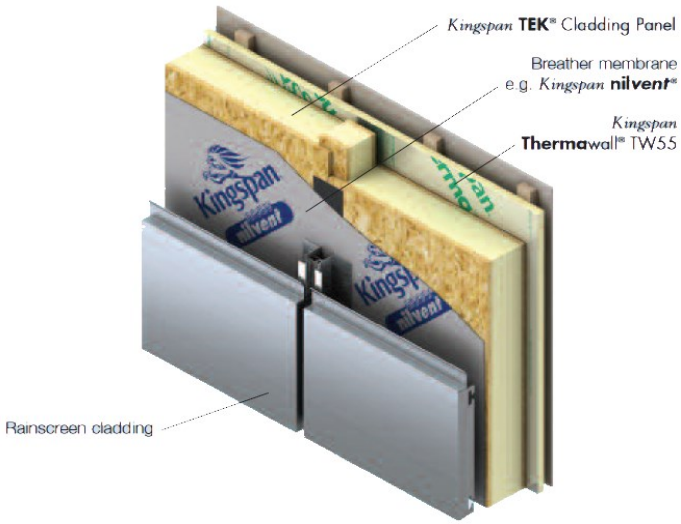


Figura 11 - Rivestimento antipioggia

3) Rivestimento in *pannelli di legno* (Figura 12) posizionati su listelli verticali in legno di spessore minimo 25 mm e 50 mm di larghezza;

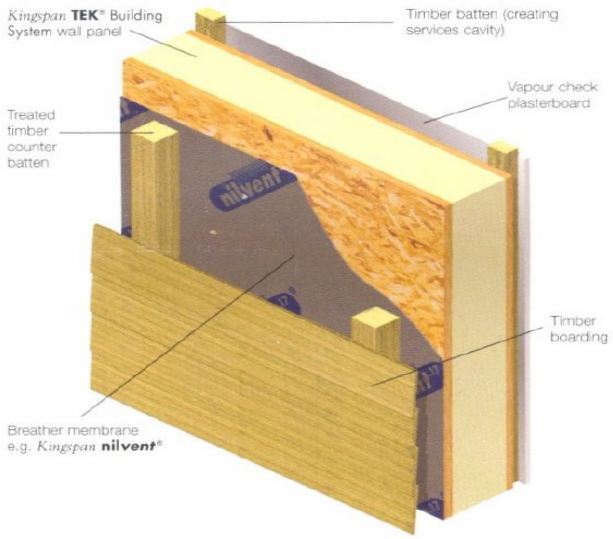


Figura 12 - Rivestimento in legno

4) Rivestimento in *piastrelle di ardesia* (Figura 13) montate su listelli in legno trattato di spessore minimo 25 mm e larghezza 50 mm.

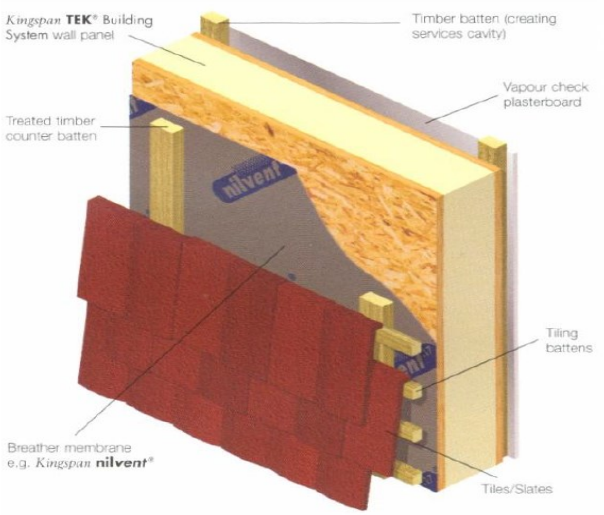


Figura 13 - Rivestimento in ardesia

2.2.3.2 Finiture Interne

Le finiture interne proposte da Kingspan TEK Ltd (2007) vedono come elemento principale il cartongesso. Il requisito minimo di quest'ultimo può variare in base ai requisiti anti-incendio ed acustici. Nel caso in cui sia necessario il passaggio di cavi o tubazioni adiacenti al pannello OSB, si possono identificare due opzioni per creare la cavità di servizio:

- l'una prevede il fissaggio su listelli in legno verticali, di spessore minimo 25 mm e profondità 50 mm, di un *singolo strato di cartongesso* dallo spessore minimo di 12.5 mm (Figura 14);

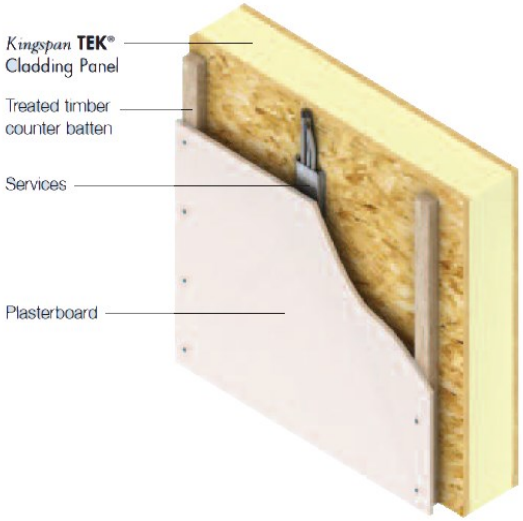


Figura 14 – Rivestimento in singolo strato di cartongesso

- l'altra l'inserimento di un *doppio strato di cartongesso* (Figura 15) di spessore 12.5 mm. Lo strato più vicino al rivestimento dovrà essere in cartongesso resistente al vapore ed avere una apposita scalanatura per il passaggio dei servizi.

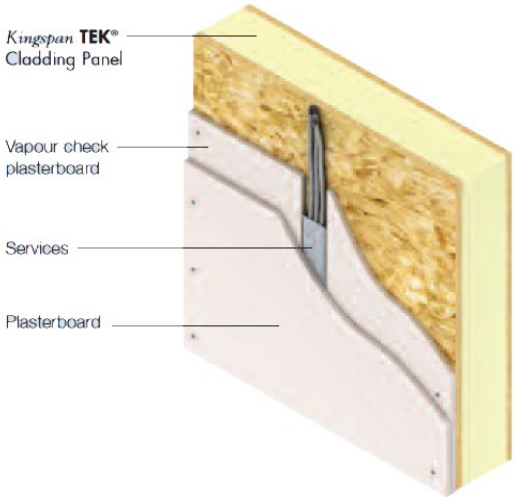


Figura 15 - Rivestimento in doppio strato di cartongesso

Nel caso in cui ci sia un ulteriore strato di isolamento e siano necessarie cavità per il passaggio degli impianti, si predispongono listelli in legno di spessore minimo 25 mm e larghezza 50 mm su cui viene montato un *singolo strato di cartongesso* di spessore minimo 12.5 mm (Figura 16).

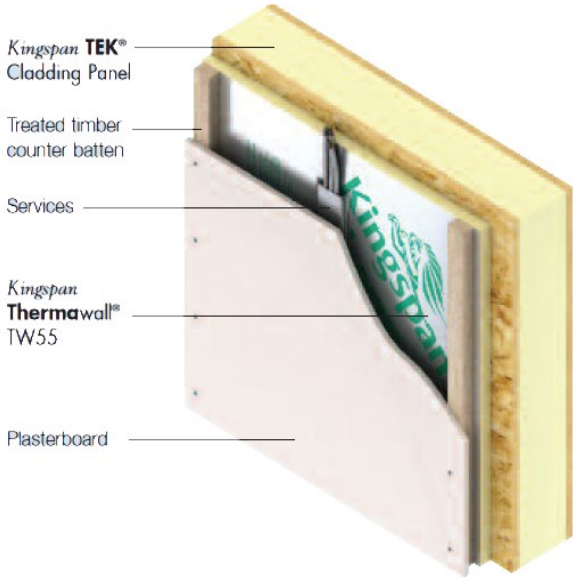


Figura 16 - Rivestimento in cartongesso con isolamento

In ognuno dei casi sopra citati, dovrà essere presente una guaina/condotto per il passaggio dei cavi, valutati in conformità con i regolamenti edilizi e BS 7671: 2001 (Requisiti per le installazioni elettriche).

Nel caso in cui non sia necessaria una cavità destinata ai servizi, Kingspan Tek prevede il fissaggio del *pannello in cartongesso* di 12.5 mm direttamente al pannello OSB (Figura 17).

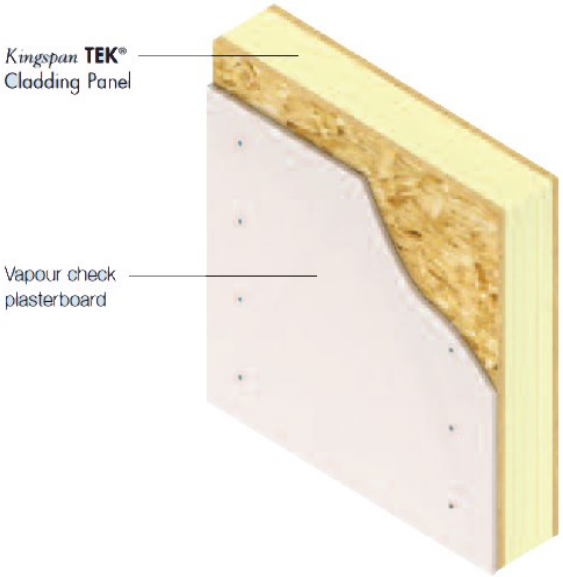


Figura 17 - Rivestimento in cartongesso senza cavità

2.2.4 Costruzione e montaggio SIP

I pannelli SIP sono prodotti in fabbrica e vengono utilizzati come materiale prefabbricato per pavimenti, coperture, pareti per qualsiasi tipologia di edificio, che sia residenziale o commerciale. I connettori, dispositivi di fissaggio e adesivi sono forniti dai produttori di pannelli.

Kermani [21] afferma che vi sono due metodi principali di fabbricazione dei pannelli:

1) Un adesivo strutturale viene applicato su un nucleo di schiuma pretagliato e il nucleo viene pressato a freddo tra due rivestimenti fino a quando l'adesivo non è indurito o la schiuma non indurisce per legare i rivestimenti (polimerizzazione);
2) La schiuma viene versata tra i due rivestimenti, previa disposizione degli spazi, per poi indurire e legarsi ai rivestimenti.

I pannelli sono realizzati in diverse dimensioni e spessori in base all'applicazione e ai requisiti termici o strutturali. Ovviamente, il processo produttivo riveste una particolare influenza sulla rigidezza e resistenza del pannello, quindi è essenziale che l'incollaggio avvenga a regola d'arte, per evitare che vi siano slittamenti o distaccamenti dei rivestimenti dal nucleo interno. Allo stesso modo, il metodo di realizzazione e le connessioni influiscono molto sulla resistenza finale dei componenti.

I SIP prefabbricati possono far risparmiare ai costruttori una notevole quantità di lavoro in loco; questi sono già pronti per l'installazione quando arrivano in cantiere, eliminando la necessità di eseguire le singole operazioni di intelaiatura, isolamento e rivestimento necessarie invece nelle strutture a telaio. Le aperture per le finestre potrebbero essere già pretagliate nel pannello.

Solitamente i pannelli vengono movimentati “a mano” (Figura 18) e collegati tra loro per formare pareti e tetti mediante l’utilizzo di elementi “spline”.

Figura 18 - Montaggio pannelli SIP

Per il mercato delle abitazioni “su misura”, i SIPs offrono un prodotto all'avanguardia in grado di fornire una grande varietà di elementi progettati su misura, creando una struttura solida ed efficiente dal punto di vista energetico (Figura 19). I SIP devono una parte della loro nascente popolarità al rinnovato interesse per le strutture in legno. I SIP sono anche una scelta ampiamente usata per le scuole che desiderano ridurre i costi energetici e creare un ambiente interno salubre per gli studenti [22].

Figura 19 - Esempi realizzazioni in SIP

Dal punto di vista progettuale e realizzativo, il SIP presenta delle considerazioni uniche rispetto alle altre tipologie costruttive. La realizzazione della fondazione, solitamente a platea (Figura 20), riveste una particolare importanza. I SIP possono essere modificati in loco per adattarsi a fondazioni fuori squadro o non livellate, ma questo processo può risultare laborioso e penalizzante per la capacità di tenuta all'aria delle pareti.

Figura 20 - Fondazione a platea per SIP

In testa ed alla base dei pannelli strutturali vengono posti degli elementi in legno, solitamente tavole in legno di abete rosso (Figura 21), aventi uno spessore coincidente con il nucleo isolante.

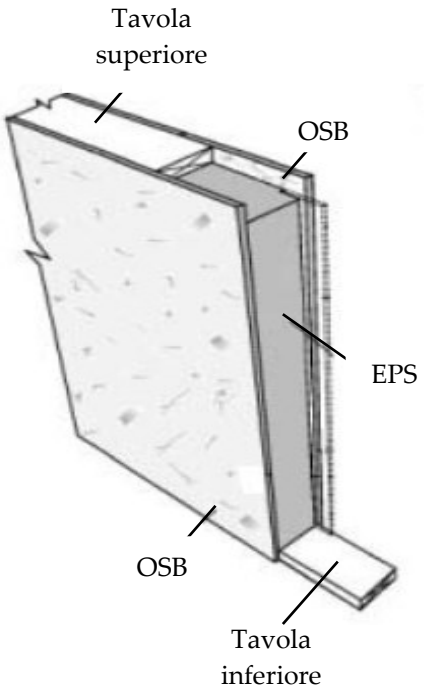


Figura 21 - Componenti SIP

Questi vengono connessi al pannello mediante l'utilizzo di adesivi strutturali e fissaggi meccanici ad intervalli regolari e solitamente sono continui per tutta la lunghezza della parete (Figura 22), fino ad un massimo di 4,8 m.

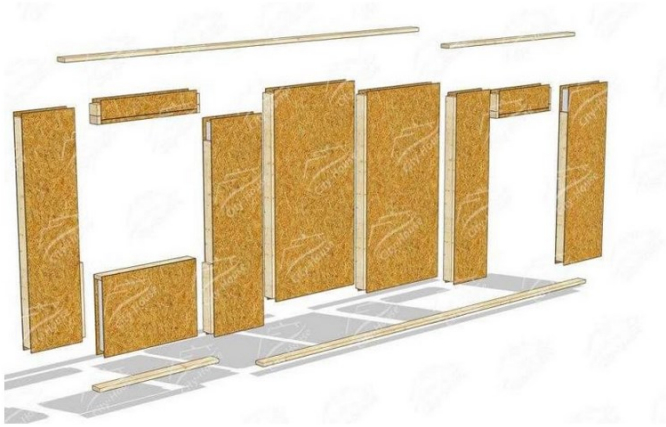


Figura 22 - Disposizione tavole in legno

Kermani [21] studiando l'impatto dei due elementi di chiusura sulle prestazioni strutturali del pannello, ha rivelato che i due elementi potrebbero influire positivamente sulle prestazioni del pannello SIP, conferendo a quest'ultimo una maggiore resistenza.

La connessione tra i pannelli SIP e la fondazione avviene mediante l'inserimento di un ulteriore elemento in legno (solitamente in larice), di spessore maggiore o uguale allo spessore del pannello. Questo funge da cordolo di base, permettendo il collegamento tra la fondazione in c.a. ed i panelli. Il collegamento del cordolo in legno alla fondazione in c.a. avviene mediante ancoraggio chimico (Figura 23).

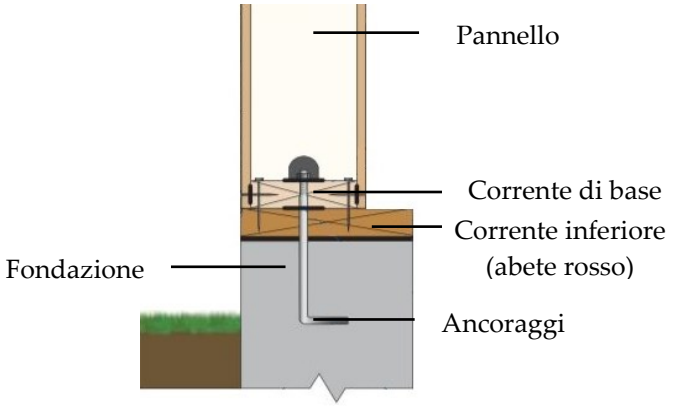


Figura 23 - Collegamento fondazione SIP

La connessione delle pareti alla fondazione deve essere adeguatamente progettata per garantire la durabilità del legno nei confronti dell'umidità. Il degrado dovuto alla risalita dell'umidità nelle pareti in legno viene evitato realizzando un cordolo in calcestruzzo per garantire una distanza sufficiente tra la base della parete ed il livello della fondazione. Inoltre, tra la parete ed il cordolo viene interposto uno strato di impermeabilizzazione, solitamente in guaina impermeabile e traspirante, che grazie alle sue proprietà permette di far fuori uscire il vapore evitando l'ingresso di molecole d'acqua più gradi di quelle di vapore.

2.2.5 Vantaggi e svantaggi SIP

L'utilizzo di pannelli SIP presenta numerosi vantaggi come l'agevole e rapida installazione, resistenza, leggerezza, economicità e risparmio energetico elevato. Le differenti parti di un edificio come montanti, barriere al vapore e isolamento possono essere sostituite nei pannelli SIP. Pertanto, il telaio in legno utilizzato per i pannelli SIP necessita di minor manodopera rispetto ad un sistema tradizionale quale Platform frame.

Grazie al nucleo in EPS (o altro materiale), i pannelli coibentati strutturali SIP forniscono prestazioni termiche elevate in tutta la struttura, garantendo uniformità nel riscaldamento e riducendone i costi da esso derivanti.

Inoltre, il collegamento tra i pannelli con spline SIP isolata forniscono un nucleo continuo in EPS tra le pareti e il tetto dell'edificio. Ciò migliora notevolmente l'efficienza termica dell'edificio rispetto alla tecnologia a montanti legno e all'isolamento delle cavità.

I pannelli vengono prodotti in fabbrica in un ambiente controllato a differenza degli edifici tradizionali prodotti interamente "on-site". L'industria dei pannelli generalmente facilita il processo di costruzione e lo rende più controllabile, sistematico e più veloce[23].

Kermani [21] ha dichiarato che per quanto riguarda la durabilità, non è stato effettuato alcun test a lungo termine ma, ci sono stati alcuni edifici SIP negli Stati Uniti che sono stati utilizzati per 50 anni. Milner [24] ha affermato che un SIP o un pannello di qualità potrebbe deteriorarsi o rompersi qualora non sia stato costruito adeguatamente.

L'interessante progetto pilota è stato lanciato dalla Structural Insulated Panel Association (SIPA) in collaborazione con l'Oak Ridge National Laboratory

(ORNL) nella costruzione di quattro edifici di ricerca "net-zero energy" finalizzati alla conferma della tenuta ed efficienza energetica delle case costruite con prodotti SIP. SIPA ha dichiarato che c'è una relazione diretta tra ermeticità e durata. Una parte fondamentale dell'edificio SIP riguarda l'appropriata sigillatura giunti, i quali devono essere correttamente sigillati per evitare la formazione di umidità ed infiltrazioni d'aria.

L'efficienza energetica del SIP è notevolmente superiore rispetto ad un sistema comune tipo platform frame, grazie alle proprietà isolanti della schiuma nel nucleo.

Inoltre, la riduzione del numero dei montanti del telaio provoca un miglioramento significativo dei pannelli, dato che questi possono fungere da "ponte termico"[25] .

I pannelli SIP sono altamente efficienti dal punto di vista energetico. Tale caratteristica è strettamente legata dalla resistenza termica del materiale. I valori di resistenza termica dei pannelli SIP dipendono sia dal tipo di nucleo isolante che dal suo spessore e, in generale, i valori di resistenza per un edificio costruito in pannelli SIP sono molto più alti rispetto a quelli delle costruzioni convenzionali.

Il sistema costruttivo a pannelli SIP ha avuto una rapida crescita negli Stati Uniti, ma è stato utilizzato solamente l'1% nelle nuove case. Nel 2004 e 2005 si ha avuto un incremento rispettivamente del 10% e 23%. Mullens et al. [26] affermano che diversi fattori limitano la crescita dei SIP, il più importante è probabilmente che la costruzione platform frame è meno costosa rispetto ad una con pannelli SIP.

Le proprietà sfavorevoli dei pannelli sandwich possono essere le seguenti:

- Creep sotto carico continuo con nucleo in schiuma rigida;

- Deformazione quando un lato del rivestimento è esposto ad elevate temperature;
- Scarsa resistenza al fuoco con nucleo in schiuma di plastica rigida.

Per i sistemi SIP è stato effettuato un test per il collaudo al fuoco. Così, i produttori in tutto il Nord America hanno stabilito quali sono le prestazioni minime anti-incendio del sistema SIP. E' stata pubblicata la documentazione relativa alle prestazioni minime del sistema SIP sulla base dei risultati ottenuti dal test di prova di tipo distruttivo. I SIP sono stati approvati dagli standard nazionali americani come ASTM E-119 e ASTM E-84 [21]. Tuttavia, la maggior parte degli edifici composti da più di tre piani sono soggetti a differenti regolamenti per via dei carichi imposti alle pareti ed ai sistemi di pavimentazione.

Le schiume di EPS e Uretano (il principale materiale del nucleo) non sono infiammabili, ma bruciano se esposti alla fiamma. Quindi, l'uso di questi materiali nei grattacieli o nei grandi edifici pubblici è limitato, a meno che non si utilizzi un'ampia tecnologia di soppressione del fuoco.

2.3 Sistema costruttivo Platform Frame

Il "PLATFORM FRAME" è ad oggi il sistema costruttivo più diffuso, utilizzato ed affidabile in Italia, in Europa e nel mondo. Riconosciuto come efficace ed efficiente metodo di costruzione per edifici a più piani, è ampiamente utilizzato nelle abitazioni residenziali.

2.3.1 Storia del Platform Frame

Il primo sistema costruttivo ad ossatura lignea che nasce nel 1800 è il "balloon frame" (struttura a pallone). Tale sistema fu brevettato da G.W.Show nel 1833 e consisteva nell'impiego di montanti, dell'altezza di due piani, senza interruzioni dal terreno al tetto di copertura.

Si riscontrò che i montanti, prima impiegati soltanto per sostenere il rivestimento dell'edificio, avrebbero potuto sostenere il carico del tetto qualora si fossero inchiodate delle assi alla loro sommità. Infatti, il sistema BF prevedeva che i montanti fossero collocati a una distanza di 45 cm l'uno dall'altro.

Ciò permise di eliminare le pesanti travi intelaiate della struttura portante evitando inoltre incastri, intagli e altri lavori di messa in opera, poiché tutto il legname necessario veniva connesso mediante chiodatura.

La prima costruzione con questo metodo si sperimentò nel 1833 con la realizzazione di una chiesa e successivamente si diffuse in tutto il Paese. Con l'impiego di montanti lunghi e leggeri si riusciva a sostenere, oltre al tetto, anche il piano superiore.

I montanti arrivavano già tagliati e numerati dalla segheria, consentendo ad una persona di costruire da sola e rapidamente la propria casa.

Verso la fine del XVIII sec. gli architetti e i carpentieri americani raggiunsero notevoli livelli di disegno, progettazione ed esecuzione e, con la scoperta dei chiodi in serie, la costruzione di questi edifici divenne sempre più ricercata.

Il sistema "Balloon Frame" fu successivamente perfezionato, fino a quando, intorno agli anni 20-30 del secolo scorso, fu completamente sostituito dal "Platform Frame" (Figura 24).

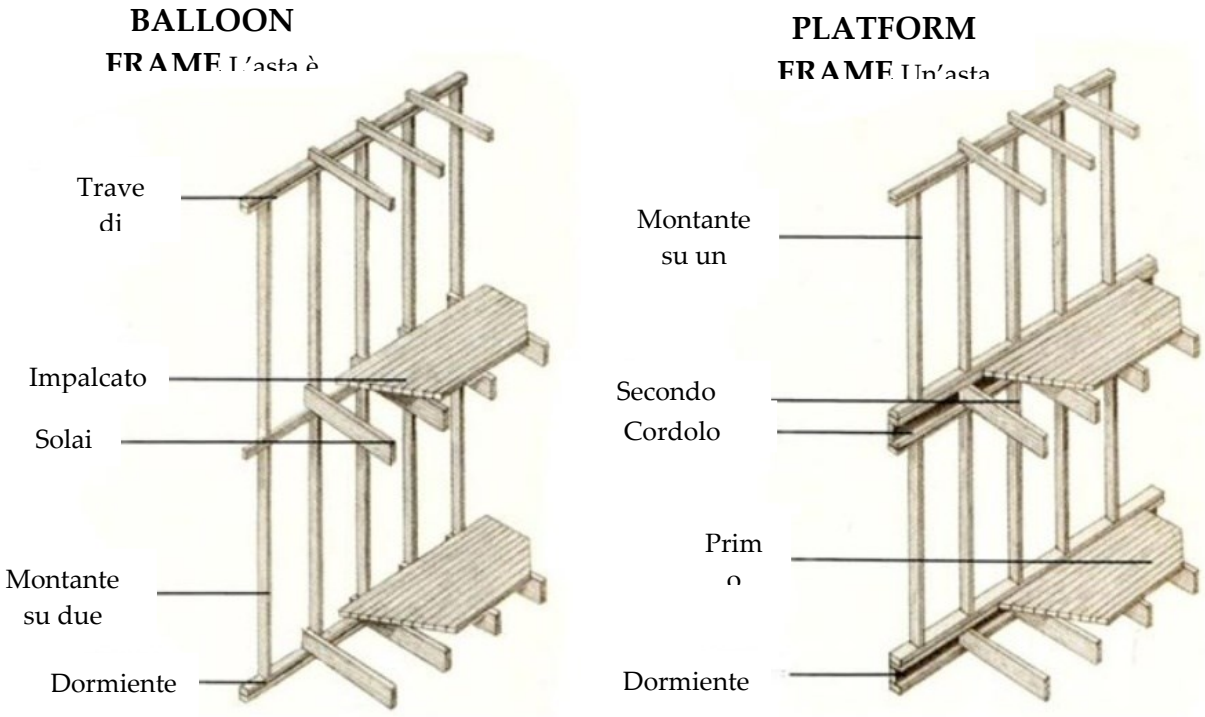


Figura 24 - Balloon Frame e Platform Frame

Ad oggi viene molto utilizzato per le proprie caratteristiche tecniche e di eco-sostenibilità.

2.4 Platform Frame

Il sistema Platform Frame, detto anche a "telaio leggero" o "telaio a maglia stretta", si caratterizza per l'utilizzo di pareti formate da montanti e correnti di piccola sezione tenuti insieme da pannelli laterali di controventamento.

In particolare, le pareti sono costituite da telai in legno lamellare irrigiditi mediante pannelli in OSB3 (Oriented Strand Board) o gessofibra. Questi vengono fissati al telaio mediante chiodi o viti posti ad un opportuno interesse, generalmente ridotto (Figura 25).

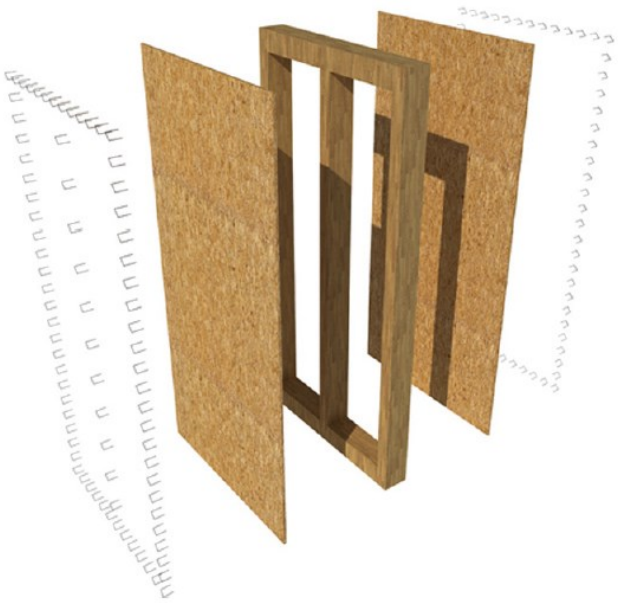


Figura 25 -Sistema Platform Frame

I pannelli sono composti da una serie pilastri posti verticalmente ad un interasse inferiore ai 60 cm ai quali viene interposto il materiale isolante (Lana di roccia, fibra di legno, canapa ecc.); tali pilastri sono collegati con opportune piastre metalliche alla base ed in sommità ad elementi in legno lamellare di pari larghezza ed altezza opportunamente dimensionata a seconda delle necessità statiche e costruttive.

Mediante l'inserimento di irrigidimenti interni ed esterni è garantito il controventamento verticale necessario a tutta la struttura.

Le pareti perimetrali, soggette a continui scambi termo igrometrici tra gli ambienti interni dell'abitazione con l'ambiente esterno, vengono protette su entrambi i lati con opportune membrane con caratteristiche di limitare e/o annullare il passaggio di vapore garantendo in tale maniera il mantenimento ottimale delle condizioni igrometrie di esercizio sia del legno che del materiale isolante.

2.4.1 Componenti Platform Frame

2.4.1.1 Rivestimento Esterno

Il rivestimento esterno generalmente è costituito da pannelli a base di legno quali OSB (EN 300), pannelli di compensato (EN 636) o altri elementi strutturali a sviluppo superficiale in grado di assicurare la necessaria resistenza e rigidezza a taglio nel piano della parete (ad esempio il gesso fibra secondo EN15283-2).

Questo può essere posto su di un lato o su ambedue i lati della parete, in ogni caso deve essere collegato in corrispondenza di tutti i bordi verticali e orizzontali di montanti e traversi mediante chiodi o cambrette. Nel caso in cui il foglio di rivestimento abbia un'altezza inferiore all'interpiano ed i bordi orizzontali non raggiungano i traversi, devono essere previsti dei traversi aggiuntivi disposti fra i montanti sui quali poter fissare i pannelli.

Sono state effettuate diverse ricerche sperimentali per indagare il comportamento dei sistemi leggeri in legno sottoposti a carichi orizzontali, variando connessioni, guaine e rivestimenti[27]. Da queste si è rivelato che il materiale di rivestimento, rispetto agli altri componenti, possiede una maggiore influenza sul comportamento della parete.

Alcuni autori hanno dimostrato che l'inserimento del pannello in OSB, sia nel lato interno che esterno del telaio, conferisce una elevata rigidezza e resistenza alla deformazione[28]. Differentemente, i pannelli in fibra di gesso hanno fornito scarsi risultati durante test ciclici [29][30].

Per questo motivo, i pannelli OSB risultano essere quelli più comunemente utilizzati, infatti sono stati oggetto della sperimentazione.

L'OSB (Oriented Strand Board) è un pannello a base di legno, prodotto da risorse forestali sostenibili (Forestry, 2010), che non soffre di alcun difetto tipico dei blocchi in legno, come ad esempio nodi, smussature, torsioni (Lyons 2010).

Solitamente l'OSB è composto di tre strati di trucioli di legno, prevalentemente lunghi e stretti, che vengono legati insieme da una resina sintetica mediante pressatura a caldo per poi essere tagliati ad ottenere le dimensioni richieste (Figura 26).

Figura 26 - Oriented Strand Board

Le tipiche dimensioni dell'OSB sono 2400 x 1200 mm, 3600 x 1200 mm con spessori variabili tra 6, 8, 9, 11, 15, 18, 22, 28 e 38 mm (Dinwoodie e Enjily, 2003).

Inoltre, i pannelli OSB non sono tutti uguali. Secondo la normativa UNI EN300:2006 ne esistono di diverse tipologie, che si differenziano per caratteristiche e impieghi:

- I pannelli OSB/1 sono i più comuni e generici. Questi vengono utilizzati in ambienti asciutti, per realizzare prevalentemente complementi d'arredo;
- I *pannelli OSB/2*, invece, sono più resistenti e con maggiori capacità portanti. Vengono utilizzati in ambienti secchi, generalmente per allestimenti fieristici;
- I *pannelli OSB/3* sono simili ai 2 per composizione, ma a differenza loro sono adatti ad un uso strutturale in ambienti umidi;
- I *pannelli OSB/4* sono ancora più resistenti dei 3 e vengono utilizzati in ambienti umidi con funzioni strutturali.

In generale l'OSB, indipendentemente dalla tipologia, vanta delle proprietà di versatilità, resistenza, costo contenuto e sostenibilità ambientale, caratteristiche che lo rendono candidato ideale per le costruzioni in bioedilizia.

2.4.1.2 Nucleo Isolante

Il sistema costruttivo Platform Frame prevede il posizionamento di uno strato isolante all'interno dell'intercapedine dell'intelaiatura. Questo può occupare tutto lo spessore oppure una sola parte lasciando una intercapedine per il posizionamento degli impianti.

Lo strato isolante, in funzione delle esigenze, può essere scelto di diverse tipologie quali lana di roccia, fibra di legno, fibra di canapa o anche sughero

(Figura 27).

Figura 27 – Tipologie isolanti

Nella presente sperimentazione si è scelto un isolante in lana di roccia. La lana di roccia è uno dei materiali isolanti più utilizzato in edilizia. Per via delle sue origini naturali e della sua ecocompatibilità, questa comunemente impiegata nelle costruzioni in legno.

La lana di roccia è ottenuta da rocce eruttive diabasiche, basaltiche, dolomie addittivate con collanti. Oltre ad essere un materiale naturale e ad avere un'ottima capacità di isolamento termico, la lana di roccia è anche un buon materiale fonoassorbente.

Questo isolante non assorbe né acqua né umidità, ed ha inoltre un ottimo comportamento al fuoco in quanto non contribuisce né allo sviluppo né alla propagazione di incendi.

2.4.2.3 Telaio in Legno

Il sistema Platform Frame è caratterizzato da pareti interne ed esterne costituite da telai portanti composti da montanti verticali in legno massiccio di sezione piuttosto piccola, disposti parallelamente tra loro e ad interasse costante e relativamente ridotto. Quest'ultimo generalmente è inferiore ai 60 cm ed è comunque sottomultiplo della larghezza del pannello di rivestimento. Ad essi è assegnato il compito di assorbire i carichi verticali di compressione provenienti dalla copertura e dai solai di interpiano, assumendo quindi la funzione di pilastro nelle pareti. Grazie alla funzione stabilizzante del rivestimento di chiusura, i montanti possono avere snellezza molto elevata. Il telaio è completato da un corrente superiore e da uno inferiore aventi generalmente uguale sezione, i quali vengono fissati ai montanti con degli elementi angolari al fine di creare un sistema solidale (Figura 28).

Figura 28 - Telaio in Legno

Le pareti sono infine collegate tra di loro da un ulteriore corrente superiore al quale viene affidata la funzione di cordolo di collegamento. I vuoti tra un montante e l'altro vengono riempiti con materiale isolante prima della chiusura della parete sul lato esterno.

2.4.2.4 Fissaggi

Nel sistema costruttivo Platform Frame gli elementi in legno orizzontali e verticali che costituiscono l'intelaiatura, sono collegati tramite connettori a gambo cilindrico come chiodi, cambrette e bulloni posti ad opportuno interasse.

Le giunzioni dei pannelli a base di legno (OSB) o gesso vengono anch'essi connessi ai montanti in legno mediante avvitatura (Figura 29).

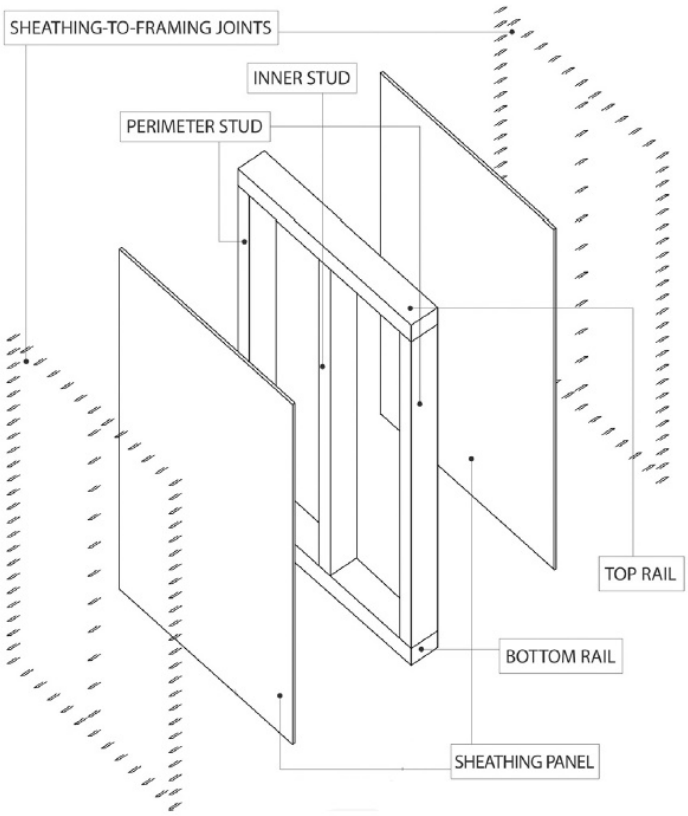


Figura 29 - Fissaggi

2.4.2 Finiture Platform Frame

Le pareti Platform Frame presentano una parte strutturale (Figura 30) composta da elementi lineari in legno di abete. Questa si completa con l'inserimento di pannelli di materiale isolante e la chiusura mediante il placcaggio del telaio con pannelli in legno tipo OSB.

Figura 30 - Parete strutturale

La parte strutturale si completa, sia nel lato interno che esterno, accoppiando diverse tecnologie e tipologie costruttive sulla base di accurate scelte progettuali.

2.4.2.1 Finiture Esterne

Nel sistema Platform Frame i rivestimenti esterni di facciata possono essere realizzati con diverse tecnologie e materiali. La scelta può ricadere tra le tipologie di seguito riportate:

1) Facciata *tradizionale* ad *intonaco* (Figura 31Figura 10), avendo predisposto uno strato di isolante a cappotto direttamente a contatto con il pannello in OSB;

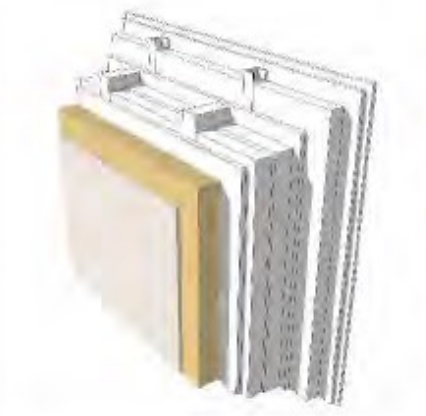


Figura 31 - Rivestimento ad intonaco

2) Facciata *ventilata* rivestita con *doghe in legno* (Figura 32) istallate mediante l'utilizzo di montanti direttamente fissati all'isolante a cappotto;

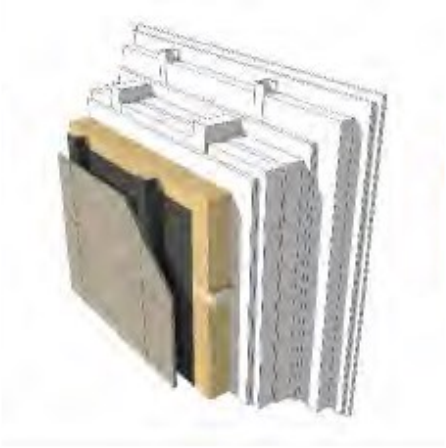


Figura 32 - Rivestimento con doghe in legno

3) Facciata *ventilata* rivestita con *pannelli di fibrocemento* (Figura 33) istallate mediante l'utilizzo di montanti direttamente fissati all'isolante a cappotto.

Figura 33 - Rivestimento con pannelli di fibrocemento

2.4.2.1 Finiture Interne

Le pareti internamente vengono completate con la realizzazione di un vano tecnico coibentato, all'interno del quale vengono inserite le canalizzazioni impiantistiche. Il rivestimento può essere essenzialmente di due tipologie:

1) Rivestimento con *pannelli in fibrogesso* (Figura 34), che possono essere ancorati direttamente allo strato isolante o mediante montanti al rivestimento in OSB;

Figura 34 - Rivestimento con pannelli in fibrogesso

2) Rivestimento con *perline in legno* (Figura 35), che possono essere ancorati direttamente allo strato isolante o mediante montanti al rivestimento in OSB.

Figura 35 - Rivestimento con perline in legno

2.4.3 Costruzione e montaggio Platform Frame

Nel sistema Platform Frame le pareti in legno arrivano in cantiere già tagliate secondo le dimensioni richieste e sono pronte per il montaggio. Questo avviene a seguito della realizzazione di una platea di fondazione in cemento armato su cui andranno posizionate e fissate le travi radice che serviranno da ancoraggio per le pareti.

Il vantaggio di questo sistema risiede proprio nella totale capacità di prefabbricazione. Le pareti vengono realizzate in fabbrica come assemblaggio di montanti e traversi, racchiusi da due pannelli di rivestimento (solitamente OSB) ed un nucleo isolante interno. Vengono portate in cantiere da un camion e, sulla base delle indicazioni di montaggio definite dall'ufficio tecnico, vengono scaricate e posizionate nell'esatto ordine in cui andranno montate. La posa in opera avviene per step (Figura 36Figura 36), partendo dalle pareti e dal solaio superiore, proseguendo man mano con i livelli successivi, mediante l'ausilio di autogrù.

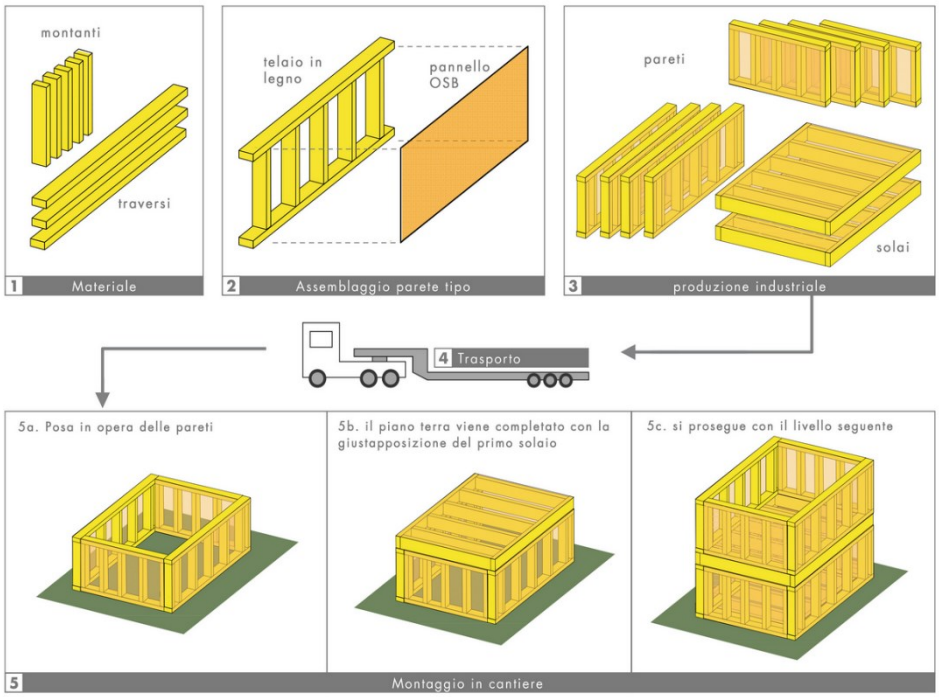


Figura 36 - Fasi di montaggio

Per la movimentazione, se l'edificio non è eccessivamente elevato (non supera i due piani), solitamente si utilizzano camion grù (Figura 37) in grado di movimentare e posizionare le pareti direttamente in loco, senza dover utilizzare una grù ancorata a terra che porterebbe ad un aumento sia dei tempi che dei costi.

Figura 37 - Movimentazione pareti

Il sistema costruttivo Platform Frame permette di realizzare case ed edifici fino a quattro piani di altezza, fondati su una platea in calcestruzzo armato (Figura 38) o, in alternativa, su un piano scantinato con pareti in calcestruzzo armato, coperto da un orizzontamento di laterocemento o di legno.

Figura 38 – Platea di fonazione con cordolo in c.a.

Sulla fondazione sono costruite le pareti, realizzate come elementi compositi la cui ossatura portante è costituita da montanti verticali in legno massiccio di sezione piuttosto piccola, disposti parallelamente tra loro e ad interasse costante e relativamente ridotto; generalmente tale interasse varia tra i 55 ed i 70 cm ed è comunque sottomultiplo della larghezza del pannello di rivestimento. Ad essi è assegnato il compito di assorbire i carichi verticali di compressione provenienti dalla copertura e dai solai di interpiano, assumendo quindi la funzione di pilastro nelle pareti. I montanti possono avere snellezza molto elevata, avendo il rivestimento una funzione stabilizzante. Il telaio è completato da un corrente superiore e da uno inferiore aventi generalmente uguale sezione, i quali vengono fissati ai montanti con degli elementi angolari al fine di creare un sistema solidale (Figura 39). Le pareti sono infine collegate tra di loro da un ulteriore corrente superiore al quale viene affidata la funzione di cordolo di collegamento [31].

Figura 39 - Collegamento corrente inferiore

Il collegamento tra fondazione e parete deve svolgere il duplice compito di contrastare il ribaltamento (e quindi il sollevamento della parete) ed allo stesso tempo evitare lo scorrimento delle pareti. Per questo motivo vengono utilizzate differenti piastre di collegamento (Figura 40).

Figura 40 - Piastre di collegamento

In particolare, si utilizzano piastre angolari allungate, dette *holdown*, collegate alle fondazioni con barre filettate inserite in fori sigillati con malta cementizia o epossidica e ai montanti con chiodi o viti. Lo slittamento viene impedito sempre con *tirafondi* di ancoraggio che collegano il corrente inferiore della parete alla fondazione [31].

Le connessioni metalliche possono essere applicate mediante viti o tramite chiodatura, utilizzando chiodi ANKER il cui numero viene valutato mediante un software progettuale, e posizionate lungo tutto il perimetro su ambo i lati della parete.

Di solito il pannello non viene posizionato direttamente sulla fondazione ma è posto al di sopra di un elemento intermedio in legno chiamato "radice o dormiente" che ha la funzione di creare una base di supporto più uniforme. Lo svantaggio di questo tipo di connessione risiede nell'elevato numero di viti necessarie per garantire la connessione. Una tecnologia che risolve parzialmente questo problema è il sistema "Alufoot", che prevede la sostituzione del dormiente in legno con una scatolata in alluminio, che presenta una scanalatura sui bordi dove vengono inserite le piastre di collegamento. La scatola è ancorata alla fondazione con bulloni; il pannello viene quindi posizionato in alto e ancorato mediante piastre, in questo caso lineari. Il numero di viti utilizzate si

riduce rispetto al dormiente in legno, ma non in modo significativo. La scatola in alluminio garantisce una buona tenuta all'acqua ma aumenta la trasmissione del calore [32].

La connessione delle pareti alla fondazione deve essere adeguatamente progettata per garantire la durabilità del legno nei confronti dell'umidità. Il degrado dovuto alla risalita dell'umidità nelle pareti in legno viene evitato realizzando un cordolo in calcestruzzo per garantire una distanza sufficiente tra la base della parete ed il livello della fondazione. Inoltre, tra la parete ed il cordolo viene interposto uno strato di impermeabilizzazione (Figura 41), solitamente in guaina impermeabile e traspirante, che grazie alle sue proprietà permette di far fuori uscire il vapore evitando l'ingresso di molecole d'acqua più gradi di quelle di vapore.

Figura 41 - Impermeabilizzazione fondazione

La realizzazione dei solai si esegue con travi in legno lamellare (in appoggio alle pareti) poste ad interasse variabile a seconda della luce. Al di sopra delle travi viene posato un doppio strato di perlinato che, insieme alla copertura, conferiscono il controventamento di piano della struttura in legno. Superiormente si realizzano impianti, massetti in cls e la pavimentazione finale.

I solai di copertura vengono solitamente realizzati con la tecnologia cosiddetta "ventilata" e sono composti da un'orditura di travi in legno e perlinato sovrastante sulla quale viene posata una listellatura ulteriore per il supporto della camera di ventilazione. La copertura sarà opportunamente isolata e protetta sia inferiormente che superiormente con teli di protezione al vapore e, la camera di ventilazione sarà completata mediante rivestimento in OSB, guaina impermeabile e manto di copertura in tegole o coppi.

Il sistema Platform Frame permette quindi di realizzare edifici che presentano un aspetto tipico degli edifici tradizionali, sia internamente che esternamente (Figura 42).

Figura 42- Subissati S.r.l: Esempio edifico realizzato in Platform Frame

2.4.4 Vantaggi e svantaggi Platform Frame

Il sistema Platform Frame risulta essere il sistema costruttivo in legno più diffuso al mondo. Le pareti e i solai che lo compongono sono costituiti da intelaiature di elementi in legno di piccole dimensioni collegati, in uno o ambo i lati, da pannelli in legno strutturale tipo OSB.

La tecnologia costruttiva si caratterizza per la sua leggerezza e ridondanza strutturale. I carichi verticali provenienti dalla copertura e dai solai di piano sono assorbiti dai montanti. I montanti delle pareti esterne assorbono anche i carichi orizzontali dovuti al vento agenti sulle pareti stesse e sono generalmente molto snelli per via della funzione stabilizzante offerta da rivestimento strutturale.

Oltre a quanto detto sopra, il Platform Frame vanta di una elevata pre-fabbricabilità dei componenti a diversi livelli e di conseguenza un contenimento dei tempi di costruzione e cantierizzazione. Inoltre, il vantaggio di operare con elementi prefabbricati risiede nella possibilità di evitare sprechi di materiale e quindi di ridurre i costi relativi al materiale stesso.

L'estrema leggerezza dei materiali permette una maggiore flessibilità in fase di posa in opera, evitando l'uso di autogrù ancorata a terra per la movimentazione degli elementi.

Il sistema Platform Frame offre una eccellente prestazione antisismica in quanto la statica dell'edificio è scaricata su tutto lo scheletro in legno che assorbe in modo uniforme le sollecitazioni. Inoltre, la presenza di un nucleo isolante interposto tra i montanti e traversi, permette di ridurre lo spessore del cappotto esterno, rispetto ad altri sistemi costruttivi, in quanto già coibentato nella struttura portante.

La tecnologia Platform Frame risulta essere vantaggiosa anche dal punto di vista energetico. Grazie alla possibilità di rivestire il telaio con varie finiture (sia internamente che esternamente), a seconda delle esigenze e prestazioni desiderate, il pacchetto viene studiato come un unico elemento facendo sì che il punto di condensa possa trovarsi al di fuori della stratigrafia. Inoltre, la riduzione dei ponti termici e l'elevata classe energetica fanno sì che questa tecnologia possa essere considerata più vantaggiosa rispetto alle altre.

Un ulteriore vantaggio sta nell'elevata prestazione antincendio, infatti il legno, pessimo conduttore di calore, brucia molto lentamente ed in modo del tutto prevedibile attraverso la carbonizzazione dello strato esterno, che protegge le sezioni più interne del materiale ed assicura una capacità di portata prolungata, contrariamente a quanto accade per esempio per l'acciaio. L'isolamento in lana di roccia nell'intercapedine genera numerosi vantaggi in termini di isolamento termico, sia per il caldo che per il freddo, grazie alla sua struttura interna che permette di incamerare aria, senza trasferire calore. Per lo stesso motivo risulta essere ottimo per filtrare i rumori, mentre l'elevato punto di fusione (oltre i 1000 gradi) lo rende un perfetto materiale ignifugo.

Le caratteristiche del platform frame, la sua duttilità e le elevate performance energetiche ne fanno sicuramente il sistema costruttivo ideale per case in legno mono e plurifamiliari, ad uno o più piani.

3 CAMPIONI DI INDAGINE

Nel presente capitolo si specificano nel dettaglio i campioni SIP e Platform Frame oggetto della sperimentazione ed i materiali utilizzati per la realizzazione degli stessi. Si specifica che le pareti SIP con connessione Surface Spline e connessione di tipo R sono stati analizzati solamente a livello analitico.

3.1 SIP

I campioni SIP utilizzati nello studio sperimentale sono stati prodotti dalla Isosystem SRL di Treviso e assemblati in laboratorio in una precedente sperimentazione strutturale. Sono stati preparati quattro differenti campioni divisibili in due categorie principali:

- Campioni *senza finiture (NF),* comprendente un campione con connessione Block Spline (SIP2) ed uno senza (SIP1);
- Campioni *con finiture (F),* comprendente un campione con connessione Block Spline (SIP2) ed uno senza (SIP1).

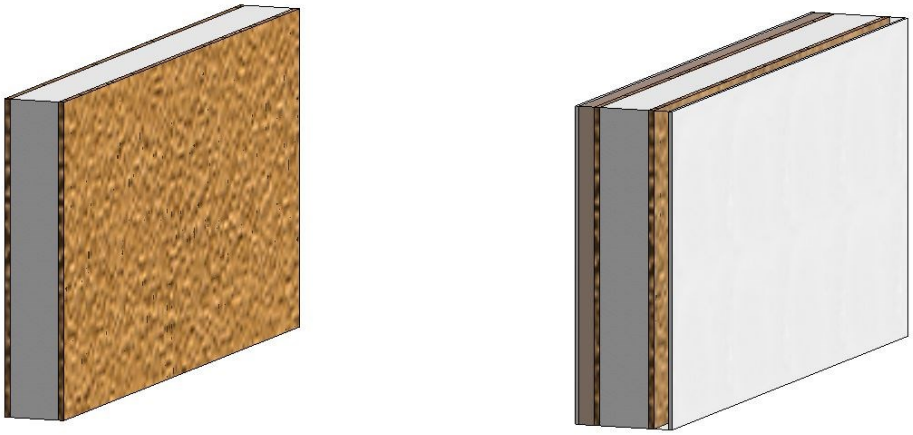


Figura 43 - SIP: Campioni NF ed F

Tutti i campioni da testare sono il risultato dell'assemblaggio di pannelli SIP, composti da due rivestimenti in OSB/3 di 1200 mm di altezza e 600 mm di larghezza, con un nucleo coibentato in EPS ed un telaio in legno costituito da tavole in legno di abete. In Tabella 1 - Campioni SIP testati Tabella 1 si riportano i campioni SIP testati con la nomenclatura utilizzata e le relative caratteristiche geometriche.

Categoria	N° di campioni	Denominazione campioni	Dimensione pannelli l x w x t [mm]	Pannelli con connessione	Spessore rivestimenti [mm]
Senza finiture	2	SIP1-NF SIP2-NF	1200 x 1200 x 170	NO SI	15
Con finiture	2	SIP1-F SIP2-F	1200 x 1200 x 170	NO SI	15

Tabella 1 - Campioni SIP testati

3.1.1 SIP senza finiture

Come già specificato, i campioni *senza finiture* utilizzati nella presente sperimentazione sono frutto dell'assemblaggio di pannelli SIP. Questi sono stati prodotti dalla Isosystem SRL in due differenti modi. In particolare, è stato prodotto un pannello omogeno privo di connessione interna (SIP1-NF), ed un altro avente una connessione di tipo Block Spline (SIP2-NF) (Figura 44).

Entrambi i pannelli presentavano un incastro di tipo "*femmina*" sui 4 lati, in modo da poter essere "incorniciato" con un telaio in legno. Tale configurazione è quella che viene utilizzata principalmente nelle costruzioni reali in SIP dove i pannelli sono quasi sempre incorniciati ai lati e fissati alle fondazioni (indirettamente) utilizzando un cordolo in legno cosiddetto "dormiente".

Figura 44 - Campioni con e senza Block Spline

Le Figure Figura 45 - Campione SIP1-NF e Figura 46 illustrano le dimensioni ed i particolari costruttivi dei due campioni oggetto di sperimentazione, mentre le Figure Figura 47 e Figura 48 raffigurano le due pareti analizzate esclusivamente in via analitica.

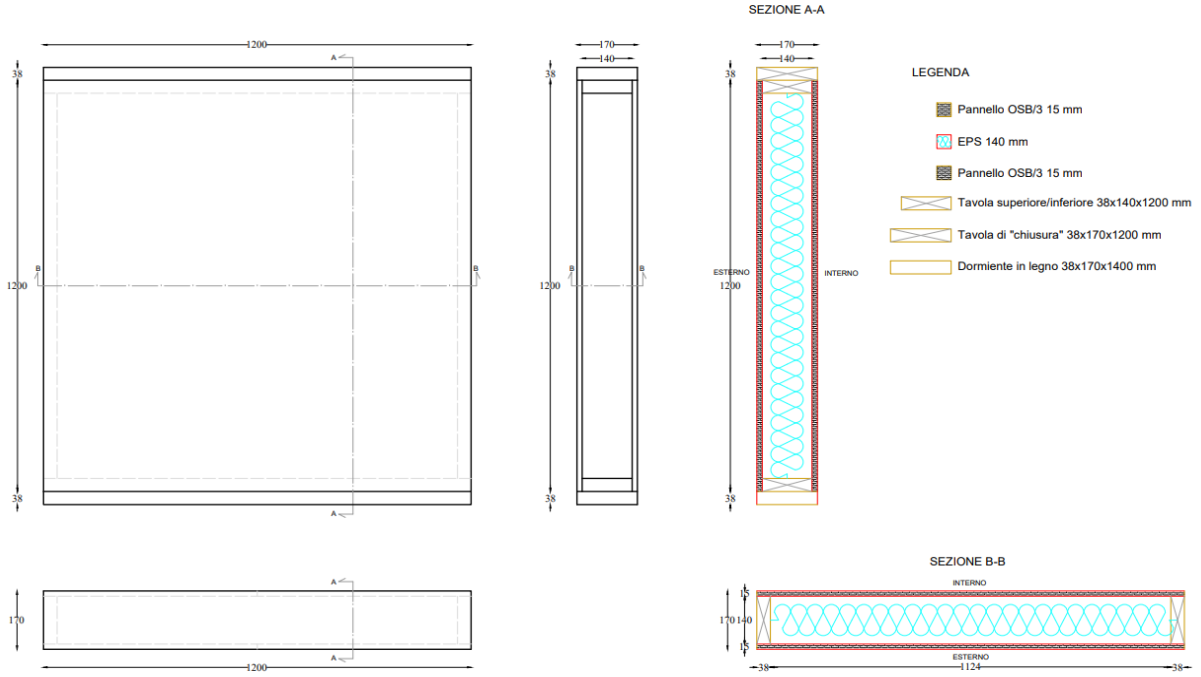


Figura 45 - Campione SIP1-NF

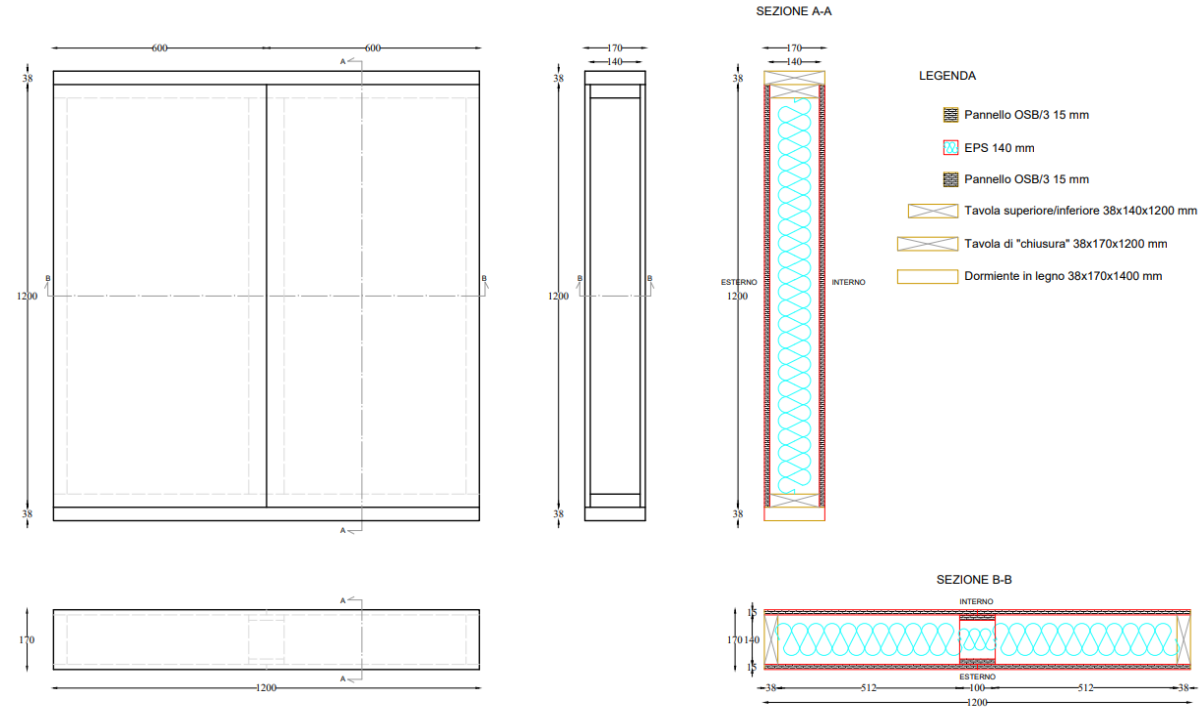


Figura 46 - Campione SIP2-NF

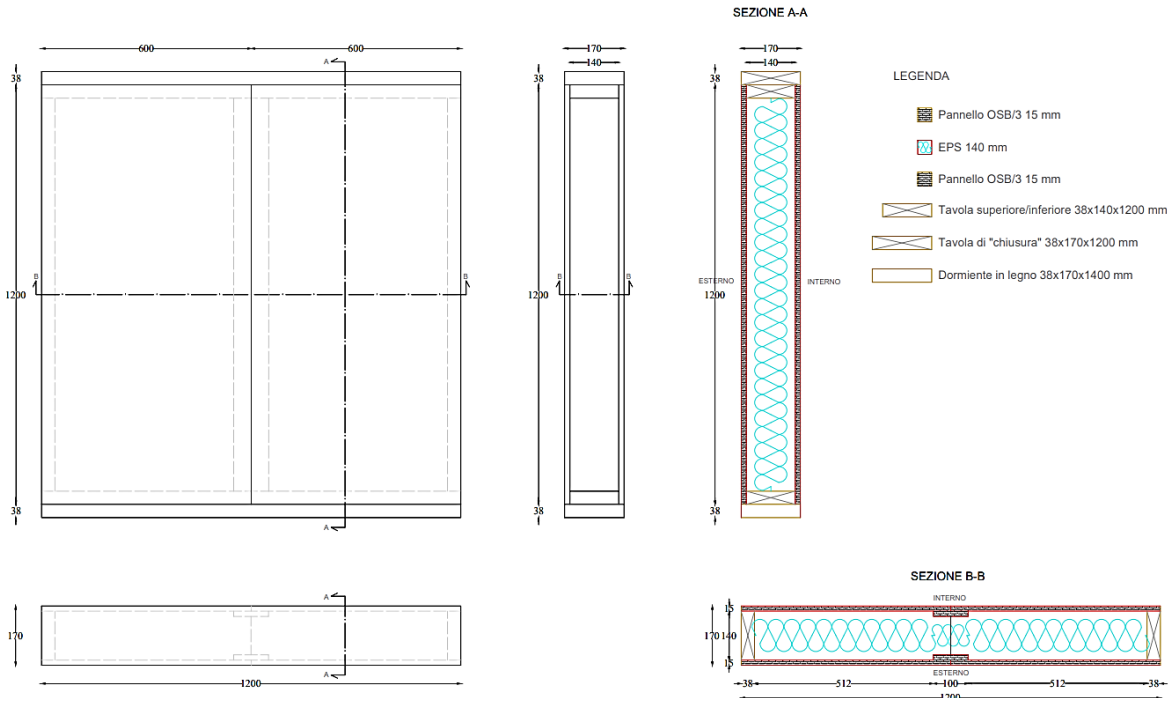


Figura 47 – Campione SIP3-NF

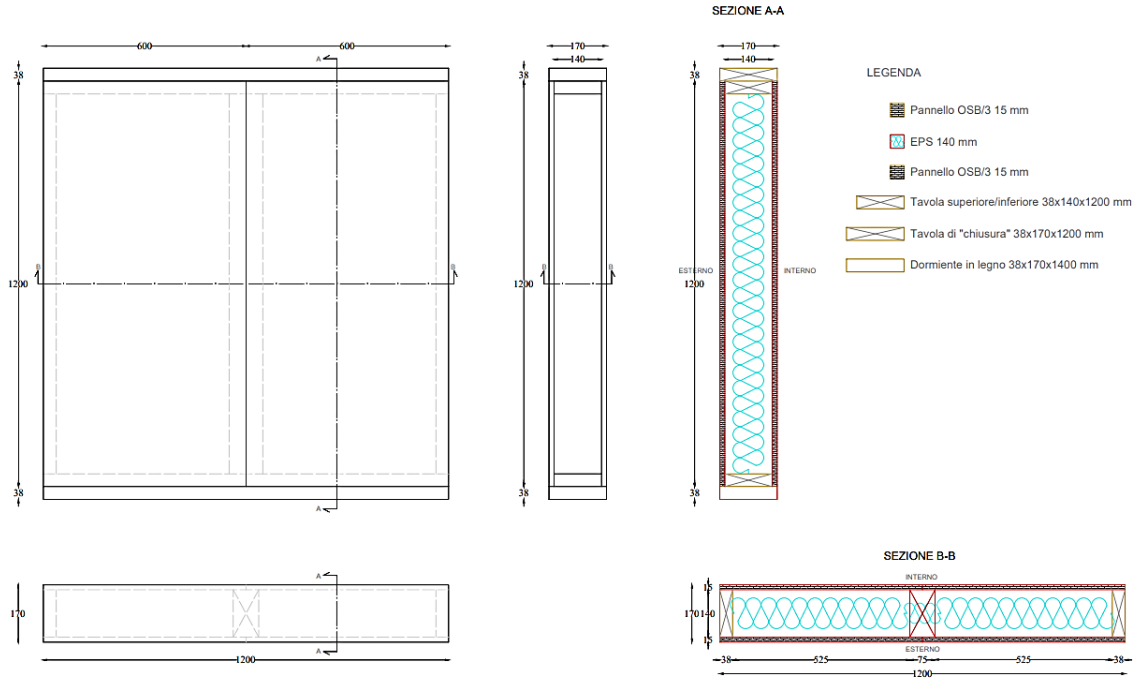


Figura 48 - Campione SIP4-NF

Di seguito si descrivono tutti i materiali che compongono le pareti studiate.

3.1.1.1 Pannello ISOSANDWICH 2K

Il pannello ISOSANDWICH 2K (Figura 49) utilizzato nell'analisi è stato realizzato per una precedente sperimentazione dalla ditta Isosystem SRL e deriva dall'accoppiamento tra due pannelli in EUROSTRAND OSB, con interposto un materiale coibente a norme EUROPEE e prestazioni energetiche secondo la Legge 10/91 art. 32 D.M. 02/04/98, ed al recente decreto del 27 Luglio 2005 del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti.

Figura 49 - Pannello ISOSANDWICH 2K

Nel caso in analisi i pannelli di rivestimento sono realizzati in OSB/3 da 15 mm di spessore, mentre l'isolante scelto è un EPS (Polistirene Espanso Sinterizzato) 100 kPa da 140 mm di spessore. Per entrambi i campioni (con e senza connessione Block Spline) sono state richieste le dimensioni di 1200 x 1200 mm.

Rivestimento in OSB

Per il rivestimento sono stati utilizzati pannelli in OSB, Oriented Strand Board, ossia pannelli a base di legno. Questi sono composti solitamente da tre strati di trucioli di legno, prevalentemente lunghi e stretti, che vengono legati insieme da una resina sintetica mediante pressatura a caldo per poi essere tagliati ad ottenere le dimensioni richieste. Le tipiche dimensioni dell'OSB sono 2400 x 1200 mm, 3600 x 1200 mm con spessori variabili tra 6, 8, 9, 11, 15, 18, 22, 28 e 38 mm (Dinwoodie e Enjily, 2003).

Normalmente i due strati esterni dell'OSB sono composti di trucioli orientati nella direzione del pannello, a differenza dello strato interno che può essere a trucioli casuali o orientati ortogonalmente al pannello.

I pannelli OSB non sono tutti uguali. Secondo la normativa UNI EN300:2006 ne esistono di diverse tipologie, che si differenziano per caratteristiche e impieghi:

- I *pannelli OSB/1* sono i più comuni e generici. Questi vengono utilizzati in ambienti asciutti, per realizzare prevalentemente complementi d'arredo;
- I *pannelli OSB/2*, invece, sono più resistenti e con maggiori capacità portanti. Vengono utilizzati in ambienti secchi, generalmente per allestimenti fieristici;
- I *pannelli OSB/3* sono simili ai 2 per composizione, ma a differenza loro sono adatti ad un uso strutturale in ambienti umidi;
- I *pannelli OSB/4* sono ancora più resistenti dei 3 e vengono utilizzati in ambienti umidi con funzioni strutturali.

In generale l'OSB, indipendentemente dalla tipologia, vanta delle proprietà di versatilità, resistenza, costo contenuto e sostenibilità ambientale, caratteristiche che lo rendono candidato ideale per le costruzioni in bioedilizia. Il principale

difetto dell'OSB è quello legato al metodo di fabbricazione che prevede di rendere il prodotto finito inevitabilmente "artificiale" e di conseguenza lo smaltimento risulterà essere più complesso per via del collante che non sarà più separabile dalla matrice legnosa.

Nella presente ricerca sono stati utilizzati rivestimenti OSB di tipo 3 dallo spessore di 15 mm e dimensioni di 1200 x 1200. La Tabella 2 – Caratteristiche tecniche OSB a norma 300riporta le caratteristiche proprie del rivestimento OSB fornite dall'azienda produttrice.

DESCRIZIONE	OSB 2		OSB3		U.M.	NORMA
Spessori pannelli	9≤18	9≤25	9≤18	9≤25		
Peso specifico apparente	580	630	610	660	kg/m³	
Modulo di elasticita' asse principale asse secondario	3500 1400	3500 1400	3500 1400	3500 1400	N/mm²	EN 310
Resistenza alla flessione asse principale asse secondario	20 10	18 9	20 10	18 9	N/mm²	EN 310
Resistenza a trazione trasversale alle fibre a secco	0,34	0,32	0,34	0,32	N/mm²	EN 319
Rigonfiamento dopo 24 h	15	15	10	10	%	EN 317
Resistenza alla diffusione del vapore acque S_d	>2,0	>2,0	>2,0	>2,0	M	DIN 52615
Classe di reazione al fuoco					B2	
Conducibilità termica	0,13	0,13	0,13	0,13	W/mK	DIN 52615
Variazione dimensionale dovuta all'umidità	um. rel 85 % 35% lunghezza +0,10-0,15 spessore +5,0-1,5				%	EN 318

Tabella 2 – Caratteristiche tecniche OSB a norma 300

Nucleo isolante in EPS

Il polistirene espanso sinterizzato (EPS) è un materiale ottenuto dal polistirene per mezzo di un processo chiamato polimerizzazione. L'EPS (Figura 50) è costituito per il 98% da aria, la restante parte da carbonio ed idrogeno, al termine del processo di formazione si ottiene un prodotto rigido e di peso ridotto, sotto forma essenzialmente di lastra.

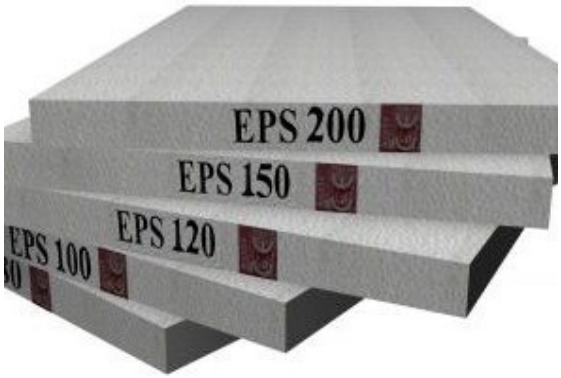


Figura 50 - Polistirene espanso sinterizzato (EPS)

Il processo di polimerizzazione è basato su una reazione chimica che trasforma lo stirene, un monomero (molecola semplice) in polistirene, un polimero, ossia una molecola complessa costituita da più molecole semplici che si ripetono in sequenza. Al termine del processo di polimerizzazione, il prodotto finito si presenta sotto forma di perle dall'aspetto vetroso e granulometria differente. Mettendo queste perle a contatto con del vapore acqueo a 90°, il gas in esse contenute si espande facendole rigonfiare fino a 20-50 volte il loro volume iniziale. Si forma così al loro interno una struttura a celle chiuse che trattiene l'aria e conferisce al polistirene le sue eccellenti caratteristiche di isolante termico. In ultimo le perle vengono sottoposte ad un processo cosiddetto di sinterizzazione, che prevede la saldatura delle perle che, sottoposte nuovamente a vapore acqueo a 110-120°, si uniscono fra loro fino a formare un blocco omogeneo di espanso.

Alla fine del processo l'EPS è costituito per il 96-99% di aria, chiusa in cellette di struttura e dimensioni tali da limitarne i moti convettivi, questo fa di esso un materiale dalle eccellenti proprietà isolanti. Il polistirene espanso, oltre ad avere ottime proprietà di isolante termico, ha una buona resistenza all'umidità, è facilmente lavorabile ed è imputrescibile e atossico.
Nella presente sperimentazione è stato utilizzato l'EPS 100, la cui densità media oscilla tra i 15 kg/m^3 e i 18 kg/m^3. Nella Tabella 3 vengono indicate alcune delle caratteristiche tecniche del nucleo in EPS utilizzati nei pannelli ISOSANDWICH 2K, fornite dall'azienda produttrice.

Adesivo strutturale 502

L'adesivo è un altro componente che riveste particolare importanza nei pannelli SIP. Questo deve garantire un forte legame tra nucleo e facce esterne, in maniera tale che l'integrità dell'incollaggio sia mantenuta, nella classe di servizio assegnata, per tutta la vita utile dell'elemento. Adesivi che rispettano tale requisito sono quelli regolati dalle norme UNI EN 301 (fenolici ed amminoplastici) e UNI EN 15425 (poliuretanici monocomponente).
Tra gli adesivi adatti per i moderni compositi troviamo Poliuretano, polivinilacetato (PVA), acrilico, fenolico e adesivi epossidici[13]. Nel caso specifico è stato utilizzato l'adesivo strutturale PROTOPUR 502 (Figura 51); questo è un adesivo a base di resine indurenti con l'umidità, altamente flessibilizzate, capace di incollare fra loro materiali quali: metalli, polistirolo espanso, fibrocemento, poliestere, laminati fenolici ecc..
Date le eccellenti caratteristiche d'incollaggio, il PROTOPUR 502 è ampiamente usato per la fabbricazione di parti di roulottes, pannelli per pareti continue, celle frigorifere, pareti isolanti. È in ogni caso necessario che

Figura 51 - PROTOPUR 502

almeno una delle parti da incollare porti un contributo d'acqua alla linea collante.

3.1.1.2 Telaio in legno

Il pannello SIP viene incorniciato utilizzando un telaio composto da tavole in legno di abete. In Italia le classi di resistenza del legno massiccio sono definite dalle Norme CNR-DT 206 R1 [33].

Per il legno di origine italiana, secondo le norme CNR-DT 206 R1/2018, valgono le regole di classificazione ed i profili prestazionali contenuti nella UNI 11035-2 "Legno strutturale - Regole per la classificazione a vista secondo la resistenza e i valori caratteristici per i tipi di legname strutturale italiani".

Nella precedente sperimentazione sono state utilizzate tavole in legno di abete per la realizzazione del telaio (Figura 52).

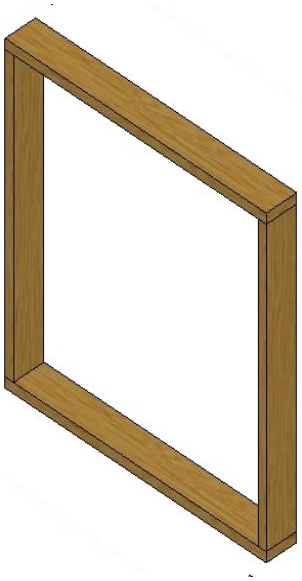


Figura 52 - Telaio in legno di abete

I montanti verticali, la tavola superiore e la tavola superiore di chiusura sono stati fissati al pannello Isosandwich mediante adesivo Protopur 502 (indicato in 3.1.1.1) e chiodati ai rivestimenti dall'azienda produttrice dei pannelli. I chiodi

sono stati inseriti in numero limitato solo per poter garantire una maggiore stabilità tra telaio e pannello isosandwich.

In laboratorio sono stati poi applicati ulteriori chiodi di dimensioni e con interasse simili alla chiodatura effettuata solitamente in cantiere. In **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** e Figura 46 sono identificate le dimensioni delle tavole in legno di abete utilizzate. Il collegamento delle tavole al pannello isosandwich 2K è stato effettuato utilizzando chiodi Anker e colla poliuretanica (indicati in 3.1.1.3).

3.1.1.3 Fissaggi

I campioni sono stati assemblati nel laboratorio di strutture nella precedente sperimentazione.

Colla poliuretanica

Nelle costruzioni in SIP, al fine di garantire un adeguato fissaggio e tenuta all'aria, i pannelli vengono impregnati tra di loro con colla poliuretanica. Per la sperimentazione è stata utilizzata la Bostik Poly Max Original Express (Figura 53), una colla poliuretanica con buone caratteristiche meccaniche e ottima elasticità. Il tempo necessario per la formazione di una pellicola superficiale (detto tempo pelle) asciutta all'interfaccia tra la sostanza adesiva e l'aria è di circa 10-15 minuti. La velocità di polimerizzazione di tale colla è di circa 2 mm/24 ore e il tempo di asciugatura/polimerizzazione è di circa 4 ore. Tale valore può variare in base alle condizioni di temperatura e umidità presenti.

Figura 53 - Colla poliuretanica

Chiodi CK Soltech

Il telaio in legno ed il pannello isosandwich sono stati collegati mediante l'utilizzo di chiodi Anker ad aderenza migliorata. Nella sperimentazione precedente sono stati utilizzati Chiodi CK (vite Torx) (Figura 54) per ognuno dei campioni; questi presentano una testa svasata e filetto parziale con diametro di 4 mm e lunghezza di 75 mm, prodotti dall'azienda Soltech SRL. Questa tipologia di chiodi, realizzata in acciaio al carbonio con trattamento galvanico, dispone di un filetto con funzione antistrappo.

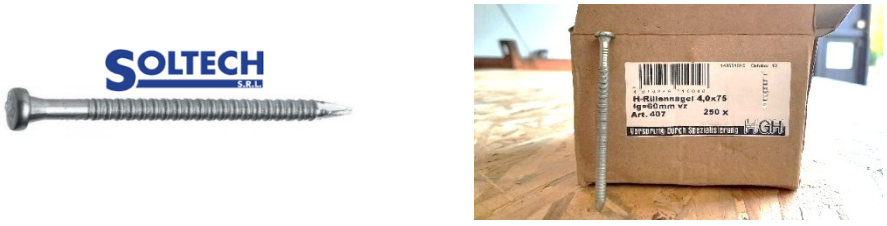


Figura 54 - Chiodi CK Soltech

3.1.2 SIP con le finiture

L'elemento "parete" di cui si sono realizzati i campioni *con le finiture* sono frutto di un assemblaggio di diversi componenti quali montanti, traversi, rivestimenti, sistemi di fissaggio, adesivi ecc.. ai campioni strutturali di cui si è descritto al capitolo 3.1.1.

Anche in questo caso quindi, si avevano a disposizione due differenti pannelli per la sperimentazione, l'uno senza connessione (SIP1-F) e l'altro con connessione di tipo block spline (SIP2-F), ed altre due pareti analizzate solo a livello analitico (SIP3-F e SIP4-F). Il rivestimento è stato realizzato sui pannelli già disponibili in laboratorio, sempre prodotti dalla ditta Isosystem S.r.l come pannello ISOSANDWICH 2K. Entrambi i pannelli sono stati poi completati identicamente dalla ditta Filippo Sabbatini Pistelli di Ostra mediante l'assemblaggio di diversi materiali di cui al seguito se ne specificano le caratteristiche.

La scelta dei materiali e delle tecnologie costruttive, sia per il rivestimento interno che esterno, è stata effettuata sulla base delle scelte costruttive proposte dalla Kingspan TEK Ltd ed adattate al caso specifico facendo sì che le pareti SIP e le pareti Platform Frame avessero una trasmittanza quanto più ravvicinata per poterne fare un confronto a parità di caratteristiche.

In Figura 55, Figura 56, Figura 58, Figura 57 sono rappresentati i dettagli costruttivi dei campioni analizzati ed al seguito verranno descritti tutti i materiali utilizzati per la realizzazione sia delle finiture esterne che interne.

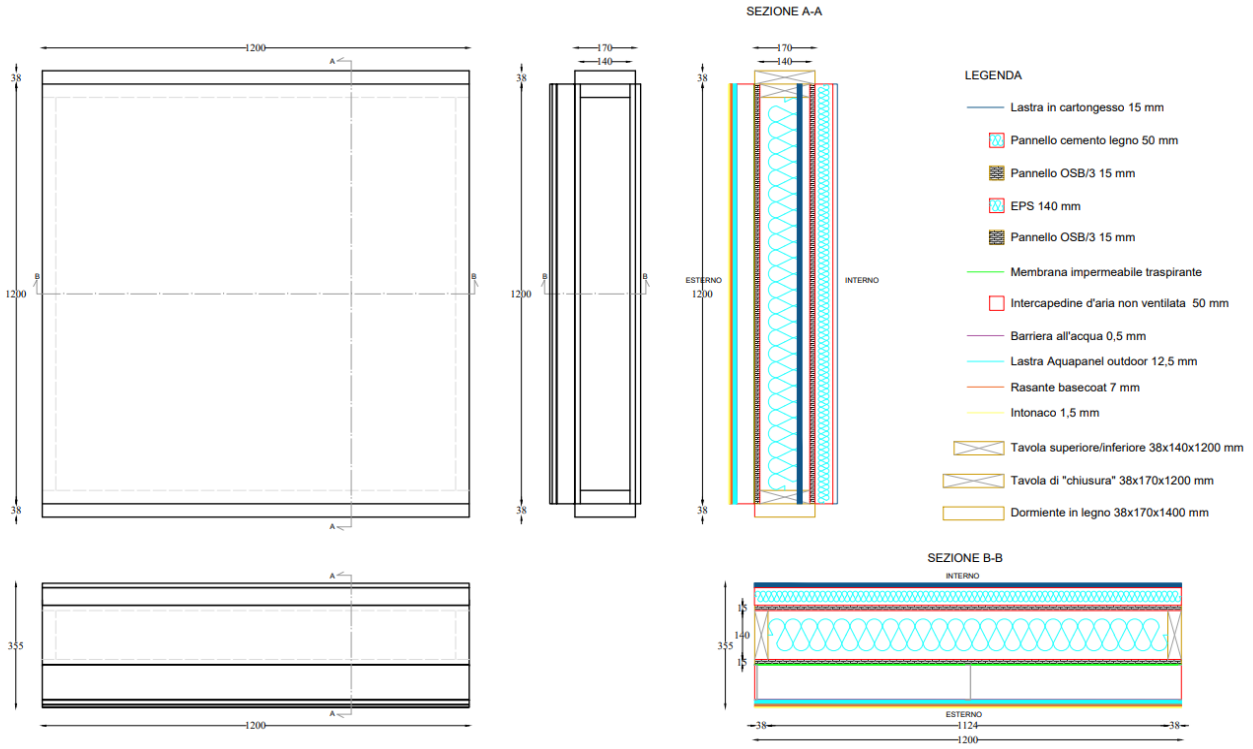


Figura 55 - Campione SIP1-F

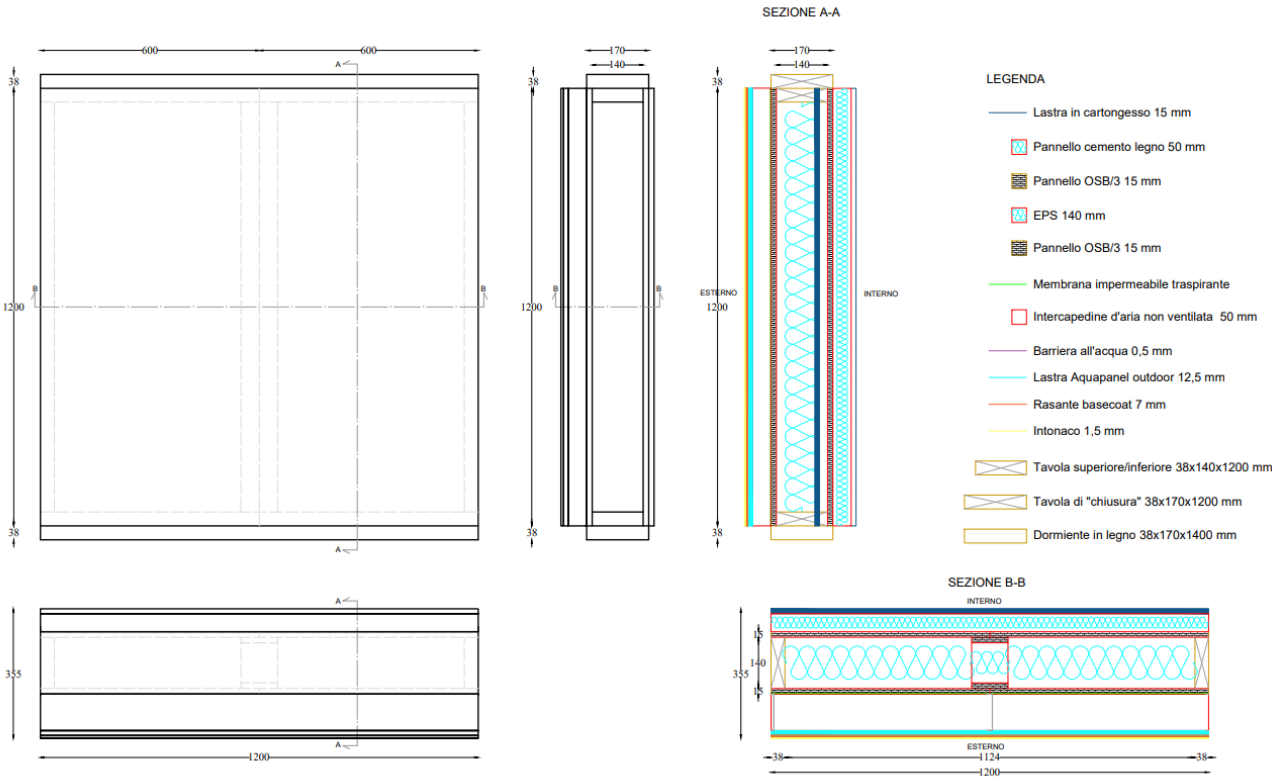


Figura 56 - Campione SIP2-F

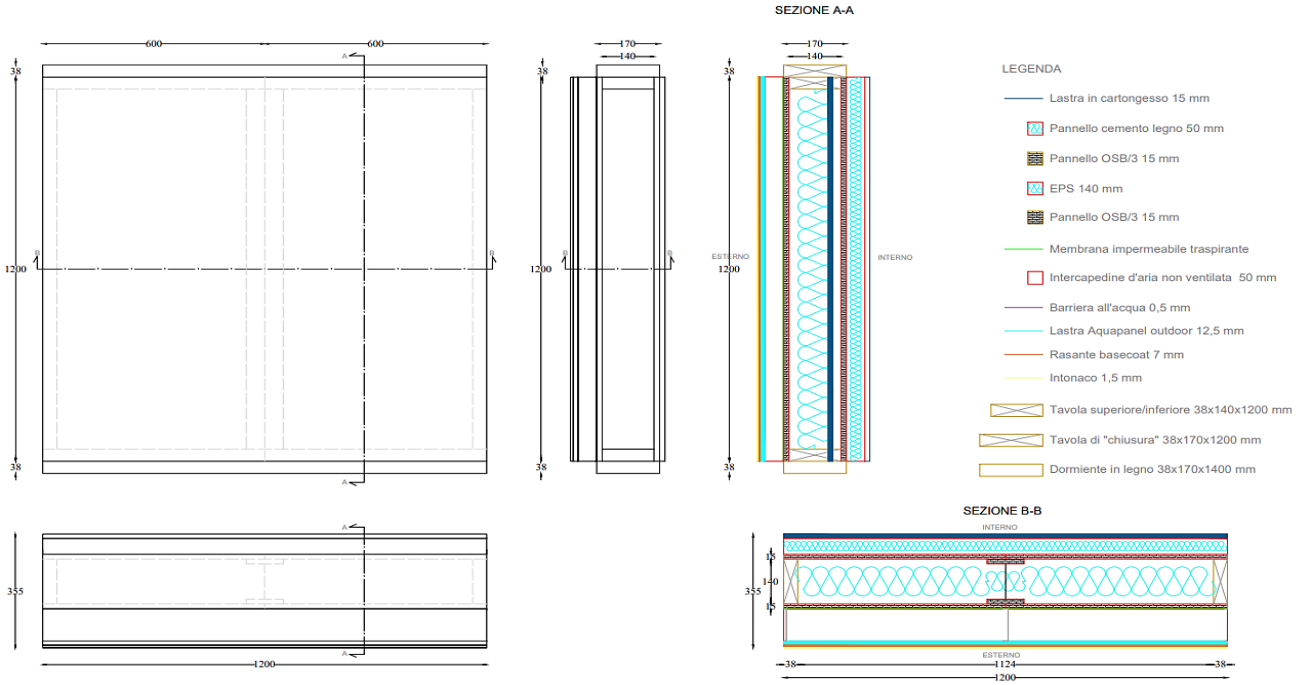


Figura 58 - Campione SIP3-F

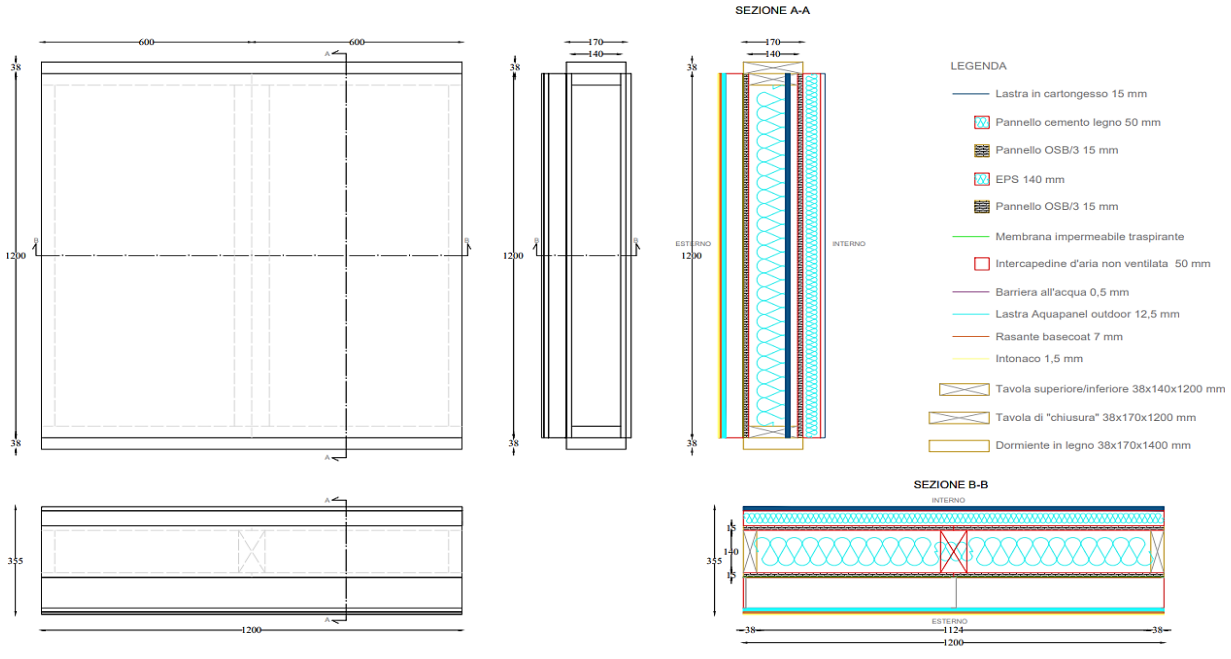


Figura 57 - Campione SIP4-F

3.1.2.1 Finitura esterna

Per la finitura esterna si è scelto il sistema a secco Aquapanel, ad oggi considerato una valida alternativa ai tradizionali sistemi di costruzione per pareti esterne e facciate. Di seguito si descrivono i materiali utilizzati per la realizzazione delle pareti.

Membrana impermeabile traspirante USB WALL 120

In aderenza al rivestimento in OSB/3 è stata posizionata ed ancorata la membrana impermeabile traspirante. Questa riveste una particolare importanza nella parete in quanto è in grado di offrire un elevato potere di tenuta all'acqua ed al vento per le pareti stesse. La membrana traspirante da parete USB WALL 120 (Figura 59) è composta di uno strato superiore protettivo in PP (polipropilene), idrorepellente, stabilizzata a i raggi UV, da un film microporoso in PP (polipropilene) e da uno strato protettivo inferiore sempre in PP (polipropilene).

Figura 59 - Membrana impermeabile USB WALL 120

Montanti MgZ Knauf

Il sistema Aquapanel prevede una orditura metallica differente dalla tradizionale orditura in acciaio zincato. La nuova tecnologia di montanti è denominata MgZ ed è una soluzione ottenuta dall'unione di due componenti, quali il magnesio e lo zinco. Il rivestimento metallico MgZ è ottenuto mediante l'immersione dell'acciaio in vasche a caldo di Magnesio, Alluminio e Zinco. L'utilizzo di queste leghe permette di lavorare con un prodotto estremamente leggero e resistente, sia dal punto di vista della corrosione atmosferica che dal punto di vista meccanico.

Nella sperimentazione sono stati quindi utilizzati montanti Mgz (Figura 60) dallo spessore di 10 cm e posizionati ad una distanza di 60 cm l'uno dall'altro; nella parte superiore ed inferiore sono state inserite due guide sempre dallo spessore di 10 cm. Gli elementi sono stati fissati al pannello OSB/3 mediante viti autofilettanti semplicemente ancorate utilizzando un avvitatore.

Figura 60 - Montanti MgZ Knauf

Barriera all'acqua Water Resistive Barrier

La barriera all'acqua pensata per il sistema Aquapanel è una membrana impermeabile resistente all'acqua e al vento che consente una migliore traspirabilità al sistema Aquapanel proteggendo al tempo stesso gli strati interni. Questa viene posizionata direttamente dietro la lastra Aquapanel Outdoor e ne costituisce uno strato protettivo che impedisce all'acqua di accumularsi dietro alla lastra e/o addirittura di penetrare nella parete permettendo il passaggio di umidità. Il prodotto viene fornito in rotoli di 150 cm di larghezza e 50 m di lunghezza e viene tagliato in fase di posa in opera a seconda delle specifiche dimensioni richieste. La posa in opera è avvenuta mediante l'incollaggio della barriera con nastro biadesivo ai montanti MgZ (Figura 61).

Figura 61 - Water Resistive Barrier

Lastra Aquapanel Outdoor

Nella sperimentazione si è scelto di utilizzare una finitura esterna a secco realizzata con la lastra aquapanel outdoor, una lastra in cemento fibrorinforzato che viene utilizzata per pareti esterne, facciate ventilate ed ambienti a stretto contatto con l'acqua. L'Aquapanel è fortemente indicata per rivestire pareti esterne grazia alla sua proprietà di avere una elevata resistenza alla pioggia, umidità, gelo e shock termici. Grazie alla composizione della lastra e alla presenza della rete in fibra, l'Aquapanel è nota anche per la sua resistenza agli

urti e impatti. Nel caso studio è stata posata una lastra di spessore 12,5 cm e di dimensioni 1200x1200 mm (Figura 62).

Figura 62 - Lastra Aquapanel Outdoor

La lastra viene posata orizzontalmente sull'orditura metallica verticale opportunamente dimensionata in funzione dei requisiti statici del sistema. Le lastre possono essere combinate in un rivestimento sia singolo che doppio, nel nostro caso si è scelto di utilizzare un singolo rivestimento a lastra Aquapanel. Quest'utltima è stata fissata con apposite viti Aquapanel Maxi Schraube (Figura 63) alla sottostruttura, facendo sì che, come richiesto dal manuale di posa, la scritta incisa sulla lastra rimanesse nel lato a vista. Le viti sono state posizionate ad un interasse di 18 cm e ad una distanza di 15 mm dal bordo della lastra.

Figura 63 - Aquapanel Maxi Schraube

Finitura

La realizzazione della finitura esterna è avvenuta mediante un susseguirsi di step costruttivi (Figura 66) e materiali di diversa tipologia. In particolare, è stato posato un primo strato di Rasante Aquapanel Exterior Basecoat (Figura 64), una miscela a base di cemento additivato con resina sintetica utilizzato come strato di fondo per le lastre Aquapanel nel caso di finiture con intonaco a strato sottile, intonaco decorativo o pittura e per la stuccatura dei giunti.

Figura 64 - Rasante Exterior Basecoat

Questo è stato applicato a mano in seguito alla miscelazione della polvere con acqua e dopo aver verificato che la superficie delle lastre sia stata asciutta e priva di polvere.

Lo strato di rasante è stato steso fino ad ottenere una superficie uniforme; dopo di chè è stata annegata la rete Aquapanel (Figura 65) su tutta la superficie delle pareti, sovrapponendola di 10 cm in corrispondenza dei giunti.

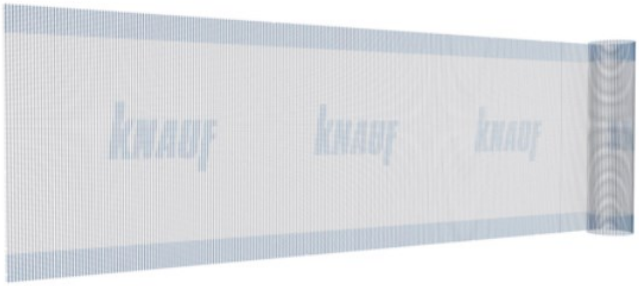


Figura 65 - Rete Aquapanel

Dopo essersi assicurati che lo strato di rasante sia stato asciutto e ben indurito, è stato applicato uno strato di fondo pigmentato e riempitivo, per poi completare la finitura con uno strato di intonachino di finitura a base di silossani.

(a) *(b)* *(c)*

(d) *(e)* *(f)*

Figura 66 - Fasi costruttive SIP

3.1.2.2 Finitura interna

La finitura interna, realizzata anch'essa dalla ditta Filippo Sabbatini Pistelli, è stata pensata e realizzata seguendo la tecnologia proposta da Kingspan TEK Ltd che vedeva accostati uno strato di isolante ed una lastra in cartongesso. Essendo una soluzione pensata analogamente dalla ditta Subissati SRL per la realizzazione degli edifici in Platform Frame, si è scelto di utilizzare gli stessi identici materiali sia per le finiture interne dei campioni SIP che Platform Frame. Nel seguito si descriveranno le operazioni eseguite ed i materiali utilizzati per il completamento delle pareti SIP.

Pannello in Cementolegno Celenit N

Il pannello in cementolegno (Figura 67) è un pannello isolante termico e acustico in lana di legno di abete rosso mineralizzata e legata con cemento Portland. È costituito di lana di legno e di leganti minerali, cemento Portland e polvere di marmo. Le fibre vengono sottoposte ad un trattamento mineralizzante che, pur mantenendo inalterate le proprietà meccaniche del legno, ne annulla i processi di deterioramento biologico, rendendole inerti e aumentandone la resistenza al fuoco. Vengono rivestite con cemento Portland, legate assieme sotto pressione a formare una struttura stabile, resistente, compatta e duratura.

Figura 67 - Pannello Cementolegno Celenit N

Lo strato isolante in cementolegno viene generalmente utilizzato come cavedio per il passaggio degli impianti ove risultasse necessario per poi essere chiuso da un pannello in cartongesso. Nella realizzazione delle pareti SIP sono stati utilizzati due pannelli in cementolegno per ogni campione, dalle dimensioni di 1200 x 600 mm e spessore di 50 mm (Figura 68).

Figura 68 - Pannelli cementolegno 1200 x 600 mm

I pannelli sono stati incollati al rivestimento OSB/3 mediante l'utilizzo dell'adesivo poliuretanico High Tack (Figura 69). High Tack è un adesivo poliuretanico monocomponente di colore azzurro, impermeabile e tenace. Questo aderisce tenacemente a legno, laterizio, calcestruzzo, calcestruzzo cellulare, fibrocemento, metallo, vetro, EPS, XPS, PU, lana di roccia, lana di vetro, materiali polimerici e plastica con l'eccezione di polietilene, teflon e silicone.

Figura 69 - Incollaggio pannello cementolegno

Lastra cartongesso Kasa

Il rivestimento interno è stato realizzato in cartongesso, utilizzando lastre in cartongesso Kasa della Knauf (Figura 71). Le lastre vengono prodotte in fabbrica impastando e colando una pasta formata da polvere di gesso, leganti, rinforzi e acqua che si solidifica tra due fogli di carta. Le lastre Knauf Kasa sono lastre in gesso rivestito di uno speciale cartone e dotate di tecnologia Cleaneo C, in grado di catturare e neutralizzare gli inquinanti presenti in un ambiente confinato, consentendo un abbattimento fino all'80% della formaldeide. Sono prodotte nelle dimensioni di 1200 x 2000/3000 mm, infatti per la sperimentazione sono state tagliate in funzione delle dimensioni richieste per il pannello.

Le lastre in cartongesso sono state fissate, con numerose viti autoperforanti, al pannello OSB/3. A tal proposito sono state utilizzate viti autoperforanti Akifix (Figura 71) di estrema lunghezza in quanto, dovendo ancorare il cartongesso al rivestimento in legno, era necessario oltrepassare lo strato di cementolegno di 50 mm per poter raggiungere il pannello in OSB.

Figura 71 - Lastra in cartongesso Kasa

Figura 71 - Viti autoperforanti Akifix

3.2 Platform Frame

I campioni Platform che sono stati utilizzati nello studio sperimentale sono stati realizzati dalla ditta Subissati S.r.l di Ostra Vetere. Anche in questo caso sono stati prodotti due differenti campioni:

- Campione *senza finiture (NF);*
- Campione *con finiture (F).*

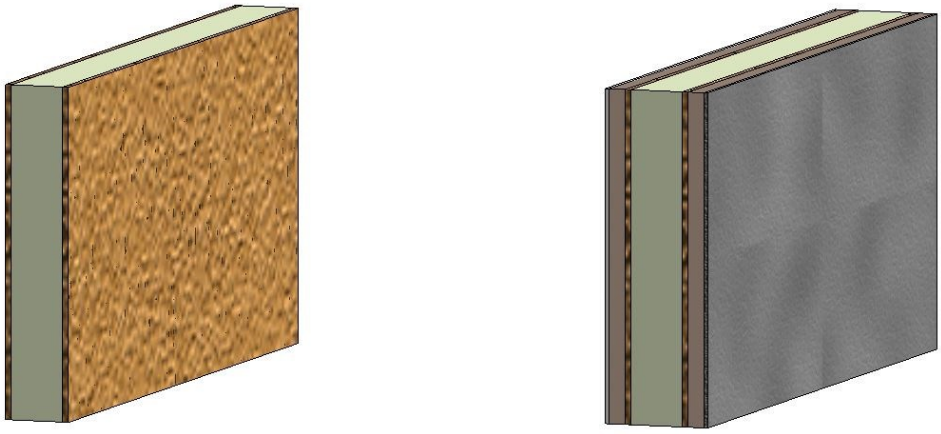


Figura 72 - PLATFORM: Campione NF ed F

Entrambi i campioni da testare sono il risultato dell'assemblaggio di pannelli Platform Frame, composti da due rivestimenti in OSB/3 di 1200 mm di altezza e 600 mm di larghezza, con un nucleo coibentato in lana di roccia.

In Tabella 4 si riportano i due campioni Platform Frame testati con le relative caratteristiche geometriche e la nomenclatura utilizzata.

Categoria	N° di campioni	Denominazione campioni	Dimensione pannelli l x w x t [mm]	Pannelli con connessione	Spessore rivestimenti [mm]
Senza finiture	1	PLATFORM-NF	1200 x 1200 x 196	SI	18
Con finiture	1	PLATFORM-F	1200 x 1200 x 196	SI	18

Tabella 4 - Campioni Platform Frame testati

3.2.1 Platform Frame senza finiture

Come già specificato, il campione *senza finiture* utilizzati nella presente sperimentazione è frutto dell'assemblaggio di pannelli Platform Frame. Questo è stato prodotto dalla ditta Subissati SRL nella modalità costruttiva solitamente utilizzata nella realizzazione di edifici in legno. Il campione si compone di montanti e traversi in legno che fungono da telaio ed un nucleo isolante in lana di roccia racchiuso tra due rivestimenti in OSB/3.

In Figura 73 è rappresentato il dettaglio geometrico e costruttivo del campione in analisi.

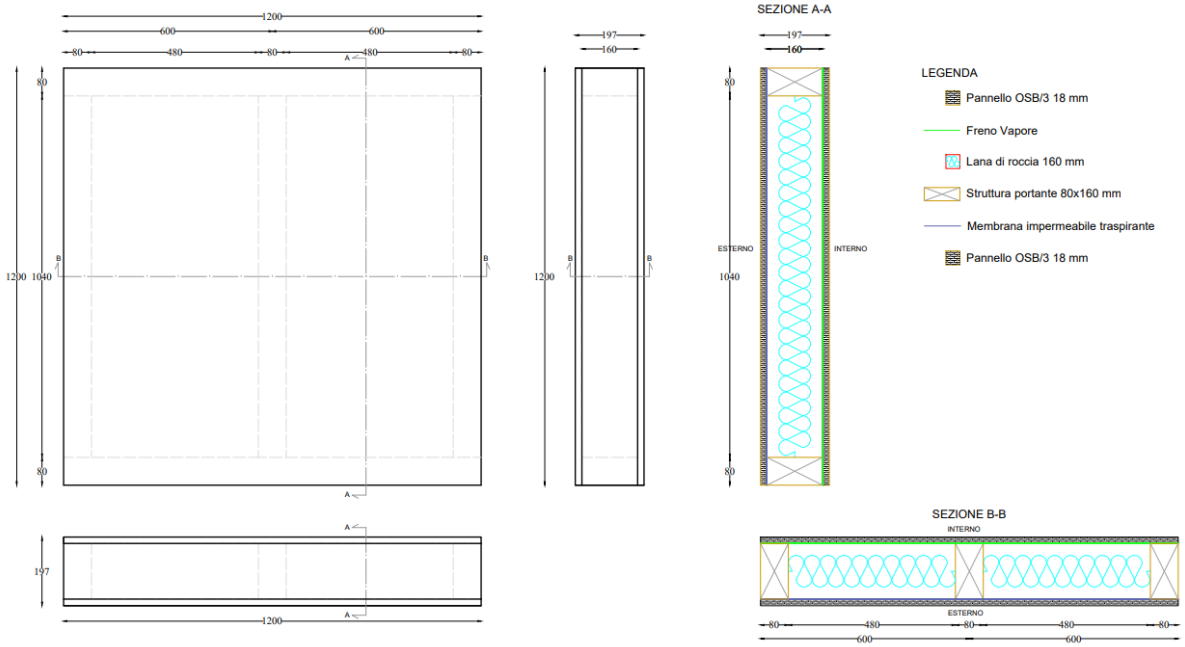


Figura 73 - Campione PLATFORM-NF

Di seguito si descrivono tutti i materiali che compongono i due pannelli utilizzati nella sperimentazione.

3.2.1.1 Rivestimento esterno OSB/3

Per il rivestimento, anche in questo caso sono stati utilizzati pannelli in OSB, Oriented Strand Board. Questi sono composti solitamente da tre strati di trucioli di legno, prevalentemente lunghi e stretti, che vengono legati insieme da una resina sintetica mediante pressatura a caldo per poi essere tagliati ad ottenere le dimensioni richieste. Le tipiche dimensioni dell'OSB sono 2400 x 1200 mm, 3600 x 1200 mm con spessori variabili tra 6, 8, 9, 11, 15, 18, 22, 28 e 38 mm (Dinwoodie e Enjily, 2003).

Normalmente i due strati esterni dell'OSB sono composti di trucioli orientati nella direzione del pannello, a differenza dello strato interno che può essere a trucioli casuali o orientati ortogonalmente al pannello.

I pannelli OSB non sono tutti uguali. Secondo la normativa UNI EN300:2006 ne esistono di diverse tipologie, che si differenziano per caratteristiche e impieghi:

- I *pannelli OSB/1* sono i più comuni e generici. Questi vengono utilizzati in ambienti asciutti, per realizzare prevalentemente complementi d'arredo;
- I *pannelli OSB/2*, invece, sono più resistenti e con maggiori capacità portanti. Vengono utilizzati in ambienti secchi, generalmente per allestimenti fieristici;
- I *pannelli OSB/3* sono simili ai 2 per composizione, ma a differenza loro sono adatti ad un uso strutturale in ambienti umidi;
- I *pannelli OSB/4* sono ancora più resistenti dei 3 e vengono utilizzati in ambienti umidi con funzioni strutturali.

In generale l'OSB, indipendentemente dalla tipologia, vanta delle proprietà di versatilità, resistenza, costo contenuto e sostenibilità ambientale, caratteristiche che lo rendono candidato ideale per le costruzioni in bioedilizia. Il principale

difetto dell'OSB è quello legato al metodo di fabbricazione che prevede di rendere il prodotto finito inevitabilmente "artificiale" e di conseguenza lo smaltimento risulterà essere più complesso per via del collante che non sarà più separabile dalla matrice legnosa.

Nella presente ricerca sono stati utilizzati rivestimenti OSB di tipo 3 dallo spessore di 18 mm e dimensioni di 1200 x 1200 (Figura 74).

Figura 74 - Rivestimento in OSB/3

3.2.1.2 Nucleo isolante in lana di roccia

Il sistema costruttivo Platform Frame prevede il posizionamento di uno strato isolante all'interno dell'intercapedine dell'intelaiatura. Nella parete utilizzata per la sperimentazione è stato posizionato uno strato isolante in lana di roccia, come usualmente utilizzato in fase realizzativa dalla ditta Subissati. La lana di roccia è uno dei materiali isolanti più utilizzato in edilizia. Per via delle sue origini naturali e della sua ecocompatibilità, questa comunemente impiegata nelle costruzioni in legno. Oltre ad essere un materiale naturale e ad avere un'ottima capacità di isolamento termico, la lana di roccia è anche un buon materiale

fonoassorbente. Questo isolante non assorbe né acqua né umidità, ed ha inoltre un ottimo comportamento al fuoco in quanto non contribuisce né allo sviluppo né alla propagazione di incendi.

In particolare, nel campione è stato inserito il pannello in lana di roccia Acustic 225 Plus della Rockwool (Figura 75) dalle dimensioni di 1200 x 600 mm ed uno spessore di 160 mm.

Figura 75 - Pannello in lana di roccia Rockwool

3.2.1.3 Telaio in legno

Il sistema Platform Frame, come descritto in precedenza, si caratterizza per la sua struttura a telaio portante composto da montanti verticali e trasversi in legno di sezione piuttosto ridotta. La parete analizzata nella presente sperimentazione è stata realizzata con montanti in legno di abete dalle dimensioni di 80 x 160 mm, posti ad un interasse di 48 cm (Figura 76).

Figura 76 - Montanti e traversi in legno di abete

3.2.1.5 Membrane

La stratigrafia prevista dalla ditta Subissati si compone di due membrane (Figura 73) che vengono posizionate, in aderenza il rivestimento in OSB/3, tra il rivestimento stesso ed il nucleo isolante. In particolare, viene inserita una membrana impermeabile traspirante sul lato esterno, mentre si posiziona un freno a vapore sul lato interno.

Membrana impermeabile traspirante USB WALL 120

In aderenza al rivestimento in OSB/3, sul lato esterno, è stata posizionata ed ancorata la membrana impermeabile traspirante. Questa riveste una particolare importanza nella parete in quanto è in grado di offrire un elevato potere di tenuta all'acqua ed al vento per le pareti stesse. La membrana traspirante da parete USB WALL 120 (Figura 77) è composta di uno strato superiore protettivo in PP (polipropilene), idrorepellente, stabilizzata a i raggi UV, da un film microporoso in PP (polipropilene) e da uno strato protettivo inferiore sempre in PP (polipropilene).

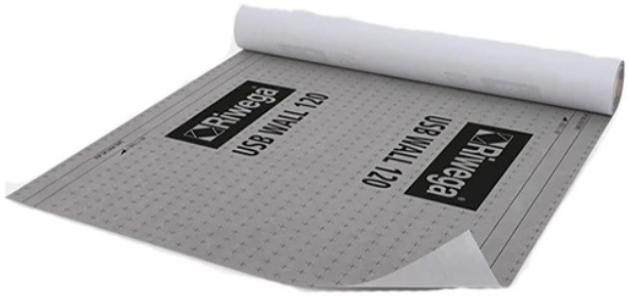


Figura 77 - Membrana impermeabile USB WALL 120

Freno al vapore USB Micro k Riwega

Il freno al vapore USB Micro k della Riwega è stato posizionato sempre in aderenza al pannello in OSB/3 ma, a differenza della membrana, questo è stato posto sul lato interno della parete. Lo strato possiede una alta resistenza meccanica e, grazie alla sua composizione, permette di regolare il passaggio di vapore acqueo all'interno della parete. USB Micro è composto di tre strati (Figura 78); gli strati superiore e inferiore sono rappresentati da tessuti non tessuti in polipropilene che vanno a proteggere il film centrale a bassa traspirazione in polipropilene. I tre strati vengono accoppiati e saldati tra loro tramite termosaldatura ad espansione molecolare. Allo strato superiore viene applicato un trattamento che lo rende idrorepellente per permettere lo scorrimento sulla sua superficie dell'eventuale acqua piovana. Nel caso di pioggia intensa, che non sia possibile smaltire rapidamente, anche la membrana centrale può fornire la necessaria impermeabilità.

Figura 78 - Freno vapore USB Micro Riwega

3.2.2 Platform Frame con le finiture

Il campione *con le finiture* prodotto dalla ditta Subissati SRL è frutto dell'assemblaggio di diversi componenti quali montanti, traversi, rivestimenti, sistemi di fissaggio, adesivi ecc.. partendo da una parete strutturale identica a quella descritta al capitolo 3.2.1.

La tecnologia costruttiva su cui si basa la parete prodotta dalla ditta Subissati è quella che comunemente viene da loro utilizzata nella realizzazione di edifici in Platform Frame. Per questo motivo si è deciso di riprodurre un campione di parete che potesse rappresentare quella che è la realtà delle costruzioni in legno.

In Figura 79 è rappresentato il dettaglio costruttivo del campione analizzato ed al seguito verranno descritti tutti i materiali utilizzati dalla ditta per la realizzazione sia delle finiture esterne che interne.

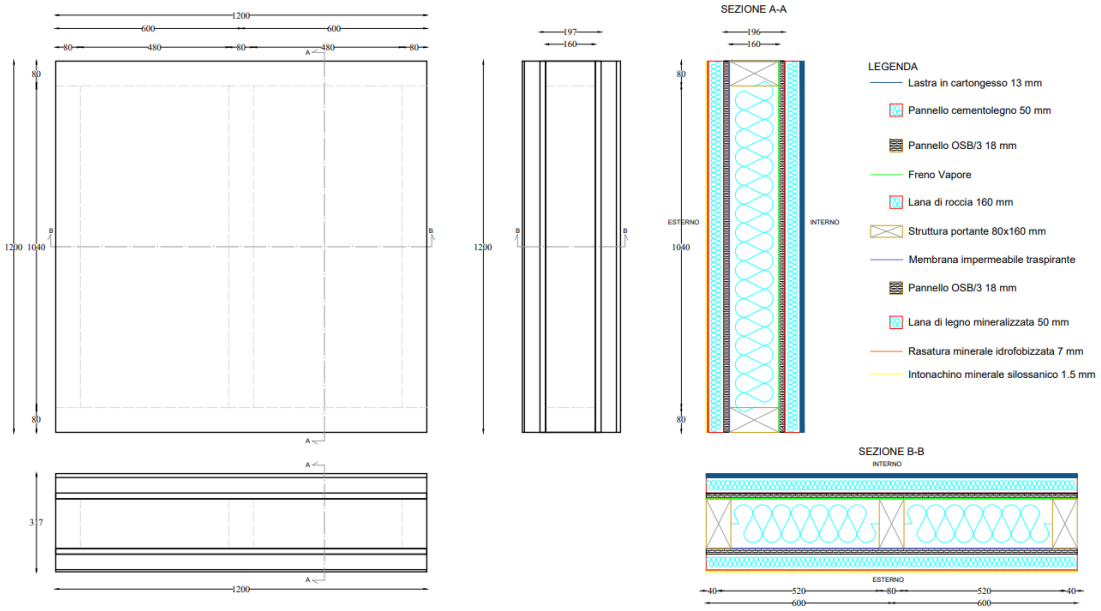


Figura 79 - Campione PLATFORM-F

3.2.2.1 Finitura esterna

La finitura esterna prevista dalla ditta Subissati per la realizzazione di edifici in legno con tecnologia Platform Frame, si compone di sistema a cappotto completato con intonaco di finitura. Di seguito si descrivono i materiali che compongono le pareti.

Lana di legno mineralizzata Celenit N

Le pareti perimetrali sono realizzate mediante il cosiddetto sistema a cappotto. Sul lato esterno vengono quindi posizionati pannelli isolanti ed in particolare, nel caso specifico sono stati utilizzati pannelli in lana di legno mineralizzata Celenit N dalle dimensioni di 1200 x 600 mm. Il pannello in lana di legno mineralizzata (Figura 80) è un pannello isolante termico e acustico in lana di legno di abete rosso mineralizzata e legata con cemento Portland. È costituito di lana di legno e di leganti minerali, cemento Portland e polvere di marmo. Le fibre vengono sottoposte ad un trattamento mineralizzante che, pur mantenendo inalterate le proprietà meccaniche del legno, ne annulla i processi di deterioramento biologico, rendendole inerti e aumentandone la resistenza al fuoco. Vengono rivestite con cemento Portland, legate assieme sotto pressione a formare una struttura stabile, resistente, compatta e duratura.

Figura 80 - Lana di legno mineralizzata Celenit N

Finitura

La finitura esterna ad intonaco prevista dalla ditta Subissati è stata realizzata mediante l'alternanza di diversi strati e materiali. Sul pannello in lana di legno è stato posato un primo strato di rasante StoLevell Novo (Figura 81), una malta minerale leggera/intonaco di fondo minerale per incollaggio ed armatura con polistirene e additivo leggero.

Figura 81 - Rasante StoLevell Novo

Sullo strato di rasante è stata annegata la rete di armatura in fibra di vetro Sto-Glasfasergewebe F resistente agli alcali. Dopo essersi assicurati che lo strato di rasante sia stato asciutto e ben indurito, è stato applicato uno strato di fondo pigmentato e riempitivo Sto-Putzgrund, per poi completare la finitura con uno strato di intonachino di finitura a base di silossani.

Figura 82 - Parete Platform frame con le finiture

3.2.2.2 Finitura interna

La finitura interna prevista dalla ditta Subissati per la realizzazione di edifici in legno con tecnologia Platform Frame, si compone di uno strato isolante ed un in cartongesso al seguito. Nel seguito si descriveranno le operazioni eseguite ed i materiali utilizzati per il completamento delle pareti Platform Frame.

Pannello in Cementolegno Celenit N

Come per i pannelli SIP, anche in questo caso è stato posato un pannello in cementolegno (Figura 67) Celenit N in aderenza al pannello di rivestimento in OBS/3. Il pannello in cementolegno descritto al paragrafo 3.1.2.2 è un pannello isolante termico e acustico in lana di legno di abete rosso mineralizzata e legata con cemento Portland. Anche in questo caso lo strato isolante viene utilizzato principalmente come cavedio per il passaggio degli impianti. Nella parete analizzata sono stati inseriti due pannelli isolanti dalle dimensioni di 1200 x 600 mm e spessore di 50 mm.

Lastra cartongesso Kasa

Il rivestimento interno è stato realizzato in cartongesso, utilizzando lastre in cartongesso Kasa della Knauf. Queste vengono prodotte in fabbrica impastando e colando una pasta formata da polvere di gesso, leganti, rinforzi e acqua che si solidifica tra due fogli di carta. Le lastre Knauf Kasa sono lastre in gesso rivestito di uno speciale cartone e dotate di tecnologia Cleaneo C, in grado di catturare e neutralizzare gli inquinanti presenti in un ambiente confinato, consentendo un abbattimento fino all'80% della formaldeide. La lastra di dimensioni 1200 x 1200 mm è stata fissata al pannello in OSB/3 mediante viti autoperforanti.

4 METODI DI ANALISI

4.1 Analisi numerica

4.1.1 Regime stazionario

Il comportamento termico degli edifici può essere studiato, in via semplificativa, supponendo che l'edificio si trovi in condizioni di stazionarietà. Questa ipotesi risulta essere poco realistica in quanto sia la temperatura che la radiazione solare variano durante tutta la giornata. Nello studio energetico con l'analisi in regime stazionario si considera un intervallo di tempo di simulazione che coincide con la stagione di riscaldamento o raffrescamento, a differenza del regime semi-stazionario, in cui l'intervallo temporale corrisponde al singolo mese. Il bilancio energetico in condizioni stazionarie viene fatto considerando che la trasmittanza termica delle pareti sia costante nel tempo e senza considerare gli accumuli termici tra i vari strati della parete.

Il flusso termico trasmesso in regime stazionario è dato dall' equazione:

$$Q=U*\mathrm{A}*\Delta T$$

dove:

A è l'area dell'elemento considerato;

ΔT è la differenza di temperatura tra interno ed esterno;

U è la trasmittanza termica dell'elemento.

4.1.1.1 Trasmittanza termica

Gli elementi che costituiscono un involucro edilizio sono continuamente interessati dal passaggio di un flusso di calore che concorre a determinare le perdite per trasmissione del bilancio energetico invernale dell'edificio. Il parametro con cui possono essere determinate le dispersioni termiche è proprio la trasmittanza termica.

La trasmittanza termica è definita come il flusso di calore [W/m²K] che passa attraverso una struttura di 1 m² di superficie e con una differenza di temperatura tra gli ambienti delimitati dalla struttura stessa pari ad 1K.

Secondo la UNI EN ISO 6946 [34] la trasmittanza termica U [W/m²K] si calcola come inverso della resistenza termica R_T [m²K/W]:

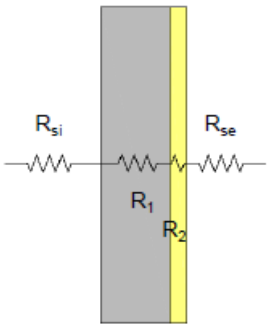
$$U = \frac{1}{R_T}$$

La resistenza termica R_T viene definita differentemente a seconda se si hanno strati omogenei o strati omogenei ed eterogenei.

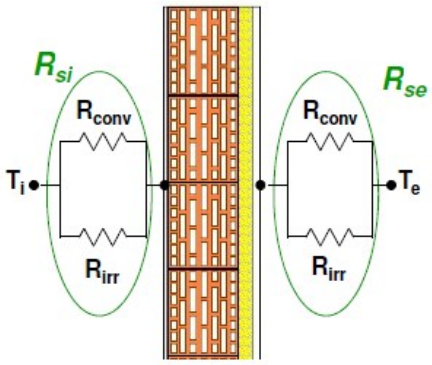
Strati omogenei

Nel caso di strati omogenei la resistenza termica R_T viene determinata come:

$$\boldsymbol{R_T = R_{si} + \sum_i R_i + R_{se}}$$



Dove Rsi ed Rse sono definite rispettivamente come la resistenza termica superficiale interna e la resistenza termica superficiale esterna.



Queste due grandezze tengono conto dello scambio termico per convezione e conduzione a cui è soggetta una superficie esposta all'aria.

In condizioni normali si possono usare i valori di resistenza termica superficiale interna (Rsi) e di resistenza termica superficiale esterna (Rse) forniti dalla norma:

		Direzione del flusso termico		
		Ascendente	Orizzontale	Discendente
Resistenze superficiali	R_{si}	0,10	0,13	0,17
	R_{se}	0,04	0,04	0,04

CONDIZIONI NORMALI INTERNE

$\varepsilon \rightarrow 0,9$

$h_{ro} \rightarrow$ relativo a 20°C

CONDIZIONI NORMALI ESTERNE

$\varepsilon \rightarrow 0,9$

$h_{ro} \rightarrow$ relativo a 0°C

$v \rightarrow 4$ m/s

La resistenza termica dei singoli strati (Ri) viene definita per i materiali omogenei come rapporto tra lo spessore dello strato del componente (d) e la conducibilità termica utile ricavata da valori tabulati riportati ad esempio nelle norme UNI 10351 [35] e UNI EN ISO 10456 [36].

$$R = \frac{d}{\lambda}$$

La resistenza termica dell'intercapedine d'aria viene determinata in funzione di valori tabulati forniti dalla norma quando questa è limita da due facce effettivamente parallele e perpendicolari alla direzione del flusso termico e con una emissività non minore di 0,8 e quando il suo spessore risulta essere inferiore al 10% delle altre due dimensioni e comunque non superiore a 0,3 m.

Resistenza termica (in $m^2 \times K/W$) di intercapedini d'aria non ventilate: superfici ad alta emissività

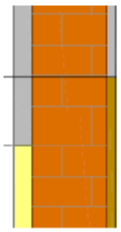
Spessore intercapedine d'aria	Senso del flusso termico		
mm	Ascendente	Orizzontale	Discendente
0	0,00	0,00	0,00
5	0,11	0,11	0,11
7	0,13	0,13	0,13
10	0,15	0,15	0,15
15	0,16	0,17	0,17
25	0,16	0,18	0,19
50	0,16	0,18	0,21
100	0,16	0,18	0,22
300	0,16	0,18	0,23

Nota - I valori intermedi possono essere ottenuti per interpolazione lineare.

Strati omogenei ed eterogenei

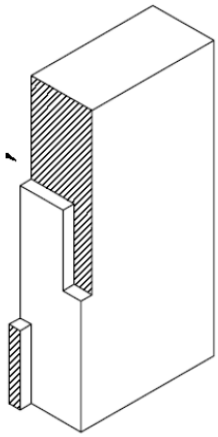
Nel caso di strati omogenei la resistenza termica R_T viene determinata come:

$$R_T = \frac{R'_T + R''_T}{2}$$



Dove R'_T e R''_T sono definiti rispettivamente come limite superiore ed inferiore della resistenza termica totale ed il loro calcolo avviene seguendo la procedura al di sotto descritta.

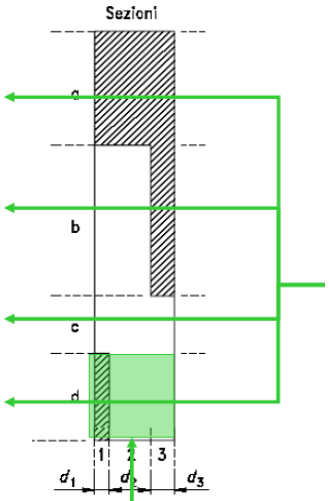
Considerando di avere un elemento come in figura, questo viene diviso in sezioni e scomposto in parti omogenee.



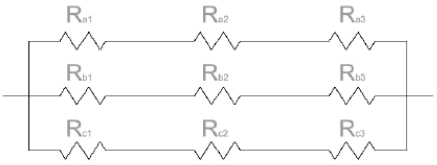
Per ogni sezione verranno determinate:

- conduttività termica λ_{mj}
- spessore d_j
- area relativa f_m
- resistenza termica R_{mj}.

Potranno essere così determinate:

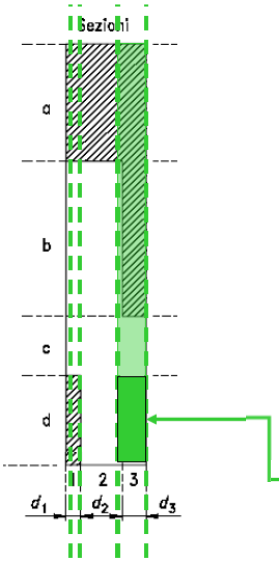


Limite superiore della resistenza termica totale

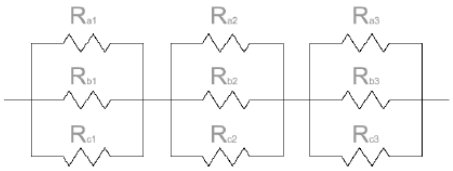


Flusso termico $\frac{1}{R'_T} = \frac{f_a}{R_{Ta}} + \frac{f_b}{R_{Tb}} + \frac{f_c}{R_{Tc}} + \frac{f_d}{R_{Td}} + \cdots + \frac{f_q}{R_{Tq}}$

Resistenza termica totale $R_{Td} = R_{si} + \sum_i R_i + R_{se}$



Limite superiore della resistenza termica totale



$$R'' = R_{si} + R_1 + R_2 + R_3 + \cdots + R_{se}$$

$$\frac{1}{R_3} = \frac{f_a}{R_{a3}} + \frac{f_b}{R_{b3}} + \frac{f_c}{R_{c3}} + \frac{f_d}{R_{d3}} + \cdots + \frac{f_q}{R_{q3}}$$

4.1.1.2 Ponti termici

Nelle diverse stagioni dell'anno, per via della differenza di temperatura che si genera tra l'interno e l'esterno di un locale abitativo, l'involucro edilizio è soggetto al continuo passaggio di un flusso termico. In particolari zone dell'involucro, si potrebbero rilevare valori di densità del flusso termico più elevati rispetto al valore medio e quindi una dispersione di calore localizzata superiore a quella delle superfici adiacenti. Questo fenomeno potrebbe essere dovuto della presenza di discontinuità geometriche o disomogeneità dei materiali che costituiscono la struttura edilizia esterna. Queste zone sono così denominate ponti termici. Essi sono normati secondo la UNI EN ISO 10211 [36], che li definisce come parte dell'involucro edilizio dove la resistenza termica, altrove uniforme, cambia in modo significativo.

La presenza di ponti termici nell'involucro edilizio determina diversi effetti negativi come:

- Incremento delle dispersioni termiche;
- Condensazione superficiale ($T_{superficiale} < T_{rugida}$);
- Diminuzione del benessere abitativo;
- Danni alle superfici nel caso di insorgenza di muffe.

I ponti termici possono essere definiti in funzione della tipologia, ed in particolare si possono avere:

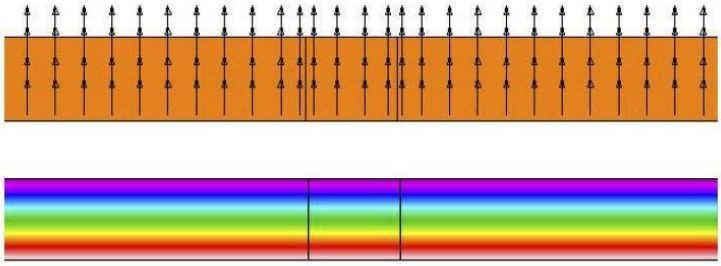
- Ponti termici *geometrici*, in cui la deviazione del flusso monodimensionale è dovuta alla variazione delle parti costruttive;
- Ponti termici *costruttivi*, in cui la deviazione del flusso è dovuta alla presenza di materiali ad alta conducibilità termica che interrompono materiali ad alte prestazioni.

La norma UNI EN ISO 14683 [37]definisce due tipologie di ponte termico:

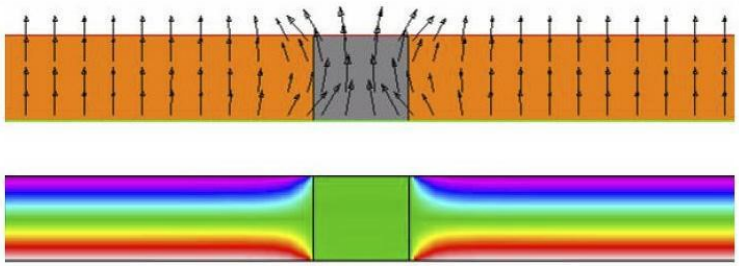
- Ponte termico *lineare*: ponte termico con una sezione trasversale uniforme in una direzione;
- Ponte termico *puntuale*: ponte termico che non presenta sezioni trasversali uniformi in nessuna direzione.

Ponte termico lineare

Una parete esterna piana, che separa due ambienti a diversa temperatura, sarà caratterizzata da un flusso termico che con buona approssimazione viene assunto monodimensionale e perpendicolare alle superfici. Nello spessore della parete si susseguiranno quindi tante superfici isoterme piane e parallele a temperatura crescente o decrescente dall'interno verso l'esterno.

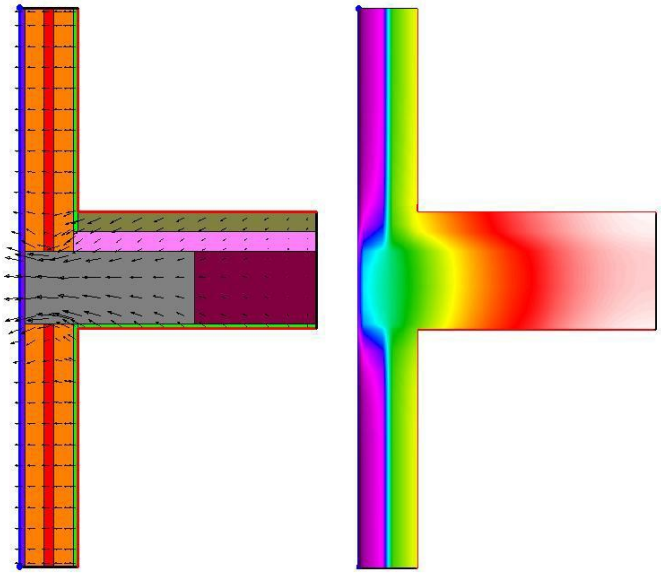


Nel caso in cui dovesse essere presente un materiale con più elevata conduttività termica rispetto alle parti adiacenti, questo determina una distorsione delle linee di flusso ed una modifica localizzata delle distribuzioni di temperatura.

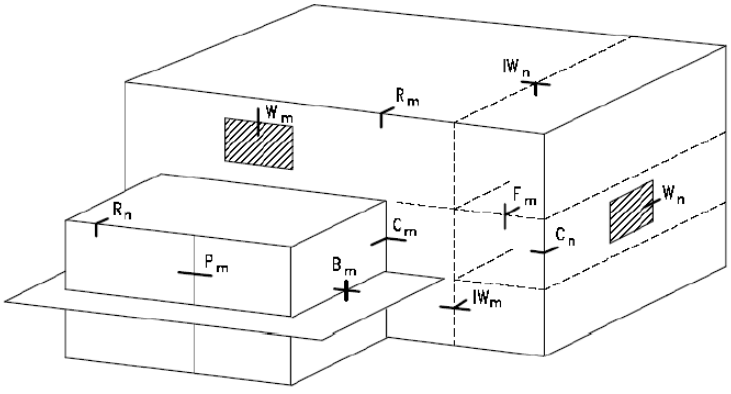


Ponte termico puntuale

La giunzione tra solaio e parete, come mostrato in figura, è classificabile come discontinuità geometrica. In questa situazione si ha una direzione preferenziale del flusso termico a causa di un incurvamento delle superfici isoterme.



La normativa UNI EN ISO 14683 [37] individua in maniera semplificativa le zone dell'involucro edilizio di un edificio in cui normalmente sono presenti i ponti termici.



Il calcolo del flusso termico trasmesso dalla parete in presenza di un ponte termico può essere effettuato secondo due differenti approcci:

- Metodo *numerico* 2D o 3D per il calcolo del flusso termico complessivamente scambiato;
- Metodo *semplificato* che permette di calcolare l'incremento del flusso termico dovuto alla presenza del ponte termico.

Il metodo semplificato prevede la determinazione di coefficienti di trasmissione lineici, esprimenti il flusso termico disperso attraverso le zone singolari di un edificio per ogni metro di lunghezza e per una differenza di temperatura unitaria tra interno ed esterno. La quantificazione dell'incremento delle dispersioni viene denominata trasmittanza termica lineica ψ [W/mK] ed il valore di quest'ultima rientra nel calcolo delle dispersioni per trasmissione dell'edificio:

$$H_D = \sum_i A_i * U_i + \sum_k l_k * \Psi_k + \sum_{jk} \chi_k$$

A_i = area dell'elemento i-esimo dell'involucro edilizio [m^2];

U_i = trasmittanza termica dell'elemento i-esimo [W/m^2K];

l_k = lunghezza del ponte termico lineare k-esimo [m];

Ψ_k = trasmittanza termica lineica del ponte termico lineare k-esimo [W/mK];

χ_j = trasmittanza termica puntuale del ponte termico j-esimo [W/mK].

Generalmente l'influenza dei ponti termici puntuali può essere trascurata.

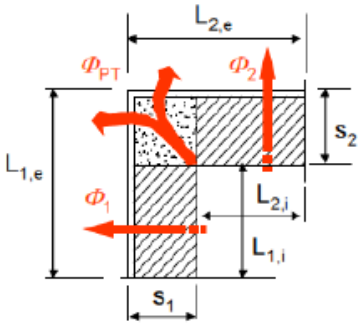
La normativa (UNI EN ISO 14683 [37]) consente di utilizzare diverse metodologie per il calcolo della trasmittanza termica lineica ed ognuna di queste consente di avere un diverso grado di accuratezza nella valutazione del ponte termico.

In particolare, vi sono tre metodologie differenti:

- Metodo forfettario
- Abachi e atlanti
- Calcolo analitico

Il calcolo numerico è considerato il metodo più preciso per la valutazione dei flussi termici, con cui stimare le dispersioni, e delle temperature superficiali per valutare il rischio condensa. Le norme UNI 10211 1-2 [36] includono i limiti del modello geometrico, delle suddivisioni dell'edificio in più parti, delle condizioni al contorno e dei valori termici ad esse collegate.

Nel caso di ponti termici lineari, possono essere utilizzati i metodi di calcolo semplificati. Supponendo di avere un problema come schematizzato in figura, determinando sperimentalmente o numericamente il flusso bidimensionale attraverso l'elemento ϕ^{2D}, dall'uguaglianza $\Phi^{(2D)} = \Phi_1^{(1D)} + \Phi_2^{(1D)} + \Phi_{PT}$



è possibile ricavare il flusso relativo al ponte termico

$$\Phi_{PT} = \Phi^{(2D)} - \Phi_2^{(1D)} - \Phi_1^{(1D)} = \Phi^{(2D)} - L_1^{(i)}\, zU_1\Delta_\theta - L_2^{(i)}\, zU_2\Delta_\theta$$

da cui si ricava il coefficiente di trasmittanza termica lineica:

$$\Psi_i = \frac{\Phi^{(2D)}}{z\Delta_\theta} - L_1^{(i)}\, U_1 - L_2^{(i)}\, U_2 \qquad \text{oppure} \qquad \Psi = L^{2D} - \sum U_i * L_i$$

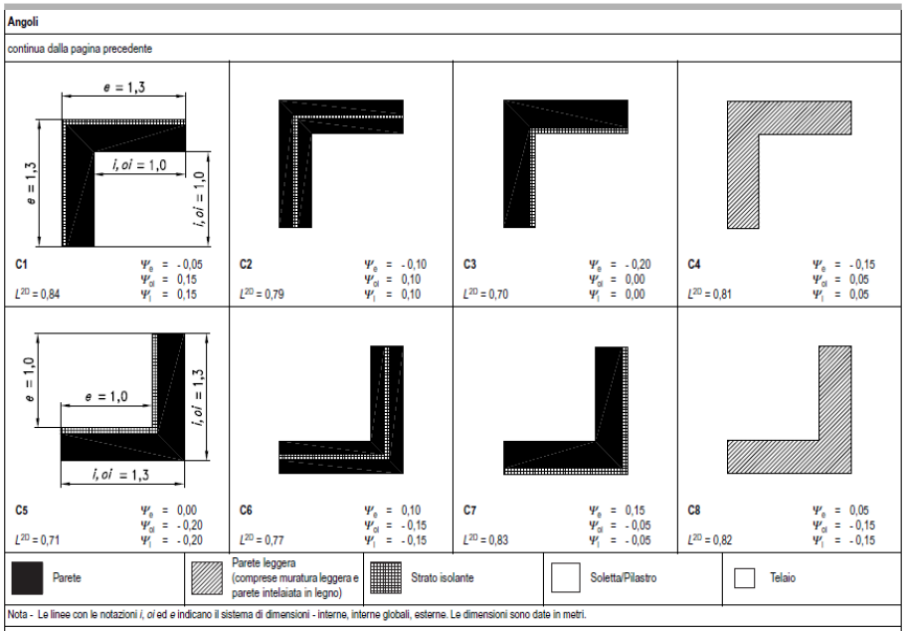
Dove:

L^{2D} è il coefficiente di accoppiamento termico lineico ottenuto con un calcolo bidimensionale del componente che separa i due ambienti considerati;

U_i è la trasmittanza termica dell'i-esimo componente monodimensionale che separa i due ambienti considerati;

l_i è la lunghezza nel modello bidimensionale cui si applica il valore di U_i.

La normativa UNI EN ISO 14863 [37] fornisce alcuni valori di progetto di Ψ riferiti a tipologie di ponti termici più frequentemente ricorrenti.



Nel caso in cui si voglia determinare l'incidenza dei ponti termici derivanti da sezioni costruttive non indicate in normativa, si può utilizzare il metodo degli elementi finiti. Questo prevede l'utilizzo di un software di calcolo FEM (Finite Element Method) con cui, una volta creato il modello secondo le prescrizioni normative ed avendo impostato le condizioni al contorno, permette di

determinare il flusso termico considerando il ponte termico in esame, con cui si potrà poi calcolare la trasmittanza termica lineica.

Software di calcolo FEM

I software di calcolo agli elementi finiti FEM permettono di stimare le dispersioni attraverso un flusso termico suddividendo il modello in singoli elementi di calcolo, permettendo di determinarne la distribuzione delle temperature e dei flussi di energia attraverso ogni modello, per mezzo di un risolutore basato su metodi numerici. Si calcola quindi il flusso termico

$$\Phi_{PT} = U_{FEM} * L * \Delta_T$$

da cui potrà essere ricavata la trasmittanza termica lineica come rapporto tra il flusso termico e la differenza di temperatura di ogni caso analizzato.

$$\Psi = \frac{(\Phi_{PT} - \Phi_{noPT)}}{\Delta_T}$$

Nella presente tesi, l'analisi agli elementi finiti FEM è stata svolta mediante l'utilizzo del *software Therm 7.8*. Therm 7.8 permette di analizzare qualsiasi tipologia di componente edilizio in cui si ritiene elevata la concentrazione dei flussi di calore a causa dei ponti termici. Il software, sviluppato da Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), si basa su metodo degli elementi finiti ed è molto utilizzato nella progettazione edilizia per poter valutare stratigrafie di involucro che siano in grado di evitare ponti termici e problemi di condensa superficiale e interstiziale.

L'analisi (descritta in [38]) ha inizio con la definizione dei dati necessari per l'elaborazione del componente edilizio. In particolare, devono essere definite:

- la località dell'edificio;
- la direzione del flusso;

- i dati relativi alla temperatura interna ed esterna;
- i dati relativi alla resistenza superficiale;
- i dati relativi ai materiali.

Il passo successivo prevede la modifica di due parametri:

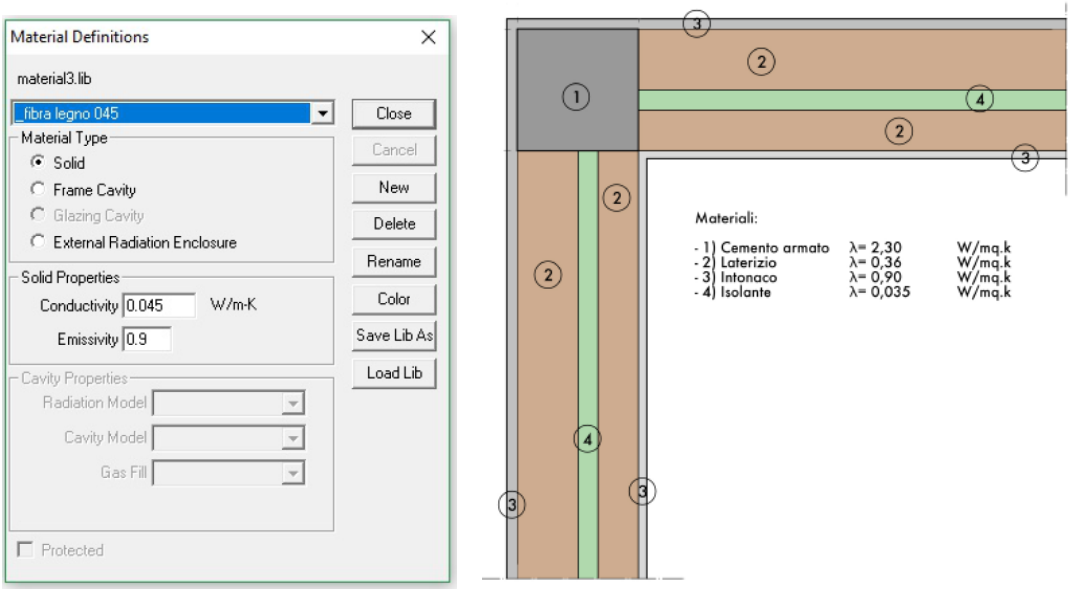
- maximum % Error Energy Norm. Therm processerà la simulazione più volte finchè questo valore sarà raggiunto,
- maximum iterations, ossia specifica il numero di volte che il programma modificherà la mesh e reitererà il calcolo.

L'elemento costruttivo che dovrà essere analizzato mediante il software, viene rappresentato tramite CAD e salvato nel formato DXF per poi essere importato all'interno del software stesso. Particolare attenzione deve essere posta nella definizione dei piani di taglio. La norma UNI EN ISO 10211:2018 [36] stabilisce la distanza minima dal nodo per considerare il piano di taglio. In particolare, la distanza d_{min} deve essere considerata pari:

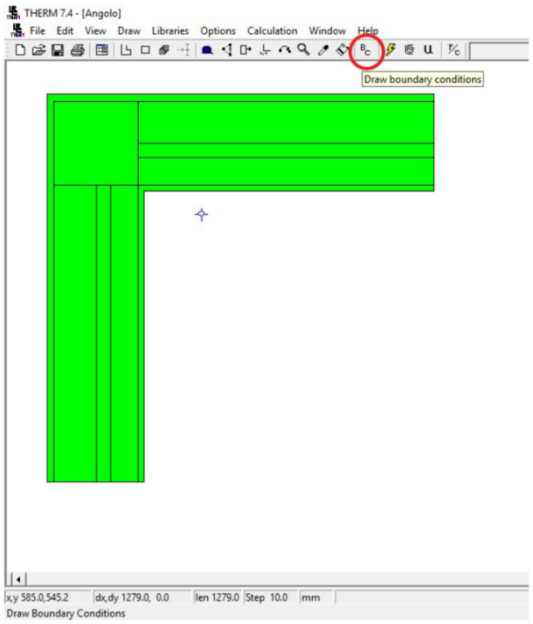
- al piano di simmetria se questo è posizionato a distanza inferiore a d_{min} dal nodo;
- alla distanza d_{min} dal nodo (elemento centrale) se non ci sono piani di simmetria più vicini.

Con d_{min} = dimensione maggiore tra 1m e 3 volte lo spessore dell'elemento considerato.

Il disegno viene poi ricalcato facendo attenzione nell'usare esclusivamente polilinee o rettangoli. Dopo aver disegnato i poligoni è necessario comunicare al software di quali materiali e relative proprietà fisiche è composta la sezione. Per fare questo sarà necessario creare i materiali e salvarli nel la corrispondente libreria quindi associarli ai poligoni.



Dopo aver assegnato i materiali viene chiesto al programma di disegnare la linea di bordo alla quale saranno poi assegnate le condizioni al contorno. Questa operazione viene effettuata andando semplicemente ad agire sul tasto BC (boundary conditions).



Per procedere con il calcolo è necessario attribuire le condizioni al contorno in termini di temperatura e resistenza superficiale (sul lato interno ed esterno). Verranno create quindi le due condizioni al contorno:

_esterna TN1

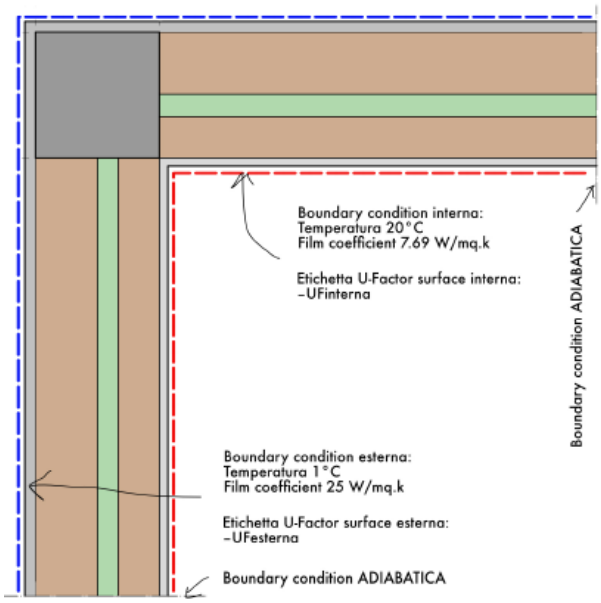
Temperatura [°C], media giornaliera mese più freddo (UNI 10349:2016 [39])

Coefficiente di scambio termico superficiale [W/m²k]

_interna 20 orizzontale

Temperatura [°C]

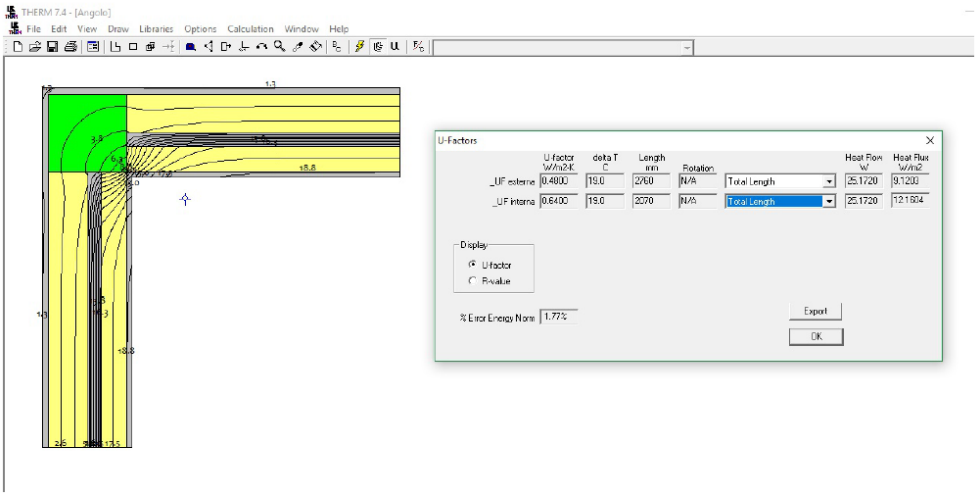
Coefficiente di scambio termico superficiale [W/m²k] (UNI EN ISO 6946 [34])



Dopo aver assegnato le condizioni al contorno, il modello è pronto per essere analizzato. Lanciando l'analisi il software inizierà l'elaborazione del modello e, una volta terminata, mostrerà la sezione indagata con le isoterme con i corrispondenti valori di temperatura.

Sulla base delle condizioni impostate al modello di _UFesterna e _UFinterna, vengono restituiti i seguenti valori:

- U-Factor (la trasmittanza termica distribuita sul la lunghezza) [W/m²k];
- Delta T [°C];
- Lunghezza lungo la quale è calcolata la trasmittanza [mm];
- il valore di Heat Flow (flusso di calore) [W].

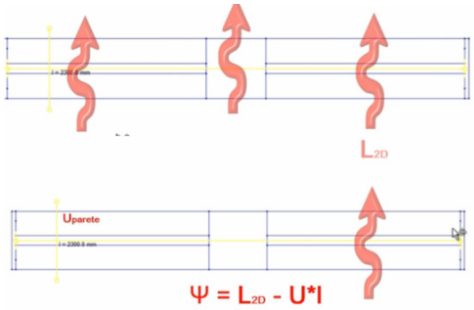


A questo punto si può procedere al calcolo della trasmittanza termica lineica che rappresenta il ponte termico. Quest'ultimo sarà semplicemente dato dalla differenza tra il coefficiente di scambio termico calcolato da Therm, che includerà l'effetto del ponte termico, e quello determinato algebricamente escludendo il ponte termico e quindi considerando la sezione omogenea.

Il coefficiente di scambio termico, comprendente l'effetto del potenziale ponte termico L^{2D}, viene determinato prendendo i valori calcolati dal Therm e moltiplicandoli per la lunghezza rispettivamente del bordo interno ed esterno. Si procede poi calcolando la trasmittanza termica della parete analizzata secondo il metodo previsto dalla norma UNI EN 6946 [34] e, moltiplicandola per la lunghezza considerata, si otterrà il coefficiente di accoppiamento termico dello stesso elemento senza ponte termico.

In ultimo, la trasmittanza termica lineica sarà determinata come segue:

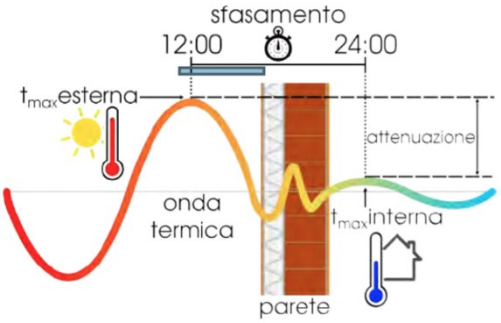
$$\Psi = L^{2D} - \sum_i U_i * l_i$$



4.1.2 Regime dinamico

Un edificio, se progettato correttamente, oltre ad avere la responsabilità di ridurre la trasmissione del calore tra interno ed esterno, dovrebbe essere in grado di mitigare gli effetti relativi a brusche variazioni climatiche che possono manifestarsi in breve tempo. Per questo motivo è necessario valutare con giusta attenzione quello che è definito il comportamento dinamico dell'involucro edilizio.

In un edificio si può considerare il regime termico durante l'arco della giornata proprio come regime dinamico. Questo fenomeno è dovuto dalle variazioni di temperatura che si instaurano tra l'interno e l'esterno dell'edificio e che, secondo leggi, possono essere approssimate a sinusoidi. La parete subisce quindi un effetto definito come inerzia termica. Quest'ultima è data dalla combinazione di due caratteristiche, quali accumulo o capacità termica e resistenza termica. L'inerzia termica può quindi essere definita come la capacità di un componente edilizio di attenuare le oscillazioni di temperatura ambiente dovuta ai carichi termici interni ed esterni ed accumulare il calore rilasciandolo dopo diverse ore nel tempo. Questo consente di avere ambienti con involucri ancora freschi quando all'esterno si ha un elevato irraggiamento solare o massima temperatura dell'aria.

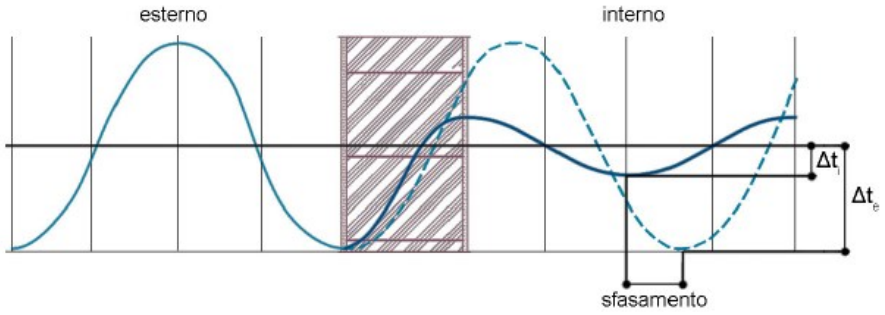


L'inerzia termica della parete si manifesta quindi con uno:

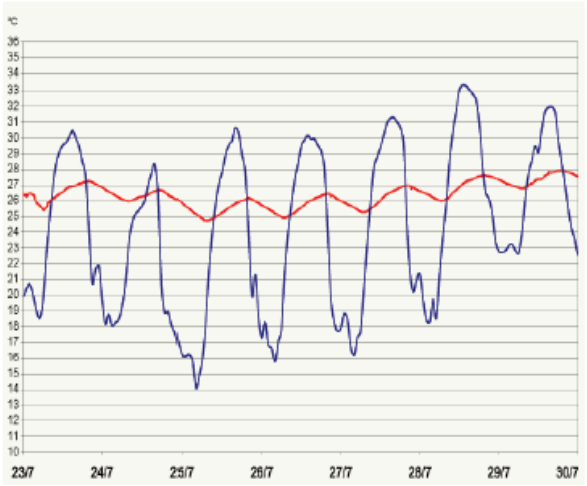
- *smorzamento* dell'ampiezza dell'onda termica, ossia l'attenuazione dell'escursione termica e, più precisamente, è definito come il rapporto tra

il valore di ampiezza dell'onda esterna (ΔT_e) e quello dell'onda interna (ΔT_i);

- *sfasamento* tra l'onda esterna e quella interna, ossia la capacità di una parete di ritardare gli effetti dell'escursione termica esterna ed, in particolare, è rappresentato dal ritardo (espresso in ore) con cui i picchi di temperatura vengono trasmessi all'interno.



Lo studio di una parete in regime dinamico risulta essere complesso, per questo viene semplificato nel caso di condizioni al contorno variabili con un'armonica semplice di un periodo temporale costante, come ad esempio una sinusoidale. La procedura semplificata è basata sull'ipotesi che le temperature ed i flussi abbiano forma sinusoidale e che, attraversando la parete, subiscano una attenuazione ed uno sfasamento.



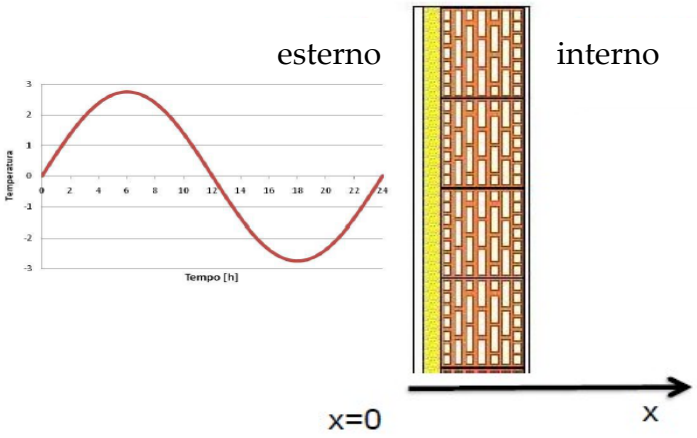
Lo studio della conduzione in regime dinamico si basa sull'equazione di Fourier che, nell'ipotesi di flusso monodimensionale per una parete piana di spessore costante, è data dall'equazione:

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0$$

Dove α è la diffusività termica definita come: $\alpha = \frac{\lambda}{\rho Cp}$

Supponendo di avere una generica parete si ipotizza che sulla faccia di entrata della parete, ossia per x=0, la temperatura possa variare con la legge:

$$T_{x=0} = A * sen(\omega t)$$

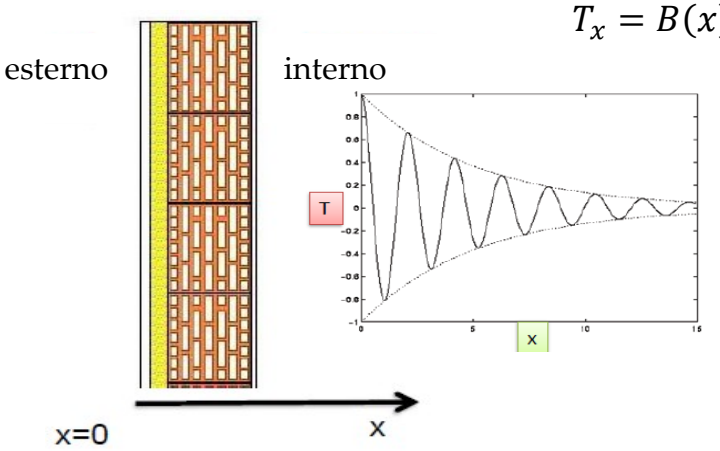


Dove:

- A è l'ampiezza definita come $A = \frac{\Delta\theta max}{2}$ L'escursione termica giornaliera estiva definita nel prospetto XVI della norma UNI EN 10349;
- ω è la pulsazione, definita come rapporto $\omega = \frac{2\pi}{P}$, con P periodo espresso in ore.

Considerando lo spessore della generica parete, la temperatura in corrispondenza della profondità x sarà del tipo:

$$T_x = B(x) * sen(\omega t - bx)$$



Dove B e b sono rispettivamente l'ampiezza e lo sfasamento in funzione dello spessore x.

La norma UNI EN ISO 13786 [40] fornisce la procedura di calcolo dei parametri termici dinamici. La procedura, come anticipato, si basa sull'ipotesi che la temperatura e i flussi termici hanno un andamento sinusoidale che si attenua durante il passaggio attraverso la parete, subendo così uno sfasamento.

4.1.2.1 Parametri termici dinamici

La normativa propone un metodo di calcolo dinamico semplificato, ipotizzando la sollecitazione termica di tipo sinusoidale con un periodo di 24h (regime periodico stabilizzato). Considerando un componente, sottoposto da un lato ad una sollecitazione termica, con temperatura costante sull'altro, possono essere definiti i seguenti parametri termici dinamici:

1) *Trasmittanza termica periodica* Y_{ie} che è data dal rapporto tra il flusso termico periodico che attraversa l'unità di superficie su un lato del componente e la sollecitazione termica periodica sull'altro lato nell'ipotesi che la temperatura ambiente sul primo lato sia costante:

$$Y_{ie} = \frac{\hat{q}_i}{\widehat{\Theta_e}}$$

dove:

$\hat{q}_i$ ampiezza complessa del flusso termico sul lato interno;
$\widehat{\Theta_e}$ ampiezza complessa della temperatura sul lato esterno;

2) *ammettenza*, è il rapporto tra il flusso termico periodico che attraversa l'unità di superficie su un lato del componente e la sollecitazione termica periodica sullo stesso lato nell'ipotesi che la temperatura ambiente sull'altro lato del componente sia costante; si hanno in generale due ammettenze diverse sui due lati di un componente, un'ammettenza interna Yii ed una esterna Yee:

$$Y_{ii} = \frac{\hat{q}_i}{\hat{\Theta}_i} \qquad Y_{ee} = \frac{\hat{q}_e}{\hat{\Theta}_e}$$

3) *Capacità termica areica* K, che è il rapporto tra la variazione di energia accumulata per unità di superficie in un componente nel periodo di tempo e la sollecitazione termica periodica su un lato nell'ipotesi che la temperatura ambiente sull'altro lato del componente sia costante:

$$K_i = \frac{C_i}{A} = \frac{1}{\omega} |Y_{ii} - Y_{ie}|$$

4) *attenuazione* o *fattore di decremento* f, è il rapporto tra il modulo della trasmittanza termica periodica e la trasmittanza termica in condizioni stazionarie U:

$$f = \frac{|Y_{ie}|}{U}$$

5) sfasamento o ritardo temporale dell'onda termica φ, si definisce come il periodo di tempo tra il valore massimo della sollecitazione termica ed il massimo del suo effetto.

Il metodo di calcolo contenuto nella UNI EN ISO 13786:2018 si basa sulla risoluzione dell'equazione di Fourier del calore con condizioni al contorno periodiche, di periodo P. Per uno strato omogeneo con conduttività λ, densità ρ e calore specifico c, la distribuzione di temperatura θ ed il flusso specifico q, si ricavano dalle equazioni:

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

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

Supponendo quindi di avere condizioni di periodo P sui due lati e sviluppando in serie di Fourier, si ottengono le seguenti equazioni della temperatura e del flusso in funzione del tempo:

$$\Theta_n(t) = \overline{\Theta}_n + \left|\widehat{\Theta}_n\right| \cos(\omega t + \Psi) = \overline{\Theta}_n + \frac{1}{2}[\widehat{\Theta}_{+n} e^{j\omega t} + \widehat{\Theta}_{-n} e^{-j\omega t}]$$

$$q_n(t) = \overline{q}_n + \left|\widehat{q}_n\right| \cos(\omega t + \varphi) = q_n + \frac{1}{2}[q e^{j\omega t} + \widehat{q}_{-n} e^{-j\omega t}]$$

dove:

$\overline{\Theta}_n$ e $\overline{q}_n$ sono i valori medi di temperatura e flusso termico;

$|\widehat{\Theta}_n|$ e $|\widehat{q}_n|$ sono le ampiezze delle variazioni di temperatura e flusso termico;

$\widehat{\Theta}_{\pm n}$ e $\widehat{q}_{\pm n}$ sono le ampiezze complesse definite da:

$$\widehat{\Theta}_{\pm n} = |\widehat{\Theta}_n| e^{\pm j\Psi} \qquad \widehat{q}_{\pm n} = |\widehat{q}_n| e^{\pm j\varphi}$$

ω è la frequenza delle variazioni.

La soluzione al problema può essere rappresentata in forma matriciale, con la matrice Z che mette in relazione le ampiezze complesse della temperatura e del

flusso termico su un lato di un componente con le ampiezze complesse della temperatura e del flusso termico sull'altro lato:

$$\begin{pmatrix} \widehat{\Theta}_2 \\ \widehat{q}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \widehat{\Theta}_1 \\ \widehat{q}_1 \end{pmatrix}$$

Gli elementi della matrice sono calcolati nel seguente modo:

$$Z_{11} = Z_{22} = \cosh(\xi)\cos(\xi) + jsinh(\xi)\sin(\xi)$$

$$Z_{12} = \frac{\delta}{2\lambda}\{sinh(\xi)cos(\xi) + cosh(\xi)sin(\xi) + j[\cosh(\xi)\, sin(\xi) - \sinh(\xi)\cos(\xi)]\}$$

$$Z_{21} = -\frac{\lambda}{\delta}\{sinh(\xi)cos(\xi) - cosh(\xi)sin(\xi) + j[\sinh(\xi)\, cos(\xi) + \cosh(\xi)\sin(\xi)]\}$$

Dove ξ è definito come il rapporto tra lo spessore e la profondità di penetrazione:

$$\xi = \frac{d}{\delta}$$

La matrice di trasferimento di strutture ad N strati omogenei viene calcolata come prodotto delle matrici di ciascuno strato, inclusi gli strati liminari, partendo dallo strato più esterno fino a quello più interno:

$$Z = \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{pmatrix} = Z_e Z_1 Z_{2\ldots} Z_{N-1} Z_N Z_i$$

dove Z_1, Z_2,..., Z_N sono le matrici degli N strati con Ze e Zi matrici degli strati liminari rispettivamente esterno ed interno.

Conoscendo la matrice completa è possibile ricavare i parametri dinamici della parete. La trasmittanza termica periodica Yie è data da:

$$Y_{ie} = \frac{1}{|Z_{12}|}$$

Le ammettenze interne ed esterne si ricavano come:

$$Y_{ii} = \left|\frac{Z_{11}}{Z_{12}}\right| \quad Y_{ee} = \left|\frac{Z_{22}}{Z_{12}}\right|$$

Le capacità termiche areiche K_1 e K_2 sono calcolate come segue:

$$K_1 = \frac{T}{2\pi}\left|\frac{Z_{11}-1}{Z_{12}}\right| \qquad K_2 = \frac{T}{2\pi}\left|\frac{Z_{22}-1}{Z_{12}}\right|$$

4.2 Analisi sperimentale

Nel presente capitolo vengono descritte le modalità con cui sono state effettuate le prove sperimentali. Nelle Tabella 5 e Tabella 6 sono riepilogati i campioni che sono stati sottoposti ai test sperimentali.

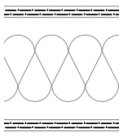
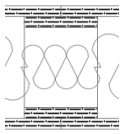
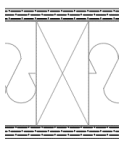
Campioni senza finiture (NF)	Strati	Spessore [m]	Conducibilità [W/mK]	Densità [kg/m^3]	Calore specifico [J/kgK]
SIP1-NF					
	1- OSB/3	0,015	0,130	610	1700
	2 - EPS	0,140	0,035	20	1300
	3 – OSB/3	0,015	0,130	610	1700
SIP2-NF					
	1- OSB/3	0,03	0,130	610	1700
	2 - EPS	0,11	0,035	20	1300
	3 – OSB/3	0,03	0,130	610	1700
PLAT-NF					
	1- OSB3	0,018	0,100	560	1450
	2 - Freno a vapore	0,001	0,220	199	1700
	3 - Lana di roccia	0,160	0,032	70	1030
	4 - Membrana	0,001	0,220	185	1700
	5 - OSB3	0,018	0,100	560	1450

Tabella 5 - Campioni senza finiture analizzati

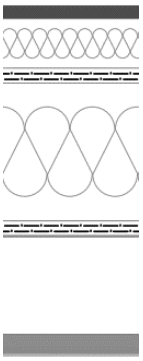
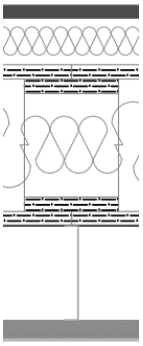
Campioni con finiture (F)	Strati	Spessore [m]	Conducibilità [W/mK]	Densità [kg/m³]	Calore specifico [J/kgK]
SIP1-F					
	1 - Cartongesso	0,013	0,210	870	1000
	2 - Cementolegno	0,050	0,065	160	1810
	3 - OSB/3	0,015	0,130	610	1700
	4 - EPS	0,140	0,035	18	1300
	5 - OSB/3	0,015	0,130	610	1700
	6 - Membrana	0,001	0,220	185	1700
	7 - Interc.aria	0,100			
	8 - Barriera all'acqua	0,001	0,170	1100	1000
	9 - Aquapanel	0,013	0,350	1150	1000
	10 - Rasante	0,007	0,540	1000	1000
	11- Intonachino	0,002	0,700	1800	1000
SIP2-F					
	1 - Cartongesso	0,013	0,210	870	1000
	2 - Cementolegno	0,050	0,065	160	1810
	3 - OSB/3	0,030	0,130	610	1700
	4 - EPS	0,110	0,035	18	1300
	5 - OSB/3	0,030	0,130	610	1700
	6 - Membrana	0,001	0,220	185	1700
	7 - Interc.aria	0,100			
	8 - Barriera all'acqua	0,001	0,170	1100	1000
	9 - Aquapanel	0,013	0,350	1150	1000
	10 - Rasante	0,007	0,540	1000	1000
	11- Intonachino	0,002	0,700	1800	1000
PLAT-F					
	1 - Cartongesso	0,013	0,210	870	1000
	2 - Cementolegno	0,050	0,065	160	1810
	3 - OSB/3	0,018	0,100	560	1450
	4 - Freno a vapore	0,001	0,220	199	1700
	5 - Lana di roccia	0,160	0,032	70	1030
	6 - Membrana	0,001	0,220	185	1700
	7 - OSB3	0,018	0,100	560	1450
	8 – Lana di legno	0,050	0,065	360	1810
	9 - Rasante	0,007	0,300	1000	1000
	10- Intonachino	0,002	0,700	1800	1000

Tabella 6 - Campioni con le finiture analizzati

4.2.1 Set-up delle prove

Le prove sono state effettuate nel Laboratorio di Energetica del Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche. Le prove sono state effettuate in due distinte fasi, l'una in condizioni stazionarie e l'altra in condizioni dinamiche.

L'analisi è stata condotta utilizzando una camera climatica per poter confrontare il comportamento di campioni aventi diversa tecnologia costruttiva ma trasmittanza termica equivalente.

4.2.2.1 Strumenti utilizzati

Le analisi, come anticipato, sono state eseguite per mezzo di una camera climatica del Politecnico della Marche.

Gli standard e gli studi riguardanti questo tipo di analisi [41], [42] suggeriscono l'uso di uno strumento a doppia cabina con camera climatica dove viene fornito l'input termico ed un apparato di misura in cui vengono misurati i risultati. Nella presente sperimentazione, per via dell'indisponibilità di uno strumento a doppia cabina, è stata utilizzata una camera avente un'unica cabina e le misurazioni sono state acquisite mediante termocoppie e termoflussimetri.

La camera climatica (Figura 83) HYGROS H120 è dotata di una cabina interna dalle dimensioni di 1001 x 1097 x 1090 mm ed una capacità di 1,2 m^3 e dispone di una porta di chiusura/apertura nella parte anteriore. La camera permette di modificare le condizioni di temperatura ed umidità relativa in un range compreso rispettivamente tra -40/+180 °C e 10/98%. La precisione nel tempo in termini percentuali varia intorno al ±25% °C per la temperatura e ±1/±3 % per l'umidità relativa.

Figura 83 - Camera climatica

Nella sperimentazione è stata sostituita la superficie di apertura della camera climatica con il campione da testare (Figura 84), così facendo si è ipotizzato che la stanza del laboratorio potesse essere lo spazio interno di un ipotetico edificio, mentre l'interno della macchina lo spazio esterno con cui il campione potesse scambiare calore.

Figura 84 - Esempio di campione posizionato a chiusura della camera

Per misurare le variazioni di temperatura sono state utilizzate diverse apparecchiature, quali:

- 1 *Termocamera* NEC TH7800 (Figura 85) con cui sono state rilevate le temperature superficiali delle pareti rilevare le temperature superficiali delle pareti;
- 14 *Termocoppie* posizionate in aderenza alle pareti per poterne rilevare la temperatura e l'umidità;
- 4 *Termoflussimetri* (Figura 85), piastre posizionate in aderenza alla parete con cui si misura il flusso di calore che attraversa la parete monitorata; *1 Datalogger* (Figura 85) per la registrazione ed interpolazione dei dati, programmabile tramite personal computer collegabile con una connessione seriale di tipo RS232;
- 1 *Software* necessario per acquisire i dati registrati dal datalogger. Questo viene installato sul computer e permette di supervisionare e programmare i logger.

Figura 85 - Termocamera NEC TH7800, Termoflussimetro, DataTaker DT85

Prima di effettuare le prove è stato necessario preparare l'ambiente ed i campioni per le misurazioni. Inizialmente sono stati collegati i sensori, quali termocoppie e termoflussimetri, al datalogger per l'acquisizione dei dati rilevati. Il datalogger è stato programmato affinchè registrasse i dati ad intervalli di 30 secondi. I sensori sono stati posizionati differentemente a seconda della tipologia di parete.

In particolare, sono stati disposti termocoppie e termoflussimetri in numero e configurazione differente tra il SIP1, SIP2 e PLATFORM (Figura 86).

Nel primo caso sono state posizionate 5 termocoppie ed 1 termoflussimetro partendo dal baricentro della parete e distanziando le termocoppie di 50 cm tra loro; nei secondi, invece, sono stati posti i sensori in due file parallele e distanti tra loro di 20cm. Sono state posizionate 4 termocoppie nella fila inferiore ad una distanza reciproca di 5 cm circa, mentre nella fila superiore sono stati posizionati due termoflussimetri ed una termocoppia distanti tra loro di 16 cm. La differente disposizione dei sensori e del numero degli stessi, nelle differenti pareti, è volutamente scelta per poter valutare la distribuzione delle temperature e dei flussi sia in corrispondenza dei montanti (di cui le pareti sono composte) che al di fuori degli stessi.

I sensori sono stati disposti nelle medesime posizioni in ambo i lati della parete.

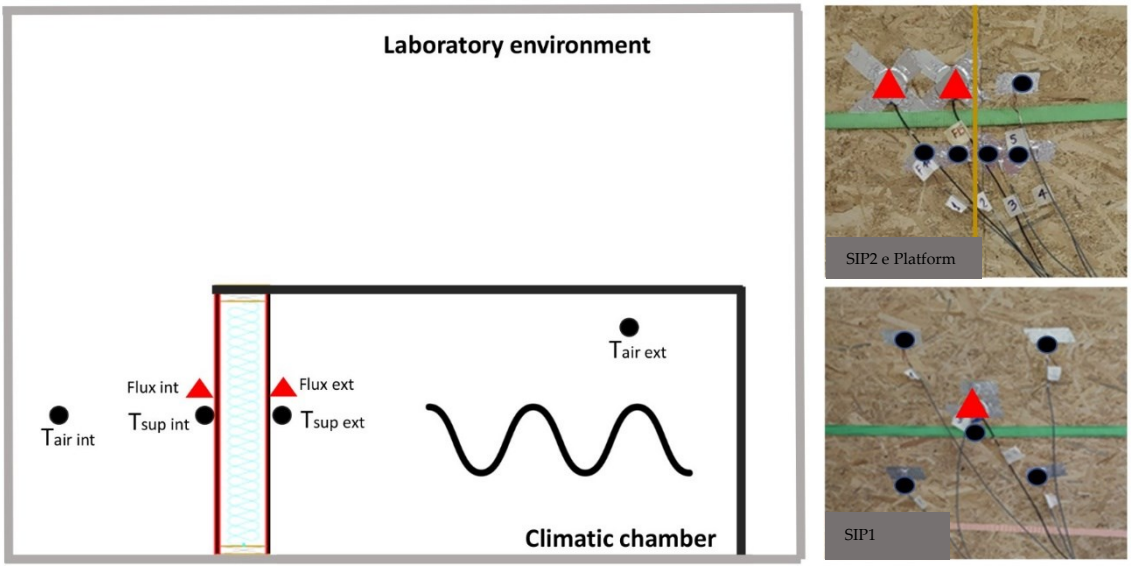
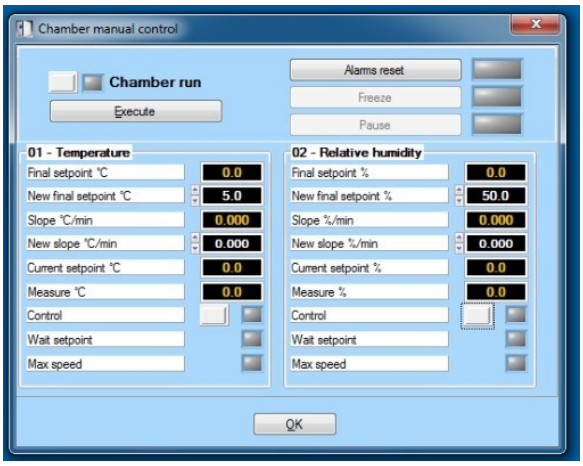


Figura 86 - Configurazione pareti e camera climatica

4.2.2 Regime stazionario

L'analisi in regime stazionario è stata effettuata facendo alcune semplificazioni. La valutazione termica è stata effettuata unicamente come confronto tra le temperature interne ed esterne avendo come elemento di separazione una parete con trasmittanza termica definita e costante nel tempo. Nel caso studio l'unica variabile stazionaria è la temperatura esterna in quanto, l'ambiente interno, ossia quello che ospita la camera climatica, non essendo condizionato non è stato possibile controllare il livello di temperatura dell'aria interna.I campioni di prova sono stati posizionati a chiusura della camera climatica (Figura 84), in posizione verticale. Le condizioni stazionarie sono state ottenute impostando la temperatura e l'umidità relativa di set-point dell'aria esterna.

Nel caso specifico l'ambiente esterno, controllato dalla camera climatica, è stato posto ad una temperatura di 5°C ed una umidità relativa al 50%, mentre l'ambiente interno è stato mantenuto (per quanto possibile) ad una temperatura oscillante intorno ai 24,5 °C.



La scelta della temperatura esterna imposta alla camera climatica è effettuata sulla base delle temperature tipiche invernali e che comportano un sufficiente ΔT tra la temperatura interna ed esterna per poter condurre le prove. Con i dati ottenuti dall'analisi in regime stazionario si è calcolata la trasmittanza termica in opera dei campioni analizzati, facendo uso del metodo delle medie progressive.

4.2.2.1 Trasmittanza termica in opera

Ad oggi si considera di fondamentale importanza la determinazione della trasmittanza termica in situ degli elementi di un involucro edilizio. Questo parametro riveste un ruolo importante in quanto permette di andare e migliorare le prestazioni energetiche di un edificio.

La misura della trasmittanza termica in opera può avvenire mediante due metodi tra loro differenti: metodi distruttivi e metodi non distruttivi. I primi prevedono la misura ed il campionamento degli strati di un involucro edilizio, mentre i secondi si differenziano in due tipologie:

- Heat flow meter method;
- Infrared method IR.

Il metodo ad infrarossi IR, definito nella norma ISO/CD 9862 [43], si basa sulla determinazione del flusso di calore che attraversa un elemento edilizio, facendo uso di una fotocamera ad infrarossi (IR). Tale metodo fornisce valori di trasmittanza termica facendo riferimento alla misura della quantità di irradianza della superficie del campione, alla temperatura superficiale dello stesso ed al coefficiente di scambio termico.

Differentemente, il metodo "Heat Flow Meter" prevede la misura in situ del flusso termico di calore che attraversa l'elemento di involucro indagato e la misura delle temperature dell'aria all'interno e all'esterno.

Nella presente campagna sperimentale, si è scelto di applicare metodi non distruttivi per la determinazione della trasmittanza termica in opera, ed in particolare è stato sperimentato il metodo "Heat Flow Meter" su ogni campione oggetto di indagine.

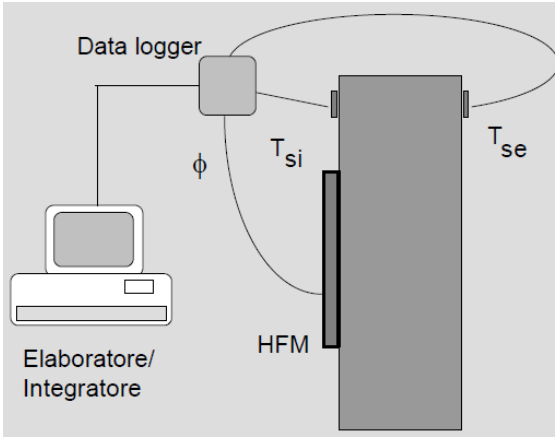
Heat Flow Meter Method

Il metodo "Heat Flow Meter" è definito nella norma BS ISO 9869-1:2014 [44] e permette di calcolare la trasmittanza termica in opera di un componente dell'involucro edilizio. Il valore della trasmittanza viene determinato misurando il flusso di calore e le temperature dell'aria a condizione che il regime sia stazionario. Dato che in situ difficilmente si riscontrano condizioni stazionarie, devono essere fatte delle assunzioni che permettano di stimare una condizione di stazionarietà. Questa condizione è possibile solo se:

- le proprietà termiche dei materiali e i coefficienti di trasferimento del calore sono costanti nell'intervallo di fluttuazioni di temperatura che si verificano durante la prova;
- la variazione della quantità di calore immagazzinata nell'elemento è trascurabile se confrontata con la quantità di calore che attraversa l'elemento.

Se queste due condizioni non possono essere rispettate è necessario utilizzare un metodo di analisi dinamico che possa tenere conto delle fluttuazioni del flusso di calore e delle temperature durante l'analisi.

L'HFM è un metodo che può essere applicato quando si hanno elementi costituiti principalmente da strati opachi perpendicolari al flusso di calore e quando l'elemento analizzato, se costituito da strati non del tutto omogenei, presenta una inomogeneità avente dimensione trascurabile in prossimità del termoflussimetro.



Le misurazioni vengono effettuate mediante l'utilizzo di temoflussimetri, termoresistenze, datalogger ed un software per l'elaborazione dei dati.

La norma BS ISO 9869 [44] fornisce le indicazioni per svolgere le misurazioni in maniera adeguata:

- Posizionare i sensori sulla parete più significativa e rappresentativa dell'involucro;
- Evitare di installare i sensori in prossimità di punti singolari (ponti termici, variazioni geometriche della facciata o crepe);
- Evitare le radiazioni solari dirette sui sensori.

Il termoflussimetro deve essere in contatto diretto con la parte su cui viene posizionato per tutta la superficie del sensore; i sensori devono essere coperti con appositi elementi in plastica in maniera tale da impedire alle radiazioni circostanti di influire sulle misurazioni. I sensori dovranno essere istallati sulle superfici interna ed esterna dell'elemento di involucro e, per conoscere i valori di trasmittanza, dovranno essere posizionati due sensori che rilevino la temperatura dell'ambiente. E' chiaro che sono molte le variabili che possono generare incertezza nelle misurazioni, per questo motivo bisogna prestare molta attenzione nell'applicazione del termoflussimetro e dei sensori di temperatura.

I dati rilevati del termoflussimetro e dai sensori di temperatura devono essere registrati continuamente o ad intervalli di giorni. La durata minima del test è di 72h (3 giorni) se la temperatura è stabile, può superare i 7 giorni nel caso in cui la temperatura non è stabile. L'intervallo di registrazione dipende dal metodo usato per l'analisi, risulta pari a 0,5-1 h per il metodo delle medie progressive e inferiore per il metodo dinamico.

I dati ottenuti dall'analisi sperimentale possono essere analizzati applicando due metodi definiti dalla norma BS ISO 9869 [44] definisce due metodi per l'analisi dei dati ottenuti dalle misurazioni:

- Metodo delle medie progressive;
- Metodo dinamico, "black-box".

Il primo metodo consiste nell'utilizzare valori medi temporali delle grandezze monitorate (temperatura e flusso), determinati sulla base di un periodo di monitoraggio sufficientemente lungo. Il secondo invece, presuppone la conoscenza delle medie temporali dei dati in ingresso ed uscita, ma non del sistema fisico oggetto di analisi.

Nella presente campagna sperimentale è stato utilizzato il metodo delle medie progressive per analizzare le proprietà stazionarie dei campioni in analisi.

Metodo delle medie progressive

Il metodo delle medie progressive si basa sulla determinazione della conduttanza o trasmittanza termica utilizzando, ad ogni istante di tempo, i valori di temperatura e flusso medi calcolati su tutti gli istanti precedenti. Tale metodo permette di valutare la resistenza termica [m^2K/W] come segue:

$$R = \frac{\sum_{j=1}^{n}\left(T_{sij} - T_{sej}\right)}{\sum_{j=1}^{n} q_j}$$

T_{sij} = temperatura superficiale interna ottenuta dalla j-esima misurazione;

T_{sej} = temperatura superficiale esterna ottenuta dalla j-esima misurazione;

q_j = flusso di calore ottenuto dalla j-esima misurazione.

La conduttanza [W/m^2K], essendo l'inverso della resistenza termica, può essere stimata come:

$$\Lambda = \frac{\sum_{j=1}^{n} q_j}{\sum_{j=1}^{n} (T_{sij} - T_{sej})}$$

La trasmittanza [W/m^{2}K] può essere calcolata come segue:

$$U = \frac{\sum_{j=1}^{n} q_j}{\sum_{j=1}^{n} (T_{ij} - T_{ej})}$$

Tij = temperatura interna ottenuta dalla j-esima misurazione;

Tej= temperatura esterna ottenuta dalla j-esima misurazione.

Quando la stima viene calcolata dopo ogni misurazione, si osserva una convergenza ad un valore asintotico. Questo valore asintotico è vicino al reale se sono soddisfatte le seguenti condizioni:

- il contenuto di calore dell'elemento e uguale alla fine e all'inizio della misurazione (stesse temperature e la stessa distribuzione dell'umidita);
- il termoflussimetro non e esposto a radiazioni solari dirette;
- la conducibilita termica dell'elemento e costante durante la prova.

Si puo considerare convergente un sistema in cui il valore di conduttanza oscilla attorno all'asintoto orizzontale con ampiezza massima di 0.05 (W/m^{2}K).

Nel caso in cui le condizioni sopra citate non siano rispettate si può applicare una procedura correttiva che consente tempi di misurazione più corti di quelli che servirebbero per soddisfare queste condizioni.

Nel presente studio sperimentale si è determinata la trasmittanza termica in opera di ogni campione analizzato in regime stazionario, facendo uso del metodo delle medie progressive. Il calcolo è stato effettuato in via sperimentale per un tempo ridotto rispetto a quello previsto dalla normativa. I risultati ottenuti per ogni campione sono riportati nel capitolo 5.

In una analisi sperimentale è necessario tenere in considerazione che la precisione con cui vengono effettuate le misure è influenzata da diversi fattori. In particolare, l'accuratezza dell'acquisizione dipende da:

- precisione nella misura della trasmittanza termica U. L'incertezza in questo caso risulta pari al 1-2% ed e dovuta alla calibrazione della termocoppia;
- precisione nella misura del flusso mediante termoflussimetri. I risultati ottenibili con l'utilizzo di un termoflussimetro sono in genere buoni, e i dati riportati nella bibliografia collocano il valore degli errori tra l'1% e il 15%, con un valore medio dell'8%;
- altre condizioni di misura come: variazioni di temperatura interna ed esterna, tempi e periodi di misurazioni, tenuta all'aria della stanza, effetto della luce del sole, ecc. Tali errori portano a un'incertezza pari al 10%.

L'incertezza totale sulla misura della trasmittanza termica risulta per questi motivi compresa tra il 15% e il 36%.

4.2.3 Regime dinamico

Le prove in regime dinamico sono state effettuate per valutare ed analizzare le prestazioni dell'involucro edilizio in condizioni reali.

I campioni di prova sono stati posizionati in maniera analoga alle prove in regime stazionario e sono stati testati per un periodo di tempo di 72h per far sì che sia le temperature che i flussi fossero stabilizzati. Le pareti sono state sottoposte a cicli di temperatura variabile con un'ampiezza di 20°C. Volendo simulare il comportamento delle pareti in condizione estiva, si è costruita una sinusoidale che potesse oscillare tra i 35°C ed i 15°C (Grafico 1**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**), temperature tipiche di un mese di fine estate (dati

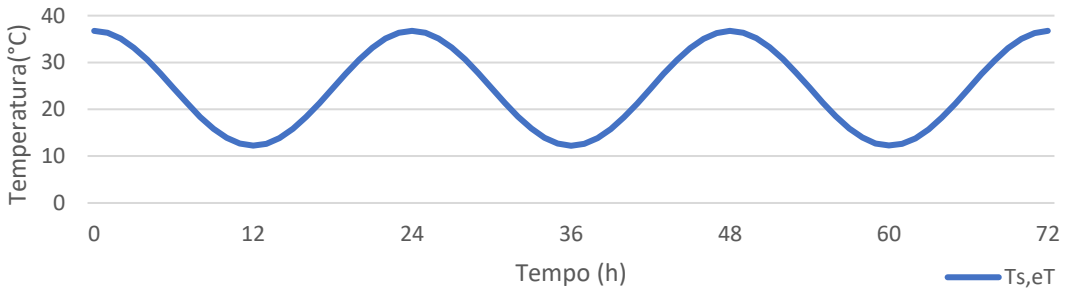


Grafico 1 – Oscillazione indotta sulla parete

determinati con la sperimentazione riportata al 4.2.3.1).

All'oscillazione delle temperature indotta sulla superficie esterna dei campioni corrisponde un'oscillazione sulla superficie interna; i valori delle oscillazioni

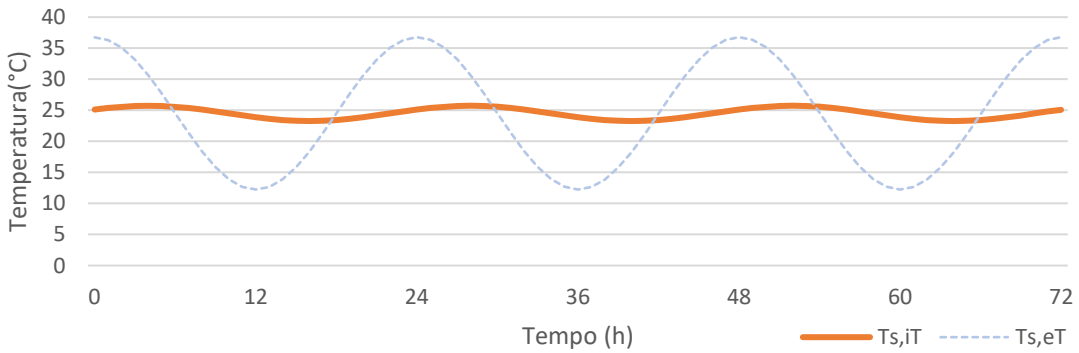


Grafico 2 - Oscillazione sulla superficie interna

delle due grandezze nell'arco di tempo in cui è stata effettuata la prova sono stati utilizzati per l'elaborazione dei dati.

4.2.3.1 Temperatura sole-aria

La temperatura sole-aria rappresenta un valore di temperatura fittizia che permette di tenere conto in maniera semplificata degli effetti della temperatura dell'aria esterna e della radiazione solare sulle pareti esterne di un edificio.

La temperatura sole-aria è definita come la temperatura fittizia dell'aria esterna che assicurerebbe uno scambio termico per convezione tra aria e parete equivalente a quello che si verifica effettivamente per convezione e irraggiamento.

La temperatura sole-aria è stata calcolata secondo le indicazioni ASHRAE[45]:

$$T_{sa} = T_a + \frac{\alpha \cdot I}{h_e}$$

dove:

T_a = temperatura dell'aria esterna, rilevata dalla centralina meteo [K];

α = coefficiente di assorbimento solare [-];

I = irraggiamento medio incidente sulla parete ventilata, rilevato dal radiometro [W/m^2];

h_e = coefficiente di scambio termico convettivo [W/(m^{2}K)].

Il coefficiente di scambio termico convettivo è stato calcolato con la seguente relazione:

$$h_e = h_c + h_r$$

dove:

h_c = coefficiente di convezione, per le superfici esterne $h_c = h_{ce}$ [W/(m²K)]:

$$h_{ce} = 4 + 4 \cdot v$$

dove:

v = velocità del vento in prossimità della superficie [m/s];

h_r = coefficiente di irraggiamento [W/(m²K)]:

$$h_r = \varepsilon \cdot h_{ro}$$

dove:

ε = emissività della superficie [-];

h_{ro} = coefficiente di irraggiamento di un corpo nero [W/(m²K)]:

$$h_{ro} = 4 \cdot \sigma \cdot T_m^3$$

dove:

σ = costante di Stefan-Boltzmann, pari a $5{,}67 \cdot 10^{-8}$ W/(m²K⁴);

T_m = temperatura termodinamica media della superficie [K]:

$$T_m = \left(\frac{T_a + T_{sup\,ext}}{2}\right)$$

dove:

T_a = temperatura dell'aria esterna, rilevata dalla centralina meteo [K];

T_{supext} = temperatura superficiale esterna della parete, rilevata dalla termoresistenza [K].

Calcolo temperatura sole-aria

La temperatura sole-aria è stata determinata in una precedente sperimentazione su una parete di stratigrafia analoga a quella analizzata nella presente campagna sperimentale. Sulla base dei dati rilevati in fase di monitoraggio è stato possibile calcolare la temperatura sole-aria facendo uso della formulazione precedentemente descritta.

Per il calcolo sono stati utilizzati i seguenti coefficienti:

- α = 0.4 (assorbanza della rasatura);
- ε = 0.8 (emissività della rasatura).

Nel Grafico 3 si nota come le temperature sole-aria rilevate nella sperimentazione oscillino tra un minimo di 15°C ed un massimo di 50°C. Per la presente sperimentazione sono state considerate le temperature sole-aria caratteristiche dei primi 3 giorni analizzati (Grafico 4).

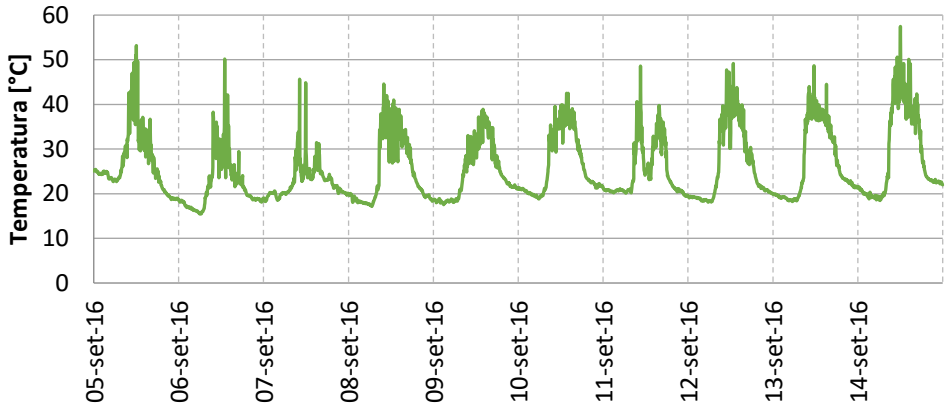


Grafico 3 – Temperatura sole-aria

5 RISULTATI

5.1 Analisi numerica

In questo capitolo si riportano i dati ottenuti dai calcoli in regime stazionario e dinamico effettuati per ogni campione analizzato.

5.1.1 Regime Stazionario

5.1.1.1 Trasmittanza termica

Nel presente sottocapitolo sono riassunti i materiali e le caratteristiche tecniche degli stessi, utilizzati per la determinazione della trasmittanza stazionaria U [W/m²K]. Quest'ultima è stata determinata per ogni campione in analisi secondo le prescrizioni da normativa UNI EN ISO 6946 [34] ed applicando il procedimento sopra descritto.

SIP

1) SIP1-NF

	Spessore (cm)	l(W/mK)	R(m²K/W)
Rsi			0,13

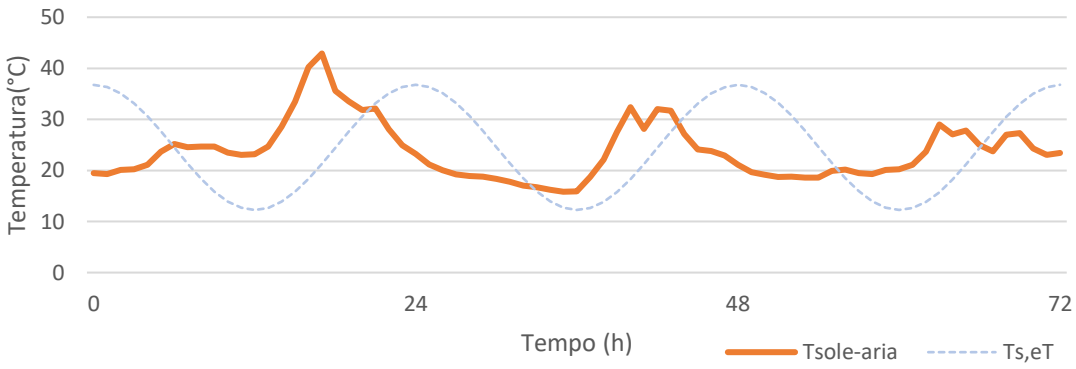


Grafico 4 - Temperatura sole-aria 72h

1	OSB/3	1,5	0,13	0,12
2	EPS	14	0,035	4,00
3	OSB/3	1,5	0,13	0,12
	Rse			0,04
			R_{TOT}	4,40
			U_{TOT}	**0,227**

Tabella 7 - SIP1-NF Trasmittanza termica

2) SIP2-NF

Strato1 – Parete senza montante		Spessore (cm)	l(W/mK)	R(m²K/W)
	Rsi			0,13
1	OSB/3	1,5	0,13	0,12
2	EPS	14	0,035	4,00
3	OSB/3	1,5	0,13	0,12
	Rse			0,04
			R_{TOT}	4,40
			U_{TOT}	**0,227**

Strato1 – Montante		Spessore (cm)	l(W/mK)	R(m²K/W)
	Rsi			0,13
1	OSB/3	3	0,13	0,12
2	EPS	11	0,035	4,00
3	OSB/3	3	0,13	0,12
	Rse			0,04
			R_{TOT}	3,77
			U_{TOT}	0,265

			Rtot = (RT1 + RT2)/2 = 4,33	
			U=1/RTOT = 0,231 [W/m2K]	

Tabella 8 - SIP2-NF Trasmittanza termica

3) SIP3-NF

Strato1 – Parete senza montante		Spessore (cm)	l(W/mK)	R(m²K/W)
	Rsi			0,13
1	OSB/3	1,5	0,13	0,12
2	EPS	14	0,035	4,00
3	OSB/3	1,5	0,13	0,12
	Rse			0,04
			R_{TOT}	4,40
			U_{TOT}	**0,227**

Strato1 – Montante		Spessore (cm)	l(W/mK)	R(m²K/W)
	Rsi			0,13
1	OSB/3	3	0,13	0,12
2	EPS	11	0,035	4,00
3	OSB/3	3	0,13	0,12
	Rse			0,04
			R_{TOT}	3,77

	U_{TOT}	0,265
	Rtot = (RT1 + RT2)/2 = 4,33	
	U=1/RTOT = 0,231 [W/m2K]	

Tabella 9 - SIP3-NF Trasmittanza termica

4) SIP4-NF

Strato1 – Parete senza montante		Spessore (cm)	l(W/mK)	R(m²K/W)
	Rsi			0,13
1	OSB/3	1,5	0,13	0,12
2	EPS	14	0,035	4,00
3	OSB/3	1,5	0,13	0,12
	Rse			0,04
			RTOT	4,40
			UTOT	**0,227**

Strato1 – Montante		Spessore (cm)	l(W/mK)	R(m²K/W)
	Rsi			0,13
1	OSB/3	1,5	0,13	0,12
2	Montante LVL R	14	0,13	1,08
3	OSB/3	1,5	0,13	0,12
	Rse			0,04
			RTOT	1,48
			UTOT	0,678
			Rtot = (RT1 + RT2)/2 = 3,87	
			U=1/RTOT = 0,258 [W/m2K]	

Tabella 10 - SIP4-NF Trasmittanza termica

5) SIP1-F

		Spessore (cm)	l(W/mK)	R(m²K/W)
	Rsi			0,13
1	Lastra cartongrsso	1,3	0,21	0,06
2	Pannello cementolegno	5	0,035	4,00
3	OSB/3	1,5	0,13	0,12
4	EPS	14	0,035	4,00
5	OSB/3	1,5	0,13	0,12
6	Membrana imp.trasp.	0,065	0,22	0,00
7	Intercapedine aria non vent.	10	0,18	0,56
8	Barriera all'acqua	0,05	0,17	0,00
9	Lastra Aquapanel	1,25	0,35	0,04
10	Rasante basecoat	0,5	0,54	0,01
11	Intonachino silossanico	0,15	0,7	0,00
	Rse			0,04
			R_{TOT}	5,84
			U_{TOT}	**0,171**

Tabella 11 - SIP1-F Trasmittanza termica

6) SIP2-F

Strato1 – Parete senza montante		Spessore (cm)	l(W/mK)	R(m²K/W)
	Rsi			0,13
1	Lastra cartongrsso	1,3	0,21	0,06
2	Pannello cementolegno	5	0,035	4,00
3	OSB/3	1,5	0,13	0,12
4	EPS	14	0,035	4,00
5	OSB/3	1,5	0,13	0,12
6	Membrana imp.trasp.	0,065	0,22	0,00
7	Intercapedine aria non vent.	10	0,18	0,56
8	Barriera all'acqua	0,05	0,17	0,00
9	Lastra Aquapanel	1,25	0,35	0,04
10	Rasante basecoat	0,5	0,54	0,01
11	Intonachino silossanico	0,15	0,7	0,00
	Rse			0,04
			R_{TOT}	5,84
			U_{TOT}	**0,171**

Strato1 – Montante		Spessore (cm)	l(W/mK)	R(m²K/W)
	Rsi			0,13
1	Lastra cartongrsso	1,3	0,21	0,06
2	Pannello cementolegno	5	0,035	4,00
3	OSB/3	3	0,13	0,12
4	EPS	11	0,035	4,00
5	OSB/3	3	0,13	0,12
6	Membrana imp.trasp.	0,065	0,22	0,00
7	Intercapedine aria non vent.	10	0,18	0,56
8	Barriera all'acqua	0,05	0,17	0,00
9	Lastra Aquapanel	1,25	0,35	0,04
10	Rasante basecoat	0,5	0,54	0,01
11	Intonachino silossanico	0,15	0,7	0,00
	Rse			0,04
			R_{TOT}	5,22
			U_{TOT}	0,192
			Rtot = (RT1 + RT2)/2 = 5,77	
			U=1/RTOT = 0,173 [W/m2K]	

Tabella 12 - SIP2-F Trasmittanza termica

7) SIP3-F

Strato1 – Parete senza montante		Spessore (cm)	l(W/mK)	R(m²K/W)
	Rsi			0,13
1	Lastra cartongrsso	1,3	0,21	0,06
2	Pannello cementolegno	5	0,035	4,00
3	OSB/3	1,5	0,13	0,12
4	EPS	14	0,035	4,00
5	OSB/3	1,5	0,13	0,12
6	Membrana imp.trasp.	0,065	0,22	0,00
7	Intercapedine aria non vent.	10	0,18	0,56
8	Barriera all'acqua	0,05	0,17	0,00
9	Lastra Aquapanel	1,25	0,35	0,04
10	Rasante basecoat	0,5	0,54	0,01
11	Intonachino silossanico	0,15	0,7	0,00
	Rse			0,04
			R_{TOT}	5,84
			U_{TOT}	**0,171**

Strato1 – Montante		Spessore (cm)	l(W/mK)	R(m²K/W)
	Rsi			0,13
1	Lastra cartongrsso	1,3	0,21	0,06
2	Pannello cementolegno	5	0,035	4,00
3	OSB/3	3	0,13	0,12
4	EPS	11	0,035	4,00
5	OSB/3	3	0,13	0,12
6	Membrana imp.trasp.	0,065	0,22	0,00
7	Intercapedine aria non vent.	10	0,18	0,56
8	Barriera all'acqua	0,05	0,17	0,00
9	Lastra Aquapanel	1,25	0,35	0,04
10	Rasante basecoat	0,5	0,54	0,01
11	Intonachino silossanico	0,15	0,7	0,00
	Rse			0,04
			R_{TOT}	5,22
			U_{TOT}	0,197
			Rtot = (RT1 + RT2)/2 = 5,77	
			U=1/RTOT = 0,173 [W/m2K]	

Tabella 13 - SIP3-F Trasmittanza termica

8) SIP4-F

Strato1 – Parete senza montante		Spessore (cm)	l(W/mK)	R(m²K/W)
	Rsi			0,13
1	Lastra cartongrsso	1,3	0,21	0,06
2	Pannello cementolegno	5	0,035	4,00
3	OSB/3	1,5	0,13	0,12
4	EPS	14	0,035	4,00
5	OSB/3	1,5	0,13	0,12
6	Membrana imp.trasp.	0,065	0,22	0,00
7	Intercapedine aria non vent.	10	0,18	0,56
8	Barriera all'acqua	0,05	0,17	0,00
9	Lastra Aquapanel	1,25	0,35	0,04
10	Rasante basecoat	0,5	0,54	0,01
11	Intonachino silossanico	0,15	0,7	0,00
	Rse			0,04
			R_{TOT}	5,84
			U_{TOT}	**0,171**

Strato1 – Montante		Spessore (cm)	l(W/mK)	R(m²K/W)
	Rsi			0,13
1	Lastra cartongrsso	1,3	0,21	0,06
2	Pannello cementolegno	5	0,035	4,00
3	OSB/3	1,5	0,13	0,12
4	Montante LVL R	14	0,035	4,00
5	OSB/3	1,5	0,13	0,12
6	Membrana imp.trasp.	0,065	0,22	0,00
7	Intercapedine aria non vent.	10	0,18	0,56
8	Barriera all'acqua	0,05	0,17	0,00
9	Lastra Aquapanel	1,25	0,35	0,04
10	Rasante basecoat	0,5	0,54	0,01
11	Intonachino silossanico	0,15	0,7	0,00
	Rse			0,04
			R_{TOT}	2,92
			U_{TOT}	0,342
			Rtot = (RT1 + RT2)/2 = 5,25	
			U=1/RTOT = 0,191 [W/m2K]	

Tabella 14 - SIP4-F Trasmittanza termica

PLATFORM FRAME

9) PLATFORM-NF

Strato1 – Parete senza montante		Spessore (cm)	l(W/mK)	R(m²K/W)
	Rsi			0,13
1	OSB/3	1,8	0,1	0,18
2	Freno vapore	0,078	0,22	0,00
3	Lana di roccia	16	0,032	5,00
4	Membrana imp.trasp	0,065	0,22	0,00
5	OSB/3	1,8	0,1	0,18
	Rse			0,04
			R_{TOT}	5,54
			U_{TOT}	0,181

Strato1 – Montante		Spessore (cm)	l(W/mK)	R(m²K/W)
	Rsi			0,13
1	OSB/3	1,8	0,1	0,18
2	Freno vapore	0,078	0,22	0,00
3	Montante lamellare in abete	16	0,14	1,14
4	Membrana imp.trasp	0,065	0,22	0,00
5	OSB/3	1,8	0,1	0,18
	Rse			0,04
			R_{TOT}	1,68
			U_{TOT}	0,595
			Rtot = (RT1 + RT2)/2 = 4,11	
			U=1/RTOT = 0,243 [W/m^{2}K]	

Tabella 15 - PLATFORM-NF Trasmittanza termica

10) PLATFORM-F

Strato1 – Parete senza montante		Spessore (cm)	l(W/mK)	R(m²K/W)
	Rsi			0,13
1	Lastra cartongrsso	1,3	0,21	0,06
2	Pannello cementolegno	5	0,035	4,00
3	OSB/3	1,8	0,1	0,18
4	Freno vapore	0,078	0,22	0,00
5	Lana di roccia	16	0,032	5,00
6	Membrana imp.trasp	0,065	0,22	0,00
7	OSB/3	1,8	0,1	0,18
8	Lana di legno mineralizzata	5	0,065	0,77
9	Rasatura minerale	0,7	0,3	0,02
10	Intonachino silossanico	0,15	0,7	0,00
	Rse			0,04
			R_{TOT}	7,16
			U_{TOT}	**0,139**

Strato1 – Montante		Spessore (cm)	l(W/mK)	R(m²K/W)
	Rsi			0,13
1	Lastra cartongrsso	1,3	0,21	0,06
2	Pannello cementolegno	5	0,035	4,00
3	OSB/3	1,8	0,1	0,18
4	Freno vapore	0,078	0,22	0,00
5	Montante lamellare in abete	16	0,14	1,14
6	Membrana imp.trasp	0,065	0,22	0,00
7	OSB/3	1,8	0,1	0,18
8	Lana di legno mineralizzata	5	0,065	0,77
9	Rasatura minerale	0,7	0,3	0,02
10	Intonachino silossanico	0,15	0,7	0,00
	Rse			0,04
			R_{TOT}	3,32
			U_{TOT}	0,301
			Rtot = (RT1 + RT2)/2 = 5,91	
			U=1/RTOT = 0,169 [W/m2K]	

Tabella 16 - PLATFORM-F Trasmittanza termica

5.1.1.2 Trasmittanza termica lineica

La valutazione della trasmittanza termica lineica è stata effettuata mediante il software Therm 7.8 sopra descritto.

Nel rappresentare la geometria dell'elemento si sono considerati i limiti geometrici definiti dalla norma UNI EN ISO 10211 [36], la quale stabilisce la distanza minima da dover considerare per definire il piano di taglio adiabatico.

Per tutte le sezioni analizzate sono state utilizzate le medesime condizioni al contorno di temperatura e resistenza superficiali presenti sui bordi delle sezioni stesse. In particolare, sono state considerate le temperature esterne ed interne rispettivamente pari a 20°C e 7.3°C (temperatura media giornaliera più fredda nella località di Ancona), ed un coefficiente di scambio termico superficiale esterno di 25 W/m^2K ed interno di 7.69 W/m^2K.

Di seguito si riportano le analisi effettuate per le due tecnologie costruttive indagate ed i relativi valori trasmittanza termica lineica ψ ottenuti.

SIP

1) SIP1-NF

Della tipologia SIP1-NF (Figura 87) è stata valutata solo ed esclusivamente la trasmittanza termica in quanto non presenta ponti termici né costruttivi, né geometrici. Questa è stata determinata secondo la norma UNI EN ISO 6946 [34], ottenendo un valore pari a U=0.23 W/m²K (Tabella 7).

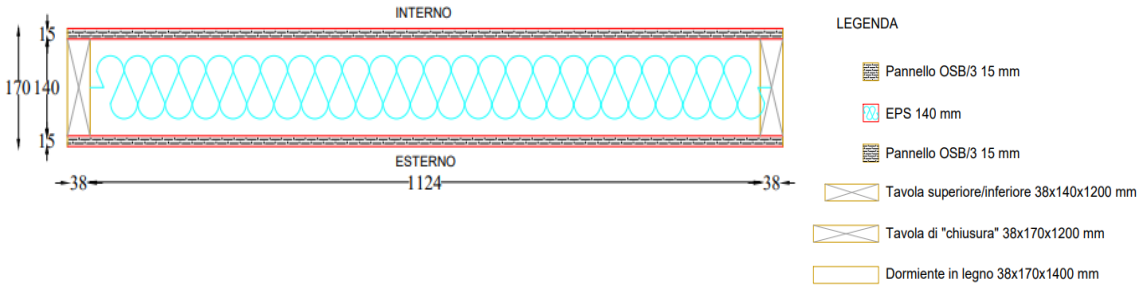


Figura 87 - SIP1-NF

2) SIP2-NF

La sezione (Figura 88) oggetto di analisi presenta la connessione Block Spline e quindi è stata analizzata mediante l'utilizzo del software per poterne valutare il ponte termico.

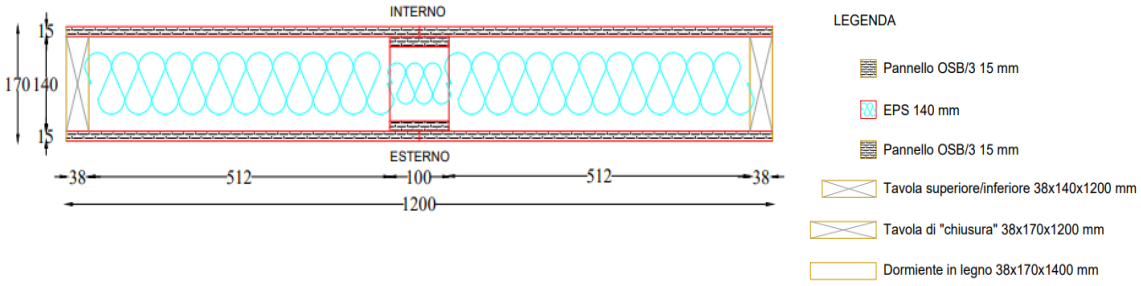


Figura 88 - SIP2-NF

Per l'elaborazione del ponte termico è stato necessario rappresentare la sezione di dettaglio facendo riferimento alla norma UNI EN ISO 10211 [36] relativa alla definizione dei piani di taglio e predisporre un file in formato DXF. Importando

il file all'interno del software Therm 7.8 si è rappresentato ogni strato che compone l'elemento mediante l'uso di poligoni che caratterizzano la stratigrafia. A questi sono poi stati attribuiti i materiali definiti per il modello geometrico. Di seguito se ne riporta l'elenco con i relativi valori di conducibilità.

		λ(W/mK)
1	OSB/3	0,13
2	EPS	0,035
3	OSB/3	0,13

Una volta attribuite le condizioni al contorno (temperatura e coefficiente di scambio termico) esterne ed interne si è potuto elaborare il modello ottenendo la distribuzione di temperatura all'interno dell'elemento (Figura 89).

Nella tabella sotto è riportata la scala cromatica relativa all'intervallo di temperatura; le temperature massime e minime fanno riferimento alle temperature calcolate sulle facce, al confine con l'ambiente interno ed esterno. La Figura 90 evidenzia invece, la distribuzione del flusso all'interno della sezione considerata.

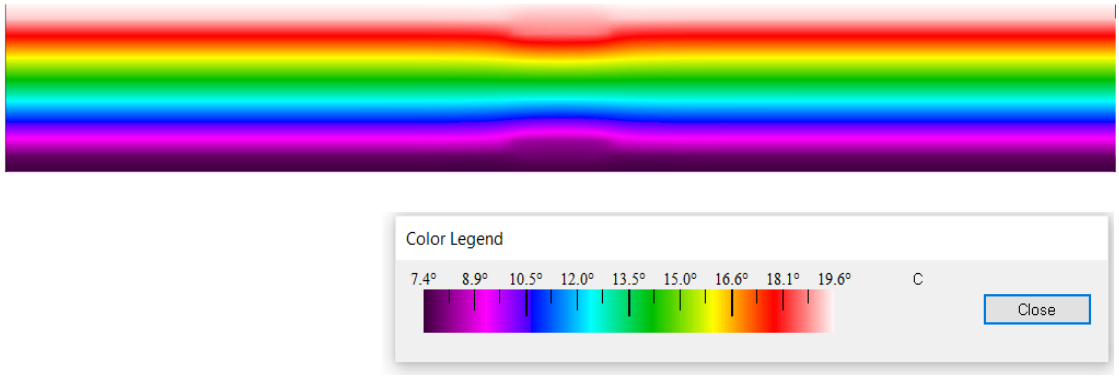


Figura 89 - SIP2-NF Distribuzione temperature

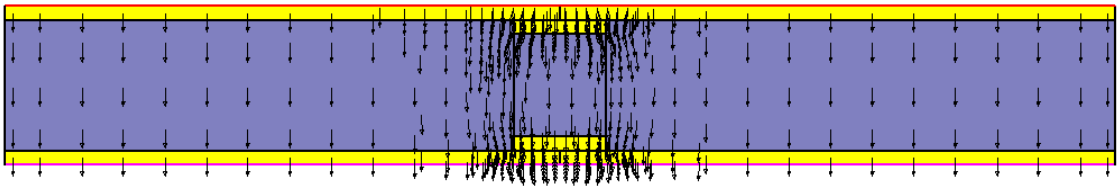
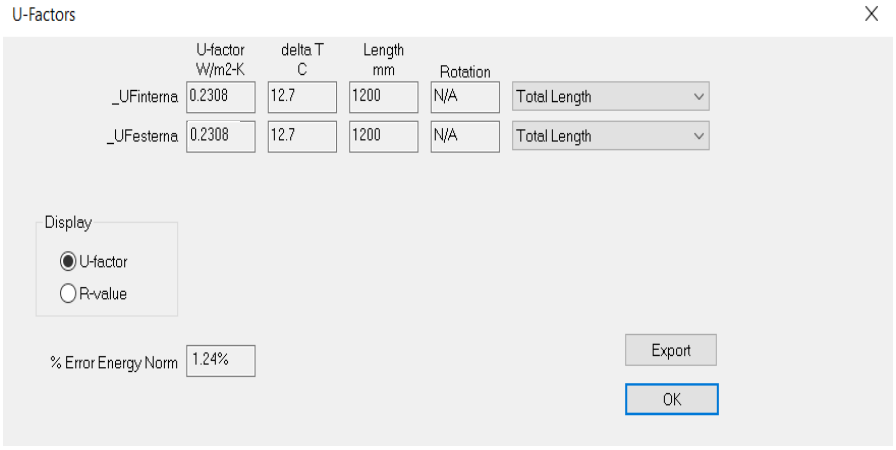


Figura 90 - SIP2-NP Distribuzione flusso

In coerenza con le condizioni al contorno assegnate al modello sono stati ottenuti i seguenti risultati:



Il valore di trasmittanza calcolato da Therm è stato poi utilizzato per la determinazione del valore di trasmittanza termica lineica che rappresenta il ponte termico.

Si è proceduto moltiplicando il valore di trasmittanza per la lunghezza considerata:

_UFesterna L2D = (0.2308 * 1.20) = 0.27696 W/mK

_UFinterna L2D = (0.2308 * 1.20) = 0.27696 W/mK

Dopo di che è stata calcolata la trasmittanza termica della parete secondo il metodo previsto dalla norma UNI EN 6946 [34], ottenendo un valore U=0.23 W/m^2K (Tabella 8).

In ultimo si è calcolato il coefficiente di scambio termico delle superfici considerate omogenee senza ponte termico e la relativa trasmittanza termina lineica PT distinta per filo esterno ed interno.

Filo esterno He = (0.23*1.20) = 0.276 W/m^2K

Filo interno Hi = (0. 23*1.20) = 0.276 W/m^2K

Filo esterno He = L2D – He = 0.27696 – 0.276 = 0.00096 W/m^{2}K

Filo interno Hi = L2D – Hi = 0.27696 – 0.276 = 0.00096 W/m^{2}K

Avendo il modello una lunghezza interna ed esterna coincidente, il ponte termico sarà definito pari a 0.00096 W/m^{2}K.

La trasmittanza termica per la parete SIP2-NF definita dal Therm risulta essere pari a 0,2308 W/m^{2}K, valore quasi coincidente con quello calcolato analiticamente.

3) SIP3-NF

La sezione (Figura 91) oggetto di analisi presenta la connessione Surface Spline e quindi è stata analizzata mediante l'utilizzo del software per poterne valutare il ponte termico.

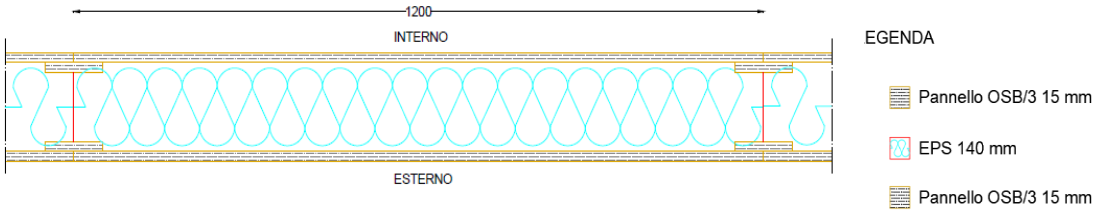


Figura 91 - SIP3-NF

Per l'elaborazione del ponte termico è stata rappresentata la sezione con lo stesso procedimento precedentemente visto. I materiali assegnati ai poligoni che compongono la sezione sono di seguito riportati.

		λ(W/mK)
1	OSB/3	0,13
2	EPS	0,035
3	OSB/3	0,13

Una volta attribuite le condizioni al contorno (temperatura e coefficiente di scambio termico) esterne ed interne si è potuto elaborare il modello ottenendo la distribuzione di temperatura all'interno dell'elemento (Figura 92).

Anche in questo caso, le temperature massime e minime fanno riferimento alle temperature calcolate sulle facce, al confine con l'ambiente interno ed esterno.

La Figura 93 evidenzia invece, la distribuzione del flusso all'interno della sezione considerata.

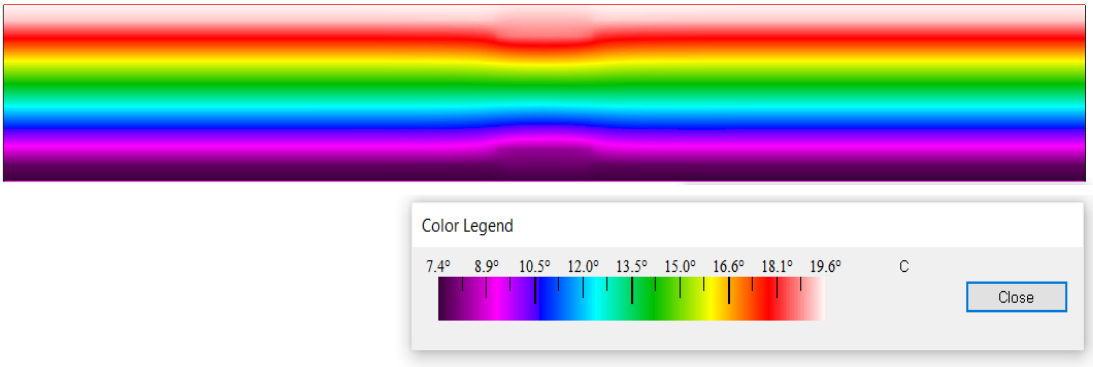


Figura 92 - SIP3-NF Distribuzione temperature

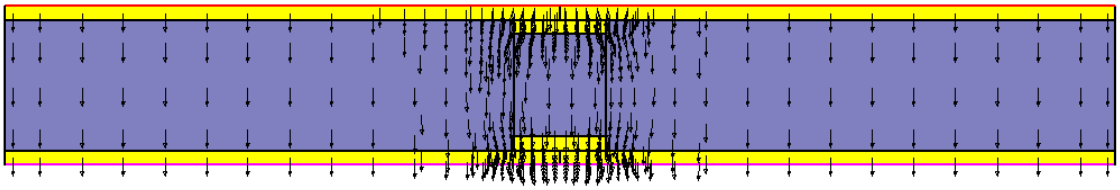
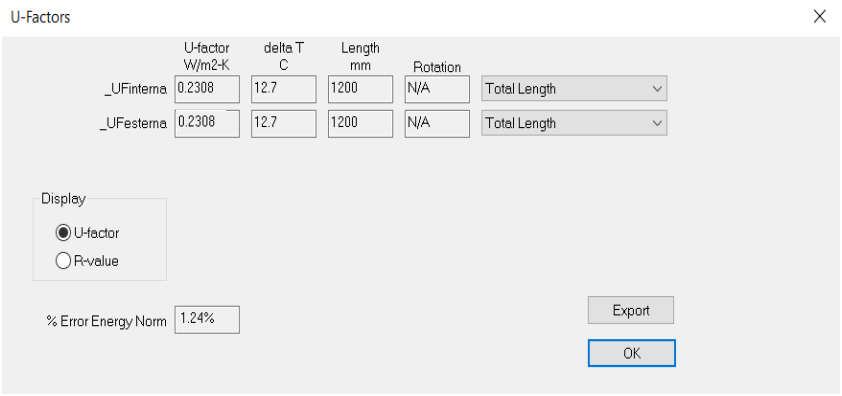


Figura 93 - SIP3-NF Distribuzione flussi

In coerenza con le condizioni al contorno assegnate al modello sono stati ottenuti i seguenti risultati:



Il valore di trasmittanza calcolato da Therm è stato poi utilizzato per la determinazione del valore di trasmittanza termica lineica che rappresenta il ponte termico.
Si è proceduto moltiplicando il valore di trasmittanza per la lunghezza considerata:

_UFesterna L2D = (0.2308 * 1.20) = 0.27696 W/mK

_UFinterna L2D = (0.2308 * 1.20) = 0.27696 W/mK

Dopo di ché è stata calcolata la trasmittanza termica della parete secondo il metodo previsto dalla norma UNI EN 6946 [34], ottenendo un valore U=0.23 W/m^2K (Tabella 9).

In ultimo si è calcolato il coefficiente di scambio termico delle superfici considerate omogenee senza ponte termico e la relativa trasmittanza termina lineica PT distinta per filo esterno ed interno.

Filo esterno He = (0.23*1.20) = 0.276 W/m2K

Filo interno Hi = (0. 23*1.20) = 0.276 W/m2K

Filo esterno He = L2D – He = 0.27696 – 0.276 = 0.00096 W/m2K

Filo interno Hi = L2D – Hi = 0.27696 – 0.276 = 0.00096 W/m2K

Avendo il modello una lunghezza interna ed esterna coincidente, il ponte termico sarà definito pari a 0.00096 W/m2K.

La trasmittanza termica per la parete SIP3-NF definita dal Therm risulta essere pari a 0,2308 W/m^2K, valore quasi coincidente con quello calcolato analiticamente.

4) SIP4-NF

La sezione (Figura 94) oggetto di analisi presenta la connessione Surface Spline e quindi è stata analizzata mediante l'utilizzo del software per poterne valutare il ponte termico.

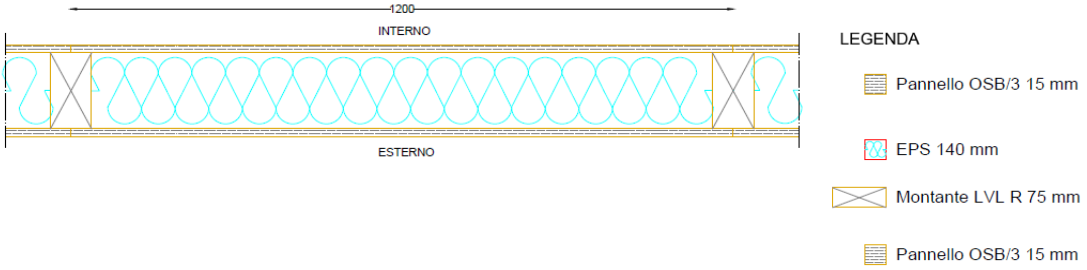


Figura 94 - SIP4-NF

Per l'elaborazione del ponte termico è stata rappresentata la sezione con lo stesso procedimento precedentemente visto. I materiali assegnati ai poligoni che compongono la sezione sono di seguito riportati.

		λ(W/mK)
1	OSB/3	0,13
2	EPS	0,035
3	OSB/3	0,13
4	Montante LVL R	0,13

Una volta attribuite le condizioni al contorno (temperatura e coefficiente di scambio termico) esterne ed interne si è potuto elaborare il modello ottenendo la distribuzione di temperatura all'interno dell'elemento (Figura 95).

Anche in questo caso, le temperature massime e minime fanno riferimento alle temperature calcolate sulle facce, al confine con l'ambiente interno ed esterno. La distribuzione dei flussi è evidenziata in Figura 96.

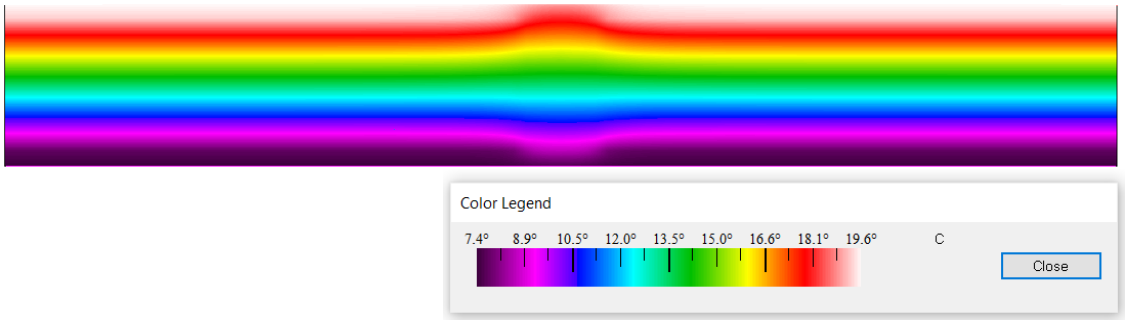


Figura 95 - SIP4-NF Distribuzione temperature

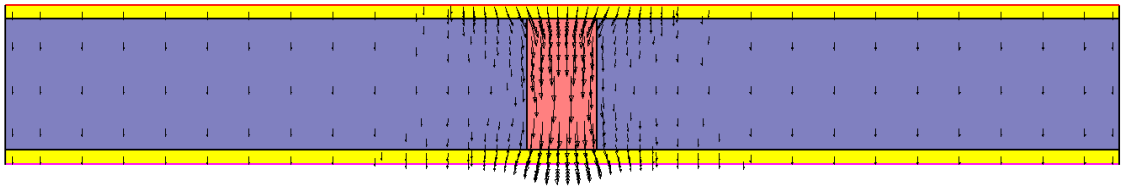
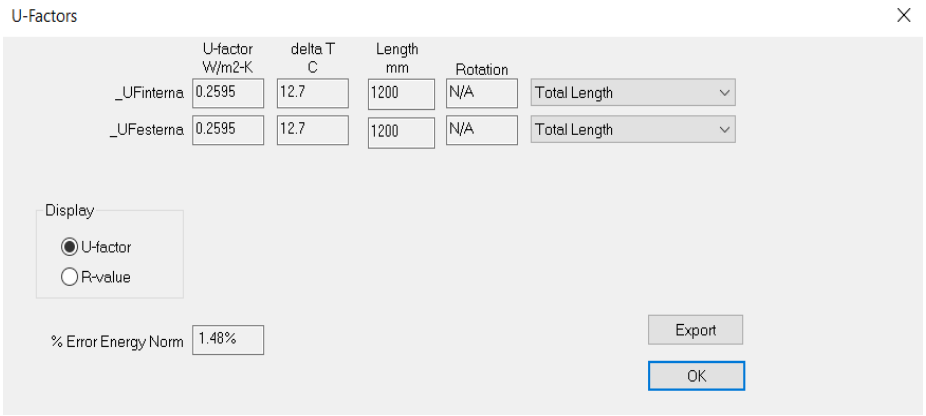


Figura 96 - SIP4-NF Distribuzione flussi

In coerenza con le condizioni al contorno assegnate al modello sono stati ottenuti i seguenti risultati:



Il valore di trasmittanza calcolato da Therm è stato poi utilizzato per la determinazione del valore di trasmittanza termica lineica che rappresenta il ponte termico.
Si è proceduto moltiplicando il valore di trasmittanza per la lunghezza considerata:

_UFesterna L2D = (0.2595 * 1.20) = 0.3114 W/mK

_UFinterna L2D = (0.2595 * 1.20) = 0.3114 W/mK

Dopo di ché è stata calcolata la trasmittanza termica della parete secondo il metodo previsto dalla norma UNI EN 6946 [34], ottenendo un valore U=0.23 W/m^2K (Tabella 10).

In ultimo si è calcolato il coefficiente di scambio termico delle superfici considerate omogenee senza ponte termico e la relativa trasmittanza termina lineica PT distinta per filo esterno ed interno.

Filo esterno He = (0.23*1.20) = 0. 276 W/m^2K

Filo interno Hi = (0.23*1.20) = 0. 276 W/m^2K

Filo esterno He = L2D – He = 0.3114– 0.276 = 0.0354 W/m^2K

Filo interno Hi = L2D – Hi = 0.3114– 0.276 = 0.0354 W/m^2K

Avendo il modello una lunghezza interna ed esterna coincidente, il ponte termico sarà definito circa pari a 0.0354 W/m^2K.

La trasmittanza termica per la parete SIP4-NF definita dal Therm risulta essere pari a 0,2595 W/m^2K, valore quasi coincidente con quello calcolato analiticamente.

5) SIP1-F

Come già specificato, della tipologia SIP1-F (Figura 97) è stata valutata solo ed esclusivamente la trasmittanza termica in quanto non presenta ponti termici né costruttivi, né geometrici.

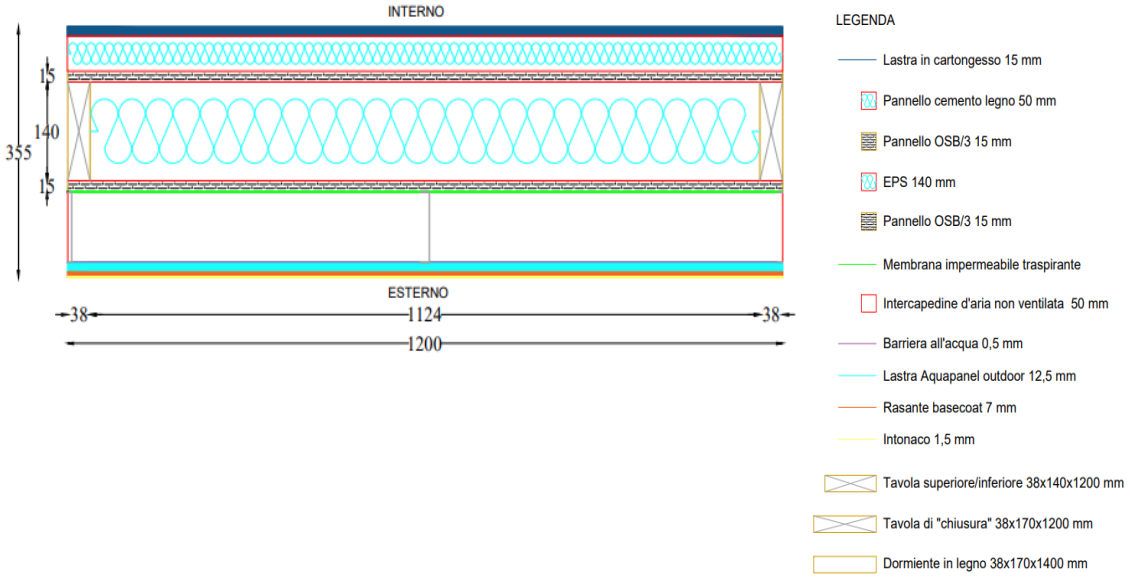


Figura 97 - SIP1-F

La trasmittanza termica della struttura è stata determinata con la metodologia prevista dalla norma UNI EN ISO 6946 [34], ottenendo un valore pari a U=0.18 W/m²K (Tabella 11).

6) SIP2-F

La sezione (Figura 98) oggetto di analisi presenta la connessione Block Spline e quindi è stata analizzata mediante l'utilizzo del software per poterne valutare il ponte termico.

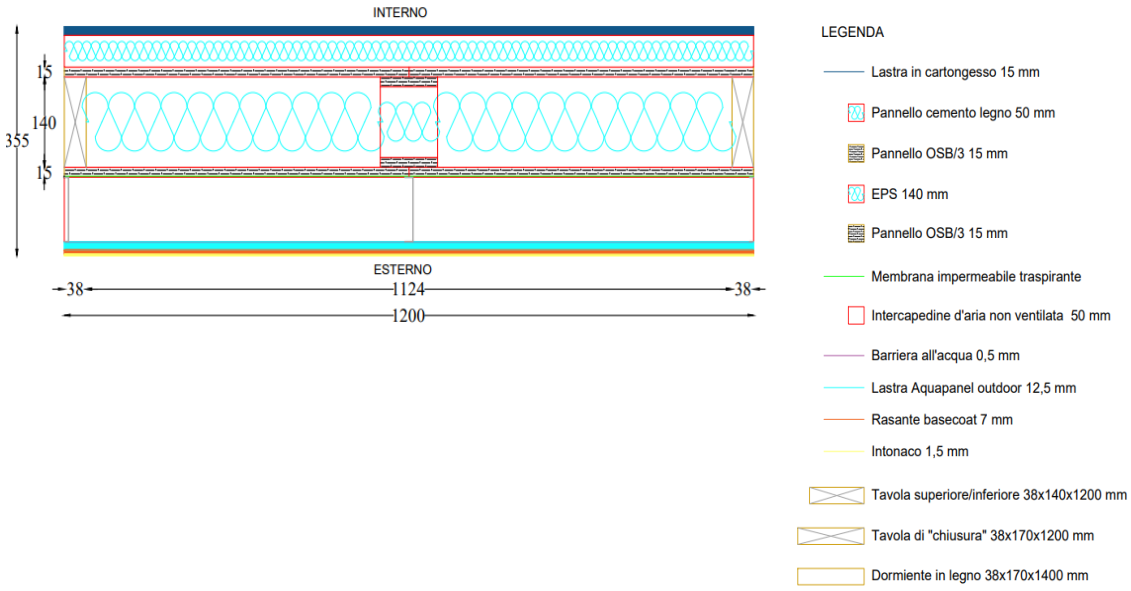


Figura 98 - SIP2-F

Per l'elaborazione del ponte termico è stato necessario rappresentare la sezione di dettaglio facendo riferimento alla norma UNI EN ISO 10211 [36] relativa alla definizione dei piani di taglio e predisporre un file in formato DXF. Importando il file all'interno del software Therm 7.8 si è rappresentato ogni strato che compone l'elemento mediante l'uso di poligoni che caratterizzano la stratigrafia. A questi sono poi stati attribuiti i materiali definiti per il modello geometrico.

Di seguito se ne riporta l'elenco con i relativi valori di conducibilità.

		λ(W/mK)
1	Lastra cartongesso	0,21
2	Pannello cementolegno	0,065
3	OSB/3	0,13
4	EPS	0,035

5	OSB/3	0,13
6	Membrana imp. Traspirante	0,22
7	Intercapedine aria non vent.	0,18
8	Barriera all'acqua	0,17
9	Lastra Aquapanel Outdoor	0,35
10	Rasante Basecoat	0,54
11	Intonachino silossanico	0,7

Una volta attribuite le condizioni al contorno (temperatura e coefficiente di scambio termico) esterne ed interne si è potuto elaborare il modello ottenendo la distribuzione di temperatura all'interno dell'elemento (Figura 99). Nella tabella sotto è riportata la scala cromatica relativa all'intervallo di temperatura; le temperature massime e minime fanno riferimento alle temperature calcolate sulle facce, al confine con l'ambiente interno ed esterno. La distribuzione dei flussi è visibile in Figura 100.

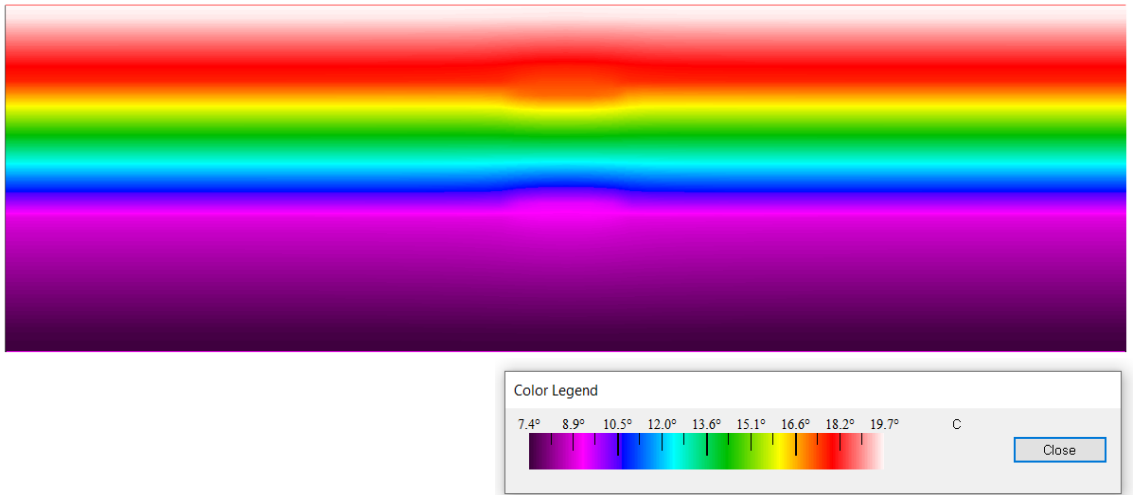


Figura 99 - SIP2-F Distribuzione temperature

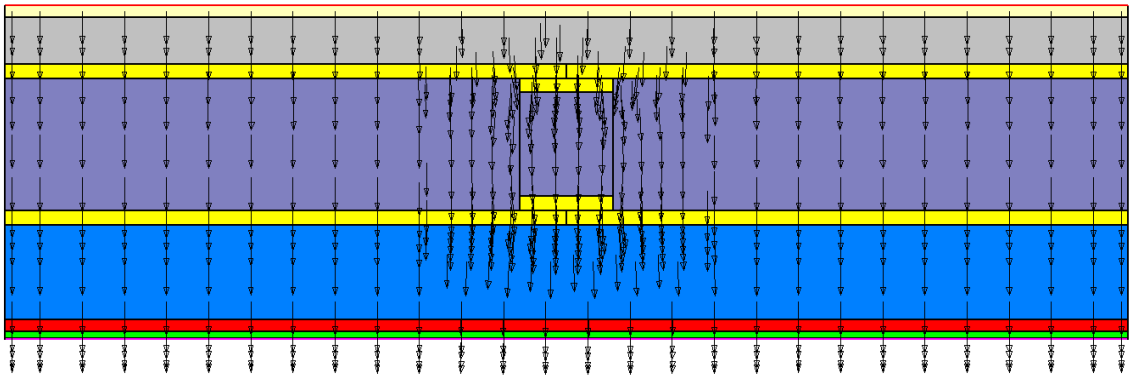
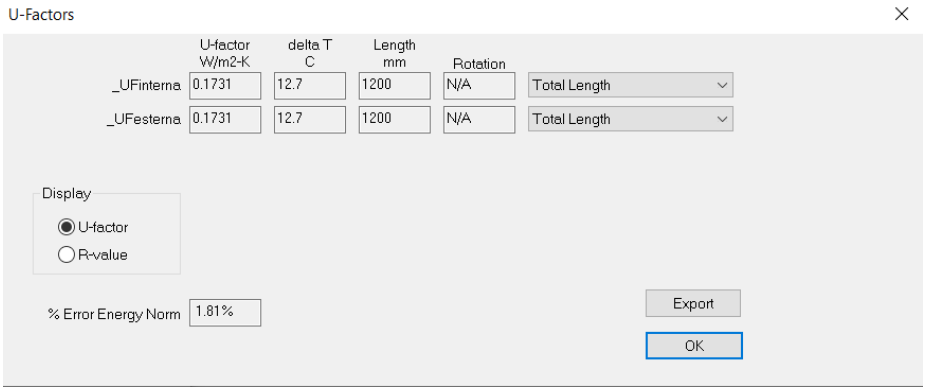


Figura 100 - SIP2-F Distribuzione flussi

In coerenza con le condizioni al contorno assegnate al modello sono stati ottenuti i seguenti risultati:



Il valore di trasmittanza calcolato da Therm è stato poi utilizzato per la determinazione del valore di trasmittanza termica lineica che rappresenta il ponte termico.

Si è proceduto moltiplicando il valore di trasmittanza per la lunghezza considerata:

_UFesterna L2D = (0.1731 * 1.20) = 0.20772 W/mK

_UFinterna L2D = (0.1731 * 1.20) = 0.20772 W/mK

Dopo di ché è stata calcolata la trasmittanza termica della parete secondo il metodo previsto dalla norma UNI EN 6946 [34], ottenendo un valore U=0.17 W/m^2K (Tabella 12).

In ultimo si è calcolato il coefficiente di scambio termico delle superfici considerate omogenee senza ponte termico e la relativa trasmittanza termina lineica PT distinta per filo esterno ed interno.

Filo esterno He = (0.17*1.20) = 0.204 W/m^2K

Filo interno Hi = (0.17*1.20) = 0.204 W/m^2K

Filo esterno He = L2D – He = 0.20772 – 0.204 = 0.00372 W/m^2K

Filo interno Hi = L2D – Hi = 0.20772 – 0.204 = 0.00372 W/m^2K

Avendo il modello una lunghezza interna ed esterna coincidente, il ponte termico sarà definito pari a 0.00372 W/m^2K.

La trasmittanza termica per la parete SIP2-F definita dal Therm risulta essere pari a 0,1731 W/m^2K, valore quasi coincidente con quello calcolato analiticamente.

7) SIP3-F

La sezione (Figura 101) oggetto di analisi presenta la connessione Surface Spline e quindi è stata analizzata mediante l'utilizzo del software per poterne valutare il ponte termico.

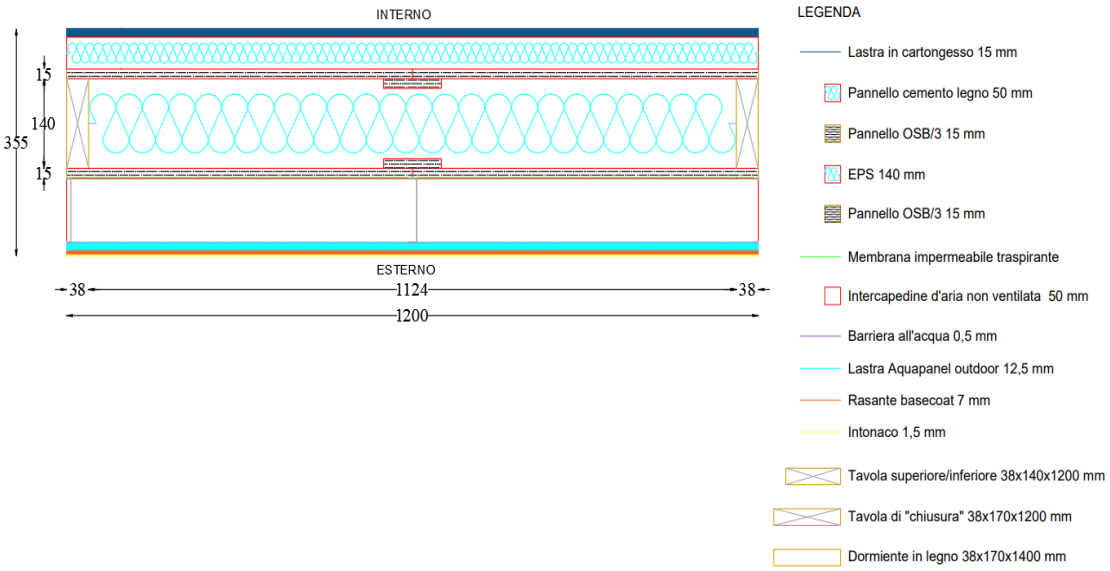


Figura 101 - SIP3-F

Per l'elaborazione del ponte termico è stata rappresentata la sezione con lo stesso procedimento precedentemente visto. I materiali assegnati ai poligoni che compongono la sezione sono di seguito riportati.

		λ(W/mK)
1	Lastra cartongesso	0,21
2	Pannello cementolegno	0,065
3	OSB/3	0,13
4	EPS	0,035
5	OSB/3	0,13
6	Membrana imp. Traspirante	0,22
7	Intercapedine aria non vent.	0,18
8	Barriera all'acqua	0,17

9	Lastra Aquapanel Outdoor	0,35
10	Rasante Basecoat	0,54
11	Intonachino silossanico	0,7

Una volta attribuite le condizioni al contorno (temperatura e coefficiente di scambio termico) esterne ed interne si è potuto elaborare il modello ottenendo la distribuzione di temperatura (Figura 102) e dei flussi (Figura 103) all'interno dell'elemento. Anche in questo caso, le temperature massime e minime fanno riferimento alle temperature calcolate sulle facce, al confine con l'ambiente interno ed esterno.

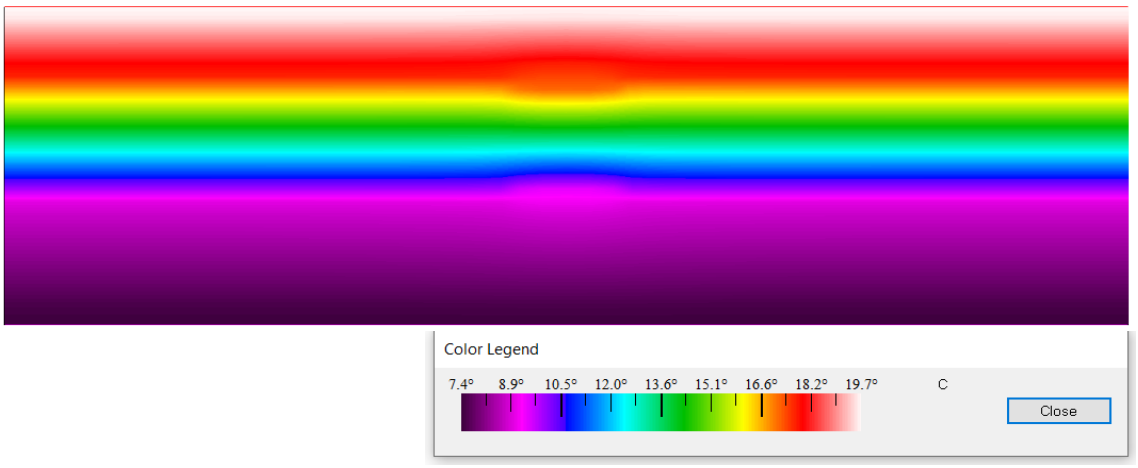


Figura 102 - SIP3-F Distribuzione temperature

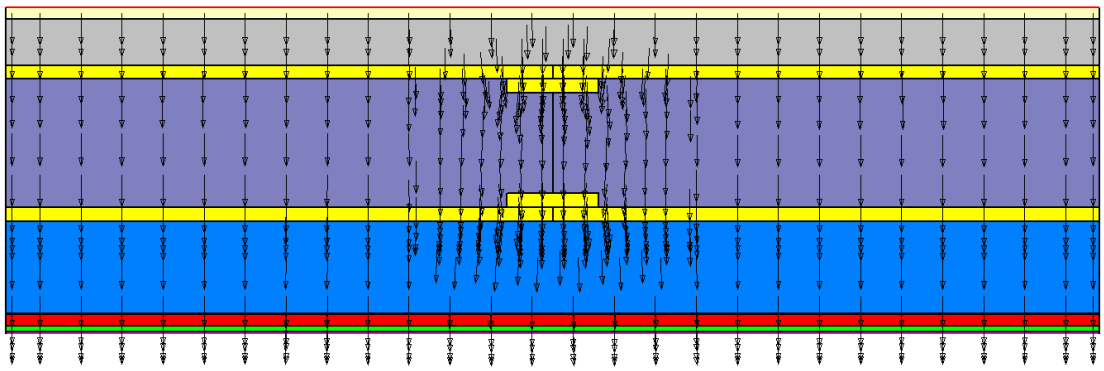
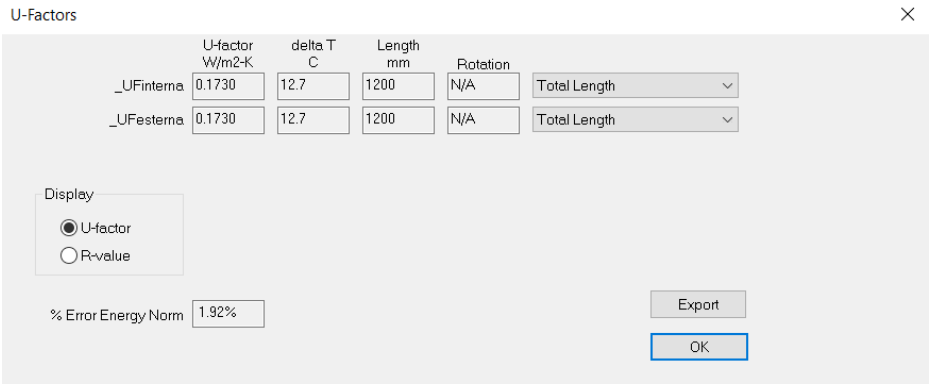


Figura 103 - SIP3-F Distribuzione flussi

Sono stati ottenuti i seguenti risultati:



Il valore di trasmittanza calcolato da Therm è stato poi utilizzato per la determinazione del valore di trasmittanza termica lineica che rappresenta il ponte termico. Si è proceduto moltiplicando il valore di trasmittanza per la lunghezza considerata:

_UFesterna L2D = (0.1730 * 1.20) = 0.2076 W/mK

_UFinterna L2D = (0.1730 * 1.20) = 0.2076 W/mK

Dopo di ché è stata calcolata la trasmittanza termica della parete secondo il metodo previsto dalla norma UNI EN 6946 [34], ottenendo un valore U=0.17 W/m^2K (Tabella 13). In ultimo si è calcolato il coefficiente di scambio termico delle superfici considerate omogenee senza ponte termico e la relativa trasmittanza termina lineica PT distinta per filo esterno ed interno.

Filo esterno He = (0.17*1.20) = 0.204 W/m^2K

Filo interno Hi = (0.17*1.20) = 0.204 W/m^2K

Filo esterno He = L2D – He = 0.2076 – 0.204 = 0.0036 W/m^2K

Filo interno Hi = L2D – Hi = 0.2076 – 0.204 = 0.0036 W/m^2K

Avendo il modello una lunghezza interna ed esterna coincidente, il ponte termico sarà definito pari a 0.0036 W/m^2K. La trasmittanza termica per la parete SIP3-F

definita dal Therm risulta essere pari a 0,1730 W/m²K, valore quasi coincidente con quello calcolato analiticamente.

8) SIP4-F

La sezione (Figura 104) oggetto di analisi presenta la connessione Surface Spline e quindi è stata analizzata mediante l'utilizzo del software per poterne valutare il ponte termico.

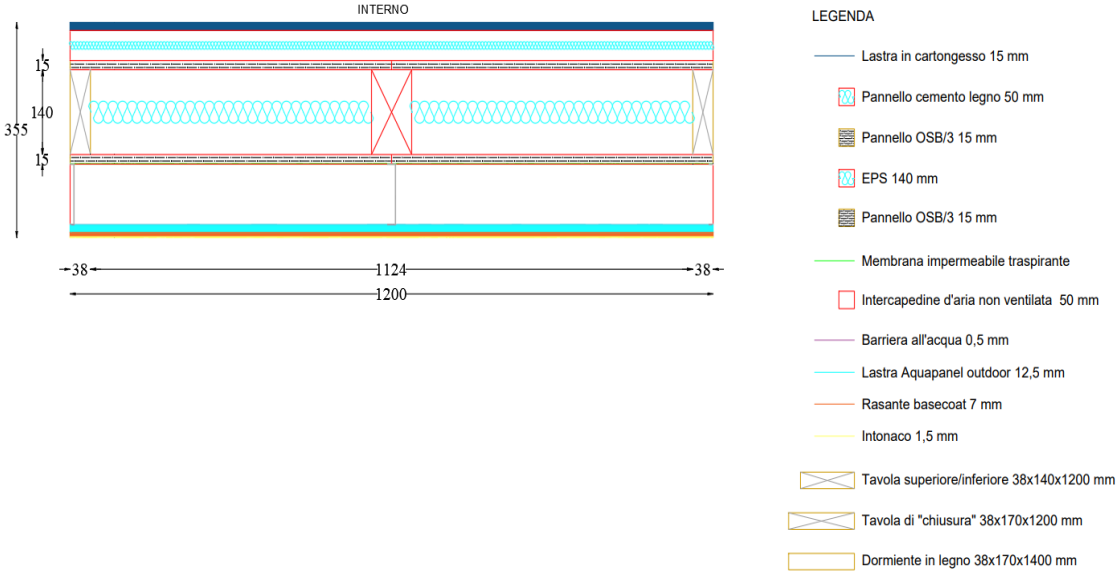


Figura 104 - SIP4-F

Per l'elaborazione del ponte termico è stata rappresentata la sezione con lo stesso procedimento precedentemente visto. I materiali assegnati ai poligoni che compongono la sezione sono di seguito riportati.

		λ(W/mK)
1	Lastra cartongesso	0,21
2	Pannello cementolegno	0,065
3	OSB/3	0,13
4	EPS	0,035
5	OSB/3	0,13
6	Membrana imp. Traspirante	0,22

7	Intercapedine aria non vent.	0,18
8	Barriera all'acqua	0,17
9	Lastra Aquapanel Outdoor	0,35
10	Rasante Basecoat	0,54
11	Intonachino silossanico	0,7
12	Montate LVL R	0,13

Una volta attribuite le condizioni al contorno (temperatura e coefficiente di scambio termico) esterne ed interne si è potuto elaborare il modello ottenendo la distribuzione di temperatura (Figura 105) e flusso (Figura 106) all'interno dell'elemento. Anche in questo caso, le temperature massime e minime fanno riferimento alle temperature calcolate sulle facce, al confine con l'ambiente interno ed esterno.

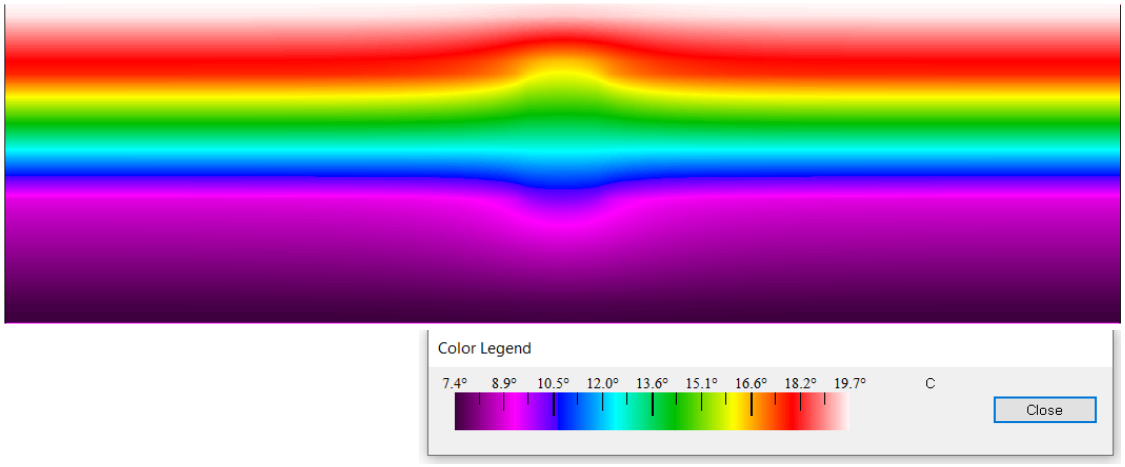


Figura 105 - SIP4-F Distribuzione temperature

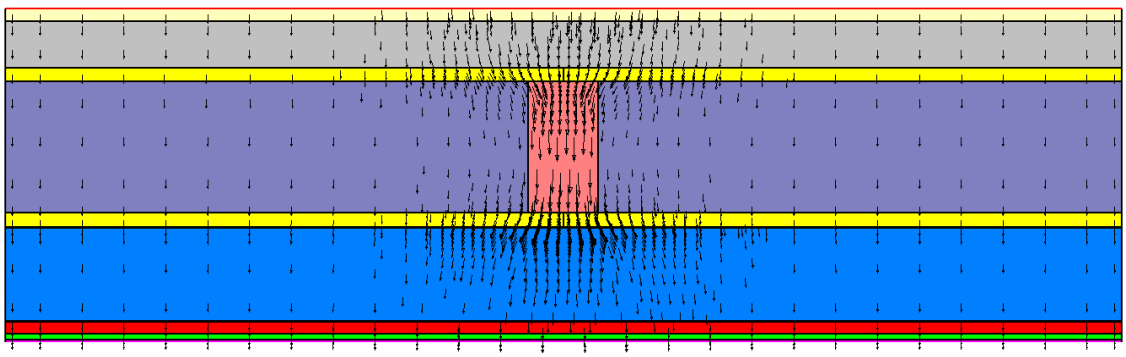
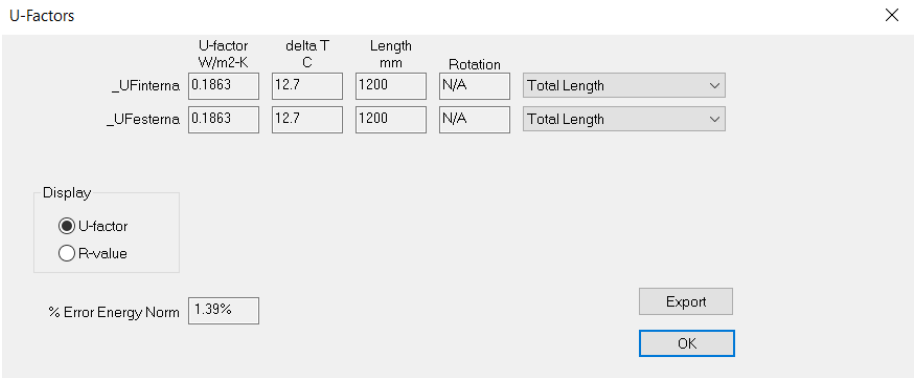


Figura 106 - SIP4-F Distribuzione flussi

In coerenza con le condizioni al contorno assegnate al modello sono stati ottenuti i seguenti risultati:



Il valore di trasmittanza calcolato da Therm è stato poi utilizzato per la determinazione del valore di trasmittanza termica lineica che rappresenta il ponte termico. Si è proceduto moltiplicando il valore di trasmittanza per la lunghezza considerata:

_UFesterna L2D = (0.1863 * 1.20) = 0.22356 W/mK

_UFinterna L2D = (0.1863 * 1.20) = 0.22356 W/mK

Dopo di ché è stata calcolata la trasmittanza termica della parete secondo il metodo previsto dalla norma UNI EN 6946 [34], ottenendo un valore U=0.17 W/m^2K (Tabella 14). In ultimo si è calcolato il coefficiente di scambio termico delle superfici considerate omogenee senza ponte termico e la relativa trasmittanza termina lineica PT distinta per filo esterno ed interno.

Filo esterno He = (0.17*1.20) = 0.204 W/m^2K

Filo interno Hi = (0.17*1.20) = 0.204 W/m^2K

Filo esterno He = L2D – He = 0.22356 – 0.204 = 0.01956 W/m^2K

Filo interno Hi = L2D – Hi = 0.22356 – 0.204 = 0.01956 W/m^2K

Il ponte termico è definito pari a 0.01956 W/m²K e la trasmittanza termica 0,1863 W/m²K è prossima a quella calcolata analiticamente.

PLATFORM FRAME

1) *PLATFORM*-NF

La valutazione del ponte termico è stata effettuata per il Platform Frame in maniera analoga ai campioni SIP. La sezione analizzata mediante il software Therm è di seguito rappresentata (Figura 107).

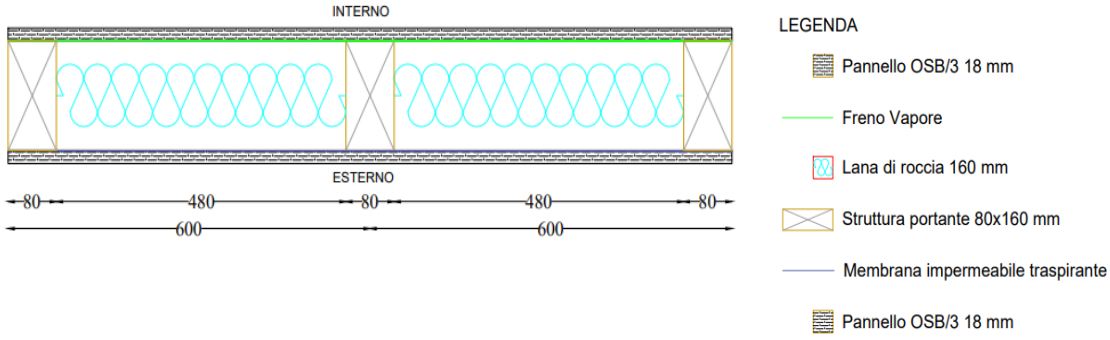


Figura 107 - PLATFORM-NF

Per l'elaborazione del ponte termico è stato necessario rappresentare la sezione di dettaglio facendo riferimento alla norma UNI EN ISO 10211 [36] relativa alla definizione dei piani di taglio e predisporre un file in formato DXF. Importando il file all'interno del software Therm 7.8 si è rappresentato ogni strato che compone l'elemento mediante l'uso di poligoni che caratterizzano la stratigrafia. A questi sono poi stati attribuiti i materiali definiti per il modello geometrico. Di seguito se ne riporta l'elenco con i relativi valori di conducibilità.

		λ(W/mK)
1	OSB/3	0,1
2	Freno a vapore	0,22
3	Lana di roccia	0,032

4	Membrana imp. Traspirante	0,22
5	OSB/3	0,1

Una volta attribuite le condizioni al contorno (temperatura e coefficiente di scambio termico) esterne ed interne si è potuto elaborare il modello ottenendo la distribuzione di temperatura (Figura 108) e del flusso (Figura 109) all'interno dell'elemento. Nella tabella sotto è riportata la scala cromatica relativa all'intervallo di temperatura; le temperature massime e minime fanno riferimento alle temperature calcolate sulle facce, al confine con l'ambiente interno ed esterno.

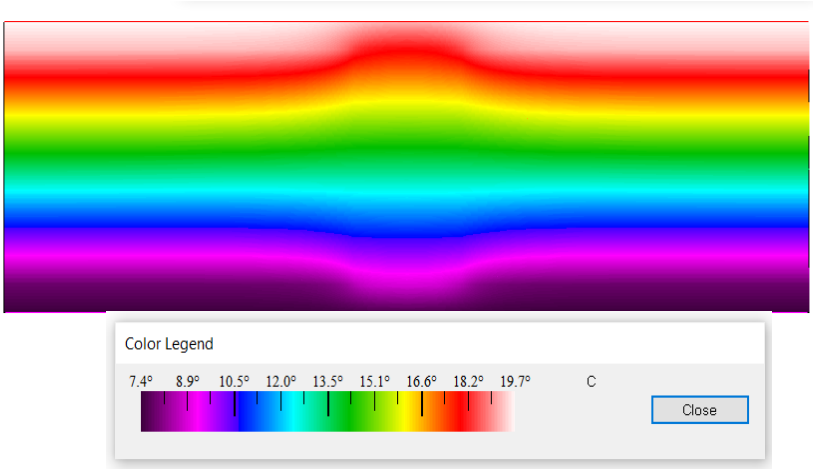


Figura 108 - PLATFORM-NF Distribuzione temperature

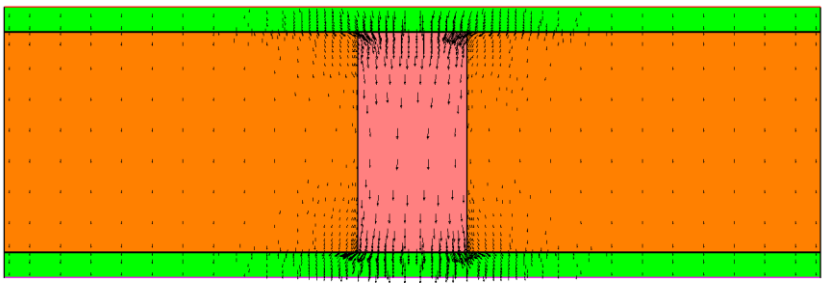
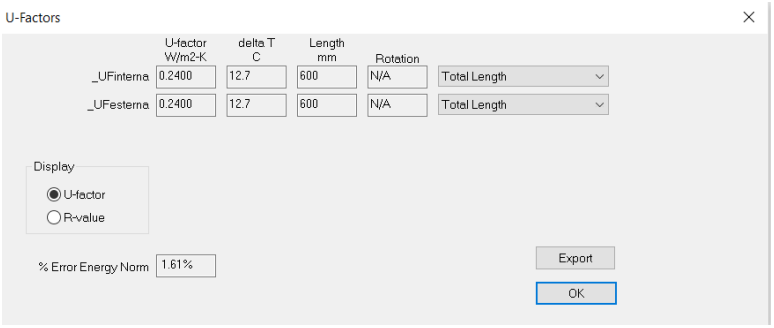


Figura 109 - PLATFORM-NF Distribuzione flussi

In coerenza con le condizioni al contorno assegnate al modello sono stati ottenuti i seguenti risultati:



Il valore di trasmittanza calcolato da Therm è stato poi utilizzato per la determinazione del valore di trasmittanza termica lineica che rappresenta il ponte termico. Si è proceduto moltiplicando il valore di trasmittanza per la lunghezza considerata:

_UFesterna L2D = (0.24 * 1.20) = 0.288 W/mK

_UFinterna L2D = (0.24 * 1.20) = 0.288 W/mK

Dopo di ché è stata calcolata la trasmittanza termica della parete secondo il metodo previsto dalla norma UNI EN 6946 [34], ottenendo un valore U=0.1806 W/m²K (Tabella 15). In ultimo si è calcolato il coefficiente di scambio termico delle superfici considerate omogenee senza ponte termico e la relativa trasmittanza termina lineica PT distinta per filo esterno ed interno.

Filo esterno He = (0.18*1.20) = 0.216 W/m²K

Filo interno Hi = (0.18*1.20) = 0.216 W/m²K

Filo esterno He = L2D – He = 0.288 – 0.216 = 0.072 W/m²K

Filo interno Hi = L2D – He = 0.288 – 0.216 = 0.072 W/m²K

Avendo il modello una lunghezza interna ed esterna coincidente, il ponte termico sarà definito pari a 0. 072 W/m²K. La trasmittanza termica ottenuta con il Therm è pari a 0,18 W/m²K.

2) PLATFORM-F

La valutazione del ponte termico nel campione con le finiture è stata eseguita con la stessa procedura fino ad ora descritta. In Figura 110 si evidenzia la sezione analizzata.

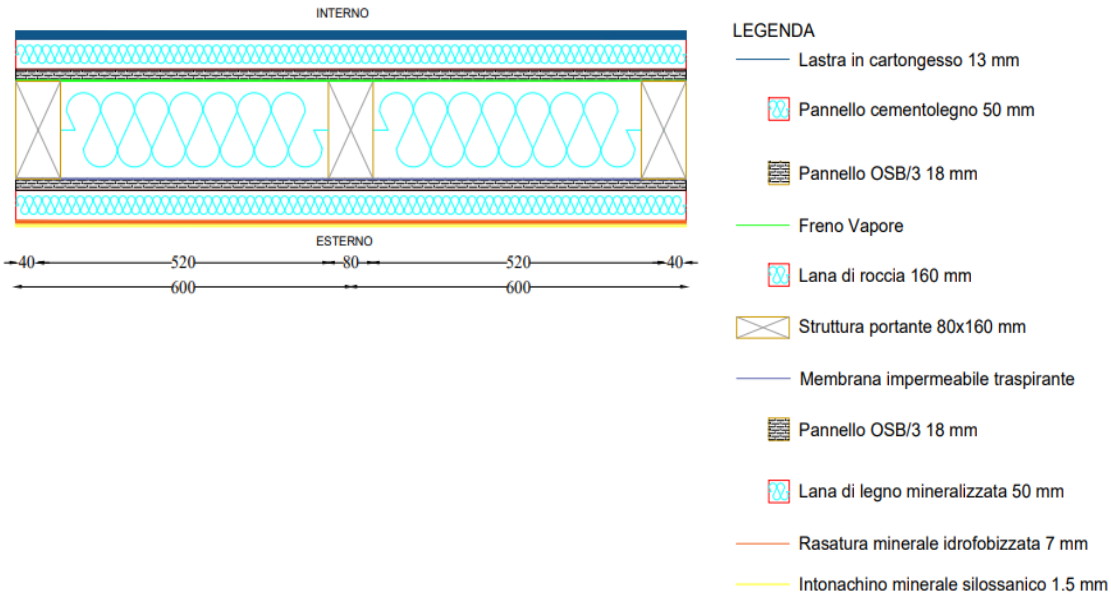


Figura 110 - PLATFORM-F

Per l'elaborazione del ponte termico è stata rappresentata la sezione con lo stesso procedimento precedentemente visto. I materiali assegnati ai poligoni che compongono la sezione sono di seguito riportati.

		λ(W/mK)
1	Lastra cartongesso	0,21
2	Pannello cementolegno	0,065
3	OSB/3	0,1
4	Freno a vapore	0,22
5	Lana di roccia	0,032

6	Membrana imp. Traspirante	0,22
7	OSB/3	0,1
8	Lana di legno mineralizzata	0,065
9	Rasatura minerale idrofobizzata	0,3
10	Intonachino silossanico	0,7

Dopo aver attribuito le condizioni al contorno è stato elaborato il modello ottenendo una distribuzione delle temperature (Figura 111) e dei flussi (Figura 112) all'interno dell'elemento considerato. Anche in questo caso, le temperature massime e minime fanno riferimento alle temperature calcolate sulle facce, al confine con l'ambiente interno ed esterno.

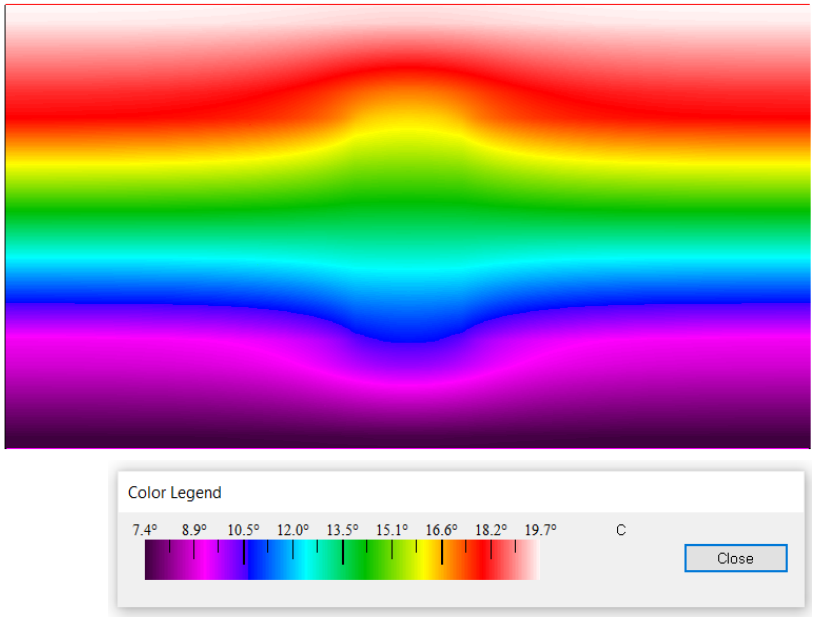


Figura 111 - PLATFORM-F Distribuzione temperature

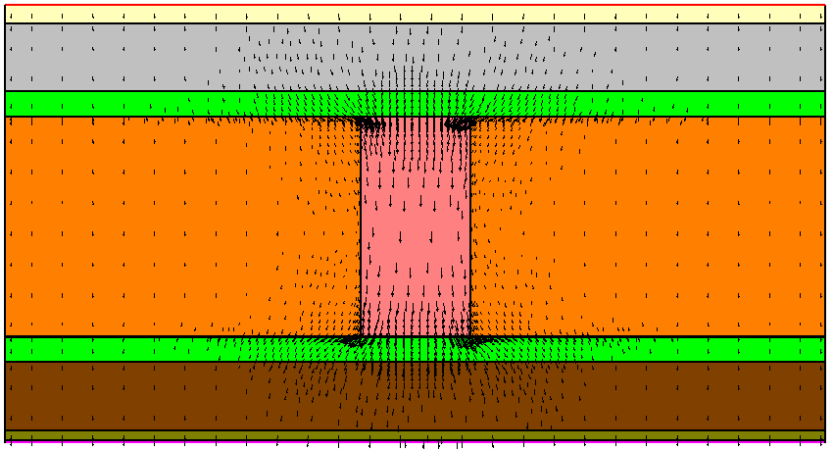
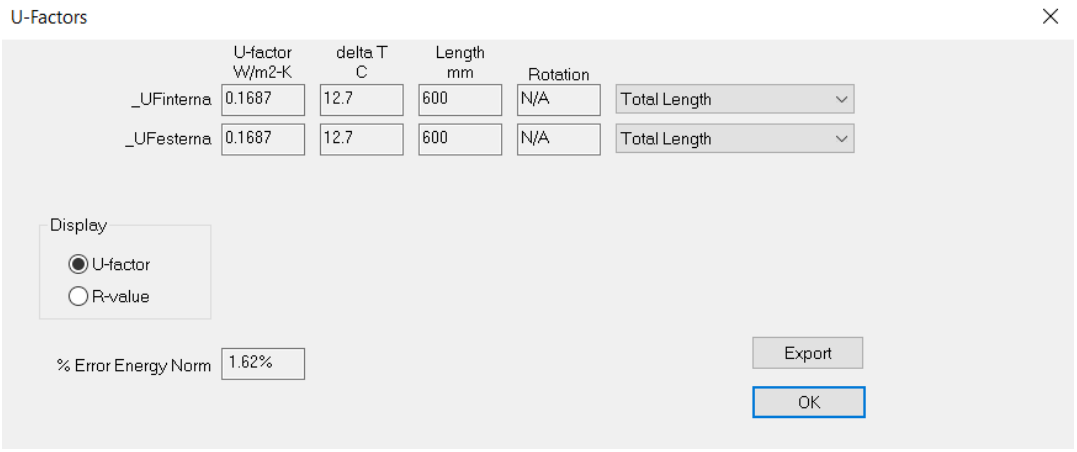


Figura 112 - PLATFORM-F Distribuzione flussi

In coerenza con le condizioni al contorno assegnate al modello sono stati ottenuti i seguenti risultati:



Il valore di trasmittanza calcolato da Therm è stato poi utilizzato per la determinazione del valore di trasmittanza termica lineica che rappresenta il ponte termico.

Si è proceduto moltiplicando il valore di trasmittanza per la lunghezza considerata:

_UFesterna L2D = (0.1687 * 1.20) = 0.2024 W/mK

_UFinterna L2D = (0.1687 * 1.20) = 0.2024 W/mK

Dopo di ché è stata calcolata la trasmittanza termica della parete secondo il metodo previsto dalla norma UNI EN 6946 [34], ottenendo un valore U=0.17 W/m^2K (Tabella 16).

In ultimo si è calcolato il coefficiente di scambio termico delle superfici considerate omogenee senza ponte termico e la relativa trasmittanza termina lineica PT distinta per filo esterno ed interno.

Filo esterno He = (0.14*1.20) = 0.168 W/m^2K

Filo interno Hi = (0.14*1.20) = 0.168 W/m^2K

Filo esterno He = L2D – He = 0.2024 – 0.168 = 0.0344W/m^2K

Filo interno Hi = L2D – He = 0.2024 – 0.168 = 0.0344W/m^2K

Il ponte termico ottenuto sarà quindi pari a 0.0344 W/m^2K e la trasmittanza termica 0,1687 W/m^2K, valore confrontabile con quella ottenuta dal calcolo secondo la UNI.

Dall'analisi delle diverse tecnologie costruttive è emerso che per ogni sezione il ponte termico risulta essere di piccola entità, quasi irrisorio. La tecnologia Platform Frame presenta valori più elevati rispetto al SIP, ma comunque nettamente inferiori all'unità.

5.1.2 Regime Dinamico

5.1.2.1 Parametri dinamici

I parametri dinamici dei campioni analizzati nella presente sperimentazione, sono stati determinati utilizzando il foglio di calcolo UNI EN ISO 13786. Sono stati inseriti i dati di spessore, conducibilità termica, densità e calore specifico di ogni materiale che compone le pareti e sono stati ottenuti i parametri dinamici sopra descritti.

Al seguito si riportano, per ogni campione analizzato, i valori ottenuti dal calcolo con il foglio excel.

SIP

I parametri dinamici sono stati analizzati nelle porzioni considerate omogenee dei campioni. Per questo motivo i campioni SIP1 e SIP2 possiedono la stessa stratigrafia e, quindi, forniscono gli stessi parametri sia dinamici che stazionari.

1) SIP1/2-NF

1) Scegliere il tipo di componente edilizio									2) Scegliere il periodo delle variazioni termiche (<= 24 ore)		24
Chiusura verticale									Periodo delle variazioni termiche T	[sec]	86400
									Resistenza termica sup interna Rsi	[m2K/W]	0,13
									Resistenza termica sup esterna Rse	[m2K/W]	0,04
Descrizione degli strati			Spessore (s) [m]	Conduttività termica (λ) [W/mK]	Resistenza termica [mqK/W]	Calore specifico (c) [J/kgK]	Densità (ρ) [kg/m3]	Resistenza termica aria [m2K/W]	Profondità di penetrazione al periodo T (δ) [m]	ξ = s/d [–]	Resistenza termica [m2k/w]
Rsi	Aria	Strato laminare interno		1	2	3	4	5			0,130
1		OSB/3	0,015	0,130		1700	610		0,059	0,255	0,115
2		EPS	0,140	0,035		1300	20		0,192	0,728	4,000
3		OSB/3	0,015	0,130		1700	610		0,059	0,255	0,115
4									-	-	-
5									-	-	-
6									-	-	-
7									-	-	-
8									-	-	-
9									-	-	-
10									-	-	-
11									-	-	-
12									-	-	-
13									-	-	-
14									-	-	-
15									-	-	-
Rse	Aria	Strato laminare esterno									0,040
		Spessore totale componente [cm]	17,00						Resistenza termica totale [m2K/W]		4,401
http://www.mygreenbuildings.org						RISULTATI			2011 @ Ing. Andrea Ursini Casalena		
Regime periodico stabilizzato			T =	24	ore				Regime stazionario		
Fattore di decremento (attenuazione)		fd	[-]			0,967			Massa superficiale	Ms [kg/m2]	21
Ritardo fattore di decremento (sfasamento)		φ	[h]			1,98			Resistenza termica totale	Rt [m2K/W]	4,401
Trasmittanza termica periodica		|Yie|	[W/m2K]			0,220			Trasmittanza	U [W/m2K]	0,227
Ammettenza termica lato interno		Yii	[W/m2K] , [h]			1,16	4,49		Conduttanza	C [W/m2K]	0,236
Ammettenza termica lato esterno		Yee	[W/m2K] , [h]			1,21	4,89		Capacità termica areica	Cta [kJ/m2K]	35
Capacità termica periodica lato interno		k1	[kJ/m2K]			16,6	17,3		Costante di tempo	τ [h]	42
Capacità termica periodica lato esterno		k2	[kJ/m2K]			17,5	17,3				
Fattore di smorzamento superficiale interno											
Parete disperdente		fsd	[-]			0,849	0,843				
Parete interna		fsi	[-]			0,843	0,834				

2) SIP1/2-F

1) Scegliere il tipo di componente edilizio	2) Scegliere il periodo delle variazioni termiche (<= 24 ore)		24
Chiusura verticale	Periodo delle variazioni termiche T	[sec]	86400
	Resistenza termica sup interna Rsi	[m2K/W]	0,13
	Resistenza termica sup esterna Rse	[m2K/W]	0,04

		Descrizione degli strati	Spessore (s) [m]	Conduttività termica (λ) [W/mK]	Resistenza termica [mqK/W]	Calore specifico (c) [J/kgK]	Densità (ρ) [kg/m3]	Resistenza termica aria [m2K/W]	Profondità di penetrazione al periodo T (δ) [m]	ξ = s/d [-]	Resistenza termica [m2k/w]
Rsi	Aria	Strato laminare interno		1	2	3	4	5			0,130
1	☐	Lastra in cartongesso	0,013	0,210		1000	870		0,081	0,160	0,062
2	☐	Pannello cementolegno	0,050	0,065		1810	160		0,079	0,636	0,769
3	☐	OSB3	0,015	0,130		1700	610		0,059	0,255	0,115
4	☐	EPS	0,140	0,035		1300	18		0,203	0,690	4,000
5	☐	OSB3	0,015	0,130		1700	610		0,059	0,255	0,115
6	☐	Membrana imp.traspirante	0,001	0,220		1700	185		0,139	0,005	0,003
7	☑	Interc.aria non ventilata	0,100					0,180	-	-	0,180
8	☐	Barriera all'acqua	0,001	0,170		1000	1100		0,065	0,008	0,003
9	☐	Lastra Aquapanel	0,013	0,350		1000	1150		0,091	0,137	0,036
10	☐	Rasante basecoat	0,007	0,540		1000	1000		0,122	0,057	0,013
11	☐	Intonachino silossanico	0,002	0,700		1000	1800		0,103	0,015	0,002
12	☐								-	-	-
13	☐								-	-	-
14	☐								-	-	-
15	☐								-	-	-
Rse	Aria	Strato laminare esterno									0,040

Spessore totale componente [cm] **35,52** — Resistenza termica totale [m2K/W] **5,469**

http://www.mygreenbuildings.org — **RISULTATI** — 2011 @ Ing. Andrea Ursini Casalena

Regime periodico stabilizzato T = 24 ore					Regime stazionario			
Fattore di decremento (attenuazione)	**fd**	[-]	**0,535**		**Massa superficiale**	**Ms**	[kg/m2]	**65**
Ritardo fattore di decremento (sfasamento)	**φ**	[h]	**7,16**		Resistenza termica totale	**Rt**	[m2K/W]	**5,469**
Trasmittanza termica periodica	**|Yie|**	[W/m2K]	**0,098**		**Trasmittanza**	**U**	[W/m2K]	**0,183**
Ammettenza termica lato interno	**Yii**	[W/m2K] , [h]	**1,68**	*3,23*	Conduttanza	**C**	[W/m2K]	**0,189**
Ammettenza termica lato esterno	**Yee**	[W/m2K] , [h]	**2,72**	*4,68*	Capacità termica areica	**Cta**	[kJ/m2K]	**85**
Capacità termica periodica lato interno	**k1**	[kJ/m2K]	**24,4**	*28,0*	Costante di tempo	**τ**	[h]	**129**
Capacità termica periodica lato esterno	**k2**	[kJ/m2K]	**38,7**	*40,2*				
Fattore di smorzamento superficiale interno								
Parete disperdente	**fsd**	[-]	**0,781**	*0,646*				
Parete interna	**fsi**	[-]	**0,770**	*0,634*				

PLATFORM FRAME

1) PLATFORM-NF

1) Scegliere il tipo di componente edilizio	2) Scegliere il periodo delle variazioni termiche (<= 24 ore)		24
Chiusura verticale	Periodo delle variazioni termiche T	[sec]	86400
	Resistenza termica sup interna Rsi	[m2K/W]	0,13
	Resistenza termica sup esterna Rse	[m2K/W]	0,04

		Descrizione degli strati	Spessore (s) [m]	Conduttività termica (λ) [W/mK]	Resistenza termica [mqK/W]	Calore specifico (c) [J/kgK]	Densità (ρ) [kg/m3]	Resistenza termica aria [m2K/W]	Profondità di penetrazione al periodo T (δ) [m]	ξ = s/d [-]	Resistenza termica [m2k/w]
Rsi	Aria	Strato laminare interno		1	2	3	4	5			0,130
1	☐	OSB3	0,018	0,100		1450	560		0,058	0,309	0,180
2	☐	Freno a vapore	0,001	0,220		1700	199		0,134	0,006	0,004
3	☐	Lana di roccia	0,160	0,032		1030	70		0,110	1,448	5,000
4	☐	Membrana imp. Trasp	0,001	0,220		1700	185		0,139	0,005	0,003
5	☐	OSB3	0,018	0,100		1450	560		0,058	0,309	0,180
6	☐								-	-	-
7	☐								-	-	-
8	☐								-	-	-
9	☐								-	-	-
10	☐								-	-	-
11	☐								-	-	-
12	☐								-	-	-
13	☐								-	-	-
14	☐								-	-	-
15	☐								-	-	-
Rse	Aria	Strato laminare esterno									0,040

Spessore totale componente [cm] **19,74** — Resistenza termica totale [m2K/W] **5,537**

http://www.mygreenbuildings.org — **RISULTATI** — 2011 @ Ing. Andrea Ursini Casalena

Regime periodico stabilizzato T = 24 ore					Regime stazionario			
Fattore di decremento (attenuazione)	**fd**	[-]	**0,841**		**Massa superficiale**	**Ms**	[kg/m2]	**32**
Ritardo fattore di decremento (sfasamento)	**φ**	[h]	**4,43**		Resistenza termica totale	**Rt**	[m2K/W]	**5,537**
Trasmittanza termica periodica	**|Yie|**	[W/m2K]	**0,152**		**Trasmittanza**	**U**	[W/m2K]	**0,181**
Ammettenza termica lato interno	**Yii**	[W/m2K] , [h]	**1,23**	*4,30*	Conduttanza	**C**	[W/m2K]	**0,186**
Ammettenza termica lato esterno	**Yee**	[W/m2K] , [h]	**1,29**	*4,70*	Capacità termica areica	**Cta**	[kJ/m2K]	**41**
Capacità termica periodica lato interno	**k1**	[kJ/m2K]	**18,4**	*19,5*	Costante di tempo	**τ**	[h]	**63**
Capacità termica periodica lato esterno	**k2**	[kJ/m2K]	**19,3**	*19,4*				
Fattore di smorzamento superficiale interno								
Parete disperdente	**fsd**	[-]	**0,840**	*0,833*				
Parete interna	**fsi**	[-]	**0,826**	*0,818*				

2) PLATFORM-F

1) Scegliere il tipo di componente edilizio	2) Scegliere il periodo delle variazioni termiche (<= 24 ore)		24
Chiusura verticale	Periodo delle variazioni termiche T	[sec]	86400
	Resistenza termica sup interna Rsi	[m2K/W]	0,13
	Resistenza termica sup esterna Rse	[m2K/W]	0,04

		Descrizione degli strati	Spessore (s) [m]	Conduttività termica (λ) [W/mK]	Resistenza termica [mqK/W]	Calore specifico (c) [J/kgK]	Densità (ρ) [kg/m3]	Resistenza termica aria [m2K/W]	Profondità di penetrazione al periodo T (δ) [m]	ξ = s/d [--]	Resistenza termica [m2k/w]
Rsi	Aria	Strato laminare interno		1	2	3	4	5			0,130
1	☐	Lastra in cartongesso	0,013	0,210		1000	870		0,081	0,160	0,062
2	☐	Pannello cementolegno	0,050	0,065		1810	160		0,079	0,636	0,769
3	☐	OSB3	0,018	0,100		1450	560		0,058	0,309	0,180
4	☐	Freno a vapore	0,001	0,220		1700	199		0,134	0,006	0,004
5	☐	Lana di roccia	0,160	0,032		1030	70		0,110	1,448	5,000
6	☐	Membrana imp.traspirante	0,001	0,220		1700	185		0,139	0,005	0,003
7	☐	OSB3	0,018	0,100		1450	560		0,058	0,309	0,180
8	☐	Lana di legno	0,050	0,065		1810	360		0,052	0,955	0,769
9	☐	Rasatura minerale	0,007	0,300		1000	1000		0,091	0,077	0,023
10	☐	Intonachino silossanico	0,002	0,700		1000	1800		0,103	0,015	0,002
11	☐								-	-	-
12	☐								-	-	-
13	☐								-	-	-
14	☐								-	-	-
15	☐								-	-	-
Rse	Aria	Strato laminare esterno									0,040

Spessore totale componente [cm] **31,89** — Resistenza termica totale [m2K/W] **7,162**

http://www.mygreenbuildings.org — **RISULTATI** — 2011 @ Ing. Andrea Ursini Casalena

Regime periodico stabilizzato — T = 24 ore

Fattore di decremento (attenuazione)	**fd**	[-]	**0,231**	
Ritardo fattore di decremento (sfasamento)	**φ**	[h]	**12,93**	
Trasmittanza termica periodica	**|Yie|**	[W/m2K]	**0,032**	
Ammettenza termica lato interno	**Yii**	[W/m2K] , [h]	**1,66**	*3,19*
Ammettenza termica lato esterno	**Yee**	[W/m2K] , [h]	**2,26**	*3,43*
Capacità termica periodica lato interno	**k1**	[kJ/m2K]	**23,1**	*26,6*
Capacità termica periodica lato esterno	**k2**	[kJ/m2K]	**31,2**	*33,1*
Fattore di smorzamento superficiale interno				
Parete disperdente	**fsd**	[-]	**0,784**	*0,707*
Parete interna	**fsi**	[-]	**0,782**	*0,705*

Regime stazionario

Massa superficiale	**Ms**	[kg/m2]	**79**
Resistenza termica totale	**Rt**	[m2K/W]	**7,162**
Trasmittanza	**U**	[W/m2K]	**0,140**
Conduttanza	**C**	[W/m2K]	**0,143**
Capacità termica areica	**Cta**	[kJ/m2K]	**109**
Costante di tempo	**τ**	[h]	**217**

5.2 Analisi sperimentale

In questo capitolo si riportano i risultati ottenuti per ogni campione nelle due configurazioni di prova in regime stazionario e dinamico. Le pareti analizzate sono state posizionate nelle medesime condizioni per entrambe le configurazioni ed i sensori posizionati nella rispettiva posizione in ambo i lati della parete. La differente posizione dei sensori tra la parete SIP1 e le pareti SIP2 e PLATFORM sono evidenziate rispettivamente in Figura 114 e Figura 113.

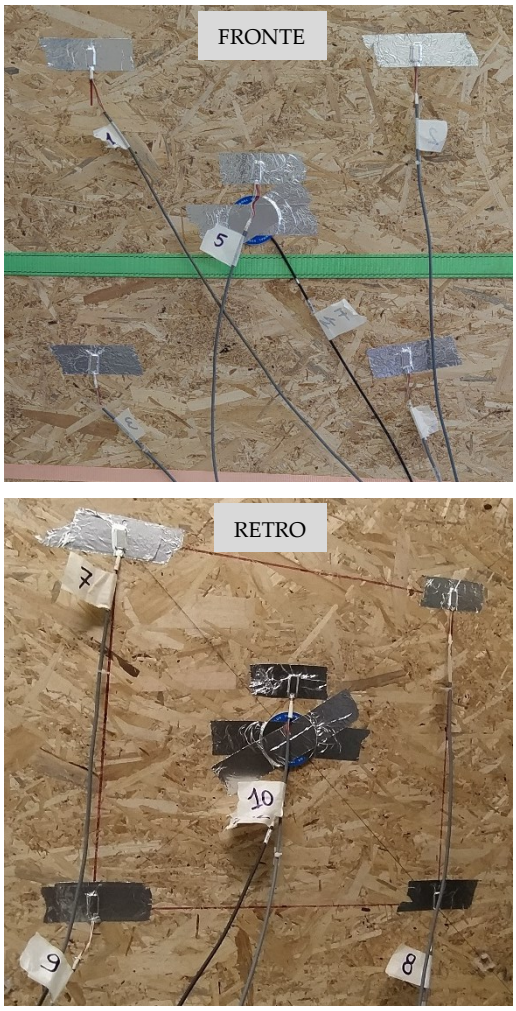


Figura 114 - Posizione sensori SIP1

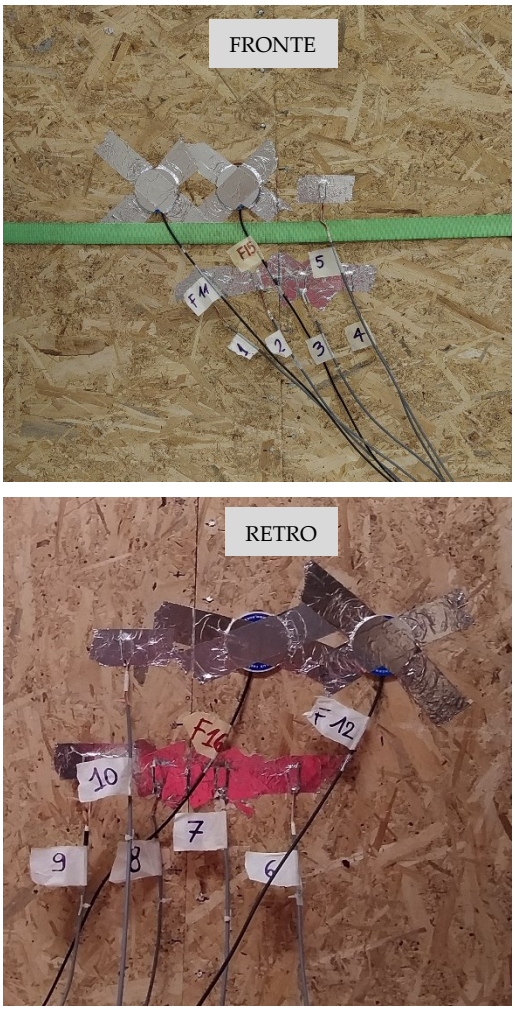


Figura 113 - Posizione sensori SIP2 e PLATFORM

5.2.1 Regime stazionario

I risultati in regime stazionario sono stati ottenuti ponendo la camera climatica ad una temperatura di 5°C ed una umidità relativa al 50%. Da notare che l'ambiente interno, ossia quello che ospita la camera climatica, non era condizionato e quindi non è stato possibile controllare il livello di temperatura dell'aria interna. A tal proposito, è stata osservata una variazione di temperatura anche sul lato interno dei campioni, cosa che normalmente avviene negli edifici reali. Nel Grafico 5 sono visualizzati gli andamenti orari della temperatura interna dell'aria misurata dalla termocoppia nei vari periodi di prova. Inoltre, avendo eseguito le prove in periodi temperali diversi e quindi con condizioni meteorologiche differenti, si riscontrano differenze di valori di temperatura dell'aria interna tra i vari campioni analizzati.

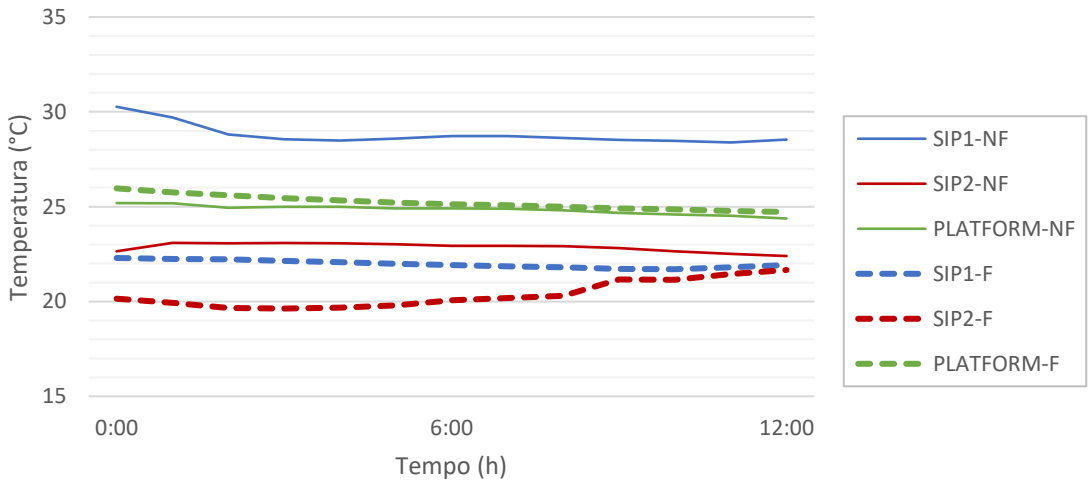


Grafico 5 – Regime stazionario: andamento orario della temperatura dell'aria interna

Di seguito si riportano i risultati ottenuti per i due gruppi di campioni (con finiture e senza finiture) dall'analisi in regime stazionario. I dati acquisiti con un intervallo di 30 secondi sono stati analizzati per determinare l'andamento delle temperature e dei flussi sulle pareti indagate. Inoltre, sono stato utilizzati per il calcolato della trasmittanza termica in opera di ogni singola parete.

5.2.1.1 Campioni senza finiture NF

SIP1-NF

Dai dati ottenuti dalla sperimentazione, si osserva come in una fase iniziale l'andamento dei flussi (q) e delle temperature (T) non si siano ancora stabilizzati. A tal proposito, si è scelto di non considerare una parte dei dati (Grafico 6)(valutati mediante i grafici box plot) ai fini del calcolo della trasmittanza termica in opera.

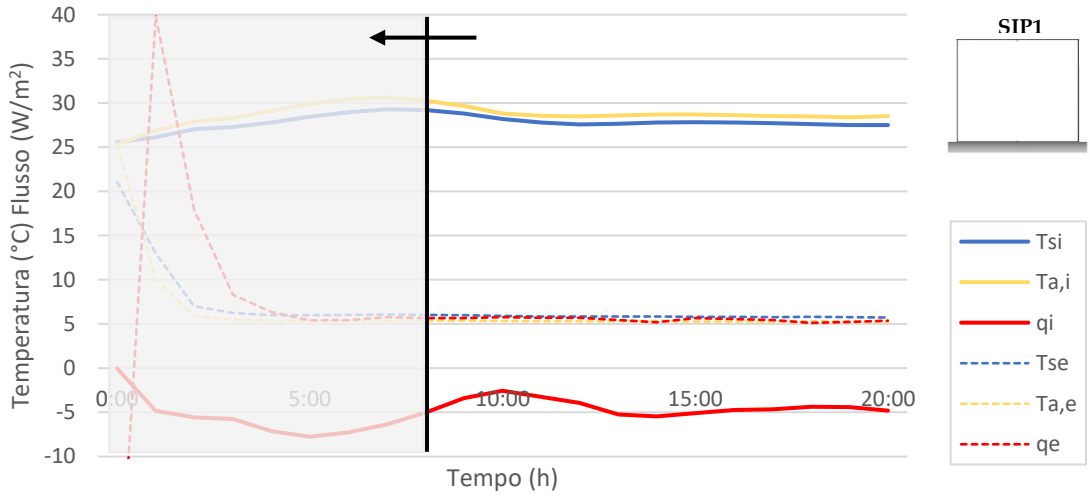


Grafico 6 – SIP1-NF: Andamento flussi e temperature, indicazione dati non considerati

Il Grafico 7 mostra l'andamento delle temperature e dei flussi corretti, in funzione dei dati scartati, con cui, mediante l'Heat Flow Meter Method si è calcolata la trasmittanza termica in opera della parete SIP1-NF.

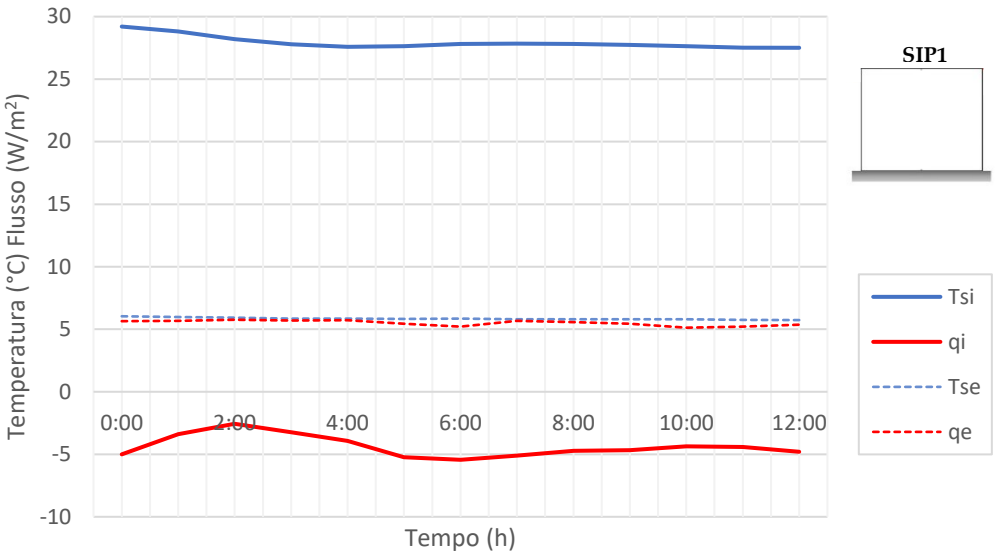


Grafico 7 – SIP1-NF: Andamento delle temperature e dei flussi

La trasmittanza termica caratteristica della parete in analisi è stata determinata applicando il metodo delle medie progressive mediante la formula:

$$U = \frac{\sum_{j=1}^{n} q_j}{\sum_{j=1}^{n} (T_{ij} - T_{ej})}$$

Tij = temperatura interna ottenuta dalla j-esima misurazione;

Tej= temperatura esterna ottenuta dalla j-esima misurazione.

Il metodo delle medie progressive prevede di calcolare la conduttanza termica utilizzando i valori medi di temperatura T e flusso q, pertanto, il valore della trasmittanza termica in opera della parete SIP1-NF risulta essere pari a:

U_{opera}=0,254 W/m²K

Questo valore può essere confrontato con la trasmittanza termica U_0 ottenuta dal calcolo secondo la UNI EN ISO 6946[34]:

U_0=0,227 W/m²K

Si nota come il valore di trasmittanza U_{opera} ottenuto dalla sperimentazione si discosta dal valore di calcolo U_0 in misura inferiore al 11,9%.

SIP2-NF

Dai dati ottenuti dalla sperimentazione, si osserva come in una breve fase iniziale l'andamento dei flussi e delle temperature non si siano ancora stabilizzati (Grafico 8). Sulla base dell'analisi effettuata mediante i grafici box plot si è scelto di non considerare i dati relativi alla prima ora ai fini del calcolo della trasmittanza termica in opera.

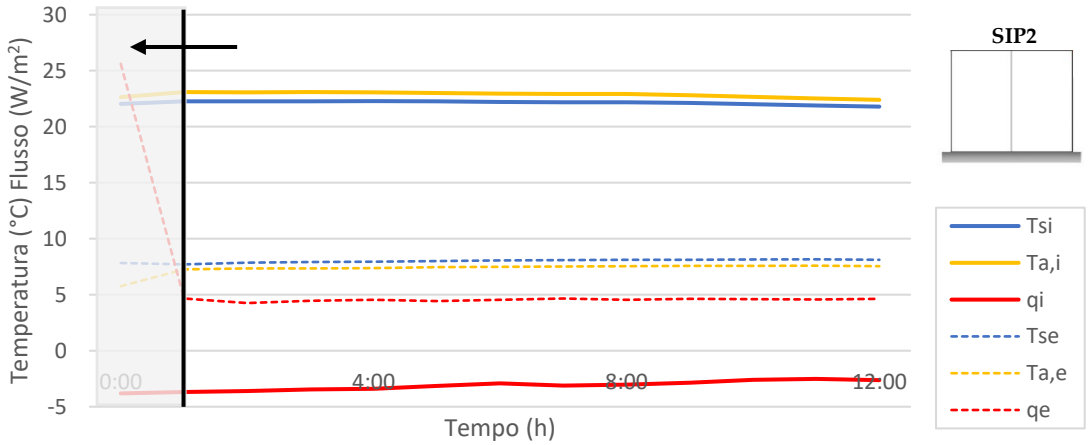


Grafico 8 – SIP2-NF: Andamento flussi e temperature, indicazione dati non considerati

Il Grafico 9**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** mostra l'andamento delle temperature e dei flussi corretti, in funzione dei dati scartati, con cui, mediante l'Heat Flow Meter Method si è calcolata la trasmittanza termica in opera della parete SIP2-NF.

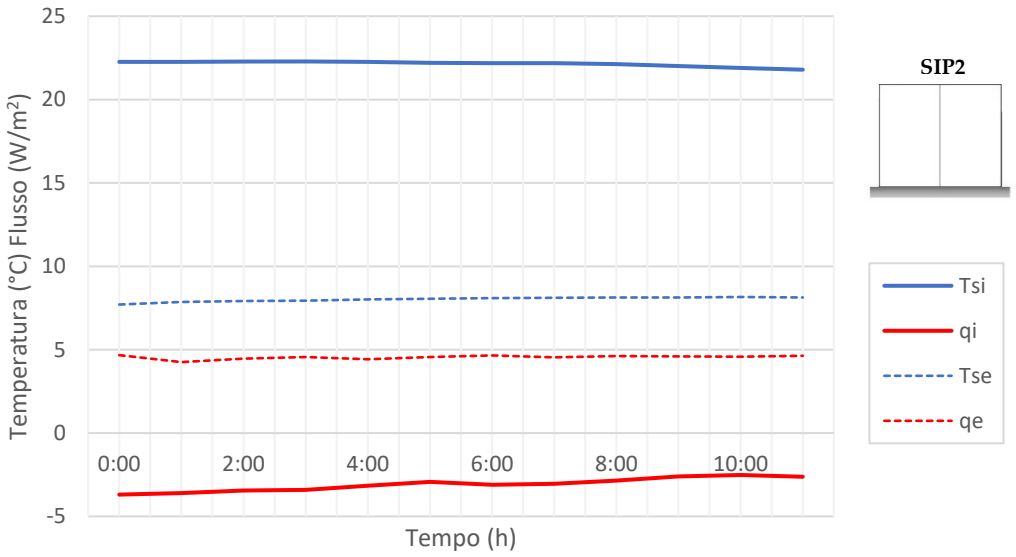


Grafico 9 – SIP2-NF: Andamento delle temperature e dei flussi

La trasmittanza termica caratteristica della parete in analisi è stata determinata applicando il metodo delle medie progressive mediante la formula:

$$U = \frac{\sum_{j=1}^{n} q_j}{\sum_{j=1}^{n} (T_{ij} - T_{ej})}$$

Tij = temperatura interna ottenuta dalla j-esima misurazione;

Tej= temperatura esterna ottenuta dalla j-esima misurazione.

Il metodo delle medie progressive prevede di calcolare la conduttanza termica utilizzando i valori medi di temperatura T e flusso q. Pertanto, il valore di trasmittanza termica in opera determinato risulta essere pari a:

U_{opera}=0,247 W/m²K

Questo valore può essere confrontato con la trasmittanza termica U_0 ottenuta dal calcolo secondo la UNI EN ISO 6946[34]:

$$U_0=0,231\ W/m^2K$$

Da questo si evince come la trasmittanza termica in opera presenta un valore che si discosta del 6,92% da quello calcolato secondo la norma.

PLATFORM-NF

Dai dati ottenuti dalla sperimentazione, si osserva come in una breve fase iniziale l'andamento dei flussi e delle temperature non si siano ancora stabilizzati (Grafico 10Grafico 8). Sulla base dell'analisi effettuata mediante i grafici box plot si è scelto di non considerare i dati relativi alle prime due ore ai fini del calcolo della trasmittanza termica in opera.

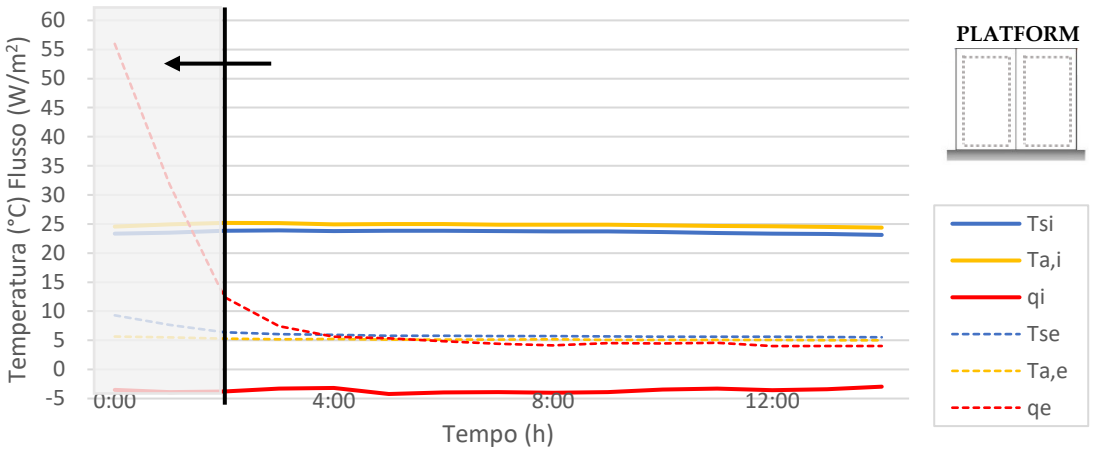


Grafico 10 – PLATFORM-NF: Andamento flussi e temperature, indicazione dati non considerati

Il Grafico 11**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** mostra l'andamento delle temperature e dei flussi corretti, in funzione dei dati scartati, con cui, mediante l'Heat Flow Meter Method si è calcolata la trasmittanza termica in opera della parete PLATFORM-NF.

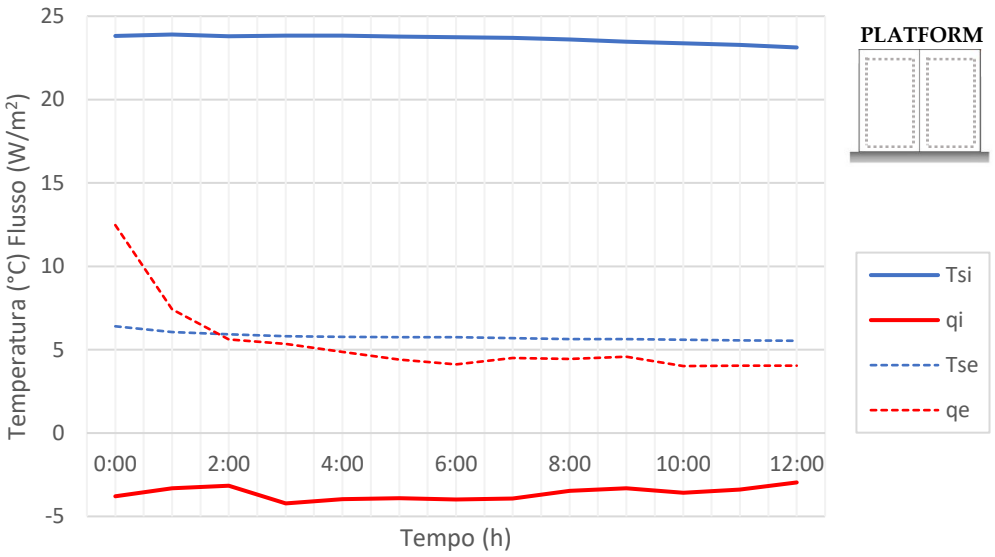


Grafico 11 – PLATFORM-NF: Andamento delle temperature e dei flussi

La trasmittanza termica caratteristica della parete in analisi è stata determinata applicando il metodo delle medie progressive mediante la formula:

$$U = \frac{\sum_{j=1}^{n} q_j}{\sum_{j=1}^{n} (T_{ij} - T_{ej})}$$

Tij = temperatura interna ottenuta dalla j-esima misurazione;

Tej= temperatura esterna ottenuta dalla j-esima misurazione.

Il valore di trasmittanza in opera determinato risulta essere pari a:

U_{opera}=0,209 W/m²K

Questo valore può essere confrontato con la trasmittanza termica U_0 ottenuta dal calcolo secondo la UNI EN ISO 6946[34]:

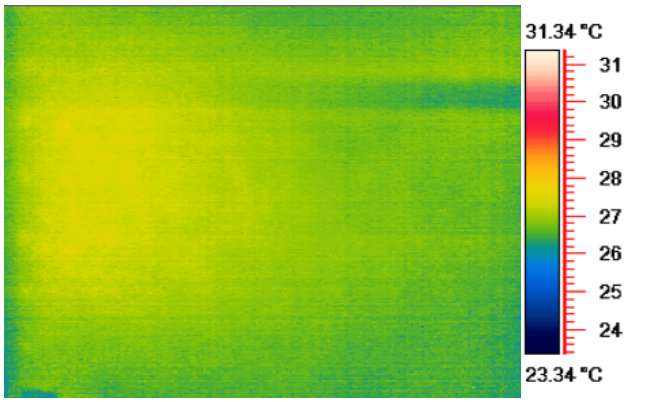
U_0=0,243 W/m²K

Da questo si evince che la trasmittanza termica in opera presenta un valore che si discosta del 16,27% da quella calcolata secondo la norma.

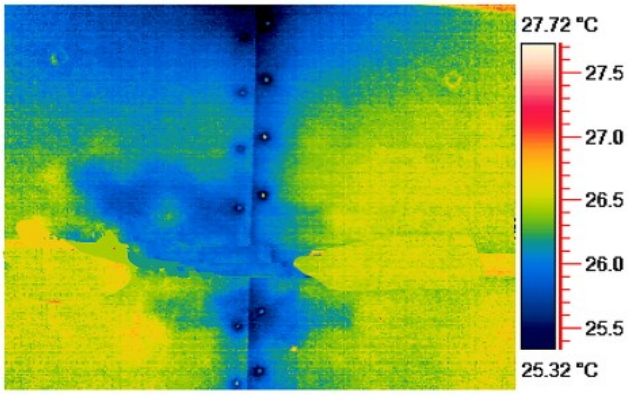
Termografie

Prima di interrompere il ciclo in regime stazionario, per ogni pannello sopra descritto, sono state eseguite le termografie. Queste sono state effettuate circa 12h dopo dell'impostazione della camera climatica in regime stazionario affinché le temperature sia superficiali che dell'aria all'interno della camera potessero stabilizzarsi. Le termografie sono state scattate dal lato del laboratorio, ossia nel lato caldo della parete, ad una distanza di circa 1.10 m.
Una volta completata l'acquisizione dei dati sulla micro SD dello strumento, questi sono stati scaricati sul pc.
Utilizzando il programma NRG energy, per l'elaborazione dei termogrammi, è stato possibile analizzarli e studiarli ottenendo quanto segue (Figura 114).

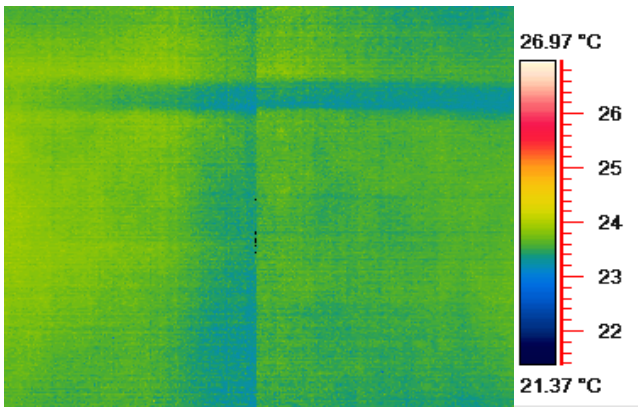
Le termografie evidenziano come le pareti risentano dell'influenza dei montanti sulla distribuzione delle temperature superficiali. In particolare, seppur il SIP2 raggiunge una temperatura minima di 21,26 °C in corrispondenza della giunzione tra i pannelli OSB, nei tre casi si rileva una temperatura media circa simile oscillante intorno ai 23 °C.



SIP1 -NF	
T_{min}	23,18 (°C)
$\mathbf{T_{media}}$	23,48 (°C)
$\mathbf{T_{max}}$	23,79 (°C)



SIP2 -NF	
T_{min}	21,26 (°C)
$\mathbf{T_{media}}$	23,99 (°C)
$\mathbf{T_{max}}$	26,73 (°C)



PLATFORM -NF	
T_{min}	23,23 (°C)
$\mathbf{T_{media}}$	23,60 (°C)
$\mathbf{T_{max}}$	23,96 (°C)

Figura 115 - Andamento delle temperature nei campioni senza finiture NF

5.2.1.2 Campioni con le finiture F

SIP1-F

Dai dati ottenuti dalla sperimentazione, si osserva come in una fase iniziale l'andamento dei flussi (q) e delle temperature (T) non si siano ancora stabilizzati. A tal proposito, anche per questo campione si è scelto di non considerare una parte dei dati (Grafico 12) ai fini del calcolo della trasmittanza termica in opera.

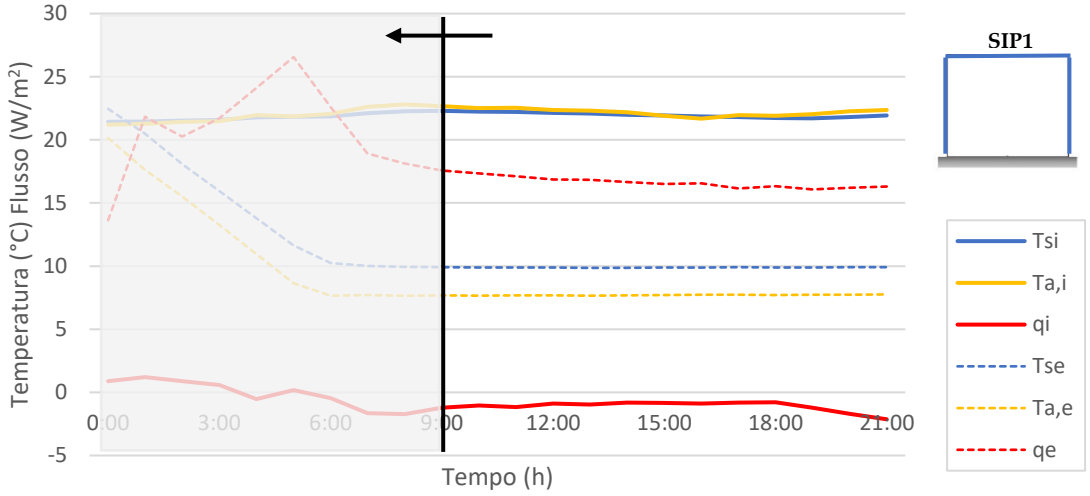


Grafico 12 - SIP1-F: Andamento flussi e temperature, indicazione dati non considerati

Il **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** mostra l'andamento delle temperature e dei flussi corretti, in funzione dei dati scartati, con cui, mediante l'Heat Flow Meter Method si è calcolata la trasmittanza termica in opera della parete SIP1-F.

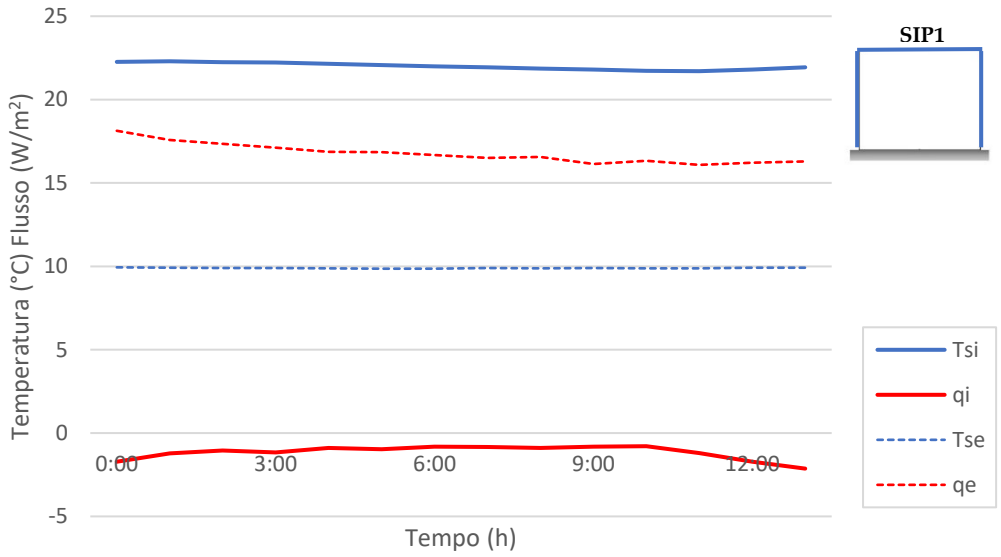


Grafico 13 - SIP1-F: Andamento delle temperature e dei flussi

La trasmittanza termica caratteristica della parete in analisi è stata determinata applicando il metodo delle medie progressive mediante la formula:

$$U = \frac{\sum_{j=1}^{n} q_j}{\sum_{j=1}^{n} (T_{ij} - T_{ej})}$$

Tij = temperatura interna ottenuta dalla j-esima misurazione;

Tej= temperatura esterna ottenuta dalla j-esima misurazione.

Il metodo delle medie progressive prevede di calcolare la conduttanza termica utilizzando i valori medi di temperatura T e flusso q, pertanto, il valore della trasmittanza termica in opera della parete SIP1-NF risulta essere pari a:

U_{opera}=0,678 W/m²K

Questo valore può essere confrontato con la trasmittanza termica U_0 ottenuta dal calcolo secondo la UNI EN ISO 6946[34]:

U_0=0,171 W/m²K

Questa sostanziale differenza tra la trasmittanza termica in opera e quella calcolata secondo la normativa potrebbe essere riconducibile alla presenza dello strato di intercapedine d'aria tra il panello OSB/3 e le lastre di Aquapanel. Questo strato, composto di montanti in acciaio-zinco, probabilmente ha risentito fortemente della temperatura dell'aria interna al laboratorio che, essendo abbastanza elevata, tendeva a scaldare i montanti predisposti per il sistema in lastre. L'elevato flusso registrato sulla superficie della parete ha quindi determinato un elevato valore di trasmittanza che si discosta del 296% da quello calcolato con la normativa.

SIP2-F

La parete SIP2-F, come le precedenti, presenta una fase iniziale non ancora stabile. Sulla base dell'analisi effettuata mediante i grafici box plot si è scelto di non considerare i dati relativi alle prime nove ore ai fini del calcolo della trasmittanza termica in opera.

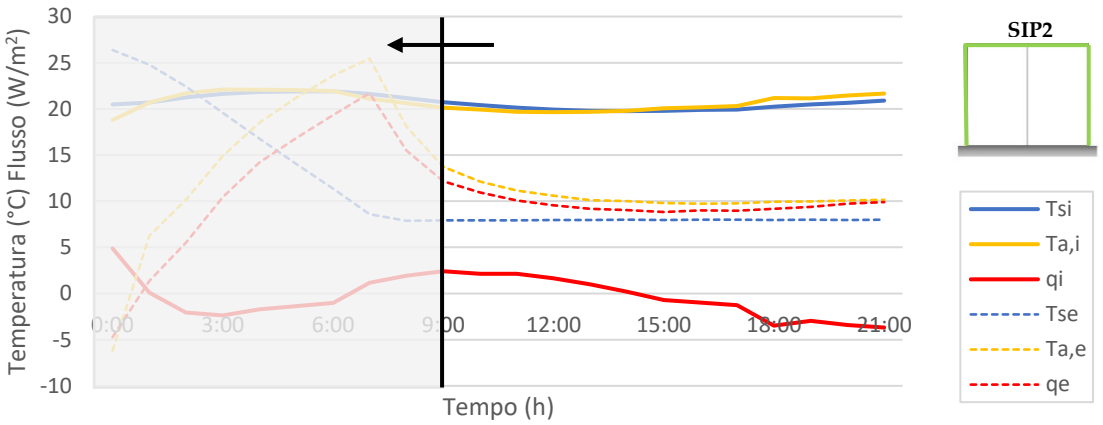


Grafico 15 - SIP2-F: Andamento flussi e temperature, indicazione dati non considerati

L'andamento delle temperature e dei flussi corretti mostrati nel Grafico 14 sono quelli utilizzati ai fini del calcolo della trasmittanza termica in opera per la parete SIP2-F.

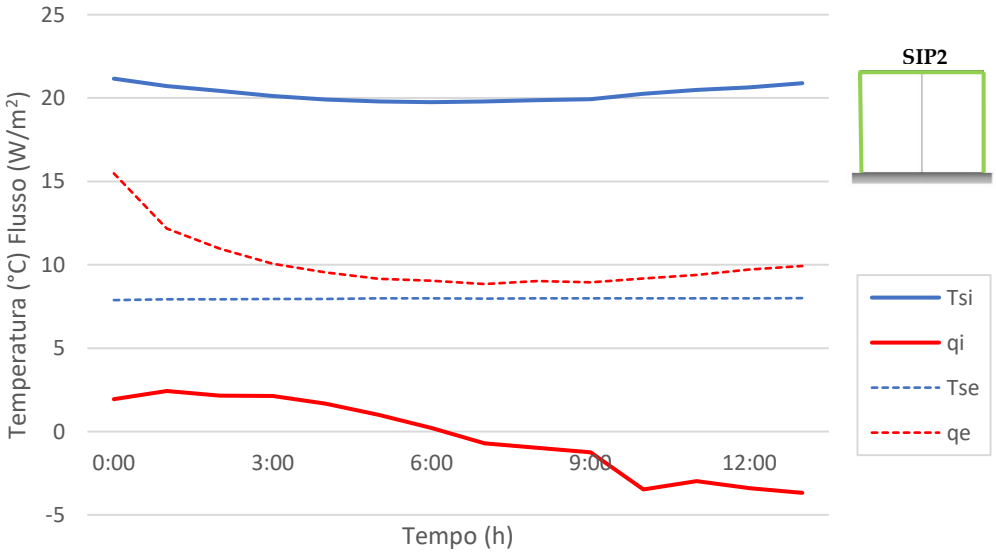


Grafico 14 - SIP2-F: Andamento delle temperature e dei flussi

La trasmittanza termica caratteristica della parete in analisi è stata determinata applicando il metodo delle medie progressive mediante la formula:

$$U = \frac{\sum_{j=1}^{n} q_j}{\sum_{j=1}^{n} (T_{ij} - T_{ej})}$$

Tij = temperatura interna ottenuta dalla j-esima misurazione;

Tej= temperatura esterna ottenuta dalla j-esima misurazione.

Il metodo delle medie progressive prevede di calcolare la conduttanza termica utilizzando i valori medi di temperatura T e flusso q. Pertanto, il valore di trasmittanza termica in opera determinato risulta essere pari a:

U_{opera}=0,531 W/m²K

Questo valore può essere confrontato con la trasmittanza termica U0 ottenuta dal calcolo secondo la UNI EN ISO 6946[34]:

U_0=0,173 W/m²K

Da questo si evince come la trasmittanza termica in opera presenta un valore che si discosta del 206% da quella calcolata secondo la norma. Anche in questo caso, come per il SIP1-F, la differenza che sussiste tra la trasmittanza termica in opera e quella calcolata secondo la norma è attribuita alla presenza dell'intercapedine d'aria che induce un aumento del flusso interno, facendone aumentare la trasmittanza.

PLATFORM-F

Dai dati ottenuti dalla sperimentazione, si osserva come in una breve fase iniziale l'andamento dei flussi e delle temperature non si siano ancora stabilizzati (Grafico 16Grafico 8). Per questo motivo sono state scartate le ore iniziali per il calcolo della trasmittanza termica in opera e si sono considerati solamente i dati acquisiti nelle ultime 12 ore (Grafico 17).

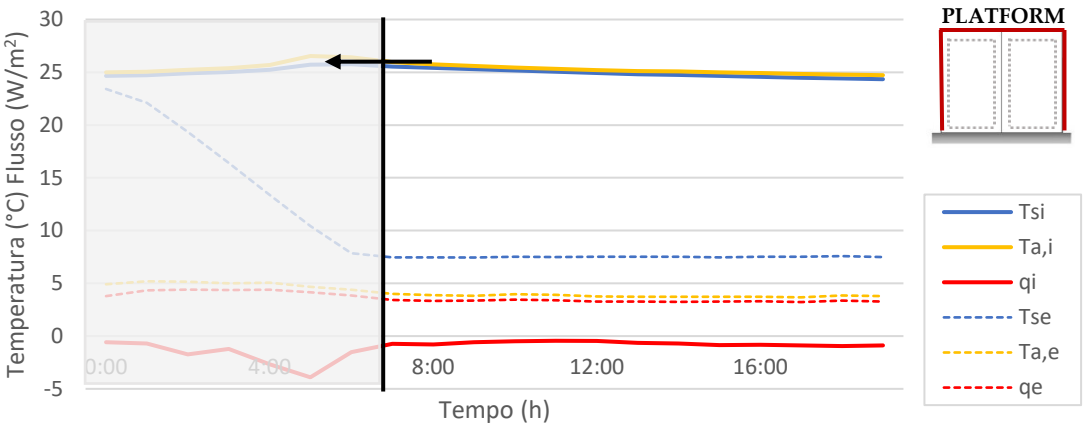


Grafico 16 - PLATFORM-F: Andamento flussi e temperature, indicazione dati non considerati

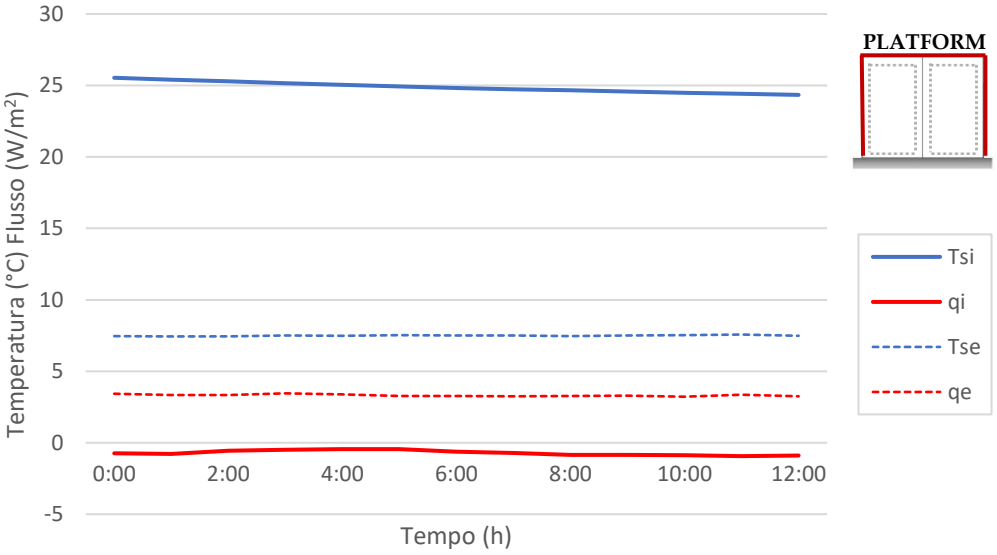


Grafico 17 - PLATFORM-F: Andamento delle temperature e dei flussi

La trasmittanza termica caratteristica della parete in analisi è stata determinata applicando il metodo delle medie progressive mediante la formula:

$$U = \frac{\sum_{j=1}^{n} q_j}{\sum_{j=1}^{n} (T_{ij} - T_{ej})}$$

Tij = temperatura interna ottenuta dalla j-esima misurazione;

Tej= temperatura esterna ottenuta dalla j-esima misurazione.

Il valore di trasmittanza in opera determinato risulta essere pari a:

U_{opera}=0,152 W/m²K

Questo valore può essere confrontato con la trasmittanza termica U_0 ottenuta dal calcolo secondo la UNI EN ISO 6946[34]:

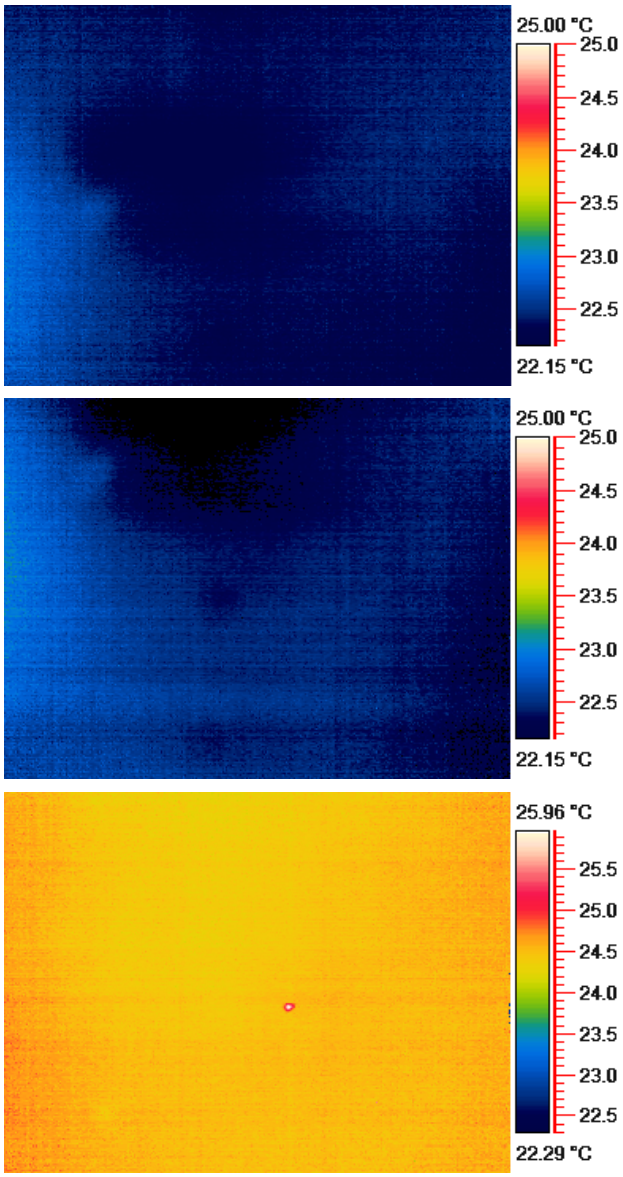
U_0=0,169 W/m²K

La trasmittanza termica in opera determinata per la parete PLATFORM-F risulta essere estremamente prossima a quella determinata analiticamente. In particolare, le due si discostano tra loro del 11,18%.

Termografie

Prima di interrompere il ciclo in regime stazionario, per ogni pannello sopra descritto, sono state eseguite le termografie. Queste sono state effettuate circa 20h dopo l'impostazione della camera climatica in regime stazionario affinché le temperature sia superficiali che dell'aria all'interno della camera potessero stabilizzarsi. Dopo aver rimosso i sensori dal lato interno della parete, sono state scattate le termografie ad una distanza di circa 1,10m. Una volta completata l'acquisizione dei dati sulla micro SD dello strumento, questi sono stati scaricati sul pc. Utilizzando il programma NRG energy, per l'elaborazione dei

termogrammi, è stato possibile analizzarli e studiarli ottenendo quanto segue (Figura 115).



SIP1 -F	
T_{min}	20,93 (°C)
$\mathbf{T_{media}}$	22,38 (°C)
$\mathbf{T_{max}}$	23,18 (°C)

SIP2 -F	
T_{min}	20,74 (°C)
$\mathbf{T_{media}}$	22,43 (°C)
$\mathbf{T_{max}}$	23,18 (°C)

PLATFORM -F	
T_{min}	22,77 (°C)
$\mathbf{T_{media}}$	24,50 (°C)
$\mathbf{T_{max}}$	26,18 (°C)

Figura 116 - Andamento delle temperature nei campioni con le finiture F

Dalle termografie si denota come l'andamento delle temperature si presenti costante sull'intera faccia di ogni parete. La differenza cromatica tra i pannelli SIP e PLATFORM, dovuta alle temperature superficiali individuate, è strettamente legata alla temperatura interna del laboratorio durante il periodo di prova. In particolare, per l'ultima parete PLATFORM-F la temperatura interna dell'ambiente si è dimostrata superiore di circa 5°C rispetto alle altre due.

5.2.2 Regime dinamico

I risultati in regime dinamico sono stati ottenuti sottoponendo le pareti a cicli di temperatura variabili con un'ampiezza di 20°C. Sulla camera climatica è stata impostata una sinusoidale di durata 72h che potesse oscillare tra i 35°C ed i 15 °C (Grafico 1). Si nota come l'ambiente interno, non essendo condizionato, ha subito delle variazioni di temperatura durante i diversi periodi di prova. Nel Grafico 18 sono visualizzati gli andamenti orari della temperatura interna dell'aria misurata dalla termocoppia nei vari periodi di prova. Inoltre, avendo eseguito le prove in periodi temperali diversi e quindi con condizioni meteorologiche differenti, si riscontrano differenze di valori di temperatura dell'aria interna tra i vari campioni analizzati.

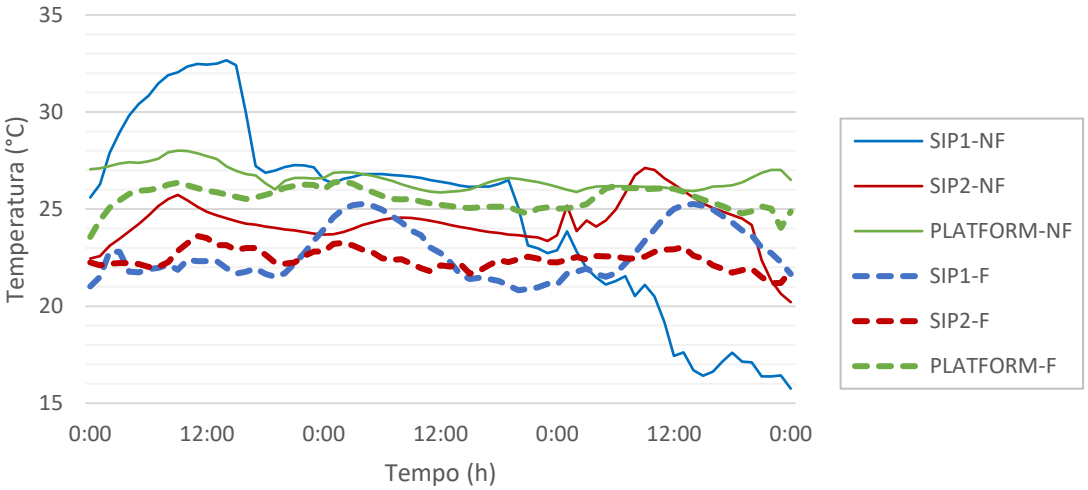


Grafico 18 - Regime dinamico: andamento orario della temperatura dell'aria interna

Di seguito si riportano i risultati ottenuti per i due gruppi di campioni (con finiture e senza finiture) dall'analisi in regime dinamico. I dati acquisiti con un intervallo di 30 secondi sono stati analizzati per determinare l'andamento delle temperature e dei flussi sulle pareti indagate. Inoltre, i dati relativi alle temperature superficiali interne ed esterne ottenuti sperimentalmente, sono stati confrontati con quelli valutati teoricamente sulla base dei parametri dinamici precedentemente determinati (sottocapitolo 5.1.2).

5.2.2.1 Campioni senza finiture NF

SIP1-NF

I Grafico 19 Grafico 20 mostrano gli andamenti delle grandezze misurate sulle superfici del campione. In particolare, le temperature Tsi e Tse rappresentano rispettivamente le temperature misurate sulla faccia interna ed esterna della parete, q_i e q_e i relativi flussi termici. L'andamento di queste quattro grandezze è riferito ad un tempo di acquisizione di 72 ore.

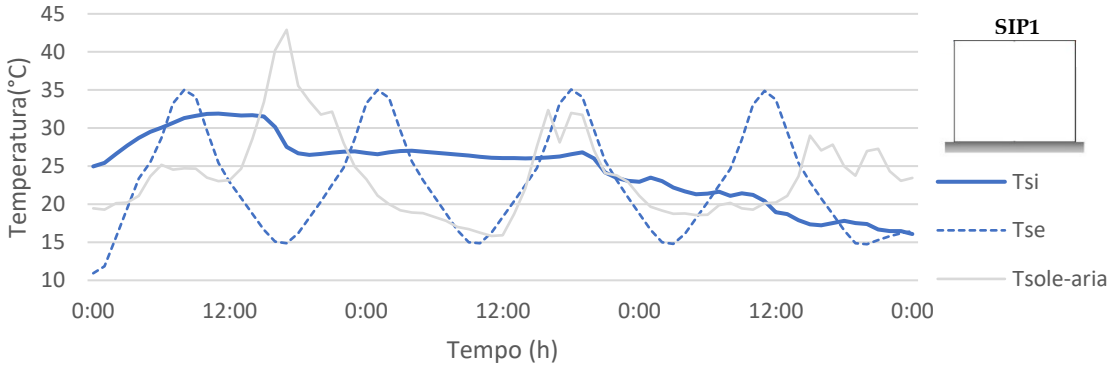


Grafico 19 - SIP1-NF: Andamento temperature superficiali interne ed esterne

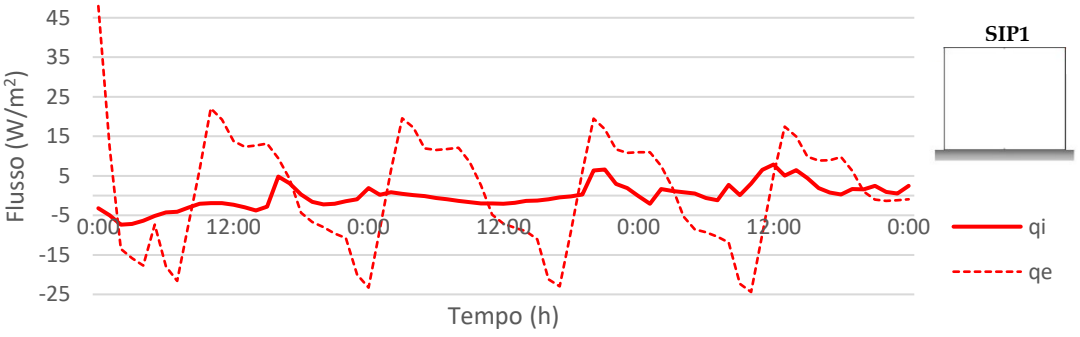


Grafico 20 - SIP1-NF: Andamento flusso termico interno ed esterno

In riferimento ai parametri dinamici determinati secondo la norma UNI EN ISO 13786 [40] sono state confrontate le curve delle temperature superficiali esterne (Grafico 21) ed interne (Grafico 22) ottenute dalla sperimentazione con la curva teorica costruita sulla base dei seguenti parametri:

- ampiezza A: 12,5 [°C]
- pulsazione ω : 0,2616 [1/h]
- fattore di decremento (attenuazione) f_d : 0,967 [-]
- ritardo fattore di decremento (sfasamento) φ : 1,9 [h]

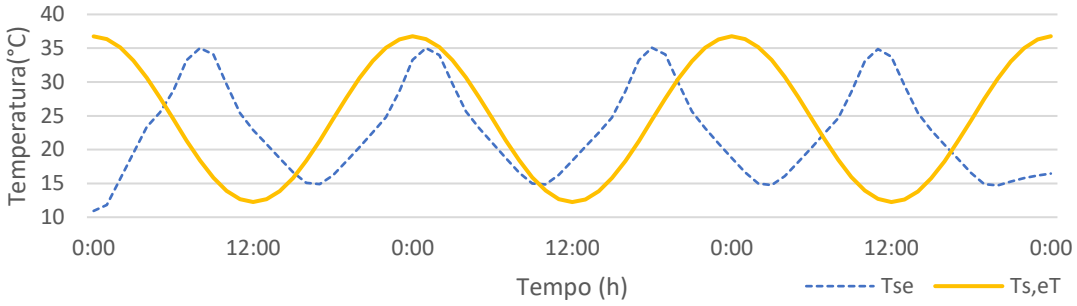


Grafico 21 - SIP1-NF: Confronto curve teorica-sperimentale delle temperature esterne

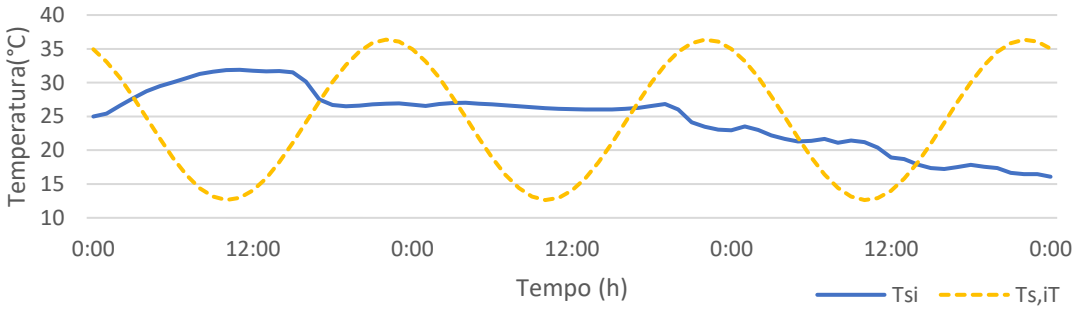


Grafico 22 - SIP1-NF: Confronto curve teorica-sperimentale delle temperature interne

Dal confronto tra le curve si denota come, in particolare per le curve delle temperature interne, i risultati ottenuti dalla sperimentazione si discostino particolarmente da quelli determinati teoricamente con i parametri dinamici.

Questo dimostra come, probabilmente, ancora ci sia troppa distanza tra la sperimentazione e la teoria che, seppur in linea di massima fornisce dei valori all'incirca confrontabili, questi non possono essere confrontati in valore assoluto.

In riferimento alle temperature dell'aria interna nei diversi istanti di prova (Grafico 18), per far sì che le pareti potessero essere confrontate nelle medesime condizioni di temperatura, si è scelto di limitare l'analisi a sole 24h. In particolare, sono state scelte le ore corrispondenti al secondo giorno di prova.

Il Grafico 23 mostra l'andamento delle temperature superficiali interne ed esterne in relazione alle temperature dell'aria Ta,i (interna al laboratorio) Ta,e (interna alla camera climatica).

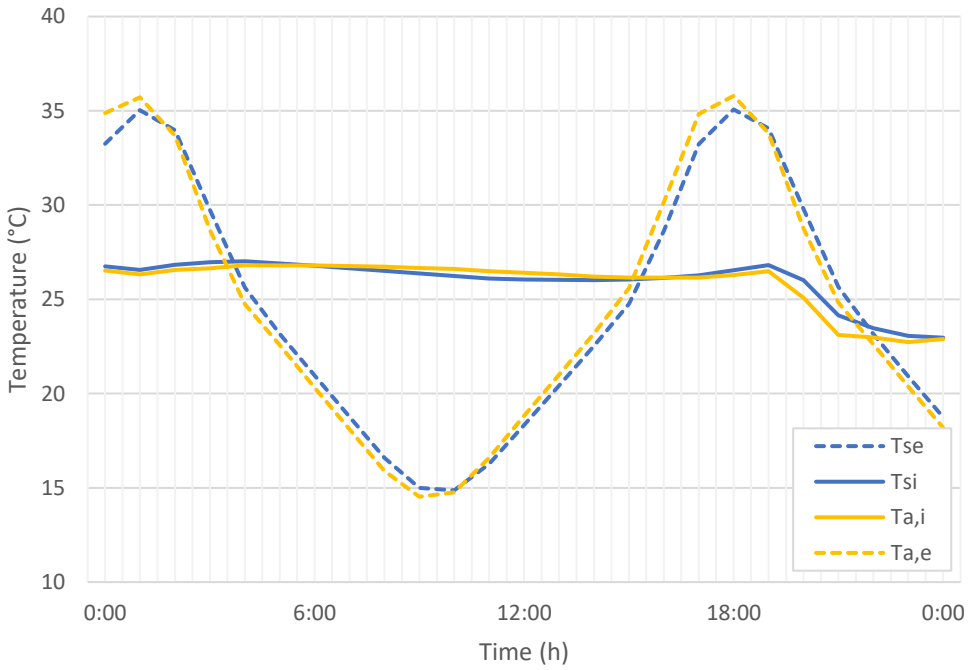


Grafico 23 - SIP1-NF: Andamento temperature nelle 24h

Da notare come le temperature dell'aria e superficiali tendano quasi a sovrapporsi nel periodo di tempo indagato.

Il Grafico 24 evidenzia l'andamento dei flussi nelle 24 h analizzate. E' evidente come i flussi, sia interno che esterno, seguano l'andamento delle temperature superficiali, con la differenza di essere sfasati nel tempo.

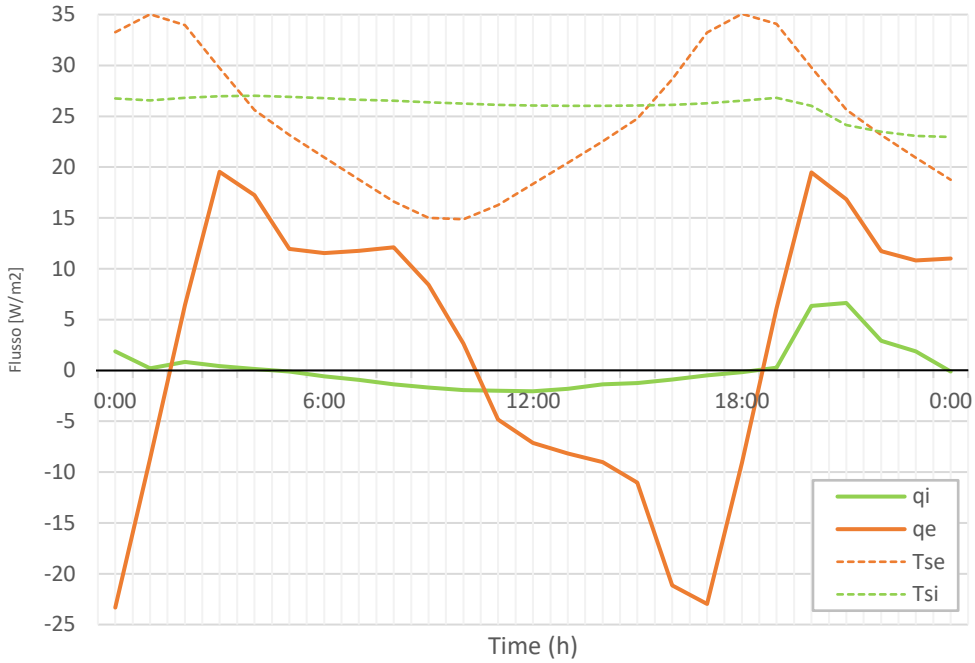


Grafico 24 - SIP1-NF: Andamento flussi nelle 24h

SIP2-NF

I Grafico 25 e Grafico 26 mostrano gli andamenti delle grandezze misurate sulle superfici del campione. In particolare, le temperature Tsi e Tse rappresentano rispettivamente le temperature misurate sulla faccia interna ed esterna della parete, q_i e q_e i relativi flussi termici. L'andamento di queste quattro grandezze è riferito ad un tempo di acquisizione di 72 ore.

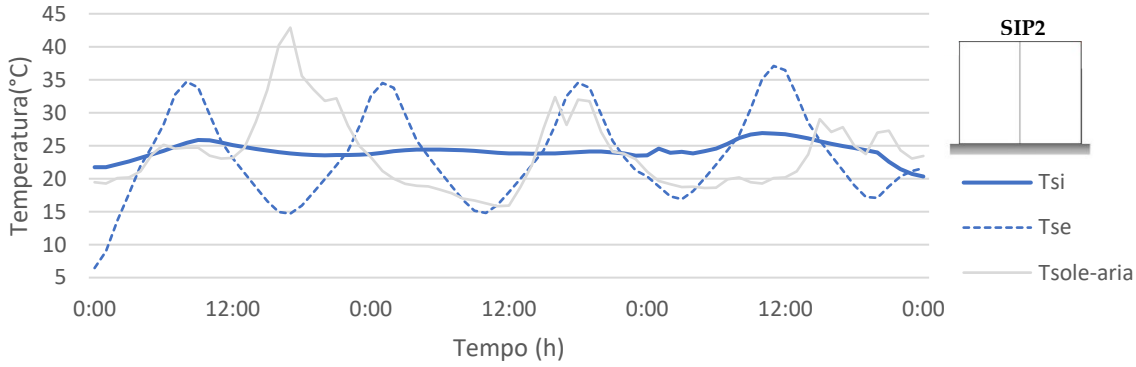


Grafico 25 - SIP2-NF: Andamento temperature superficiali interne ed esterne

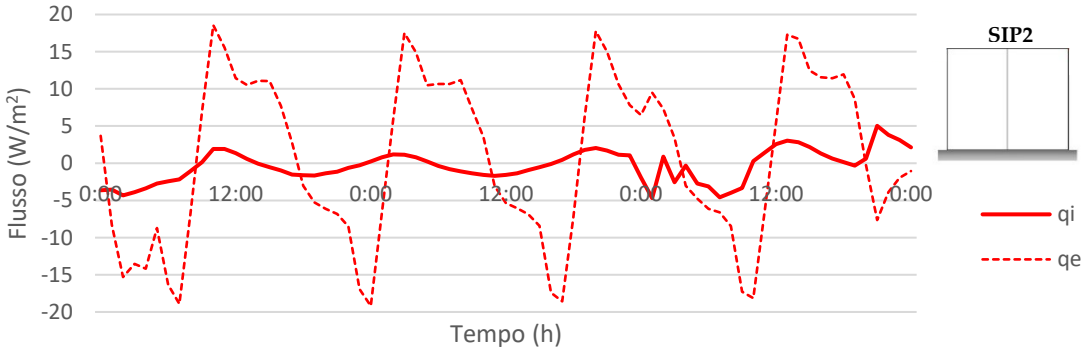


Grafico 26 - SIP2-NF: Andamento flusso termico interno ed esterno

In riferimento ai parametri dinamici determinati secondo la norma UNI EN ISO 13786 [40] sono state confrontate le curve delle temperature superficiali esterne (Grafico 27) ed interne (Grafico 28**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**) ottenute dalla sperimentazione con la curva teorica costruita sulla base dei seguenti parametri:

- ampiezza A: 12,5 [°C]
- pulsazione ω : 0,2616 [1/h]
- fattore di decremento (attenuazione) f_a : 0,967 [-]
- ritardo fattore di decremento (sfasamento) φ : 1,9 [h]

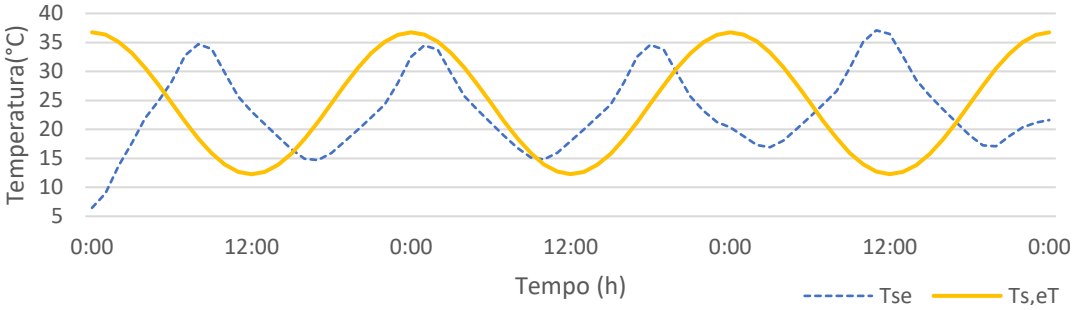


Grafico 27 - SIP2-NF: Confronto curve teorica-sperimentale delle temperature esterne

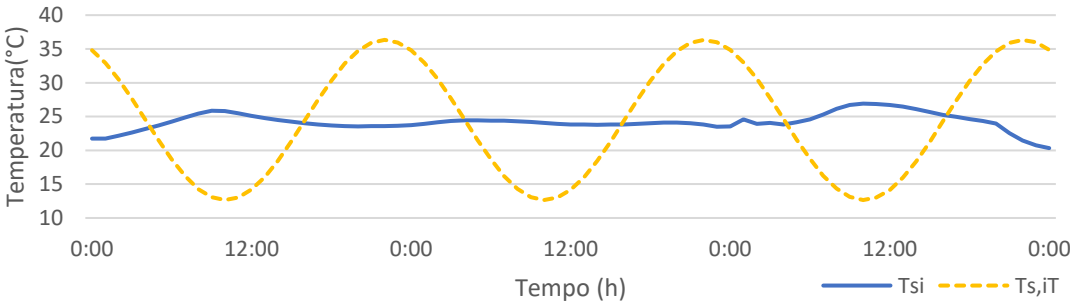
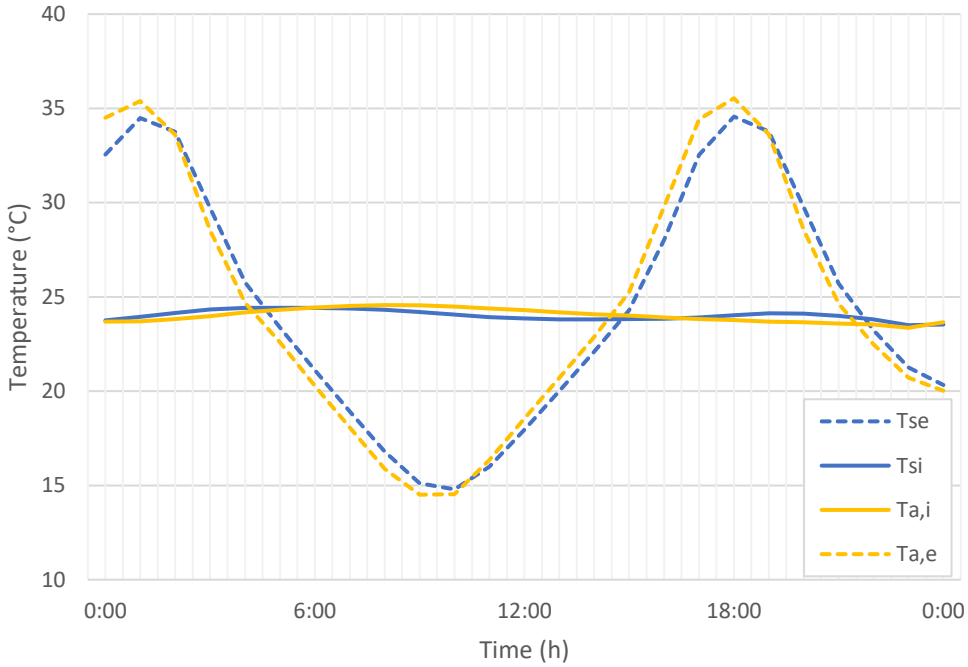


Grafico 28 - SIP2-NF: Confronto curve teorica-sperimentale delle temperature interne

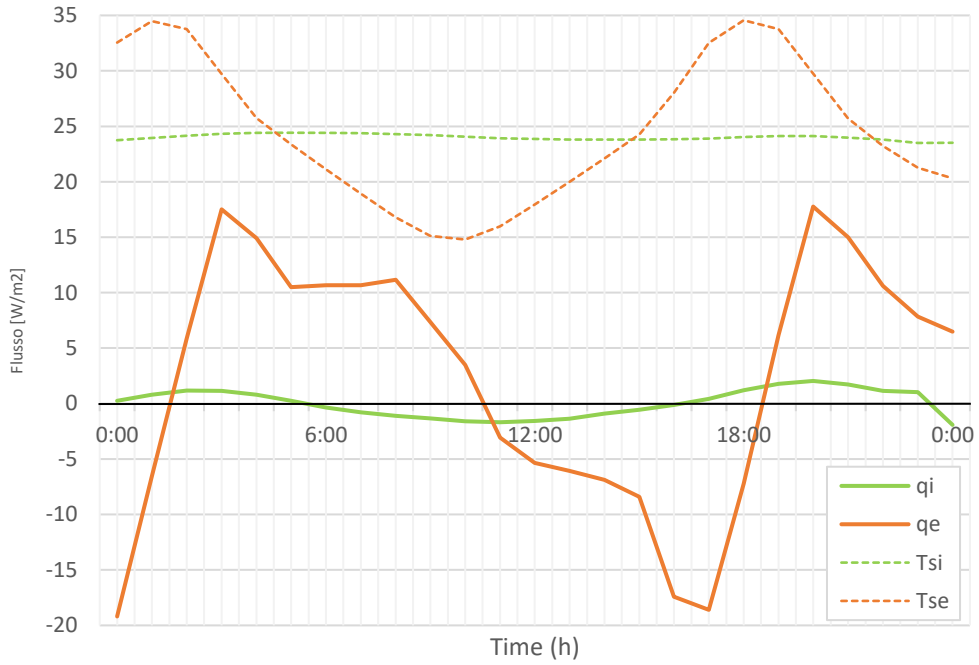
Anche per questa parete, come la precedente, il confronto tra le curve mostra come i risultati ottenuti dalla sperimentazione si discostino particolarmente da quelli determinati teoricamente con i parametri dinamici. Questo dimostra come, probabilmente, ancora ci sia troppa distanza tra la sperimentazione e la teoria che, seppur in linea di massima fornisce dei valori all'incirca confrontabili, questi

non possono essere confrontati in valore assoluto. In riferimento alle temperature dell'aria interna nei diversi istanti di prova (Grafico 18), per far sì che le pareti potessero essere confrontate nelle medesime condizioni di temperatura, si è scelto di limitare l'analisi a sole 24h. In particolare, sono state scelte le ore



corrispondenti al secondo giorno.

Grafico 29 - SIP2-NF: Andamento temperature nelle 24h



PLATFORM-NF

I Grafico 31 Grafico 32 mostrano gli andamenti delle grandezze misurate sulle superfici del campione. In particolare, le temperature Tsi e Tse rappresentano rispettivamente le temperature misurate sulla faccia interna ed esterna della parete, q_i e q_e i relativi flussi termici. L'andamento di queste quattro grandezze è riferito ad un tempo di acquisizione di 72 ore.

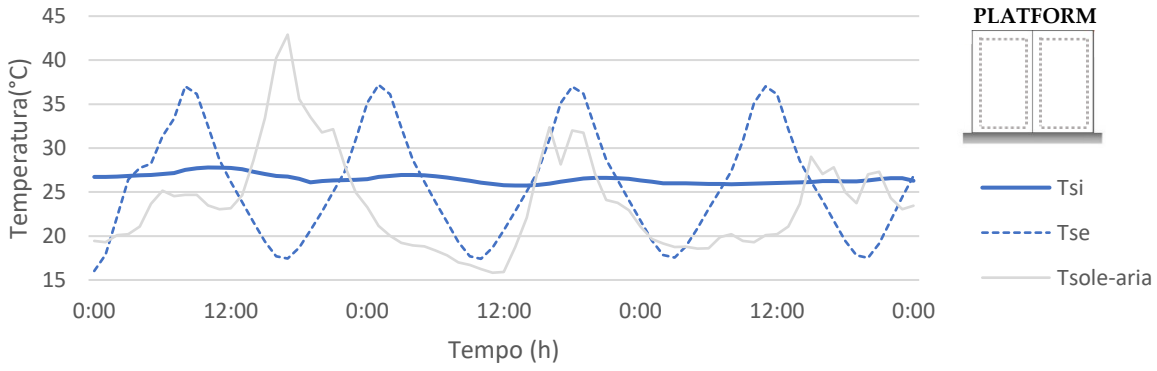


Grafico 31 - PLATFORM-NF: Andamento temperature superficiali interne ed esterne

Grafico 30 - SIP2-NF: Andamento flussi nelle 24h

In riferimento ai parametri dinamici determinati secondo la norma UNI EN ISO 13786 [40] sono state confrontate le curve delle temperature superficiali esterne

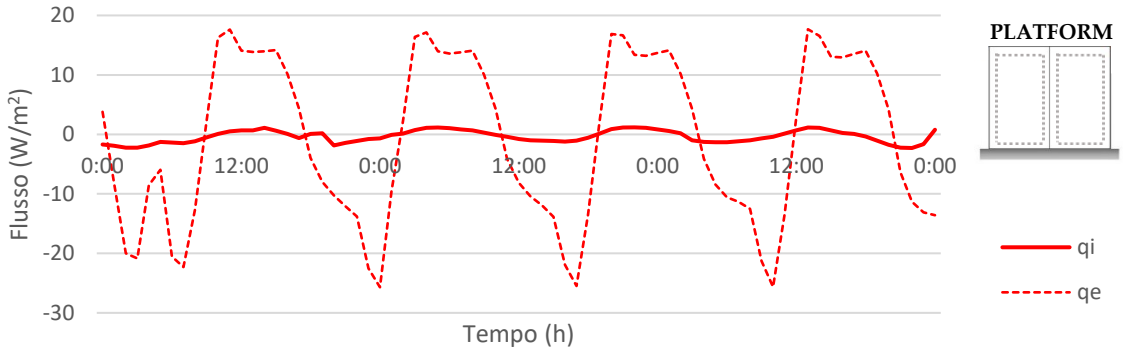


Grafico 32 - PLATFORM-NF: Andamento flusso termico interno ed esterno

(Grafico 33) ed interne (Grafico 34**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**) ottenute dalla sperimentazione con la curva teorica costruita sulla base dei seguenti parametri:

- ampiezza A: 12,5 [°C]
- pulsazione ω : 0,2616 [1/h]
- fattore di decremento (attenuazione) f_d : 0,841 [-]

- ritardo fattore di decremento (sfasamento) φ : 4,43 [h]

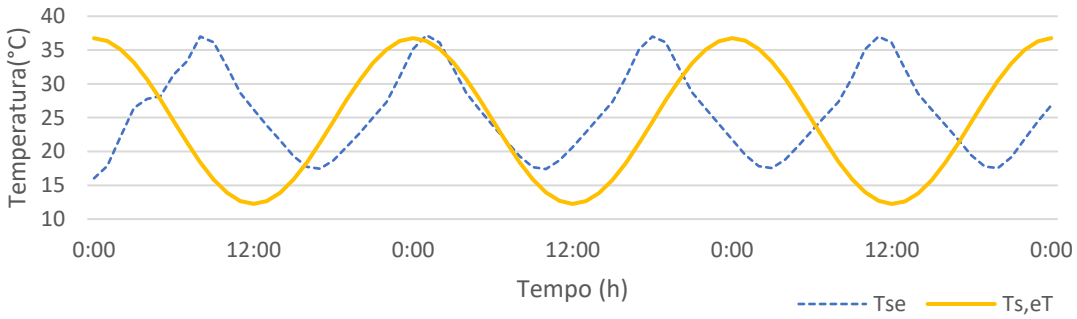


Grafico 33 - PLATFORM-NF: Confronto curve teorica-sperimentale delle temperature esterne

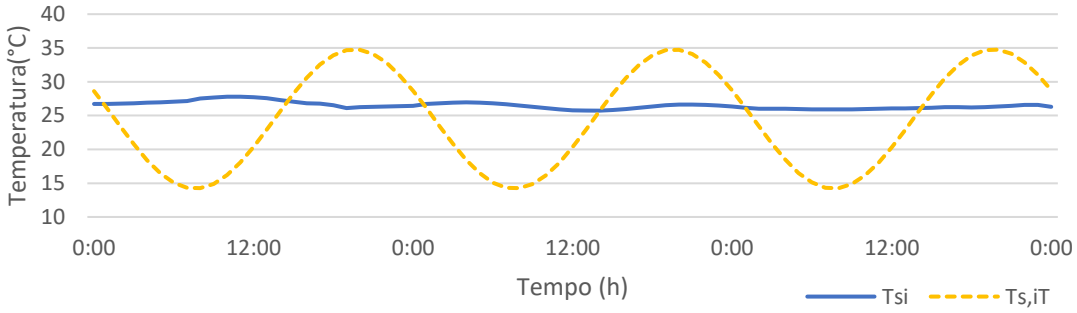


Grafico 34 - PLATFORM-NF: Confronto curve teorica-sperimentale delle temperature interne

Dai grafici si può notare come la curva teorica $T_{s,iT}$ della parete in PLATFORM-NF, seppur anch'essa fornisca una differenza notevole rispetto a quella sperimentale, risulta essere leggermente più attenuata e sfasata rispetto a quelle calcolate per i SIP1/2-NF. Tale contributo di attenuazione e sfasamento dell'onda termica probabilmente è attribuibile agli strati di freno al vapore e membrana impermeabile di cui la parete è composta.

Per poter confrontare la parete PLATFORM-NF con le altre prima descritte, si è limitata l'analisi alle sole 24h. In particolare, sono state scelte le ore corrispondenti al secondo giorno.

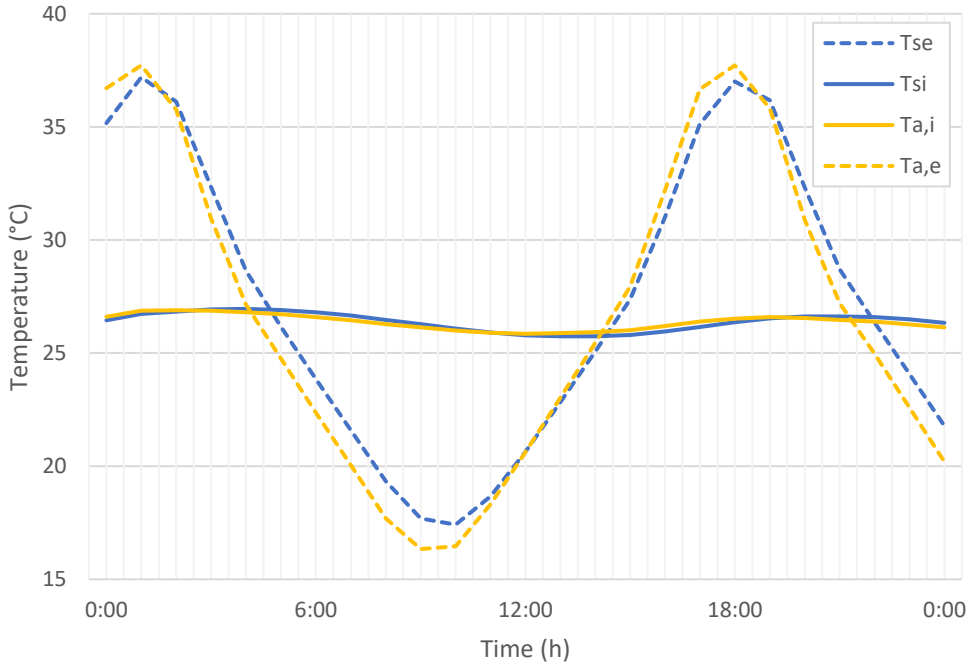


Grafico 35 - PLATFORM-NF: Andamento delle temperature nelle 24h

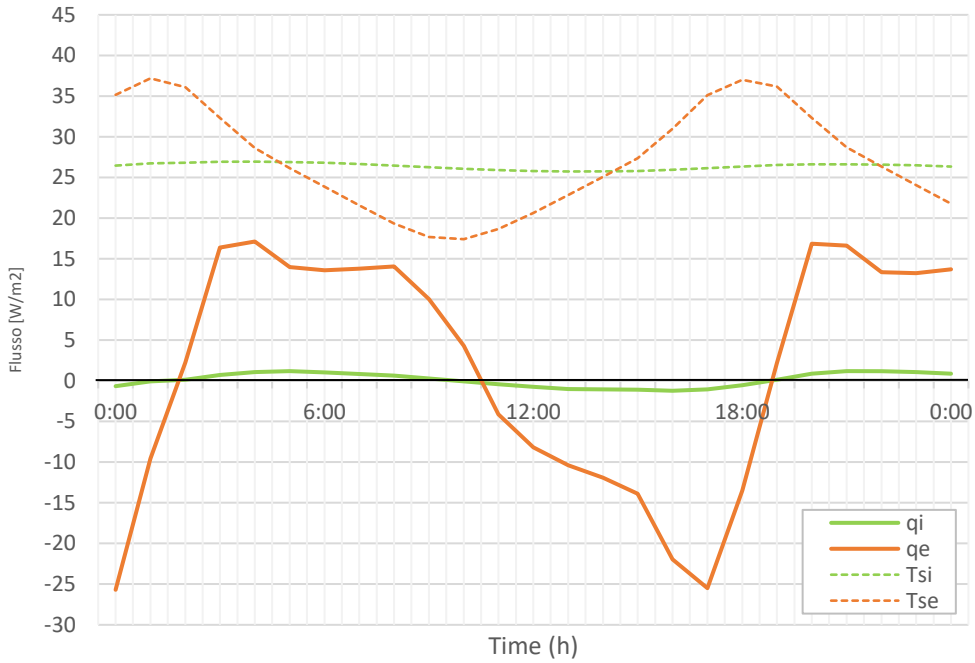


Grafico 36 - PLATFORM-NF: Andamento dei flussi nelle 24h

5.2.2.2 Campioni con le finiture F

SIP1-F

I Grafico 37Grafico 20e Grafico 38 mostrano gli andamenti delle grandezze misurate sulle superfici del campione. In particolare, le temperature Tsi e Tse rappresentano rispettivamente le temperature misurate sulla faccia interna ed esterna della parete, q_i e q_e i relativi flussi termici. L'andamento di queste quattro grandezze è riferito ad un tempo di acquisizione di 72 ore.

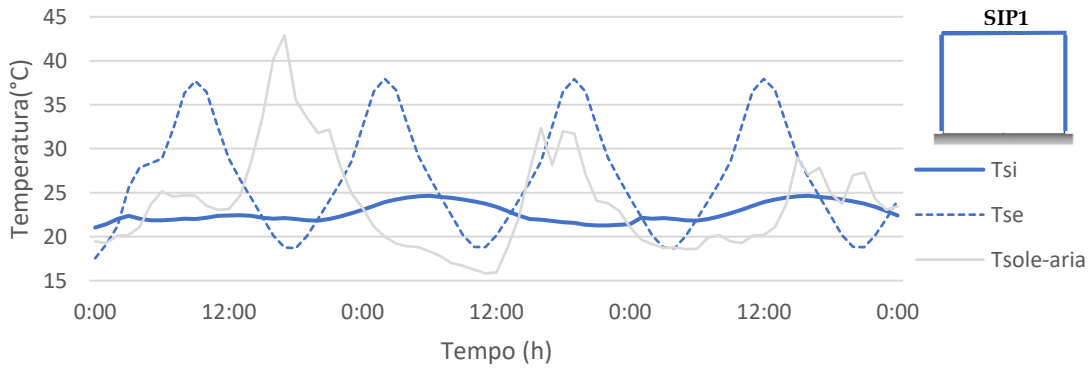


Grafico 37 - SIP1-F: Andamento temperature superficiali interne ed esterne

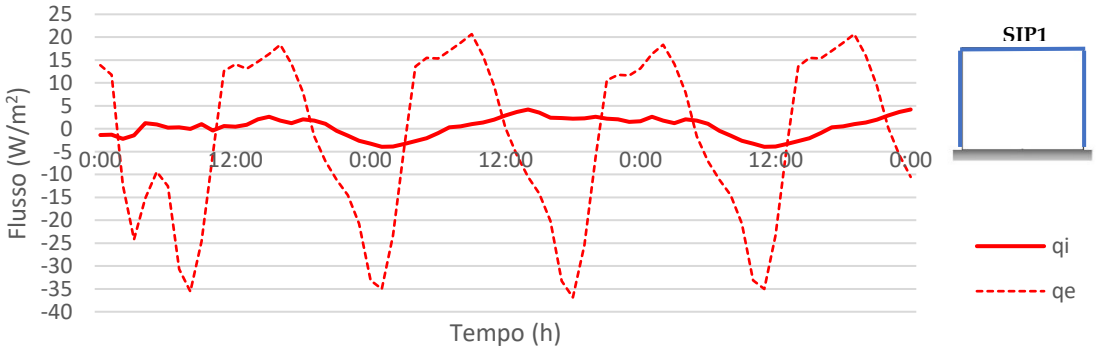


Grafico 38 - SIP1-F: Andamento flusso termico interno ed esterno

In riferimento ai parametri dinamici determinati secondo la norma UNI EN ISO 13786 [40] sono state confrontate le curve delle temperature superficiali esterne (Grafico 39) ed interne (Grafico 40) ottenute dalla sperimentazione con la curva teorica costruita sulla base dei seguenti parametri:

- ampiezza A: 12,5 [°C]
- pulsazione ω : 0,2616 [1/h]
- fattore di decremento (attenuazione) f_a : 0,5362 [-]
- ritardo fattore di decremento (sfasamento) φ : 7,11 [h]

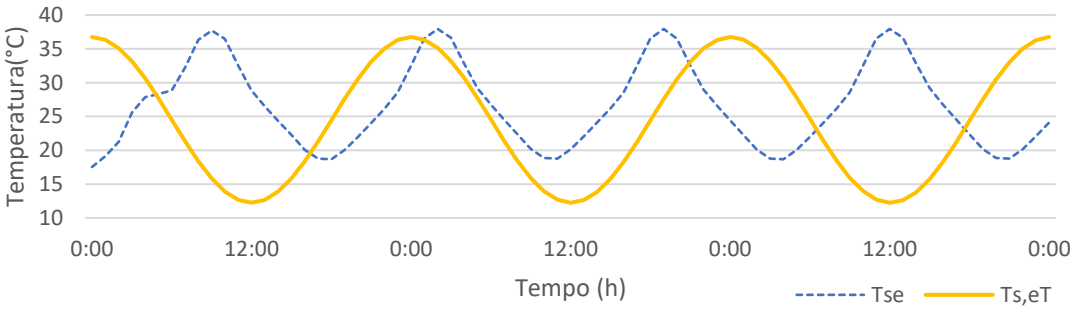


Grafico 39 - SIP1-F: Confronto curve teorica-sperimentale delle temperature esterne

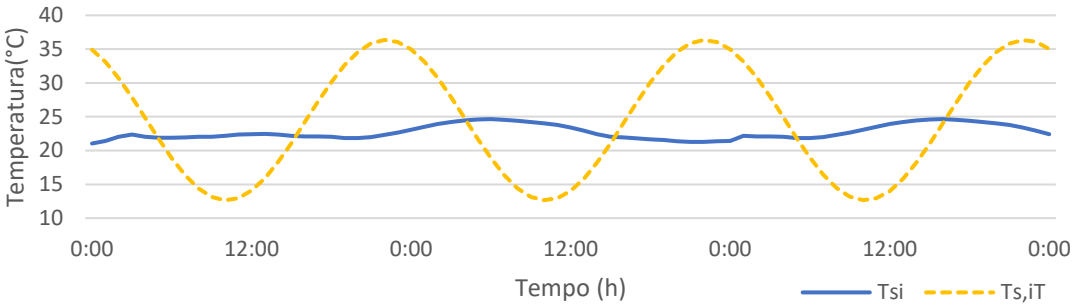


Grafico 40 - SIP1-F: Confronto curva teorica-sperimentale delle temperature interne

Dal confronto tra le curve si denota come, in particolare per le curve delle temperature interne, i risultati ottenuti dalla sperimentazione si discostino particolarmente da quelli determinati teoricamente con i parametri dinamici. In particolare, seppur l'onda termica teoria $T_{s,i}$ si presenta attenuata e sfasata rispetto a quella ottenuta dalla sperimentazione, questa è ancora relativamente distante da quella sperimentale.

In riferimento alle temperature dell'aria interna nei diversi istanti di prova (Grafico 18), per far sì che le pareti potessero essere confrontate nelle medesime condizioni di temperatura e soprattutto in un tratto in cui la temperatura dell'aria interna alla stanza fosse pressoché costante, si è scelto di limitare l'analisi a sole 24h. In particolare, sono state scelte le corrispondenti al secondo giorno di prova.

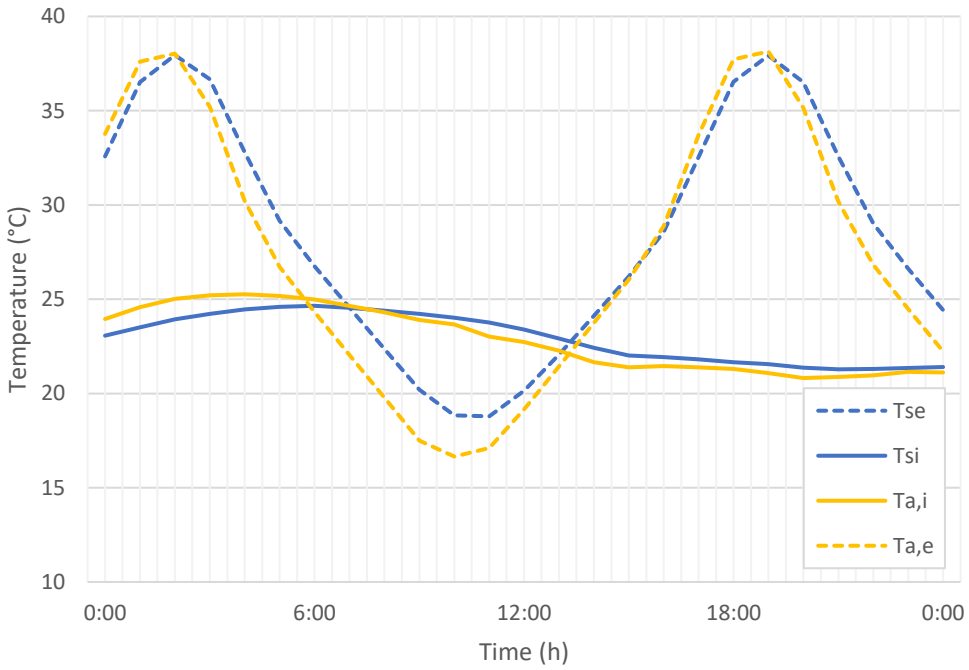


Grafico 41 - SIP1-F: Andamento temperature nelle 24h

La temperatura superficiale esterna rispetto a quella dell'aria esterna, presenta un valore inferiore di qualche grado tra le ore 12 e le 18.

Il Grafico 41 mostra l'andamento delle temperature superficiali interne ed esterne in relazione alle temperature dell'aria Ta,i (interna al laboratorio) Ta,e (interna alla camera climatica). Il Grafico 42 evidenzia l'andamento dei flussi nelle 24 h analizzate.

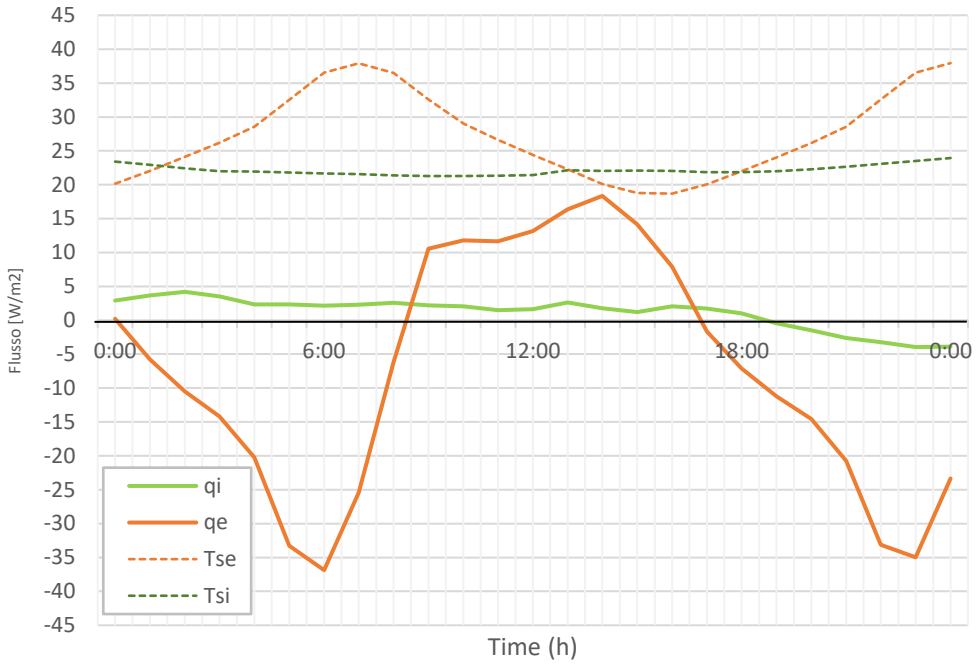


Grafico 42 - SIP1-F: Andamento flussi nelle 24h

E' evidente come i flussi, sia interno che esterno, seguano l'andamento delle temperature superficiali, con la differenza di essere sfasati nel tempo.

SIP2-F

I Grafico 43Grafico 20e Grafico 44 mostrano gli andamenti delle grandezze misurate sulle superfici del campione. In particolare, le temperature Tsi e Tse rappresentano rispettivamente le temperature misurate sulla faccia interna ed esterna della parete, q_i e q_e i relativi flussi termici. L'andamento di queste quattro grandezze è riferito ad un tempo di acquisizione di 72 ore.

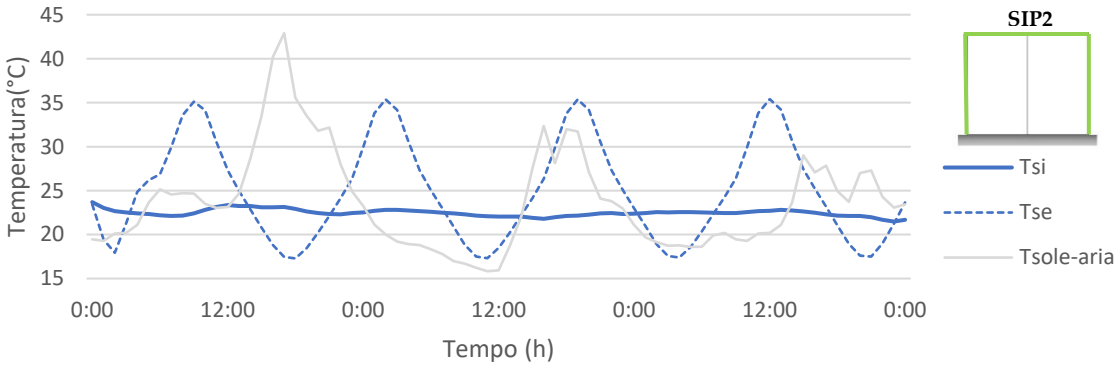


Grafico 43 - SIP2-F: Andamento temperature superficiali interne ed esterne

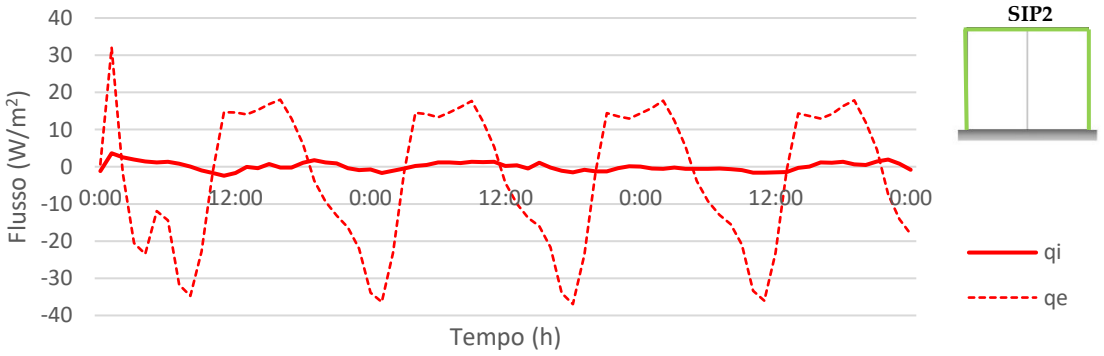


Grafico 44 - SIP2-F: Andamento flusso termico interno ed esterno

In riferimento ai parametri dinamici determinati secondo la norma UNI EN ISO 13786 [40] sono state confrontate le curve delle temperature superficiali esterne (Grafico 45) ed interne (Grafico 46) ottenute dalla sperimentazione con la curva teorica costruita sulla base dei seguenti parametri:

- ampiezza A: 12,5 [°C]
- pulsazione ω : 0,2616 [1/h]
- fattore di decremento (attenuazione) f_d : 0,5362 [-]
- ritardo fattore di decremento (sfasamento) φ : 7,11 [h]

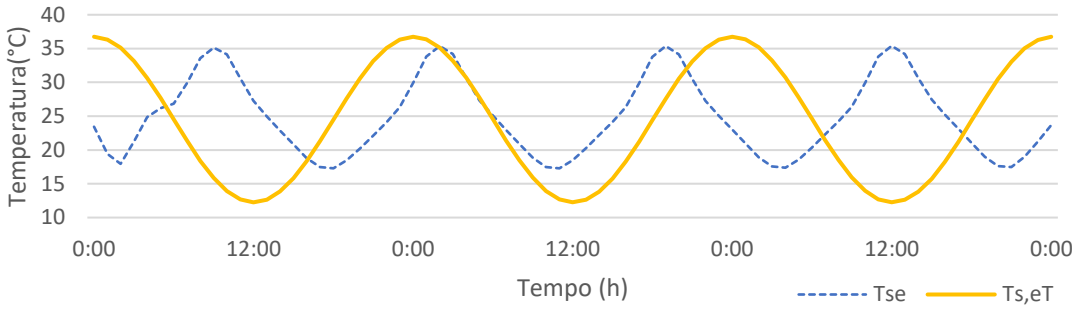


Grafico 45 - SIP2-F: Confronto curve teorica-sperimentale delle temperature esterne

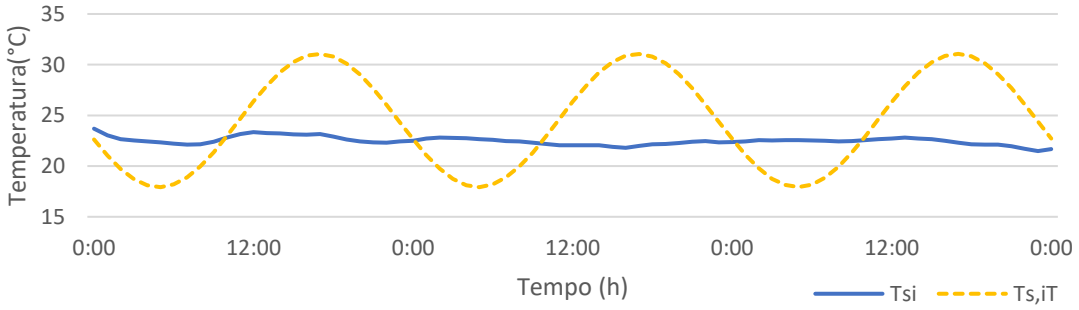


Grafico 46 - SIP2-F: Confronto curva teorica-sperimentale delle temperature interne

Come per il SIP-1 i risultati ottenuti dalla sperimentazione si discostano particolarmente da quelli determinati teoricamente determinati con i parametri dinamici. In particolare, seppur l'onda termica teoria $T_{s,iT}$ si presenta attenuata e

sfasata rispetto a quella ottenuta dalla sperimentazione, questa è ancora relativamente distante da quella sperimentale.

In riferimento alle temperature dell'aria interna nei diversi istanti di prova (Grafico 18), per far sì che le pareti potessero essere confrontate nelle medesime condizioni di temperatura e soprattutto in un tratto in cui la temperatura dell'aria interna alla stanza fosse pressoché costante, si è scelto di limitare l'analisi a sole 24h. In particolare, sono state scelte le ore a cavallo del secondo e terzo giorni di acquisizione dei dati.

Il Grafico 47 mostra l'andamento delle temperature superficiali interne ed esterne in relazione alle temperature dell'aria Ta,i (interna al laboratorio) Ta,e (interna alla camera climatica).

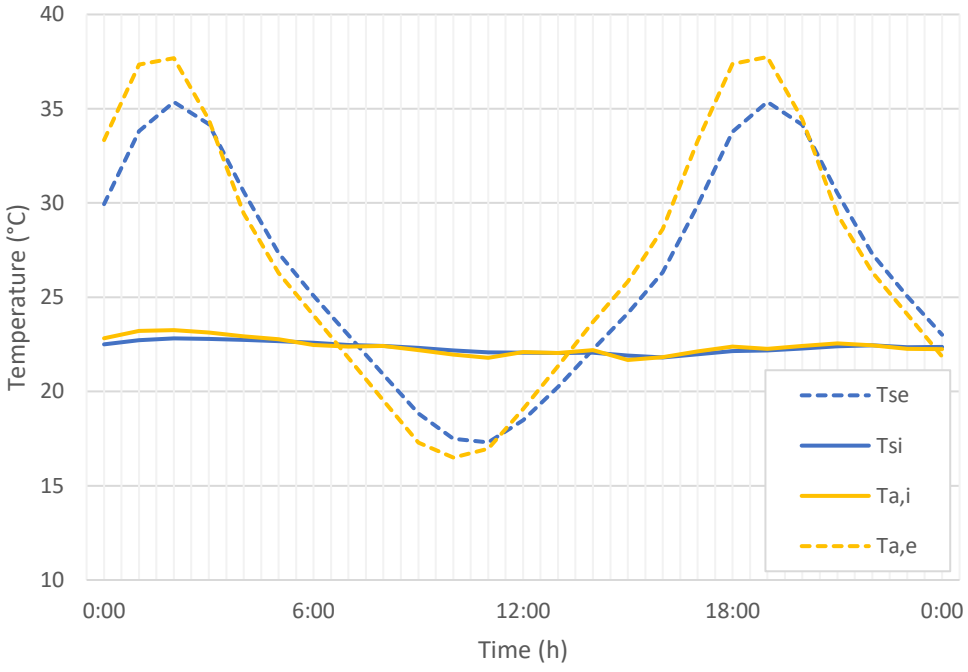


Grafico 47 - SIP2-F: Andamento temperature nelle 24h

Il Grafico 48 evidenzia l'andamento dei flussi nelle 24 h analizzate.

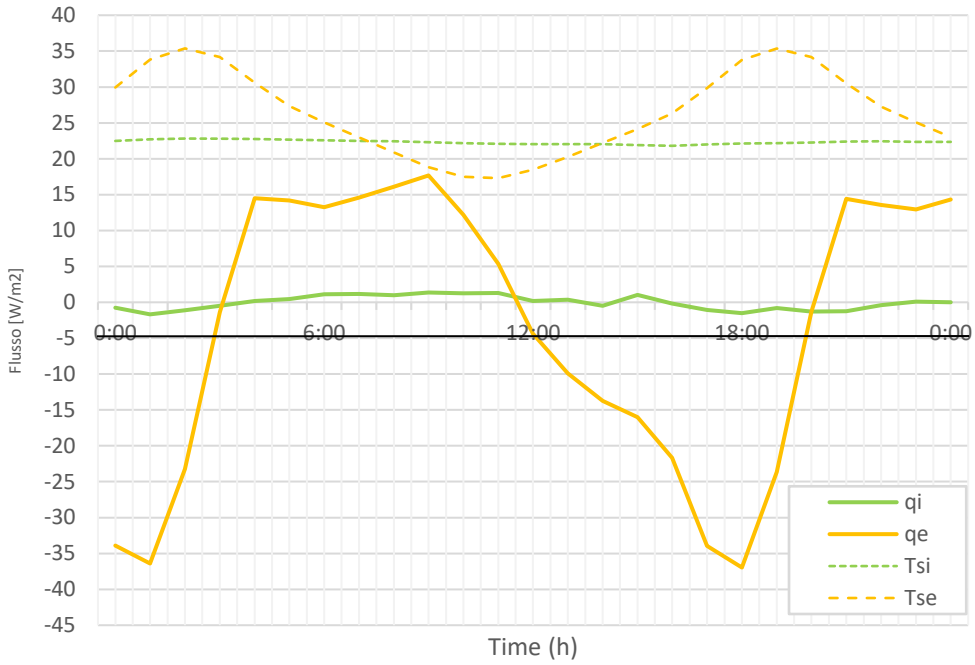


Grafico 48 - SIP2-F: Andamento flussi nelle 24h

Il flusso esterno segue l'andamento sinusoidale della temperatura superficiale esterna, con l'unica differenza di essere sfasato di circa 6 ore rispetto alla curva sinusoidale.

PLATFORM-F

I Grafico 49Grafico 20e Grafico 44 mostrano gli andamenti delle grandezze misurate sulle superfici del campione. In particolare, le temperature Tsi e Tse rappresentano rispettivamente le temperature misurate sulla faccia interna ed esterna della parete, q_i e q_e i relativi flussi termici. L'andamento di queste quattro grandezze è riferito ad un tempo di acquisizione di 72 ore.

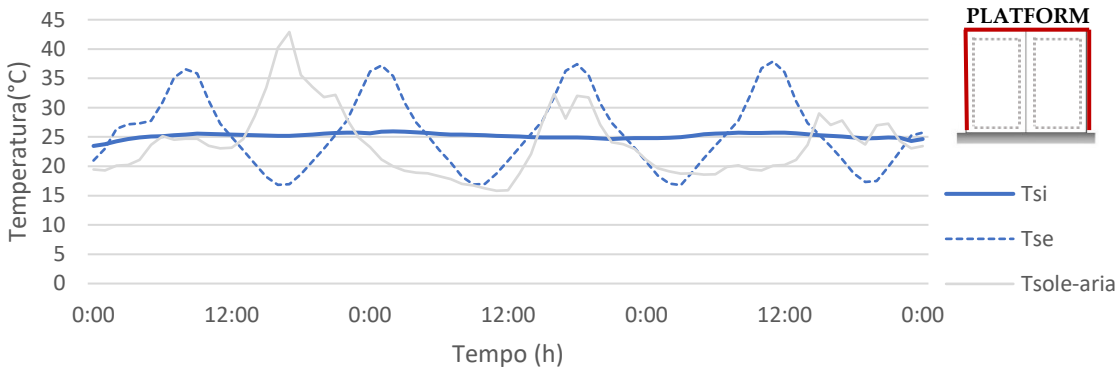


Grafico 49 - PLATFORM-F: Andamento temperature superficiali interne ed esterne

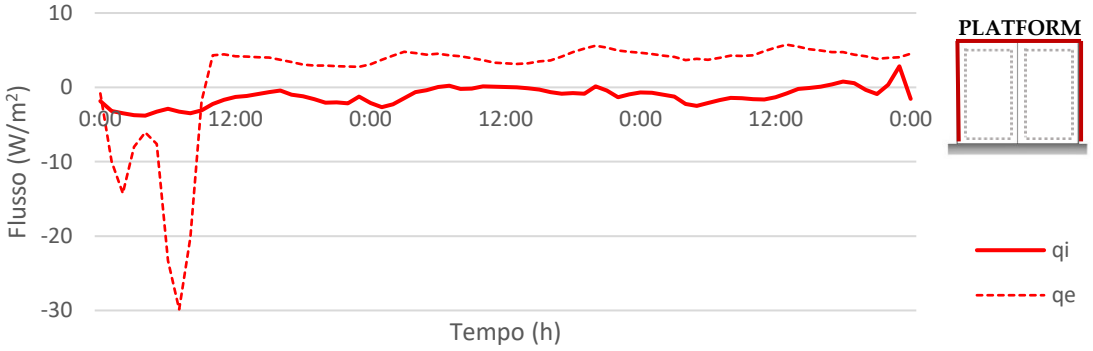


Grafico 50 - PLATFORM-F: Andamento flusso termico interno ed esterno

In riferimento ai parametri dinamici determinati secondo la norma UNI EN ISO 13786 [40] sono state confrontate le curve delle temperature superficiali esterne (Grafico 51) ed interne (Grafico 52) ottenute dalla sperimentazione con la curva teorica costruita sulla base dei seguenti parametri:

- ampiezza A: 12,5 [°C]
- pulsazione ω : 0,2616 [1/h]
- fattore di decremento (attenuazione) f_d : 0,231 [-]
- ritardo fattore di decremento (sfasamento) φ : 12,93 [h]

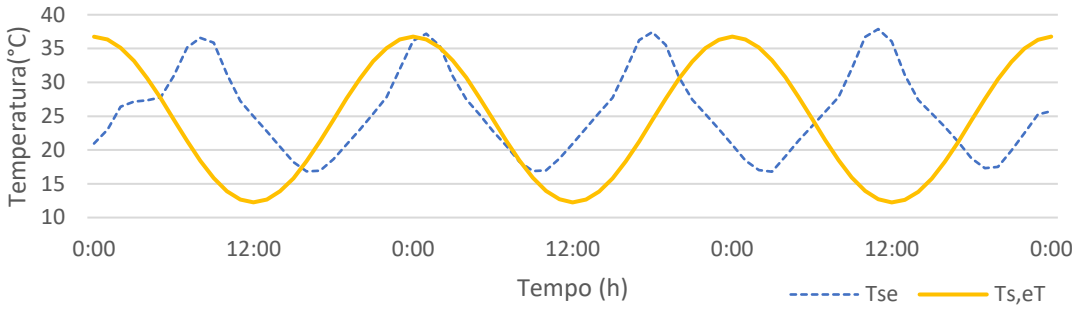


Grafico 51 - PLATFORM-F: Confronto curve teorica-sperimentale delle temperature esterne

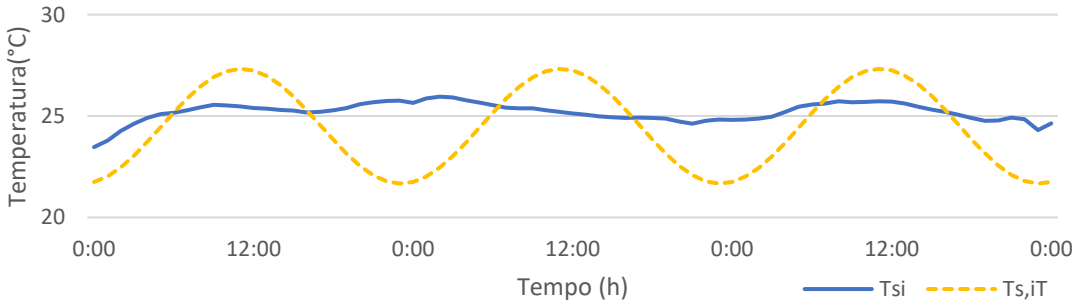


Grafico 52 - PLATFORM-F: Confronto curva teorica-sperimentale delle temperature interne

In riferimento alle pareti precedentemente analizzate, la parete PLATFORM-F è quella che presenta un fattore di sfasamento ed attenuazione superiore rispetto alle altre. Infatti, come visibile dal grafico l'onda termica $T_{s,iT}$ ha un andamento che si avvicina a quella sperimentale.

In riferimento alle temperature dell'aria interna nei diversi istanti di prova (Grafico 18), per far sì che le pareti potessero essere confrontate nelle medesime condizioni di temperatura e soprattutto in un tratto in cui la temperatura dell'aria interna alla stanza fosse pressoché costante, si è scelto di limitare l'analisi a sole 24h. In particolare, sono state scelte le ore a cavallo del secondo e terzo giorni di acquisizione dei dati.

Il Grafico 53 mostra l'andamento delle temperature superficiali interne ed esterne in relazione alle temperature dell'aria Ta,i (interna al laboratorio) Ta,e (interna alla camera climatica).

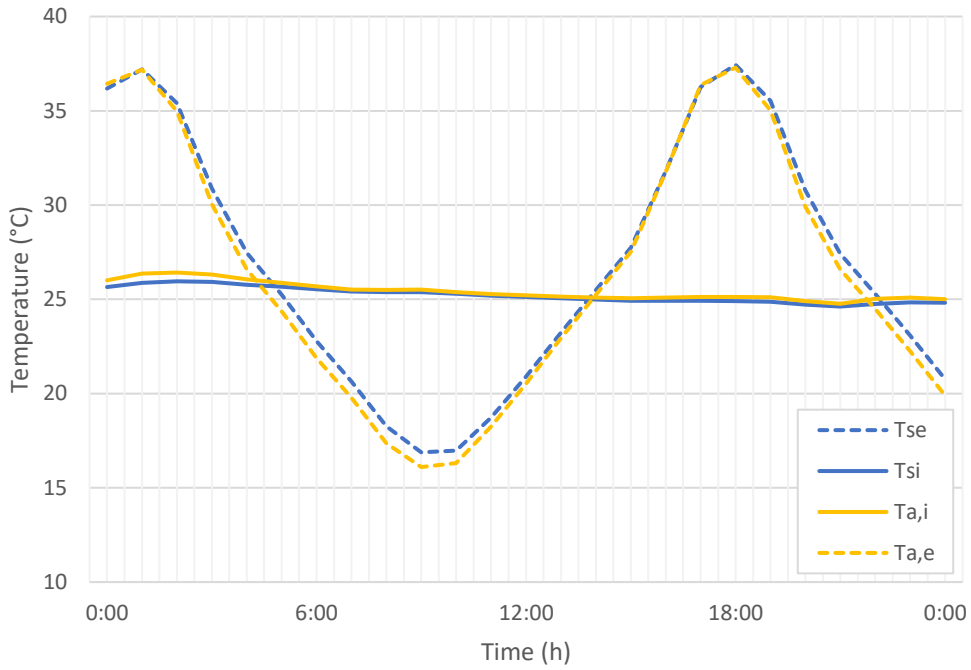


Grafico 53 - PLATFORM-F: Andamento temperature nelle 24h

Il Grafico 54 evidenzia l'andamento dei flussi nelle 24 h analizzate. Questi si presentano, differentemente dagli altri, molto attenuati rispetto all'andamento delle temperature superficiali.

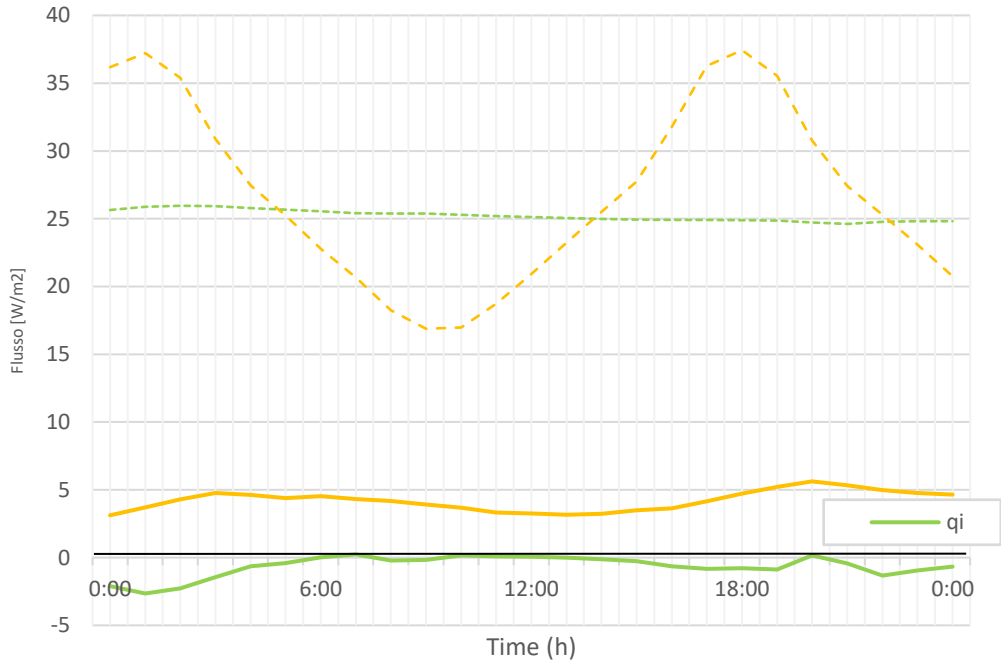


Grafico 54 - PLATFORM-F: Andamento flussi nelle 24h

6 DISCUSSIONE

L'obiettivo di questo Capitolo consiste nell'interpretare i risultati ottenuti dalle prove nelle due diverse configurazioni di prova. Si cercherà di valutare il comportamento termico delle due tecnologie costruttive mettendole a confronto.

6.1 Regime stazionario

I risultati ottenuti dalle prove sperimentali in regime stazionario vengono riassunti e confrontati insieme per i due gruppi di campioni "F" ed "NF".

6.1.1 Campioni senza finiture NF

Il Grafico 55 mostra l'andamento delle temperature superficiali interne ed esterne riferite ad ogni parete analizzata.

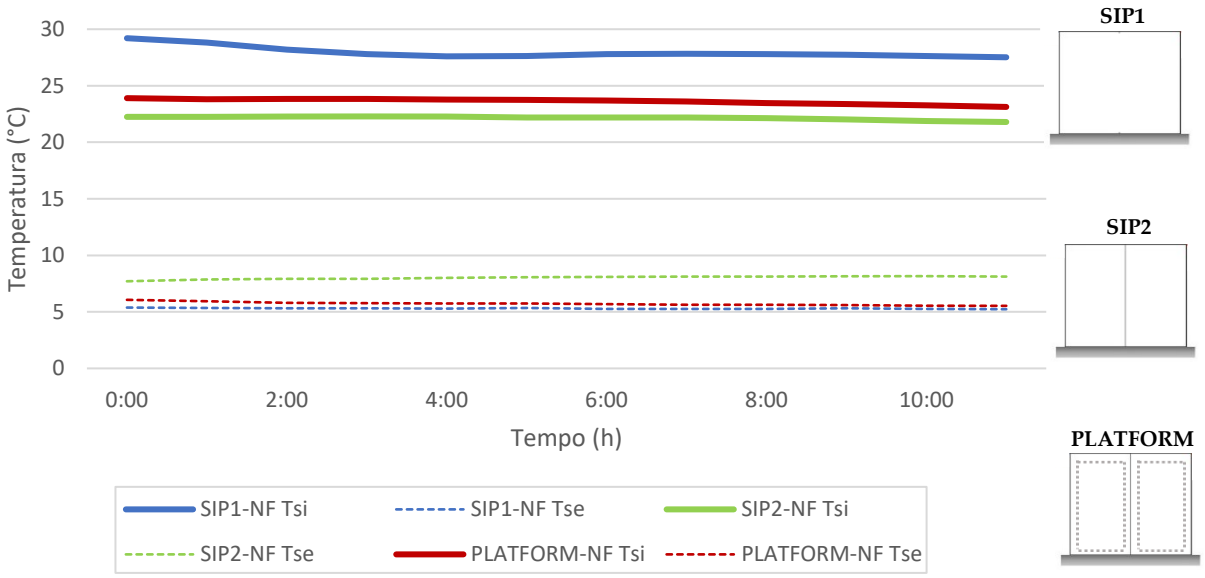


Grafico 55 - Campioni NF: Andamento delle temperature superficiali

Come si può notare, le temperature superficiali interne rilevate sui pannelli presentano una leggera differenza a causa delle diverse condizioni meteorologiche che hanno caratterizzato i diversi istanti di prova. In ogni caso l'andamento delle temperature superficiali, sia interne che esterne, risulta essere costante per tutto il periodo indagato e con valori prossimi alle temperature degli ambienti interno ed esterno impostato.

Nel Grafico 56 sono invece visualizzati gli andamenti dei flussi termici interni caratteristici di ogni pannello testato.

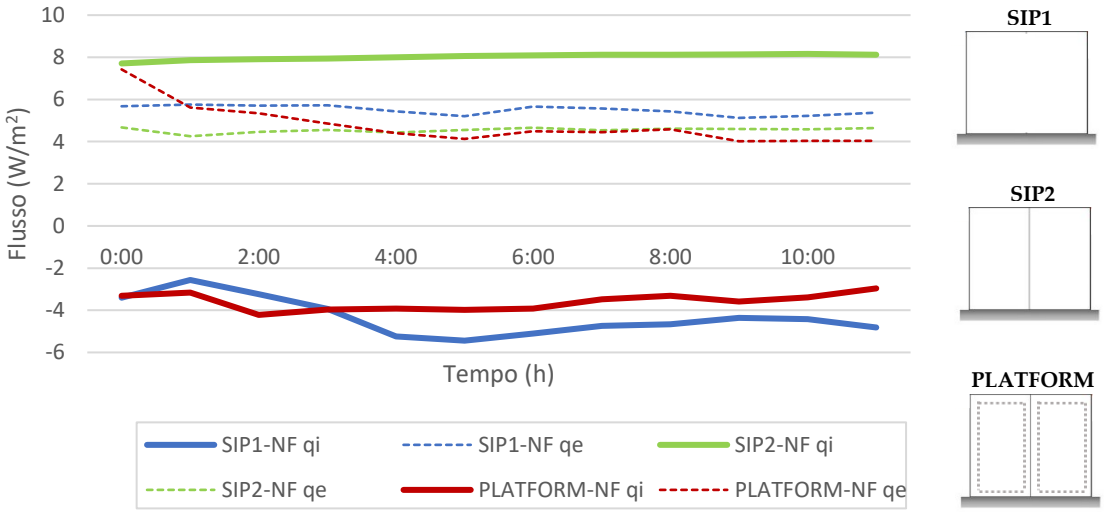


Grafico 56 - Campioni NF: Andamento dei flussi termici

Dal grafico si nota come il flusso interno, in particolar modo della parete SIP1-NF, sembra non essersi ancora stabilizzato dopo la quarta ora. A tal proposito si è scelto di limitare l'analisi dei flussi interni alle sole 6h centrali (Grafico 57), andando quindi a scartare i dati ottenuti nelle prime quattro e nell'ultima ora.

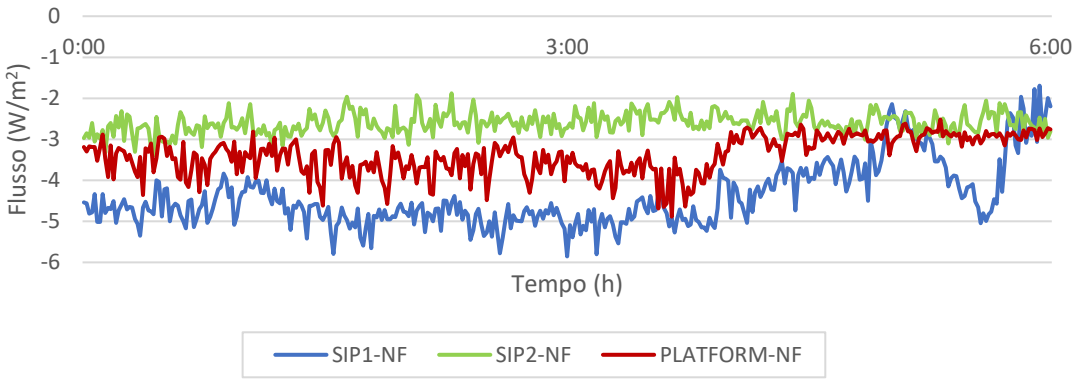


Grafico 57 - Campioni NF: Confronto flussi 6h

E' possibile notare dal grafico che il SIP1-NF presenta un flusso superiore agli altri.

Scartando ulteriormente un'ultima ora, è stato valutato il rapporto tra il flusso e la differenza di temperatura superficiale interna ed esterna, per ogni campione analizzato.

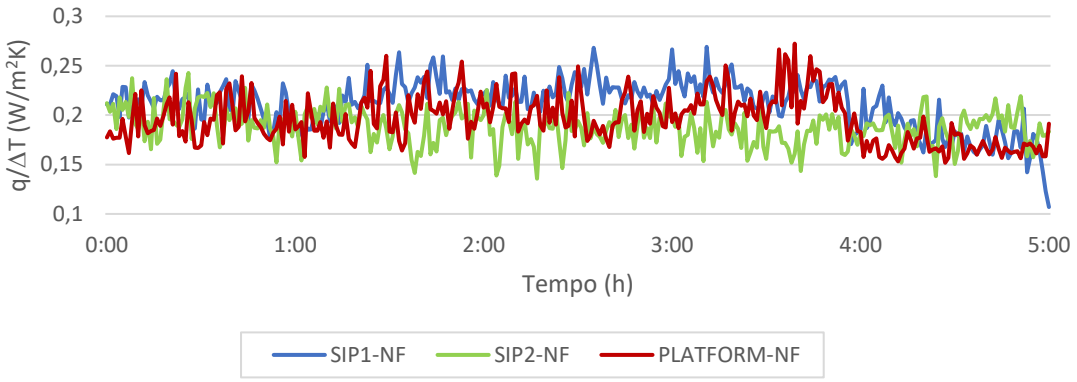


Grafico 58 - Campioni NF: Confronto q/ΔT 5h

Il Grafico 58 fornisce una stima della trasmittanza termica caratteristica di ogni campione analizzato. Si nota come ciascuna curva presenti una oscillazione del valore di trasmittanza nell'intervallo di tempo, sicuramente dovuta ad una variazione temporale delle temperature dell'aria.

Il valore di trasmittanza termica in opera è stato successivamente determinato mediante il metodo delle medie progressive, ottenendo i risultati riportati in Tabella 17.

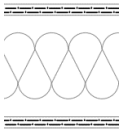
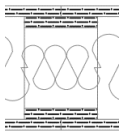
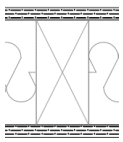
Campioni senza finiture (NF)	Strati	Spessore [m]	Conducibilità [W/mK]	U_0 [W/m²K]	U_{opera} [W/m²K]	ΔU [%]
SIP1-NF						
	1- OSB/3	0,015	0,130			
	2 - EPS	0,140	0,035	0,227	**0,254**	11,89
	3 – OSB/3	0,015	0,130			
SIP2-NF						
	1- OSB/3	0,03	0,130			
	2 - EPS	0,11	0,035	0,231	**0,247**	6,92
	3 – OSB/3	0,03	0,130			
PLAT-NF						
	1- OSB3	0,018	0,100			
	2 - Freno a vapore	0,001	0,220			
	3 - Lana di roccia	0,160	0,032	0,243	**0,209**	16,26
	4 - Membrana	0,001	0,220			
	5 - OSB3	0,018	0,100			

Tabella 17 – Campioni NF:Confronto trasmittanza U_0 e U_{opera}

Si ritengono soddisfacenti i risultati ottenuti dalla sperimentazione in quanto, mediante la procedura di calcolo fornita dalla normativa, seppur semplificata ai fini della sperimentazione, i valori di trasmittanza termica in opera determinati sono prossimi a quelli calcolati secondo la UNI EN ISO 6946 pur considerando il margine di errore nell'acquisizione dei dati imputabile ai sensori.

6.1.2 Campioni con le finiture F

Il Grafico 59 mostra l'andamento delle temperature superficiali interne ed esterne riferite ad ogni parete analizzata nel periodo temporale di 11h.

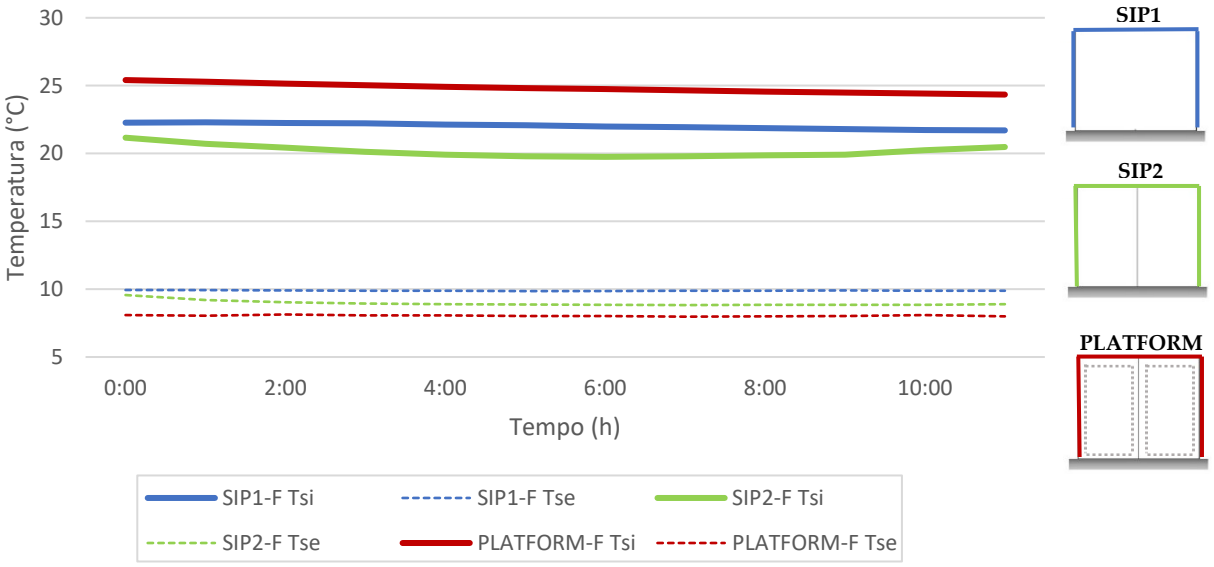


Grafico 59- Campioni F: Andamento delle temperature superficiali

Dal grafico si nota come le temperature analizzate presentino un andamento costante per tutto il periodo indagato. Una leggera differenza è individuabile tra le temperature superficiali rilevate sui differenti pannelli. Questa probabilmente è influenzata dalle diverse condizioni meteorologiche che hanno caratterizzato i diversi istanti di prova.

Nel Grafico 60 sono invece visualizzati gli andamenti dei flussi termici interni caratteristici di ogni pannello testato.

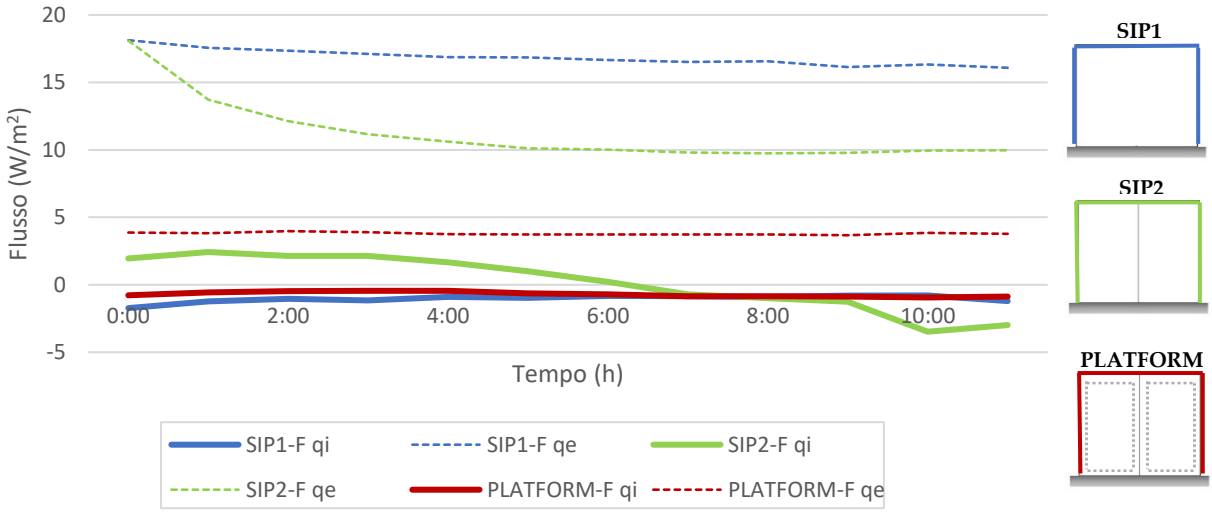


Grafico 60 - Campioni F: Andamento dei flussi termici

Come si nota dal grafico, l'andamento del flusso del SIP2-F in particolar modo, presenta delle variazioni nelle 11h indagate. Per questo si è scelto di valutare l'andamento dei flussi interni rispettivi di ogni pannello limitatamente alle 7h iniziali (Grafico 61).

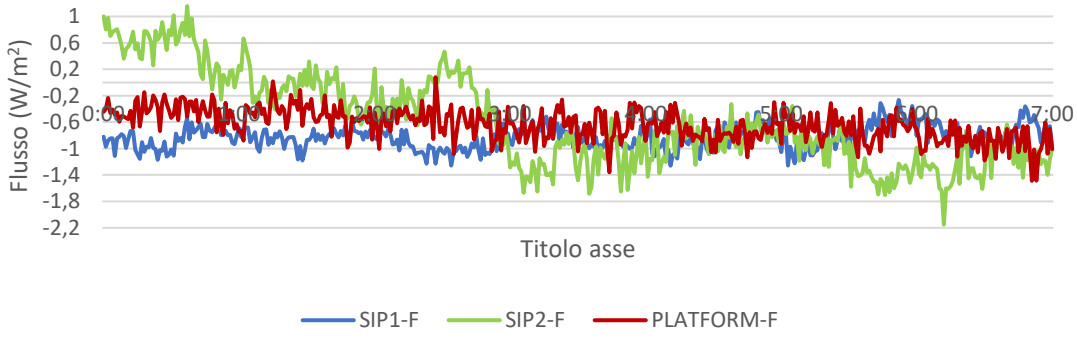


Grafico 61 - Campioni F: Confronto flussi 7h

Dal grafico si nota come i due pannelli SIP presentano un flusso elevato rispetto alla parete in PLATFORM FRAME. Probabilmente, questo risultato è strettamente legato all'influenza dell'intercapedine sull'andamento del flusso nelle pareti stesse.

Andando a confrontare il rapporto tra il flusso termico scambiato e la differenza di temperatura superficiale interna ed esterna, per i tre pannelli indagati, si è potuta stimare la trasmittanza termica di ogni singolo pannello.

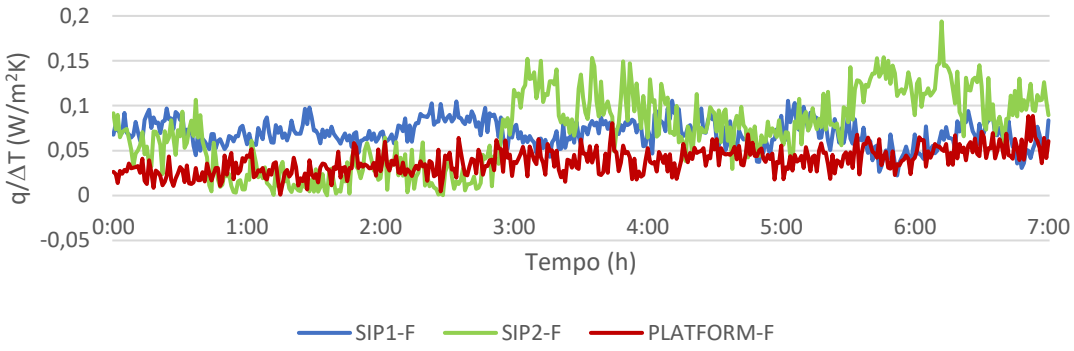


Grafico 62 - Campioni F: Confronto q/ΔT 7h

Il Grafico 62 fornisce una stima della trasmittanza termica caratteristica di ogni campione analizzato. Da notare come l'andamento del rapporto per la parete in PLATFORM-F si presenta pressoché costante per le ore indagate, a differenza delle altre due pareti in cui è evidente una oscillazione continua e di ampiezza notevole.

L'andamento ottenuto dal rapporto si discosta però dalla trasmittanza termica in opera calcolato secondo il metodo delle medie progressive. Questo viene considerato solamente in via qualitativa per fornire un quadro in linea generale di quello che è l'andamento temporale delle grandezze analizzate.

Il valore di trasmittanza termica in opera determinato mediante il metodo delle medie progressive è riportato in per ogni parete indagata (Tabella 18).

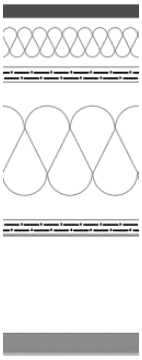
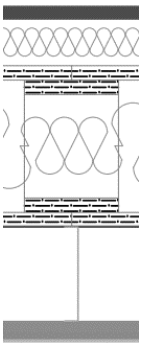
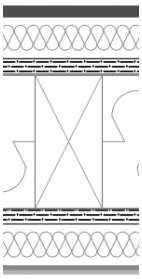
Campioni con finiture (F)	Strati	Spessore [m]	Conducibilità [W/mK]	U_0 [W/m²K]	$\mathbf{U_{opera}}$ [W/m²K]	ΔU [%]
SIP1-F						
	1 - Cartongesso	0,013	0,210			
	2 - Cementolegno	0,050	0,065			
	3 - OSB/3	0,015	0,130			
	4 - EPS	0,140	0,035			
	5 - OSB/3	0,015	0,130			
	6 - Membrana	0,001	0,220	0,171	**0,678**	296,49
	7 - Interc.aria	0,100				
	8 - Barriera	0,001	0,170			
	all'acqua	0,013	0,350			
	9 - Aquapanel	0,007	0,540			
	10 - Rasante	0,002	0,700			
	11- Intonachino					
SIP2-F						
	1 - Cartongesso	0,013	0,210			
	2 - Cementolegno	0,050	0,065			
	3 - OSB/3	0,030	0,130			
	4 - EPS	0,110	0,035			
	5 - OSB/3	0,030	0,130			
	6 - Membrana	0,001	0,220	0,173	**0,531**	206,93
	7 - Interc.aria	0,100				
	8 - Barriera	0,001	0,170			
	all'acqua	0,013	0,350			
	9 - Aquapanel	0,007	0,540			
	10 - Rasante	0,002	0,700			
	11- Intonachino					
PLAT-F						
	1 - Cartongesso	0,013	0,210			
	2 - Cementolegno	0,050	0,065			
	3 - OSB/3	0,018	0,100			
	4 - Freno a vapore	0,001	0,220			
	5 - Lana di roccia	0,160	0,032	0,169	**0,152**	11,18
	6 - Membrana	0,001	0,220			
	7 - OSB3	0,018	0,100			
	8 – Lana di legno	0,050	0,065			
	9 - Rasante	0,007	0,300			
	10- Intonachino	0,002	0,700			

Tabella 18 – Campioni F: Confronto trasmittanza U_0 e U_{ope}

Risulta evidente come la trasmittanza termica in opera calcolata per le pareti SIP si discosta particolarmente da quella calcolata secondo la UNI EN ISO 6946.

Come anticipato, questa sostanziale differenza potrebbe essere riconducibile alla presenza dello strato di intercapedine d'aria tra il panello OSB/3 e le lastre di Aquapanel. La presenza dei montanti in acciaio-zinco (Figura 116) di cui la struttura è composta ha influenzato negativamente la risposta termica della parete. Questo a causa dell'esposizione dei montanti stessi alla temperatura interna del laboratorio che, essendo più elevata rispetto a quella impostata nella camera, probabilmente ha riscaldato i montanti andando quindi a variare le condizioni dell'intercapedine d'aria. Sicuramente, per avere dei risultati più attendibili, si sarebbe dovuta isolare l'intercapedine della parete nell'intero spessore per far sì che i montanti non potessero risentire della temperatura interna dell'aria.

Figura 117 - Montanti pareti SIP1/2

In ogni caso, l'elevato flusso registrato sulla superficie della parete ha determinato un elevato valore di trasmittanza termica in opera. La metodologia utilizzata, nel caso di intercapedini con montanti, ha creato sicuramente dei problemi riscontrati proprio nel valore di trasmittanza e quindi, l'intercapedine, invece di essere una parte che favorisce lo scambio, questa tende a peggiorarlo.

6.2 Regime dinamico

I risultati ottenuti dalle prove sperimentali in regime dinamico vengono riassunti e confrontati insieme per i due gruppi di campioni "F" ed "NF", inoltre verranno confrontate le singole pareti nelle due configurazioni senza e con le finiture.

6.2.1 Campioni senza finiture NF

I **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** e 64 mostrano gli andamenti delle temperature Tsi e Tse misurate sulle facce delle pareti analizzate, qi il flusso

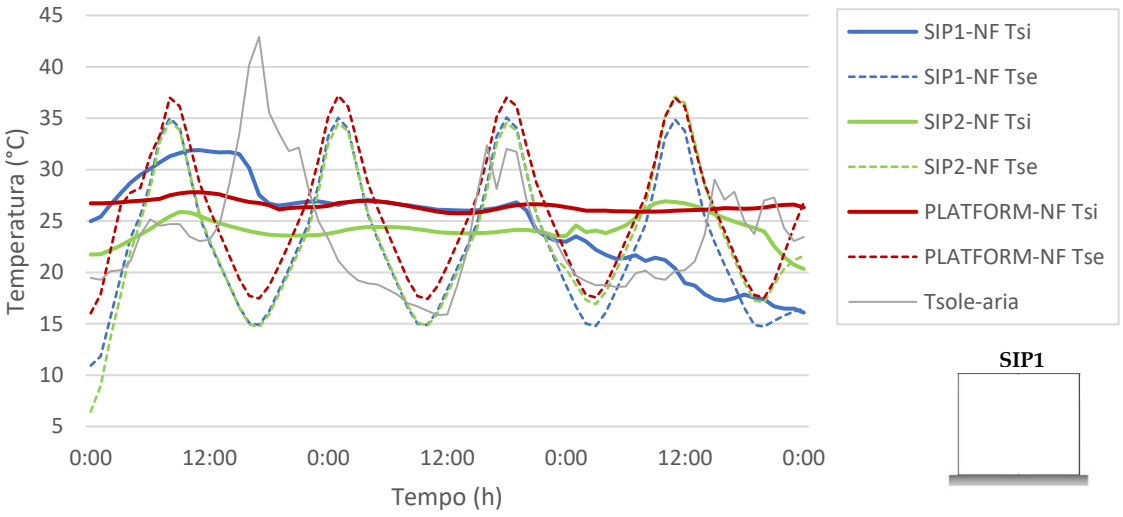
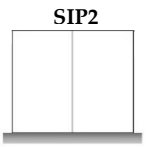
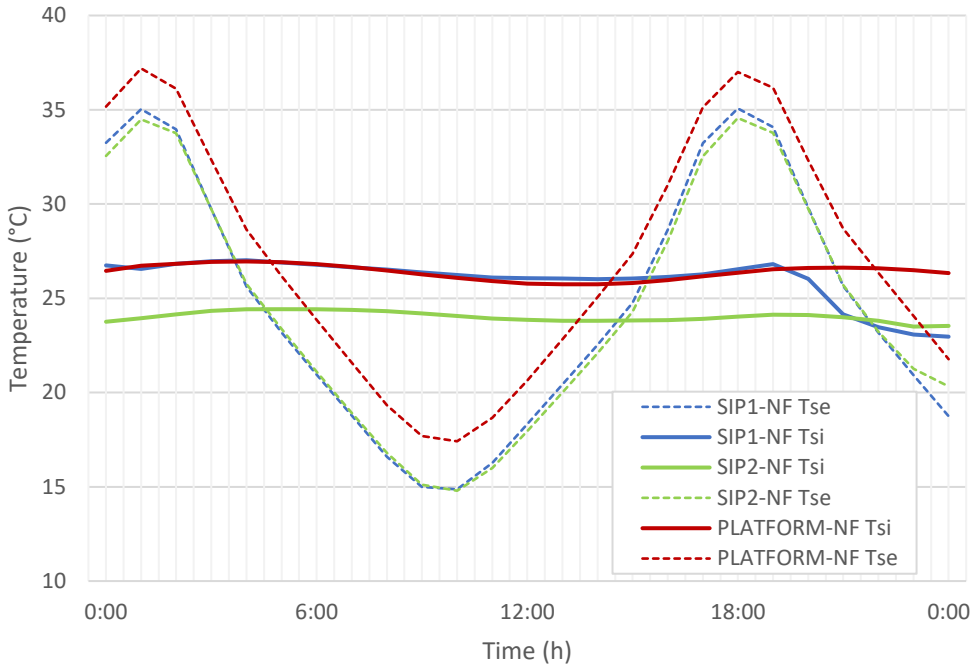


Grafico 63 - Campioni NF: Confronto temperature interne ed esterne

termico effettivamente scambiato.



Seppur l'andamento di queste quattro grandezze è stato determinato in un tempo di prova di 72h, il confronto tra le tre pareti è stato fatto limitatamente alle



24h corrispondenti al secondo giorno.

Grafico 65 - Campioni NF: Confronto delle temperature superficiali nelle 24h

Grafico 64 - Campioni NF: Confronto flussi interni

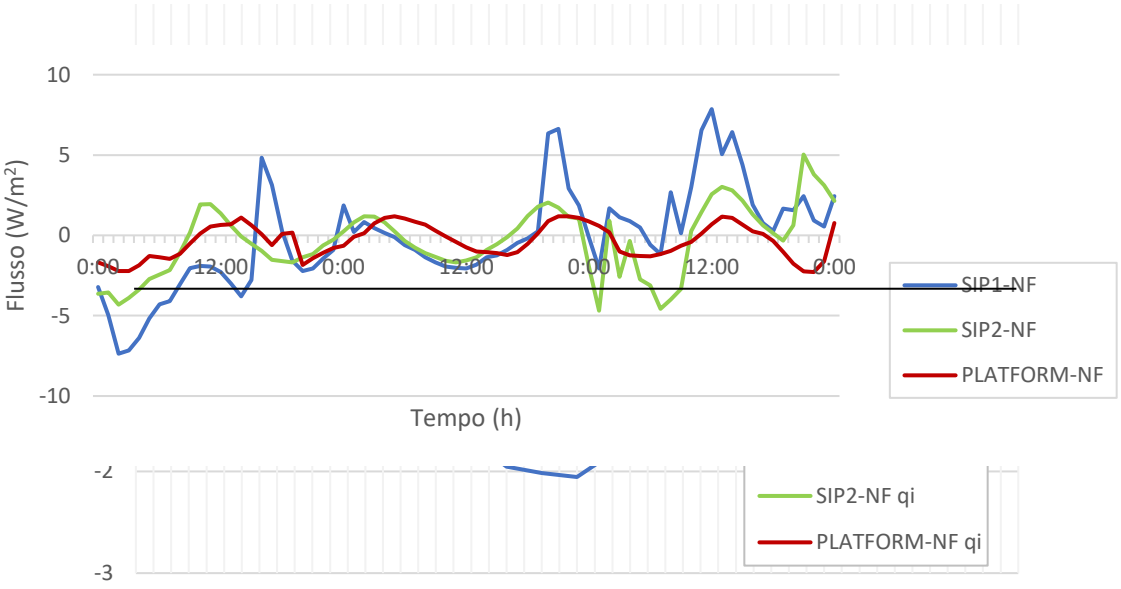


Grafico 66 - Campioni NF: Confronto dei flussi interni nelle 24h

6.2.2 Campioni con le finiture F

I Grafico 67 eGrafico 68 mostrano gli andamenti delle temperature Tsi e Tse misurate sulle facce delle tre pareti analizzate, qi e qe i relativi flussi termici

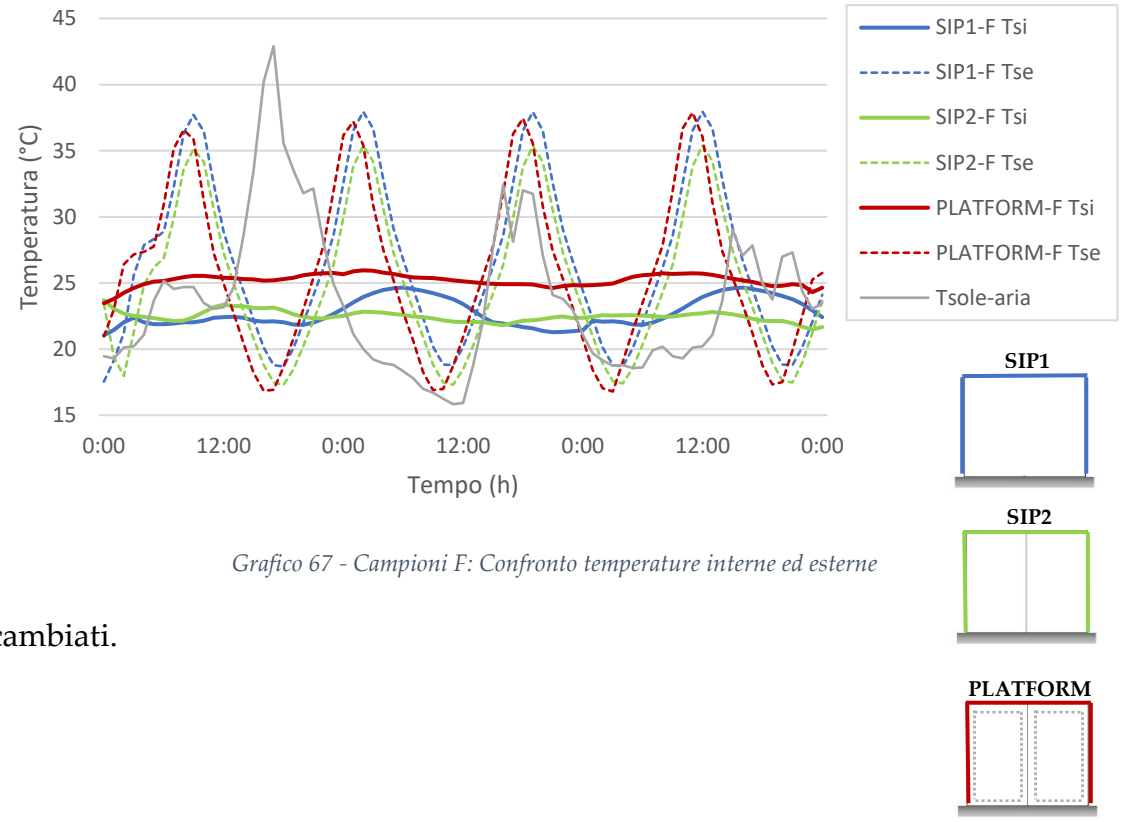


Grafico 67 - Campioni F: Confronto temperature interne ed esterne

scambiati.

Seppur l'andamento di queste quattro grandezze è stato determinato in un tempo di prova di 72h, in riferimento alle temperature dell'aria interna nei diversi istanti di prova (Grafico 18), per far sì che le pareti potessero essere confrontate nelle medesime condizioni di temperatura e soprattutto in un tratto in cui la

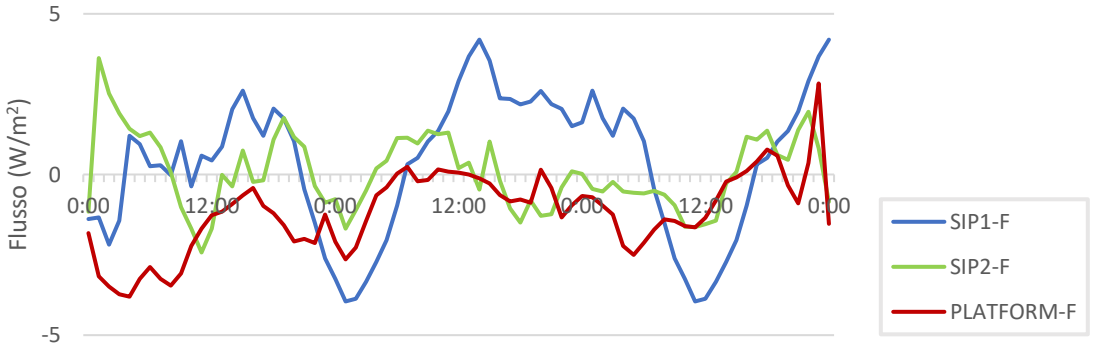


Grafico 68 - Campioni F: Confronto flussi termici

temperatura dell'aria interna alla stanza fosse pressoché costante, si è scelto di limitare l'analisi a sole 24h. In particolare, sono state scelte le ore corrispondenti al secondo giorno. Purtroppo, il SIP1-F non presenta una temperatura costante nell'intervallo di tempo analizzato, infatti come mostra il Grafico 69 la temperatura superficiale interna oscilla per tutto il tratto considerato.

A tal proposito si nota nel che nel Grafico 70, a differenza delle altre pareti, il flusso

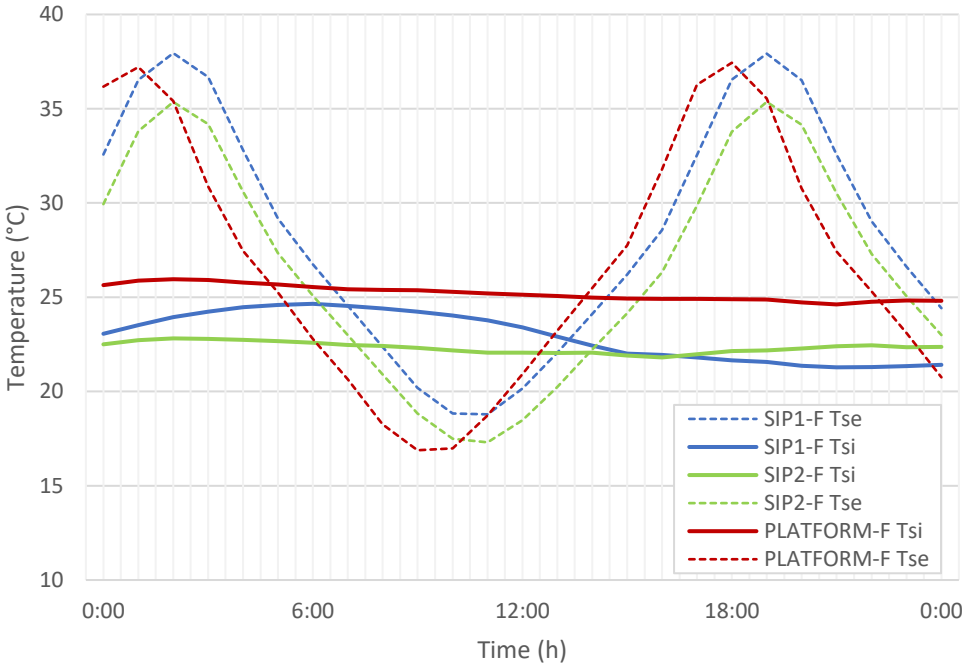


Grafico 69 - Campioni F: Confronto delle temperature superficiali nelle 24h

interno del SIP1-F risente particolarmente dell'oscillazione della temperatura dell'aria interna.

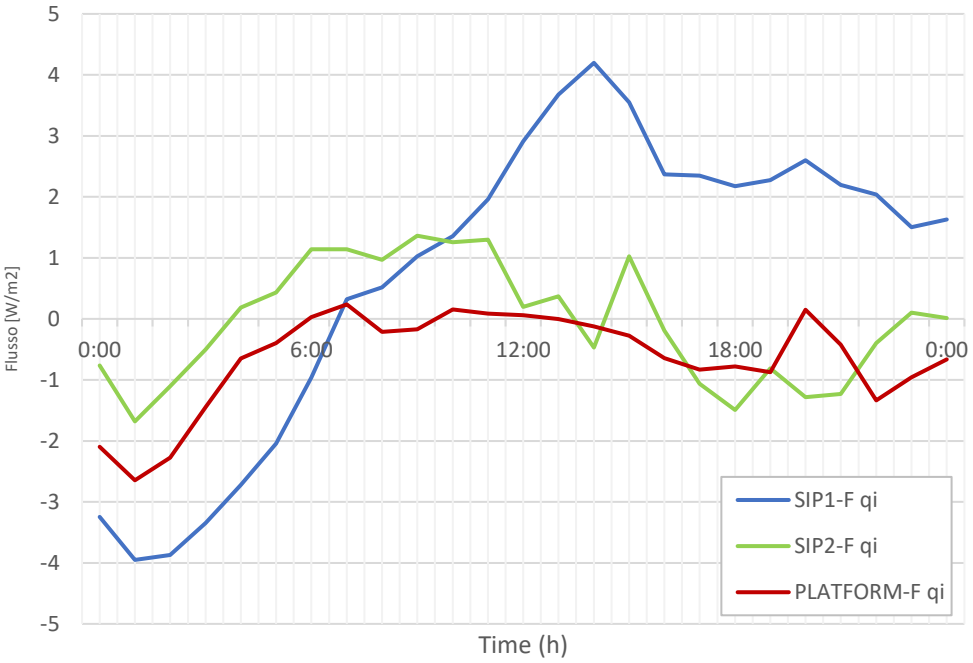


Grafico 70 - Campioni F: Confronto dei flussi interni nelle 24h

6.2.3 Campioni con e senza finiture

In questo sottocapitolo verrà confrontato il comportamento termico delle 3 pareti analizzate, per poter evidenziare come varia la prestazione termica di una parete senza finiture in riferimento alla stessa parete ma con le finiture.

SIP1

Il Grafico 71 e **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** mostrano gli andamenti delle temperature Tsi e Tse misurate sulle facce delle tre pareti analizzate, qi e qe i relativi flussi termici scambiati.

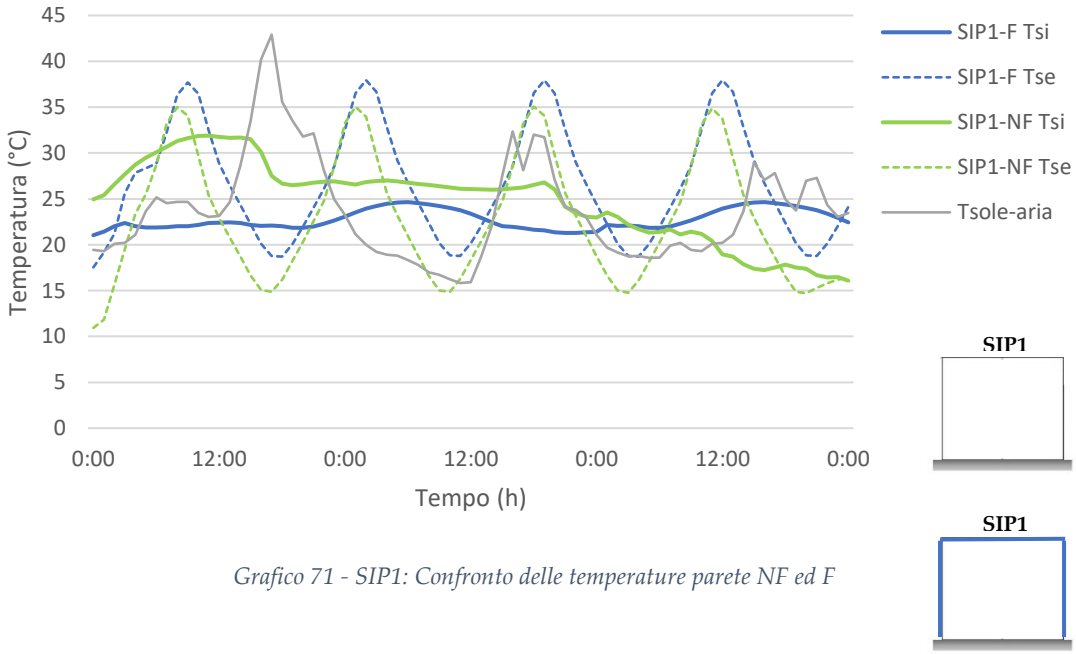


Grafico 71 - SIP1: Confronto delle temperature parete NF ed F

In riferimento alle 24h analizzate come in precedenza, si riporta il Grafico 72 che individua l'andamento delle temperature superficiali interne ed esterne per le due pareti.

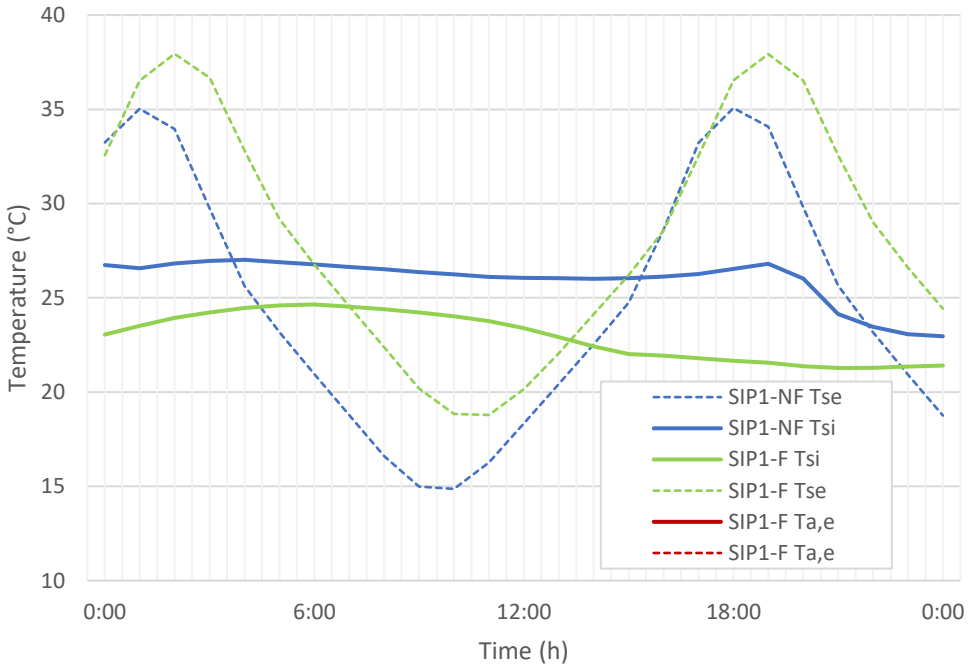


Grafico 72 - SIP1: Confronto temperature parete NF ed F nelle 24h

Dal grafico si nota come sussista una differenza di temperatura superficiale tra i due pannelli, sicuramente dovuta alle condizioni climatiche nei periodi di prova. Inoltre, si evidenzia che il SIP1-F tende a riscaldarsi maggiormente rispetto al SIP1-NF arrivando a temperature superiori ai 35°C.

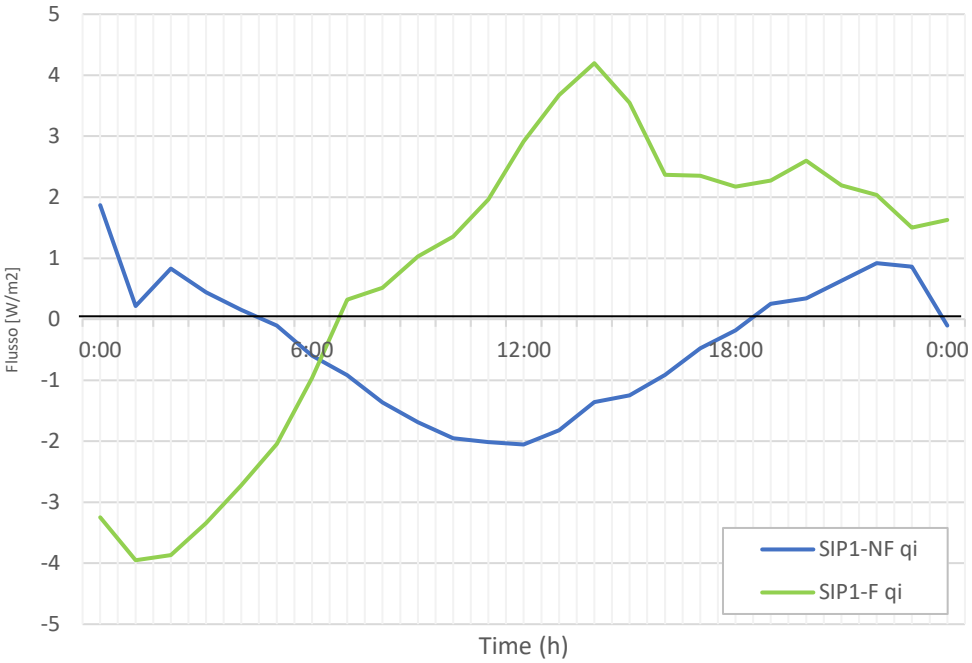


Grafico 73 - SIP1: Confronto flusso termico parete NF ed F nelle 24h

Il Grafico 73 descrive l'andamento dei flussi termici delle due pareti. Da questi si nota come l'andamento del flusso termico sia strettamente legato all'andamento della temperatura superficiale interna. Suppur l'andamento sinusoidale delle temperature superficiali delle due pareti indagate seguano lo stesso andamento, i flussi si comportano in maniera totalmente opposta.

SIP2

Il Grafico 74 e Grafico 75 mostrano gli andamenti delle temperature Tsi e Tse misurate sulle facce delle tre pareti analizzate, qi e qe i relativi flussi termici scambiati.

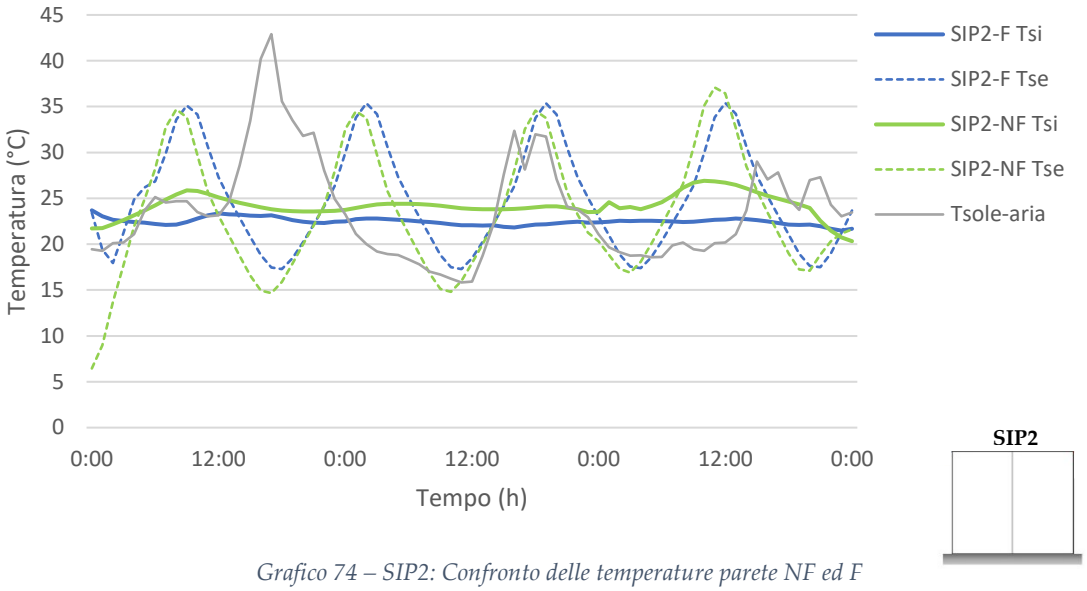


Grafico 74 – SIP2: Confronto delle temperature parete NF ed F

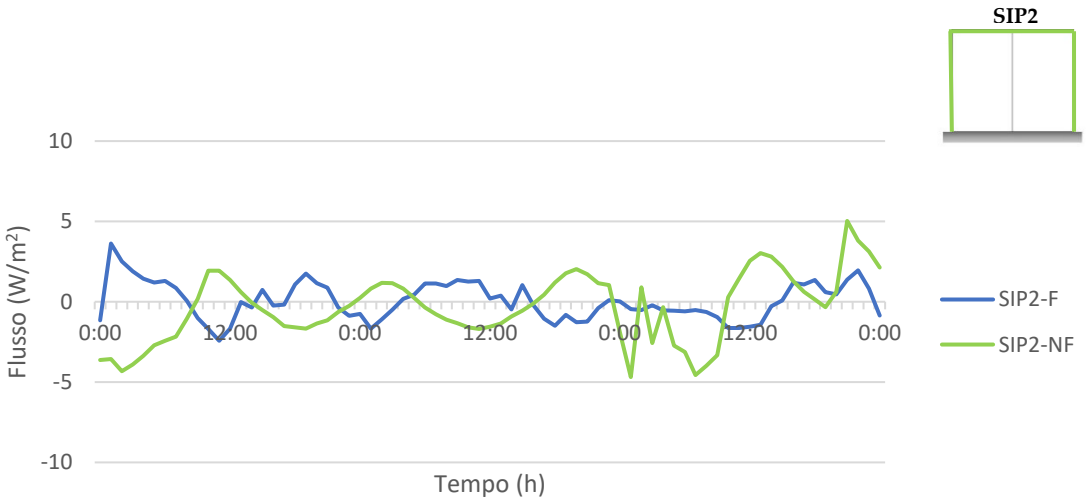


Grafico 75 - SIP2: Confronto flussi termici parete NF ed F

In riferimento alle 24h analizzate come in precedenza, si riporta il Grafico 76 che individua l'andamento delle temperature superficiali interne ed esterne per le due pareti.

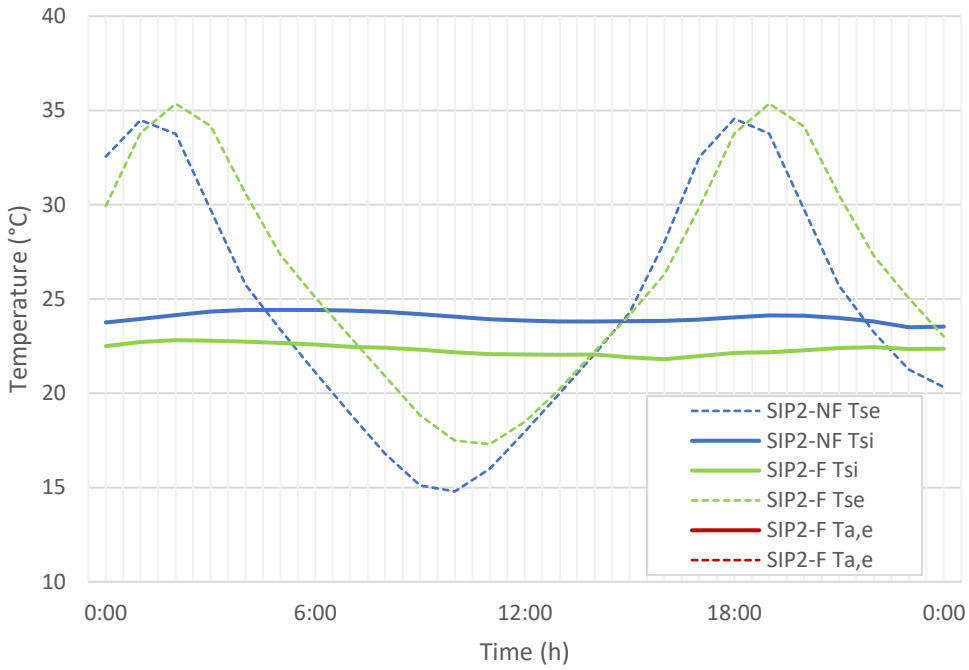


Grafico 76 – SIP2: Confronto temperature parete NF ed F nelle 24h

Dal Grafico 76 nota come, seppur ci sia un leggero sfasamento tre temperature superficiali esterne delle due pareti, le due curve seguano un andamento pressoché simile, variando solamente di qualche grado.

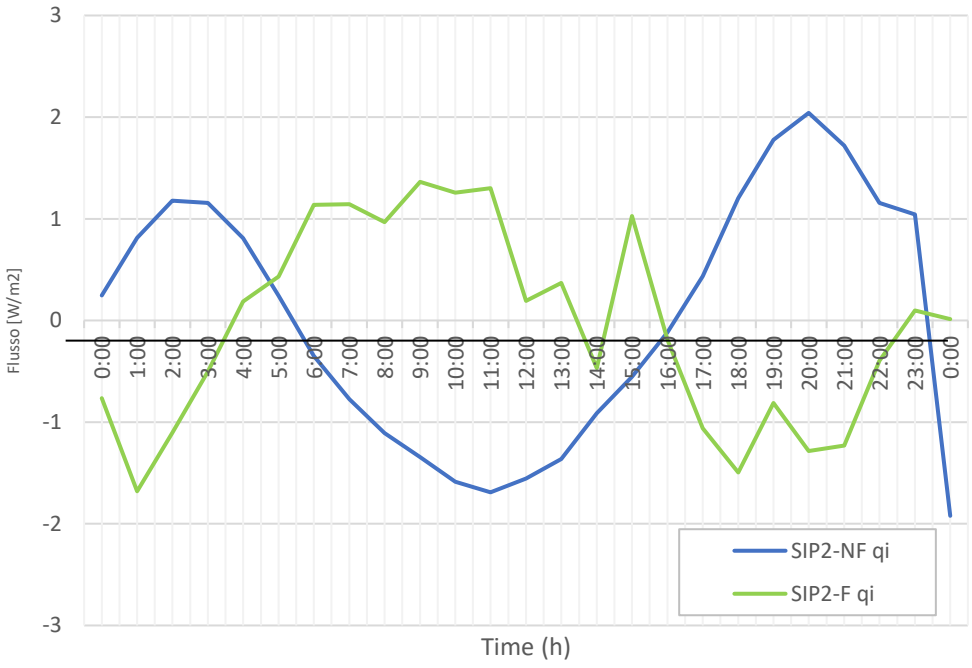


Grafico 77 - SIP1: Confronto flusso termico parete NF ed F nelle 24h

PLATFORM

Il Grafico 78 e Grafico 79 mostrano gli andamenti delle temperature Tsi e Tse misurate sulle facce delle tre pareti analizzate, qi e qe i relativi flussi termici scambiati.

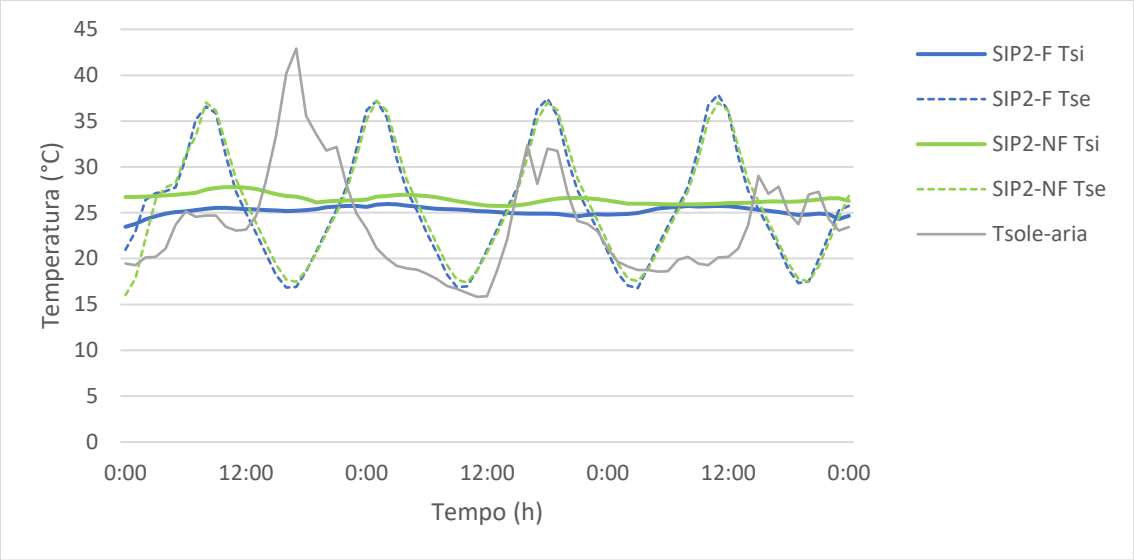


Grafico 78 – PLATFORM: Confronto delle temperature parete NF ed F

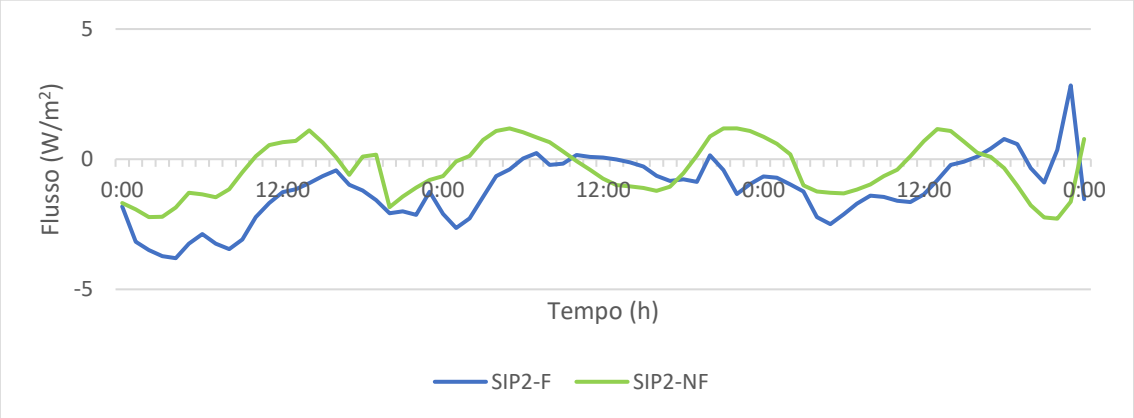


Grafico 79 - PLATFORM: Confronto flussi termici parete NF ed F

Il Grafico 80 individua l'andamento delle temperature superficiali interne ed esterne per le due pareti nella 24h considerate. Dal Grafico 80 si nota come la parete Platform Frame abbia un andamento quasi sovrapposto nelle due configurazioni.

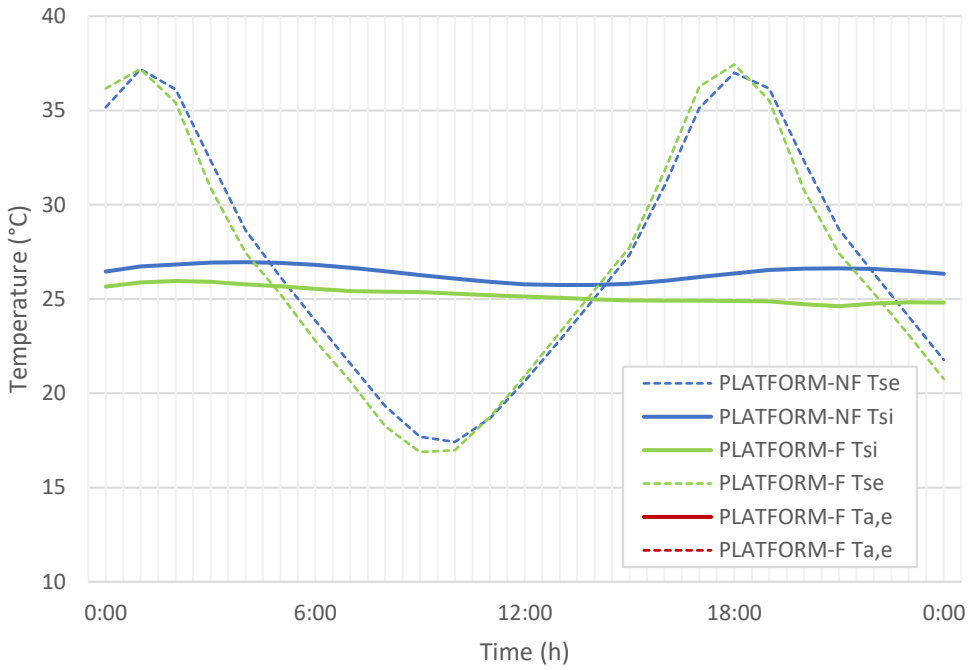


Grafico 80 – PLATFORM: Confronto temperature parete NF ed F nelle 24h

Anche in questo caso è evidente che il flusso segua l'andamento delle temperature superficiali, avendo però comportamento opposto tra la parete F ed NF (Grafico 81).

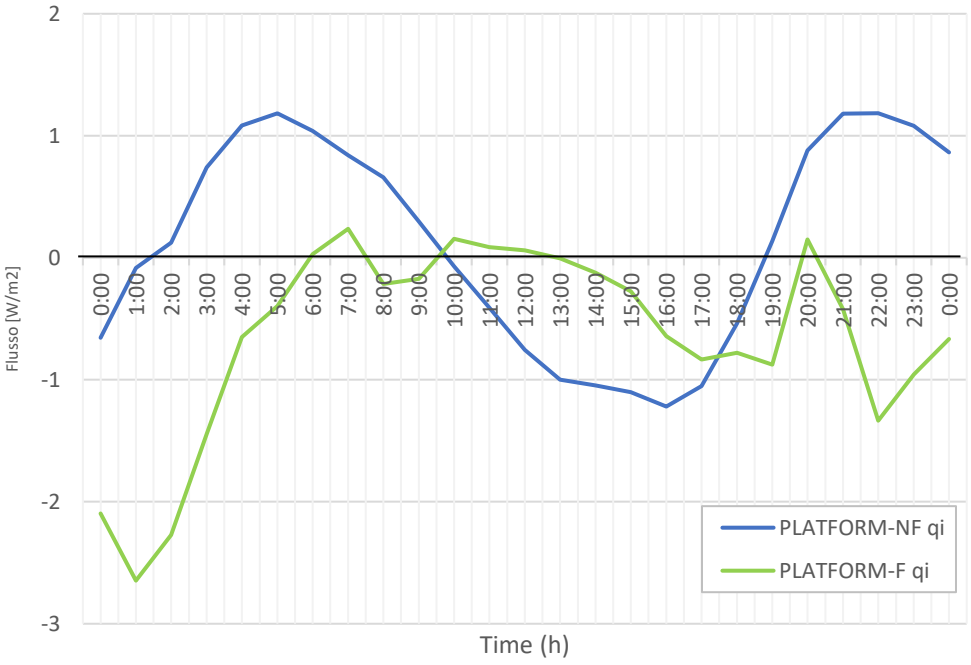


Grafico 81 - PLATFORM: Confronto flusso termico parete NF ed F nelle 24h

7 CONCLUSIONI

I risultati ottenuti nei capitoli 4 e 5 dimostrano che un'attenta schematizzazione degli elementi di involucro e delle caratteristiche dei materiali costituenti consente di ottenere sia analiticamente che sperimentalmente dei risultati attendibili sia dal punto di vista stazionario che dinamico.

In questo lavoro di tesi è stato valutato ed indagato il comportamento termico di sistemi costruttivi SIP e Platform Frame. E' stata valutata sperimentalmente, numericamente e analiticamente la trasmittanza termica U delle sei diverse pareti in condizioni di stazionarietà. Le misure sperimentali sono state eseguite utilizzando una camera climatica con cui sono state impostate le condizioni di umidità e temperatura. Sono state effettuate simulazioni 2D FEM utilizzando il software THERM per stimare il valore U delle diverse configurazioni SIP e Platform Frame. Le stime analitiche si sono basate sull'approccio ISO 6946 [34] per la costruzione di componenti con strati disomogenei. L'approccio analitico ha evidenziato la buona prestazione termica di ogni singola parete e questa è stata confermata sperimentalmente nella maggioranza delle pareti analizzate.

L'analisi in regime dinamico, seppur di gran lunga differente dalla valutazione analitica, ha dimostrato sperimentalmente che l'involucro edilizio ha un ruolo fondamentale nel filtrare le oscillazioni della temperatura esterna, facendo sì che come osservato, l'onda termica fuoriesca dalla parete di involucro sfasata ed attenuata.

BIBLIOGRAFIA

[1] D. Michálková and P. Ďurica, "Analysis of the influence of the selected exterior surface finish on the thermo-technical behaviour of passive wooden constructions," in *Transportation Research Procedia*, 2019, vol. 40, pp. 823–830. doi: 10.1016/j.trpro.2019.07.116.

[2] International Energy Agency. and Organisation for Economic Co-operation and Development., *Transition to sustainable buildings : strategies and opportunities to 2050*. OECD/IEA, 2013.

[3] "Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council on the Energy Performance of Buildings 2010.".

[4] "European Commission, Evaluation of Directive 2010/31/EU on the energy per- formance of buildings, 2016.".

[5] J. Goggins, P. Moran, A. Armstrong, and M. Hajdukiewicz, "Lifecycle environmental and economic performance of nearly zero energy buildings (NZEB) in Ireland," *Energy and Buildings*, vol. 116, pp. 622–637, Mar. 2016, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2016.01.016.

[6] M. O'Grady, A. A. Lechowska, and A. M. Harte, "Application of infrared thermography technique to the thermal assessment of multiple thermal bridges and windows," *Energy and Buildings*, vol. 168, pp. 347–362, Jun. 2018, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2018.03.034.

[7] P. Rungthonkit, "STRUCTURAL BEHAVIOUR OF STRUCTURAL INSULATED PANELS (SIPS)," 2012.

[8] by Hassan Abbasi MASc, "STRUCTURAL BEHAVIOUR OF INSULATED FOAM-TIMBER PANELS UNDER GRAVITY AND LATERAL LOADING," 2014.

[9] N. Sulong, S. Mustapa, and M. K. Abdul Rashid, "Application of expanded polystyrene (EPS) in buildings and constructions: A review," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 136, Oct. 2019, doi: 10.1002/app.47529.

[10] L. Wang, C. Wang, P. Liu, Z. Jing, X. Ge, and Y. Jiang, "The flame resistance properties of expandable polystyrene foams coated with a cheap and effective barrier layer," *Construction and Building Materials*, vol. 176, pp. 403–414, Jul. 2018, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.05.023.

[11] A. A. Sayadi, J. v. Tapia, T. R. Neitzert, and G. C. Clifton, "Effects of expanded polystyrene (EPS) particles on fire resistance, thermal conductivity and compressive strength of foamed concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 112, pp. 716–724, Jun. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.218.

[12] "Mirnateghi E. UC irvine electronic theses and dissertations. 2017 [En lı́nea]. Available: https://escholarship.org/content/qt8qr0b9rr/qt8qr0b9rr.pdf?t¼onxl97&v¼lg. [Accessed 28 December 2020].".

[13] K. Noakes, "in Successful composite techniques : a practical introduction to the use of modern composite materials, 4th edition, Ramsbury, Crowood, 2008. ".

[14] "«BBA No. 09/S043,» i-S Manufacturing Ltd, (2009). ".

[15] ASTM E72-10, *"Standard Test Methods of Conducting Strength Tests of Panels for Building Construction", American Society for Testing Materials, Philadelphia, PA, USA.* Philadelphia, PA, USA., 2010.

[16] "ICC-ES Evaluation Report ESR-1780," 2019. [Online]. Available: www.icc-es.org

[17] M. Morley, "Building with Structural Insulated Panels (SIPs): Strength and Energy Efficiency Through Structural Panel Construction," 2000.

[18] SIPA, "Structural Insulated Panel (SIP): Engineering Design Guide, Florida, 2019.".

[19] D. Benadova, "Digital Commons @ Ryerson Experimental Study On The Flexural Behavior Of Structural Insulated Headers," 2009. [Online]. Available: http://digitalcommons.ryerson.ca/dissertations

[20] J. Bregulla, "«Investigation into the fire and racking performance of structural sandwich panel walls - a methodology to assess loadbearing sandwich panel walls in fire,» in PhD thesis, University of Surrey, 2003.".

[21] A. Kermani, "Performance of structural insulated panels," *Proceedings of The Institution of Civil Engineers-structures and Buildings - PROC INST CIVIL ENG-STRUCT B*, vol. 159, pp. 13–19, Jan. 2006, doi: 10.1680/stbu.2006.159.1.13.

[22] "SIPA, Structural Insulated Panels: product Guide, 2007. ".

[23] M. A. Gagnon and R. D. Adams, "A marketing profile of the U.S. structural insulated panel industry," *Forest Products Journal*, vol. 49, pp. 31–35, 1999.

[24] H. Milner and H. Tan, "Modelling deformation in nailed, thin-webbed timber box beams," *Computers & Structures - COMPUT STRUCT*, vol. 79, pp. 2541–2546, Oct. 2001, doi: 10.1016/S0045-7949(01)00138-9.

[25] S.-T. Lee, "A Fundamental Study of Thermoplastic Foam Extrusion with Physical Blowing Agents," in *ACS Symposium Series*, vol. 669, 1997, pp. 195–205. doi: 10.1021/bk-1997-0669.ch013.

[26] M. Mullens and M. Arif, "Structural Insulated Panels: Impact on the Residential Construction Process," *Journal of Construction Engineering and Management-asce - J CONSTR ENG MANAGE-ASCE*, vol. 132, Oct. 2006, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9364(2006)132:7(786).

[27] K. Vogrinec and M. Premrov, "Influence of the design approach on the behaviour of timber-frame panel buildings under horizontal forces," *Engineering Structures*, vol. 175, pp. 1–12, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.engstruct.2018.08.014.

[28] J. M. Branco, F. T. Matos, and P. B. Lourenço, "Experimental in-plane evaluation of light timber walls panels," *Buildings*, vol. 7, no. 3, 2017, doi: 10.3390/buildings7030063.

[29] U. Carusi, F. Riparbelli, and G. Salerno, "Open scientific problems about the Platform Frame constructive system," *Energy and Buildings*, vol. 83, pp. 209–216, 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.03.078.

[30] T. Sartori and R. Tomasi, "Experimental investigation on sheathing-to-framing connections in wood shear walls," *Engineering Structures*, vol. 56, pp. 2197–2205, Oct. 2013, doi: 10.1016/j.engstruct.2013.08.039.

[31] Marta Zanin, "Tesi di Laurea Magistrale Strutture Platform Frame: metodo di validazione tabellare," 2014.

[32] C. Caldera, F. Gianfreda, F. Manzone, and D. Troiano, "Procedures and Methodologies to Assembly and Mounting the constructive system called 'Panel for Building,'" 2017.

[33] “Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istruzioni per la Progettazione, l’esecuzione ed il controllo delle strutture di legno (CNR DT 206-R1), 2018. ”.

[34] “ISO 6946, Building components and building elements — Thermal resistance and thermal transmittance — Calculation methods, International Organization for Standardization, (2017).”.

[35] “UNI EN ISO 10351, Materiali da costruzione - Conduttività termica e permeabilità al vapore ”.

[36] “ISO 10211, Thermal bridges in building construction — Heat flows and surface temperatures — Detailed calculations, International Organization for Standardization, (2017).”.

[37] “UNI EN ISO 14683:2018, Ponti termici in edilizia - Coefficiente di trasmissione termica lineica - Metodi semplificati e valori di riferimento ”.

[38] “Therm stepbystep 01”.

[39] “UNI EN ISO 10349, Riscaldamento e raffrescamento degli edifici. Dati climatici. ”.

[40] “UNI EN ISO 13786:2018, Prestazione termica dei componenti per edilizia.Caratteristiche termiche dinamiche. Metodi di calcolo.”.

[41] “ASTM C1363. Standard test method for thermal performance of building materials and envelope assemblies by means of ahot box apparatus. West Consohoken (PA): American Society for Testing and Materials; 2005. [22] ISO 8990. Thermal insulation –determination of steady-state thermal”.

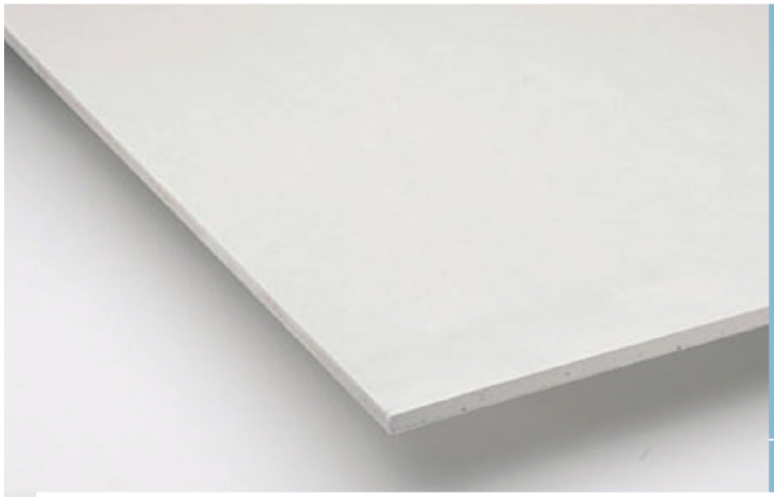
[42] “Burch DM, Licitra BA, Zarr RR. Acomparison of two test methods for determining transfer function coefficients for awall using acalibrated hot box. J Heat Transfer 1990;112:35–42.”.

[43] “ISO/CD 9869-2: “Thermal insulation- Building elements- In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance.”.

[44] “BS ISO 9869-1:2014 Part 1: ‘Thermal insulation- Building elements- In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance’.”.

[45] “ASHRAE Handbook, Volume Fundamentals, 2009.”.

ALLEGATI



Lastra Kasa | 05/2020

Knauf Kasa

Lastre in gesso rivestito con cartone extra-bianco e tecnologia Cleaneo® C

Descrizione

- Classificazione della lastra

EN 520	DI
■ Colore del cartone	bianco
■ Colore marchio retro:	blu

Formati

Spessore lastre	12,5 mm
■ 1200x2000 mm	
■ 1200x3000 mm	
altri formati	su richiesta

Stoccaggio
Conservare su pallet o su bearer, in luogo asciutto

Normativa di riferimento
UNI EN 520

Campo di applicazione

Le lastre Knauf Kasa sono lastre in gesso rivestito di uno speciale cartone e dotate di tecnologia Cleaneo® C, in grado di catturare e neutralizzare gli inquinanti presenti in un ambiente confinato, consentendo un abbattimento fino all'80% della formaldeide.

Impiego:

- Edilizia residenziale
- Aule scolastiche
- Ospedali / case di cura
- Uffici
- Alberghi

Caratteristiche

- Capacità di rendere l'aria più salubre grazie alla tecnologia Cleaneo® C
- Rivestita da uno speciale cartone extra-bianco
- Facilità di applicazione di carichi
- Maggiore durezza superficiale
- Nucleo speciale di gesso per buon isolamento acustico
- Facile da applicare
- Non infiammabile
- Non rilascia VOC

CELENIT **N/C**

SCHEDA TECNICA

VOCE DI CAPITOLATO

Pannello isolante termico ed acustico studiato per l'applicazione a cappotto, in lana di legno di abete rosso, mineralizzata e legata con cemento Portland ad alta resistenza. È conforme alla norma UNI EN 13168, prodotto da azienda certificata UNI EN ISO 9001:2008.
Il legname impiegato proviene da foreste gestite in maniera sostenibile (certificazione PEFC per la Catena di Custodia).
TÜV Italia ha certificato che il 15% in peso del pannello Celenit N è composto da materiale riciclato pre-consumatore.

Impieghi	Isolamento a cappotto
Dimensione	120x60 - 100x60 cm
Spessore	25 - 35 - 50 - 75 mm

CERTIFICATI ACUSTICI

n. 651 del 23/12/2011 - Università di Padova (POTERE FONOISOLANTE - PARETE IN POROTON)

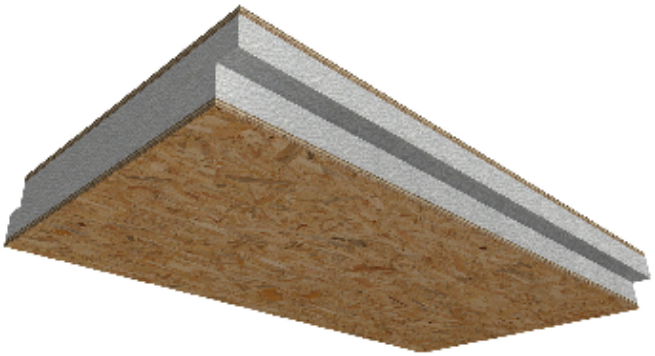
CELENIT SPA Via Bellingrera, 17 - 35019 Onara di Tombolo - Padova - Tel. +39 049.5993544 - Fax +39 049.5993599 - info@celenit.com - www.celenit.com

isosystem
THERMAL ACOUSTIC SOLUTIONS

Rev.02-2018

ISOSANDWICH 2K EPS 100/120/150/200 KPA

Isolanti termici per coperture residenziali ed industriali



- Economico
- Rifiuto Non Pericoloso
- Non contiene olii usati e/o rigenerati
- Modulare
- Riciclabile

CARATTERISTICHE TECNICHE

Sistema isolante termico per coperture composto dall'accoppiamento di due pannelli EUROSTRAND OSB a norma EN 300 spessore 12 mm, una lastra coibente in polistirene espanso sinterizzato a norma UNI EN 13163. Bordo dritto o battentato lati lunghi.

DIMENSIONI PANNELLO

lunghezza 2440 mm
larghezza 1200 mm

lunghezza 5000 mm
larghezza 585 mm

VANTAGGI

- Elevate performance di isolamento termico
- Velocità di posa in opera
- Resistenza meccanica e pedonabilità in fase di posa

ISOSYSTEM SRL
Via dell'Artigianato, 25 - 31047 PONTE DI PIAVE (Treviso) ITALY
T +39 0422 858070 r.a. **F** +39 0422 759654 **E** info@termoisolanti.com **W** termoisolanti.com

eternitycomfort

USB WALL 120

R2

Membrana impermeabile traspirante

SUBISSATI.it

CASE E STRUTTURE IN LEGNO

Materiale	PP.PP.PP
Film	PP
Larghezza rotolo	1,5 m
Lunghezza rotolo	50 m
Peso rotolo	9 Kg
Massa areica	120 (±10 g/m²)
Strato d'aria equivalente al passaggio di vapore [valore Sd]	0,02 m
Permeabilità al vapore acqueo [DVA]	ca.1000 g/m²/24h
Colonna d'acqua	> 200 cm
Classe di impermeabilità	W1
Resistenza a trazione MD/CD*	260/155 N/50mm (±30N/50mm)
Allungamento MD/CD*	60/70 % (±15%)
Resistenza a lacerazione chiodo MD/CD*	105/140 N (±15N)
Reazione al fuoco	Classe E
Stabilità ai raggi UV	3 mesi
Resistenza alla temperatura	-40 / +100 °C

*MD=longitudinale; CD=trasversale

Riwega S.r.l. si riserva la possibilità di modificare e/o aggiornare i dati riportati nella presente scheda tecnica. La scheda tecnica aggiornata è reperibile sul sito internet www.riwega.com. La presente scheda tecnica annulla e sostituisce la precedente versione.

CE

Flexible sheets for waterproofing

EN 13859-1 Part 1: Underlays for discontinuous roofing
EN 13859-2 Part 2: Underlays for walls
EN 13984 Plastic and rubber vapour control layers

MADE IN GERMANY

AIS MT

Riwega SrlGmbH
I-39044 Egna (BZ) Via Isola d. Supia, 28
info@riwega.com - www.riwega.com

Riwega

AQUAPANEL® | 12/2019

AQUAPANEL® Water-Resistive Barrier

Barriera all'acqua permeabile all'umidità

AQUAPANEL® | 09/2019

AQUAPANEL®
Exterior Basecoat

Rasante a base cemento additivato con resina sintetica

AQUAPANEL®

L'OSB 3 di I-PAN offre tanti vantaggi rispetto ai prodotti similari:

- caratteristiche tecniche e meccaniche conformi alle norme EN 300 e EN 13986
- certificato CE sistema 2+
- composizione 100% legno di pioppo
- colore chiaro e peso circa 22% inferiore all'OSB tradizionale

	OSB 3	METODO DI TEST	UNITA' mm	GAMMA DI SPESSORI
PROPRIETA' FISICHE E MECCANICHE				>10 e < 18mm
	Densità	EN323	Kg/m3	530-560
	RESISTENZA A FLESSIONE	EN310	N/mm2	
	Longitudinale/ Trasversale			20-10
	MODULO DI ELASTICITA'	EN310	N/mm2	
	Longitudinale/ Trasversale			3500/1400
	TRAZIONE PERPENDICOLARE			
	Coesione interna	EN 319	N/mm2	0,32
	Coesione interna dopo ciclo di bollitura	EN 1087-1	N/mm	> 0,13
	TOLLERANZE su misure nominali			
	Spessore (calibrato)	EN 324-1	mm	+ /- 0,3
	Spessore (non calibrato)	EN 324-1	mm	+ /- 0,8
	Lunghezza/Larghezza	EN 324-1	mm	+ /- 3,0
	Rettilineita' dei bordi	EN 324-2	mm/m	1,5
	Squadratura	EN 324-2	mm/m	2,0
	Densità media %	EN 323	%	+/-15
	Rigonfiamento di spessore 24 h	EN 317	%	15
	Umidità	EN 322	%	5 - 12
	Formaldeide	EN 120	mg/100g	< 8
	Valori determinati da prove di laboratorio:			
	Conducibilità termica - fattore λ**	EN 13664	w/mK	0,100
	Resistenza alla diffusione del vapore - fattore μ*	EN 12524		90-150
	Resistenza al fuoco	EN 13501-1		D-s2, d0

* misurazioni eseguite su OSB spessori 9mm e 18 mm

** misurazioni eseguite su OSB spessore 15 mm

eternitycomfort

USB Micro K

R2

Freno al vapore

SUBISSATI.it

CASE E STRUTTURE IN LEGNO

Materiale	PP.PP.PP
Film	PP
Larghezza rotolo	1,5 m
Lunghezza rotolo	50 m
Peso rotolo	11 Kg
Massa areica	145 g/m²
Strato d'aria equivalente al passaggio di vapore [valore Sd]	>2 m
Permeabilità al vapore acqueo [DVA]	ca.15 g/m²/24h
Impermeabilità all'acqua	Superato
Resistenza a trazione MD/CD*	290/210 N/50mm (±30N/50mm)
Allungamento MD/CD*	60/70 % (±15%)
Resistenza a lacerazione chiodo MD/CD*	170/210 N (±15N)
Reazione al fuoco	Classe E

*MD=longitudinale; CD=trasversale

Riwega S.r.l. si riserva la possibilità di modificare e/o aggiornare i dati riportati nella presente scheda tecnica. La scheda tecnica aggiornata è reperibile sul sito internet www.riwega.com. La presente scheda tecnica annulla e sostituisce la precedente versione.

CE

MADE IN GERMANY

AIS MT

Riwega Srl/GmbH
I-39044 Egna (BZ) Via Isola d. Scpia, 28
info@riwega.com - www.riwega.com

Riwega

Acoustic 225 Plus

Pannello rigido in lana di roccia non rivestito a media densità, per l'isolamento termico e acustico di pareti divisorie e perimetrali leggere (tecnologia a secco) e massive.

Il prodotto contribuisce in modo significativo all'incremento delle prestazioni acustiche e di sicurezza in caso di incendio.

Dimensioni disponibili

Formato 1200x600 mm

Spessori da 30 a 160* mm

VANTAGGI

- Prestazioni termiche: grazie all'ottimo valore di conduttività λ_D=0,033 W/(mK) il pannello, disponibile in un'ampia gamma di spessori (fino a 250 mm), è ideale per la realizzazione di chiusure ad elevata resistenza termica.
- Proprietà acustiche: la struttura a celle aperte della lana di roccia contribuisce significativamente al miglioramento delle prestazioni fonoisolanti della parete in cui il pannello viene installato. Sono disponibili prove di isolamento acustico di laboratorio.
- Comportamento al fuoco: il pannello, incombustibile, se esposto a fiamme libere non genera nè fumo nè gocce; aiuta inoltre a prevenire la propagazione del fuoco e contribuisce ad incrementare le prestazioni di resistenza al fuoco dell'elemento costruttivo in cui è installato. Sono disponibili valutazioni della prestazione di resistenza al fuoco.
- Stabilità dimensionale: il pannello non subisce variazioni dimensionali o prestazionali al variare delle condizioni igrometriche dell'ambiente.

Dati tecnici	Valore	Norma
Reazione al fuoco	A1	UNI EN 13501-1
Conduttività termica dichiarata	λ_D = 0,033 W/(mK)	UNI EN 12667, 12939
Coefficiente di resistenza alla diffusione di vapore acqueo	μ = 1	UNI EN 13162
Densità	ρ = 70 kg/m³	UNI EN 1602
Calore specifico	C_p = 1030 J/(kgK)	UNI EN ISO 10456

Spessore e R_D										
Spessore [mm]	30	40	50	60	70	80	100	120	140	160*
Resistenza termica R_D [m²K/W]	0,90	1,20	1,50	1,80	2,10	2,40	3,00	3,60	4,20	4,80

* Disponibili su richiesta spessori più elevati (fino a 250 mm). Per ulteriori informazioni contattare i nostri uffici commerciali.

Scheda tecnica
StoLevell Novo

Malta minerale leggera/intonaco di fondo minerale per incollaggio ed armatura con polistirene e additivo leggero

Caratteristiche

Utilizzo

Esterni ed interni
Per tutti i supporti minerali
Per incollaggio di lastre isolanti su supporti minerali
Per la produzione di strati per armatura di medio e grande spessore
Come malta di incollaggio ed armatura per StoTherm Mineral, Wood e Vario

Caratteristiche

Elevata permeabilità al vapore acqueo
Elevata resistenza agli agenti atmosferici
Straordinariamente economico nei consumi
Peso ridotto
Lavorazione in strato medio o spesso
Ottimo per lavorazione a macchina

Dati tecnici

Criterio	Norma/ direttiva di prova	Valore/ Unità	Nota
Classe malta	EN 998-1	CS II	
Classe malta	DIN V 18550	P II	
Densità apparente malta solida	EN 1015-10	1,0 g/cm³	
Resistenza alla flessione (28 giorni)		EN 1015-11 1,5 N/mm²	
Resistenza alla compressione (28 giorni)		EN 1015-11 2,6 N/mm²	
Modulo E dinamico (28 giorni)	TP BE-PCC	2.000 N/mm²	
Resistenza alla diffusione del vapore acqueo μ			≤ 20
Assorbimento acqua	ETAG 004	≤ 0,5 kg/m²	
Assorbimento acqua (classe)		c ≤ 0,20 $_{0,5}$ kg/m²*min	W 2
Conduttività termica (val. tabella)	EN 1745	≤0,27 W/(m*k) per P=50 %	Valore tabella
Conduttività termica (val. tabella)	EN 1745	≤0,30 W/(m*k) per P=90 %	Valore tabella
Risposta antincendio (Classe)	EN 13501-1	A1	non combustibile
Resa		1.160 L/t	

I dati caratteristici indicati sono valori medi e/o approssimativi. A causa dell'impiego di materie prime naturali nei nostri prodotti, i valori indicati per la singola fornitura possono risultare lievemente differenti senza per questo pregiudicare l'idoneità del prodotto.

Preparazione del supporto

Requisiti

Il sottofondo deve essere solido, portante, piano, asciutto e privo di grassi e polveri.

Scheda tecnica

Sto-Glasfasergewebe F

Rete di armatura in fibra di vetro resistente agli alcali

Caratteristiche

Utilizzo	Esterni ed interni Come rete di armatura
Caratteristiche	Elevata resistenza alla trazione Antistramante Resistenza agli alcali Non contiene solventi
Formato	Larghezza maglie: 4 x 4 mm Larghezza: 110 cm

Dati tecnici

Criterio	Norma/Direttiva di prova	Valore/Unità	Note
Peso specifico	ETAG 004 / allegato C 6.1	> 155 g/m²	
Larghezza maglie	ETAG 004 / allegato C 6.3	4,0 mm	
Resistenza allo strappo allo stato alla consegna	ETAG 004 / 5.6.7.1.1	> 1.750 N/5cm	
Resistenza alla rottura in seguito a invecchiamento	ETAG 004/ 5.6.7.1.2	> 1.000 N/5cm	

I dati caratteristici elencati sono valori medi. A causa dell'impiego di materie prime naturali nei nostri prodotti, i valori indicati per la singola fornitura può risultare lievemente differenti senza per questo pregiudicare l'idoneità del prodotto.

Supporto

Requisiti -

Lavorazione

Consumo

Esecuzione	consumo ca.	
con 10 cm sovrapposizione	1,00	m/m²

Il consumo di materiali dipende tra l'altro da lavorazione, sottofondo e consistenza. I valori indicati per il consumo sono esclusivamente di riferimento. Verificare il consumo esatto direttamente in cantiere.

Applicazione

Inserire la rete di armatura nel terzo superiore dell'armatura, evitando bolle e pieghe nella malta di armatura e splanare.
I bordi della rete devono essere sovrapposti di 10 cm, le cimose gialle

Scheda tecnica

Sto-Putzgrund

Mano di fondo organica, riempitiva, pigmentata

Caratteristica	
Applicazione	• esterni • per rivestimenti organici e a base di resina silossanica • inadatto per superfici orizzontali o inclinate esposte ad agenti atmosferici
Proprietà	• trasmettitore di aderenza • regolazione del potere assorbente • prolunga il tempo aperto nella lavorazione dell'intonaco • permeabile alla CO_2 e al vapore acqueo • resistente agli alcali • pigmentato • riempitivo • colorabile

Dati tecnici

Criterio	Norma / disposizione di prova	Valore/ Unità	Indicazioni
Densità	EN ISO 2811	1,4 - 1,6 g/cm³	
Spessore dello strato d'aria equivalente della diffusione	EN ISO 7783-2	0,21 - 0,32 m	V2 medio
Coefficiente di resistenza alla diffusione del vapore acqueo μ	EN ISO 7783-2	3.200	
Spessore		500 µm	

I dati caratteristici indicati sono valori medi e/o approssimativi. A causa dell'impiego di materie prime naturali nei nostri prodotti, i valori indicati per la singola fornitura possono risultare lievemente differenti senza per questo pregiudicare l'idoneità del prodotto. .

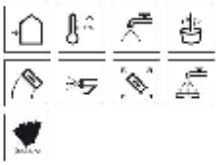
Supporto	
Requisiti	Il supporto deve essere solido, asciutto, pulito e portante nonché privo di efflorescenze, alghe/funghi e di agenti distaccanti. Le nuove malte di rasatura devono indurirsi per almeno 14 giorni.
Preparazioni	Verificare che i rivestimenti siano portanti. Rimuovere i rivestimenti non portanti.

Lavorazione	
Temperatura di lavorazione	Temperatura dell'aria e del supporto minima : +5 °C Temperatura dell'aria e del supporto massima: +30 °C

Scheda tecnica
StoSilco® K

Intonaco di finitura a base di silossani, a struttura con intonaco riempitivo

CE



Caratteristica

Applicazione

- per esterni
- su muratura, facciate ventilate e sistemi isolanti con intonaco di fondo
- su supporti minerali e organici
- non adatto a superfici orizzontali o inclinate, sottoposte agli agenti atmosferici

Proprietà

- intonaco esterno a norma EN 15824
- intonaco a base di resina silossanica per una lavorazione sicura e facciate durevoli
- A2-s1, d0 secondo EN 13501-1
- con pellicola di protezione integrata
- molto permeabile a CO_2 e al vapore acqueo
- elevata resistenza ad intemperie
- idrofobo per capillarità
- elevata idrorepellenza
- diluibile con acqua

Aspetto

- Struttura piena

Particolarità/indicazioni

- vedere Servizi/Panoramica Silo nel programma prodotti o nel listino prezzi
- se la tonalità prescelta ha un valore di luminosità di ≥ 15, non è necessaria una mano di finitura supplementare

Dati tecnici

Criterio	Norma / disposizione di prova	Valore/ Unità	Indicazioni
Densità	EN ISO 2811	1,7 - 1,9 g/cm³	
Spessore dello strato d'aria equivalente della diffusione	EN ISO 7783	0,07 - 0,08 m	V1 elevato
Tasso di permeabilità w	EN 1062-1	< 0,05 kg/(m²h^{0,5})	W3 basso