



5 — L'umidità nell'isolamento in paglia

Durante un periodo di permanenza come visiting PhD student presso il Department of Architecture and Civil Engineering dell'University of Bath (UK), seguita dal prof. Peter Walker e dal dott. Andy Shea è stato possibile entrare in contatto con una realtà che fa ricerca con materiali naturali. La disponibilità e comunanza di interessi delle persone incontrate ha permesso la collaborazione al tema proposto per la mia ricerca di dottorato relativo allo studio dell'umidità dell'isolamento in paglia su edifici esistenti, applicando differenti conoscenze tecniche delle persone coinvolte¹ (tecnologia dell'architettura, fisica tecnica e fisica dei materiali). Presso questo dipartimento sono già stati realizzati in passato studi sulla paglia e sul comportamento dell'umidità in edifici di nuova costruzione realizzati in paglia (Lawrence *et al.*, 2009).

5.1 I casi studio

Analizzando le costruzioni esistenti italiane e inglesi si è ritrovata una comunanza nella composizione della stratigrafia della muratura. In questo studio, sono state prese in considerazione due chiusure verticali: una muratura a cassa vuota (cavity wall) con 5 cm di intercapedine d'aria ($U = 1,36 \text{ W/m}^2\text{K}$; spessore totale 29 cm) e una muratura in mattoni pieni (masonry wall) ($U = 1,12 \text{ W/m}^2\text{K}$; spessore totale 40 cm). Per quanto riguarda le caratteristiche degli altri strati che compongono la muratura si sono ipotizzati degli spessori considerando le dimensioni utilizzate durante la realizzazione in opera. Su questi due casi studio sono state applicate, usando una simulazione con il software WUFI Pro 5.2², dif-

¹Il dipartimento ha una forte prevalenza di ingegneri rispetto agli architetti. Il gruppo di ricerca in cui sono stata inserita era composto da un dottorando, Neal Holcroft, (fisico dei materiali interessato all'isolamento di edifici esistenti con materiali naturali); un post-doc, Mike Barclay, (ingegnere computazionale che si occupa di fisica dell'edificio) e il dott. Andy Shea (fisica tecnica).

²WUFI Pro è uno strumento per la valutazione igrotermica in una dimensione negli involucri edilizi. I metodi di calcolo precedenti (es. Glaser) considerano solo il rischio di formazione di condensa in condizioni stazionarie. Con questo metodo il trasporto di liquidi, gli effetti climatici (es. pioggia e radiazione solare) non vengono considerati. Wufi calcola il comportamento

ferenti stratigrafie di materiali naturali (350 mm di paglia, 200mm e 300 mm di calce canapa³) usati come isolamento dall'interno e dall'esterno. Gli spessori dello strato di isolante sono stati scelti in base al normale metodo di costruzione abitualmente usati per questi materiali (per la paglia lo spessore dipende dalle dimensioni della balla mentre per la calce canapa lo scopo è stato quello di testare differenti spessori che si avvicinassero alle dimensioni della paglia per un confronto tra i due materiali.

Nella tabelle 5.1 e 5.2, vengono rappresentate le tipologie delle diverse murature di studio con l'elencazione delle caratteristiche (componenti presenti nella muratura, spessore e relativa rappresentazione grafica). Le tipologie prese in considerazione sono state le seguenti:

- Cavity wall (muratura a cassa vuota)
- Cavity wall + HL 200 (muratura a cassa vuota con applicazione di 200 mm di calce canapa)
- Cavity wall + HL 300 (muratura a cassa vuota con applicazione di 300 mm di calce canapa)
- Cavity wall + SB (muratura a cassa vuota con applicazione di balle di paglia)
- Masonry wall (muratura in mattoni pieni)
- Masonry wall + HL 200 (muratura in mattoni pieni con applicazione di 200 mm di calce canapa)
- Masonry wall + HL 300 (muratura in mattoni pieni con applicazione di 300 mm di calce canapa)
- Masonry wall + SB (muratura in mattoni pieni con applicazione di balle di paglia)

igrotermico dinamico dei componenti di una costruzione con le condizioni reali.

³La calce canapa è un materiale isolante, traspirante e dal peso leggero prodotto dalla miscelazione di fibre di canapa con un legante a base di calce e acqua.

| tipologia di chiusura verticale | componenti | spessore (cm) | dettaglio |
|---------------------------------|---|------------------------------|-----------|
| cavity wall | (a) intonaco di calce-cemento (b) muratura in mattoni pieni (c) intercapedine d'aria | 29 | |
| cavity wall + HL 200 | (a) intonaco di calce-cemento (b) muratura in mattoni pieni (c) intercapedine d'aria (d) intonaco di calce (f) hemp-lime | 52 | |
| cavity wall + HL 300 | (a) intonaco di calce-cemento (b) muratura in mattoni pieni (c) intercapedine d'aria (d) intonaco di calce (f) hemp-lime | 62 | |
| cavity wall + SB | (a) intonaco di calce-cemento (b) muratura in mattoni pieni (c) intercapedine d'aria (d) intonaco di calce (e) balle di paglia (g) pannello in legno | 80 (esterno) 80 (interno) | |

Figura 5.1: Descrizione delle componenti delle murature di studio per una muratura cassa vuota

| tipologia di chiusura verticale | componenti | spessore (cm) | dettaglio |
|---------------------------------|---|------------------------------|-----------|
| masonry wall | (a) intonaco di calce-cemento (h) muratura in mattoni pieni | 29 | |
| masonry wall + HL 200 | (a) intonaco di calce-cemento (h) muratura in mattoni pieni (d) intonaco di calce (f) hemp-lime | 52 | |
| masonry wall + HL 300 | (a) intonaco di calce-cemento (h) muratura in mattoni pieni (d) intonaco di calce (f) hemp-lime | 62 | |
| masonry wall + SB | (a) intonaco di calce-cemento (h) muratura in mattoni pieni (c) intercapedine d'aria (d) intonaco di calce (e) balle di paglia (g) pannello in legno | 68 (esterno) 80 (interno) | |

Figura 5.2: Descrizione delle componenti delle murature di studio per una muratura portante

5.2 Caratteristiche fisiche delle murature di studio

Successivamente, utilizzando il software IES (Integrated Environmental Solutions)⁴ sono stati calcolati alcuni parametri della performance termica delle murature oggetto di studio applicati al modello già disponibile usato per il progetto della BaleHouse (tabella 5.1). Il primo parametro è rappresentato dalla *trasmissione termica* U (W/m^2K) che è comunemente usata per descrivere il flusso di calore che attraversa una superficie unitaria sottoposta a differenza di temperatura pari a $1^\circ C$ (UNI EN ISO 6946)⁵. Nella realtà un edificio non subisce un trasferimento di calore costante nel tempo perchè in una costruzione le oscillazioni delle temperature esterne causano l'oscillazione del flusso di calore. Per quanto riguarda questa osservazione, la *trasmissione termica periodica* o *Y value* (W/m^2K) può essere una migliore indicazione della performance termica dinamica perchè si assume un ciclo di 24 ore di riscaldamento e raffreddamento. Questo parametro rappresenta una misura di come il calore venga trasferito dalla superficie esterna alla superficie interna della muratura. La risposta dell'edificio alle differenze cicliche giornaliere delle temperature è collegata alla massa termica o inerzia termica della costruzione. I parametri che quantificano questo comportamento sono il *fattore di decremento* o *fattore di attenuazione* (f_a , adimensionato), che è il rapporto tra il modulo della trasmissione termica dinamica e la trasmissione termica periodica in condizioni stazionarie, e lo *sfasamento* (φ in ore) che rappresenta il ritardo temporale tra il massimo flusso termico entrante nell'ambiente interno e il massimo della temperatura dell'ambiente esterno.

| | abbreviazione del nome | spessore (mm) | U-value (W/m^2K) | Y-value (W/m^2K) | f_a (-) | sfasamento φ (h) |
|----------------------------------|---------------------------|------------------|-------------------------|-------------------------|--------------|-----------------------------|
| cavity wall | CW | 290 | 1.36 | 4.60 | 0.32 | 9 |
| cavity wall + HL 200mm isolante | CWHL200EX | 515 | 0.28 | 4.57 | 0.037 | 7 |
| | CWHL200IN | 510 | 0.29 | 2.77 | 0.052 | 7 |
| cavity wall + HL 300mm isolante | CWHL300EX | 615 | 0.21 | 4.58 | 0.015 | 12 |
| | CWHL300IN | 610 | 0.21 | 2.76 | 0.021 | 12 |
| cavity wall + SB isolante | CWSBEX | 680 | 0.13 | 4.57 | 0.007 | 4 |
| | CWSBIN | 800 | 0.12 | 3.95 | 0.007 | 6 |
| masonry wall | MW | 400 | 1.22 | 4.44 | 0.13 | 2 |
| masonry wall + HL 200mm isolante | MWHL200EX | 625 | 0.28 | 4.44 | 0.014 | 11 |
| | MWHL200IN | 620 | 0.28 | 2.77 | 0.019 | 11 |
| masonry wall + HL 300mm isolante | MWHL300EX | 725 | 0.20 | 4.44 | 0.006 | 4 |
| | MWHL300IN | 720 | 0.20 | 2.76 | 0.008 | 4 |
| masonry wall + SB isolante | MWSBEX | 790 | 0.13 | 4.44 | 0.003 | 8 |
| | MWSBIN | 910 | 0.12 | 3.95 | 0.007 | 6 |

Tabella 5.1: Proprietà termiche delle murature oggetto di studio

I singoli valori presenti nella tabella forniscono un'indicazione delle prestazioni termiche dinamiche, informazioni utili in fase di scelta di possibili soluzioni

⁴Software di modellazione usato nell'industria e nella ricerca per la simulazione della performance termica degli edifici.

⁵UNI EN ISO 6946 - Componenti ed elementi per l'edilizia. Resistenza termica e trasmissione termica. Metodo di calcolo

progettuali da impiegare durante un intervento di progettazione. A partire dagli anni '80 del Novecento, l'uso di strumenti di simulazione per il calcolo di energia impiegata negli edifici è stato utilizzato come potenziale per la riduzione dei consumi energetici. Comprendere l'intera performance dell'edificio è un compito molto complesso e con molti effetti di retroazione che influenzano i risultati. Le caratteristiche costruttive dell'edificio e le condizioni climatiche a cui è esposto interagiscono per determinare le prestazioni della costruzione e determinano le condizioni ambientali interne e il consumo di energia. La simulazione viene utilizzata per lo studio di possibili studi parametrici su soluzioni progettuali diverse riproducendo le condizioni necessarie attraverso il funzionamento dei fattori interessati. In questo studio, è stato utilizzato questo approccio basato sul confronto di chiusure verticali isolate con fibre naturali. Durante la simulazione, il modello utilizzato come caso studio non aveva riscaldamento, raffrescamento, apporti interni e la ventilazione è stata mantenuta costante a 1 -h per consentire di focalizzare l'attenzione solo sulla costruzione. I risultati ottenuti dal modello si sono concentrati sulla temperatura operativa.

5.3 Modellazione con WUFI

Per analizzare il comportamento dell'umidità all'interno dei casi studio è stato usato WUFI Pro 5.2, basato sul lavoro sviluppato da Kunzel⁶ riguardante la modellazione del trasporto del calore e dell'umidità. Questo software calcola in una dimensione contemporaneamente il calore e il trasporto di umidità dei vari strati che compongono la muratura, esposta a condizioni climatiche naturali esterne ed interne. Le proprietà del materiale usate per le simulazioni sono state prese dal database presente in WUFI, mentre i valori per la paglia e la calce canapa sono stati tratti dalla letteratura di settore e da test effettuati presso il laboratorio dell'università di Bath⁷.

| | SB (Schmidt) | HL (Evrard, 2009) | HL University of Bath |
|--|-----------------|----------------------|--------------------------|
| bulk density (kg/m ³) | 120 | 440 | 254.30 |
| porosity (m ³ /m ³) | 0.50 | 0.73 | 0.73 |
| specific heat capacity, dry (J/kg K) | 2000 | 1560 | 2000 |
| thermal conductivity, dry, 10 (W/mK) | 0.05 | 0.115 | 0.074 |
| water vapour diffusion resistance factor | 2 | 4.85 | 4.85 |

Tabella 5.2: Proprietà termiche delle murature oggetto di studio

5.3.1 La parete in muratura a cassa vuota isolata esternamente in paglia

È stata modellata la parete in muratura a cassa vuota (29 cm) a cui è stata aggiunto esternamente un cappotto in paglia di 35 cm più 4 cm di intonaco

⁶Tesi di dottorato riguardante *Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components. One- and twodimensional calculation using simple parameters* (Kunzel, 1995)

⁷I test effettuati presso il laboratorio sono stati utili per comprendere la porosità del materiale e il fattore di resistenza della diffusione al vapore per quanto riguarda l'calce canapa. Le prime fasi della preparazione di un provino di calce canapa sono state documentate e sono presenti nell'allegato *Preparazione campione per attività di laboratorio*.

Location: Torino; TBZ;

WUFI®

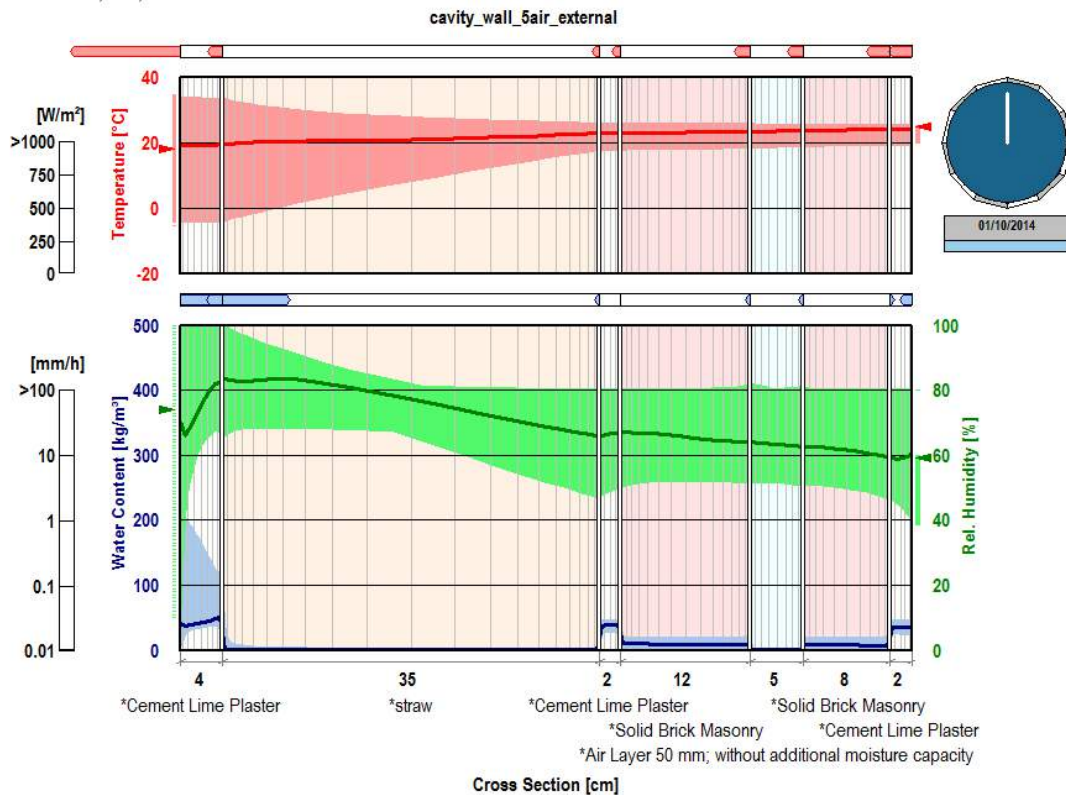


Figura 5.3: Andamento della temperatura, dell'umidità relativa e del contenuto di acqua negli strati della parete oggetto di studio per il periodo di calcolo con il software WUFI

in calce. Lo spessore totale della parete isolata risulta di 68 cm. Per il calcolo sono stati scelti alcuni parametri: esposizione della parete a sud, condizioni al contorno per la superficie esterna sono state scelte quelle riferite alla località di Torino mentre per le condizioni climatiche interne sono stati selezionati i dati della EN 15026⁸.

La modellazione è stata calcolata per tre anni a partire dal 01/10/2013 con termine il 01/10/2016. Analizzando i risultati si è riscontrato che il contenuto totale di acqua nell'intera parete isolata in paglia all'inizio della modellazione è di 7.53 kg/m², dopo tre anni è di 5.15 kg/m². Sono stati anche valutati i picchi minimi e massimi pari a 4.10 kg/m² e 9.31 kg/m².

Analizzando invece il contenuto di acqua nello strato di isolamento in paglia i dati sono i seguenti: all'inizio della modellazione 0.94 kg/m³, alla fine della modellazione 0.82 kg/m³ con valori minimi di 0.51 kg/m³ e massimi di 1.46 kg/m³.

5.3.2 Altre tipologie di parete isolate con paglia e calce canapa

Con la stessa procedura appena descritta al punto precedente sono state modellate altre pareti isolate esternamente e internamente sia in paglia che

⁸EN 15026 Prestazione termo igrometrica dei componenti e degli elementi di edificio - Valutazione del trasferimento di umidità mediante una simulazione numerica

con la calce canapa.

Di seguito vengono riportati i risultati ottenuti dopo la simulazione con il programma WUFI per le altre tipologie di parete oggetto di studio.

| | parete | | strato isolamento | |
|-----------|--|--|--|--|
| | quantità totale di acqua (inizio simulazione) (kg/m ²) | quantità totale di acqua (fine simulazione) (kg/m ²) | quantità totale di acqua (inizio simulazione) (kg/m ³) | quantità totale di acqua (fine simulazione) (kg/m ³) |
| CWHL200EX | 12,75 | 9,26 | 33 | 28,08 |
| CWHL200IN | 12,75 | 13,15 | 33 | 28,82 |
| CWHL300EX | 16,05 | 12,04 | 33 | 28,99 |
| CWHL300IN | 16,05 | 16,43 | 33 | 29,15 |
| CWSBEX | 7,53 | 5,15 | 0,94 | 0,82 |
| CWSBIN | 9,33 | 10,63 | 0,94 | 0,53 |
| MWHL200EX | 10,17 | 9,51 | 33 | 32,68 |
| MWHL200IN | 10,17 | 8,87 | 33 | 28,84 |
| MWHL300EX | 13,47 | 12,78 | 33 | 32,71 |
| MWHL300IN | 13,47 | 12,13 | 33 | 29,67 |
| MWSBEX | 4,57 | 4,07 | 0,94 | 0,94 |
| MWSBIN | 6,56 | 5,94 | 0,94 | 0,55 |

Come si evince dai risultati presenti nella tabella, l'isolamento in paglia rispetto alla calce canapa ha un contenuto minore di acqua sia per quanto riguarda la simulazione dell'intera parete isolata che per quanto riguarda il singolo strato di isolamento. Questo può essere dovuto alla sua realizzazione poiché viene utilizzato un legante a base di calce e acqua per la miscelazione delle fibre di canapa durante la messa in opera (realizzazione umida rispetto alla paglia che risulta a secco per quanto riguarda il materiale componente).

Confrontando la stessa tipologia di parete (cavity wall), a parità circa di spessore (es. CWHL300EX e CWSBEX) la parete isolata esternamente con paglia risulta avere, a fine simulazione, poco più della metà del contenuto di acqua rispetto alla calce canapa. Se invece si confronta il singolo strato isolante, la paglia ha un contenuto di acqua 35 volte minore che sale a 55 nel caso di isolamento interno della stessa parete.

5.4 Calcolo del Moisture Buffer Value (MBV)

Per ottenere un dato più realistico della presenza di umidità all'interno delle murature oggetto di studio è stato calcolato il Moisture Buffer Value (MBV). Questo valore indica la quantità di umidità che viene assorbita o rilasciata da un materiale quando è esposto a variazioni giornaliere dell'umidità relative tra due livelli dati e viene riportato come area di superficie aperta per % di variazione di umidità relativa. L'unità di misura è kg/(m² % RH). (Rode et al, 2005)

Il MBV viene calcolato usando lo standard Nordtest (Nordic, 2005) che testa differenti esposizioni climatiche (8 ore con alto contenuto di umidità e 16 ore con basso livello di umidità) per riprodurre il ciclo giornaliero che avviene nell'edificio. Due differenti valori di umidità relativa sono stati applicati a temperatura costante di 20° C: 75% per il periodo con alta umidità e 33% per il periodo con bassa umidità.

I coefficienti utilizzati durante il calcolo per la resistenza termica superficiale sono stati 0.04 m²W/K (superficie esterna) e 0.13 m²W/K (superficie interna). Per

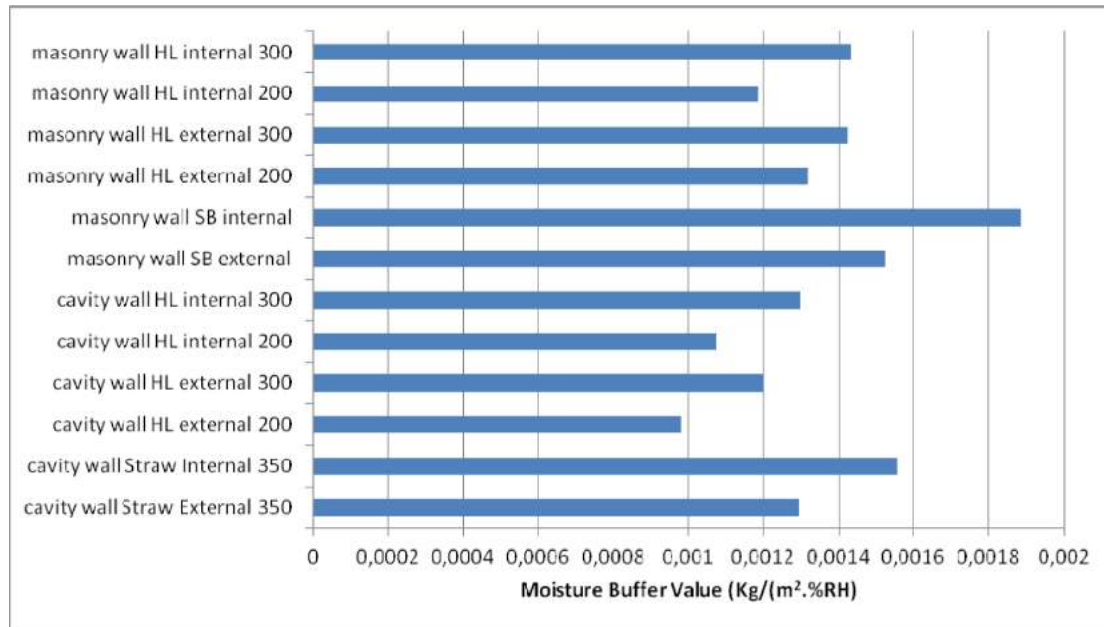


Figura 5.4: Moisture Buffer Value calcolato a temperatura costante per 16 ore a bassa umidità relativa (33%) e 8 ore ad alta umidità relativa (75%)

la modellazione, come clima esterno è stato scelto Torino presente nel database WUFI, mentre per il clima interno è stato utilizzato il file meteo per un ciclo di un anno di umidità relativa a temperatura costante.

Sulla superficie esterna di ogni caso studio è stato applicato un foglio di alluminio per creare un sistema sigillante con un'igroscopicità trascurabile. I risultati dopo la modellazione confermano che solo un caso rientra nell'intervallo tra 0.005 – 0.010 Kg/m² %RH mentre per gli altri casi i valori variano tra 0.010 – 0.019 Kg/m² %RH.

5.5 Calcolo della trasmittanza termica transitoria (transient U-value) con WUFI

Per calcolare la trasmittanza termica transitoria mensile è stata utilizzata un'applicazione di post elaborazione presente nel software WUFI. I risultati vengono riportati per ogni mese, eccetto per il periodo estivo perchè vengono disabilitati per default. Il motivo sta nel fatto che in questo periodo il flusso interno cambia due volte al giorno e può portare a valori negativi di trasmittanza.

Il software calcola la trasmittanza termica transitoria secondo questa formula (WUFI, 2009):

$$R = \frac{\Delta T_s}{(-Q)}$$

dove:

ΔT_s (K) rappresenta il valore medio mensile della differenza di temperatura tra la superficie interna ed esterna

$(-Q)$ (W/m) è il valore medio del flusso di calore attraverso la superficie interna

Durante questa analisi solo due tipologie di murature sono state comparate per la similitudine di spessore: la muratura a cassa vuota isolata con 300 mm di calce canapa e la muratura a cassa vuota isolata in paglia. Per entrambe è stato considerato il caso di collocazione dell'isolamento dall'interno e dall'esterno e il periodo di calcolo è stato pari a 3 anni utilizzando il file meteo di Torino.

Per quanto riguarda l'isolamento di una muratura a cassa vuota (cavity wall) e in muratura piena (masonry wall) si nota che la paglia ha una trasmittanza termica transitoria minore rispetto alla calce canapa. Analizzando l'andamento delle curve si rileva che subiscono una traslazione in base al materiale utilizzato (sia confrontando le curve dell'isolamento interno che dell'isolamento esterno). L'andamento delle curve dell'isolamento interno nel periodo da Novembre ad Aprile decrescono maggiormente rispetto all'isolamento esterno confermando il minore passaggio di calore rispetto alla sua collocazione all'esterno.

I valori di trasmittanza termica transitoria risultano avere una dilatazione nell'andamento delle curve del caso della muratura piena. Ad esempio confrontando i dati del secondo anno (periodo ottobre – maggio) per un isolamento in paglia esterno si ottengono i seguenti risultati: da 0.09 W/m²K a 0.19 W/m²K per una muratura piena e da 0.12 W/m²K a 0.16 W/m²K per una muratura a cassa vuota.

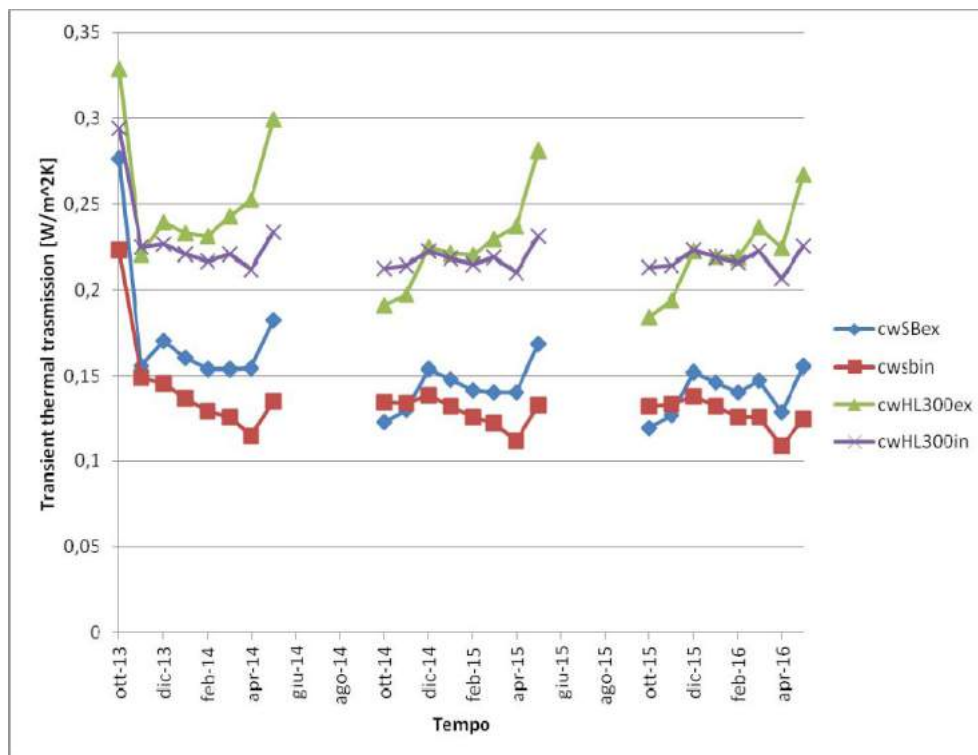


Figura 5.5: Trasmittanza termica transitoria calcolata con WUFI per un periodo di 3 anni in un muro a cassa vuota

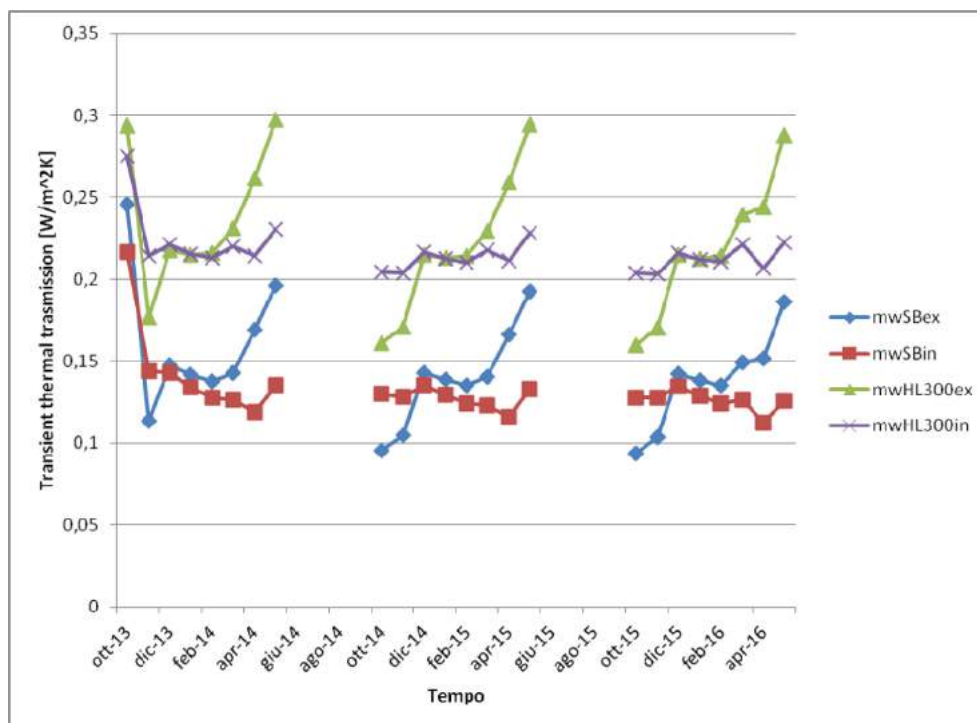


Figura 5.6: Trasmittanza termica transitoria calcolata con WUFI per un periodo di 3 anni in un muro di muratura piena

