



6 — La sperimentazione

Nelle schede dei casi studio analizzati in precedenza non è stato possibile avere un riscontro quantitativo prima e dopo i lavori di isolamento per comprenderne l'efficacia, anche nei casi di opportunità di incontro diretto con i progettisti ed esecutori. La sperimentazione del cappotto esterno in balle di paglia è stata realizzata per capire in opera le caratteristiche costruttive e comprendere, prima, con un valutazione attraverso un software i parametri termici igrometrici e termici dinamici della chiusura verticale esistente e della chiusura isolata con paglia e, dopo, con un monitoraggio in opera la verifica diretta sul caso studio. Oltre a queste motivazioni, è stato possibile verificare la realizzazione e comprendere le eventuali problematiche riscontrate durante la messa in opera del cappotto.

6.1 Il caso studio

La sperimentazione è stata realizzata al piano terra di un'abitazione privata situata a Chivasso (TO). L'intervento di isolamento esterno con balle di paglia ha interessato una camera da letto (superficie interna 4,49 x 4,10 m) che si affaccia sul fronte sud dell'abitazione, riparata dal portico del balcone superiore. I muri perimetrali della camera sono in muratura portante (0,40 m) con finitura ad intonaco, la partizione orizzontale è in putrelle ma è stato realizzato un controsoffitto durante i lavori di ristrutturazione. Nella camera è presente una finestra (1,50 x 1,50 m) costituita da un telaio in legno con vetro semplice e schermata da un avvolgibile con cassonetto interno non isolato.

Il soggiorno (superficie interna di 4,46 x 4,10 m), camera adiacente alla camera da letto isolata in paglia, è stato utilizzato per il confronto diretto di un ambiente non isolato con le stesse dimensioni durante la fase di monitoraggio.

Il riscaldamento dell'abitazione avviene mediante una stufa a legna presente in cucina e una stufa a pellet ad aria non canalizzata nell'ingresso. È presente anche un sistema di riscaldamento con radiatori ad acqua alimentato da una caldaia a metano, ma non viene utilizzato.



Figura 6.1: Planimetria pianta piano terra caso studio (fuori scala) (A.R. Bertorello, 2013)

Dato che si tratta di una sperimentazione temporanea, si è optato durante le fasi di progettazione di adottare il requisito di reversibilità dell'intervento, non comune per un sistema di isolamento. Questo è stato dovuto al non voler intaccare e arrecare danni alla chiusura esistente durante e dopo lo smontaggio del cappotto.



Figura 6.2: A sinistra: caso studio utilizzato per la sperimentazione, a destra: fronte esterno della camera oggetto di intervento (A.R. Bertorello, 26.10.13)

6.2 Le fasi di progetto

È stato eseguito un rilievo architettonico e "tecnologico"¹ del locale oggetto di intervento e del contesto in cui si inserisce per comprendere le caratteristi-

¹Per rilievo tecnologico si intende l'individuazione e la comprensione dell'essenza costruttiva dell'edificio esistente tramite una precisa analisi delle caratteristiche costruttive dei sottoinsie-

che dell'edificio. Per il progetto di sperimentazione sono state realizzate due ipotesi progettuali per vagliare differenti soluzioni dal punto di vista costruttivo e dei materiali da impiegare durante la costruzione. Nelle due soluzioni si sono mantenute costanti i seguenti punti:

- lo spessore dell'isolamento in paglia 35 cm (lato corto della balla)
- il posizionamento di lastre di isolante di tipo tradizionale con caratteristiche di solidità e con un comportamento idrofugo da collocare a contatto con il pavimento e il soffitto per separare la paglia dal possibile assorbimento di umidità dai due elementi costruttivi
- telaio in legno per sorreggere le balle di paglia collocate sopra il vano finestra.

Di seguito vengono analizzate in dettaglio le soluzioni del cappotto in paglia.

6.2.1 Soluzione A

In questa soluzione (tavola 2 presente nell'allegato *Disegni progettuali sperimentazione*) viene costruito un telaio in legno che delimita il perimetro dell'intervento, fissato alla chiusura verticale con tasselli, su cui vengono fissate delle tavole in legno con profilati ad L disposte perpendicolarmente alla chiusura verticale. La funzione delle tavole è quella di trattenimento delle balle di paglia. Questa soluzione rispetta il requisito della reversibilità ma necessita interventi sulla chiusura esistente per il fissaggio del telaio in legno e dopo la rimozione della sperimentazione lascia dei segni permanenti sulla muratura. La finitura esterna del cappotto in paglia è stata pensata in intonaco di calce (spessore 3 cm).

Elenco materiale occorrente per questa soluzione:

- profilati ad L
- tasselli per muratura
- viti per legno
- tavole di legno
- intonaco

6.2.2 Soluzione B

Questa soluzione (tavola 3 presente nell'allegato *Disegni progettuali sperimentazione*), invece, non si avvale di un telaio in legno per delimitare e trattenere le balle di paglia. Il trattenimento contro la muratura e nella loro posizione avviene attraverso pali da cantiere che vengono bloccati al pavimento e soffitto del portico e sono posizionati sul fronte e sulle estremità dell'intervento. In questo modo la chiusura verticale non viene intaccata e dopo la rimozione della sperimentazione non rimangono segni permanenti. Per questo motivo si è scelto di optare per questa soluzione che richiede anche meno materiali rispetto alla soluzione A. La finitura esterna del cappotto in paglia è stata pensata in intonaco di calce (spessore 3 cm).

Elenco materiale occorrente per questa soluzione:

- distanziali in legno
- pali da cantiere (minimo 4)

mi edilizi presenti (cioè, delle parti della costruzioni svolgenti un ruolo funzionale specifico) e completarsi con l'accertamento del loro stato di degrado. (Cavaglià et al, 1982)

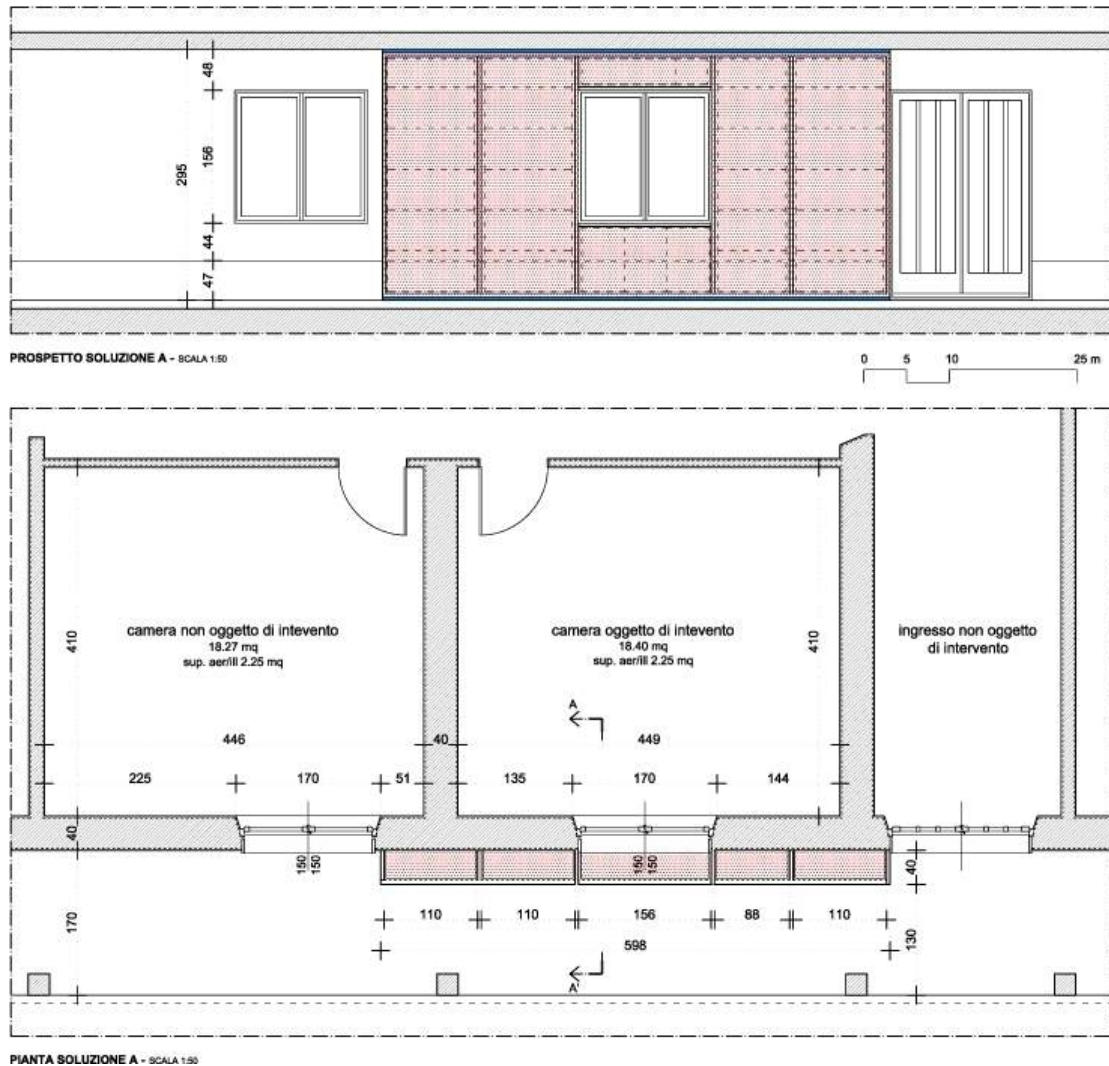


Figura 6.3: Pianta e prospetto della soluzione A (fuori scala). Si veda tavola 2 nell'allegato F *Disegni progettuali sperimentazione* (A.R. Bertorello, 04.10.13)

- intonaco

6.2.2.1 variante soluzione B

Non potendo effettuare la costruzione e il monitoraggio dell'intervento di isolamento in autunno (per motivi di reperimento della strumentazione di monitoraggio e per motivi climatici che non ne permettono il rilievo date le temperature esterne miti), non è stato possibile realizzare la finitura esterna ad intonaco durante la costruzione a fine dicembre per motivi climatici². È stata così scelta una finitura protettiva delle balle di paglia con tessuto non tessuto³ (gram-

²Dato che il monitoraggio degli ambienti avviene in continuo prima e dopo l'isolamento (senza interruzione), la soluzione ipotizzata per la finitura esterna ad intonaco non può essere presa in considerazione perché falserebbe le misurazioni. L'intonaco impiegherebbe 3 – 4 settimane per asciugare e non permetterebbe la collocazione della sonda subito dopo il termine della posa in opera del cappotto.

³Tessuto non tessuto in polipropilene stabilizzato ai raggi U.V. Utilizzato in agricoltura per favorire lo sviluppo dei fiori e degli ortaggi, preservandoli dagli agenti atmosferici.

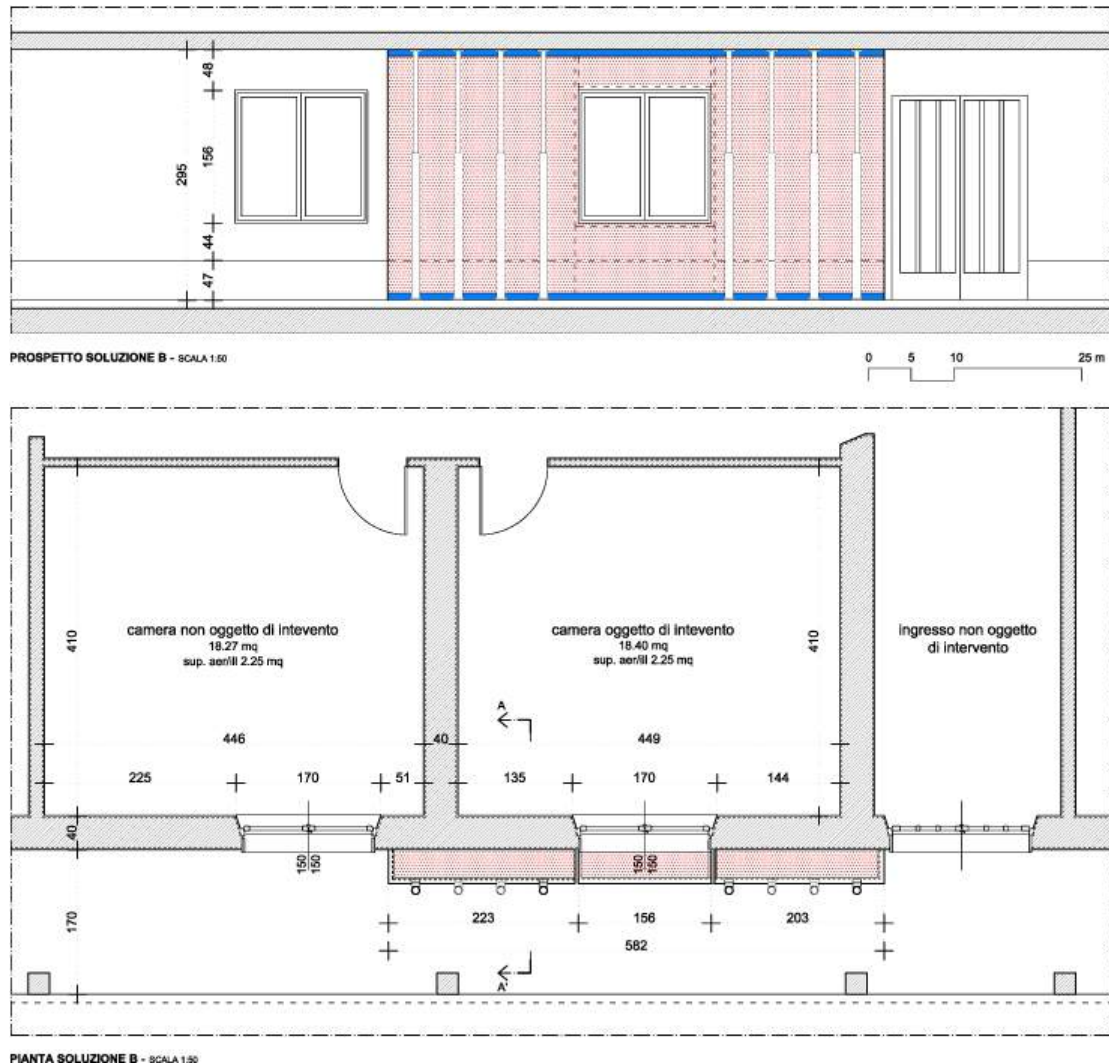


Figura 6.4: Pianta e prospetto della soluzione B (fuori scala). Si veda tavola 3 nell'allegato *Disegni progettuali sperimentazione* (A.R. Bertorello, 04.10.13)

matura 17 gr/mq). I disegni progettuali sono presenti nelle tavole 6 - 7 - 8 - 9 dell'allegato *Disegni progettuali sperimentazione*.

6.3 Il reperimento dei materiali

Dopo la fase progettuale è stata avviata la ricerca dei materiali per la costruzione del caso studio. La fase più difficile è stata quella del reperimento delle balle di paglia rettangolari di piccola dimensione perché al momento il sistema di raccolta e confezionamento maggiormente utilizzato è la rotoballa. Parlando con il contadino che ha fornito la paglia di grano, è emerso che le balle di piccole dimensioni non vengono più realizzate perché ormai vengono confezionate nella zona solo più quelle rotonde, più veloci da raccogliere nel campo. Riferisce che le persone che acquistano le balle rettangolari abitano in contesti in cui la rotoballa non può essere movimentata (es. contesti montani particolari per cui la movimentazione deve essere realizzata a mano) o le usano per animali da gabbia (es. conigli).

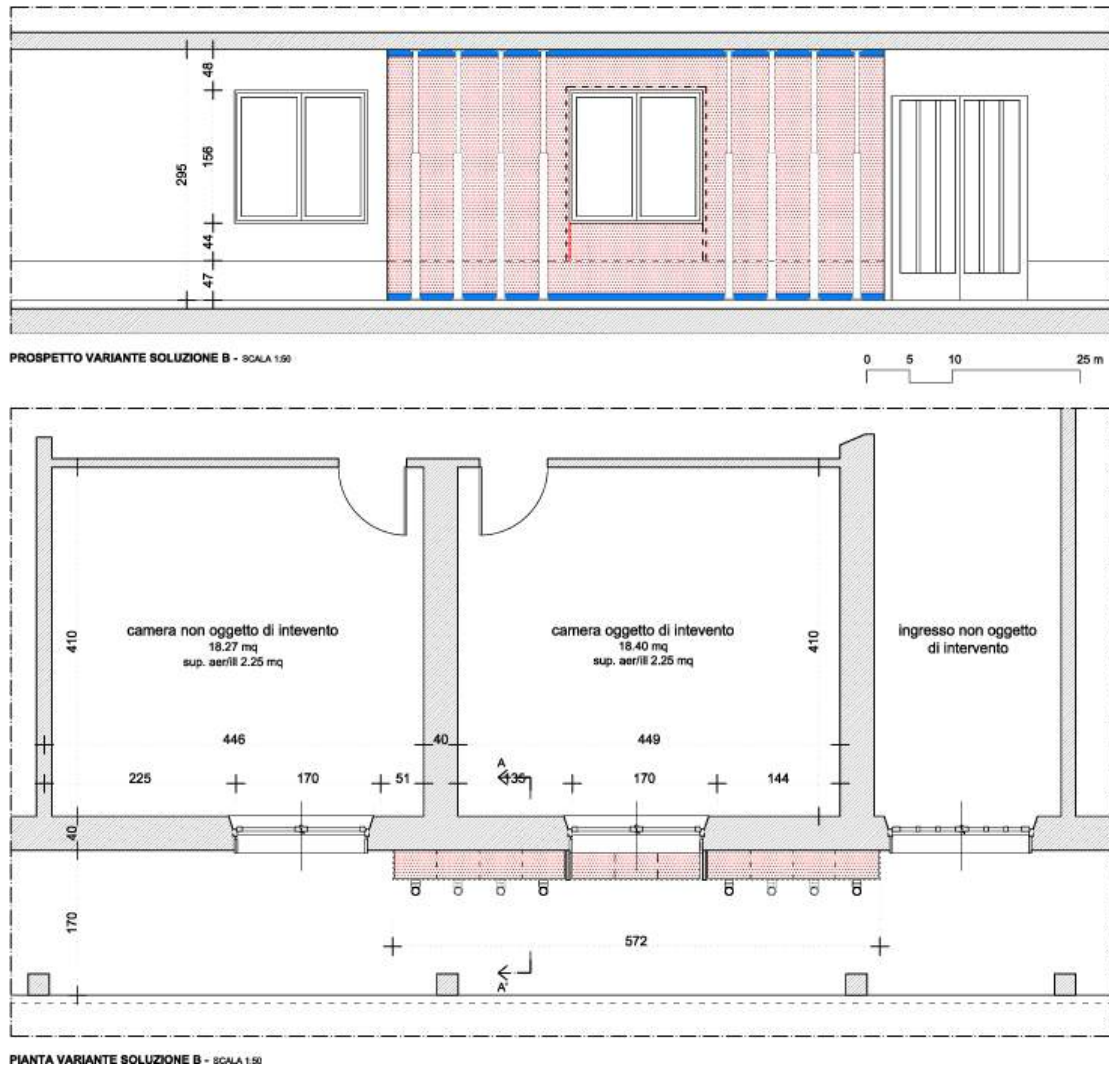


Figura 6.5: Pianta e prospetto della variante alla soluzione B (fuori scala). Si veda tavola 6 nell'allegato *Disegni progettuali sperimentazione* (A.R. Bertorello, 13.10.13)

Le dimensioni di una singola balla di paglia reperita sono di circa 1,10 x 0,50 x 0,35 m con un peso di 15,80 kg circa (si veda figura 6.7 a sinistra). Non risulta perfettamente rettangolare e questo è dovuto alle legature che non sono sempre posizionate simmetricamente all'asse perpendicolare all'orientamento delle fibre. Questa situazione è rappresentata nella figura 6.7 (foto a destra) in cui si può notare che le legature sono spostate verso il lato superiore della balla. È stato collocato un asse in legno sopra la balla per evidenziare la non linearità dei lati.

Dopo aver esaminato le balle, è stata calcolata la densità della paglia reperita perché si è constatato che la legatura, durante la movimentazione, risultava debole compromettendo la compattezza della balla. Infatti, la densità è pari a 82 kg/mc e rientra per poco nell'intervallo ideale di impiego nelle costruzioni (80 – 120 Kg/mc) (Minke e Mahlke, 2005).

Per la tipologia di isolamento rigido da inserire sotto le balle di paglia per separare la pavimentazione dalla paglia (evitare il contatto con eventuale umi-

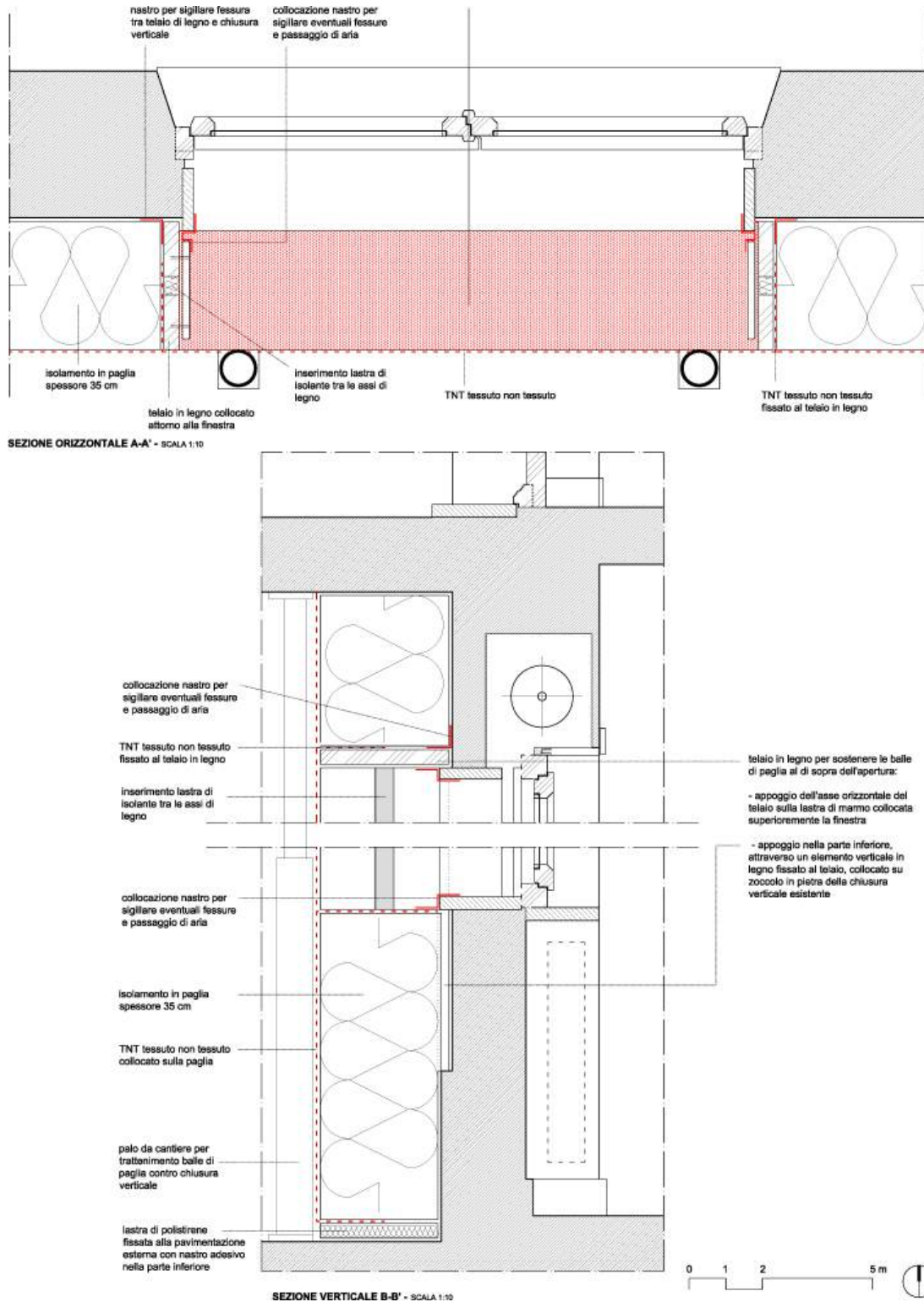


Figura 6.6: Pianta e prospetto del dettaglio in prossimità dell'apertura (fuori scala). Si veda tavola 9 nell'allegato *Disegni progettuali sperimentazione* (A.R. Bertorello, 13.12.13)

dità di risalita) è stato scelto un pannello in polistirene (dimensione pannello 125 x 60 x 3 cm, densità 30 kg/mc).



Figura 6.7: A sinistra: peso della balla di paglia (15,8 kg) (A.R. Bertorello, 26.10.13); a destra: balla non perfettamente rettangolare e con difetti nella legatura (A.R. Bertorello, 26.10.13)

6.4 La prova di disposizione delle balle di paglia

Prima della realizzazione del cappotto in paglia, sono state realizzate delle prove per la collocazione in opera dei corsi di balle per verificare la loro disposizione e stabilità. Sono state effettuate 3 diverse modalità di posa per comprendere, in fase di realizzazione, la migliore disposizione dei corsi di balle: posizionamento "in foglio" sfalsati, posizionamento "in foglio" non sfalsati e posizione in verticale. Di seguito vengono riportati nello specifico le considerazioni effettuate durante la prova.

6.4.1 Posizionamento delle balle "in foglio" sfalsate

Il posizionamento "in foglio" con balle sfalsate rappresenta il modo comune utilizzato nella costruzione di un muro in mattoni. Questo garantisce una distribuzione del peso e una maggiore legatura tra le diverse balle attraverso l'attrito delle fibre. Se si utilizza questa soluzione è necessario tagliare alcune balle per il completamento delle parti poste lateralmente a completamento del corso di paglia (figura 6.8).

6.4.2 Posizionamento delle balle "in foglio" non sfalsate

Il posizionamento "in foglio" con balle non sfalsate, in questa applicazione sul caso studio, non necessita il taglio delle balle per il completamento dei corsi perché lo spazio tra finestra e porta di ingresso corrisponde a 2 moduli di paglia esatti. Non si vede alcuna differenza di stabilità rispetto alla soluzione delle balle "in foglio" sfalsate, però si nota un incremento e localizzazione della mancanza di paglia in una stessa parte dell'isolamento (zona di contatto tra le parti di testata delle balle di paglia) (figura 6.9).

6.4.3 Posizionamento delle balle in verticale

La collocazione delle balle di paglia in verticale non è affatto semplice data la loro non perfetta linearità e data dal fatto che la superficie di appoggio



Figura 6.8: Disposizione delle balle "in foglio" sfalsata (foto A.R. Bertorello, 26.10.13)



Figura 6.9: Disposizione delle balle in foglio non sfalsate (foto A.R. Bertorello, 26.10.13)

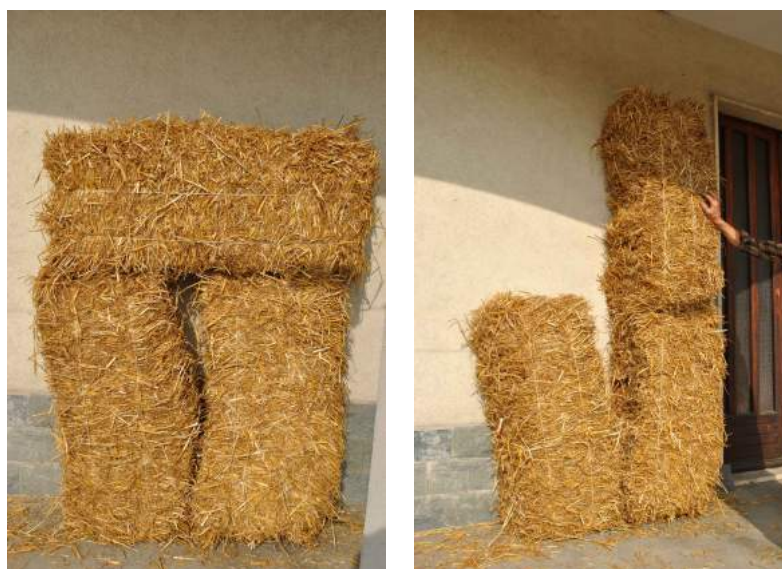


Figura 6.10: Prove di disposizione delle balle di paglia in verticale (foto A.R. Bertorello, 26.10.13)

è minore rispetto alle soluzioni presentate in precedenza. Durante l'impilaggio in verticale le balle necessitano di un trattenimento dovuto al fatto che

l'attrito delle fibre del lato ruvido non è presente. E' stata anche verificata la disposizione orizzontale sopra due balle in verticale per conferire stabilità ma si evidenziano ampi lacune tra le balle date dalla loro non linearità (figura 6.10).

6.4.4 Accostamento orizzontale

Le prove realizzate sono state utili per comprendere il comportamento reale delle balle di paglia. Infatti, si è potuto capire che è presente un attrito tra le diverse fibre delle balle sovrapposte una volta collocate nella loro corretta posizione. Questo non comporta, quindi, un'ulteriore legatura tra le balle per assicurare la stabilità. L'accostamento avviene facilmente attraverso una spinta laterale e data la "morbidezza" della paglia è possibile schiacciarla attraverso questa operazione. Tra le varie balle di paglia si vengono a creare delle fessure che, in fase di realizzazione, dovranno essere colmate con paglia sfusa per limitare una differenza di isolamento e un possibile ponte termico in quella zona.



Figura 6.11: Prove di schiacciamento e accostamento della paglia e evidenziazione degli spazi tra le varie balle di paglia (foto A.R. Bertorello, 26.10.13)

6.5 Prova di legatura delle balle

È stata eseguita una prova di legatura (in data 29.10.13) delle balle di paglia per verificare la compattazione e l'accostamento attraverso la legatura. Sono state utilizzati due tipi di corda, una sintetica e l'altra di origine vegetale utilizzata un tempo nelle fasi di lavorazione delle balle di paglia. Dopo aver preso le misure per la lunghezza da utilizzare nella legatura, la corda è stata piegata in due in modo da formare un cappio, che è risultato utile durante le fasi di stringimento delle balle. Da una prima legatura (apparecchiatura orizzontale non sfalsata) è emerso che la corda acrilica non era funzionale per questo lavoro perché durante il tiraggio si è spezzata. Si è così testata la seconda corda, di origine vegetale, che durante le fasi di tiratura, fissaggio e legatura è risultata idonea all'uso e stabile.

6.5.1 Apparecchiatura orizzontale non sfalsata

Per questa prova sono state utilizzate due balle di paglia accostate e disposte "in foglio" e la corda acrilica blu. Per effettuare la legatura è stata posizionata

a terra la corda, su cui sono state adagiate le due balle di paglia collocandole in posizione centrale rispetto alla corda. Per compattare orizzontalmente le balle è stato effettuato un tiraggio attraverso la corda e la successiva legatura superiore.



Figura 6.12: Tiraggio della corda per compattare le balle e due balle legate superiormente (foto A.R. Bertorello, 29.10.13)

6.5.2 Apparecchiatura orizzontale sfalsata

Per questa prova è stato posizionato il primo corso di balle "in foglio" e successivamente è stata collocata sulla parte superiore la corda di origine vegetale che è servita per legare il secondo corso di balle disposto sfalsato rispetto a quello inferiore. Dopo aver fatto passare la corda sulla parte superiore del secondo corso di balle, si è proceduto nella fase di compattazione delle balle attraverso il tiraggio delle balle e la successiva legatura (La1). È stata realizzata una seconda legatura laterale (La2), ruotata di 90 gradi rispetto alla prima, per cercare di compattare ulteriormente le balle effettuando sempre l'operazione di tiraggio della corda. Si è notato che all'estremità della balla è presente una zona centrale che spancia rispetto ai lati. Questo non permette di compattare molto le balle accostate e a legatura effettuata lascia delle lacune che dovranno essere colmate con paglia sfusa.



Figura 6.13: Passaggio della corda nella parte superiore e legature della balla: superiore (La1) e laterale (La2) (foto A.R. Bertorello, 29.10.13)

6.5.3 Apparecchiatura verticale

Dopo aver posizionato verticalmente due balle si è visto che non erano perfettamente rettangolari perché la legatura non era stata realizzata correttamente. Si è proceduto alla loro regolarizzazione attraverso lo spostamento della legatura con operazioni di pressione con le ginocchia nella parte centrale della balla e compattazione in verticale e relativo movimento della corda verso la zona centrale della balla. Sono state effettuate due legature: una nella parte superiore (La1) e una nella parte inferiore (La2). Questo ha permesso di rendere solidali le due balle e di accostarle maggiormente. Successivamente, è stata addossata una terza balla e si è proceduto alla relativa legatura. Attraverso un paletto di legno appuntito, si è fatta passare la corda nella fessura verticale centrale delle prime due balle legate sia nella parte superiore (Lb1) sia in quella inferiore (Lb2). In questo modo, è stato possibile legare tre balle e verificare che è possibile diminuire lo spazio tra le balle dopo il tiraggio e relativa legatura. Restano, comunque, delle lacune che dovranno essere colmate con paglia sfusa.



Figura 6.14: Passaggio della corda nella parte superiore e legature della balla: superiore (La1) e laterale (La2) (foto A.R. Bertorello, 29.10.13)

6.5.4 Considerazioni sulla legatura

Dopo aver effettuato le prove di legatura attraverso il differente posizionamento della balla sono emerse le seguenti considerazioni:

- difficoltà di movimentazione manuale delle balle legate per il loro peso
- nel caso in cui le balle sono posizionate in verticale la differenza in altezza delle balle non permette di posizionare al di sopra balle già legate perché non c'è una linearità di appoggio
- nella soluzione delle balle posizionate in orizzontale è possibile ammortizzare meglio le differenze dimensionali della paglia
- la legatura della posizione orizzontale non è molto efficace perché la parte terminale della balla ha una zona centrale più alta (c'è uno spanciamiento) che interferisce durante la fase di compattazione
- la legatura risulta più efficace nella soluzione verticale rispetto alla soluzione orizzontale perché permette di avere maggiore aderenza tra i lati della paglia
- anche se viene effettuata la legatura, dato che le balle non sono regolari, si vengono a formare delle lacune tra le balle che devono essere colmate.

6.6 Prova di taglio di una balla di paglia

È stata realizzata una prova per tagliare una balla di paglia in due parti più piccole, necessarie per colmare eventuali zone di risulta durante la fase di montaggio del cappotto. Occorre realizzare delle nuove legature nella balla, secondo le dimensioni desiderate e necessarie. I materiali occorrenti utilizzati per effettuare questa operazione sono i seguenti: filo in polipropilene adatto alla legatura delle balle, una bacchetta in ferro con presenza di un occhio ad un'estremità e delle forbici. Di seguito vengono riportate le fasi operative effettuate per tagliare una balla:

1. legatura del filo in polipropilene ad una estremità della bacchetta in ferro (quella con l'occhio)
2. passaggio della bacchetta attraverso la balla di paglia nella posizione desiderata
3. posizionamento del filo attorno alla parte di balla interessata
4. realizzazione di un occhio ad un'estremità del filo e passaggio dell'altra estremità all'interno
5. serraggio del filo attorno alla balla
6. la nuova legatura è stata fissata e legata con due nodi
7. effettuare le stesse operazioni per altre 3 volte (legatura A2, A3 e A4)
8. taglio delle due legature originarie della balla
9. separazione delle nuove balle attraverso la sovrapposizione delle stesse
10. eliminazione della paglia non legata presente nelle estremità appena tagliate

Durante le varie operazioni bisogna prestare attenzione al serraggio e alla legatura delle nuove legature. Infatti, per mantenere la densità delle fibre nella nuove balle è stato necessario applicare una forza durante l'operazione di serraggio e fissaggio della corda.

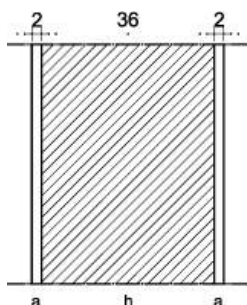
Dopo aver suddiviso la balla in due, è rimasta della paglia di risulta anche se le nuove legature sono state realizzate correttamente cercando di far passare la bacchetta nella stessa posizione per entrambe le legature adiacenti e adottando la stessa dimensione di lunghezza per quelle inferiori. La risulta è data dal fatto che nella balla non sono presenti fibre lunghe quanto il lato della balla, ma hanno varie dimensioni. Nella parte centrale, tra le due legature, è possibile che le fibre non vengano intercettate dalle nuove legature portando alla formazione di paglia sfusa. Oltre a questo caso, è possibile che alcune fibre vengano trattenute da una legatura solo per una piccola porzione e quindi la maggior parte della fibra non risulti legata dall'altra legatura. Per ovviare a quest'ultimo caso, è necessario ripulire le parti terminali della balla per eliminare le fibre sfuse e non legate correttamente. In quest'ultimo caso, se sono molte, bisogna tagliarle lasciando la parte legata per non compromettere il serraggio dato dalla legatura (se si togliessero, la legatura potrebbe diventare lasca).

Per la documentazione fotografica delle varie fasi della prova si rimanda all'allegato *Taglio di una balla di paglia*.

6.7 Verifica dei parametri termogrometrici in regime stazionario e dinamico della chiusura verticale

Prima della realizzazione del monitoraggio, sono state effettuate le verifiche dei parametri termogrometrici, in regime stazionario e dinamico, della chiusura verticale oggetto di intervento. Attraverso l'utilizzo del software Termolog Epix4 è stato possibile calcolare i parametri per la chiusura verticale prima e dopo l'intervento di isolamento in paglia.

Le caratteristiche delle componenti della chiusura portante in muratura con spessore di 0.40 m sono state ipotizzate ed elencate nella seguente tabella:



descrizione	s (mm)	ρ (kg/m ³)	μ (-)	c (kJ/kgK)	λ (W/mK)	R m ² K/W
strato liminare interno						0.13
intonaco interno (a)	20	1400	11.1	1	0.70	0.029
muratura portante (h)	360	1800	10	1	0.72	0.50
intonaco di calce (a)	20	1800	16.7	1	0.90	0.022
strato liminare esterno						0.04

Il caso studio si trova in zona climatica E con 2628 gradi giorno.

I parametri termici della chiusura esistente sono:

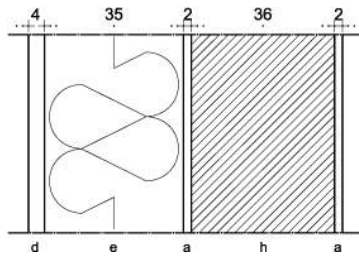
- trasmittanza termica (U): 1.38 W/m²K
- resistenza termica (R): 0.72 m²K/W

Vengono riportati i parametri termici dinamici:

- *trasmittanza termica periodica* (Yei): 0.165 W/m²K
- *fattore di attenuazione* (fa): 0.12
- *sfasamento* (φ): 13.52 h
- *ammittenza termica interna* (Yii): 4.6 W/m²K
- *ammittenza termica esterna* (Yee): 7.8 W/m²K

Inoltre, a causa della elevata trasmittanza termica la chiusura verticale è soggetta a fenomeni di condensa superficiale e non a fenomeni di condensa interstiziale.

Dopo aver calcolato i parametri della chiusura esistente, è stato applicato lo strato di isolamento in paglia per vedere il comportamento attraverso l'applicazione del cappotto esterno in paglia. La nuova chiusura verticale presenta uno spessore di 0.75 m con le seguenti caratteristiche:



descrizione	s (mm)	ρ (kg/m ³)	μ (-)	c (kJ/kgK)	λ (W/mK)	R m ² K/W
strato liminare interno						0.13
intonaco interno (a)	20	1400	11.1	1	0.70	0.03
muratura portante (h)	360	1800	10	1	0.72	0.50
intonaco di calce (a)	20	1800	16.7	1	0.90	0.02
isolamento in paglia (e)	350	82	2	2	0.045	7.78
strato liminare esterno						0.04

I parametri termici della chiusura esistente sono:

- trasmittanza termica (U): 0.12 W/m²K
- resistenza termica (R): 8.33 m²K/W

Vengono riportati i parametri termici dinamici:

- *trasmittanza termica periodica* (Yei): 0.001 W/m²K
- *fattore di attenuazione* (fa): 0.004
- *sfasamento* (φ): 28.34 h
- *ammittenza termica interna* (Yii): 4.51 W/m²K
- *ammittenza termica esterna* (Yee): 0.71 W/m²K

Con l'isolamento in paglia, la chiusura verticale non è soggetta a fenomeni di condensa superficiale nè a fenomeni di condensa interstiziale. Inoltre, analizzando i valori della trasmittanza termica dopo l'isolamento in paglia (U = 0.12 W/m²K) si è potuto verificare che è molto minore del valore richiesto dalla normativa (DPR 59/09) per le pareti (U = 0.33 W/m²K).

6.8 Le fasi di costruzione del cappotto

La realizzazione in opera dell'isolamento in paglia sulla chiusura verticale esistente esterna della camera da letto è avvenuta il 28 dicembre 2013. Le fasi di costruzione effettuate durante l'installazione in opera sono state le seguenti:

1. realizzazione telaio in legno da collocare attorno alla finestra per sorreggere le balle al di sopra dell'apertura
2. installazione telaio attorno alla finestra
3. posizionamento lastre di polistirene sulla pavimentazione esterna
4. posizionamento parti di tessuto non tessuto fissate all'isolamento in polistirene
5. posizionamento balle di paglia sull'isolamento in polistirene (se necessario regolarizzazione delle balle di paglia⁴)

⁴In alcuni casi si è reso necessario battere alcune balle di paglia con un pezzo di legno di grandi dimensioni in modo da abbassare le fibre di un lato della balla per poterla collocare al di sopra del telaio in legno posizionato attorno alla finestra.

6. colmataura delle lacune presenti tra le balle di paglia; tra il telaio e le balle di paglia; tra la partizione orizzontale esterna e le balle superiori
7. collocazione e fissaggio del tessuto non tessuto sulle balle di paglia e sul telaio in legno
8. sigillazione di alcune lacune di tessuto non tessuto
9. installazione pali da cantiere per sostegno contro la chiusura verticale dell'isolamento in paglia
10. collocazione della sonda di temperatura superficiale sulla finitura esterna del cappotto in paglia

Rispetto a quanto progettato, la costruzione del cappotto in paglia (superficie 18 mq circa) ha portato ad alcune modifiche durante la messa in opera:

- non è stato collocato lo strato di isolamento in polistirene sulla parte superiore del cappotto in paglia
- il tessuto non tessuto non è stato fissato nella parte interna del telaio in legno attorno alla finestra, ma è stato fissato nella parte esterna



Figura 6.15: Particolare telaio finestra e pannelli isolanti prima della collocazione delle balle di paglia (A.R. Bertorello, 28.12.13)



Figura 6.16: Fasi di costruzione dell'isolamento in paglia (A.R. Bertorello, 28.12.13)



Figura 6.17: Isolamento in paglia prima della collocazione del tessuto non tessuto e intervento di isolamento terminato (A.R. Bertorello, 29.12.13)

6.9 Il progetto di monitoraggio

Scopo della campagna di monitoraggio è stato quello di misurare in opera e quantificare il comportamento di un isolamento esterno in paglia applicato a una chiusura in muratura portante. Prima della realizzazione dell'intervento di isolamento della chiusura è stato effettuato uno studio per la collocazione dei sensori di monitoraggio in modo da quantificarne il numero, la tipologia e verificare l'effettiva metratura dei fili dei sensori⁵.

La campagna di monitoraggio ha previsto la registrazione dei dati in contemporanea per tutto il periodo compreso tra il 20 dicembre 2013 e il 13 gennaio 2014 nelle due camere di riferimento: soggiorno (stanza 1) e camera da letto (stanza 2). I dati sono stati acquisiti tramite un datalogger (Data Taker DT 85 series 2) attraverso la registrazione ogni 15 minuti delle temperature e dei flussi termici.

Nel periodo compreso tra il 20 dicembre e il 28 dicembre 2013 i due ambienti sono stati monitorati per comprendere le caratteristiche e verificare la trasmittanza delle porzioni di chiusura verticale e successivamente in data 28 dicembre è stato collocato l'isolamento in paglia sulla chiusura verticale esterna della stanza 2 fino al termine del monitoraggio. Oltre al rilevamento in continuo, sono state effettuate delle termografie prima e dopo l'intervento per verificare le eventuali disomogeneità presenti ed i ponti termici.

I sensori necessari e la loro collocazione nei due ambienti (tavole 5 - 6 - 10 e 11 presenti nell'allegato *Disegni progettuali sperimentazione*) sono stati posizionati nel seguente modo:

Nella stanza 2:

- termocoppia per la misura della temperatura dell'aria interna (A.T_Ai_INT2)
- termocoppia per la misura della temperatura superficiale (A.T_Si2)
- termoflussimetro (A.HF_INT2)

Sulla parete esterna della stanza 2, prima della collocazione dell'isolante sono stati posizionati:

- termoflussimetro (A.HF_INT1B)
- termocoppia per la misura della temperatura superficiale (A.T_Se2)

⁵I fili dei sensori sono stati fatti passare nella battuta del serramento esistente in legno che avendo una tolleranza tra il telaio fisso e il telaio mobile ne ha permesso l'inserimento

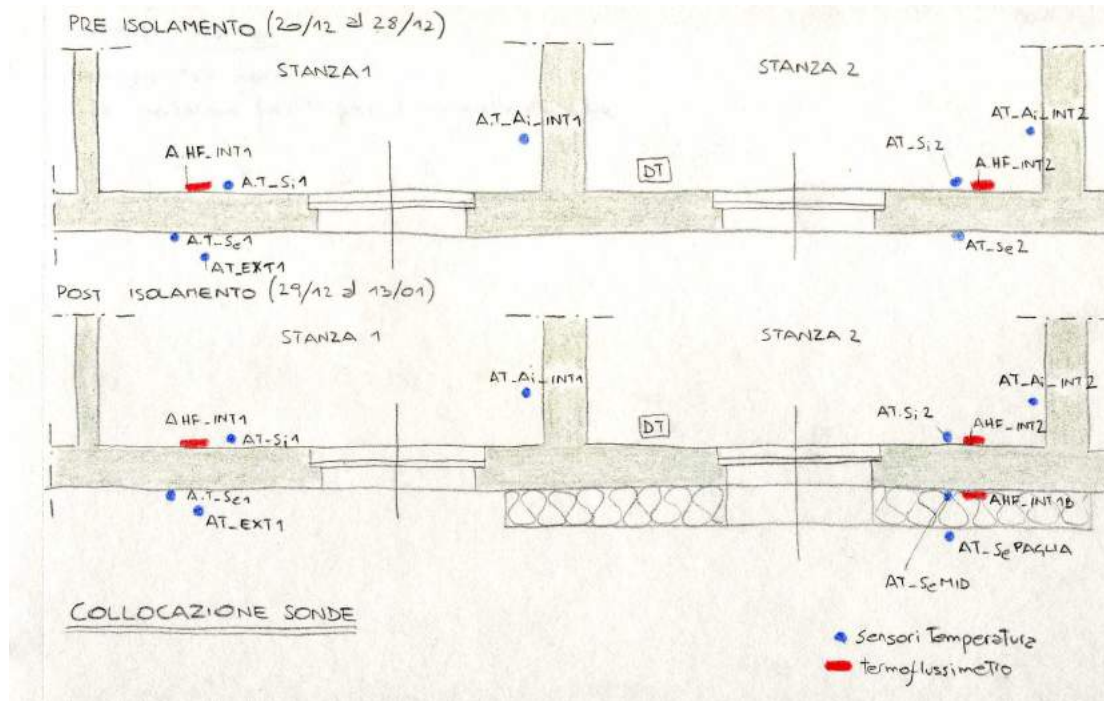


Figura 6.18: Schizzo della collocazione dei sensori nelle due stanze oggetto di monitoraggio (A.R. Bertorello, 29 dicembre 2013)

Sulla superficie esterna dell'isolamento in paglia (dal 28 dicembre 2013):

- termocoppia per la misura della temperatura superficiale (A.T_SePAGLIA)

Nella stanza 1:

- termocoppia per la misura della temperatura dell'aria interna (A.T_Ai_INT1)
- termocoppia per la misura della temperatura superficiale (A.T_Si1)
- termoflussimetro (A.HF_INT1)

Sulla parete esterna della stanza 1:

- termocoppia per la misura della temperatura superficiale (A.T_Se1)

E' inoltre stata posizionata in esterno, davanti alla stanza 1:

- termocoppia per la misura della temperatura esterna (A.T_EXT1)

Tutti i sensori sono stati collegati al Datalogger collocato nell'ambiente 1.

Nel periodo di monitoraggio le temperature esterne sono variate nell'intervallo compreso tra 2,47° C e 10° C eccetto per il 27 dicembre in cui si sono raggiunti i 15° C. In particolare, non sono state registrate temperature esterne molto basse (inferiori a 4°).

6.9.1 Monitoraggio parete senza isolamento in paglia (20 dicembre – 28 dicembre)

Per calcolare la trasmittanza e la conduttanza termica delle chiusure delle due stanze oggetto di rilevamento è stato utilizzato il metodo delle medie progressive seguendo la norma UNI 9869 (UNI, 1994) secondo le seguenti formule:

$$U = \frac{\sum_{j=1}^n q_j}{\sum_{j=1}^n (T_{i_j} - T_{e_j})} \left[\frac{W}{m^2K} \right]$$

$$C = \frac{\sum_{j=1}^n q_j}{\sum_{j=1}^n (T_{si_j} - T_{se_j})} \left[\frac{W}{m^2K} \right]$$

I risultati hanno riportato che:

- conduttanza stanza 1, $C_1 = 2,03 \text{ W/m}^2\text{K}$
- conduttanza stanza 2 prima dell'intervento di isolamento $C_{2pre} = 1,65 \text{ W/m}^2\text{K}$
- trasmittanza stanza 1, $U_1 = 1,34 \text{ W/m}^2\text{K}$
- trasmittanza stanza 2 prima dell'intervento di isolamento, $U_{2pre} = 0,99 \text{ W/m}^2\text{K}$

Dall'analisi termografica (figure 6.20 e 6.21), si nota che le due chiusure sono tra loro confrontabili e hanno circa la stessa temperatura superficiale (circa 16°C).

Sono stati monitorati anche i flussi termici, l'andamento delle temperature dell'aria degli ambienti e la temperatura esterna (figura 6.22). Nei giorni di registrazione dei dati la temperatura interna dei locali variava da $17,07^\circ \text{C}$ a $21,56^\circ \text{C}$ nella stanza 1 e da $18,28^\circ \text{C}$ a $22,30^\circ \text{C}$ nella stanza 2. Durante questo periodo il riscaldamento dei locali interni è avvenuto con l'uso dei termosifoni alimentati da una caldaia a metano.

6.9.2 Monitoraggio con isolamento in paglia (28 dicembre – 13 gennaio)

Dopo la collocazione (28 dicembre 2013) sulla chiusura esterna della stanza 2 dell'isolamento in paglia dello spessore di 35 cm, sono stati registrati i dati dei due ambienti nel periodo tra il 29 dicembre 2013 e il 13 gennaio 2014. Il monitoraggio in questo periodo ha permesso di comprendere l'influenza dell'isolamento sulla chiusura verticale. Applicando il metodo delle medie progressive sono state calcolate la trasmittanza e la conduttanza delle due chiusure verticali delle stanze dopo la collocazione dell'isolante. Dai risultati ottenuti si ha che:

$$C_1 = 1,94 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$C_2 = 0,77 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$U_1 = 1,44 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$U_2 = 0,72 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Le differenze tra i dati rilevati nei due periodi di monitoraggio sono dovuti alle diverse condizioni al contorno e rientrano nell'incertezza delle misure ($1,94 \text{ W/m}^2\text{K}$ contro $2,03 \text{ W/m}^2\text{K}$). Per quanto riguarda la valutazione del singolo strato di paglia, avendo misurato anche la temperatura sullo strato di separazione tra parete e paglia è stato possibile calcolare la conduttanza di questo strato pari a $1,26 \text{ W/m}^2\text{K}$, da cui è possibile calcolare la resistenza termica e, noto lo spessore, la conduttività termica, che risulta pari a $0,44 \text{ W/mK}$.

Dalla figura 6.24, si può osservare che l'isolamento in paglia ha impiegato circa 4 giorni prima di andare a regime e rilevare dei dati costanti. Questo motivo è dato principalmente dallo spessore dell'isolamento.

Nei giorni di registrazione dei dati la temperatura interna dei locali variava da 14.08° C a 20.58° C nella stanza 1 e da 15.04° C a 20.71° C nella stanza 2. Dopo l'intervento di isolamento, si è riscontrato che le temperature dell'aria interna della stanza 2 (isolata) sono diminuite rispetto alle temperature della stanza 1. Questo fatto probabilmente è derivato dal fatto che la fonte di riscaldamento in questo periodo è stata sostituita con la stufa a pellet ad aria non canalizzata, collocata nel corridoio e direzionata verso la porta interna della camera 1, influenzando così sull'ingresso del calore all'interno della stanza 2.

Analizzando i dati delle temperature superficiali dei due ambienti, si vede che le medie delle temperature sono le seguenti:

$$A.T_{si1_{media}} = 17,64^{\circ} C$$

$$A.T_{si2_{media}} = 19,21^{\circ} C$$

con una differenza in media di 1,57° C tra la chiusura isolata della stanza 2 e la chiusura non isolata della stanza 1. Invece, si riscontra che la temperatura media registrata nella zona tra la chiusura verticale e l'isolamento in paglia ($A.T_{Se\ mid}$) è di 15,4° C⁶.

Per quanto riguarda le temperature superficiali esterne delle due chiusure si riscontra che la chiusura isolata cede meno calore rispetto alla chiusura senza isolamento poiché la temperatura superficiale della chiusura isolata ($A.T_{SePAGLIA}$) è minore della chiusura non isolata ($A.T_{Se1}$) (figura 6.25).

È stata calcolata l'energia misurata nell'arco della giornata secondo la seguente formula:

Analizzando delle giornate nuvolose (dal 2 al 5 gennaio 2014) e delle giornate serene (dal 6 al 9 gennaio 2014) si riscontra un maggiore dispersione nelle giornate nuvolose, dovuto alle inferiori temperature esterne del periodo. Calcolando la media delle energia nei periodi di riferimento si riscontra che:

$$E_{1(2-5\ gennaio)} = -449,97\ Wh/m^2\ e\ E_{2(2-5\ gennaio)} = -217,32\ Wh/m^2$$

$$E_{1(6-9\ gennaio)} = -381,85\ Wh/m^2\ e\ E_{2(6-9\ gennaio)} = -193,40\ Wh/m^2$$

Tra le due stanze monitorate è stata registrata una variazione in percentuale del 51% nelle giornate nuvolose e del 47% nelle giornate serene.

6.10 Il rilievo termografico

L'utilizzo della termografia permette di raccogliere informazioni sull'oggetto di studio attraverso l'analisi delle radiazioni infrarosse di origine termica emesse dalla superficie (Negro *et al.*, 2001).

La campagna di rilievo termografico ha evidenziato ponti termici e variazioni di temperatura superficiale prima e dopo la realizzazione dell'isolamento termico in paglia. Vengono riportati esempi pre e post isolamento di parti presenti nella stanza 2 (stanza oggetto di isolamento termico esterno in paglia) in modo da avere un confronto diretto dell'influenza dell'isolamento.

⁶Durante lo smontaggio del cappotto in paglia si percepiva la differenza di temperatura nei lati della palla di paglia: quello a contatto con la chiusura verticale era caldo rispetto al lato confinante con l'aria esterna che risultava freddo.

Le termografie sono state realizzate da Lorenza Bianco e dalla prof. Valentina Serra del dipartimento Energia (DENERG) del Politecnico di Torino (da figure 6.26 a 6.34).

6.11 Risultati raggiunti

Durante il monitoraggio non è stato possibile avere la stessa fonte di calore per il riscaldamento e questo non ha reso del tutto possibile il confronto con identiche condizioni ambientali. In media si è riscontrato un incremento della temperatura superficiale interna della chiusura verticale di $1,6^{\circ}$ C rispetto alla stanza senza isolamento in paglia.

La trasmittanza termica media della stanza 2 è diminuita dopo la collocazione dell'isolante da $1,44 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ a $0,72 \text{ W/m}^2 \text{ K}$. La diminuzione è significativa (riduzioni delle dispersioni del 50%) anche se non sono stati eliminati tutti i ponti termici e non si è riusciti a controllare la perfetta aderenza delle balle di paglia contro la chiusura verticale durante la costruzione. Confrontando i dati rilevati ottenuti con quelli calcolati dal programma Termolog Epix4 precedentemente, si riscontra una differenza tra i risultati. Secondo il programma la trasmittanza simulata della chiusura della stanza 1 sarebbe di $1,38 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ mentre quella misurata è di $1,44 \text{ W/m}^2 \text{ K}$. Questi dati sono molto simili come risultato a quelli calcolati nella ricerca TABULA⁷ (Corrado et al., 2011) e confermano che la chiusura verticale è in muratura portante. Per quanto riguarda la stanza 2 (stanza isolata), i risultati ottenuti sono molto diversi: secondo il programma la trasmittanza dovrebbe essere di $0,12 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ mentre quella misurata in opera è di $0,89 \text{ W/m}^2 \text{ K}$. Questa differenza può essere dovuta al valore di conducibilità scelto per la paglia ($0,045 \text{ W/mK}$) riscontrato in letteratura (Minke e Mahlke, 2005) e che forse non rappresenta quello reale della paglia oggetto di studio.

⁷Il progetto TABULA (Typology Approach for Building stock Energy Assessment), finanziato dal progetto europeo Intelligent Energy Europe, ha creato una struttura armonizzata delle tipologie edilizie europee, con particolare focus sugli edifici residenziali. Ogni tipologia edilizia è costituita da edifici-tipo con caratteristiche energetiche note in cui vengono esemplificati alcuni casi di potenziale risparmio energetico che si potrebbe raggiungere con interventi di riqualificazione sull'involucro in esame.

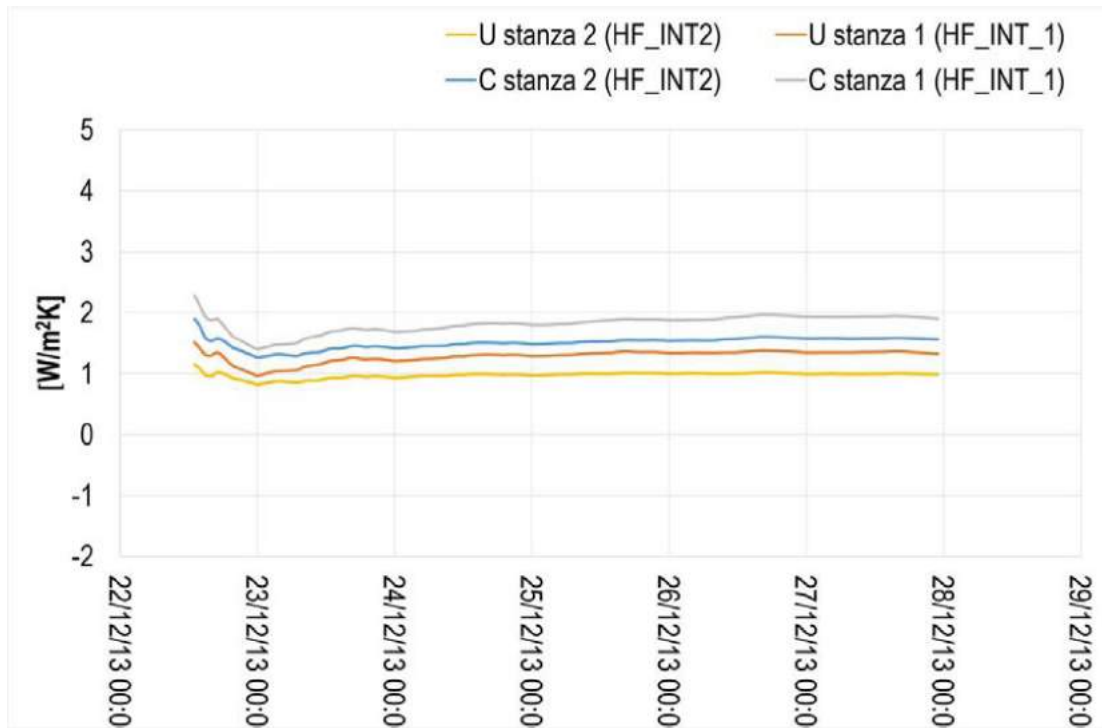


Figura 6.19: Grafico della conduttanza e trasmittanza nelle due camere prima dell'isolamento in paglia

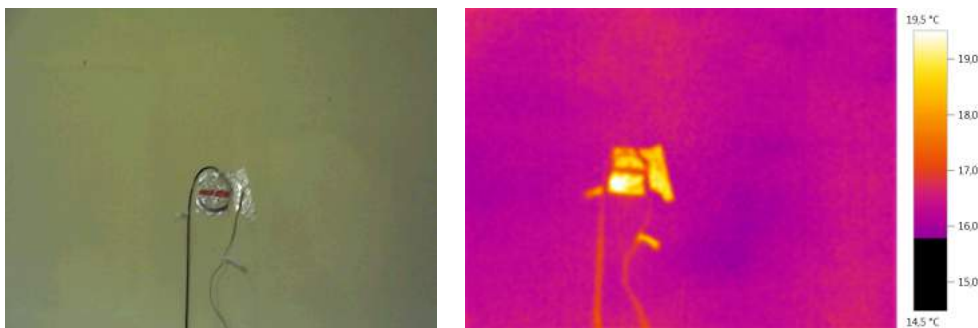


Figura 6.20: Termografia della stanza 1 (DENERG, 19 dicembre 2013)



Figura 6.21: Termografia della stanza 2 prima dell'isolamento in paglia (DENERG, 19 dicembre 2013)

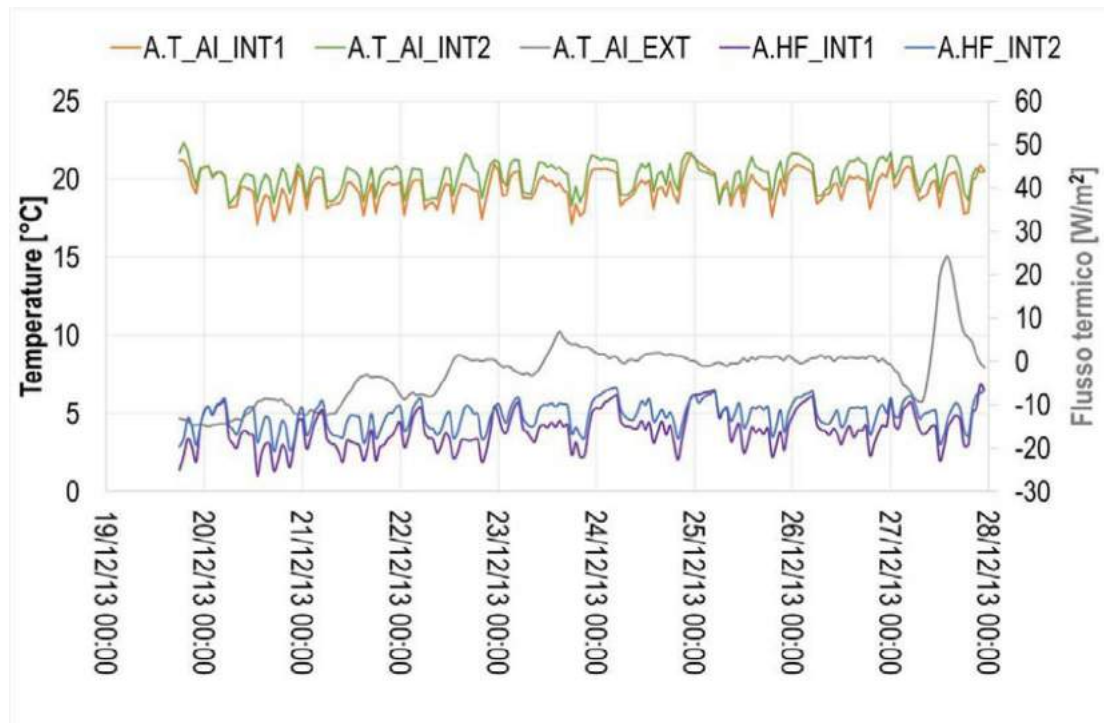


Figura 6.22: Temperatura esterna, temperature interne e flussi di calore registrati nei due ambienti prima dell'isolamento

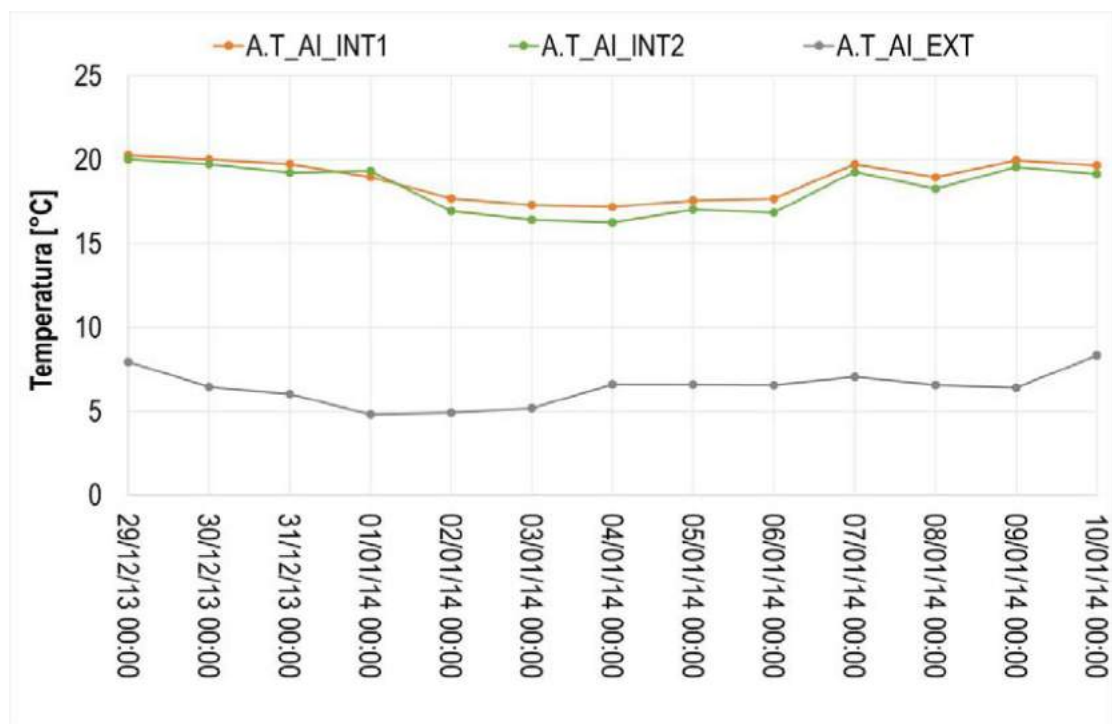


Figura 6.23: Condizioni al contorno dopo intervento di isolamento termico

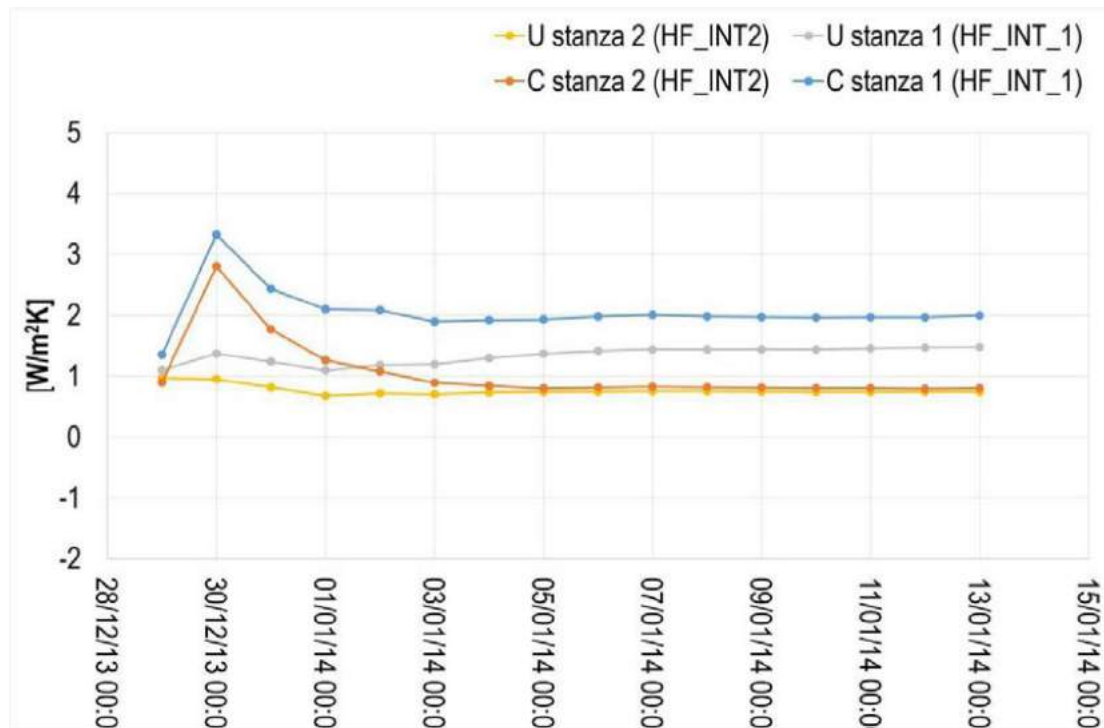


Figura 6.24: Trasmittanza e conduttanza dopo isolamento

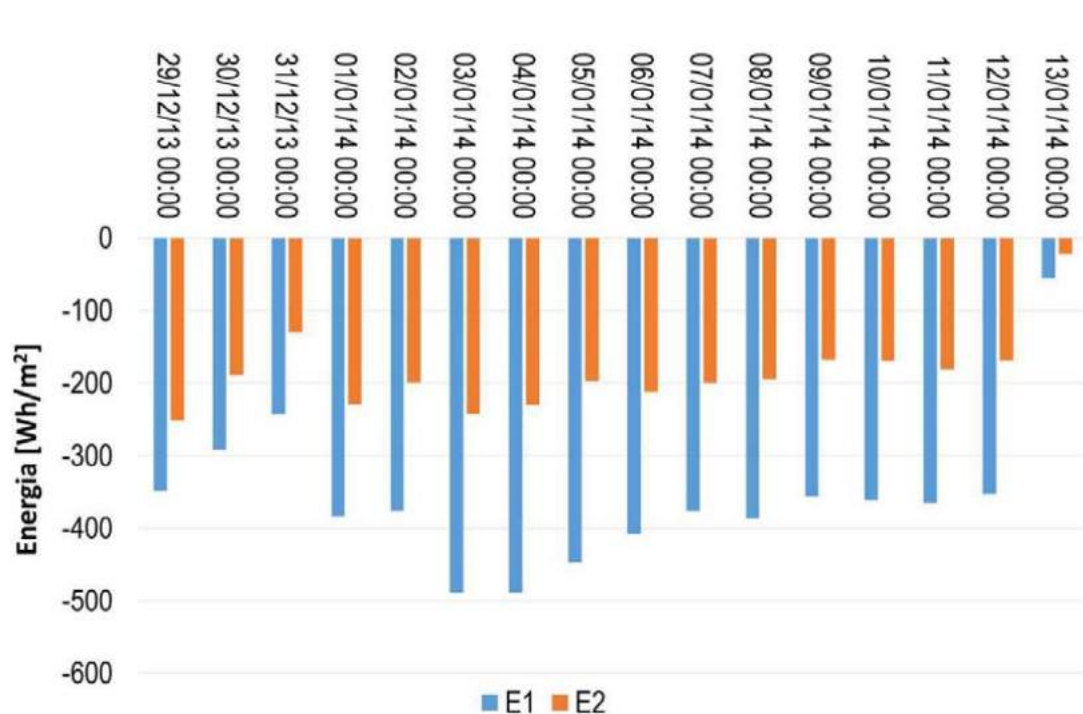


Figura 6.25: Energie disperse tra ambiente interno e ambiente esterno nel periodo monitorato

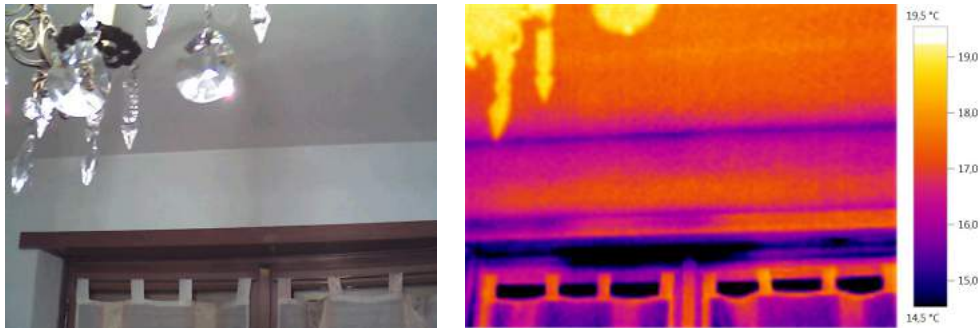


Figura 6.26: stanza 2 (prima della collocazione dell'isolamento): ponte termico in corrispondenza dell'attacco tra chiusura verticale e partizione orizzontale (DENERG, 20 dicembre 2013)

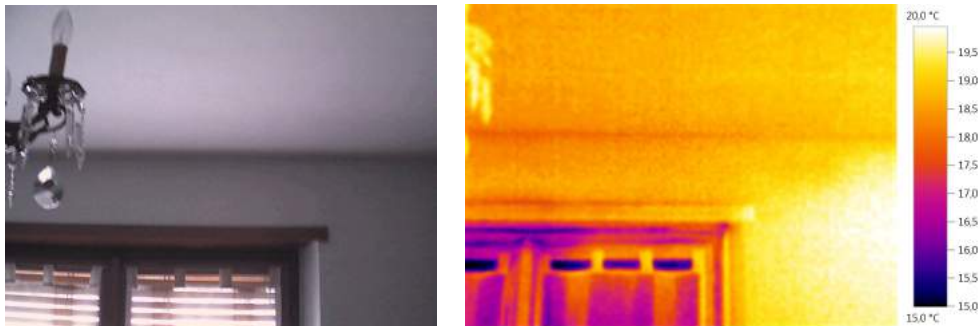


Figura 6.27: stanza 2 (dopo la collocazione dell'isolamento): scomparsa ponte termico e temperatura superficiale della chiusura verticale maggiore rispetto alla figura 1 (L. Bianco, 13 gennaio 2014)

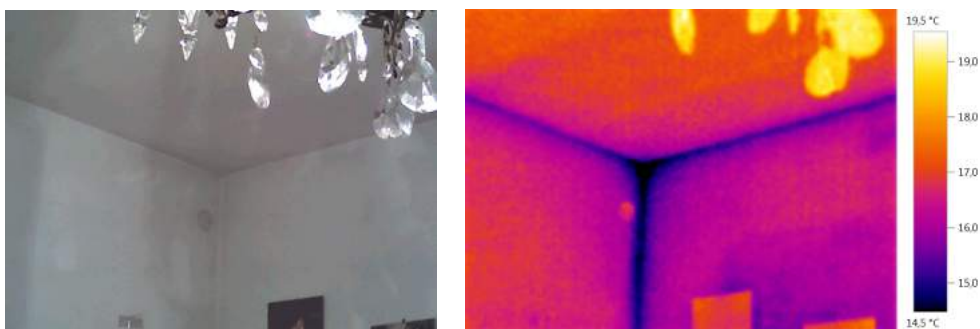


Figura 6.28: stanza 2 (prima della collocazione dell'isolamento): ponte termico in corrispondenza delle connessioni tra chiusura verticale e partizione orizzontale; tra partizione interna verticale e chiusura verticale e tra partizione interna verticale e partizione interna orizzontale (DENERG, 20 dicembre 2013)

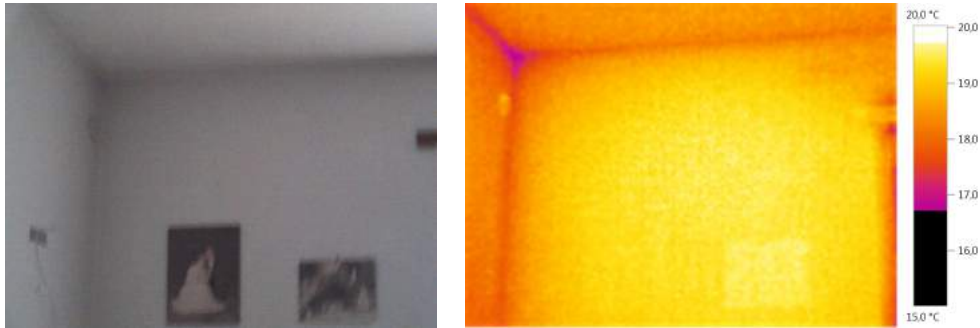


Figura 6.29: stanza 2 (dopo la collocazione dell'isolamento): attenuazione del ponte termico tra chiusura verticale e partizione interna orizzontale. Presenza di ponte termico nella zona non oggetto di isolamento tra partizione interna orizzontale e partizione interna verticale. Si rileva che la temperatura superficiale della chiusura interna è aumentata (L. Bianco, 13 gennaio 2014)

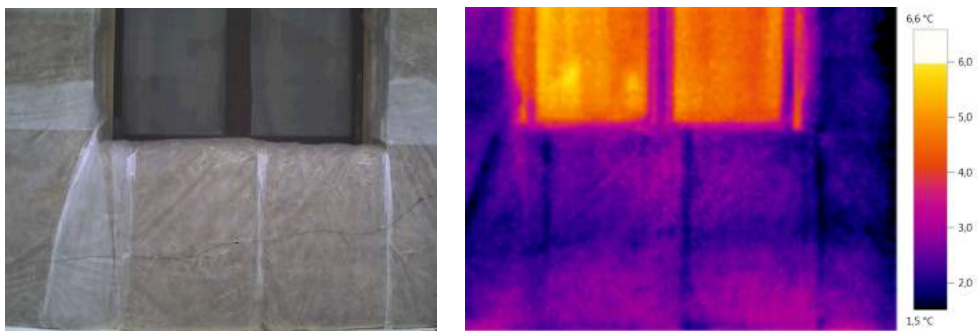


Figura 6.30: esterno stanza 2 (dopo la collocazione dell'isolamento): ponte termico in corrispondenza dell'apertura (L. Bianco, 13 gennaio 2014)



Figura 6.31: esterno stanza 2 (dopo la collocazione dell'isolamento): ponti termici costruttivi in corrispondenza dell'attacco tra chiusura verticale isolata e partizione esterna orizzontale e in prossimità dell'attacco tra isolante e apertura (L. Bianco, 13 gennaio 2014)

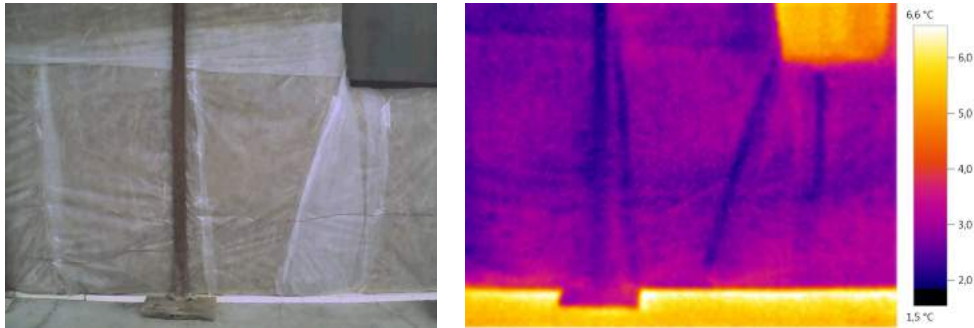


Figura 6.32: esterno stanza 2 (dopo la collocazione dell'isolamento): ponte termico costruttivo in corrispondenza dell'attacco tra chiusura verticale isolata e pavimentazione esterna (L. Bianco, 13 gennaio 2014)

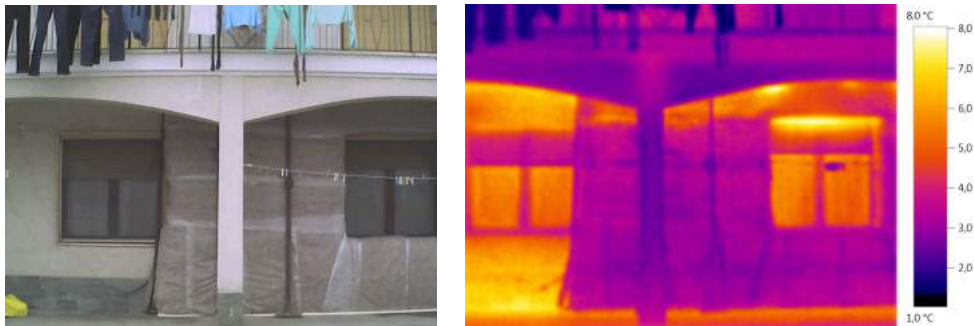


Figura 6.33: influenza dell'isolamento in paglia rispetto alla chiusura verticale esterna non isolata (L. Bianco, 13 gennaio 2014)

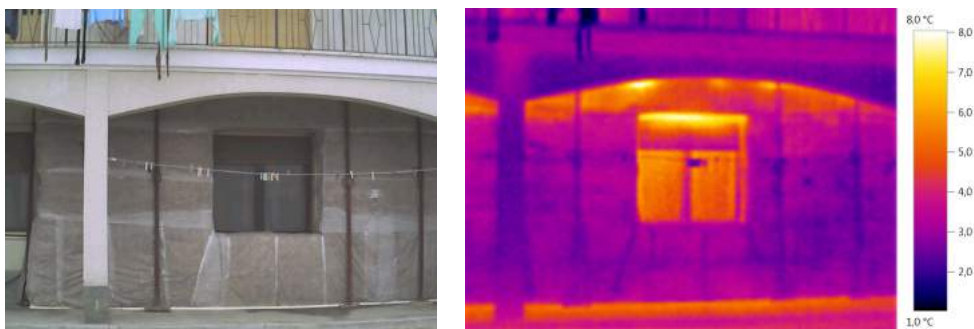


Figura 6.34: esterno stanza 2 (dopo la collocazione dell'isolamento): presenza di ponti termici nella parte superiore dell'isolamento (attacco tra chiusura verticale e partizione esterna orizzontale), nella parte inferiore (attacco chiusura verticale e pavimentazione esterna) e nella zona dell'apertura. Non si riscontrano ponti termici in prossimità dell'accostamento delle balle di paglia (L. Bianco, 13 gennaio 2014)

