



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile

**Pareti isolanti innovative in paglia ad alta traspirabilità: prove
sperimentali in laboratorio ed in situ e applicazione di modelli
previsionali**

**Innovative highly breathable straw insulating walls: laboratory and in-
situ experimental tests and application of predictive models**

Relatrice:

Prof.ssa **Francesca Stazi**

Correlatori:

Prof. **Costanzo Di Perna**

Prof.ssa **Chiara Giosuè**

Tesi di Laurea di:

Martina Ferraro

Anno accademico 2025/2026

Indice

1. Introduzione.....	4
2. Stato dell'arte.....	5
2.1 Sintesi dei principali risultati presenti in letteratura	9
3. Obiettivi dello studio	11
4. Caso di studio	13
4.1 Materiale oggetto di caratterizzazione sperimentale	13
4.2 Definizione della stratigrafia di riferimento	16
5. Metodi sperimentali.....	24
5.1 Prova di conducibilità termica.....	24
5.2 Prova di permeabilità al vapore d'acqua	28
5.3 Isotherme di adsorbimento	35
6. Metodi analitici	38
6.1 Modellazione con software PAN	38
6.2 Modellazione con software WUFI.....	45
6.2.1 Ulteriori stratigrafie analizzate con software WUFI.....	51
6.3 Proprietà dei materiali utilizzate nella modellazione numerica.....	54
7. Risultati sperimentali	55
7.1 Risultati prova di conducibilità termica.....	55
7.2 Risultati prova di permeabilità al vapore d'acqua	57
7.3 Risultati prova isoterme di adsorbimento	61
8. Risultati analitici	63
8.1 Risultati modellazione con software PAN	63
8.2 Risultati modellazione con software WUFI.....	68
8.2.1 Risultati ulteriori stratigrafie analizzate con software WUFI.....	79
9. Discussione dei risultati	101
10. Conclusioni	113
Bibliografia	115
Allegati – schede tecniche dei materiali	116

1. Introduzione

Negli ultimi decenni il settore delle costruzioni è stato chiamato a confrontarsi con sfide sempre più rilevanti legate alla sostenibilità ambientale, alla riduzione dei consumi energetici e alla diminuzione delle emissioni di gas climalteranti associate all'intero ciclo di vita degli edifici. In questo contesto, l'impiego dei materiali naturali rappresenta una delle strategie più promettenti per ridurre l'impatto ambientale del settore edilizio e favorire la transizione verso modelli costruttivi più sostenibili.

Tra i materiali bio-based che hanno suscitato maggiore interesse negli ultimi anni vi è la paglia, un sottoprodotto agricolo ampiamente disponibile e caratterizzato da un ridotto contenuto energetico incorporato. Oltre alla sua abbondanza e reperibilità, la paglia presenta proprietà che la rendono particolarmente interessante per applicazioni nell'involucro edilizio, tra cui una bassa conducibilità termica, una limitata resistenza alla diffusione del vapore acqueo e una significativa capacità di interagire con l'umidità ambientale. Tali caratteristiche possono contribuire non solo alla riduzione dei fabbisogni energetici degli edifici, ma anche al miglioramento del comfort interno e alla regolazione igrometrica degli ambienti.

Nonostante il crescente interesse verso questo materiale, la conoscenza del suo comportamento in esercizio risulta ancora limitata rispetto a quella disponibile per i materiali isolanti convenzionali. Ciò rende complessa la definizione di parametri di riferimento affidabili e limita la possibilità di prevedere con accuratezza il comportamento termoigrometrico delle strutture che utilizzano tale materiale.

Alla luce di queste considerazioni emerge la necessità di approfondire la conoscenza delle proprietà della paglia e del comportamento delle stratigrafie che la impiegano come materiale isolante, al fine di supportarne una diffusione consapevole nell'ambito delle costruzioni sostenibili.

2. Stato dell'arte

Negli ultimi anni numerosi studi hanno approfondito il comportamento termoigrometrico dei materiali bio-based destinati all'impiego nell'involucro edilizio, con particolare attenzione alle proprietà di adsorbimento dell'umidità, alla permeabilità al vapore acqueo, alle prestazioni termiche e alla durabilità in esercizio. Tra questi risultano particolarmente significativi gli studi di Ismail et al., Zhou et al., Múnera e Gosselin e Chen et al., che hanno analizzato differenti materiali e configurazioni costruttive realizzate con la paglia.

Ismail et al. hanno studiato il comportamento igrico di tre differenti pannelli compositi bio-based realizzati con paglia di cereali e differenti tipologie di legante. In particolare, il primo materiale era costituito da paglia, calce, emoglobina e caseina (LHC), il secondo da paglia, calce e gelatina (LGB), mentre il terzo era composta da paglia, gesso e galatina (GGB). La presenza di calce nei primi due pannelli compositi risulta particolarmente interessante in quanto permette di valutare l'influenza di un legante comunemente utilizzato nelle costruzioni naturali sul comportamento igroscopico del materiale.

Per la caratterizzazione igrometrica dei materiali gli autori hanno determinato le isoterme di adsorbimento-desorbimento a differenti livelli di umidità relativa. I risultati hanno evidenziato che, per i pannelli compositi a base di calce, il contenuto d'acqua aumenta in modo quasi lineare fino a circa l'80% di umidità relativa, per poi crescere rapidamente alle umidità più elevate. Per il campione LHC il contenuto d'acqua ha raggiunto valori prossimi al 20%, mentre per il campione LGB si è attestato intorno al 16%. Durante il processo di desorbimento è stata osservata una marcata isteresi tra le curve di adsorbimento e desorbimento, attribuita sia alla presenza di pori di tipo "ink bottle" sia ai fenomeni di carbonatazione ancora in corso della matrice a base di calce. Il campione a base di gesso ha invece mostrato un comportamento più lineare e una isteresi significativamente inferiore. Gli autori hanno inoltre confrontato le curve ottenute con quelle di altri materiali vegetali riportati in letteratura, evidenziando come l'andamento generale delle isoterme risulti simile per la maggior parte dei materiali bio-based. Tuttavia, i campioni a base di calce hanno mostrato fenomeni di isteresi più pronunciati rispetto ad altri materiali vegetali, confermando l'importanza della tipologia del legante nel determinare il comportamento igroscopico del materiale.

Un ulteriore aspetto analizzato riguarda la permeabilità al vapore acqueo. Le prove, eseguite mediante il metodo della tazza previsto dalla norma EN ISO 12572, hanno mostrato valori

molto simili per i tre pannelli studiati, indipendentemente dal tipo di legante utilizzato. La permeabilità al vapore è risultata dell'ordine di $4,3 \cdot 10^{-11} \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$, mentre il fattore di resistenza alla diffusione del vapore μ è risultato compreso tra circa 8 e 10. Gli autori concludono che i materiali bio-based consentono un rapido passaggio del vapore acqueo, riducendo il rischio di condensazione e favorendo l'asciugatura delle strutture edilizie.

Un contributo importante allo studio dei materiali isolanti bio-based è fornito da Zhou et al., che hanno sviluppato compositi isolanti completamente bio-based realizzati con fibre di paglia di riso e leganti naturali quali alginato di sodio e chitosano. Lo studio aveva l'obiettivo di valutare l'influenza della tipologia di legante, della dimensione delle fibre e del rapporto fibra-legante sulle proprietà termoigrometriche e sulla durabilità dei materiali. I risultati relativi alla conducibilità termica hanno evidenziato che tutti i compositi sviluppati possono essere classificati come materiali isolanti, presentando valori compresi tra 0,038 e 0,047 W/mK. Tali prestazioni risultano comparabili sia con quelle di altri materiali isolanti bio-based presenti sul mercato, come gli isolanti in canapa, sia con quelle di materiali isolanti tradizionali quali il polistirene espanso e la lana di roccia. Gli autori hanno inoltre osservato che la conducibilità termica aumenta all'aumentare della quantità di legante e al diminuire della dimensione delle fibre, a causa della progressiva riduzione della porosità del materiale. Dal punto di vista igrotermico, i campioni a base di alginato hanno mostrato una maggiore capacità di accumulo dell'umidità rispetto a quelli realizzati con chitosano. In corrispondenza dell'85% di umidità relativa, il contenuto d'acqua dei campioni con alginato supera il 30%, mentre quello dei campioni con chitosano rimane inferiore al 20%. Anche in questo caso le isoterme hanno mostrato il tipico comportamento dei materiali vegetali porosi, caratterizzato da un forte incremento del contenuto d'acqua alle elevate umidità relative e dalla presenza di isteresi tra adsorbimento e desorbimento.

Particolare attenzione è stata dedicata alla durabilità biologica dei materiali. I campioni sono stati sottoposti a condizioni ambientali severe, caratterizzate da temperatura costante di 20 °C e da umidità relativa pari al 93% e 97%. I risultati hanno evidenziato una significativa influenza della tipologia di legante sul comportamento biologico del materiale. Le prime colonie fungine sono infatti comparse sui campioni contenenti alginato dopo circa tre-quattro settimane di esposizione, mentre nei campioni contenenti chitosano la comparsa delle muffe è stata osservata soltanto dopo otto-nove settimane. Inoltre, nei campioni a base di alginato è stata osservata una maggiore varietà di colonie fungine, suggerendo una minore

resistenza al degrado biologico. Gli autori attribuiscono tale comportamento alla maggiore capacità di assorbimento e accumulo dell'umidità dei compositi a base di alginato.

Un ulteriore contributo significativo allo studio delle prestazioni igrotermiche degli isolanti vegetali è rappresentato dai lavori di Juan Camilo Castañeda Múnera e Louis Gosselin, che hanno analizzato sperimentalmente il comportamento della paglia d'orzo compattata destinata all'impiego come materiale isolante per l'involucro edilizio. Gli autori hanno approfondito l'influenza della densità, della dimensione delle fibre e delle condizioni ambientali sulle principali proprietà termoigrometriche del materiale, con particolare riferimento alla conducibilità termica, alla permeabilità al vapore acqueo, alle isoterme di adsorbimento-desorbimento e alla capacità di regolazione dell'umidità. Per quanto riguarda le prestazioni termiche, i risultati hanno evidenziato valori di conducibilità termica compresi tra 0,0468 e 0,0799 W/mK. I valori più bassi sono stati registrati nei campioni secchi a minore densità, mentre l'aumento dell'umidità relativa ha determinato un incremento significativo della conducibilità termica. È stato inoltre osservato che la densità influisce sulla conducibilità termica, sebbene in misura inferiore rispetto all'umidità relativa.

L'analisi delle isoterme di adsorbimento e desorbimento ha mostrato il tipico comportamento dei materiali vegetali porosi. Le curve ottenute sono state classificate come isoterme di tipo II secondo la classificazione IUAPC e presentano una limitata isteresi tra adsorbimento e desorbimento. I risultati hanno evidenziato che alle basse umidità relative la densità del materiale influenza significativamente il contenuto d'acqua, mentre oltre il 60-70% di umidità relativa le differenze tendono a ridursi per effetto della condensazione capillare.

Gli autori hanno inoltre osservato che le fibre corte presentano una maggiore capacità di assorbimento dell'umidità rispetto alle fibre lunghe alle basse umidità relative. Per quanto riguarda il trasporto del vapore acqueo, la paglia d'orzo ha mostrato valori del fattore di resistenza alla diffusione del vapore μ compresi tra circa 3 e 14 in funzione della densità, della lunghezza delle fibre e delle condizioni ambientali considerate. Nel complesso, il materiale è stato classificato come altamente permeabile al vapore e caratterizzato da una buona capacità di asciugatura. Gli autori non hanno eseguito prove specifiche sulla crescita delle muffe, ma hanno evidenziato la necessità di approfondire gli aspetti legati alla proliferazione fungina e alla durabilità nel lungo periodo.

Un contributo complementare agli studi sperimentale sui materiali è stato infine fornito da Chen et al., che hanno analizzato il comportamento igrotermico di pareti isolate con balle di paglia mediante simulazioni numeriche eseguite col software WUFI Pro. Lo studio è stato sviluppato considerando il clima freddo e umido della città di Québec e confrontando differenti configurazioni di parete caratterizzate da diversi spessori di isolamento esterno in EPS e isolamento interno in balle di paglia.

In tutte le configurazioni analizzate è stata prevista una membrana traspirante di protezione dagli agenti atmosferici e dal vento (weather barrier), mentre il freno al vapore interno è stato adottato esclusivamente nella parete di riferimento con isolamento in fibra di vetro. L'assenza del freno al vapore nelle stratigrafie contenenti balle di paglia rispondeva all'obiettivo degli autori di valutare la possibilità di realizzare pareti ad elevata traspirabilità senza ricorrere a strati interni di controllo del vapore.

L'analisi del contenuto d'acqua di tali stratigrafie ha mostrato che alcune configurazioni raggiungono un equilibrio dinamico caratterizzato da cicli annuali di accumulo e asciugatura dell'umidità, mentre altre tendono ad accumulare progressivamente acqua nel tempo. In particolare, l'aumento dello spessore dell'isolamento esterno in EPS e la contestuale riduzione dello spessore delle balle di paglia hanno determinato una diminuzione del contenuto d'acqua e un miglioramento della capacità di asciugatura della parete. L'analisi dei profili igrotermici ha evidenziato come la zona più critica della stratigrafia fosse rappresentata dall'interfaccia tra il pannello di supporto e l'isolamento in paglia. In tale posizione sono stati registrati i valori più elevati di umidità relativa, con picchi prossimi al 100% nelle configurazioni meno performanti. Gli autori individuano pertanto questa interfaccia come il punto maggiormente soggetto al rischio di condensazione interstiziale. Particolare attenzione è stata dedicata anche al rischio di sviluppo di muffe mediante il modulo WUFI-Bio. I risultati hanno evidenziato che il rischio di crescita biologica diminuisce progressivamente all'aumentare dello spessore dell'isolamento esterno ed alla riduzione dello spessore della paglia. Soltanto una delle configurazioni analizzate soddisfaceva contemporaneamente i criteri relativi al tasso di crescita della muffa e all'indice di muffa.

Le simulazioni hanno mostrato che livelli elevati e persistenti di umidità all'interfaccia tra pannello di supporto e isolamento possono determinare condizioni favorevoli alla germinazione delle spore e allo sviluppo del micelio.

Nel complesso, gli studi analizzati evidenziano come le prestazioni delle strutture a base di paglia dipendano non soltanto dalle proprietà intrinseche del materiale, quali conducibilità termica, permeabilità al vapore e capacità di accumulo dell'umidità, ma anche dalla configurazione stratigrafica adottata e dalle condizioni ambientali di esercizio. La gestione dei fenomeni di trasporto dell'umidità e la prevenzione della crescita biologica rappresentano pertanto aspetti centrali nella progettazione di involucri edilizi realizzati con materiali naturali e altamente traspiranti.

2.1 Sintesi dei principali risultati presenti in letteratura

Nella seguente Tabella 2.1 sono sintetizzati i principali risultati emersi dagli studi analizzati, evidenziando le caratteristiche termoigrometriche dei materiali e gli aspetti maggiormente rilevanti ai fini della presente ricerca.

<u>Autori</u>	<u>Materiale utilizzato</u>	<u>λ [W/mK]</u>	<u>μ [-]</u>	<u>Prestazioni igrotermiche</u>	<u>Muffa</u>
Ismail et al.	Compositi a base di paglia con leganti a base di calce (calce-emoglobina-caseina e calce-gelatina) e gesso-gelatina	Non analizzata	Circa 8 - 10	Contenuto d'acqua in forte aumento oltre l'80% di UR (fino al 20% per il composito LCH). La presenza della calce influenza significativamente il comportamento igroscopico	Non analizzata
Chen et al.	Pareti a isolamento misto con balle di paglia, EPS, pannello di supporto (sheathing) e cartongesso interno	Non analizzata direttamente (simulazioni WUFI)	Non analizzato	Analisi numerica del comportamento igrotermico mediante WUFI. Individuata una zona critica all'interfaccia tra sheathing e isolamento in paglia, dove si registrano i massimi valori	Analisi mediante WUFI-Bio. Il rischio di muffa diminuisce all'aumentare dello spessore dell'EPS e alla riduzione dello spessore della paglia. Solo una delle configurazioni con paglia soddisfa i criteri relativi a tasso di

				di UR (fino a 99,5%)	crescita e indice di muffa
Zhou et al.	Compositi bio-based in paglia di riso con leganti naturali a base di alginato di sodio e chitosano	0,038-0,047	2,7-5,3	I compositi con alginato mostrano contenuti d'acqua superiori al 30% con UR dell'85%, mentre quelli con chitosano rimangono sotto il 20%. Il tipo di legante influenza fortemente la capacità di accumulo dell'umidità	Crescita biologica più rapida nei compositi con alginato. Prime muffe osservate dopo 3-4 settimane contro 8-9 settimane nei compositi con chitosano. La crescita aumenta sensibilmente passando da 93% e 97% UR
Múnera e Gosselin	Paglia d'orzo compattata (fibre lunghe e fibre corte, densità 100-120 kg/m ³)	0,0468 ÷ 0,0799 W/mK Valori che aumentano con la UR e, in misura minore, con la densità. A basse UR le fibre corte mostrano valori leggermente inferiori rispetto alle fibre lunghe	3,14 ÷ 14,20. Valore che aumenta all'aumentare della densità e risulta maggiore nei campioni con fibre lunghe.	A basse UR la densità influenza significativamente il contenuto d'acqua, mentre oltre il 60 - 70 % di UR le differenze tendono a ridursi per effetto della condensazione capillare. Le fibre corte mostrano un maggiore assorbimento di umidità alle basse UR	Non analizzata

3. Obiettivi dello studio

L'obiettivo principale del presente lavoro di ricerca è la caratterizzazione termoigrometrica della paglia come materiale isolante naturale e lo studio del suo comportamento all'interno di differenti configurazioni di parete ad elevata traspirabilità, mediante un approccio integrato basato su prove sperimentali di laboratorio e simulazioni numeriche.

L'interesse verso la paglia come materiale da costruzione deriva dalle sue caratteristiche di sostenibilità ambientale, dalla disponibilità della materia prima e dalle potenziali prestazioni energetiche e igrotermiche che essa può offrire all'interno dell'involucro edilizio. Sebbene negli ultimi anni siano stati pubblicati numerosi studi sui materiali isolanti a base di paglia, permane una significativa carenza di dati sperimentali completi e condivisi relativi alle proprietà termoigrometriche del materiale. Inoltre, i valori disponibili in letteratura presentano spesso una notevole variabilità, dovuta alle differenti tipologie di paglia analizzate, alle diverse densità, ai processi di lavorazione e alle metodologie di prova adottate. Di conseguenza, la caratterizzazione della paglia risulta ancora oggi uno degli aspetti maggiormente critici per la corretta modellazione del suo comportamento igrotermico e per la valutazione delle sue prestazioni in opera.

Per tale motivo, parte dello studio è stato dedicato alla determinazione sperimentale di alcune proprietà fondamentali del materiale, quali la conducibilità termica, la permeabilità al vapore acqueo e le isoterme di adsorbimento, indispensabili per descrivere i fenomeni di trasporto di calore e dell'umidità all'interno della parete. I risultati ottenuti sono stati confrontati con i dati presenti in letteratura al fine di valutarne la coerenza e l'applicabilità ai modelli di calcolo.

Successivamente, tali proprietà sono state utilizzate come dati di input per le simulazioni igrotermiche condotte mediante i software PAN e WUFI, con l'obiettivo di analizzare il comportamento della stratigrafia di riferimento nel corso di due anni di simulazione e di valutare l'influenza delle diverse soluzioni costruttive sulla distribuzione dell'umidità e sul comportamento igrotermico complessivo della parete, al fine di individuare eventuali strategie di ottimizzazione delle prestazioni. Particolare attenzione è stata rivolta all'individuazione delle zone più critiche della parete e all'influenza esercitata dalle condizioni al contorno e dalle caratteristiche dei materiali che compongono la stratigrafia.

Tra le diverse configurazioni analizzate è stata definita una stratigrafia di riferimento destinata alla realizzazione in opera presso la test room sperimentale, sulla quale proseguiranno le successive attività di monitoraggio e validazione dei modelli numerici sviluppati nell'ambito della ricerca. Le simulazioni numeriche hanno inoltre consentito di individuare, tra le configurazioni investigate, una soluzione caratterizzata da prestazioni igrotermiche migliorative rispetto alla stratigrafia di riferimento, la cui realizzazione e il cui monitoraggio costituiranno una fase successiva del programma di ricerca, permettendo il confronto diretto tra le due configurazioni in condizioni reali di esercizio.

L'obiettivo è quindi quello di approfondire la conoscenza delle proprietà del materiale e valutare il comportamento delle stratigrafie in condizioni realistiche di esercizio, fornendo indicazioni utili per il loro impiego nell'edilizia sostenibile.

4. Caso di studio

Nel presente capitolo viene descritto il caso studio oggetto della ricerca. La paglia rappresenta il materiale principale oggetto della caratterizzazione sperimentale e su di essa sono state eseguite prove di conducibilità termica, permeabilità al vapore d'acqua e determinazione delle isoterme di adsorbimento. I risultati ottenuti sono stati successivamente utilizzati come dati di input per le modellazioni numeriche effettuate mediante software PAN e WUFI.

Le simulazioni sono state sviluppate per prevedere il comportamento termoigrometrico della parete in esercizio, che verrà installata all'interno di una test room sperimentale situata nel comune di Ancona. Attraverso il monitoraggio delle temperature superficiali, delle temperature all'interno della stratigrafia e delle condizioni igrotermiche interne ed esterne sarà possibile valutare il comportamento della parete in condizioni reali e l'efficacia della paglia come materiale isolante.

Nel seguito vengono descritti il materiale oggetto di studio, la stratigrafia della parete e il sistema di monitoraggio previsto.

4.1 Materiale oggetto di caratterizzazione sperimentale

Il materiale oggetto della caratterizzazione sperimentale è un pannello isolante in paglia prodotto dall'azienda EAP Thermus. Il pannello è costituito esclusivamente da paglia compressa, contenuta mediante un sistema di cucitura realizzato con filo di cotone, che consente di garantire la stabilità geometrica del prodotto senza l'impiego di collanti o leganti sintetici.

La materia prima utilizzata deriva da sottoprodotti dell'industria alimentare ed è ampiamente disponibile sul territorio europeo. Grazie alla limitata trasformazione richiesta durante il processo produttivo ed all'impiego di una risorsa rinnovabile, il materiale presenta un ridotto impatto ambientale rispetto a molti materiali isolanti tradizionali.



Figura 4.1 - Campioni in paglia

Dal punto di vista prestazionale, la struttura fibrosa e porosa della paglia conferisce al pannello buone proprietà di isolamento termico ed elevata permeabilità al vapore, caratteristiche che lo rendono particolarmente adatto alla realizzazione di stratigrafie traspiranti. Il produttore ne prevede l'impiego per l'isolamento di pareti esterne ed interne, coperture e solai. Per favorire l'applicazione degli strati di finitura, un lato del pannello è dotato di una rete portaintonaco preinstallata.

Secondo i dati dichiarati dal produttore, il materiale presenta:

- conducibilità termica pari a 0,041 W/mK.
- Densità compresa tra 70 e 80 kg/m³.
- Resistenza alla compressione variabile tra 25 e 38 kPa.
- Resistenza alla flessione pari a 0,5 kPa.
- Coefficiente di resistenza alla diffusione del vapore pari a 4,4.

- Potere fonoisolante di 43 dB.

4.1.1 Campioni utilizzati nelle prove di laboratorio

Per la caratterizzazione sperimentale del materiale sono stati utilizzati otto campioni di paglia forniti direttamente dall'azienda produttrice. I campioni sono stati consegnati già pronti per l'esecuzione delle prove e non hanno richiesto particolari operazioni di preparazione preliminare, ad eccezione delle attività necessarie all'allestimento dei portacampioni per la prova di permeabilità al vapore, descritte nel Capitolo 5.

Su ciascun campione sono state effettuate misure geometriche finalizzate alla determinazione dello spessore medio e della densità apparente. Lo spessore è stato determinato mediante dodici misurazioni, effettuate con tre rilevazioni per ciascuno dei quattro lati del pannello, in modo da ottenere una stima rappresentativa dello spessore medio, considerando che il pannello non presenta una planarità perfetta, mentre la densità è stata calcolata a partire dal peso e dal volume di ciascun campione.

I campioni presentano uno spessore medio compreso tra 7,02 cm e 7,52 cm e una densità variabile tra 74,12 kg/m³ e 85,57 kg/m³. Tali valori risultano coerenti con quelli dichiarati dal produttore per il materiale oggetto di studio.

I campioni sono stati identificati mediante la sigla C1-C8 e successivamente assegnati alle diverse campagne sperimentali. In particolare, i campioni C3, C5 e C6 sono stati utilizzati per la determinazione della conducibilità termica, i campioni C1, C4 e C7 per la prova di permeabilità al vapore d'acqua e i campioni C2, C3, C5, C6 e C8 per la determinazione delle isoterme di adsorbimento.

CAMPIONE	SPESSORE CAMPIONE [cm] (3 misurazioni per lato)											
	Misurazioni lato 1			Misurazioni lato 2			Misurazioni lato 3			Misurazioni lato 4		
C1	6,70	6,60	7,10	7,70	7,60	7,80	7,80	7,20	7,50	7,80	7,70	7,70
C2	7,10	6,70	7,20	7,20	6,90	7,30	7,30	7,00	7,00	7,20	7,20	7,50
C3	7,00	6,70	6,80	6,70	7,00	7,10	7,30	7,40	7,10	7,20	7,10	6,80
C4	7,80	7,60	8,00	7,50	7,00	7,20	8,00	7,90	7,80	7,20	7,00	7,20
C5	7,10	6,80	7,10	7,30	7,20	7,60	7,40	7,10	7,00	7,50	7,30	7,50
C6	6,90	6,90	6,80	7,10	7,40	7,80	7,50	7,10	7,40	7,30	7,10	7,00
C7	7,20	7,30	7,50	7,50	6,80	7,10	7,20	7,50	7,50	7,90	7,80	7,40
C8	7,20	7,10	7,20	7,00	7,00	6,90	7,00	7,20	7,30	7,90	7,50	7,70

CAMPIONE	SPESSORE [cm]	VOLUME [m ³]	PESO [kg]	DENSITÀ [kg/m ³]
C1	7,43	0,0067	0,57	84,97
C2	7,13	0,0064	0,55	85,57
C3	7,02	0,0063	0,54	84,99
C4	7,52	0,0068	0,55	81,36
C5	7,24	0,0065	0,52	80,02
C6	7,19	0,0065	0,48	74,12
C7	7,39	0,0067	0,51	77,30
C8	7,25	0,0065	0,54	82,41

Tabella 4.1 - Caratteristiche geometriche e fisiche dei campioni utilizzati

4.2 Definizione della stratigrafia di riferimento

La stratigrafia inizialmente ipotizzata era composta dai seguenti strati:

- intonaco di calce esterno di spessore 2 cm;
- pannelli in paglia di spessore complessivo di 26 cm;
- malta d'argilla di spessore 2 cm.

In una fase preliminare della ricerca era stata prevista l'esecuzione delle prove sperimentali su campioni in paglia intonacati su entrambe le facce, in coerenza con la stratigrafia inizialmente ipotizzata per la parete oggetto di studio. Tuttavia, al momento della consegna presso il laboratorio, alcuni campioni presentavano evidenti fenomeni di crescita biologica in corrispondenza dell'interfaccia tra la paglia e l'intonaco interno in terra. Per tale motivo si è deciso di modificare la soluzione costruttiva prevista, sostituendo l'intonaco interno applicato in opera con una soluzione a secco costituita da lastre prefabbricate in terra cruda.

Tale scelta è stata motivata principalmente dalla necessità di eliminare l'apporto di acqua associato alla posa dell'intonaco umido, che può determinare un temporaneo incremento del contenuto di umidità nella paglia favorendo lo sviluppo biologico. Le lastre prefabbricate, essendo prodotte ed essiccate in stabilimento, consentono infatti una posa a secco e riducono significativamente l'umidità introdotta durante la fase costruttiva.



Figura 4.2 - campioni intonacati con malta di terra e malta di calce

Si è quindi definita la stratigrafia di riferimento, costituita, procedendo dall'interno verso l'esterno, da una finitura interna in malta di argilla di spessore pari a 1 cm, una lastra prefabbricata in terra cruda di spessore pari a 2,2 cm, tre pannelli isolanti accoppiati in paglia compressa EAP Thermus di spessore rispettivamente pari a 8 cm, 10 cm e 8 cm, per uno spessore complessivo di 26 cm, e un intonaco esterno in calce di spessore pari a 2 cm.

Le prestazioni termiche preliminari della stratigrafia sono state valutate mediante un foglio di calcolo Excel basato sulle procedure previste dalla UNI EN ISO 13786, utilizzando per la paglia il valore di conducibilità termica determinato sperimentalmente nell'ambito della presente ricerca, pari a 0,055 W/mK. Lo spessore dello strato isolante è stato fissato a 26 cm al fine di ottenere una trasmittanza termica confrontabile con quella delle altre pareti presenti nella test room.

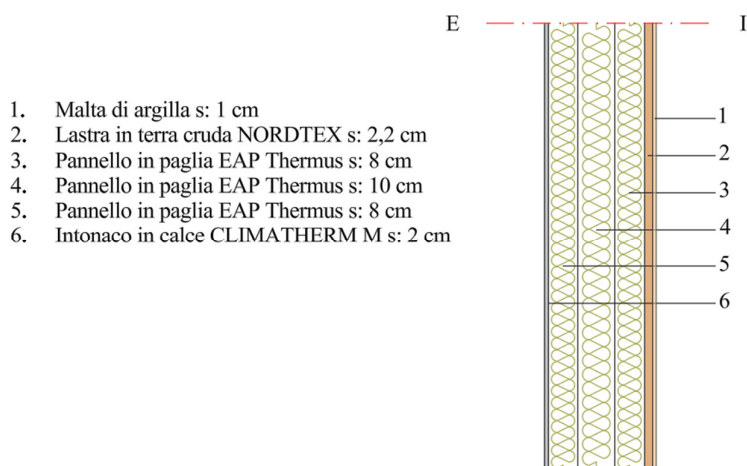


Figura 4.3 - Stratigrafia della parete di riferimento

Descrizione degli strati			Spessore (s) [m]	Conduttività termica (λ) [W/mK]	Resistenza termica [m ² K/W]	Calore specifico (c) [J/kgK]	Densità (ρ) [kg/m ³]	Resistenza termica aria [m ² K/W]	Profondità di penetrazione al periodo T (δ) [m]	ξ = s/d [-]	Resistenza termica [m ² K/W]
Rsi	Aria	Strato laminare interno		1	2	3	4	5			0,130
1		NORDTEX (int-terra)	0,022	0,353	0,062	1100	1450		0,078	0,282	0,062
2		EAP THERMUS (paglia)	0,260	0,055	4,727	900	80		0,145	1,794	4,727
3		CLIMATHERM (ext-calce)	0,020	0,057	0,351	1000	400		0,063	0,319	0,351

Tabella 4.2 - Parametri utilizzati per la valutazione delle prestazioni termiche della stratigrafia

I principali risultati ottenuti dall'analisi delle prestazioni termiche della stratigrafia sono riportati in seguito:

- Trasmittanza termica: 0,188 W/m²K;
- Resistenza termica totale: 5,31 m²K/W;
- Trasmittanza termica periodica Y_{ie} : 0,129 W/m²K;
- Fattore di attenuazione: 0,685;
- Sfasamento dell'onda termica: ~ 6,38 ore;
- Capacità termica periodica del lato interno: 36,8 kJ/m²K.

Tali valori confermano l'elevata capacità isolante della parete ed il buon comportamento dinamico dell'involucro nei confronti delle sollecitazioni termiche esterne.

La stratigrafia descritta costituisce la configurazione di riferimento adottata nel presente studio, progettata con l'obiettivo di valorizzare la naturale traspirabilità della paglia e le sue capacità di regolazione igrometrica, nonché di consentire lo studio del comportamento della parete in condizioni reali di esercizio. Le proprietà termofisiche della paglia utilizzate per la definizione della stratigrafia sono state determinate sperimentalmente nell'ambito della presente ricerca, mentre il comportamento igrotermico della parete è stato successivamente analizzato mediante simulazioni numeriche al fine di prevederne il comportamento in esercizio e di individuare possibili strategie di ottimizzazione della configurazione di riferimento. Le soluzioni migliorative individuate costituiranno oggetto delle successive fasi della ricerca e saranno confrontate sperimentalmente con la stratigrafia di riferimento in condizioni reali di esercizio.

Realizzazione della parete di riferimento

La realizzazione della parete è stata preceduta dalla completa demolizione della parete esistente posta sul lato sud della test room, situata nel comune di Ancona. La nuova

stratigrafia è stata quindi installata mantenendo come quota di riferimento la platea di fondazione in calcestruzzo armato.

La prima fase ha previsto il fissaggio alla fondazione di un cordolo inferiore in legno avente spessore pari a 26 cm, corrispondente allo spessore complessivo dello strato isolante di paglia. Il cordolo è stato ancorato alla platea mediante apposite viti per calcestruzzo armato. Tra il legno e la fondazione è stato inoltre inserito uno strato di tessuto non tessuto, posato in modo tale da garantire impermeabilità nei confronti dell'umidità proveniente dal basso e, al tempo stesso, consentire la traspirazione verso l'esterno. Tale accorgimento è stato adottato in seguito all'osservazione di fenomeni di infiltrazione d'acqua all'interno della test room.



Figura 4.3 - Demolizione della parete esistente



Figura 4.4 - Predisposizione tessuto non tessuto e fissaggio cordolo inferiore in legno

Successivamente sono stati installati i montanti della struttura interna in legno. I montanti laterali sono stati ancorati alla struttura metallica esistente della test room, mentre quelli intermedi sono stati collegati mediante staffe metalliche ad “L” posizionate sia alla base sia alla sommità degli elementi.

Alla struttura interna sono state fissate le lastre in terra cruda costituenti il rivestimento interno della parete. Il collegamento è stato realizzato mediante viti per legno dotate di rondella maggiorata, in modo da distribuire uniformemente le tensioni sulla superficie del materiale ed evitare fenomeni di danneggiamento locale. Le lastre erano già predisposte con fori di fissaggio.

Una volta completato il rivestimento interno, è stato posato il primo strato di pannelli in paglia dello spessore di 8 cm, collocato all'interno dell'orditura costituita dai montanti interni in legno. Successivamente è stato realizzato un secondo strato di pannelli in paglia dello spessore di 10 cm, disposto all'esterno del primo strato. In questa zona della stratigrafia, non sono presenti elementi strutturali in legno, così da garantire la continuità dello strato isolante e limitare la formazione di ponti termici.

Completata la posa dello strato intermedio, sono stati installati i montanti esterni in legno, aventi la funzione di contenere e stabilizzare il pacchetto isolante. All'interno di tale orditura è stato quindi collocato il terzo e ultimo strato di pannelli in paglia, anch'esso dello spessore di 8 cm. I pannelli più esterni sono stati inoltre trattenuti mediante bande in cotone disposte

orizzontalmente rispetto alla parete e fissate ai montanti in legno tramite viti, al fine di impedirne il ribaltamento.



Figura 4.5 - Rivestimento interno in terra cruda



Figura 4.6 - Strato esterno di paglia trattenuto dalle bande in cotone

Le eventuali cavità residue presenti all'interno della stratigrafia sono state riempite con lana di pecora, al fine di migliorare la continuità dello strato isolante e ridurre la presenza di vuoti d'aria non controllati.

Infine, sulla superficie esterna della parete è stato applicato l'intonaco di calce previsto in progetto e sono state eseguite le relative opere di finitura, applicando sullo strato esterno la malta d'argilla. La configurazione finale risulta pertanto costituita, procedendo dall'interno verso l'esterno, da malta d'argilla di finitura interna, da una lastra in terra cruda, da un primo strato di paglia inserito tra i montanti interni, da uno strato centrale continuo di paglia privo di elementi strutturali, da un secondo strato di paglia inserito tra i montanti esterni e dall'intonaco di calce esterno.



Figura 4.7 - Superficie esterna dopo l'applicazione dell'intonaco in calce esterno

Le restanti pareti e la copertura della struttura sono costituite da due strati di lana di roccia dello spessore di 12 cm ciascuno, che conferiscono all'involucro una trasmittanza termica pari a $0,29 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Progetto di monitoraggio

La progettazione del sistema di monitoraggio è finalizzata alla verifica sperimentale del comportamento termoigrometrico della parete installata nella test room. La definizione del progetto di monitoraggio ha richiesto l'individuazione delle grandezze da misurare, della strumentazione più idonea e del relativo posizionamento all'interno della parete e dell'ambiente di prova.

L'obiettivo del monitoraggio è quello di acquisire le condizioni climatiche esterne e i principali parametri termici della parete, al fine di confrontare il comportamento reale della stratigrafia con i risultati ottenuti mediante le simulazioni numeriche sviluppate con i software PAN e WUFI e con la stratigrafia ottimizzata che verrà messa in opera successivamente. Inoltre, i dati acquisiti potranno essere confrontati con quelli provenienti da altre pareti presenti presso il sito sperimentale delle test room.

In particolare, il sistema di monitoraggio è stato progettato per acquisire le seguenti grandezze:

- condizioni climatiche esterne (temperatura dell'aria, umidità relativa, radiazione solare, velocità e direzione del vento);
- temperatura superficiale interna della parete;
- temperatura in differenti punti all'interno della stratigrafia;
- temperature dell'aria interna alla test room;
- flusso termico attraverso la parete.

Per la misura delle condizioni climatiche esterne è prevista l'acquisizione dei dati mediante una stazione meteorologica installata in prossimità della test room. Le temperature superficiali e le temperature interne alla stratigrafia saranno invece monitorate mediante termocoppie PT100 posizionate tra la lastra in terra cruda e la paglia e tra gli strati di paglia. La misura del flusso termico sarà effettuata mediante un termoflussimetro installato sulla superficie interna della parete, mentre la temperatura dell'aria interna sarà rilevata mediante una termoresistenza PT100 a tubo, collocata in posizione rappresentativa dell'ambiente.

La disposizione delle sonde è stata definita in modo da consentire la costruzione del profilo termico attraverso la stratigrafia e la valutazione dei flussi energetici che interessano la parete.

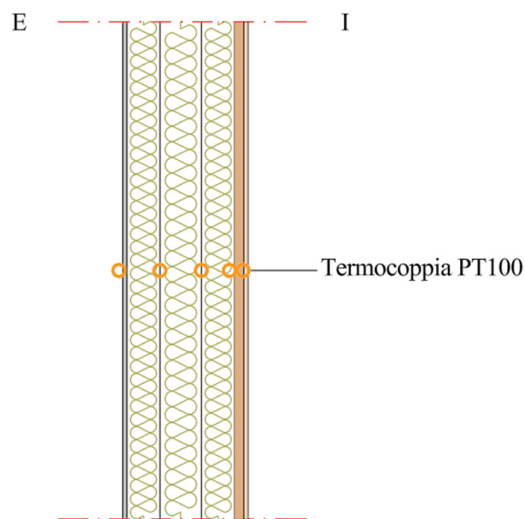


Figura 4.8 - Sezione verticale della parete con posizionamento Termocoppie PT100

5. Metodi sperimentali

5.1 Prova di conducibilità termica

La conducibilità termica rappresenta una delle proprietà più rilevanti dei materiali isolanti, poichè descrive la capacità del materiale di trasmettere calore per conduzione. Valori ridotti di tale parametro indicano una maggiore capacità isolante e, di conseguenza, migliori prestazioni energetiche della stratigrafia.

La conoscenza della conducibilità termica è inoltre necessaria per il calcolo delle resistenze termiche dei singoli strati che compongono la parete e, conseguentemente, della trasmittanza termica dell'elemento costruttivo. Dunque, questo parametro riveste un ruolo fondamentale nella progettazione dell'involucro edilizio e nella valutazione dell'efficienza energetica degli edifici.

Nel caso di materiali isolanti naturali, come la paglia, la misura della conducibilità termica assume particolare importanza, poichè consente di confrontare le sue prestazioni con quelle dei tradizionali materiali impiegati per l'isolamento termico.

Ai fini della presente prova viene determinata la seguente grandezza:

- Conducibilità termica λ : esprime l'attitudine del materiale a condurre il calore.

Riferimento normativo

La determinazione della conducibilità termica è stata effettuata facendo riferimento alle norme UNI EN 13163 e UNI EN ISO 10456, nonché al documento tecnico ANIT "Dal λ_D dichiarato λ_D al λ di progetto λ ".

Risulta comunque opportuno evidenziare che la norma UNI EN 13163, pur essendo specificamente riferita ai materiali isolanti in polistirene espanso, fornisce indicazioni utili per la determinazione della conduttività termica dichiarata λ_D .

La norma definisce le condizioni di prova relative alla temperatura e all'umidità del materiale, riportate nella seguente tabella.

	Condizioni di prova			
	I (10°C)		II (23°C)	
	a)	b)	a)	b)
Temperatura di riferimento	10 °C	10 °C	23 °C	23 °C
Umidità	u asciutto	u _{23,50}	u asciutto	u _{23,50}
Invecchiamento	sì	sì	sì	sì

Tabella 5.1 – Condizioni di prova per la misura della conducibilità termica

La conducibilità termica dichiarata λ_D viene determinata a partire dal valore di $\lambda_{90/90}$ che rappresenta il valore di conducibilità termica per il quale si può affermare che almeno il 90% della produzione presenta prestazioni uguali o migliori rispetto a questo valore. Per la sua determinazione, devono essere ottenuti almeno 10 risultati da prove dirette di conduttività. Il valore di $\lambda_{90/90}$ corrisponde al valore di λ_D se le condizioni di stagionatura e di temperatura media sono identiche a quelle richieste per il lambda dichiarato, altrimenti devono essere applicati opportuni fattori correttivi.

Il valore di λ_D deve essere trasformato nel valore di lambda di progetto λ , come descritto nella normativa UNI EN ISO 10456, nel caso in cui si operi in condizioni di progetto diverse e peggiori da quelle del lambda dichiarato.

Criticità e limiti della prova

Le procedure previste dalle norme UNI EN 13163 e UNI EN ISO 10456 consentono di determinare il valore di conducibilità termica dichiarata λ_D e, successivamente, il corrispondente valore di progetto λ . In particolare, la determinazione del valore $\lambda_{90/90}$ richiede l'esecuzione di almeno dieci prove su campioni rappresentativi della produzione e la successiva elaborazione statistica dei risultati.

Nel presente lavoro non è stato possibile seguire integralmente tale procedura, poichè non erano disponibili un numero sufficiente di campioni che avevano inoltre masse volumiche differenti. Anche le condizioni di prova adottate si discostano parzialmente da quelle previste dalla normativa. In particolare, la UNI EN 13163 prevede che la conducibilità termica dichiarata venga determinata con una temperatura media di riferimento pari a 10 °C, mentre nel presente studio le misure sono state eseguite con una temperatura media di prova pari a 15 °C. Tale scelta è stata effettuata per evitare il rischio di formazione di condensa sulla superficie della piastra fredda, fenomeno che avrebbe potuto influenzare le misurazioni e compromettere l'affidabilità dei risultati ottenuti.

Come descritto nel paragrafo dedicato alla procedura sperimentale, le misure sono state pertanto eseguite nelle condizioni termoigrometriche presenti in laboratorio, con l'obiettivo di ottenere un valore di conducibilità termica rappresentativo delle condizioni considerate nello studio. I risultati ottenuti devono quindi essere interpretati come valori sperimentali riferiti ai campioni analizzati e non come valori dichiarati ai sensi della normativa.

Apparato sperimentale

- Provini C3, C5 e C6, descritti nel dettaglio al Capitolo 4.
- Netzsch HFM 446 Lambda.
- Computer dotato di software per il controllo ed il calcolo del valore di λ .

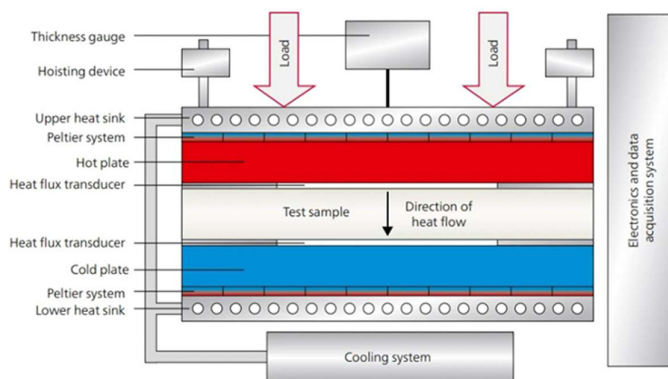


Figura 5.1 - Schema descrittivo Netzsch HFM 446 Lambda

Procedura sperimentale

I provini utilizzati per la prova di conducibilità termica sono stati i campioni C3, C5 e C6. Essi sono stati conservati nelle condizioni termoigrometriche presenti in laboratorio, caratterizzate da una temperatura di $\sim 20^\circ\text{C}$ e da un'umidità relativa di $\sim 40\%$.

I campioni sono stati poi inseriti all'interno del Netzsch HFM 446 Lambda. Prima dell'inizio della prova, è stata applicata una pressione tale da garantire il completo contatto tra le superfici del materiale e le piastre dello strumento. Tale accorgimento si è reso necessario poichè, a causa della natura del prodotto, le superfici dei provini possono presentare irregolarità che potrebbero determinare la formazione di vuoti d'aria, alternando i valori misurati.

Il principio di funzionamento dello strumento si basa sul metodo a regime stazionario, nel quale il campione viene posto tra due termoflussimetri a temperatura diversa. La piastra

superiore viene riscaldata fino ad una temperatura di 20 °C, mentre quella inferiore viene raffreddata fino ad una temperatura di 10 °C, generando un gradiente termico di 10 K attraverso il materiale. Il flusso di calore che si instaura viene misurato mediante appositi sensori integrati nelle piastre.

Il sistema è anche dotato di un circuito di termostatazione esterno ad acqua, che mantiene la temperatura del corpo strumentale prossima alla temperatura media di prova. Tale accorgimento garantisce che le condizioni dell'ambiente esterno non vadano ad influenzare significativamente le misurazioni.

Una volta raggiunto l'equilibrio termico, ossia la condizione in cui il flusso di calore che attraversa il campione risulta essere stabile nel tempo, il software associato allo strumento restituisce il valore della conducibilità termica λ .



Figura 5.2 - Prova di conducibilità termica

Elaborazione dei dati

Il valore della conducibilità termica λ [W/mK] è stato ricavato per ogni provino in accordo con la legge di Fourier:

$$\lambda = \frac{Q \cdot L}{A \cdot \Delta T}$$

Dove:

- Q / A [W/m²] è il flusso di calore medio.
- L [m] è lo spessore del campione.
- ΔT [K] è il gradiente di temperatura.

5.2 Prova di permeabilità al vapore d'acqua

Fondamentale nella caratterizzazione igrotermica di un materiale da costruzione è la conoscenza del valore di permeabilità al vapore d'acqua, ovvero della capacità di lasciarsi attraversare dal vapore acqueo. Tale parametro riveste un ruolo centrale nella progettazione dell'involucro edilizio, poichè consente di valutare il rischio di accumuli di umidità all'interno della stratigrafia. La migrazione del vapore attraverso gli elementi costruttivi può infatti compromettere le prestazioni termiche dei materiali e favorire fenomeni di degrado biologico. Nel caso di materiali isolanti naturali, come la paglia, questo aspetto assume un'importanza ancora maggiore, poichè il comportamento igrotermico del materiale è fortemente influenzato dalla sua struttura porosa e dalla capacità di regolare gli scambi di umidità con l'ambiente circostante.

Ai fini della presente prova vengono definite le seguenti grandezze:

- Permeanza al vapore acqueo W_p : flusso di vapore acqueo passante in condizioni stazionarie attraverso il campione, riferito ad una superficie unitaria e per una differenza unitaria di pressione parziale di vapore.
- Permeabilità al vapore d'acqua δ : grandezza ottenuta moltiplicando la permeanza W_p per lo spessore del campione.
- Fattore di resistenza igroscopica μ : rapporto tra la permeabilità al vapore dell'aria (δ_{air}) e quella del materiale (δ).

Un valore ridotto del fattore di resistenza alla diffusione del vapore μ indica una maggiore permeabilità al passaggio del vapore e, di conseguenza, una più elevata traspirabilità del materiale.

Riferimento normativo

La permeabilità al vapore acqueo è stata determinata mediante il metodo della wet cup, secondo quanto previsto dalla norma UNI EN ISO 12572. Tale metodo prevede il fissaggio del provino sul lato aperto di un recipiente contenente una soluzione acquosa satura. L'assemblaggio viene successivamente collocato all'interno di una camera climatica di prova a temperatura e umidità relativa controllate.

La differenza di pressione parziale del vapore tra l'interno del recipiente di prova e l'ambiente della camera climatica genera un flusso di vapore attraverso il provino, consentendo la determinazione delle proprietà di trasporto del materiale.

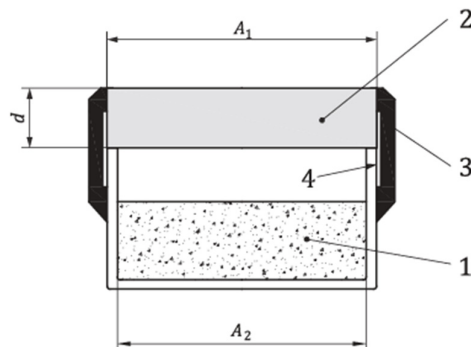


Figura 5.3 - Schema di assemblaggio provino per prova di permeabilità al vapore d'acqua UNI EN ISO 12572

Dove:

1. soluzione salina satura acquosa;
 2. provino di prova;
 3. sigillante;
 4. nastro;
- A_1 : area esposta superiore;
 - A_2 : area esposta inferiore;
 - d : spessore del provino di prova

L'assemblaggio viene periodicamente pesato al fine di determinare, in condizioni di regime stazionario, la velocità di trasmissione di vapore acqueo attraverso il campione.

Prima dell'esecuzione della prova, i provini devono essere preconditionati ad una temperatura di 23 ± 5 °C e a un'umidità relativa del $50 \pm 5\%$. Il condizionamento deve essere protratto fino al raggiungimento della stabilizzazione della massa, verificata quando tre pesate giornaliere consecutive differiscono tra loro di non oltre il 5%.

La norma UNI EN ISO 12572 fornisce la seguente tabella, in cui è possibile scegliere le condizioni di prova.

Table 1 — Test conditions

Set	Condition °C - % RH	Temperature °C	Tolerances			
			Relative humidity ^a			
			%			
			Dry state		Wet state	
			Set point	Tolerance	Set point	Tolerance
A	23 – 0/50	23 ± 1	0	+5	50	±5
B	23 – 0/85	23 ± 1	0	+5	85	±5
C	23 – 50/93	23 ± 1	50	±5	93	±5
D	38 – 0/93	38 ± 1	0	+5	93	±3
E	23 – 50/100	23 ± 1	50	±5	100	

Tabella 5.2 - Condizioni per prova di permeabilità al vapore d'acqua UNI EN ISO 12572

Apparato sperimentale

- Provini C1, C4 e C7, descritti nel dettaglio al Capitolo 4. Per ogni campione sono stati misurati o ricavati i valori di: spessore medio per lato, lunghezza lati, la media complessiva degli spessori, l'area inferiore esposta, l'area superiore esposta e la media delle aree, riportate in seguito nel dettaglio:

Dati provino C1				
spessore medio per lato (m)	0,068	0,077	0,075	0,077
lunghezza lati (m)	0,270	0,260	0,270	0,260
spessore medio totale (m)	0,074			
area inf (recipiente) (m²)	0,063			
area superiore (m²)	0,070			
media aree (m²)	0,066			

Dati provino C4				
spessore medio per lato (m)	0,078	0,072	0,079	0,071
lunghezza lati (m)	0,263	0,270	0,260	0,265
media altezza (m)	0,075			
area inf (recipiente) (m²)	0,061			
area sup (m²)	0,070			
media aree (m²)	0,065			

Dati provino C7				
spessore medio per lato (m)	0,073	0,071	0,074	0,077
lunghezza lati (m)	0,260	0,260	0,262	0,270
media altezza (m)	0,074			
area inf (recipiente) (m ²)	0,061			
area sup (m ²)	0,069			
media aree (m ²)	0,065			

Tabella 5.3 - Dati relativi ai campioni utilizzati per la prova di permeabilità al vapore d'acqua

- Silicone e plastica per le sigillature.
- Contenitori di plastica di dimensioni 39 x 29 x 11 cm.
- Camera climatica ACS Hygros 120.
- Soluzione di nitrato di potassio KNO₃
- Bilancia con accuratezza di 0,01 g.

Procedura sperimentale

I provini utilizzati per la prova di permeabilità al vapore d'acqua sono stati i campioni C1, C4 e C7. Essi sono stati inizialmente preconditionati ad una temperatura di 23 °C e a un'umidità relativa del 50% fino al raggiungimento della condizione di massa costante, così da partire da uno stato iniziale noto e riproducibile.

Al fine di garantire un flusso monodimensionale, ovvero limitato alle sole due facce principali del campione, i bordi laterali dei provini sono stati sigillati tramite l'utilizzo di plastica, silicone e nastro adesivo.

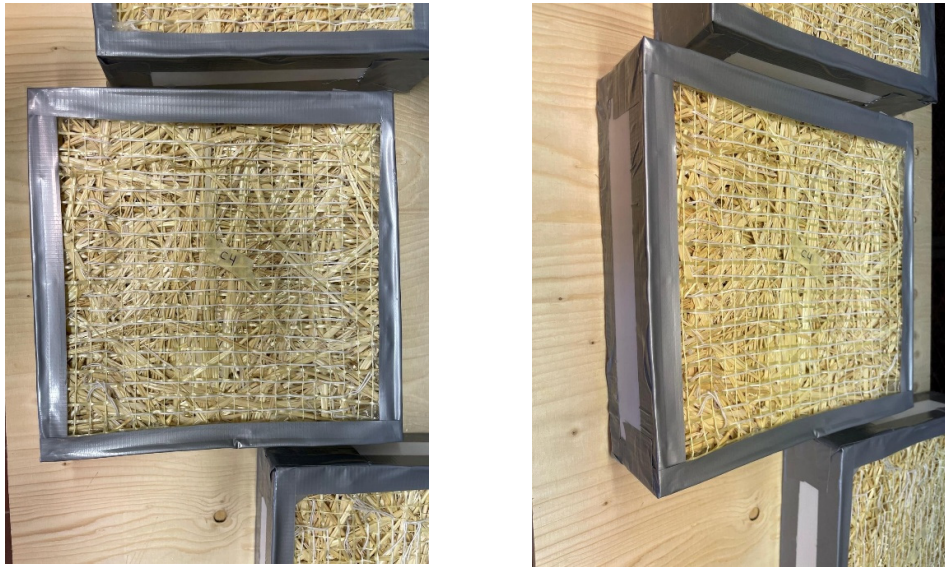


Figura 5.4 - Campioni opportunamente sigillati

Sul contenitore in plastica destinato ad accogliere la soluzione satura è stato fissato, tramite l'utilizzo del silicone, un supporto in materiale plastico dotato di un'apertura centrale di dimensioni pari a 25 x 25 cm.



Figura 5.5 - Contenitore in plastica con supporto dotato di apertura 25 x 25 cm

Poichè è stato adottato il set C riportato nella Tabella 5.2, è stata utilizzata una soluzione satura di nitrato di potassio (KNO_3), in grado di garantire una umidità relativa interna del 94%.

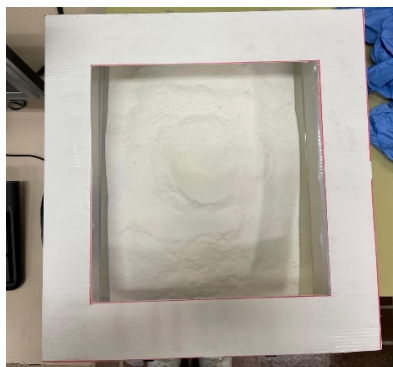


Figura 5.6 - Contenitore in plastica contenente KNO_3

Successivamente, i provini sono stati fissati al recipiente tramite l'utilizzo del silicone, ottenendo il sistema di prova costituito dal contenitore e dal relativo campione. Come riportato dalla normativa, è stato previsto uno spessore di intercapedine d'aria tra il campione e la superficie della soluzione.

I sistemi così assemblati sono stati pesati e collocati nella cella climatica, mantenuta ad una temperatura costante di 23 °C ed un'umidità relativa del 50%, per tutta la durata della prova. In tali condizioni si genera un gradiente di pressione parziale del vapore Δp tra l'interno del recipiente e l'ambiente circostante, che crea un flusso di vapore attraverso il campione.



Figura 5.7 - Campioni inseriti nella camera climatica di prova

Le misurazioni della massa sono state effettuate a intervalli di 24 ore al fine di monitorarne la variazione nel tempo. La prova è stata protratta fino all'ottenimento di cinque determinazioni consecutive per le quali la variazione di massa risultasse costante entro $\pm 5\%$ del valore medio relativo a ciascun provino. A supporto della verifica del raggiungimento

del regime stazionario, è stata inoltre tracciata una curva della variazione di massa in funzione del tempo.

Elaborazione dei dati

Dalla curva della variazione di massa in funzione del tempo è stato ricavato il valore della portata di vapore G [kg/s]. A partire da tale grandezza è stata determinata la permeanza al vapore Wp [kg /m²·s·Pa] mediante la seguente relazione:

$$Wp = \frac{G}{A \cdot \Delta p}$$

Successivamente è stata calcolata la permeabilità al vapore d'acqua δ [kg/m·s·Pa], moltiplicando il valore di Wp per lo spessore medio del relativo provino.

Infine, è stata determinato il fattore di resistenza igroscopica μ definito come:

$$\mu = \frac{\delta_{air}}{\delta}$$

Dove:

- G [kg/s] è la portata di vapore, definita come la media di tre determinazioni successive di $\Delta \bar{m}$ in cui $\Delta \bar{m} = \frac{m_2 - m_1}{t_2 - t_1}$. La condizione di regime stazionario si considera raggiunta quando ciascuna delle ultime tre determinazioni differisce di non oltre $\pm 5\%$ rispetto al valore medio di G .
- A [m²] è la media complessiva delle aree.
- $\Delta p = p_{vi} - p_{ve}$ [Pa] è la differenza di pressione parziale del vapore acqueo ai due lati del campione. Per la condizione C riportata nella Tabella 5.2 della normativa risulta che $\Delta p = 1207$ Pa.
- δ_{air} [kg / m·s·Pa] è la permeabilità al vapore dell'aria, che viene calcolata mediante la seguente espressione:

$$\delta_{air} = \frac{0.086 \cdot p_0}{R_d \cdot T \cdot p} \left(\frac{T}{273} \right)^{1.81}$$

in cui p_0 è la pressione atmosferica, R_d è la costante dei gas per il vapore acqueo e p è la pressione atmosferica effettiva. Nel presente studio è stata assunta la condizione $p_0 = p$.

5.3 Isoterme di adsorbimento

La correlazione tra il contenuto di umidità di un materiale e l'umidità relativa dell'ambiente circostante, in condizioni di temperatura costante, può essere rappresentata mediante le isoterme di adsorbimento. Tali curve rappresentano uno dei principali dati di input per la previsione dell'accumulo di umidità nei materiali, la valutazione del rischio di condensa e la stima della crescita delle muffe all'interno della stratigrafia.

Nel caso di materiali isolanti naturali, come la paglia, la conoscenza delle isoterme di adsorbimento assume un ruolo fondamentale poichè anche la durabilità del materiale è strettamente legata al suo contenuto di umidità. Come verrà mostrato nei capitoli successivi, livelli elevati e persistenti di umidità possono compromettere la stabilità biologica della paglia, mentre la sua capacità di assorbire e rilasciare umidità contribuisce al mantenimento di condizioni igrotermiche favorevoli nella stratigrafia.

Ai fini della presente prova, viene definita la seguente grandezza:

- contenuto di umidità u : contenuto di umidità di un materiale poroso in equilibrio con l'ambiente e l'umidità relativa dell'aria ambiente, ad una temperatura specifica.

Valori elevati di u indicano una maggiore quantità di acqua adsorbita rispetto alla massa secca del materiale, mentre valori ridotti corrispondono ad un minore contenuto di umidità.

Riferimento normativo

L'isoterma di adsorbimento è stata determinata mediante il metodo con camera climatica, secondo quanto previsto dalla norma UNI EN ISO 12571.

La norma prevede che il provino venga inizialmente essiccato fino al raggiungimento della massa costante. Successivamente, esso deve essere collocato consecutivamente in una serie di ambienti di prova, con umidità relativa crescente per stadi e ad una temperatura costante di $23 \pm 0,5$ °C. Per ciascun livello di umidità relativa, il contenuto di umidità del materiale viene determinato una volta raggiunto l'equilibrio igroscopico con l'ambiente circostante, che corrisponde alla condizione per cui si assume una distribuzione uniforme dell'umidità all'interno del campione. Tale condizione viene verificata mediante pesate successive fino al raggiungimento della massa costante. In accordo con la norma, l'equilibrio si considera raggiunto quando la variazione di massa tra tre pesate consecutive, eseguite ad intervalli di almeno 24 ore, risulta inferiore allo 0,1% della massa totale del provino.

In riferimento all'intervallo di umidità considerato, devono essere selezionate un minimo di 4 umidità, distribuite il più uniformemente possibile nell'intervallo compreso tra il 30% ed il 95%.

Infine, la curva di adsorbimento può essere tracciata considerando, per ciascun valore di umidità relativa, il contenuto di umidità medio ottenuto da almeno 3 provini.

Apparato sperimentale

- Provini C2, C3, C5, C6 e C8, descritti nel dettaglio al Capitolo 4.
- Bilancia con accuratezza di 0,01 g.
- Forno di essiccazione.
- Camera climatica ACS Hygros 120.

Procedura sperimentale

I provini utilizzati per la determinazione dell'isoterma di adsorbimento sono stati i campioni C2, C3, C5, C6 e C8. Essi sono stati inizialmente essiccati in forno fino al raggiungimento della massa costante.

Successivamente, i campioni sono stati collocati all'interno della camera climatica mantenuta ad una temperatura costante di 23 °C, e sottoposti a una serie di livelli crescenti di umidità relativa.

Nel primo step è stata impostata un'umidità relativa del 10%. Una volta che tutti i campioni hanno raggiunto l'equilibrio igroscopico, il valore è stato incrementato al 30%. In accordo con la norma, l'equilibrio è stato considerato raggiunto quando la variazione di massa tra tre pesate consecutive, effettuate a intervalli di almeno 24 ore, risultava inferiore allo 0,1% della massa totale del provino.

Seguendo la medesima procedura, sono stati successivamente impostati i seguenti livelli di umidità relativa: 50%, 75%, 85% e 95%.



Figura 5.8 - Campioni inseriti nella camera climatica di prova

Per ciascun provino e per ogni livello di umidità relativa è stato determinato il corrispondente valore del contenuto di umidità u . L'isoterma di adsorbimento è stata infine ottenuta calcolando, per ogni livello di umidità relativa, il valore medio del contenuto di umidità ricavato dai cinque provini analizzati.

Elaborazione dei dati

Il valore del contenuto di umidità u [kg/kg] è stato ricavato per ogni provino, a ciascuna umidità relativa, considerando la seguente formula:

$$u = \frac{m - m_0}{m_0}$$

Dove:

- m è la massa del provino di prova.
- m_0 è la massa del provino di prova essiccato

6. Metodi analitici

6.1 Modellazione con software PAN

PAN 8 è il software sviluppato da TEP srl per l'analisi delle stratigrafie opache dell'involucro edilizio. Il software si basa su modelli di calcolo conformi alle normative vigenti per l'analisi termica, igrometrica e dinamica delle stratigrafie ed è allineato alle modalità di verifica definite a livello nazionale dal DM 26/6/2015.

Nel presente studio, il software è stato utilizzato per la valutazione delle prestazioni termoigrometriche della parete oggetto di analisi, con particolare riferimento alla trasmittanza termica stazionaria e periodica, al rischio di muffa e condensazione superficiale, alla verifica della condensazione interstiziale mediante metodo di Glaser, alla capacità inerziale della stratigrafia e al tempo di asciugatura dei materiali.

Le verifiche igrometriche sono state effettuate in accordo con la UNI EN ISO 13788, norma finalizzata alla valutazione del rischio di formazione di muffe e condensa nei componenti edilizi attraverso l'analisi delle condizioni termoigrometriche interne ed esterne.

Definizione delle condizioni al contorno

Per la definizione delle condizioni climatiche esterne è stata selezionata la provincia di Ancona, richiamando i dati climatici provinciali previsti dalla norma UNI 10349. Sono stati quindi utilizzati i valori medi mensili di temperatura dell'aria esterna, pressione di vapore, irradiazione solare globale giornaliera sul piano orizzontale e velocità del vento.

I gradi giorno sono stati invece assunti in accordo con il DPR 412/93.

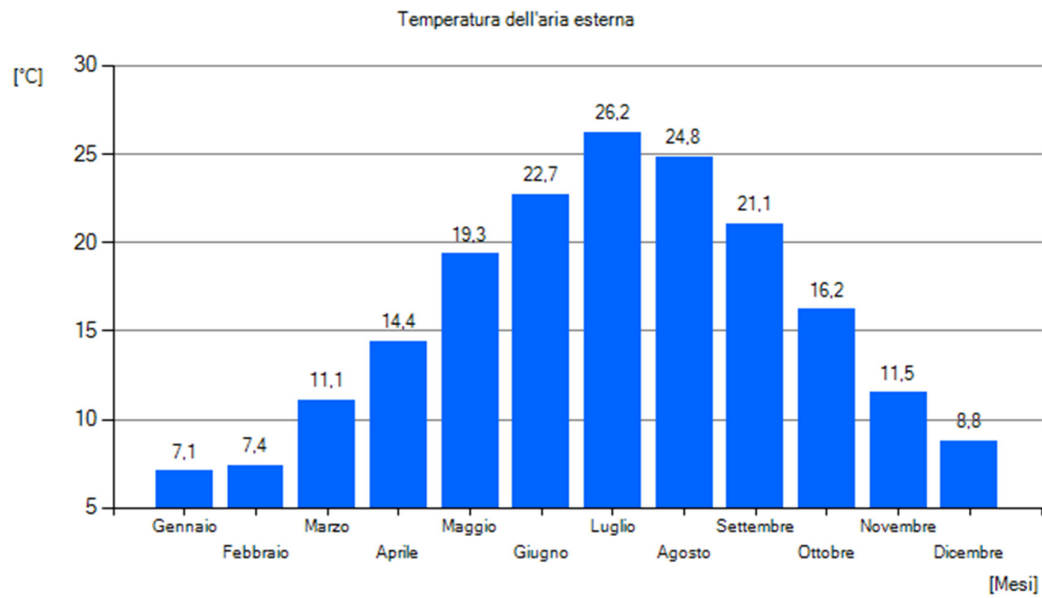


Figura 6.1 - Temperatura media mensile dell'aria esterna per la località di Ancona

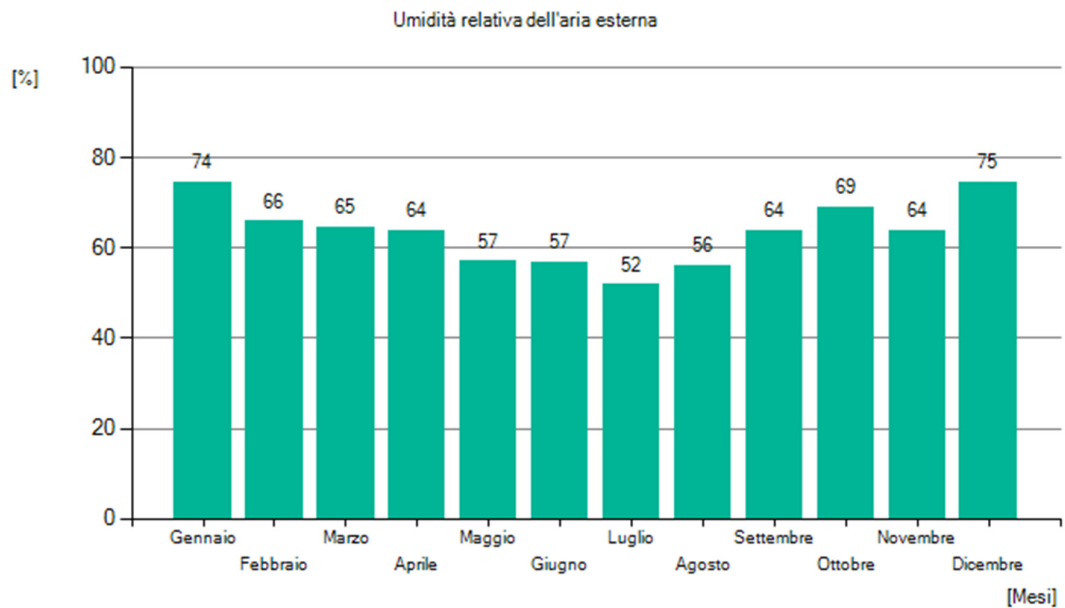


Figura 6.2 - Umidità relativa mensile dell'aria esterna per la località di Ancona

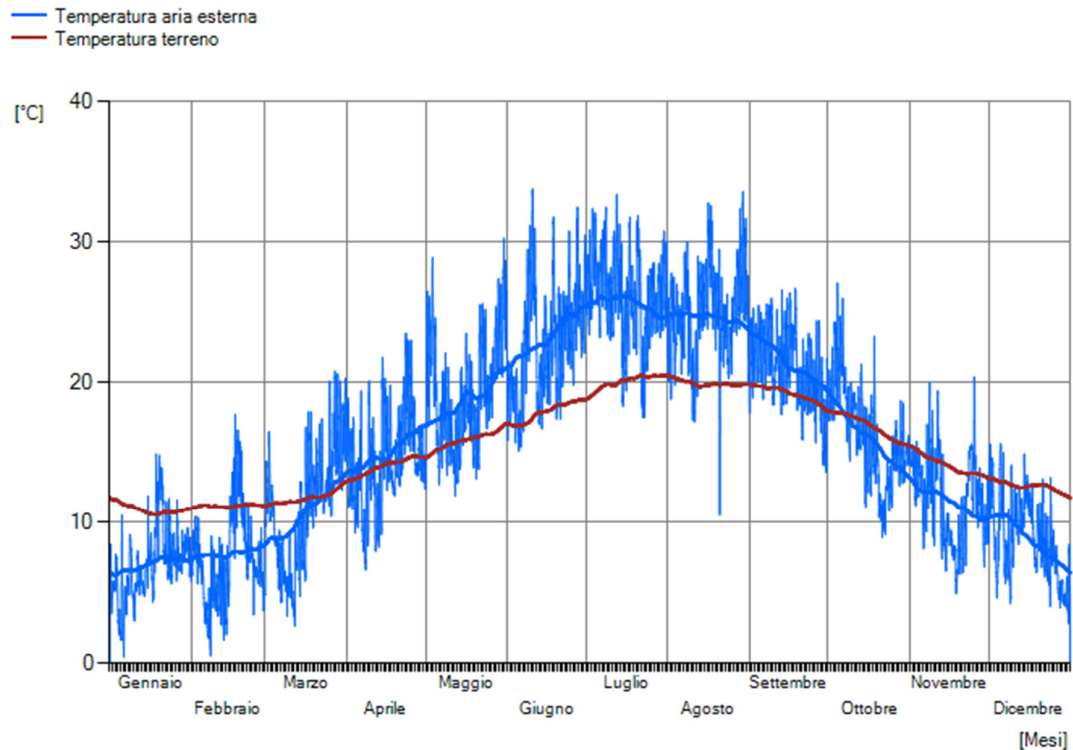


Figura 6.3 - Andamento delle temperature orarie dell'aria esterna e del terreno per la località di Ancona

I dati climatici interni sono stati determinati a partire dai dati climatici esterni, in accordo con i metodi proposti dalla norma UNI EN ISO 13788, adottando la classe di concentrazione del vapore 3, corrispondente agli alloggi senza ventilazione meccanica controllata, edifici con indice di affollamento non noto. In base a tale classificazione il software determina le condizioni termoigrometriche interne necessarie alle verifiche di rischio muffa e condensazione.

Nell'ambito di tali elaborazioni vengono ricavati i valori di:

- temperatura e pressione di vapore dell'aria interna ed esterna,
- umidità relativa interna,
- pressione di vapore superficiale minima per il rischio muffa,
- temperature superficiali minime di rischio muffa e condensazione e i relativi fattori di temperatura.

Il fattore di temperatura per il rischio muffa f_{Rsm} e fattore di temperatura di condensazione f_{Rsc} vengono determinati mediante la seguente relazione:

$$f_{rischio} = \frac{\theta_{rischio} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e}$$

Dove:

- $f_{rischio}$ corrisponde a f_{Rsm} o f_{Rsc}
- $\theta_{rischio}$ è la temperatura di rischio pari a θ_{sm} o θ_{sc} .
- θ_e è la temperatura dell'aria esterna.
- θ_i è la temperatura dell'aria interna.

	θ_e [°C]	P_e [Pa]	UR_e [%]	UA_e [g/kg]	θ_i [°C]	P_i [Pa]	UR_i [%]	UA_i [g/kg]	P_{sm} [Pa]	θ_{sm} [°C]	θ_{sc} [°C]	f_{Ram} [-]	f_{Rsc} [-]
Gennaio	7,1	750	74,4	4,6	20,0	1308	56,0	8,1	1635	14,4	11,0	0,563	0,299
Febbraio	7,4	679	65,9	4,2	20,0	1226	52,4	7,6	1532	13,4	10,0	0,472	0,204
Marzo	11,1	851	64,5	5,3	20,0	1268	54,2	7,9	1585	13,9	10,5	0,314	-0,066
Aprile	14,4	1047	63,9	6,5	20,0	1346	57,6	8,4	1683	14,8	11,4	0,073	-0,536
Maggio	19,3	1278	56,9	7,9	19,3	1401	62,4	8,7	1751	15,4	12,0	-	-
Giugno	22,7	1563	56,7	9,7	22,7	1663	60,3	10,4	2079	18,1	14,6	-	-
Luglio	26,2	1760	51,8	11,0	26,2	1860	54,8	11,6	2325	19,9	16,4	-	-
Agosto	24,8	1754	56,1	11,0	24,8	1854	59,2	11,6	2318	19,9	16,3	-	-
Settembre	21,1	1595	63,9	9,9	21,1	1695	67,9	10,6	2119	18,4	14,9	-	-
Ottobre	16,2	1272	69,1	7,9	18,0	1506	73,0	9,4	1883	16,6	13,1	0,197	-1,730
Novembre	11,5	865	63,8	5,4	20,0	1267	54,2	7,9	1584	13,9	10,5	0,280	-0,118
Dicembre	8,8	843	74,5	5,2	20,0	1341	57,4	8,3	1676	14,7	11,3	0,531	0,226

Tabella 6.1 - Parametri climatici mensili e fattori di rischio muffa e condensazione definiti secondo la UNI EN ISO 13788

Dall'analisi dei dati climatici il mese più gravoso per le verifiche di condensazione superficiale e rischio muffa è risultato gennaio, caratterizzato dai valori più elevati dei fattori f_{Rsc} e f_{Rsm} .

In base a tali valori, sono state determinate le resistenze termiche minime necessarie per evitare fenomeni di condensazione superficiale e crescita di muffe mediante la seguente relazione:

$$R_{critica} = \frac{1}{U_{critica}} = \frac{1}{4 \cdot (1 - f_R)}$$

Mese critico per la condensa	Gennaio	Resistenza minima per evitare condensa	0,357	m²K/W
Mese critico per il rischio muffa	Gennaio	Resistenza minima per evitare rischio muffa	0,572	m²K/W

Figura 6.4 - Individuazione mese critico e resistenze termiche minime per la verifica del rischio di muffa e condensazione superficiale

Successivamente sono stati definiti i dati dell'edificio, selezionando la tipologia di intervento “Nuova costruzione” e la destinazione d’uso privata. La zona climatica associata al comune di Ancona risulta essere la zona D.

In questa sezione il software riporta inoltre i valori limite di trasmittanza termica previsti dalla normativa per la specifica tipologia di intervento.

	Coperture	Pareti	Pavimenti
Trasmittanza dell'edificio di riferimento U_{ref} [W/m ² K]	0,26	0,29	0,29

Tabella 6.2 - Valori limite di trasmittanza termica per edifici di nuova costruzione in zona climatica D

Definizione della stratigrafia

La stratigrafia della parete è stata modellata a partire dalle informazioni ricavate dalle schede tecniche dei materiali previsti nella configurazione oggetto di studio:

- intonaco esterno in calce Climatherm M di spessore pari a 2 cm;
- isolante termico in paglia Eap Thermus di spessore pari a 26 cm;
- lastra in terra cruda interna Nordtex di spessore pari a 2,2 cm;
- finitura interna in malta di argilla di spessore pari a 1 cm.

Per ciascun materiale sono stati inseriti nel software i parametri fisici e termoigrometrici necessari alla simulazione. I valori adottati per la modellazione sono stati ricavati dalle schede tecniche dei produttori, dai risultati sperimentali ottenuti nel presente lavoro. L'insieme dei parametri utilizzati nelle simulazioni verrà riportato e discusso nel successivo Capitolo 6.3 dedicato alla definizione dei dati di input del modello.

Il software esegue automaticamente il calcolo delle principali caratteristiche termiche e dinamiche della stratigrafia. In particolare, vengono determinati la trasmittanza termica stazionaria U , la trasmittanza termica periodica Y_{ie} , il fattore di attenuazione f_a , lo sfasamento ϕ e gli ulteriori parametri dinamici previsti dalla norma UNI EN ISO 13786, definiti in seguito.

La trasmittanza termica U [W/m²K], calcolata in accordo con la UNI EN ISO 6946, rappresenta il flusso di calore che attraversa un metro quadro di struttura per unità di differenza di temperatura tra ambiente interno ed esterno.

La trasmittanza termica periodica Y_{ie} [W/m^2K] rappresenta invece la capacità della parete di trasmettere verso l'ambiente interno una sollecitazione termica variabile nel tempo.

Il fattore di attenuazione f_a che è il rapporto tra la trasmittanza termica periodica e la trasmittanza termica stazionaria e fornisce un'indicazione della capacità della struttura di ridurre l'intensità dell'onda termica proveniente dall'esterno.

Lo sfasamento φ rappresenta il ritardo temporale tra il picco della sollecitazione termica applicata sulla superficie esterna della parete e il corrispondente picco rilevato sulla superficie interna.

La capacità termica k_i e k_e 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.

L'ammittenza Y_{ii} e Y_{ee} che 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.

Nella seguente tabella vengono riportati i parametri relativi alla stratigrafia, derivati dal calcolo del software PAN.

	Valori invernali	Valori estivi
Trasmittanza U [W/m^2K]	0,188	0,187
Trasmittanza periodica Y_{ie} [W/m^2K]	0,085	0,084
Fattore di attenuazione f_a [-]	0,451	0,448
Sfasamento φ [-]	9h 14'	9h 18'
Capacità termica periodica interna k_i [kJ/m^2K]	41,30	41,63
Capacità termica periodica esterna k_e [kJ/m^2K]	14,78	14,50
Ammittenza interna Y_{ii} [W/m^2K]	2,921	2,946
Ammittenza esterna Y_{ee} [W/m^2K]	0,992	0,973

Tabella 6.3 - Parametri della stratigrafia calcolati mediante software PAN

Output della simulazione

Le verifiche effettuate mediante il software PAN riguardano sia gli aspetti termici che quelli igrometrici della stratigrafia.

La verifica della trasmittanza termica confronta il valore di progetto U con i limiti previsti dalla normativa vigente. Si precisa tuttavia che il programma non considera l'effetto dei ponti termici.

La verifica del rischio muffa e condensazione superficiale viene eseguita in accordo con la UNI EN ISO 13788 mediante il confronto tra la resistenza termica totale della parete e la resistenza minima richiesta per evitare il raggiungimento delle condizioni critiche sulla superficie interna.

L'analisi del rischio di condensazione interstiziale viene effettuata mediante il metodo stazionario medio mensile, anche chiamato metodo di Glaser, previsto dalla UNI EN ISO 13788. Tale procedura consente di individuare eventuali fenomeni di condensazione all'interno della stratigrafia attraverso il confronto tra la pressione parziale del vapore e la corrispondente pressione di saturazione. I risultati sono restituiti sotto forma di diagramma di Glaser e di grafico della condensa eventualmente accumulata.

Occorre tuttavia evidenziare che il metodo di Glaser presenta dei limiti di accuratezza, in quanto si basa su un approccio stazionario e considera esclusivamente la diffusione del vapore come meccanismo di trasporto dell'umidità. Non vengono infatti considerati l'accumulo di umidità nei materiali, il trasporto capillare dell'acqua liquida, la capacità igroscopica dei materiali né gli effetti delle variazioni climatiche transitorie. Le condizioni termoigrometriche interne ed esterne sono inoltre rappresentate mediante valori medi mensili.

Il software consente inoltre la valutazione della condensazione interstiziale stazionaria con passo temporale orario, ottenuta mediante l'applicazione del metodo di Glaser a dati climatici orari, fornendo una rappresentazione più dettagliata dell'eventuale evoluzione dei fenomeni di condensazione.

Per quanto riguarda il comportamento estivo della parete, PAN permette di valutare i parametri dinamici della stratigrafia, quali sfasamento e fattore di attenuazione, nonché l'energia termica che attraversa il componente nella simulazione. Tali informazioni consentono di stimare la capacità della parete di limitare il surriscaldamento degli ambienti interni e di confrontare l'efficacia di differenti soluzioni costruttive. Per la definizione di questi parametri è stato necessario definire: l'orientamento della struttura, il fattore d'assorbimento solare del rivestimento esterno, la resistenza superficiale, la temperatura apparente del cielo, la temperatura oraria dell'aria esterna e l'irradianza oraria.

6.2 Modellazione con software WUFI

WUFI 7.2 è il software sviluppato dal Fraunhofer Institute for Building Physics (IBP) per l'analisi igrotermica dinamica delle strutture edilizie. Il software si basa su modelli di calcolo transitori che consentono di simulare il trasporto simultaneo di calore ed umidità all'interno dei materiali porosi, tenendo conto delle reali condizioni climatiche esterne ed interne.

A differenza dei metodi stazionari tradizionali, WUFI considera fenomeni quali l'assorbimento della pioggia battente, il trasporto capillare dell'acqua liquida, la capacità igroscopica dei materiali e le variazioni climatiche nel tempo.

Nel presente studio il software è stato utilizzato per valutare il comportamento igrotermico della stratigrafia di riferimento mediante l'analisi dell'evoluzione nel tempo del contenuto totale d'acqua, del contenuto d'acqua nei singoli strati, dell'andamento della temperatura e dell'umidità relativa all'interno della parete. Particolare attenzione è stata rivolta all'individuazione di eventuali fenomeni di accumulo di umidità, alle condizioni favorevoli alla crescita biologica e alla capacità della stratigrafia di raggiungere condizioni di equilibrio igrotermico nel lungo periodo.

Le simulazioni numeriche sono state inoltre impiegate per analizzare l'influenza di differenti soluzioni costruttive sul comportamento della parete e per individuare possibili strategie di ottimizzazione delle prestazioni igrotermiche della configurazione di riferimento.

Le simulazioni sono state eseguite considerando un periodo di calcolo pari a due anni, ritenuto sufficiente per valutare l'evoluzione del comportamento igrotermico della stratigrafia e l'eventuale raggiungimento di condizioni di equilibrio del lungo periodo.

Definizione delle condizioni al contorno

Per la definizione delle condizioni al contorno esterne è stato selezionato il file climatico relativo alla città di Roma. Il software mette a disposizione i valori orari di temperatura dell'aria, umidità relativa, radiazione solare e precipitazioni per l'intero periodo coperto dal file climatico, consentendo di ricostruire l'andamento delle principali variabili ambientali utilizzati nella simulazione.

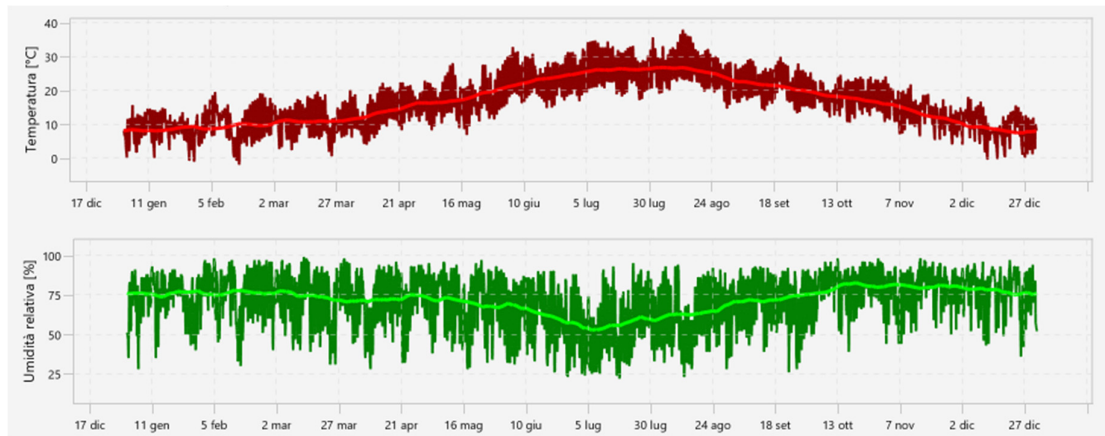


Figura 6.5 - Andamento annuale della temperatura e dell'umidità relativa dell'aria esterna ricavate dal file climatico della città di Roma

Successivamente sono stati definiti l'orientamento, l'inclinazione e l'altezza del componente edilizio. Nel caso studio è stata modellata una parete verticale alta 3 metri con esposizione verso sud. Tali informazioni risultano necessarie per il calcolo degli apporti di radiazione solare e del carico dovuto alla pioggia battente sulla superficie esterna.

Il carico di pioggia viene determinato mediante il modello implementato nel software secondo la seguente relazione:

$$\text{Carico pioggia} = \text{pioggia} \cdot (R1 + R2 \cdot \text{velocità del vento})$$

Dove:

- per “Pioggia” si intende la precipitazione ordinaria.
- “Velocità del vento” rappresenta la componente della velocità media del vento, misurata a 10 m di altezza in aria aperta, perpendicolare alla superficie dell'edificio e determinata a partire dalla velocità media del vento e dalla sua direzione.
- R1 e R2 dipendono dalla specifica posizione considerata della superficie della facciata. R1 è stata assunta pari a 0 in quanto è il valore riferito alle superfici verticali. R2 è stata posta pari a 0,07 [s/m] in quanto è il valore di riferimento per le zone non particolarmente esposte.

Questi valori vengono ricavati dal file climatico selezionato.

Per la superficie esterna è stato inoltre adottato un coefficiente di scambio termico pari a 17 W/m²K, valore comunemente utilizzato per una superficie esterna in accordo con la

normativa tedesca DIN 4108-3. Inoltre, è stato assunto un coefficiente di assorbimento della radiazione solare a onde corte pari a 0,4, corrispondente a un rivestimento esterno di colore chiaro, e un valore di emissività alle onde lunghe pari a 0,9. Nella simulazione è stato infine considerato anche il raffreddamento radiativo della superficie esterna, al fine di tenere conto degli scambi radiativi con la volta celeste, in particolare durante le ore notturne.

Le condizioni climatiche interne sono state definite secondo la norma EN ISO 13788. In tale approccio l'umidità interna viene determinata a partire dall'umidità esterna mediante l'aggiunta di un carico di umidità dipendente dalla temperatura esterna e dalla classe di utilizzo dell'edificio.

La temperatura interna è stata mantenuta costante e pari a 20 °C per l'intero periodo di simulazione.

È stata inoltre adottata la classe di umidità 3, corrispondente a edifici residenziali privi di ventilazione meccanica controllata, alla quale è associato un incremento del contenuto di umidità pari a 6 g/m³ rispetto alle condizioni esterne.

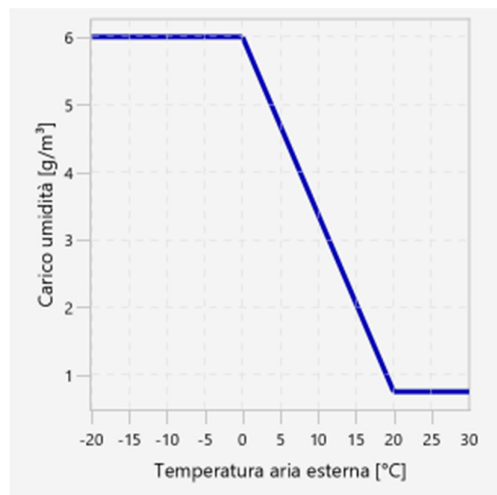


Figura 6.6 - Definizione delle condizioni climatiche interna secondo la EN ISO 13788: andamento del carico di umidità in funzione della temperatura esterna

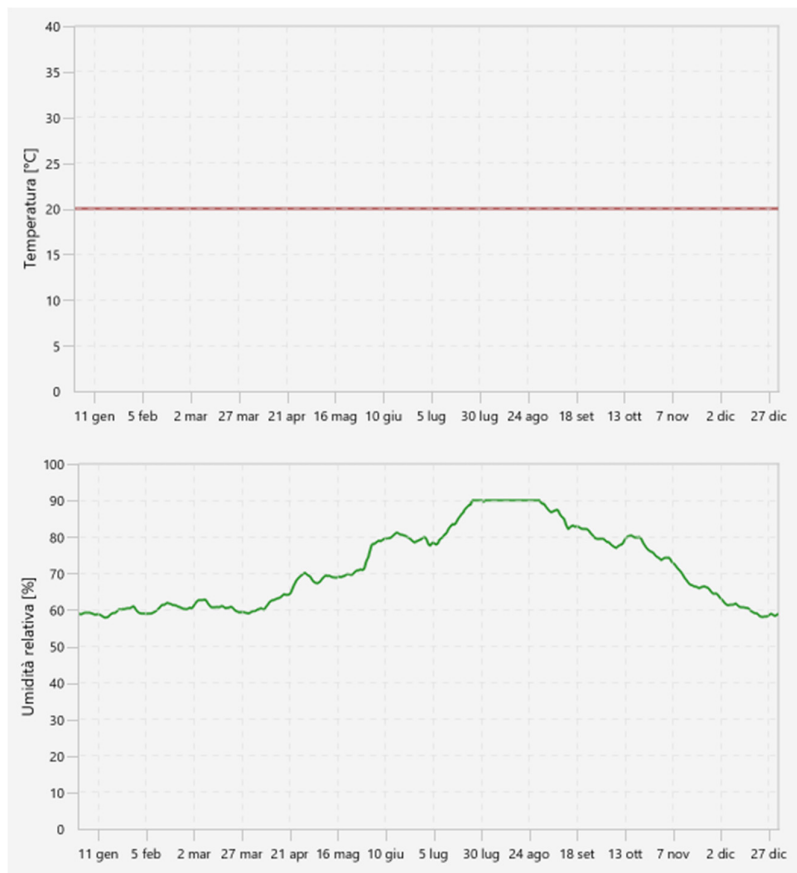


Figura 6.7 - Andamento annuale della temperatura interna di progetto e dell'umidità relativa interna determinata per la classe di umidità 3, in accordo con la EN ISO 13788

Per la superficie interna è stato infine adottato un coefficiente di trasmittanza termica pari a $8 \text{ W/m}^2\text{K}$, valore comunemente utilizzato per superfici interne secondo la normativa tedesca DIN 4108-3.

Definizione della stratigrafia

La configurazione adottata come stratigrafia di riferimento per le simulazioni numeriche è stata modellata utilizzando le proprietà termoigrometriche dei materiali ricavate dalle relative schede tecniche, dai risultati sperimentali ottenuti nel presente lavoro e, ove necessario, da dati disponibili in letteratura. Per ciascun materiale sono stati definiti i parametri necessari alla modellazione, quali conducibilità termica, densità, calore specifico, fattore di resistenza al passaggio del vapore e porosità. La stratigrafia di riferimento risulta pertanto costituita da:

- intonaco esterno in calce Climatherm M di spessore pari a 2 cm;
- isolante termico in paglia Eap Thermus di spessore pari a 26 cm;

- lastra in terra cruda interna Nordtex di spessore pari a 2,2 cm;
- finitura interna in malta di argilla di spessore pari a 1 cm.

Nr.		Strato/Materiale (dall'esterno all'...	Gruppo	Spessore [m]
1		Intonaco CLIMATHERM_M		0,02
2		Paglia_custom		0,26
3		Nordtex lastre terra cruda		0,022
4		Malta di argilla		0,01

Tabella 6.4 - Composizione della stratigrafia di riferimento analizzata con WUFI

Per tutti i materiali è stata inoltre assunta un'umidità relativa iniziale pari al 50%. Tale valore è stato scelto sulla base dei risultati ottenuti dalle prove sperimentali di adsorbimento della paglia descritte nel Capitolo 7.

Oltre alle proprietà termo-fisiche dei materiali, sono state definite anche le rispettive funzioni igrometriche, necessarie per descrivere l'accumulo e il trasporto dell'umidità all'interno della stratigrafia. Per la paglia, la funzione di adsorbimento è stata definita a partire dalla curva sperimentale ottenuta nell'ambito della presente attività di ricerca come verrà descritto al Capitolo 7, mentre per gli altri materiali sono state utilizzate le curve presenti nell'archivio dati del software WUFI.

Sono stati inoltre definiti i coefficienti di trasporto dell'acqua liquida, relativi ai fenomeni di succhiamento e redistribuzione capillare. Tali funzioni sono state generate automaticamente dal software a partire dalle curve di adsorbimento e dal coefficiente di assorbimento dell'umidità A. Per l'intonaco in calce tale coefficiente è stato assunto pari al valore dichiarato dal produttore; per la paglia è stato stimato sulla base dei dati disponibili in letteratura scientifica, mentre per la lastra in terra cruda e la malta di argilla è stato utilizzato il valore presente nell'archivio del software.

I valori utilizzati come dati di input sono riportati al successivo Capitolo 6.3.

Output della simulazione

Il principale parametro analizzato mediante WUFI è il contenuto totale d'acqua del componente $[\text{kg}/\text{m}^2]$ che corrisponde alla somma dei contenuti medi d'acqua di tutti gli strati che compongono la stratigrafia, ponderati in funzione dello spessore di ciascuno strato. Tale grandezza consente di valutare l'evoluzione dell'umidità all'interno della parete durante

l'intero periodo di simulazione. Variazioni stagionali del contenuto d'acqua sono generalmente da considerarsi normali, purchè il sistema tende a raggiungere una condizione di equilibrio nel lungo periodo. Un incremento progressivo e continuo del contenuto d'acqua può invece indicare la presenza di criticità legate all'accumulo di umidità.

Oltre al contenuto totale d'acqua, il software consente di analizzare il contenuto medio d'acqua di ciascuno strato $[\text{kg}/\text{m}^3]$. Tale informazione permette di individuare eventuali fenomeni di accumulo locale di umidità, possibili fenomeni di condensazione o infiltrazione d'acqua piovana ed il rischio di raggiungimento di contenuti d'acqua critici.

Per ciascun punto di monitoraggio possono inoltre essere valutati gli andamenti temporali della temperatura e dell'umidità relativa, consentendo di verificare le condizioni termoigrometriche che si instaurano nei diversi punti della parete durante il periodo di simulazione.

Un ulteriore strumento di analisi è rappresentato dal diagramma temperatura-umidità, nel quale l'umidità relativa viene rappresentata in funzione della temperatura per ciascun intervallo temporale della simulazione. Tale diagramma consente di individuare eventuali condizioni caratterizzate dalla contemporanea presenza di elevata temperatura ed elevata umidità, potenzialmente favorevoli a fenomeni di degrado biologico.

Per le superfici interne il software riporta inoltre le curve limite LIM B I e LIM B II, associate a differenti tipologie di substrato. La curva LIM B I è riferita a materiali biologicamente utilizzabili, quali carta da parati e cartongesso, mentre la curva LIM B II riguarda materiali porosi come intonaci e materiali da costruzione minerali. Se le condizioni termoigrometriche rimangono al di sotto di tali curve, il rischio di crescita delle muffe può essere considerato trascurabile.

Il software permette inoltre di visualizzare i profili di temperatura, umidità relativa e contenuto d'acqua all'interno dell'intera stratigrafia per ogni istante temporale della simulazione, consentendo di analizzare l'evoluzione dei fenomeni di trasporto di calore e umidità nei diversi strati del componente.

Nei materiali igroscopici, come la paglia, l'umidità può essere adsorbita e accumulata all'interno della struttura porosa anche in assenza di condizioni di condensazione nel senso tradizionale del metodo di Glaser. Per questo motivo la sola verifica della presenza o meno di condensa interstiziale non è sempre sufficiente per descrivere il reale comportamento

igrotermico della stratigrafia. Inoltre, nei materiali igroscopici non è sempre possibile distinguere in modo univoco tra umidità adsorbita e acqua di condensazione, poichè tra queste condizioni esiste una transizione graduale. Nelle simulazioni effettuate con WUFI assume quindi particolare importanza l'analisi del contenuto d'acqua, che non si limita alla sola acqua derivante da fenomeni di condensazione, ma comprende l'insieme dell'umidità presente all'interno dei materiali sotto forma di acqua adsorbita, acqua capillare e acqua di condensazione. Tale approccio consente di rappresentare in maniera più realistica i fenomeni di accumulo e trasporto dell'umidità nei materiali porosi e di valutarne i possibili effetti sulle prestazioni e sulla durabilità della parete.

Gli output messi a disposizione dal software consentono quindi di effettuare una valutazione approfondita del comportamento igrotermico della stratigrafia in condizioni dinamiche. Attraverso l'analisi dell'andamento temporale della temperatura, dell'umidità relativa e del contenuto d'acqua nei diversi strati è possibile individuare eventuali fenomeni di accumulo o ridistribuzione dell'umidità, verificare il raggiungimento dell'equilibrio igrotermico e valutare la capacità della parete di smaltire l'umidità adsorbita nel corso del tempo. Tali informazioni costituiscono la base per l'analisi dei risultati presentata nei capitoli successivi.

6.2.1 Ulteriori stratigrafie analizzate con software WUFI

Oltre alla stratigrafia di riferimento definita per il caso studio, sono state analizzate ulteriori configurazioni di parete al fine di valutare l'influenza dei materiali e della disposizione degli strati sul comportamento igrotermico del componente e di individuare possibili strategie di ottimizzazione della configurazione di riferimento. Tutte le simulazioni sono state effettuate utilizzando le medesime condizioni al contorno interne ed esterne descritte nel paragrafo precedente, in modo da consentire un confronto diretto tra le diverse soluzioni costruttive.

A partire dalla configurazione della stratigrafia di riferimento, descritta al paragrafo precedente, sono state quindi sviluppate tre stratigrafie alternative.

La prima prevede la sostituzione dell'intonaco esterno in calce con una lastra di cemento Aquapanel, mantenendo invariati lo strato isolante in paglia di spessore pari a 26 cm, la lastra interna in terra cruda e la finitura interna in malta di argilla.

Nr.	Strato/Materiale (dall'esterno all'...	Gruppo	Spessore [m]
1	 Siniat Duripanel B1 geschliffen		0,018
2	 Paglia_custom		0,26
3	 Nordtex lastre terra cruda		0,022
4	 Malta di argilla		0,01

Tabella 6.5 - Composizione stratigrafia con Aquapanel esterno analizzata con WUFI

La seconda stratigrafia è costituita da un intonaco minerale esterno in sostituzione dell'intonaco in calce, associato a uno strato di paglia di 26 cm e alla medesima lastra interna in terra cruda e finitura in malta d'argilla.

Nr.	Strato/Materiale (dall'esterno all'...	Gruppo	Spessore [m]
1	 Intonaco esterno minerale (valore w...		0,02
2	 Paglia_custom		0,26
3	 Nordtex lastre terra cruda		0,022
4	 Malta di argilla		0,01

Tabella 6.6 - Composizione stratigrafia con intonaco esterno minerale analizzata con WUFI

La terza configurazione rappresenta una soluzione costruttiva differente, caratterizzata da un intonaco minerale rinforzato esterno, uno strato di paglia di 10 cm, una lastra in fibrogesso Fermacell, un secondo strato di paglia da 16 cm, un freno al vapore e una lastra interna in fibrogesso Fermacell.

Nr.	Strato/Materiale (dall'esterno all'interno)	Gruppo	Spessore [m]
1	 Mineral Plaster (stucco, A-value: 0.1 kg/m2h0.5)		0,01
2	 Mineral Reinforced Plaster		0,01
3	 Paglia_custom		0,1
4	 FERMACELL Gypsum-Fibreboard		0,0125
5	 Paglia_custom		0,16
6	 vapor retarder (sd=2m)		0,001
7	 FERMACELL Gypsum-Fibreboard		0,0125

Tabella 6.7 - Composizione stratigrafia multistrato con Fermacell e freno al vapore analizzata con WUFI

Oltre alle stratigrafie precedentemente descritte, sono state effettuate ulteriori simulazioni sulla stratigrafia di riferimento al fine di valutare l'influenza di specifiche condizioni progettuali e ambientali sul comportamento igrotermico della parete.

In particolare, è stata utilizzata una configurazione nella quale è stato inserito un freno al vapore tra la lastra interna in terra cruda e lo strato isolante in paglia. Tale simulazione è

stata eseguita con l'obiettivo di valutare gli effetti di una maggiore resistenza al passaggio del vapore sulla distribuzione dell'umidità all'interno della stratigrafia e sull'eventuale riduzione dei fenomeni di accumulo.

Nr.	Strato/Materiale (dall'esterno all'...	Gruppo	Spessore [m]
1	 Intonaco CLIMATHERM_M		0,02
2	 Paglia_custom		0,26
3	 Freno al vapore (sd=2m)		0,001
4	 Nordtex lastre terra cruda		0,022
5	 Malta di argilla		0,01

Tabella 6.8 - Composizione stratigrafia di riferimento con freno al vapore analizzata con WUFI

È stata inoltre analizzata un'ulteriore configurazione della stratigrafia di riferimento nella quale è stata inserita, sul lato esterno della parete, una membrana traspirante e idrorepellente WÜTOP Thermo Fassade SK prodotta da Adolf Würth. Tale soluzione è stata introdotta con l'obiettivo di valutare l'influenza di una protezione aggiuntiva nei confronti della pioggia battente, mantenendo al tempo stesso un'elevata permeabilità al vapore acqueo.

Nr.	Strato/Materiale (dall'esterno all'...	Gruppo	Spessore [m]
1	 Intonaco CLIMATHERM_M		0,02
2	 Adolf Würth, WÜTOP Thermo Fassa...		0,001
3	 Paglia_custom		0,26
4	 Nordtex lastre terra cruda		0,022
5	 Malta di argilla		0,01

Tabella 6.9 - Composizione stratigrafia di riferimento con membrana traspirante e idrorepellente analizzata con WUFI

È stata inoltre effettuata una simulazione della stratigrafia di riferimento escludendo il contributo della pioggia battente. Questa analisi è stata condotta la fine di valutare l'influenza delle precipitazioni sul comportamento igrotermico della parete e di distinguere gli effetti dovuti al trasporto di umidità proveniente dall'esterno da quelli associati esclusivamente ai fenomeni di diffusione del vapore e agli scambi igrotermici tra ambiente interno ed esterno.

Le simulazioni aggiuntive sono state eseguite mantenendo invariati tutti gli altri parametri di calcolo e le condizioni al contorno adottate per la stratigrafia di riferimento.

L'analisi comparativa di tali stratigrafie ha permesso di valutare l'influenza delle differenti soluzioni costruttive sulla distribuzione dell'umidità, sul contenuto d'acqua dei materiali e sul comportamento igrotermico complessivo della parete nel corso del periodo di simulazione.

6.3 Proprietà dei materiali utilizzate nella modellazione numerica

Nella seguente tabella sono riportati i principali parametri termoigrometrici utilizzati per la definizione dei materiali nelle simulazioni numeriche condotte mediante i software PAN e WUFI. I valori sono stati ricavati, ove disponibili, dalle prove sperimentali eseguite nell'ambito del presente lavoro, dalle schede tecniche dei produttori e, per i parametri non direttamente determinabili, da dati presenti in letteratura o dall'archivio dei materiali dei software utilizzati.

Materiale	Densità apparente [kg/m3]	Porosità [m3/m3]	Capacità termica [J/kgK]	Conduttività termica [W/mK]	Fattore di resistenza al vapore [-]
Isolante in paglia	85	0,9	1500	0,055	1,51
Intonaco in calce Climatherm M	400	0,77	1000	0,057	5
Lastre in terra cruda Nordtex	1450	0,45	1100	0,353	7
Malta di argilla	1568	0,41	488	0,4837	11
Siniat Duripanel B1 geschliffen	1188	0,42	1500	0,35	74
Intonaco minerale	1900	0,24	850	0,8	25
Fermacell	1153	0,52	1200	0,32	16
Freno al vapore (sd=2m)	130	0,001	2300	2,3	2000
Würth Wütop Thermo Fassade SK	219	0,001	2300	2,3	80

7. Risultati sperimentali

7.1 Risultati prova di conducibilità termica

La determinazione della conducibilità termica del materiale ha consentito di caratterizzare il comportamento termico della paglia e di ottenere il parametro necessario per le successive analisi e modellazioni.

La misura di λ è stata infatti utilizzata sia per la definizione delle prestazioni energetiche della stratigrafia oggetto di studio, che come dato di input per le simulazioni igrotermiche condotte mediante i software PAN e WUFI.

Di seguito vengono pertanto presentati i risultati ottenuti dalle prove sperimentali di conducibilità termica eseguite sui campioni analizzati.

Risultati ottenuti

I dati riportati nella tabella seguente sono stati ricavati direttamente dal software utilizzato per l'elaborazione delle misure di conducibilità termica. Come dato di input è stata inserita la massa del provino, mentre lo spessore è stato determinato automaticamente dallo strumento, in funzione della pressione applicata durante la prova. La densità è stata quindi calcolata dal software sulla base di tali parametri. Per questo motivo, i valori riportati nella tabella possono presentare lievi differenze rispetto a quelli indicati nel Capitolo 4.

CAMPIONE	SPESSORE (m)	DENSITÀ (kg/m ³)	PRESSIONE APPLICATA (kPa)	T PIASTRA CALDA (°C)	T PIASTRA FREDDA (°C)	T MEDIA (°C)	CONDUCIBILITÀ TERMICA (W/mK)
C3	7,15	83,90	1,60	20,00	10,00	15,00	0,05400
C5	7,22	80,00	1,40	20,00	10,00	15,00	0,05371
C6	7,18	74,30	1,60	20,00	10,00	15,00	0,05582

Tabella 7.1 - Parametri di prova e valori di conducibilità termica ottenuti per i campioni analizzati

CAMPIONE	λ (W/mK)	λ media (W/mK)	λ (SD) (W/mK)
C3	0,05400	0,05451	0,00114
C5	0,05371		
C6	0,05582		

Tabella 7.2 - Valori di conducibilità termica, valore medio e deviazione standard

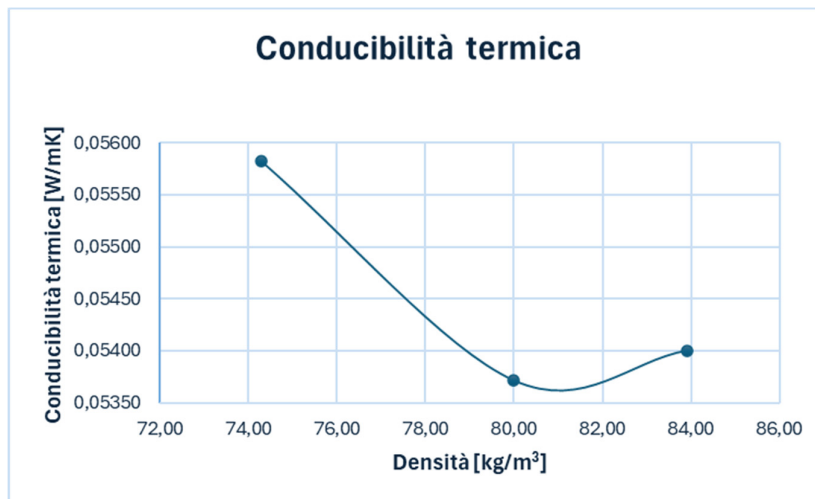


Figura 7.1 - Relazione tra densità e conducibilità termica dei campioni di paglia sottoposti a prova sperimentale

Considerazioni

La Figura 7.1 mostra l'andamento della conducibilità termica in funzione della densità dei campioni analizzati.

Le misure effettuate hanno fornito valori di conducibilità termica compresa tra 0,05371 e 0,05582 W/mK, evidenziando una variabilità contenuta tra i diversi provini. Dall'analisi del grafico, si osserva una diminuzione di λ all'aumentare della densità fino al raggiungimento del valore minimo pari a 0,05371 W/mK, corrispondente ad una densità pari a 80,00 kg/m³. Per densità superiori si registra invece un lieve incremento della conducibilità termica, che raggiunge 0,05400 W/mK nel campione caratterizzato da una densità di 83,90 kg/m³.

I valori di conducibilità termica ottenuti dalle prove sperimentali risultano leggermente superiori rispetto a quello riportato nella scheda tecnica del materiale, pari a 0,041 W/mK. Tale differenza può essere attribuita a diversi fattori, tra cui le specifiche condizioni di prova, lo stato igrometrico dei campioni e la strumentazione utilizzata per le misurazioni.

È inoltre opportuno considerare che il valore dichiarato dal produttore è stato determinato seguendo procedure di prova standard e in condizioni sperimentali controllate, con l'obiettivo di ottenere un valore rappresentativo del materiale.

I risultati ottenuti nel presente studio, pur appartenendo allo stesso ordine di grandezza, riflettono invece le specifiche condizioni operative e sperimentali adottate durante la campagna sperimentale.

7.2 Risultati prova di permeabilità al vapore d'acqua

La prova di permeabilità al vapore d'acqua ha consentito di caratterizzare il comportamento igrotermico della paglia e di valutarne la capacità di opporsi al passaggio del vapore attraverso la propria struttura porosa. L'attività sperimentale ha permesso di determinare il fattore resistenza al vapore μ , parametro che è stato utilizzato per descrivere il comportamento della parete nei confronti dei fenomeni di trasporto dell'umidità e successivamente impiegato come dato di input nelle simulazioni igrotermiche condotte mediante i software PAN e WUFI.

Di seguito vengono pertanto presentati i risultati delle prove sperimentali di permeabilità al vapore acqueo condotte sui campioni analizzati.

Risultati ottenuti

PAGLIA C1	
ΔG (kg)	Δt (s)
0,000	864000,00
0,008	950400,00
0,020	1036800,00
Portata di vapore G (kg/s)	1,15741E-07
Densità portata di vapore g (kg/(m ² ·s))	1,7444E-06
Permeanza al vapore W_p (kg/(m ² ·s·Pa))	1,41245E-09
Permeabilità al vapore d'acqua δ (kg/(m·s·Pa))	1,04945E-10
Fattore di resistenza igroscopica μ	1,86

PAGLIA C4	
ΔG (kg)	Δt (s)
0,000	864000,00
0,012	950400,00
0,024	1036800,00
Portata di vapore G (kg/s)	1,3889E-07
Densità portata di vapore g (kg/(m ² ·s))	2,121E-06
Permeanza al vapore W_p (kg/(m ² ·s·Pa))	1,7174E-09
Permeabilità al vapore d'acqua δ (kg/(m·s·Pa))	1,2915E-10
Fattore di resistenza igroscopica μ	1,51

PAGLIA C7	
ΔG (kg)	Δt (s)
0,000	864000,00
0,012	950400,00
0,032	1036800,00
Portata di vapore G (kg/s)	1,85185E-07
Densità portata di vapore g (kg/(m ² ·s))	2,84509E-06
Permeanza al vapore W_p (kg/(m ² ·s·Pa))	2,30369E-09
Permeabilità al vapore d'acqua δ (kg/(m·s·Pa))	1,70242E-10
Fattore di resistenza igroscopica μ	1,15

Tabella 7.3 - Risultati della prova di permeabilità al vapore acqueo per i campioni C1, C4 e C7

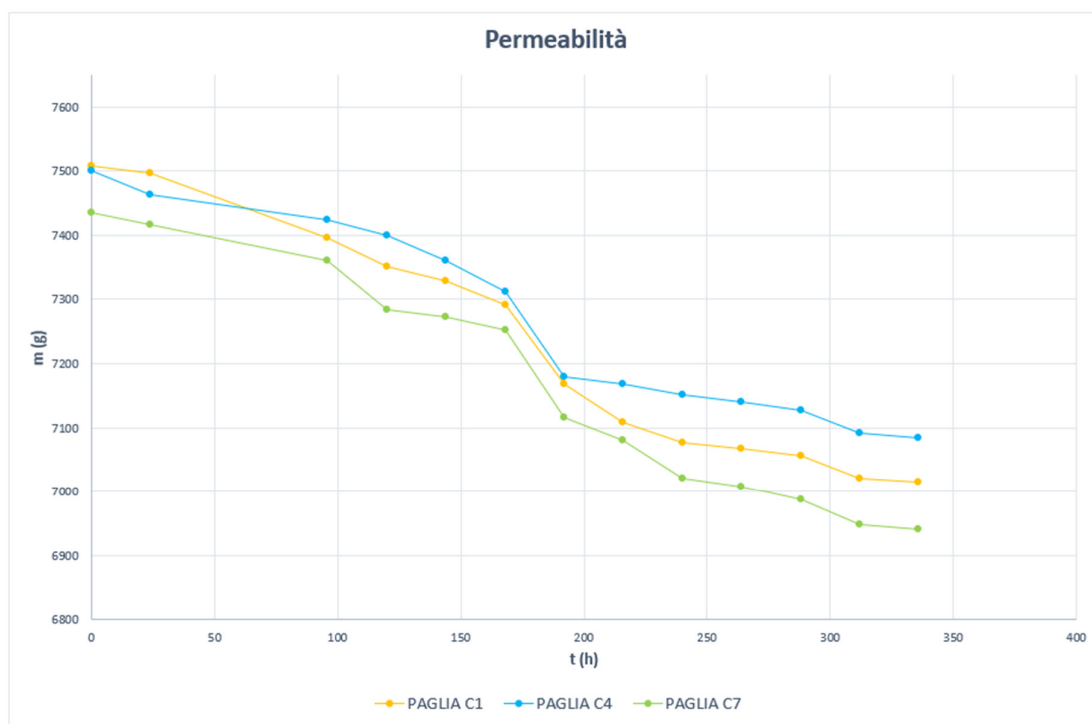


Figura 7.2 - Andamento della massa dei campioni durante la prova di permeabilità al vapore acqueo

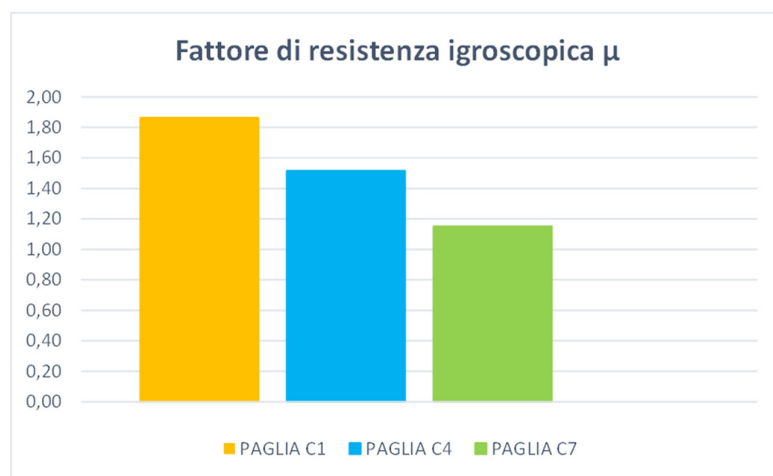


Figura 7.3 - Valori del fattore di resistenza igroscopica ottenuti per i campioni analizzati

Provino	μ	μ media	μ (SD)
PAGLIA C1	1,86	1,51	0,36
PAGLIA C4	1,51		
PAGLIA C7	1,15		

Tabella 7.4 - Valori del fattore di resistenza igroscopica, valore medio e deviazione standard

Considerazioni

Per il calcolo del fattore di resistenza igroscopica μ sono stati considerati gli ultimi valori registrati durante la prova. Tale scelta è stata effettuata sulla base dell'andamento massa-tempo riportato in Figura 7.2, dal quale si osserva che, dopo una fase iniziale caratterizzata da variazioni più marcate, le curve relative ai diversi campioni analizzati assumono un andamento più regolare e pressoché lineare. Questo comportamento indica il raggiungimento di una condizione prossima al regime stazionario di trasferimento del vapore, nella quale la variazione di massa nel tempo può essere considerata sufficientemente stabile per la determinazione del flusso di vapore attraverso il materiale.

L'elaborazione dei dati ha fornito valori del fattore di resistenza alla diffusione del vapore μ compresi tra 1,15 e 1,86, con un valore medio pari a 1,51. Tali risultati evidenziano la limitata resistenza della paglia alla diffusione del vapore acqueo. Per definizione, l'aria presenta un valore di μ pari a 1; i valori ottenuti sperimentalmente risultano pertanto essere dello stesso ordine di grandezza, confermando l'elevata traspirabilità del materiale e la loro capacità di favorire il trasferimento del vapore acqueo, evitando possibili problemi di condensa all'interno delle stratigrafie.

Le differenze riscontrate tra i tre provini risultano contenute e possono essere attribuite alla naturale eterogeneità del materiale. La distribuzione dei vuoti all'interno del campione avviene infatti in maniera non uniforme, influenzando localmente i percorsi di diffusione del vapore e determinando lievi variazioni nei valori misurati.

Il valore medio di μ pari a 1,51, ottenuto sperimentalmente, risulta inferiore a quello dichiarato dal produttore che è pari a 4,4. Tale differenza può essere ricondotta alle diverse condizioni sperimentali adottate, alla naturale variabilità del materiale ed alle caratteristiche specifiche dei campioni analizzati. Nonostante tale scostamento, entrambi i valori confermano la ridotta resistenza del materiale alla diffusione del vapore e, di conseguenza, la sua elevata traspirabilità.

Al termine della prova, i provini sono stati mantenuti nelle condizioni sperimentali previste dal metodo wet cup, con una faccia costantemente esposta ad un'umidità relativa pari al 93-94%. Dopo circa 7 settimane di esposizione nelle suddette condizioni, sulla superficie esposta alle condizioni più umide è stato osservato lo sviluppo di muffe.

Tale fenomeno è riconducibile alle condizioni particolarmente gravose a cui i provini sono stati sottoposti per un periodo prolungato. L'esposizione continua ad elevati livelli di umidità relativa ha infatti favorito il mantenimento di un elevato contenuto d'acqua negli strati superficiali del materiale, creando condizioni favorevoli alla proliferazione microbiologica. Si evidenzia tuttavia che tali condizioni risultano significativamente più severe rispetto a quelle normalmente riscontrabili in esercizio all'interno di una stratigrafia edilizia correttamente progettata.



Figura 7.4 - Tracce di muffa osservate sui campioni al termine della prova di permeabilità al vapore acqueo

7.3 Risultati prova isoterme di adsorbimento

La determinazione della curva di adsorbimento ha consentito di caratterizzare il comportamento igroscopico della paglia, valutando la capacità del materiale di assorbire umidità dall'ambiente al variare dell'umidità relativa.

La prova ha permesso di determinare il contenuto di umidità di equilibrio del materiale ai diversi livelli di umidità relativa, fornendo informazioni fondamentali sulla sua capacità di accumulare e rilasciare vapore acqueo. Al momento della stesura del presente elaborato, la prova sperimentale risulta ancora in corso; pertanto, i valori relativi ai livelli di umidità fino al 75% corrispondono ai dati effettivamente misurati in laboratorio, mentre quelli relativi agli step successivi (85%, 95% e 100%) sono stati stimati sulla base delle curve di adsorbimento reperite in letteratura relative a campioni di paglia con caratteristiche simili. In particolare, tali valori sono stati ricavati mantenendo un andamento coerente con quello osservato negli studi di riferimento, considerando gli incrementi del contenuto di umidità tra i diversi livelli di umidità relativa.

L'insieme dei dati così ottenuti ha costituito un parametro essenziale per la caratterizzazione igrotermica della paglia ed è stato successivamente impiegato come dato di input nelle simulazioni numeriche condotte mediante il software WUFI.

Risultati ottenuti

ASSORBIMENTO - valori sperimentali		
UR (%)	u media [kg/kg]	u (SD)
30	0,0247	0,0011
50	0,0538	0,0015
75	0,1321	0,0037

ASSORBIMENTO - stima da letteratura	
UR (%)	u media [kg/kg]
85	0,1850
95	0,2900
100	0,4200

Tabella 7.5 - Valori sperimentali e valori ricavati dalla stima della letteratura del contenuto d'umidità u

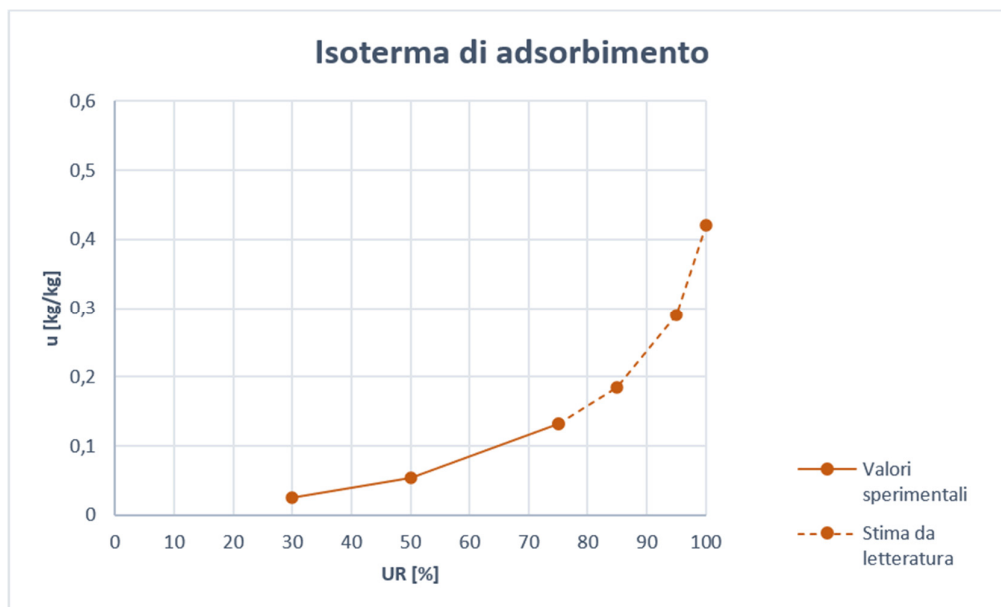


Figura 7.5 - Andamento della curva di adsorbimento

Considerazioni

L'isoterma di adsorbimento riportata in Figura 7.5 evidenzia l'andamento del contenuto di umidità di equilibrio della paglia al variare dell'umidità relativa dell'ambiente.

Si evidenzia che i punti relativi ai livelli di umidità fino al 75% corrispondono ai dati sperimentali ottenuti nel presente studio, mentre quelli relativi all'85%, 95% e 100% sono stati stimati in riferimento alla curva di adsorbimento osservato nello studio di Múnera e Gosselin, mantenendo un andamento coerente con gli incrementi osservati negli studi di riferimento.

Dai risultati sperimentali si osserva che il contenuto di umidità aumenta progressivamente all'aumentare dell'umidità relativa. In particolare, fino al 75% di umidità relativa l'incremento risulta pressoché graduale, mentre per valori superiori si registra un aumento più marcato del contenuto di umidità. I valori relativi all'85%, 95% e 100% di umidità relativa, ricavati dalla letteratura per completare la curva, confermano tale andamento, evidenziando una crescita sempre più accentuata alle elevate umidità relative.

Nel complesso, la curva ottenuta mette in evidenza la capacità della paglia di assorbire quantità crescenti di umidità al crescere dell'umidità relativa dell'ambiente. Tale comportamento risulta particolarmente evidente in prossimità della saturazione, dove anche piccoli incrementi di umidità relativa determinano un aumento significativo del contenuto di umidità del materiale.

8. Risultati analitici

8.1 Risultati modellazione con software PAN

Al fine di valutare le prestazioni termoigrometriche della stratigrafia oggetto di studio è stata effettuata una modellazione numerica mediante il software PAN. I parametri fisici utilizzati come dati di input sono stati riportati al Capitolo 6.

L'analisi ha consentito di determinare le principali prestazioni termiche della parete in regime stazionario e dinamico e di verificare il rischio di formazione di muffa superficiale, condensa superficiale e condensa interstiziale secondo il metodo di Glaser previsto dalla UNI EN ISO 13788. Uno dei principali vantaggi di questa metodologia consiste nella semplicità di applicazione e nella possibilità di effettuare verifiche conformi alle procedure normative. Tuttavia, come descritto nel Capitolo 6, il metodo di Glaser presenta alcune limitazioni legate all'approccio stazionario.

Per tali motivi i risultati ottenuti mediante PAN rappresentano una prima valutazione del comportamento termoigrometrico e verranno successivamente confrontati con quelli ottenuti mediante simulazione dinamica attraverso il software WUFI.

Risultati ottenuti

La simulazione è stata eseguita sulla stratigrafia costituita da 2 cm di intonaco esterno in calce, 26 cm di pannelli in paglia, 2,2 cm di lastra in terra cruda e 1 cm di finitura interna in malta di argilla.

L'analisi ha restituito una trasmittanza termica pari a $0,188 \text{ W/m}^2\text{K}$ e una resistenza termica complessiva di $5,33 \text{ m}^2\text{K/W}$. Per quanto riguarda il comportamento dinamico estivo, la trasmittanza termica periodica risulta pari a $0,085$ e $0,084 \text{ W/m}^2\text{K}$, il fattore di attenuazione assume un valore di $0,451$ e $0,448$ e lo sfasamento dell'onda termica risulta pari a 9 ore e 14 minuti e 9 ore e 18 minuti, rispettivamente per i valori invernali ed i valori estivi

La capacità termica totale della stratigrafia è pari a $83,9 \text{ kJ/m}^2\text{K}$, mentre la massa superficiale complessiva risulta pari a $77,7 \text{ kg/m}^2$.

Nelle seguenti tabelle vengono riportati i risultati ottenuti dalle verifiche eseguite.

Trasmittanza termica stazionaria

Irradianza max nella località [W/m²]	290,6 ≥ 290
Trasmittanza di progetto [W/m²K]	0,188
Trasmittanza di riferimento [W/m²K]	0,29
Confronto con edificio di riferimento	○

Trasmittanza termica periodica e verifiche inerziali

Trasmittanza periodica di progetto [W/m²K]	0,084
Trasmittanza periodica limite requisiti minimi [W/m²K]	0,100
Verifica limite trasmittanza periodica (requisiti minimi)	✓
Massa superficiale esclusi intonaci [kg/m²]	22,1
Massa superficiale limite requisiti minimi [kg/m²]	230
Verifica limite massa superficiale (requisiti minimi)	✗○

Tabella 8.1 - Verifiche trasmittanze software PAN

Fattore di attenuazione	0,45
Sfasamento	9h 18'
Orientamento	Sud
Colore	RGB 255,255,255
Fattore di assorbimento solare	0,6
Energia totale [kWh/m²]	0,150

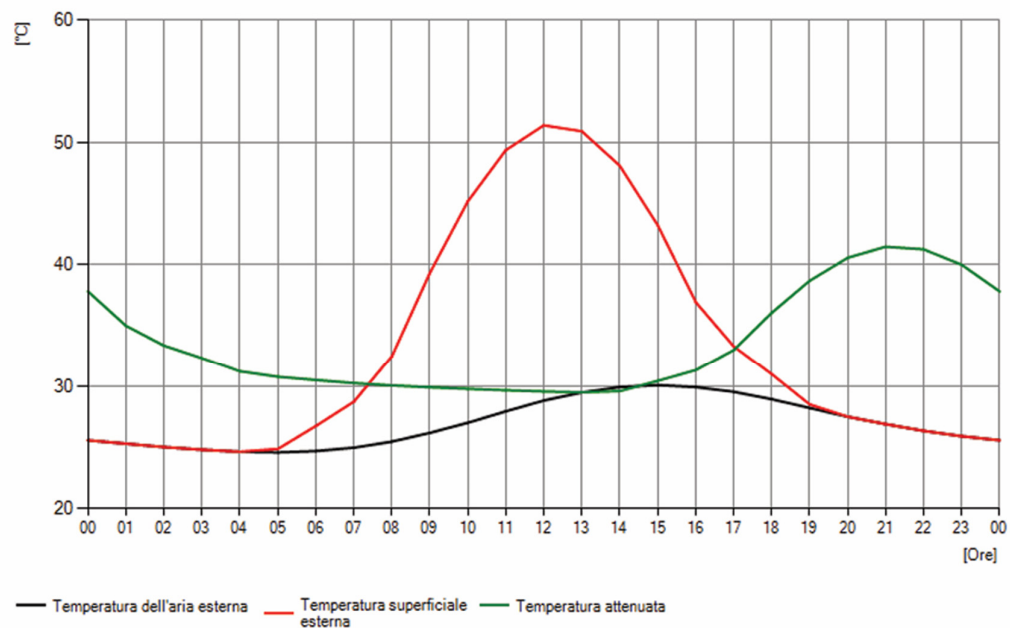


Tabella 8.2 - Valori di sfasamento ed attenuazione software PAN

	θ_e [°C]	P_e [Pa]	UR_e [%]	θ_i [°C]	P_i [Pa]	UR_i [%]
Gennaio	7,1	750	74,4	20,0	1308	56,0
Febbraio	7,4	679	65,9	20,0	1226	52,4
Marzo	11,1	851	64,5	20,0	1268	54,2
Aprile	14,4	1047	63,9	20,0	1346	57,6
Maggio	19,3	1278	56,9	19,3	1401	62,4
Giugno	22,7	1563	56,7	22,7	1663	60,3
Luglio	26,2	1760	51,8	26,2	1860	54,8
Agosto	24,8	1754	56,1	24,8	1854	59,2
Settembre	21,1	1595	63,9	21,1	1695	67,9
Ottobre	16,2	1272	69,1	18,0	1506	73,0
Novembre	11,5	865	63,8	20,0	1267	54,2
Dicembre	8,8	843	74,5	20,0	1341	57,4

Tabella 8.3 - Verifiche igrotermiche superficiali software PAN

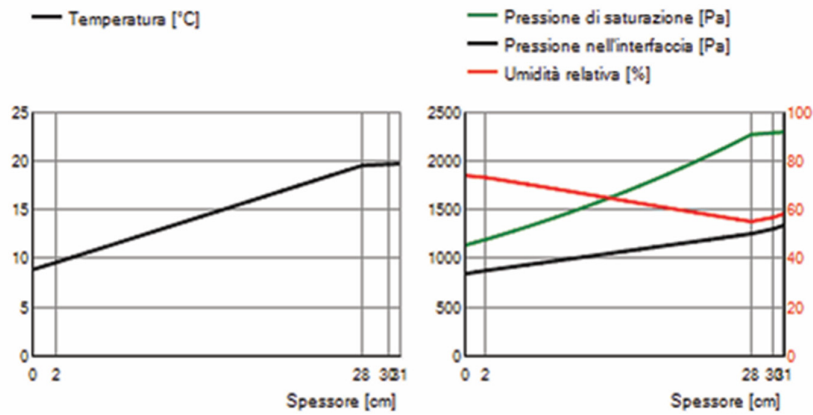
Fattore di temperatura

	Rischio formazione muffa		Rischio condensa superficiale	
	θ_{sm} [°C]	fR_{sm} [-]	θ_{sc} [°C]	fR_{sc} [-]
Gennaio	14,4	0,563	11,0	0,299
Febbraio	13,4	0,472	10,0	0,204
Marzo	13,9	0,314	10,5	-0,066
Aprile	14,8	0,073	11,4	-0,536
Maggio	15,4	-	12,0	-
Giugno	18,1	-	14,6	-
Luglio	19,9	-	16,4	-
Agosto	19,9	-	16,3	-
Settembre	18,4	-	14,9	-
Ottobre	16,6	0,197	13,1	-1,730
Novembre	13,9	0,280	10,5	-0,118
Dicembre	14,7	0,531	11,3	0,226

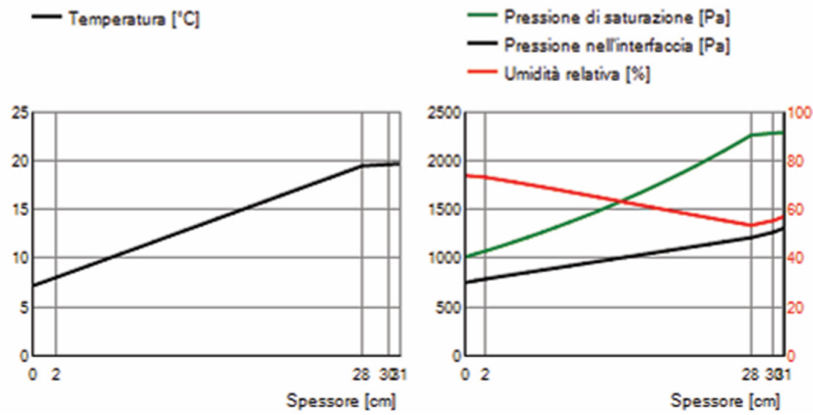
	Rischio formazione muffa	Rischio condensa superficiale
Mese critico	Gennaio	Gennaio
Fattore di temperatura	0,563	0,299
Resistenza minima accettabile [m²K/W]	0,572	0,357
Verifica limite	✓	✓
Resistenza termica dell'elemento [m²K/W]	5,331	

Tabella 8.4 - Verifica del rischio di formazione di muffa superficiale e di condensa superficiale software PAN

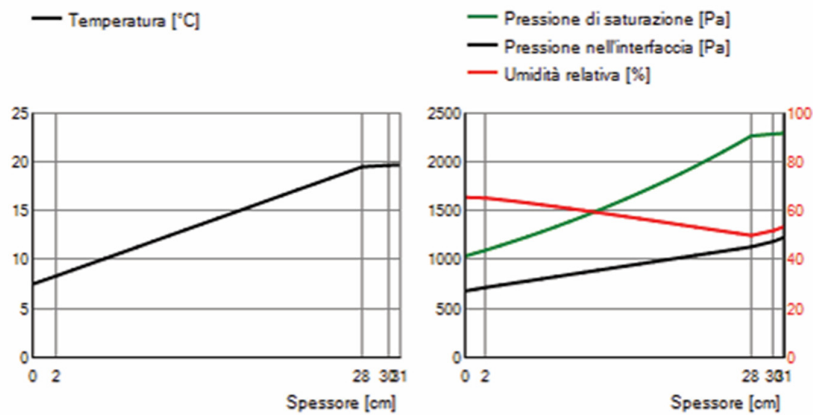
DICEMBRE



GENNAIO



FEBBRAIO



	Rischio condensa interstiziale
Verifica limite	✓

Tabella 8.5 - Verifica condensa interstiziale software PAN

Considerazioni

L'analisi effettuata mediante PAN evidenzia come la stratigrafia studiata presenti prestazioni particolarmente elevate dal punto di vista dell'isolamento termico. Il valore di trasmittanza pari a $0,188 \text{ W/m}^2\text{K}$ risulta infatti significativamente inferiore ai limiti normativi e conferma l'efficacia dello strato isolante in paglia nel limitare le dispersioni termiche attraverso l'involucro. Emerge infatti che la resistenza termica fornita dalla paglia rappresenta quasi il 90% della resistenza termica complessiva della stratigrafia e ciò conferma quantitativamente il ruolo della paglia quale principale elemento responsabile delle prestazioni energetiche della parete.

Per quanto riguarda il comportamento estivo, la trasmittanza termica periodica pari a $0,085 \text{ W/m}^2\text{K}$ risulta inferiore al limite normativo di $0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$, evidenziando una buona capacità della parete di limitare la trasmissione delle oscillazioni termiche provenienti dall'ambiente esterno.

L'analisi restituisce inoltre un fattore di attenuazione pari a 0,45. Ciò significa che l'onda termica incidente viene ridotta di circa il 55% durante l'attraversamento della stratigrafia, consentendo di limitare le variazioni di temperatura sul lato interno della parete. Sebbene tale valore risulti generalmente superiore a quelli ottenibili con strutture massive tradizionali, esso può essere considerato soddisfacente per una parete caratterizzata da elevato isolamento e ridotta massa.

Lo sfasamento dell'onda termica risulta pari a circa 9 ore e 18 minuti. Tale valore indica che il picco di temperatura proveniente dall'esterno raggiunge l'ambiente interno con un ritardo di circa 9 ore. Questo comportamento consente di trasferire parte del carico termico alle ore serali, quando le temperature esterne risultano generalmente inferiori e la ventilazione naturale può favorire la dissipazione del calore accumulato.

Questi risultati ottenuti devono essere interpretati considerando la particolare natura costruttiva della parete analizzata, che si configura come un sistema leggero ad elevate prestazioni termiche, il cui comportamento dinamico è influenzato dalla ridotta massa complessiva. In questo contesto, la lastra interna in terra cruda svolge un ruolo importante nel contributo ai valori di sfasamento ed attenuazione ottenuti.

Nel caso studio, la verifica della massa superficiale non risulta richiesta, mentre risulta pienamente soddisfatta quella relativa alla trasmittanza termica periodica. Le prestazioni

estive della parete possono pertanto essere considerate adeguate, sulla base dei parametri dinamici calcolati.

Dal punto di vista igrotermico, le verifiche effettuate mostrano l'assenza di fenomeni di formazione di muffa superficiale e di condensa superficiale. Il mese più gravoso risulta gennaio; tuttavia, anche nelle condizioni climatiche più sfavorevoli considerate dal software, la stratigrafia soddisfa pienamente le verifiche previste dalla normativa.

Anche la verifica della condensa interstiziale non evidenzia criticità. L'andamento della pressione parziale del vapore risulta infatti sempre inferiore alla corrispondente pressione di saturazione lungo l'intero spessore della parete, escludendo la formazione di condensa dovuta ai soli fenomeni diffusivi. Tuttavia, nel mese di gennaio, identificato come il periodo più critico dal punto di vista igrometrico, si osserva come la pressione parziale del vapore tenda ad avvicinarsi alla pressione di saturazione in corrispondenza della zona esterna della stratigrafia, in prossimità dell'interfaccia tra l'intonaco di calce e lo strato isolante in paglia. Sebbene non vengano raggiunte condizioni di condensazione secondo il metodo di Glaser, tale andamento suggerisce che questa porzione della parete possa rappresentare una zona particolarmente sensibile nei periodi invernali e meriti pertanto ulteriori approfondimenti.

Tale risultato rappresenta una prima indicazione positiva sul comportamento della stratigrafia. Tuttavia, come discusso nel Capitolo 6, il metodo di Glaser si basa su un approccio stazionario e monodimensionale che non considera numerosi fenomeni che influenzano il comportamento reale dei materiali da costruzione. Questi aspetti assumono particolare rilevanza nel caso della paglia, materiale fortemente igroscopico e caratterizzato da una significativa capacità di assorbire e rilasciare umidità. Di conseguenza, l'assenza della condensa interstiziale evidenziata dal metodo di Glaser non consente di escludere completamente possibili fenomeni di accumulo di umidità all'interno della stratigrafia.

Per questo motivo si è ritenuto necessario approfondire l'analisi mediante simulazioni dinamiche con il software WUFI.

8.2 Risultati modellazione con software WUFI

Al fine di approfondire il comportamento igrotermico della stratigrafia oggetto di studio è stata eseguita una simulazione dinamica mediante il software WUFI. A differenza dell'analisi effettuata con PAN, WUFI consente di simulare il trasporto accoppiato di calore ed umidità nel tempo, tenendo conto delle effettive condizioni climatiche esterne, della

capacità di accumulo idrico dei materiali e dei fenomeni di trasporto dell'acqua sia in fase di vapore sia in fase liquida.

La modellazione è stata eseguita utilizzando le proprietà termoigrometriche dei materiali descritte nel Capitolo 6 e le condizioni climatiche relative alla località di Roma. Sono stati considerati gli effetti della radiazione solare, della pioggia battente, degli scambi termici superficiali e delle variazioni climatiche stagionali.

I risultati ottenuti consentono di valutare l'evoluzione temporale del contenuto d'acqua della parete, l'andamento dell'umidità relativa all'interno della stratigrafia e l'eventuale presenza di condizioni favorevoli all'insorgenza di fenomeni di degrado biologico, oltre a fornire indicazioni utili per l'ottimizzazione della configurazione di riferimento e per la pianificazione delle successive attività sperimentali di monitoraggio in opera.

Risultati ottenuti

Come mostrato nelle figure in seguito, l'analisi evidenzia un contenuto di umidità totale variabile nel tempo, caratterizzato da oscillazioni stagionali correlate alle condizioni climatiche esterne. Durante il periodo di simulazione il contenuto d'acqua totale della stratigrafia varia tra 2 e 18 kg/m². Per contenuto d'acqua totale si intende quella derivante dall'umidità presente nei materiali sotto forma di acqua adsorbita, acqua capillare ed acqua di condensazione.

I profili termoigrometrici evidenziano che le condizioni più gravose si verificano in prossimità dell'interfaccia tra l'intonaco esterno e lo strato di paglia, dove l'umidità relativa raggiunge valori prossimi alla saturazione e si mantiene elevata per intervalli temporali più estesi. Sebbene anche negli strati più interni della parete possano verificarsi episodi caratterizzati da valori elevati di umidità relativa, tali condizioni risultano generalmente meno persistenti rispetto a quelle riscontrate nell'interfaccia tra l'intonaco in calce e la paglia, riducendo il tempo di esposizione dei materiali a condizioni potenzialmente critiche.

Sono stati infine analizzati i diagrammi di carico igrotermico locale, che consentono di individuare eventuali situazioni che potrebbero essere favorevoli all'insorgenza di fenomeni di degrado biologico.

In seguito, vengono mostrati gli andamenti ottenuti dalla modellazione.

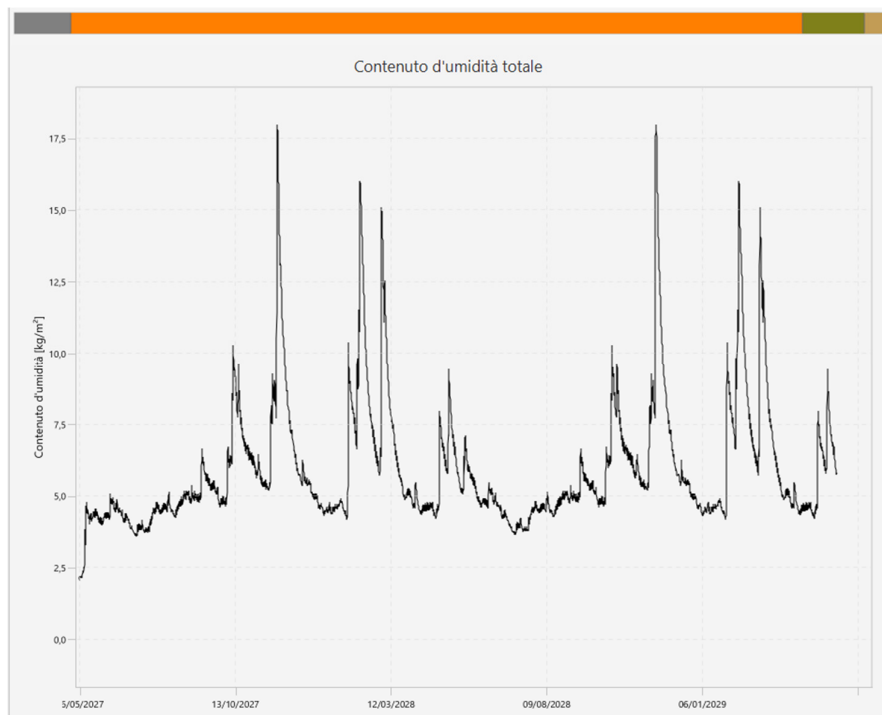


Figura 8.1 - Andamento del contenuto d'umidità totale della stratigrafia di riferimento nel periodo di simulazione

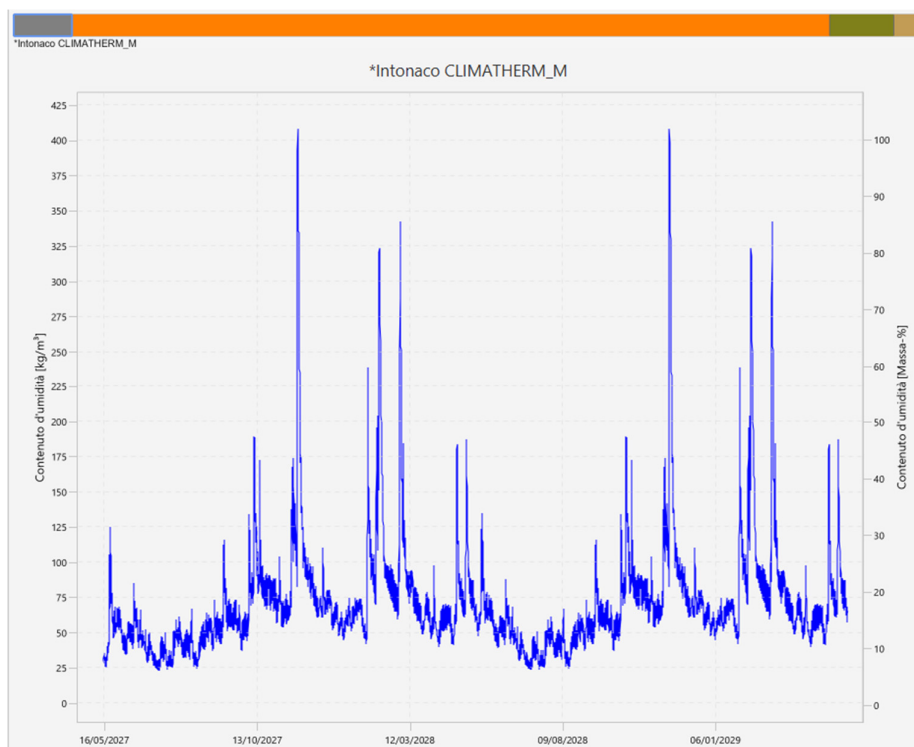


Figura 8.2 - Andamento del contenuto d'umidità dell'intonaco esterno CLIMATHERM M nella stratigrafia di riferimento

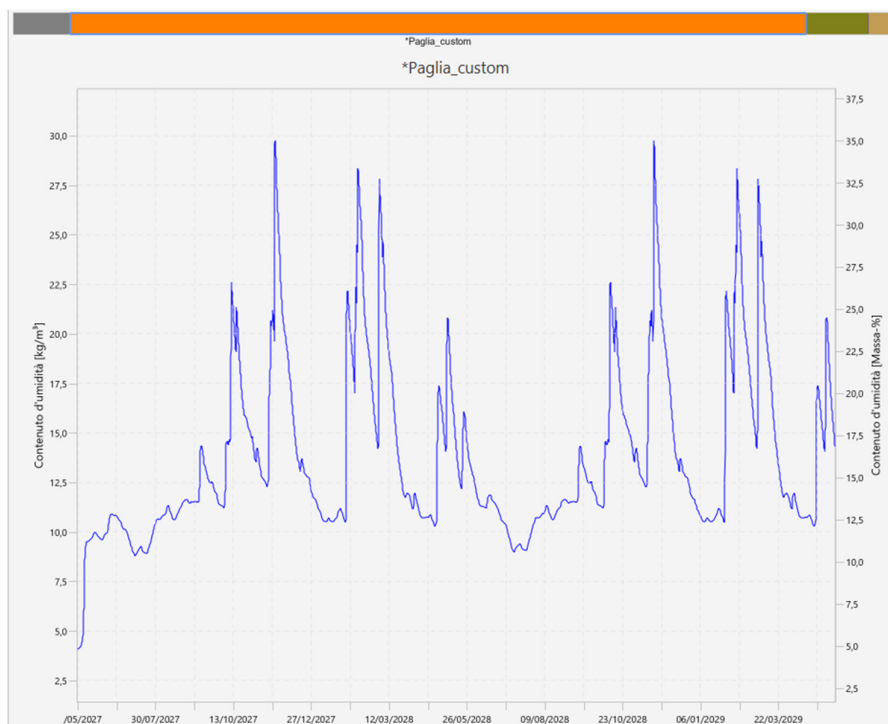


Figura 8.3 - Andamento del contenuto d'umidità della paglia EAP THERMUS nella stratigrafia di riferimento

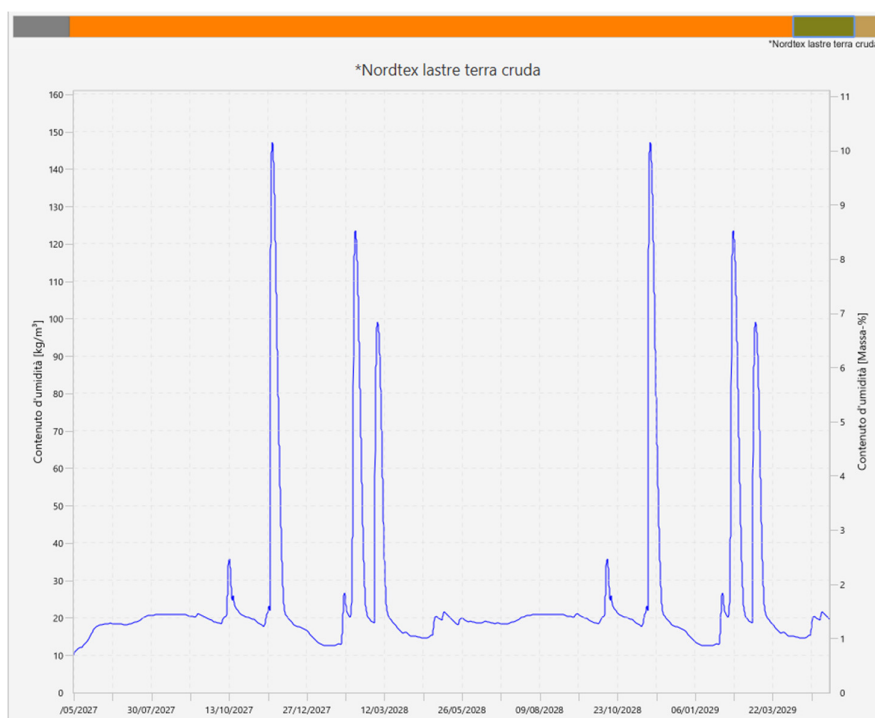


Figura 8.4 - Andamento del contenuto d'umidità della lastra interna in terra cruda NORDTEX nella stratigrafia di riferimento

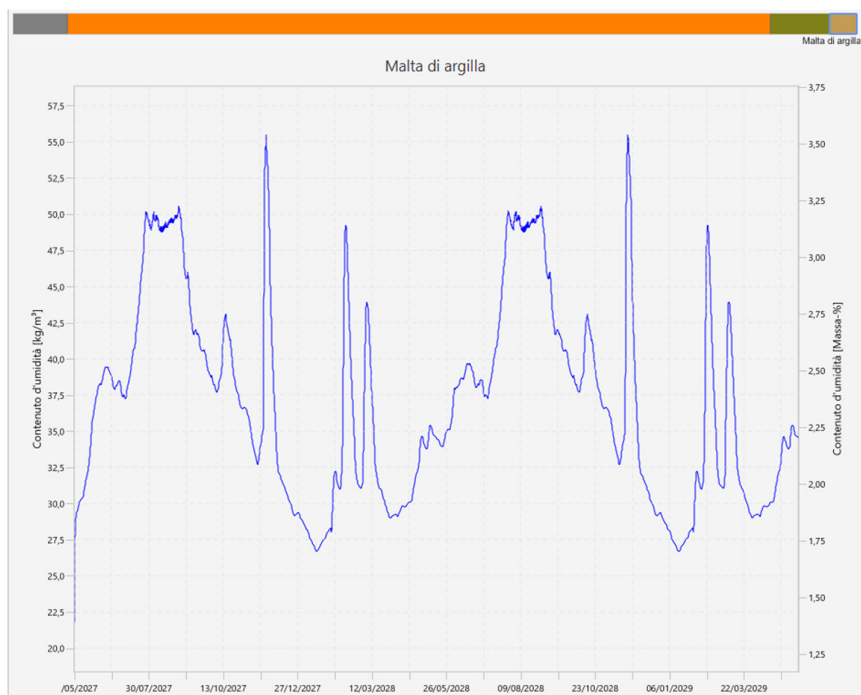


Figura 8.5 - Andamento del contenuto d'umidità della finitura interna in malta d'argilla nella stratigrafia di riferimento

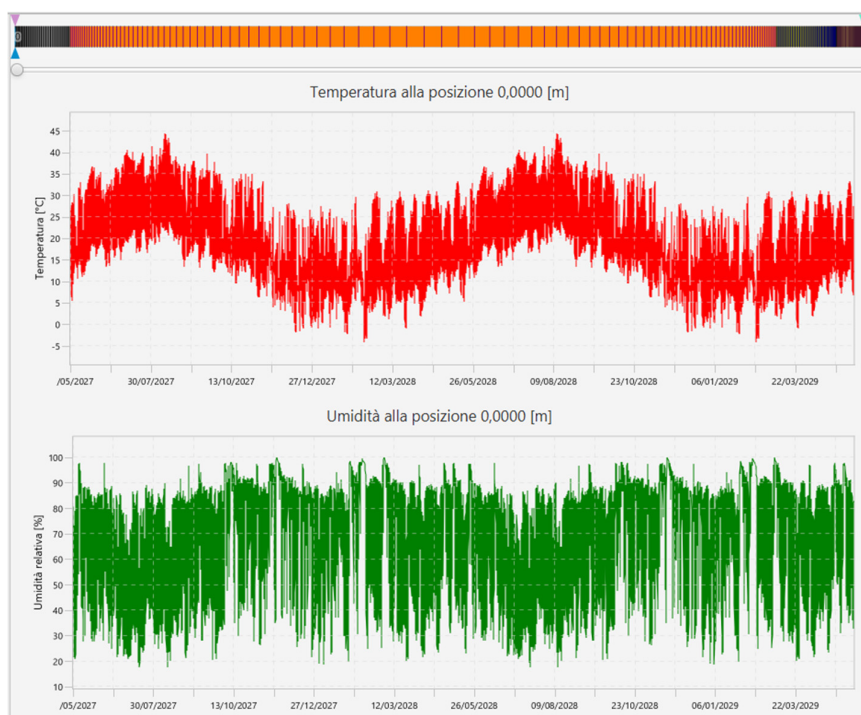


Figura 8.6 - Andamento della temperatura e dell'umidità relativa sulla superficie esterna della parete

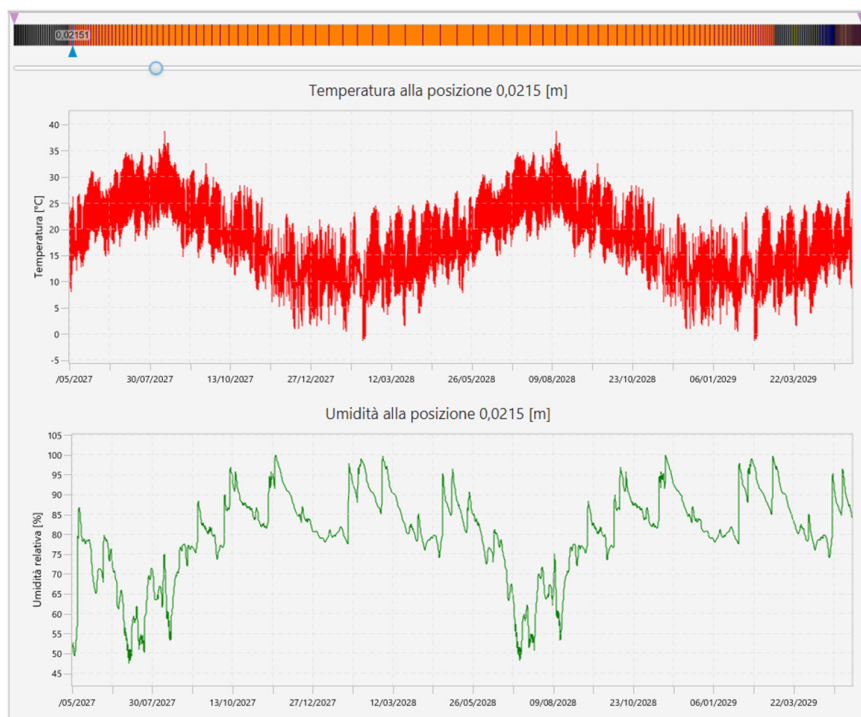


Figura 8.7 - Andamento della temperatura e dell'umidità relativa all'interfaccia intonaco esterno - paglia

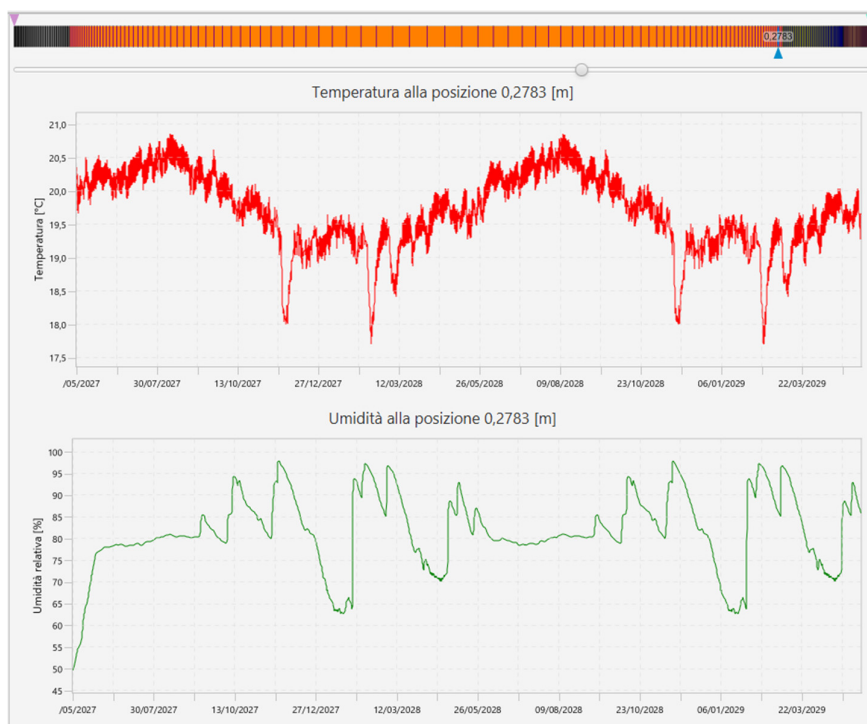


Figura 8.8 - Andamento della temperatura e dell'umidità relativa all'interfaccia intonaco interno - paglia

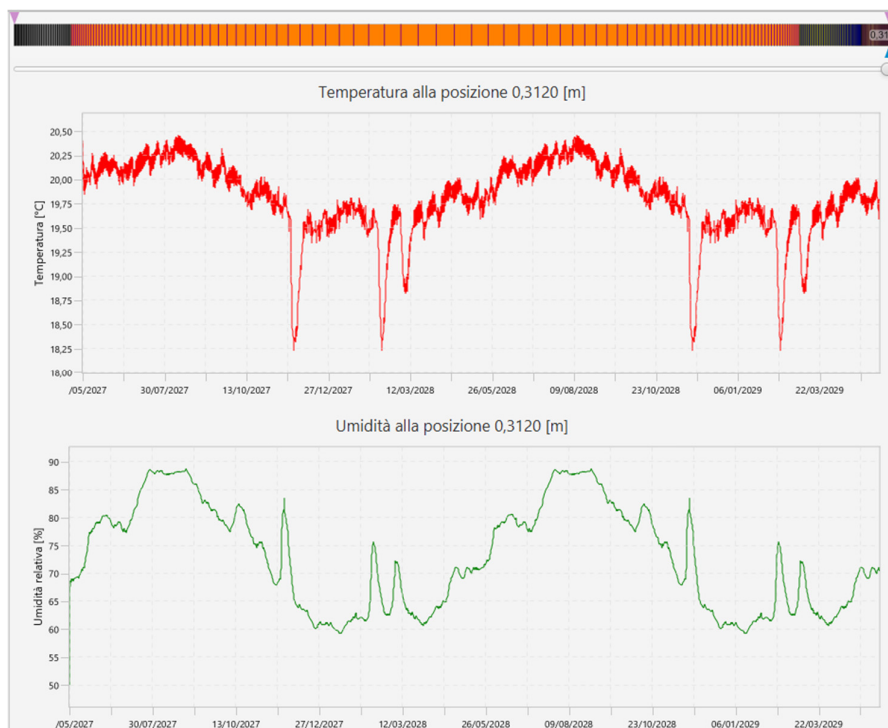


Figura 8.9 - Andamento della temperatura e dell'umidità relativa sulla superficie interna della parete

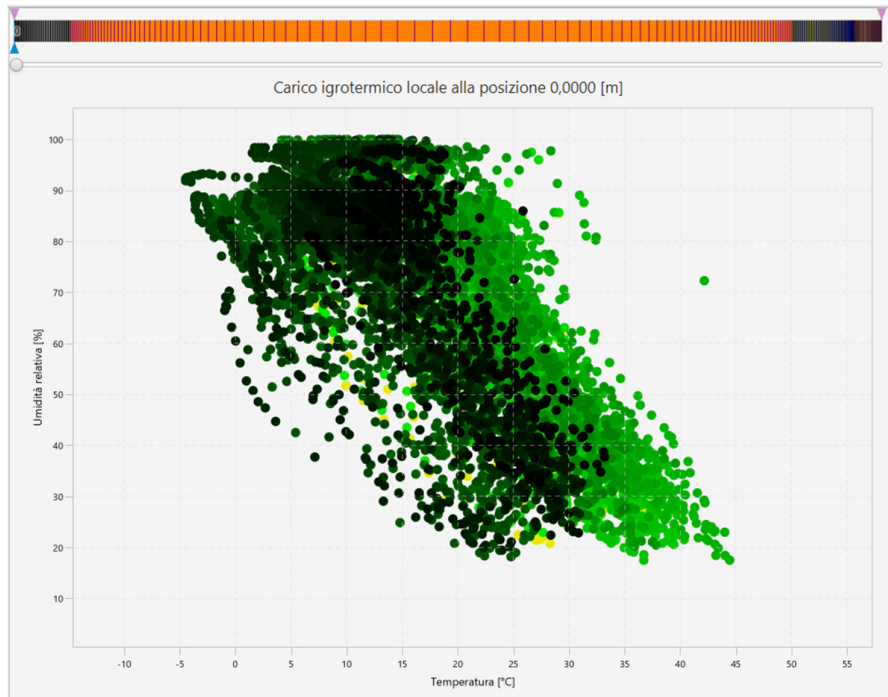


Figura 8.10 - Diagramma del carico igrometrico locale sulla superficie esterna della parete

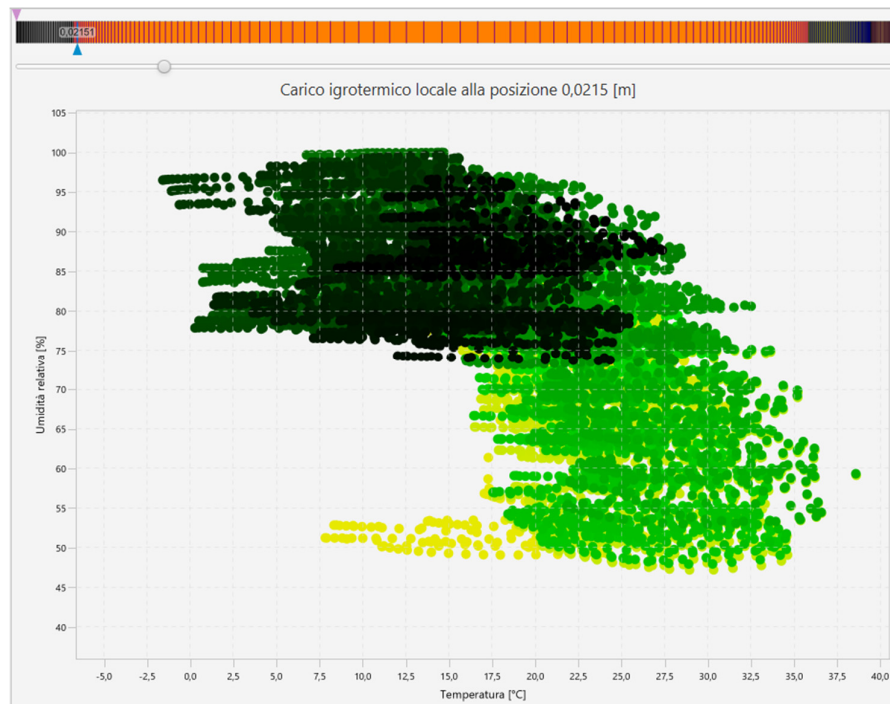


Figura 8.11 - Diagramma del carico igrometrico locale nell'interfaccia intonaco esterno
- paglia

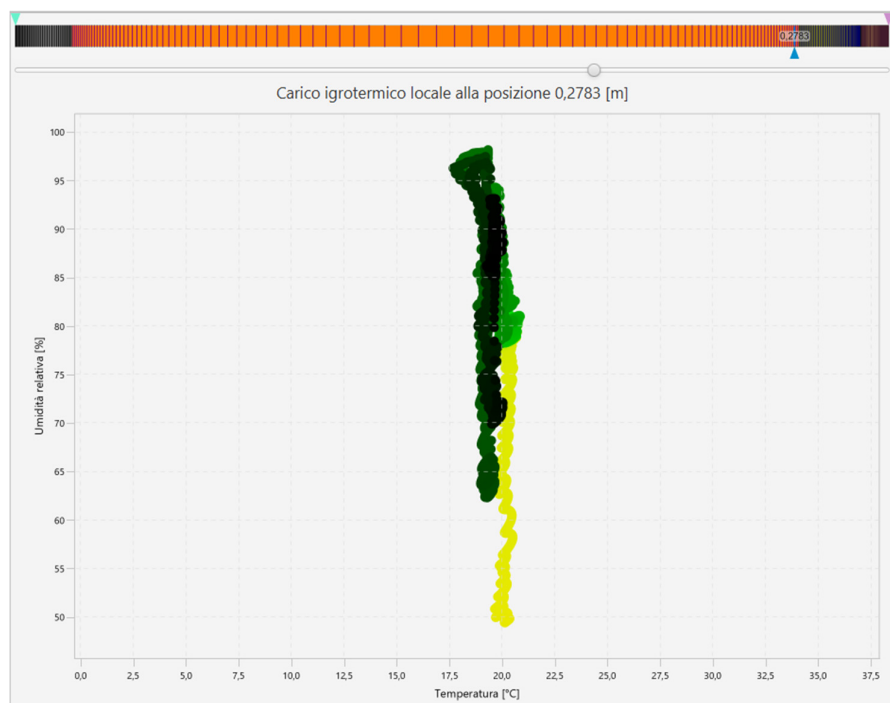


Figura 8.12 - Diagramma del carico igrometrico locale nell'interfaccia intonaco interno
- paglia

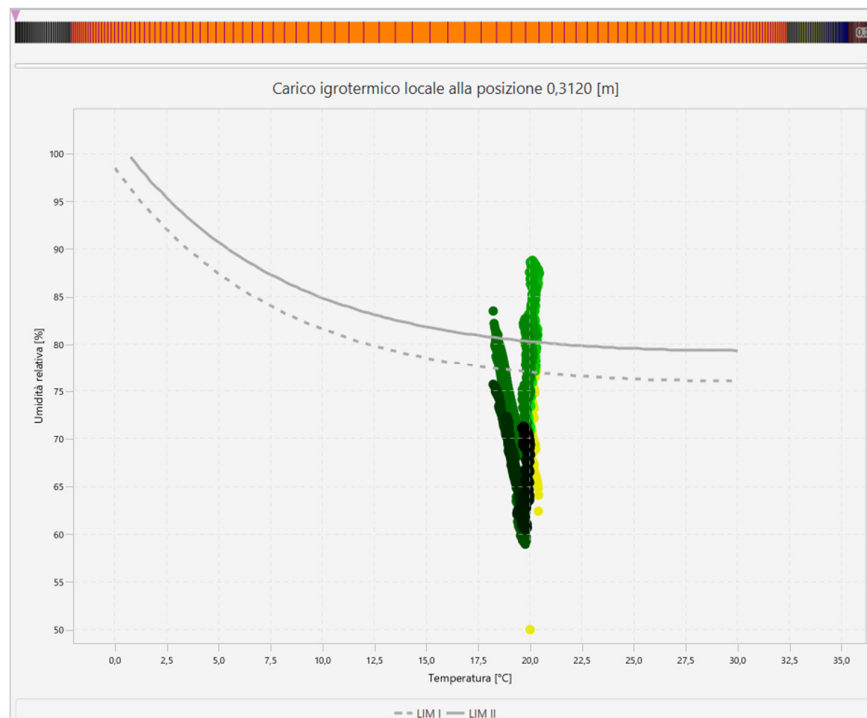


Figura 8.13 - Diagramma del carico igrometrico locale sulla superficie interna della parete

Considerazioni

L'analisi dinamica effettuata mediante WUFI fornisce informazioni significativamente più approfondite rispetto alla verifica stazionaria effettuata con PAN, mettendo in luce condizioni localmente critiche che non emergono dalla sola verifica di Glaser.

Un primo aspetto rilevante riguarda l'evoluzione del contenuto d'acqua complessivo della parete. Nel caso in esame, tale analisi assume particolare importanza poiché l'umidità può essere accumulata all'interno della struttura porosa anche in assenza di fenomeni di condensazione nel senso tradizionale del metodo di Glaser, come illustrato nel Capitolo 6. L'assenza di un incremento progressivo del contenuto d'acqua nel corso della simulazione indica che la stratigrafia possiede una buona capacità di asciugamento. Tale comportamento è confermato dal fatto che l'acqua assorbita durante i periodi climaticamente più sfavorevoli venga successivamente rilasciata senza dare luogo a fenomeni di accumulo permanente. L'analisi del contenuto d'acqua dei singoli materiali evidenzia inoltre che le variazioni osservate risultano compatibili con il comportamento atteso di materiali igroscopici quali la paglia e la terra cruda, nei quali l'umidità viene continuamente assorbita e successivamente rilasciata in funzione delle condizioni ambientali. In quest'ambito, i picchi di contenuto

d'acqua di durata limitata che si verificano all'interno delle lastre in terra cruda e nella malta in argilla di finitura, sono riconducibili a condizioni termoigrometriche transitorie e ai rapidi scambi di umidità tra gli strati della parete. L'intonaco esterno, invece, è caratterizzato da rapidi incrementi del contenuto d'acqua in corrispondenza degli eventi di pioggia, seguiti da una fase di progressivo asciugamento. Tale comportamento evidenzia la capacità del materiale di assorbire temporaneamente l'acqua meteorica e di rilasciarla successivamente verso l'ambiente. La criticità non è pertanto rappresentata dai picchi di contenuto d'acqua raggiunti dall'intonaco stesso, bensì dalla possibilità che parte dell'umidità venga trasferita allo strato di paglia, determinando condizioni di elevata umidità persistente nell'interfaccia tra i due materiali ed all'interno dello strato di paglia stesso.

La principale criticità emersa dall'analisi non è associata al quantitativo complessivo di acqua contenuto nella parete, bensì ai valori elevati di umidità relativa localmente raggiunti in corrispondenza dell'interfaccia tra l'intonaco esterno e la paglia. In tale zona si registrano ripetutamente valori superiori al 90% e, in alcuni episodi, prossimi alla saturazione. Nella maggior parte dei casi tali incrementi risultano tuttavia temporanei e vengono seguiti da una rapida fase di asciugamento, con una riduzione dell'umidità relativa nell'arco di circa una o due settimane. La situazione più critica si osserva invece nel periodo compreso tra la fine di gennaio e la metà di marzo, durante il quale l'umidità relativa permane stabilmente su valori molto elevati per un intervallo di tempo significativamente più lungo. È proprio la persistenza di tali condizioni, più che il raggiungimento di picchi isolati, a rappresentare il principale elemento di criticità, poiché potrebbe favorire l'innescare di fenomeni di degrado biologico, quali la formazione di muffe e la proliferazione di microrganismi.

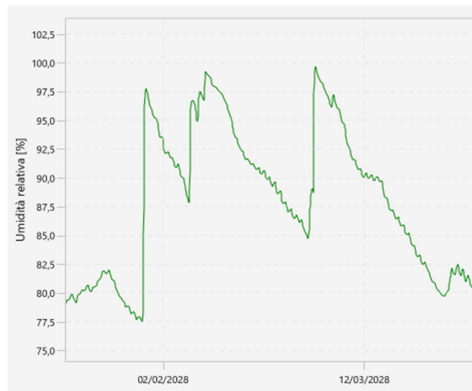


Figura 8.14 - Condizione di umidità relativa all'interfaccia tra l'intonaco esterno e la paglia nel periodo gennaio - marzo

Sebbene la verifica stazionaria effettuata con PAN abbia escluso la presenza di condensa interstiziale, la simulazione dinamica evidenzia che l'accumulo temporaneo di umidità dovuto ai fenomeni di trasporto e di assorbimento nei materiali porosi può determinare condizioni locali sensibilmente più gravose. I risultati ottenuti suggeriscono inoltre che la principale sorgente di umidità sia riconducibile all'azione degli agenti atmosferici sulla superficie esterna della parete, interpretazione confermata anche dalle simulazioni comparative illustrate nei paragrafi successivi.

Per quanto riguarda il rischio di degrado biologico, l'analisi è stata effettuata mediante i diagrammi di carico igrotermico locale, che consentono di confrontare le condizioni termoigrometriche registrate nei punti monitorati con le curve limite LIM, individuando eventuali combinazioni di temperatura e umidità relativa potenzialmente favorevoli alla crescita microbiologica. Dall'analisi dei diagrammi relativi alla superficie interna della parete emerge che alcune condizioni termoigrometriche superano localmente le curve limite LIM B I e LIM B II. Tali superamenti risultano tuttavia limitati e associati a specifiche combinazioni di temperatura e umidità relativa che si verificano durante particolari periodi dell'anno. Comunque, non è possibile escludere completamente la formazione di fenomeni di degrado biologico sulla superficie interna della parete.

È inoltre opportuno evidenziare che la superficie esterna della parete non può essere considerata rappresentativa ai fini della valutazione del rischio biologico, poiché le condizioni termoigrometriche risultano fortemente influenzate dagli agenti atmosferici. I valori registrati in tale zona devono pertanto essere interpretati come il risultato dell'interazione diretta con l'ambiente esterno e non come indicativi delle condizioni interne della stratigrafia.

Nel complesso, la simulazione dinamica evidenzia una stratigrafia dotata di una buona capacità di asciugamento e caratterizzata dall'assenza di fenomeni di accumulo progressivo dell'umidità nel periodo analizzato. L'analisi ha individuato come zona maggiormente critica l'interfaccia tra l'intonaco esterno e la paglia, scelta come riferimento per le successive valutazioni in quanto caratterizzata dai valori di umidità relativa più elevati e dalla maggiore persistenza di tali condizioni nel tempo, rappresentando quindi la condizione igrotermica più gravosa dell'intera stratigrafia. Ciò non implica tuttavia che il resto dello strato di paglia sia esente da condizioni di elevata umidità relativa, che risultano comunque presenti, seppur con valori inferiori e per intervalli temporali generalmente più limitati.

Sebbene i risultati ottenuti non consentano di affermare la presenza di fenomeni di degrado biologico, essi evidenziano condizioni termoigrometriche che meritano particolare attenzione progettuale e per le quali non è possibile escludere completamente l'insorgenza di fenomeni biologici nelle zone maggiormente sollecitate della stratigrafia. Tali considerazioni hanno pertanto motivato l'analisi delle configurazioni alternative presentate nel paragrafo successivo.

8.2.1 Risultati ulteriori stratigrafie analizzate con software WUFI

Al fine di approfondire il comportamento della stratigrafia di riferimento e valutare possibili strategie di mitigazione delle condizioni risultate localmente critiche, sono state eseguite ulteriori simulazioni mediante il software WUFI, mantenendo inalterate le condizioni climatiche e le principali impostazioni di calcolo adottate per la configurazione di riferimento.

Le configurazioni analizzate possono essere suddivise in due gruppi. Il primo gruppo comprende alcune simulazioni di sensitività eseguite sulla stratigrafia di riferimento, finalizzate a valutare l'influenza di specifici parametri sul comportamento igrotermico della parete. In particolare, sono state analizzate una configurazione caratterizzata dall'inserimento di un freno al vapore sul lato interno della parete, una configurazione con l'inserimento di una membrana traspirante sul lato esterno e una simulazione nella quale è stato escluso il contributo della pioggia battente dalle condizioni al contorno.

Il secondo gruppo comprende invece alcune stratigrafie alternative, ottenute modificando lo strato esterno della parete al fine di valutare l'influenza delle caratteristiche dei materiali sulle prestazioni igrotermiche del sistema. In particolare, sono state analizzate una configurazione caratterizzata dalla sostituzione dell'intonaco esterno in calce con un pannello Aquapanel, una configurazione con intonaco minerale esterno e una stratigrafia multistrato costituita da pannelli di paglia, lastre in fibrogesso Fermacell e freno al vapore.

L'obiettivo delle simulazioni comparative è individuare le cause delle criticità osservate nella configurazione di riferimento e valutare l'efficacia di diverse soluzioni progettuali nel ridurre i livelli di umidità all'interno della parete.

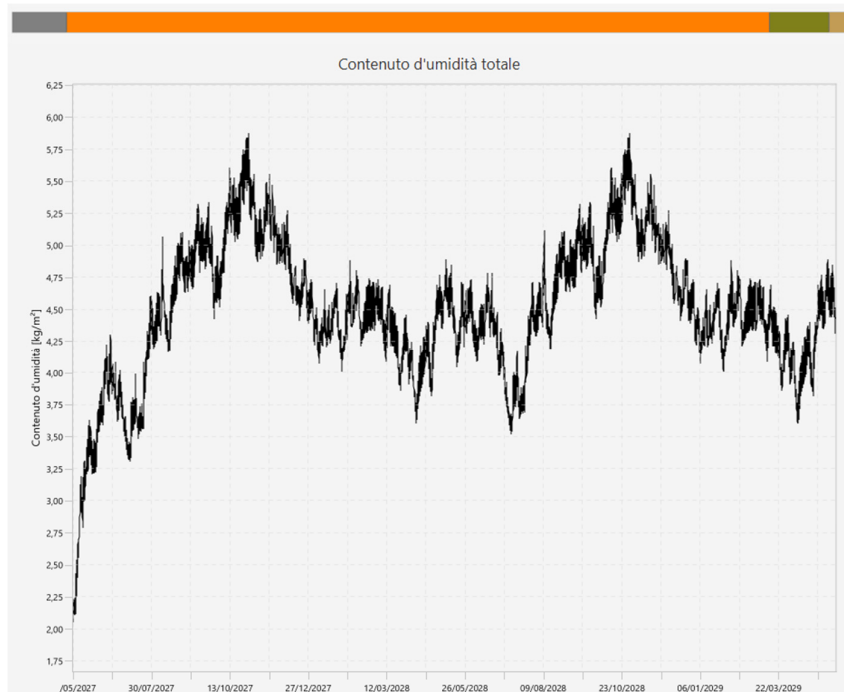
8.2.1.1 Analisi di sensibilità: esclusione del contributo della pioggia battente

Risultati ottenuti

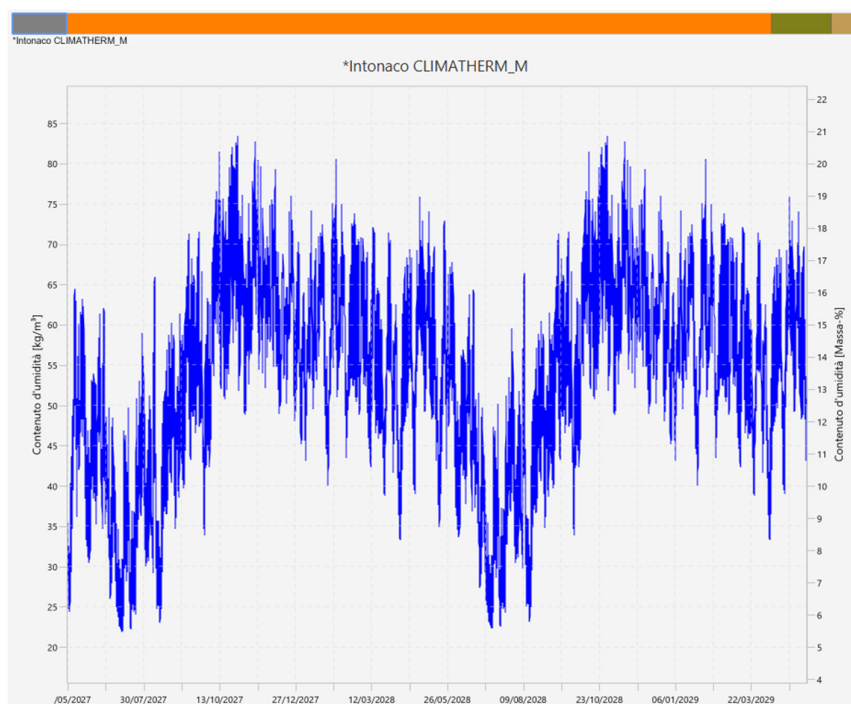
Al fine di valutare l'influenza della pioggia battente sul comportamento igrotermico della parete, è stata eseguita una simulazione della stratigrafia di riferimento escludendo il contributo delle precipitazioni atmosferiche dalle condizioni al contorno. Il contenuto d'umidità totale della stratigrafia risulta compreso tra circa 2,15 e 5,87 kg/m² durante l'intero periodo di simulazione.

Il contenuto d'acqua dei singoli materiali raggiunge valori massimi pari a circa 83,42 kg/m³ nell'intonaco esterno in calce, 13,35 kg/m³ nella paglia, 20,81 kg/m³ nelle lastre in terra cruda e 50,56 kg/m³ nella malta di finitura interna.

Nella zona monitorata in prossimità dell'interfaccia tra l'intonaco esterno e la paglia, l'umidità relativa varia indicativamente tra il 45% e l'85%, senza raggiungere condizioni prossime alla saturazione. L'analisi del carico igrotermico locale evidenzia inoltre valori di umidità relativa generalmente inferiori all'80%, con limitati episodi compresi tra l'80% e l'85%.



*Figura 8.15 - Andamento del contenuto d'umidità totale della stratigrafia di riferimento
- simulazione senza pioggia battente*



*Figura 8.16 - Andamento del contenuto d'umidità dell'intonaco esterno CLIMATHERM
M nella stratigrafia di riferimento - simulazione senza pioggia battente*

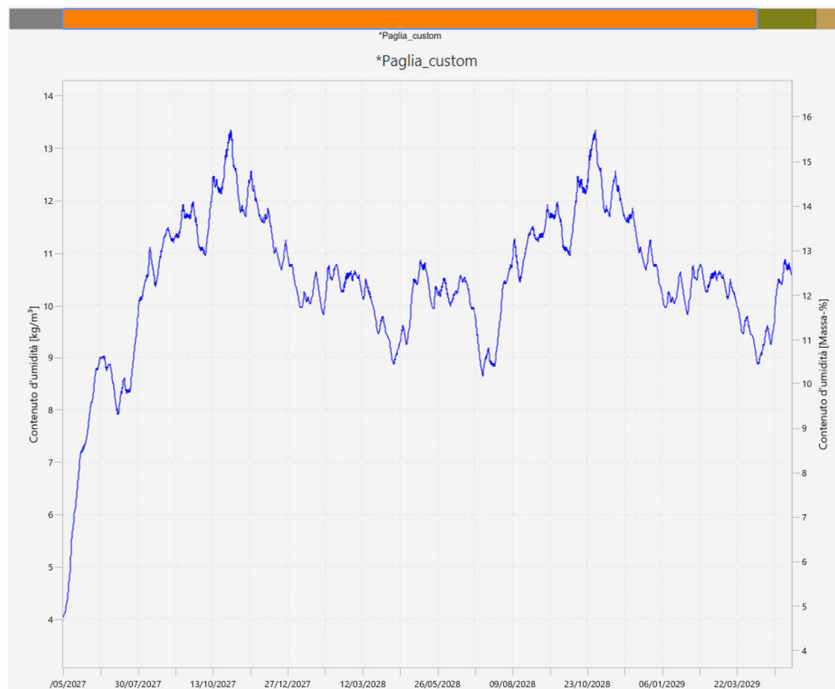


Figura 8.17 - Andamento del contenuto d'umidità della paglia EAP THERMUS nella stratigrafia di riferimento - simulazione senza pioggia battente

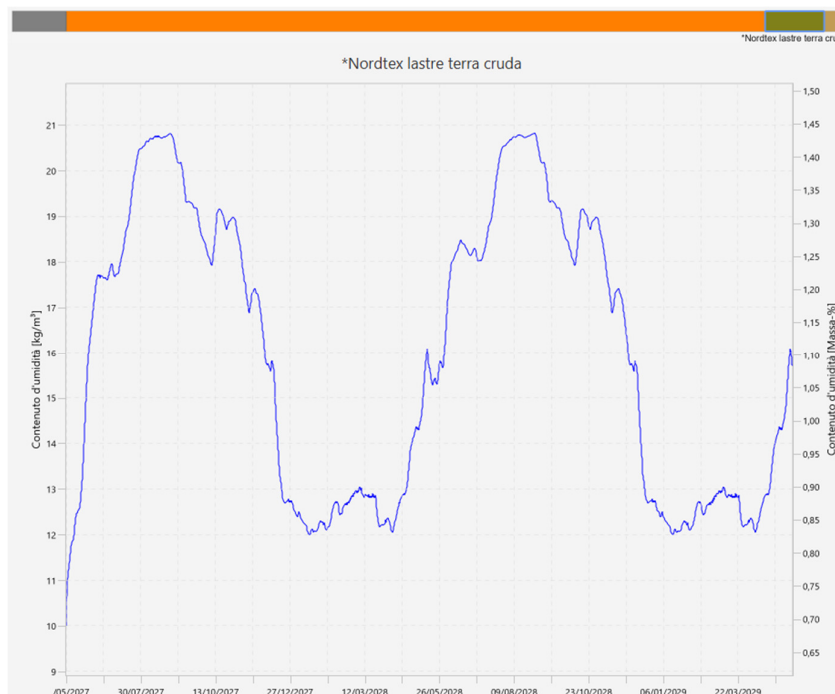


Figura 8.18 - Andamento del contenuto d'umidità della lastra interna in terra cruda NORDTEX nella stratigrafia di riferimento - simulazione senza pioggia battente

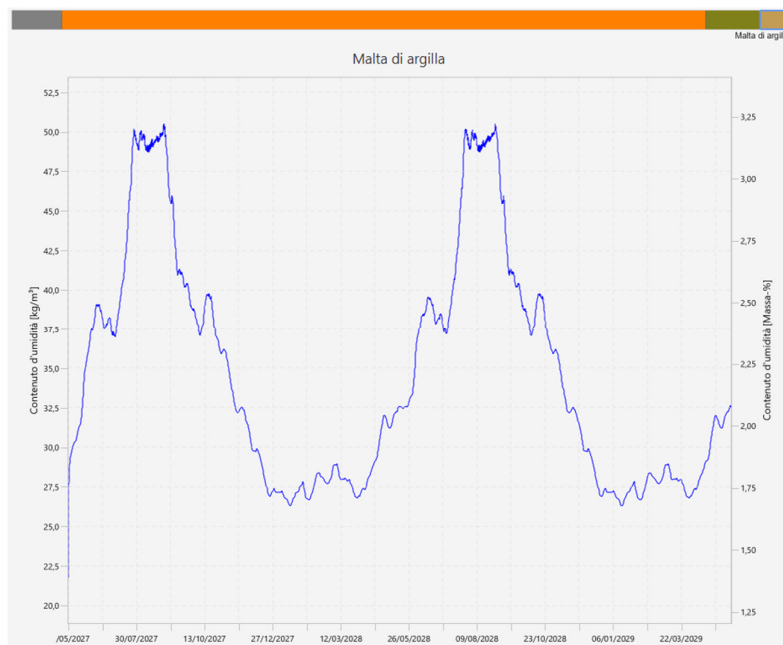


Figura 8.19 - Andamento del contenuto d'umidità della finitura interna in malta d'argilla nella stratigrafia di riferimento - simulazione senza pioggia battente

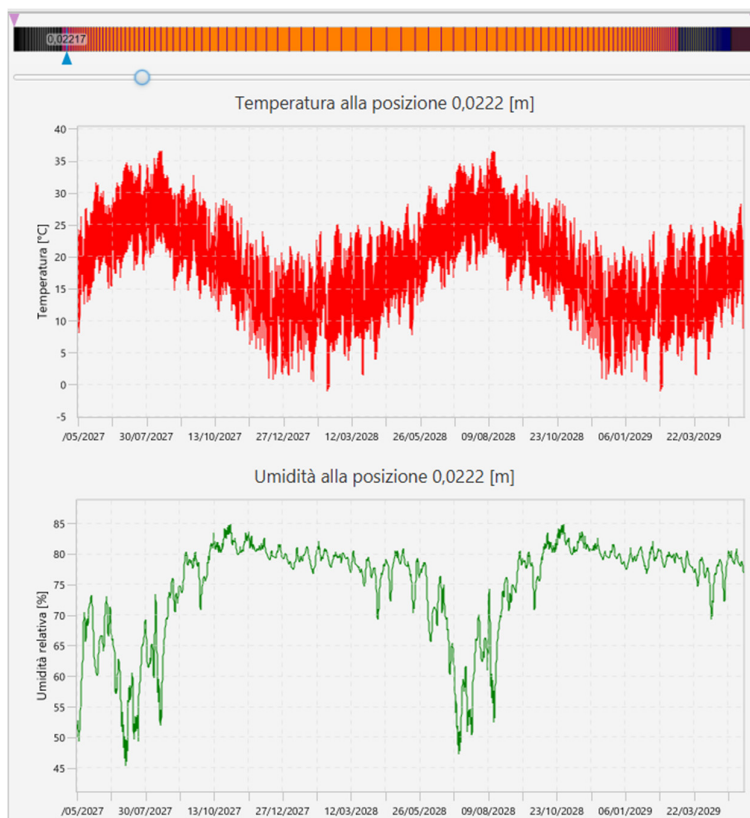


Figura 8.20 - Andamento della temperatura e dell'umidità all'interfaccia intonaco esterno - paglia nella stratigrafia di riferimento - simulazione senza pioggia battente

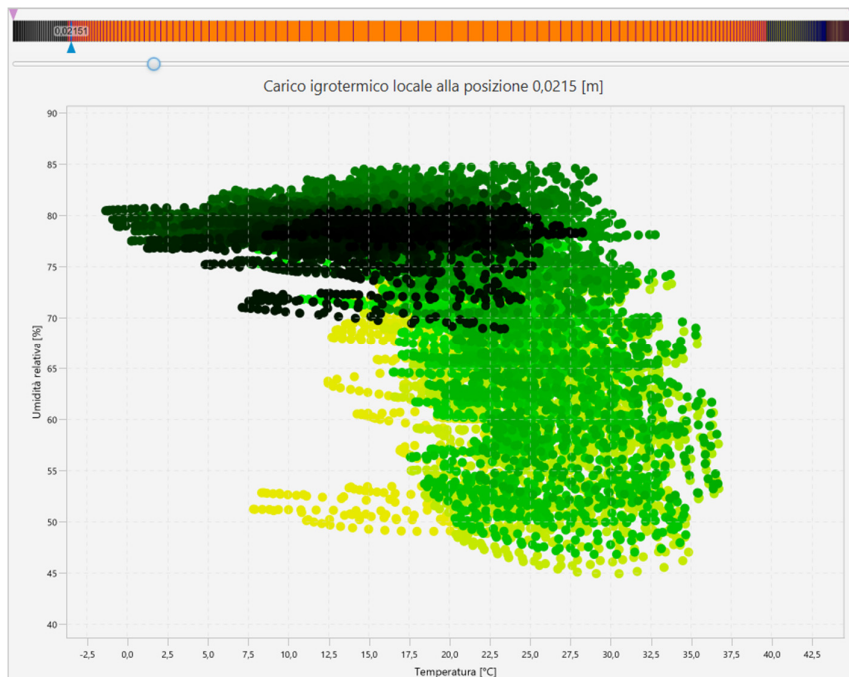


Figura 8.21 - Diagramma del carico igrotermico locale nell'interfaccia intonaco esterno - paglia nella stratigrafia di riferimento - simulazione senza pioggia battente

Considerazioni

Rispetto alla stratigrafia di riferimento, l'esclusione della pioggia battente determina una marcata riduzione sia del contenuto d'umidità complessivo della parete sia del contenuto d'acqua dei singoli materiali. In particolare, scompaiono i picchi di accumulo osservati nella configurazione originaria e non vengono più raggiunte condizioni prossime alla saturazione nell'interfaccia tra l'intonaco esterno e la paglia.

È inoltre importante osservare che i limitati episodi caratterizzati da valori di umidità relativa compresi tra l'80% e l'85% risultano di durata molto breve, generalmente dell'ordine di pochi giorni, ai quali segue un rapido ritorno verso valori inferiori.

Tali risultati evidenziano come le condizioni igrometriche più gravose riscontrate nella stratigrafia di riferimento siano principalmente riconducibili all'apporto di acqua meteorica attraverso lo strato esterno della parete. L'assenza della pioggia battente comporta infatti una significativa riduzione dei livelli di umidità raggiunti nella stratigrafia, confermando il ruolo determinante delle precipitazioni atmosferiche nel determinare la criticità osservata nell'interfaccia tra l'intonaco esterno e la paglia. L'influenza della pioggia battente si riflette inoltre anche sugli strati più interni della parete: pur non essendo direttamente esposte agli agenti atmosferici, le lastre in terra cruda mostrano una sensibile riduzione dei picchi di

contenuto d'acqua in assenza delle precipitazioni, a conferma che l'umidità assorbita dallo strato esterno viene successivamente redistribuita all'interno della stratigrafia attraverso i materiali igroscopici.

8.2.1.2 Analisi di sensibilità: aggiunta del freno al vapore

Risultati ottenuti

Al fine di valutare l'influenza del flusso di vapore proveniente dall'ambiente interno sul comportamento igrotermico della parete, è stata eseguita una simulazione della stratigrafia di riferimento introducendo un freno al vapore sul lato interno, posizionato tra la lastra in terra cruda e la paglia.

Il contenuto d'umidità totale della stratigrafia risulta compreso tra circa 2,0 e 17,06 kg/m² durante il periodo di simulazione. L'andamento mostra oscillazioni stagionali simili a quelle osservate nella stratigrafia di riferimento, con picchi elevati concentrati nei periodi climaticamente più sfavorevoli.

Nella zona monitorata in prossimità dell'interfaccia tra lo strato esterno e la paglia, l'umidità relativa assume valori compresi tra circa il 47% e il 100%, raggiungendo in più occasioni condizioni prossime alla saturazione.

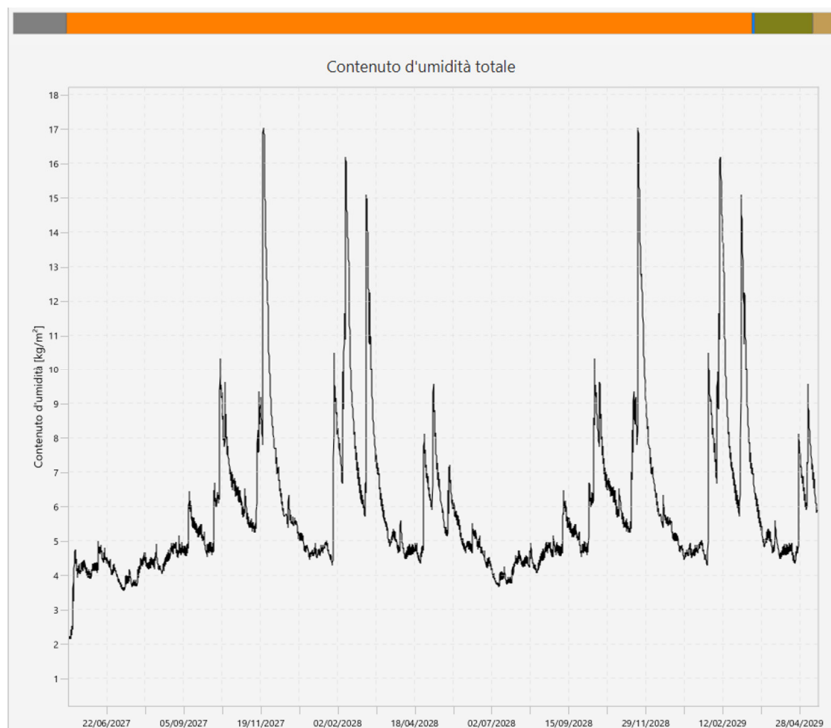


Figura 8.22 - Andamento del contenuto d'umidità totale della stratigrafia di riferimento con freno al vapore

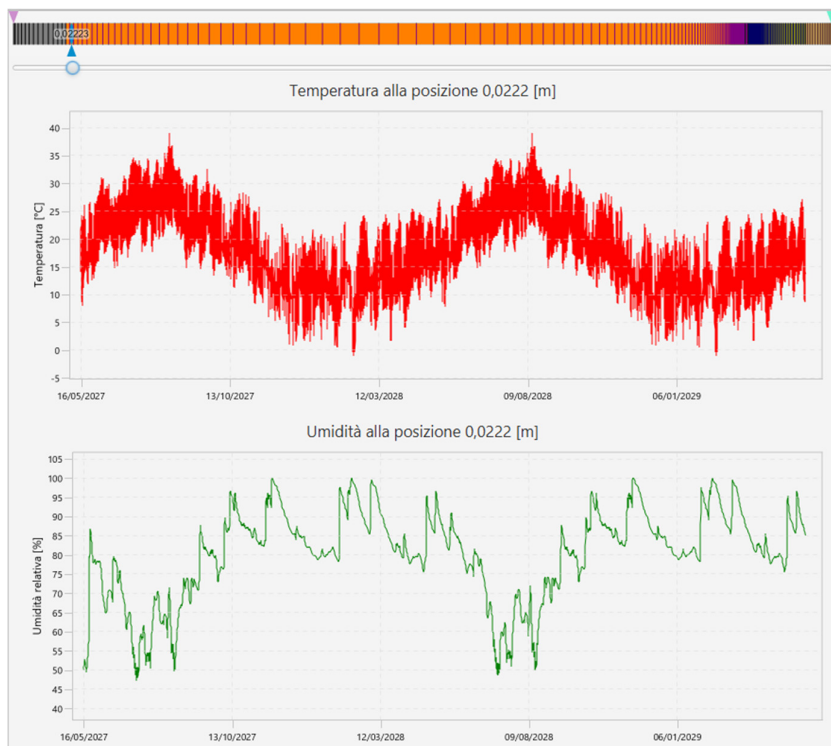


Figura 8.23 - Andamento della temperatura e dell'umidità all'interfaccia intonaco esterno - paglia nella stratigrafia di riferimento con freno al vapore

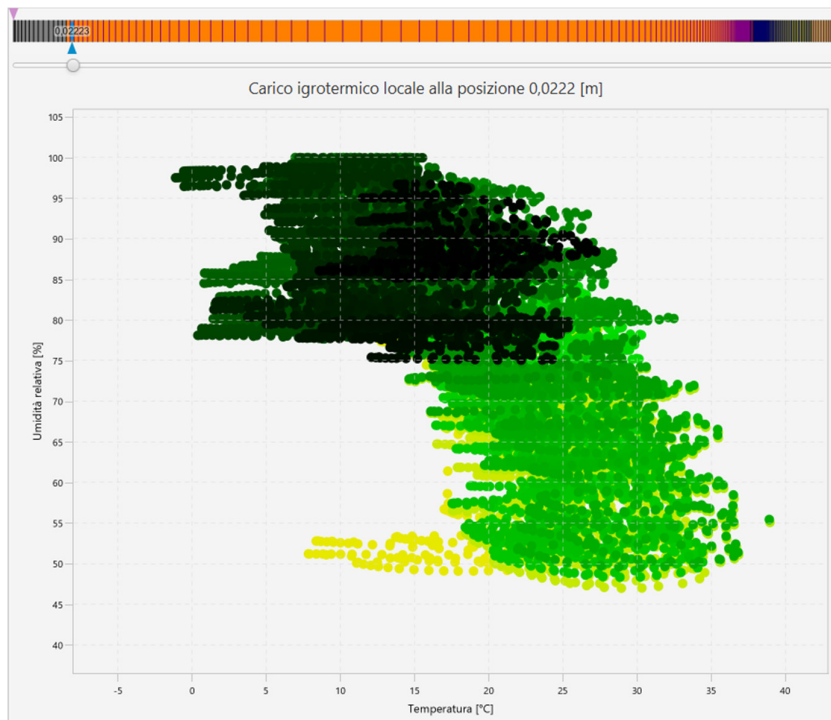


Figura 8.24 - Diagramma del carico igrotermico locale nell'interfaccia intonaco esterno - paglia nella stratigrafia di riferimento con freno al vapore

Considerazioni

L'introduzione del freno al vapore sul lato interno è stata analizzata come configurazione di confronto per valutare l'effetto della riduzione del flusso di vapore proveniente dall'ambiente interno.

Dal confronto con la stratigrafia di riferimento emerge che l'inserimento del freno al vapore non determina un miglioramento significativo delle condizioni presenti nella zona più critica della parete. I valori massimi di umidità relativa nell'interfaccia tra lo strato esterno e la paglia rimangono infatti molto elevati e raggiungono ancora condizioni prossime alla saturazione.

Anche il contenuto d'umidità totale della stratigrafia mostra valori massimi sostanzialmente analoghi a quelli osservati nella configurazione di riferimento. Ciò suggerisce che il fenomeno di accumulo di umidità evidenziato dalla simulazione non sia principalmente legato al vapore proveniente dall'ambiente interno, ma risulti influenzato soprattutto dalle sollecitazioni esterne.

L'analisi dei profili termoigrometrici evidenzia come, nella zona critica corrispondente all'interfaccia tra l'intonaco esterno e la paglia, l'umidità relativa mantenga un andamento sostanzialmente analogo a quello osservato nella stratigrafia di riferimento. In particolare, durante il periodo compreso tra la fine di gennaio e la metà di marzo si registrano valori di umidità relativa costantemente compresi tra l'80% e condizioni prossime alla saturazione, mantenuti per oltre un mese consecutivo. Tali condizioni rappresentano il periodo più critico dell'intera simulazione e risultano significativamente più gravose rispetto ai picchi di breve durata osservati negli altri periodi dell'anno.

Nel complesso, la simulazione evidenzia che il freno al vapore interno non migliora in modo significativo il comportamento igrotermico della parete. Le criticità osservate risultano infatti legate principalmente alle condizioni del lato esterno, più che ai flussi di vapore provenienti dall'ambiente interno.

8.2.1.3 Analisi di sensibilità: aggiunta di una membrana traspirante

Risultati ottenuti

L'inserimento di una membrana traspirante e idrorepellente tra l'intonaco esterno in calce e lo strato di paglia modifica il comportamento igrotermico della parete, pur mantenendo un andamento generale analogo a quello osservato per la stratigrafia di riferimento. Il contenuto d'umidità totale della stratigrafia presenta un'evoluzione temporale simile a quella della configurazione di riferimento, con un valore massimo pari a circa 12,3 kg/m², leggermente inferiore rispetto al caso precedente.

Per quanto riguarda i singoli materiali, il contenuto d'acqua massimo dell'intonaco esterno in calce risulta sostanzialmente invariato, mentre la paglia evidenzia un andamento più regolare, caratterizzato da oscillazioni meno accentuate e da un valore massimo pari a circa 13,45 kg/m³. Analogamente, le lastre in terra cruda non presentano più i marcati picchi di accumulo osservati nella stratigrafia di riferimento, raggiungendo un contenuto massimo di circa 20,86 kg/m³, mentre la malta di argilla presenta un valore massimo pari a circa 50,5 kg/m³.

L'analisi dei profili termoigrometrici nella zona di interfaccia tra l'intonaco esterno e la paglia mostra che l'umidità relativa rimane compresa indicativamente tra il 50% e l'85%, senza raggiungere condizioni prossime alla saturazione come osservato nella stratigrafia di riferimento.

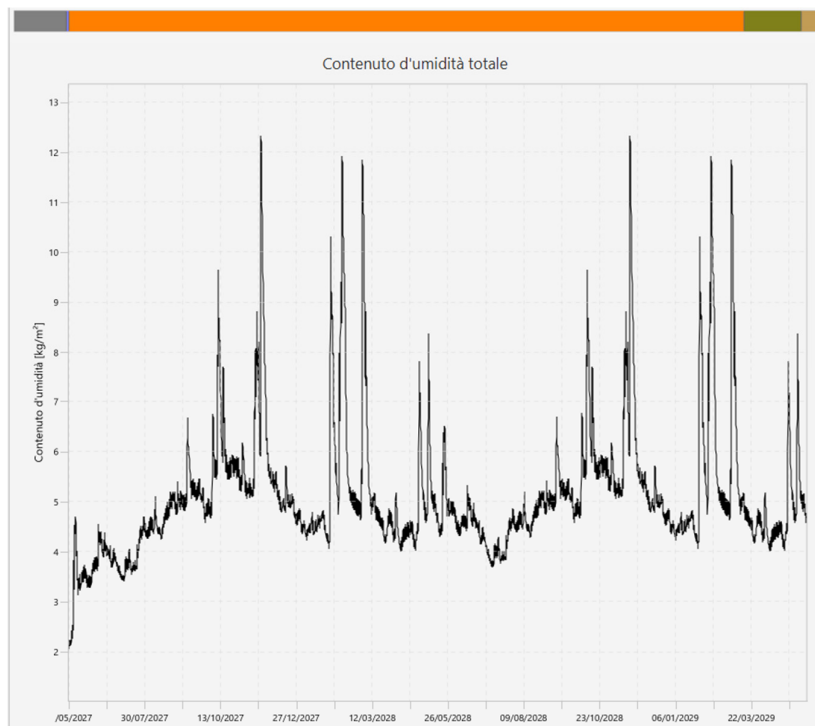


Figura 8.25 - Andamento del contenuto d'umidità totale della stratigrafia con membrana traspirante



Figura 8.26 - Andamento della temperatura e dell'umidità all'interfaccia membrana traspirante - paglia

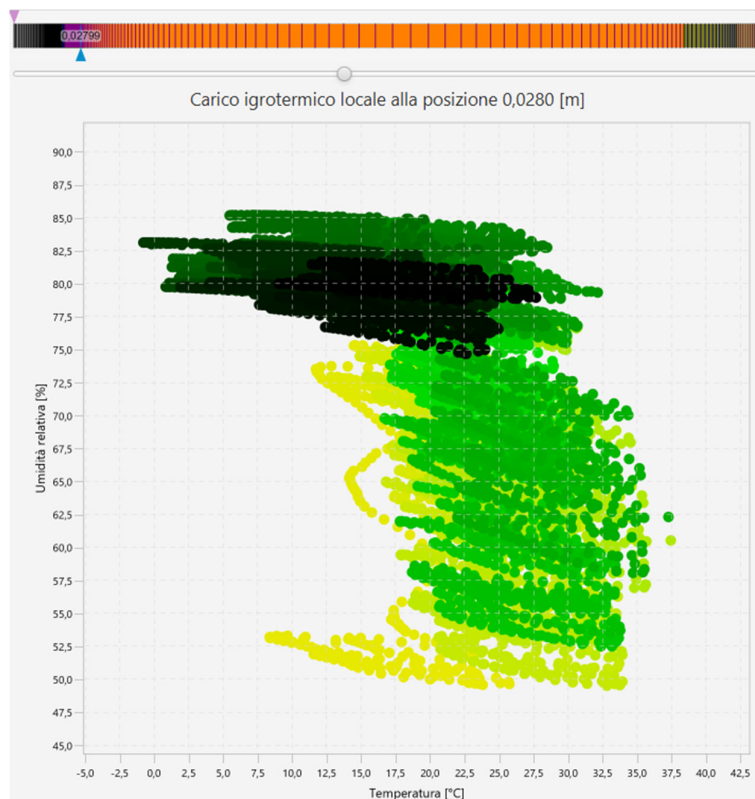


Figura 8.27 - Diagramma del carico igrotermico locale nell'interfaccia membrana traspirante - paglia

Considerazioni

L'inserimento della membrana traspirante e idrorepellente determina una sensibile riduzione delle condizioni di accumulo di umidità nella zona critica della parete. Pur permanendo periodi nei quali l'umidità relativa supera l'80%, non vengono più raggiunti valori prossimi alla saturazione, evidenziando un netto miglioramento rispetto alla stratigrafia di riferimento.

La membrana non impedisce l'assorbimento dell'acqua meteorica da parte dell'intonaco esterno, che continua infatti a presentare contenuti d'acqua massimi sostanzialmente analoghi a quelli osservati nella configurazione di riferimento. Tuttavia, grazie all'assenza di trasporto capillare al suo interno, essa limita il trasferimento dell'acqua liquida verso lo strato di paglia e verso gli strati più interni della parete. Ciò è confermato dalla riduzione dei picchi di contenuto d'acqua nella paglia e dall'assenza di incrementi significativi nelle lastre in terra cruda e nella malta interna.

Permangono tuttavia alcuni intervalli temporali, in particolare nei mesi di ottobre-novembre e nel periodo compreso tra la fine di gennaio e marzo, durante i quali l'umidità

relativa si mantiene superiore all'80% per periodi relativamente lunghi, dell'ordine di circa un mese. Tali condizioni risultano comunque sensibilmente meno gravose rispetto alla stratigrafia di riferimento, nella quale venivano raggiunti valori superiori al 90% e prossimi alla saturazione.

Nel complesso, la simulazione evidenzia come la membrana traspirante e idrorepellente rappresenti una soluzione efficace nel limitare il trasferimento dell'acqua meteorica verso gli strati interni della parete. Pur lasciando pressoché inalterato il comportamento igrotermico dell'intonaco esterno, essa impedisce che l'acqua assorbita venga trasferita alla paglia, riducendo sensibilmente il contenuto d'acqua dei materiali interni e impedendo il raggiungimento di condizioni prossime alla saturazione nell'interfaccia critica.

8.2.1.4 Stratigrafia alternativa: Aquapanel esterno

Risultati ottenuti

I risultati mostrano un contenuto di umidità totale della stratigrafia compreso tra 2,5 e 5,75 kg/m² durante il periodo di simulazione. Anche in questo caso si osservano oscillazioni stagionali correlate alle condizioni climatiche esterne, senza evidenziare fenomeni di accumulo progressivo dell'umidità.

Per quanto riguarda i singoli materiali, il contenuto d'acqua massimo raggiunge valori pari a circa 11,64 kg/m³ nella paglia, 20,8 kg/m³ nelle lastre in terra cruda e 50,6 kg/m³ nella malta di argilla, evidenziando una riduzione dell'umidità accumulata negli strati interni rispetto alla stratigrafia di riferimento.

L'analisi dell'interfaccia tra l'Aquapanel e lo strato di paglia evidenzia valori di umidità relativa generalmente compresi tra il 40% e l'80%, con un andamento ciclico legato all'alternanza delle stagioni.

L'analisi delle condizioni termoigrometriche nel punto monitorato tra l'Aquapanel e lo strato di paglia evidenzia che l'umidità relativa non raggiunge mai condizioni prossime alla saturazione, mantenendosi su valori sensibilmente inferiori rispetto a quelli osservati nella stratigrafia di riferimento.

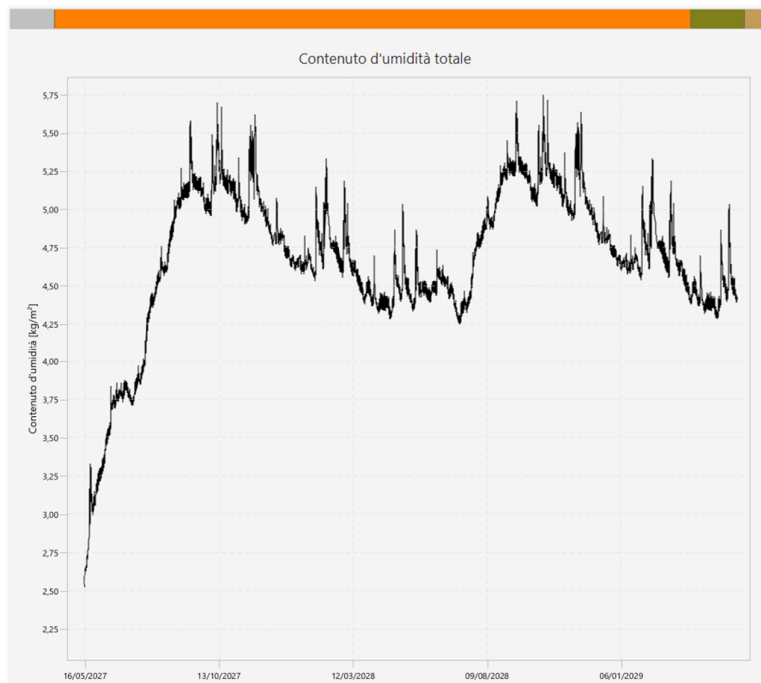


Figura 8.28 - Andamento del contenuto d'umidità totale della stratigrafia con Aquapanel esterno



Figura 8.29 - Andamento della temperatura e dell'umidità all'interfaccia Aquapanel - paglia

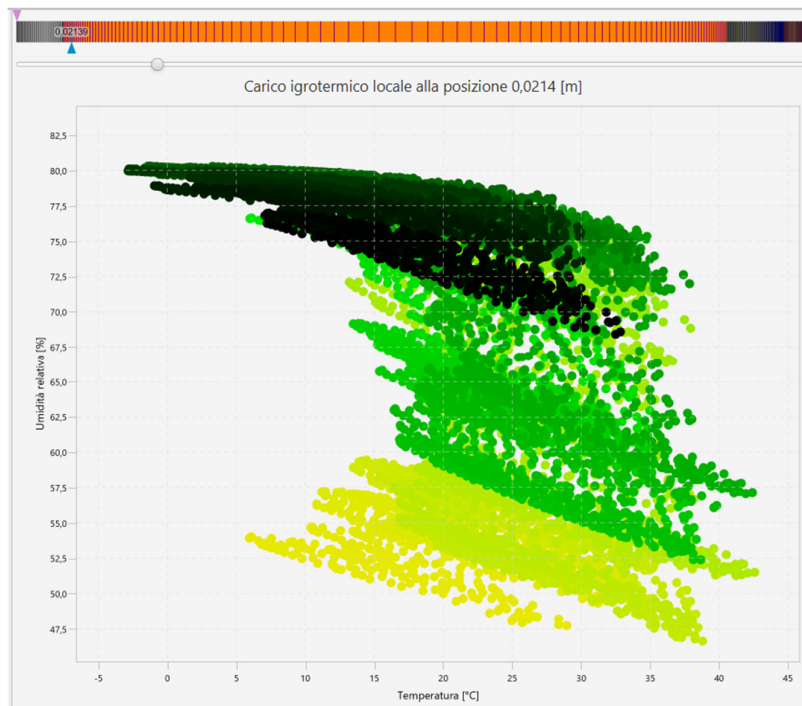


Figura 8.30 - Diagramma del carico igrotermico locale nell'interfaccia Aquapanel - paglia

Considerazioni

Rispetto alla stratigrafia di riferimento, la configurazione con Aquapanel evidenzia una significativa riduzione dei valori massimi di umidità relativa raggiunti in prossimità dell'interfaccia con la paglia. Mentre nella configurazione originaria venivano raggiunti valori superiori al 90% e prossimi alla saturazione, nella presente simulazione l'umidità relativa si mantiene generalmente compresa tra il 70% e l'80%, senza raggiungere condizioni prossime al 100%.

Anche il contenuto d'acqua complessivo della stratigrafia e quello dei materiali interni risultano inferiori rispetto alla parete con intonaco in calce, confermando una riduzione dell'umidità trasferita verso gli strati più interni. In particolare, l'Aquapanel limita l'ingresso dell'acqua meteorica all'interno della stratigrafia, riducendo conseguentemente il contenuto d'acqua della paglia e degli strati posti a valle.

È tuttavia opportuno osservare che, durante i periodi climaticamente più sfavorevoli, l'umidità relativa permane su valori compresi tra il 70% e l'80% per intervalli temporali relativamente lunghi. Tali condizioni risultano comunque sensibilmente meno gravose

rispetto alla stratigrafia di riferimento, nella quale venivano raggiunti valori superiori al 90% e prossimi alla saturazione.

Nel complesso, la stratigrafia con Aquapanel mostra un comportamento igrotermico sensibilmente più favorevole rispetto alla configurazione di riferimento. L'introduzione del pannello consente infatti di ridurre l'ingresso di acqua meteorica e, di conseguenza, il trasferimento dell'umidità verso gli strati interni della parete, impedendo il raggiungimento di condizioni prossime alla saturazione nell'interfaccia con la paglia e riducendo in modo significativo la criticità evidenziata nella configurazione di riferimento.

8.2.1.2 Stratigrafia alternativa: intonaco minerale esterno

Risultati ottenuti

I risultati mostrano un contenuto di umidità totale della stratigrafia compreso tra circa 2,9 e 4,75 kg/m² durante il periodo di simulazione. Anche in questo caso si osservano oscillazioni stagionali correlate alle variazioni delle condizioni climatiche esterne, senza evidenziare fenomeni di accumulo progressivo dell'umidità. Il contenuto d'acqua massimo registrato nei singoli materiali risulta pari a 11,28 kg/m³ per la paglia, 20,67 kg/m³ per le lastre prefabbricate in terra cruda e 50,64 kg/m³ per la malta di argilla.

L'analisi dell'interfaccia tra l'intonaco minerale esterno e lo strato di paglia evidenzia valori di umidità relativa generalmente compresi tra il 45% e l'80%. Durante il periodo climaticamente più gravoso, indicativamente compreso tra la fine di ottobre e la fine di marzo, l'umidità relativa si mantiene prevalentemente tra il 70% e l'80%, senza tuttavia raggiungere le condizioni prossime alla saturazione osservate nella stratigrafia di riferimento.

L'analisi del carico igrotermico locale evidenzia una distribuzione delle condizioni termoigrometriche caratterizzata da valori di umidità relativa sensibilmente inferiori rispetto alla configurazione di riferimento, confermando l'assenza di condizioni prossime alla saturazione.

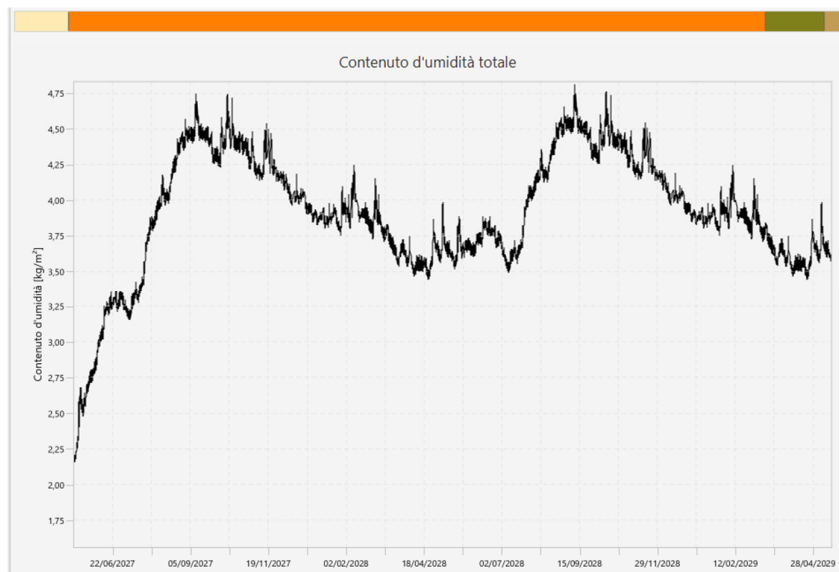


Figura 8.31 - Andamento del contenuto d'umidità totale della stratigrafia con intonaco minerale esterno

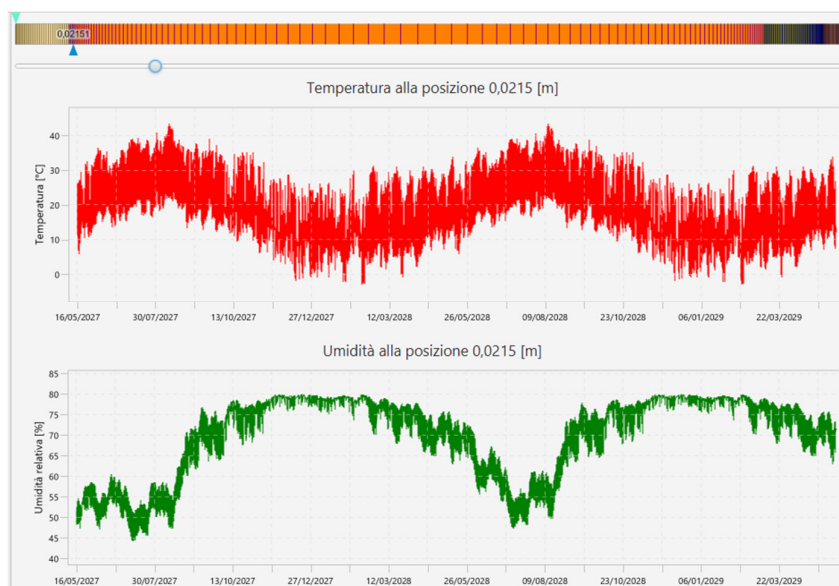


Figura 8.32 - Andamento della temperatura e dell'umidità all'interfaccia intonaco minerale - paglia

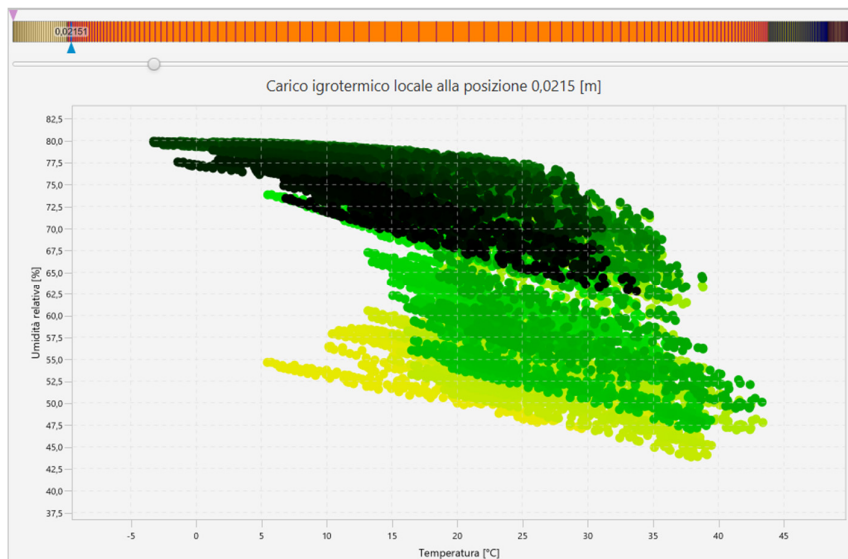


Figura 8.33 - Diagramma del carico igrotermico locale nell'interfaccia intonaco minerale - paglia

Considerazioni

Rispetto alla stratigrafia di riferimento, la configurazione con intonaco minerale evidenzia una significativa riduzione dei valori massimi di umidità relativa raggiunti in prossimità dell'interfaccia tra lo strato esterno e la paglia. Mentre nella configurazione originaria venivano raggiunti valori superiori al 90% e prossimi alla saturazione, nella presente simulazione l'umidità relativa si mantiene generalmente compresa tra il 70% e l'80%, senza raggiungere condizioni prossime al 100%.

Anche il contenuto d'acqua complessivo della stratigrafia e quello dei materiali interni risultano inferiori rispetto alla configurazione di riferimento. In particolare, negli strati più interni della parete non si evidenziano più gli incrementi transitori del contenuto d'acqua associati agli eventi di bagnamento dello strato esterno, indicando una sensibile riduzione della propagazione dell'umidità verso l'interno della stratigrafia.

È tuttavia opportuno osservare che, durante il periodo climaticamente più sfavorevole, compreso indicativamente tra la fine di ottobre e la fine di marzo, l'umidità relativa nell'interfaccia tra l'intonaco minerale e la paglia permane su valori compresi tra il 70% e l'80% per intervalli temporali relativamente lunghi. Tali valori risultano comunque inferiori rispetto a quelli osservati nella stratigrafia di riferimento, mostrando un comportamento più favorevole rispetto a quest'ultima.

L'utilizzo di tale rivestimento consente infatti di ridurre il contenuto d'acqua negli strati interni della parete e di impedire il raggiungimento di condizioni prossime alla saturazione nell'interfaccia con la paglia, attenuando la criticità evidenziata nella configurazione originaria.

8.2.1.2 Stratigrafia alternativa multistrato con Fermacell e freno al vapore

Risultati ottenuti

Il contenuto di umidità totale della stratigrafia risulta compreso tra circa 1,6 e 3,6 kg/m² durante il periodo di simulazione. L'andamento evidenzia oscillazioni stagionali regolari e non mostra fenomeni di accumulo progressivo dell'umidità.

Nella zona monitorata, tra lo strato di intonaco esterno e la paglia, l'umidità relativa assume valori generalmente compresi tra circa il 40% e l'80%, con valori massimi registrati nei periodi più sfavorevoli dal punto di vista climatico.

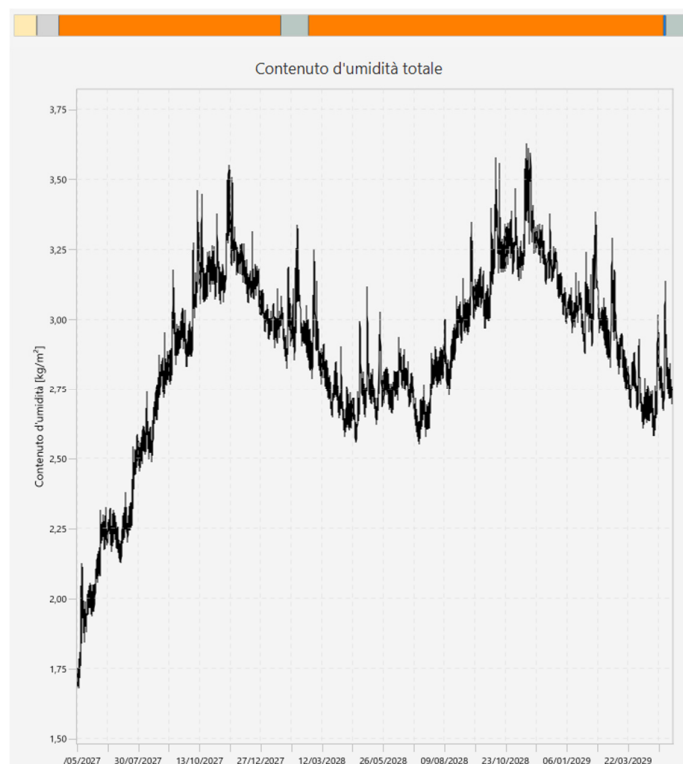


Figura 8.34 - Andamento del contenuto d'umidità totale della stratigrafia multistrato con Fermacell e freno al vapore

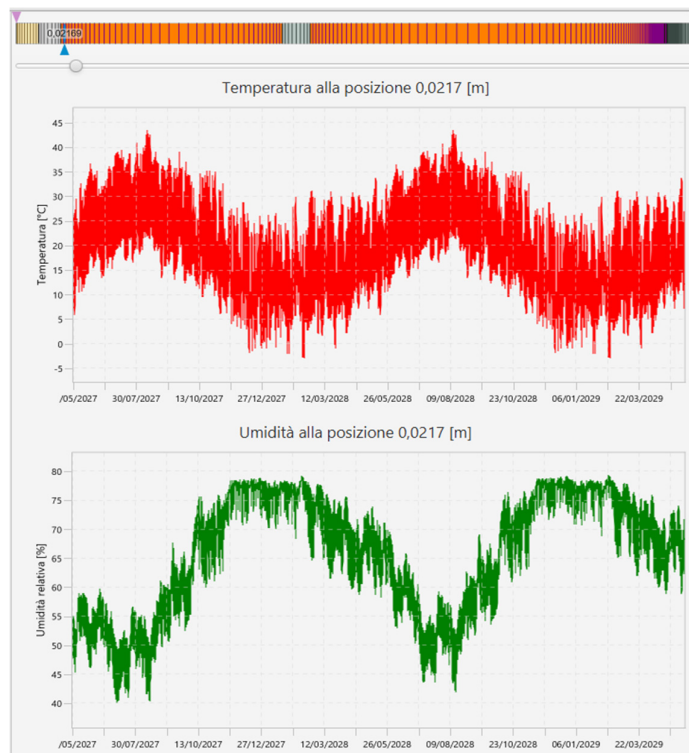


Figura 8.35 - Andamento della temperatura e dell'umidità all'interfaccia intonaco esterno - paglia nella stratigrafia multistrato con Fermacell e freno al vapore

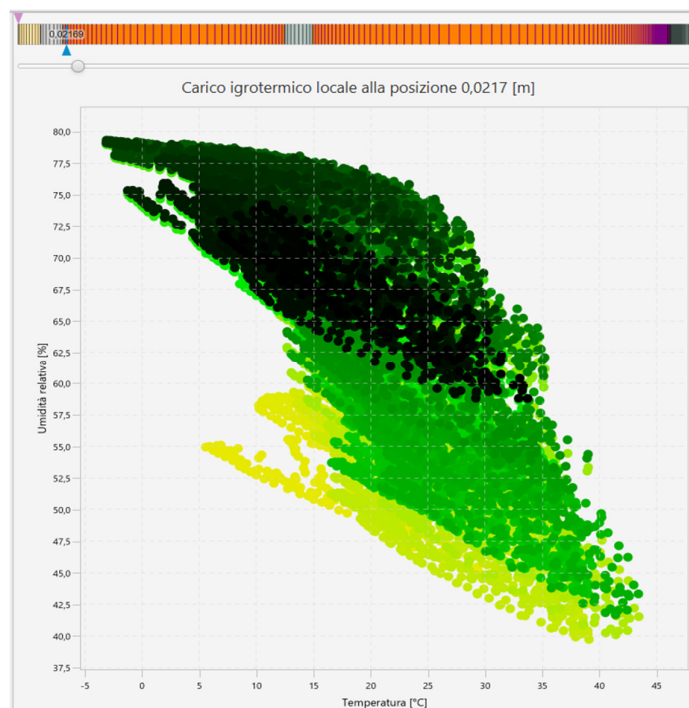


Figura 8.36 - Diagramma del carico igrotermico locale nell'interfaccia intonaco esterno - paglia nella stratigrafia multistrato con Fermacell e freno al vapore

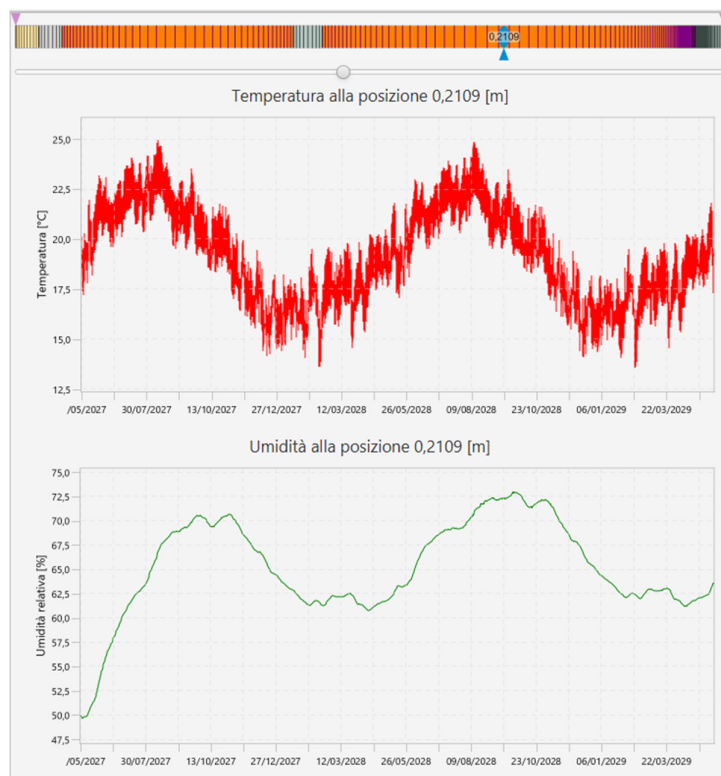


Figura 8.37 - Andamento della temperatura e dell'umidità nel punto di monitoraggio posto nello strato interno di paglia, nella stratigrafia multistrato con Fermacell e freno al vapore

Considerazioni

I risultati mostrano un comportamento igrotermico complessivamente favorevole. Rispetto alla stratigrafia di riferimento, la configurazione multistrato evidenzia una marcata riduzione dei valori di umidità relativa nell'interfaccia tra l'intonaco esterno e la paglia. In tale zona l'umidità relativa si mantiene generalmente compresa tra circa il 45% e il 78%, senza raggiungere le condizioni prossime alla saturazione osservate nella configurazione di riferimento. Anche il contenuto d'umidità totale della parete risulta sensibilmente inferiore, confermando una riduzione dell'acqua complessivamente presente nella stratigrafia. Inoltre, la presenza della lastra intermedia in fibrogesso e del freno al vapore contribuisce a ridurre i livelli di umidità relativa anche all'interno dello strato isolante in paglia, dove si osservano oscillazioni stagionali contenute e valori generalmente inferiori al 75%.

È tuttavia opportuno evidenziare che tale miglioramento non può essere attribuito ad un singolo elemento della stratigrafia. A differenza delle configurazioni precedentemente analizzate, questa soluzione modifica infatti contemporaneamente più aspetti costruttivi: lo

strato isolante viene suddiviso in due porzioni separate da una lastra in fibrogesso Fermacell ed è inoltre introdotto un freno al vapore sul lato interno. Il comportamento igrotermico osservato rappresenta pertanto il risultato dell'azione combinata di tali modifiche e non consente di valutare il contributo dei singoli elementi separatamente.

Nel complesso, la configurazione con Fermacell e freno al vapore mostra un comportamento igrotermico migliore rispetto alla stratigrafia di riferimento. Il miglioramento osservato è però legato all'insieme delle modifiche introdotte nella stratigrafia.

9. Discussione dei risultati

Richiamo dei principali risultati ottenuti

Le attività sperimentali e analitiche svolte nell'ambito del presente lavoro hanno consentito di caratterizzare il comportamento termoigrometrico della paglia e di valutare le prestazioni della stratigrafia oggetto di studio.

Per quanto riguarda la permeabilità al vapore acqueo, i risultati hanno evidenziato valori del fattore di resistenza alla diffusione del vapore μ compresi tra 1,15 e 1,86, con un valore medio pari a 1,51. Tali valori confermano l'elevata traspirabilità della paglia e la sua capacità di favorire il trasferimento del vapore acqueo attraverso la stratigrafia, riducendo il rischio di accumuli di umidità dovuti ai soli fenomeni diffusivi.

Le prove di conducibilità termica hanno invece mostrato valori di λ compresi tra 0,05371 e 0,05400 W/mK per i campioni analizzati, confermando le buone proprietà isolanti del materiale. In particolare, il valore minimo di conducibilità termica è stato registrato in corrispondenza di una densità pari a 80 kg/m³, mentre per densità superiori è stato osservato un lieve incremento del parametro.

Le verifiche effettuate mediante software PAN, riguardanti la stratigrafia di riferimento, hanno evidenziato prestazioni termiche pienamente conformi ai requisiti normativi. La trasmittanza termica della stratigrafia è risultata pari a 0,188 W/m²K, mentre la trasmittanza termica periodica ha assunto un valore di 0,088 W/m²K, inferiore al limite normativo di 0,10 W/m²K. Le verifiche igrometriche hanno inoltre escluso la formazione di muffa superficiale, condensa superficiale e condensa interstiziale, evidenziando un comportamento favorevole della stratigrafia secondo le procedure previste dalla UNI EN ISO 13788.

Le simulazioni dinamiche condotte mediante WUFI, riguardanti la stratigrafia di riferimento, hanno confermato l'assenza di fenomeni di accumulo progressivo dell'umidità all'interno della parete, evidenziando una buona capacità di asciugamento della stratigrafia. Tuttavia, l'analisi ha individuato una zona particolarmente critica in corrispondenza dell'interfaccia tra l'intonaco esterno e la paglia, dove si registrano ripetutamente valori di umidità relativa superiori al 90% e, in alcuni periodi, prossimi alla saturazione. Le simulazioni hanno inoltre mostrato il ruolo determinante della pioggia battente nel comportamento igrotermico della parete e hanno evidenziato come alcune soluzioni costruttive, quali l'utilizzo di una membrana traspirante, l'impiego di un rivestimento esterno

in Aquapanel, di un intonaco minerale o di una configurazione multistrato con Fermacell e freno al vapore, consentano di ridurre i livelli di umidità raggiunti nelle zone maggiormente critiche della stratigrafia.

Confronto con dati ricavati dalla letteratura

Per quanto riguarda le prove di conducibilità termica, un primo confronto può essere effettuato con lo studio di Múnera e Gosselin, relativo a campioni di paglia d'orzo compattata. Gli autori hanno analizzato campioni con densità comprese tra 100 e 120 kg/m³, distinguendo tra fibre corte e fibre lunghe. Considerando i valori determinati alla condizione di umidità relativa del 45%, confrontabile con quella adottata nel presente studio, pari a circa il 40%, la conducibilità termica risulta compresa tra 0,0514 e 0,0560 W/mK.

Dunque, la vicinanza dei valori ottenuti nel presente studio rispetto a quelli riportati da Múnera e Gosselin risulta particolarmente significativa considerando che i campioni analizzati presentano densità differenti. Osservando i valori medi di conducibilità termica, emerge infatti una sostanziale sovrapposizione tra i risultati dei due studi: il valore medio ottenuto nel presente lavoro risulta pari a circa 0,0545 W/mK, mentre i valori medi ricavati per i campioni a fibre corte e a fibre lunghe analizzati da Múnera e Gosselin risultano pari rispettivamente a circa 0,0530 e 0,0552 W/mK. Tale risultato suggerisce che, nelle condizioni considerate, la densità non rappresenti l'unico parametro in grado di influenzare la conducibilità termica del materiale e che anche altri fattori, quali il contenuto di umidità e la struttura interna delle fibre, possano svolgere un ruolo rilevante.

Un ulteriore confronto può essere effettuato con lo studio di Zhou et al., relativo ai campioni realizzati con fibre di paglia di riso e leganti naturali, quali alginato di sodio e chitosano. In questo caso i valori di conducibilità termica riportati risultano compresi tra 0,034 e 0,047 W/mK quindi inferiori rispetto a quelli ottenuti nel presente studio. Tale differenza è giustificabile considerando che i campioni analizzati di Zhou et al. sono materiali compositi realizzati in condizioni controllate e testati allo stato secco, mentre nel presente lavoro sono stati analizzati campioni di paglia in condizioni termoigrometriche di laboratorio.

Nel complesso, i valori di conducibilità termica ottenuti risultano coerenti con la letteratura per materiali a base di paglia, in particolare con campioni di paglia d'orzo compattata ed in condizioni di umidità simili. Le differenze rispetto ai pannelli a base di

paglia di riso confermano che la conducibilità dipende non solo dalla natura della fibra, ma anche da densità, umidità, presenza di leganti e struttura porosa.

Articolo	Campione	Stato del campione	Densità [kg/m ³]	λ [W/mK]	λ_{medio} [W/mK]	λ (SD)
-	Presente studio	≈40% UR (laboratorio)	83,9	0,0540	0,0545	0,0011
			80,0	0,0537		
			74,3	0,0558		
Múnera, Gosselin	Paglia d'orzo compattata - fibre corte	45% UR	100,0	0,0514	0,0530	0,0016
			110,0	0,0529		
			120,0	0,0546		
	Paglia d'orzo compattata - fibre lunghe	45% UR	100,0	0,0541	0,0552	0,0010
			110,0	0,0555		
			120,0	0,0560		
Zhou et al.	Fibre di paglia di riso	stato secco	43,0	0,0350	0,0345	0,0007
			39,0	0,0340		
	Fibre di paglia di riso e alginato di sodio	stato secco	132,0	0,0410	0,0427	0,0031
			142,0	0,0450		
			162,0	0,0470		
			104,0	0,0380		
			124,0	0,0420		
			135,0	0,0430		
	Fibre di paglia di riso e chitosano	stato secco	115,0	0,0410	0,0422	0,0025
			143,0	0,0440		
			144,0	0,0450		
			100,0	0,0380		
			121,0	0,0420		
			133,0	0,0430		

Tabella 9.1 - Confronto dei valori di conducibilità termica ottenuti nel presente studio con quelli riportati da Múnera e Gosselin e da Zhou et al. per differenti tipologie di materiali a base di paglia

Relativamente al fattore di resistenza alla diffusione del vapore, i risultati ottenuti nel presente studio evidenziano valori compresi tra 1,15 e 1,86, con un valore medio pari a 1,51, inferiori rispetto a quelli riportati in letteratura. Nello studio di Múnera e Gosselin, relativo a campioni di paglia d'orzo compattata con densità comprese tra 100 e 120 kg/m³, sono stati misurati valori di μ compresi tra 4,2 e 14,2. Analogamente, Zhou et al. hanno ottenuto valori compresi tra 2,7 e 5,3 per campioni realizzati con fibre di paglia di riso e leganti naturali a base di alginato di sodio e chitosano, mentre Ismail et al. hanno riportato valori compresi tra 8,35 e 9,47 per campioni costituiti da paglia e differenti tipologie di legante.

Le differenze osservate possono essere attribuite principalmente alle differenti caratteristiche dei materiali analizzati. In particolare, nel presente studio sono stati testati campioni di paglia con densità inferiori e che presentano una maggiore eterogeneità, legata alla disposizione delle fibre, al grado di compattazione e alle caratteristiche intrinseche del materiale, rispetto ai campioni utilizzati nello studio condotto da Múnera e Gosselin che

sono stati realizzati in laboratorio mediante una procedura controllata, che prevedeva la selezione e la classificazione delle fibre in funzione della loro dimensione, nonché il raggiungimento di densità prefissate mediante compattazione. Tale approccio ha consentito di ottenere campioni maggiormente omogenei e di ridurre l'influenza di variabili non controllate.

I risultati di Múnera e Gosselin evidenziano inoltre una significativa differenza tra campioni costituiti da fibre corte e fibre lunghe, suggerendo che la disposizione e la morfologia delle fibre possano influenzare in modo non trascurabile il trasporto del vapore all'interno del materiale. Questo aspetto potrebbe contribuire a spiegare parte delle differenze osservate rispetto ai risultati del presente studio.

Per Zhou et al. e Ismail et al., i valori più elevati di μ sono dovuti alla natura composita dei materiali e alla presenza dei leganti, che aumentano la resistenza al passaggio del vapore rispetto alla paglia pura.

Nel complesso, nonostante le differenze quantitative riscontrate, tutti gli studi confermano il comportamento fortemente traspirante dei materiali a base di paglia. I risultati ottenuti nel presente lavoro evidenziano in particolare una permeabilità al vapore particolarmente elevata, con valori del fattore μ prossimi a quelli dell'aria e quindi favorevoli alla diffusione del vapore attraverso la stratigrafia.

Articolo	Campione	μ [-]	μ medio [-]	μ (SD)
-	Presente studio	1,86	1,51	0,36
		1,51		
		1,15		
Múnera, Gosselin	Paglia d'orzo compattata - fibre corte	4,20	6,25	2,46
		5,58		
		8,98		
	Paglia d'orzo compattata - fibre lunghe	6,48	9,88	3,94
		8,97		
		14,20		
Zhou ed al.	Fibre di paglia di riso e alginato di sodio	3,10	3,63	0,39
		3,30		
		3,90		
		2,70		
		3,10		
	Fibre di paglia di riso e chitosano	3,30	5,79	0,76
		3,80		
		5,00		
		5,30		
		3,40		
Ismail et al.	Paglia, calce, emoglobina e caseina	9,47	-	-
	Paglia, calce e gelatina	8,45		
	Paglia, gesso e galatina	8,35		

Tabella 9.2 - Confronto dei valori del fattore di resistenza alla diffusione del vapore acqueo μ ottenuti nel presente studio e nei principali studi presenti in letteratura

Dopo aver confrontato i risultati delle prove sperimentali con quelli disponibili in letteratura, risulta opportuno estendere l'analisi al comportamento igrotermico della stratigrafia nel suo complesso. A tale scopo, i risultati ottenuti mediante le simulazioni dinamiche condotte con WUFI vengono confrontati con quelli riportati da altri autori per sistemi costruttivi a base di paglia.

Il confronto può essere effettuato con lo studio di Chen et al., nel quale sono state analizzate diverse configurazioni di pareti a base di paglia mediante simulazioni igrotermiche dinamiche eseguite con WUFI. Sebbene le stratigrafie considerate dagli autori differiscano significativamente da quella analizzata nel presente lavoro, essendo caratterizzate dalla presenza di strati EPS esterni e da condizioni climatiche differenti, è possibile individuare alcune analogie nei fenomeni osservati.

Un primo elemento di confronto riguarda l'andamento del contenuto d'acqua all'interno delle pareti. Chen et al. hanno osservato che le configurazioni ritenute più performanti raggiungono una condizione di equilibrio dinamico caratterizzata da oscillazioni stagionali del contenuto d'acqua senza fenomeni di accumulo progressivo nel tempo. Analogamente,

nel presente studio la simulazione della stratigrafia di riferimento ha evidenziato una buona capacità di asciugamento, senza incrementi progressivi dell'umidità nel corso del periodo simulato. Tali risultati suggeriscono che la parete sia in grado di smaltire l'umidità assorbita durante i periodi climaticamente più sfavorevoli, evitando fenomeni di accumulo permanente.

Un secondo aspetto di interesse riguarda l'individuazione delle zone maggiormente soggette a criticità igrometriche. Nello studio di Chen et al. i valori più elevati di umidità relativa sono stati registrati in corrispondenza dell'interfaccia tra il rivestimento strutturale (sheathing) e lo strato isolante interno, identificata dagli autori come la zona maggiormente esposta al rischio di degrado biologico. In maniera simile, le simulazioni condotte nel presente lavoro hanno evidenziato come la principale criticità della stratigrafia sia localizzata all'interfaccia tra l'intonaco esterno e la paglia, dove si registrano valori di umidità relativa superiori al 90% e, in alcuni periodi limitati, prossimi alla saturazione. Sebbene la posizione della zona critica risulti differente a causa della diversa composizione delle stratigrafie considerate, entrambi gli studi evidenziano come il comportamento igrotermico della parete sia fortemente influenzato dalle condizioni che si instaurano in specifiche interfacce tra materiali differenti.

I risultati ottenuti confermano inoltre l'importanza delle caratteristiche degli strati esterni nel controllo dell'umidità all'interno della parete. Chen et al. hanno osservato che l'incremento dello spessore dell'isolamento esterno in EPS comporta una riduzione del contenuto d'acqua e del rischio di degrado biologico. Nel presente studio, invece, l'impiego di soluzioni quali l'Aquapanel, l'intonaco minerale esterno o l'aggiunta di una membrana traspirante e idrorepellente, ha determinato una riduzione dei valori massimi di umidità relativa raggiunti nella zona critica della stratigrafia. Sebbene i meccanismi fisici coinvolti siano differenti, gli studi evidenziano come le caratteristiche degli strati più esterni della parete influenzino in modo significativo il comportamento igrotermico complessivo del sistema.

Infine, i risultati ottenuti da Chen et al. confermano l'importanza di valutare non soltanto il contenuto d'acqua complessivo della parete, ma anche le condizioni termoigrometriche locali che si instaurano nelle zone maggiormente critiche. Tale osservazione risulta particolarmente rilevante anche per il presente studio, nel quale, nonostante l'assenza di accumulo progressivo di umidità, sono stati registrati valori elevati di umidità relativa in

prossimità dell'interfaccia tra intonaco esterno e paglia. Questi risultati, unitamente alle osservazioni sperimentali relative alla formazione di muffa riscontrata durante le attività di laboratorio, suggeriscono che il rischio di degrado biologico debba essere valutato considerando non solo il contenuto d'acqua medio della stratigrafia, ma anche le condizioni locali che si sviluppano nei punti maggiormente soggetti all'accumulo di umidità.

Limiti dello studio

Nell'interpretazione dei risultati ottenuti è opportuno considerare alcuni limiti associati alle simulazioni igrometriche condotte. In primo luogo, le analisi dinamiche sono state sviluppate facendo riferimento ad una specifica stratigrafia e alle condizioni climatiche della città di Roma. I risultati ottenuti descrivono pertanto il comportamento della configurazione costruttiva analizzata nelle condizioni considerate e non possono essere automaticamente estesi ad altre tipologie di pareti in paglia, caratterizzate da differenti spessori, orientamenti o condizioni climatiche. Eventuali variazioni di tali parametri potrebbero infatti modificare in maniera significativa il comportamento igrotermico della stratigrafia.

Un secondo aspetto da considerare riguarda la caratterizzazione delle proprietà igroscopiche della paglia impiegate nelle simulazioni. In particolare, per la definizione della curva di adsorbimento utilizzata come dato di input nel modello sono stati impiegati i valori determinati sperimentalmente nel presente lavoro per umidità relative pari al 10%, 30%, 50% e 75%. Per i livelli di umidità relativa più elevati (85%, 95% e 100%), non essendo disponibili dati sperimentali, la curva è stata completata facendo riferimento all'andamento osservato in studi presenti in letteratura relativi a materiali analoghi. Tale approccio ha consentito di definire una curva rappresentativa del comportamento igroscopico della paglia, mantenendo come riferimento principale i risultati sperimentali ottenuti. Tuttavia, una caratterizzazione sperimentale completa della curva di adsorbimento sull'intero intervallo di umidità relativa potrebbe consentire, in studi futuri, una definizione ancora più accurata dei parametri di input e un ulteriore affinamento delle simulazioni svolte.

Confronto tra le simulazioni analizzate e interpretazione dei risultati

Stratigrafia	Contenuto d'umidità totale [kg/m²]	UR max interfaccia paglia - intonaco ext [%]	Superamento 90% UR	Superamento 95% UR	Condizioni favorevoli degrado biologico
Stratigrafia di riferimento	2,0 - 18,0	~100	Sì	Sì	Possibili
Aquapanel + paglia + terra cruda + malta d'argilla	2,5 - 5,7	~80	No	No	Ridotte
Intonaco minerale + paglia + terra cruda + malta d'argilla	2,9 - 4,75	~80	No	No	Ridotte
Stratigrafia multistrato con Fermacell e freno al vapore	1,6 - 3,6	~78	No	No	Ridotte
Stratigrafia di riferimento + freno al vapore	2,0 - 17,0	~100	Sì	Sì	Possibili
Stratigrafia di riferimento + membrana traspirante	2,0 - 12,3	~85	No	No	Ridotte
Stratigrafia di riferimento senza pioggia battente	2,15 - 5,8	~85 per periodi molto limitati	No	No	Molto ridotte

L'analisi comparativa delle diverse configurazioni modellate evidenzia il ruolo determinante della pioggia battente nel comportamento igrotermico della stratigrafia. Le simulazioni relative alla configurazione con Aquapanel, alla presenza della membrana traspirante e idrorepellente, all'intonaco minerale esterno, alla stratigrafia multistrato con Fermacell e all'esclusione della pioggia battente mostrano infatti una significativa riduzione

dei valori massimi di umidità relativa registrati nella zona critica compresa tra lo strato esterno e la paglia. In tutte queste configurazioni le condizioni prossime alla saturazione osservate nella stratigrafia di riferimento risultano infatti assenti o fortemente limitate.

Tale comportamento suggerisce che i valori di umidità relativa superiori al 90% osservati nella configurazione di riferimento siano principalmente riconducibili all'apporto di acqua meteorica attraverso gli strati esterni della parete. Questa interpretazione è ulteriormente supportata dalla simulazione condotta escludendo la pioggia battente, nella quale i fenomeni di elevata umidità relativa scompaiono quasi completamente pur mantenendo inalterate le altre condizioni al contorno del modello.

Le differenti configurazioni analizzate evidenziano inoltre come il miglioramento del comportamento igrotermico sia ottenuto mediante meccanismi differenti. L'intonaco in calce della stratigrafia di riferimento, pur essendo un materiale traspirante, è caratterizzato da un comportamento capillarmente attivo che consente l'assorbimento di una quota significativa di acqua meteorica, successivamente trasferita verso gli strati più interni della parete. L'Aquapanel, al contrario, limita in modo significativo l'ingresso dell'acqua liquida dall'esterno, riducendo il trasferimento di umidità verso la paglia pur mantenendo la possibilità di diffusione del vapore. La membrana traspirante e idrorepellente adotta un differente principio di funzionamento: essa consente il passaggio del vapore acqueo ma costituisce una barriera nei confronti dell'acqua liquida, impedendo che l'umidità assorbita dall'intonaco esterno venga trasferita allo strato isolante. L'intonaco minerale rappresenta invece una soluzione intermedia, caratterizzata da una minore capacità di assorbimento dell'acqua rispetto all'intonaco in calce e da una più rapida asciugatura, con conseguente riduzione dell'umidità trasferita verso gli strati interni.

Nel loro complesso, tali risultati evidenziano come il comportamento igrotermico della parete non dipenda esclusivamente dalla permeabilità al vapore dei materiali impiegati, ma soprattutto dalla loro capacità di limitare l'ingresso e la redistribuzione dell'acqua liquida proveniente dalle precipitazioni atmosferiche. La gestione dell'acqua meteorica risulta quindi l'aspetto progettuale più determinante per ridurre le condizioni di elevata umidità nella zona critica della stratigrafia.

Un'ulteriore considerazione può essere formulata confrontando le osservazioni sperimentali relative alle prove di adsorbimento e di permeabilità al vapore d'acqua. Durante la prova delle isoterme di adsorbimento i campioni sono stati mantenuti ad una temperatura

costante di circa 23 °C, dapprima ad un'umidità relativa del 75% e successivamente dell'85%, per una durata complessiva di circa 16 giorni. In tali condizioni non è stata osservata la formazione di muffa sui provini.

Diversamente, nel corso della prova di permeabilità al vapore d'acqua, i campioni sono rimasti esposti per circa sette settimane ad un'umidità relativa prossima al 94% sul lato umido della prova, evidenziando al termine dell'esperimento la comparsa di muffa. Sebbene le due prove siano state condotte secondo modalità differenti e non siano quindi direttamente confrontabili, tale osservazione suggerisce come la combinazione di valori molto elevati di umidità relativa e di tempi di esposizione prolungati possa rappresentare una condizione significativamente più favorevole allo sviluppo di fenomeni biologici rispetto ad esposizioni di durata inferiore e caratterizzate da livelli di umidità più contenuti.

Individuazione della configurazione maggiormente performante

Il confronto tra le diverse configurazioni analizzate mediante simulazione dinamica ha consentito di individuare la soluzione caratterizzata dal comportamento igrotermico complessivamente più favorevole. In particolare, la stratigrafia multistrato costituita da un doppio strato di paglia separato da una lastra intermedia in gessofibra e da un freno al vapore ha evidenziato il minor contenuto di umidità totale della parete, oltre ai valori più contenuti di umidità relativa nella zona critica posta in corrispondenza dell'interfaccia tra lo strato esterno e la paglia, che non superano il valore del 78%.

La presenza del sistema multistrato contribuisce inoltre a mantenere livelli di umidità relativa inferiori anche nello strato di paglia più interno, determinando condizioni termoigrometriche complessivamente più favorevoli rispetto alle altre configurazioni considerate. Tali risultati hanno portato ad individuare questa soluzione come la configurazione di riferimento per la futura realizzazione sperimentale della parete presso la test room.

I risultati ottenuti suggeriscono inoltre che il comportamento della stratigrafia potrebbe essere ulteriormente migliorato mediante l'inserimento della membrana traspirante e idrorepellente sul lato esterno della parete. Tale soluzione, infatti, ha mostrato risultati positivi anche quando analizzata in associazione alla stratigrafia di riferimento, contribuendo a limitare il trasferimento di acqua liquida verso lo strato isolante senza compromettere la diffusione del vapore acqueo verso l'esterno. L'adozione combinata delle due soluzioni potrebbe pertanto rappresentare un'ulteriore evoluzione progettuale finalizzata a ridurre

ulteriormente il rischio di accumulo di umidità nella zona maggiormente critica della stratigrafia.

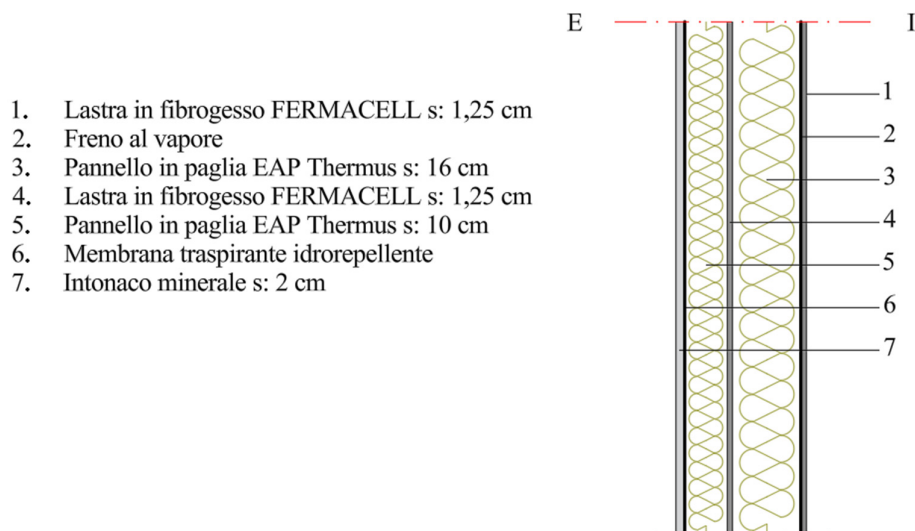


Figura 9.1 – Stratigrafia maggiormente performante

Implicazioni e sviluppi futuri

I risultati ottenuti consentono di formulare alcune considerazioni sulle possibili implicazioni della ricerca, sia dal punto di vista scientifico sia in relazione alle future applicazioni progettuali.

Dal punto di vista scientifico e metodologico, il lavoro ha contribuito alla caratterizzazione igrotermica della paglia come materiale isolante attraverso la determinazione sperimentale di alcune proprietà fondamentali e il loro impiego nelle simulazioni numeriche. L'integrazione tra prove sperimentali e modellazione ha permesso di definire parametri di input rappresentativi del materiale studiato, fornendo un approccio applicabile anche all'analisi di altri materiali naturali.

Dal punto di vista progettuale, i risultati hanno evidenziato come il comportamento igrotermico della parete dipenda in modo significativo dalla configurazione degli strati di rivestimento e dalle modalità con cui viene gestita la diffusione del vapore acqueo attraverso la stratigrafia, oltre che dalle proprietà della paglia stessa. Le simulazioni hanno inoltre consentito di individuare strategie di ottimizzazione della configurazione di riferimento, fornendo indicazioni utili per la progettazione di sistemi costruttivi in paglia ad elevata traspirabilità.

Per quanto riguarda gli sviluppi futuri, la naturale prosecuzione della presente ricerca riguarda innanzitutto la fase di monitoraggio in opera della stratigrafia di riferimento realizzata presso la test room sperimentale. L'acquisizione dei dati termoigrometrici in condizioni reali di esercizio consentirà di confrontare i risultati sperimentali con quelli ottenuti mediante le simulazioni numeriche, permettendo una validazione dei modelli adottati e una migliore comprensione del comportamento della parete nel lungo periodo.

Parallelamente, i risultati ottenuti dalle simulazioni hanno consentito di individuare una configurazione caratterizzata da prestazioni igrotermiche migliorative rispetto alla stratigrafia di riferimento, la cui realizzazione e il cui successivo monitoraggio costituiscono una fase successiva del programma di ricerca. Il confronto diretto tra il comportamento in opera della configurazione di riferimento e della soluzione ottimizzata consentirà di valutare sperimentalmente l'efficacia delle strategie progettuali individuate mediante modellazione numerica e di verificare la capacità delle soluzioni proposte di ridurre il rischio di accumulo di umidità nelle zone maggiormente critiche della parete.

L'integrazione tra monitoraggio sperimentale e simulazioni numeriche potrà infine contribuire allo sviluppo di componenti edilizi a base di paglia sempre più performanti, affidabili e durevoli, favorendo una più ampia diffusione dei materiali naturali e dei sistemi costruttivi altamente traspiranti nel settore dell'edilizia sostenibile.

10. Conclusioni

La presente ricerca ha avuto l'obiettivo di approfondire il comportamento igrotermico della paglia come materiale isolante naturale, definire e realizzare una stratigrafia di riferimento ad elevata traspirabilità destinata all'impiego nell'involucro edilizio e analizzarne il comportamento mediante simulazioni numeriche, al fine di prevederne le prestazioni in condizioni realistiche di esercizio e individuare, attraverso il confronto con ulteriori configurazioni progettuali, una soluzione caratterizzata da prestazioni igrotermiche migliorative.

La caratterizzazione sperimentale ha consentito di determinare alcune delle principali proprietà fisiche e igroscopiche della paglia, tra cui la conducibilità termica, la permeabilità al vapore acqueo e la capacità di adsorbimento dell'umidità. I risultati ottenuti hanno confermato le elevate potenzialità del materiale dal punto di vista dell'isolamento termico e della traspirabilità, evidenziando valori pienamente compatibili con l'impiego della paglia in soluzioni costruttive ad alte prestazioni energetiche e basso impatto ambientale.

Parallelamente, le simulazioni condotte mediante i software PAN e WUFI hanno permesso di prevedere il comportamento della stratigrafia di riferimento sia in regime stazionario sia in regime igrotermico dinamico e di valutarne le principali criticità e potenzialità in condizioni realistiche di esercizio. Le verifiche effettuate mediante PAN hanno evidenziato l'assenza di fenomeni di condensazione interstiziale e di rischio biologico secondo i criteri previsti dalla normativa vigente, confermando le buone prestazioni della soluzione proposta. Le simulazioni dinamiche condotte con WUFI hanno tuttavia evidenziato la presenza di periodi caratterizzati da elevati valori di umidità relativa in corrispondenza di specifiche interfacce della stratigrafia, individuando nell'interfaccia tra l'intonaco di calce esterno e la paglia la zona maggiormente critica dal punto di vista igrotermico. Tali condizioni costituiranno oggetto delle future attività di monitoraggio della parete realizzata presso la test room sperimentale, finalizzate alla validazione dei modelli numerici e alla verifica del comportamento reale della stratigrafia nel lungo periodo.

Lo studio ha inoltre evidenziato l'importanza di una corretta progettazione delle interfacce tra materiali naturali differenti, come dimostrato dalle problematiche di sviluppo biologico osservate nei campioni inizialmente realizzati con intonaco in terra a diretto contatto con la paglia, che hanno portato alla successiva adozione di lastre prefabbricate in terra cruda come soluzione alternativa.

Nel complesso, i risultati ottenuti confermano che la paglia rappresenta un materiale particolarmente promettente per lo sviluppo di sistemi costruttivi sostenibili, caratterizzati da elevate prestazioni energetiche, ridotto impatto ambientale e buona capacità di regolazione dell'umidità interna. Al tempo stesso, il lavoro svolto evidenzia la necessità di ulteriori approfondimenti sperimentali e di monitoraggi in opera finalizzati a validare nel lungo periodo il comportamento della stratigrafia di riferimento e a verificare l'effettiva corrispondenza tra i risultati sperimentali e le previsioni ottenute mediante simulazione numerica.

Parallelamente, le simulazioni hanno consentito di individuare una configurazione caratterizzata da prestazioni igrotermiche migliorative rispetto alla soluzione di riferimento, la cui realizzazione e il cui monitoraggio costituiscono la naturale prosecuzione della presente attività di ricerca.

Il confronto tra il comportamento in opera della stratigrafia di riferimento e della configurazione ottimizzata consentirà di valutare sperimentalmente l'efficacia delle strategie progettuali individuate e di verificare se gli elevati valori di umidità relativa previsti nelle zone maggiormente critiche della parete possano effettivamente tradursi in fenomeni di condensazione o sviluppo biologico, contribuendo così allo sviluppo e alla validazione di sistemi costruttivi in paglia sempre più affidabili, durevoli e performanti.

Bibliografia

- Brahim Ismail, Naima Belayachi, Dashnor Hoxha,
“Hygric properties of wheat straw biocomposite containing natural additives intended for thermal insulation of buildings”,
Construction and Building Materials, vol. 317, 2022, 126049.
- Yuchen Chen, Xiaodong Alice Wang, Dehong Li, Denis Rodrigue, Louis Gosselin,
“Hygrothermal performance of straw bales split-insulation wall assembly in cold and humid climates”
Energy & Buildings, vol. 307, 2024, 113974.
- Yaping Zhou, Abdelkrim Trabelsi, Mohamed El Mankibi,
“Hygrothermal properties of insulation materials from rice straw and natural binders for buildings”
Construction and Buildings Materials, vol. 327, 2023, 130770.
- Juan Camilo Castañeda Múnera, Louis Gosselin,
“Impact of Density, relative Humidity, and fiber size on hygrothermal properties of barley straw for building envelopes”
Construction and Building Materials, vol. 409, 2023, 133954.

Allegati – schede tecniche dei materiali

Allegato 1 – scheda tecnica pannello in paglia EAP Thermus



Dichiarazione di prestazione N°:
HU-SSH/50-100/CE/TNY/01

- Codice di identificazione unico del prodotto-tipo:
Pannello EAP Thermus
- Uso Previsto:
Isolamento termico e sonoro degli edifici, pareti esterne ed interne, solai e tetti spioventi.
- Nome e indirizzo del produttore:
SSH-System Kft. 2084 Pilisszentiván, Ipartelep utca 2-4.
- Sistema di attestazione di conformità:
System 3
- Dichiarazione del produttore:
Il produttore ha effettuato i propri test, in conformità con i requisiti degli standard di prova nominati, nel laboratorio di prova dei materiali da costruzione dell'Università "Széchenyi István", a Győr, tra il 30/11/2020 e il 09/12/2020.

Rapporto di prova rilasciato dalla Central Material and Structure Testing Laboratory di ÉMI Nonprofit Kft. accreditata sotto il codice alfanumerico NAH-1-1110/2018/K + M1-A186K-21803-2021 nel 28/05/2021. (MSZ EN 12086:2013).

Caratteristiche	Prestazione	Specifica tecnica armonizzata
Densità (ρ - kg/m ³):	mediamente 75 (70-85)	MSZ EN 1602:2013
Conduttività termica (λ - W/mK)	0,041	MSZ EN 12667:2001
Assorbimento dell'acqua (breve termine) [w - kg/m ²]	1 - 1,6	MSZ EN 1609:2013
Tolleranza dimensionale - larghezza - lunghezza - spessore	0,5 % 1,5 % 3,0 %	MSZ EN 1604:2013
Resistenza alla compressione [kPa]	25-38	MSZ EN 826:2013
Resistenza alla flessione [kPa]	0,5	MSZ EN 12089:2013
W - indice di trasmissione del vapore [mg/(m ² *h*Pa)]	2,58	MSZ EN 12086:2013
Z - resistenza alla diffusione del vapore [(m ² *h*Pa)/mg]	0,388	
δ - permeabilità al vapore [mg/(m ² *h*Pa)]	0,168	
μ - coefficiente di resistenza alla diffusione del vapore [-]	4,4	
S _d - resistenza alla diffusione del vapore acqueo, metri equivalenti [m]	0,287	MSZ EN ISO 717-1:2013
R _w (C; C _{tr}) - Potere fonoisolante (-5; -12) dB	43	

- Le proprietà definite nella tabella del punto 6 corrispondono alle prestazioni del prodotto in accordo alla dichiarazione.

Il produttore (o il rappresentante autorizzato), specificato nella dichiarazione delle prestazioni, è l'unico responsabile del rilascio della dichiarazione di prestazione.

Firmato a nome e per conto del produttore da:


SSH-System Kft.
2084 Pilisszentiván,
Ipartelep utca 2-4.
Adószám: 26180462-2-13
Bui.: 16200137-16596403
Stvertczky Zsolt
CEO

EAP Thermus S.r.l.
Strada Campagna, 41 - Santa Restituta
05020 - Avigliano Umbro (TR)
P.IVA 01727900555

Allegato 2 – scheda tecnica intonaco TCS Climatherm M



Scheda Tecnica Dicembre 2022 | Rev.3

Dati Tecnici

TIPO DI PRODOTTO: Malta per isolamento termico (T) per interni ed esterni conforme norma UNI EN 998-1

DATI TECNICI		
Proprietà	U.m.	Valore
Curva Granulometrica EN 1015-1	mm	0 - 4
pH dell'impasto	pH	> 12.5
Massa volumica apparente malta fresca EN 1015-6	kg/m ³	media 650-730
Massa volumica apparente malta essiccata EN 1015-10	kg/m ³	media 400
Massa volumica apparente in mucchio	kg/m ³	media 348
Resistenza a compressione EN 1015-11:	-	categoria CS I
Resistenza a flessione EN 1015-11:	N/mm ²	0.58
Adesione EN 1015-12	N/mm ²	0.35
Coefficiente di resistenza alla diffusione del vapore acqueo EN 1015-19	μ	< 6
Assorbimento d'acqua per capillarità EN 1015-18	-	W1
Tempo inizio presa a 20°C 65% UR	h	16
Tempo fine presa a 20°C 65% UR	h	24
Conducibilità termica (EN 12667) lambdaD	W/(m·K)	0.057 valore Tabulato
Contenuto di aria in malta fresca EN 1015-7	%	27
Calore specifico EN 12524	J/(kg·K)	1000
Fonoassorbenza	Rw	37 dB su stratigrafia composta da Climatherm 3 cm, Tavolato in laterizio forato 8 cm, intonaco tradizionale 1.5 cm
Reazione al fuoco EN 13501-1	Classe	A1
Acqua d'impasto	l	10-11 l per sacco
Resa	kg/m ² /cm spessore	4
Spessore applicabile per strato	cm	3-4

STOCCAGGIO E CONFEZIONI	
Confezioni	Sacco da 17kg
Pallet	48 sacchi, 816 kg
Conservazione	18-24 mesi nella confezione originale in luogo asciutto
Temperatura di applicazione	da +5°C a +32°C
Classificazione Reach	Vedere SDS