

Gli e-book di **Edil** **Tecnico**.it

Marta Calzolari, Luísa Dias Pereira, Francesca Renato

Isolamento termico per edifici storici

Soluzioni tecnologiche, sperimentazioni
e simulazioni termoigrometriche



Marta Calzolari, Luísa Dias Pereira, Francesca Renato

Isolamento termico per edifici storici

**Soluzioni tecnologiche, sperimentazioni
e simulazioni termoigrometriche**



Marta Calzolari

Centro Ricerche Architettura> Energia, Dipartimento di Architettura - Università degli studi di Ferrara, via Ghiara 36, 44121, Ferrara, Italia; marta.calzolari@unife.it, dsplmr@unife.it, francesca.renato@edu.unife.it

Luísa Dias Pereira

Dipartimento di Ingegneria Meccanica Pólo II, Università di Coimbra, ADAI-LAETA, Rua Luís Reis Santos, 3030-788 Coimbra, Portogallo

Francesca Renato

Centro Ricerche Architettura> Energia, Dipartimento di Architettura - Università degli studi di Ferrara, via Ghiara 36, 44121, Ferrara, Italia; marta.calzolari@unife.it, dsplmr@unife.it, francesca.renato@edu.unife.it



© Copyright 2022 by Maggioli S.p.A.

Maggioli Editore è un marchio di Maggioli S.p.A.
Azienda con sistema di gestione qualità certificato ISO 9001:2015

47822 Santarcangelo di Romagna (RN) • Via del Carpino, 8

Tel. 0541/628111 • Fax 0541/622595

www.maggiolieditore.it

e-mail: clienti.editore@maggioli.it

Diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica, di riproduzione e di adattamento totale o parziale con qualsiasi mezzo sono riservati per tutti i Paesi.

Gli Autori e l'Editore declinano ogni responsabilità per eventuali errori e/o inesattezze relativi alla elaborazione dei testi normativi e per l'eventuale modifica e/o variazione degli schemi e della modulistica allegata.

Gli Autori, pur garantendo la massima affidabilità dell'opera, non rispondono di danni derivanti dall'uso dei dati e delle notizie ivi contenuti.

L'Editore non risponde di eventuali danni causati da involontari refusi o errori di stampa.

Preservare gli edifici storici è un'azione necessaria per conservare il loro valore culturale come importante testimonianza per il futuro. Ripensare un edificio storico in ottica di una continuità d'uso significa adattarlo alle nuove esigenze di comfort richieste dalla società. Questo implica sicuramente un miglioramento energetico anche dell'involucro architettonico.

Il progetto HeLLO (Heritage energy Living Lab onsite) nasce in questo contesto con lo scopo di valutare, grazie a una campagna di monitoraggio *in situ*, le potenziali criticità derivanti dall'aggiunta di strati di isolamento interno posati senza barriera al vapore, per conservare l'originaria traspirabilità del muro storico. L'obiettivo è quello di aumentare la consapevolezza di tecnici e progettisti in merito a temi di grande attualità e utilità nella pratica professionale quotidiana.

L'esperimento ha permesso di testare tre tecnologie isolanti differenti nel contesto di Palazzo Tassoni Estense, a Ferrara, grazie a un'attività di ricerca promossa congiuntamente con la Soprintendenza e le aziende produttrici

Il progetto HeLLO

Il consumo energetico degli edifici è oggi sempre più spesso sotto i riflettori, non solo perché il patrimonio edilizio costruito è, effettivamente, riconosciuto come altamente energivoro, ma ancor più nell'ultimo periodo a causa del conflitto bellico che ha sottolineato ulteriormente l'urgenza di limitare il consumo di energia in tutti i settori. A livello europeo, sin dal 2012 (grazie alla direttiva europea 2012/27/Ue), è stata suggerita la necessità di stabilire piani per l'efficienza energetica negli edifici, come mezzo prezioso per affrontare le sfide legate alla scarsità di risorse energetiche, ai cambiamenti climatici e alla crisi economica. Nonostante l'incoraggiamento di tali politiche, il settore aspetta e richiede ancora azioni vitali e tempestive. Recentemente, due strategie, con l'obiettivo di migliorare l'efficienza energetica del parco immobiliare dell'Ue, riconoscono l'importanza della pianificazione, da un lato attraverso la nuova direttiva sulla prestazione energetica nell'edilizia (2018/844/Ue), dall'altro con l'ondata di ristrutturazioni (Commissione europea, 2020) degli edifici pubblici e privati, attivata dal *Green Deal* europeo (Commissione europea, 2019). In questo contesto, il patrimonio storico deve essere ampiamente coinvolto, in termini di mantenimento dei suoi valori architettonici, sociali e testimoniali per le prossime generazioni, senza che venga, però, travolto negativamente da questi piani.

È noto che nei processi di ristrutturazione degli edifici storici si incontrino varie criticità e vincoli quando si intenda agire rispettandone i valori testimoniali. Uno degli aspetti più delicati è il miglioramento delle prestazioni energetiche dell'involucro e particolarmente difficile risulta lavorare sulle superfici opache verticali a causa delle possibili incompatibilità delle soluzioni proposte con i materiali storici e della potenziale interferenza di tali interventi con il comportamento termoisolante originale della muratura. Per questa ragione, l'aggiunta di uno strato isolante interno (quando sono assenti superfici di pregio e decorazioni che possano ostacolare anche questa strada) è spesso l'unica opzione. Tuttavia, contrariamente all'isolamento esterno, questa soluzione presenta diversi svantaggi, (approfonditi anche in *L'Ufficio Tecnico* 4/2017 – Calzolari, 2017) tra i quali la perdita di spazio interno (Zagorskas *et. al.*, 2014) e la possibilità di generazione di condensa interstiziale (Calzolari, Davoli e Dias Pereira, 2020) a causa di temperature inferiori della parete storica (che, una volta isolata, non riceve più calore dall'interno) e la con-

seguinte riduzione della capacità di asciugatura della stessa, che porta a livelli di umidità più elevati sulla faccia interna della frontiera.

La soluzione più intuitiva e comune per evitare la possibilità di condensa è l'aggiunta di una barriera al vapore sullo strato isolante. Questa, però, non solo modifica in modo significativo le caratteristiche "tradizionali" di traspirazione tipiche delle murature in laterizio, ma il suo effetto può, anche, essere immediatamente compromesso quando viene interrotta in corrispondenza di prese elettriche, dell'appoggio delle teste delle travi dei solai o in presenza di forature e/o canalizzazioni nei muri. Pertanto, le diverse criticità che questa opzione comporta, inducono le Sovrintendenze, il più delle volte, a giudicare l'aggiunta di uno strato impermeabile come un'alterazione inaccettabile del comportamento termoigrometrico originale dell'involucro storico, di conseguenza congelando o interrompendo l'intero processo di intervento.

In questo quadro nasce HeLLO - Heritage Energy Living Lab Onsite ⁽¹⁾, un progetto di ricerca che, attraverso la creazione di un vero e proprio laboratorio sperimentale, ha lo scopo di verificare, negli edifici storici, gli effetti e le potenziali criticità di soluzioni di isolamento termico dall'interno senza l'aggiunta di una barriera al vapore. L'obiettivo è di raccogliere e mettere a disposizione di tecnici e progettisti informazioni reali circa il comportamento termoigrometrico di soluzioni comunemente utilizzate sul mercato.

A fianco di un sistema strutturato di "Laboratori aperti" per la disseminazione delle attività (precedentemente documentate anche in *L'Ufficio Tecnico* 6/2020 – Calzolari, Davoli e Dias Pereira,



Figura 1 – Palazzo Tassoni Estense, Ferrara: la parete selezionata per il monitoraggio in situ (sullo sfondo) si trova sotto un portico, nel cortile dell'edificio

2020), nell'ambito del progetto è stata condotta una campagna di monitoraggio per testare le prestazioni termoigrometriche di una parete isolata con tre diverse tecnologie, per poi analizzare e confrontare i risultati con simulazioni numeriche ⁽²⁾. Il contributo presenta una sintesi dei principali risultati ottenuti nell'ambito del progetto ⁽³⁾.

Palazzo Tassoni Estense

Il caso studio di HeLLO è Palazzo Tassoni Estense, un edificio del XV secolo, collocato vicino alle mura medievali nella porzione Sud/Est della città di Ferrara. Attualmente l'edificio ospita il Dipartimento di Architettura dell'Università degli Studi di Ferrara ed è quindi rappresentativo di un edificio di tipo pubblico, con un significativo valore testimoniale e di impatto per i bisogni della comunità.

Nonostante l'edificio sia stato sottoposto ad un intervento di restauro scientifico, l'esperimento è stato condotto in un'area non ancora ristrutturata, che ha permesso di installare più liberamente il laboratorio. La parete selezionata su cui sono stati condotti i test, orientata ad Est/Sud Est, è situata sotto un portico (figura 1). Questa situazione fa sì, da un lato, che la parete non si bagni come le altre facciate esposte alle intemperie, dall'altra, l'ombreggiamento dato dalla presenza del portico limita l'asciugatura, poiché la parete non riceve irraggiamento solare diretto. Il fenomeno è, pertanto, studiato nel suo stato più puro, in quanto dipende esclusivamente dai fenomeni di trasporto del vapore. La particolare configurazione è molto frequente negli edifici storici, quindi, pur rappresentando una situazione specifica, può comunque essere rappresentativa di molti edifici appartenenti al patrimonio storico.

La parete è costituita da mattoni di tipo "bolognese" (28x14x6 cm), comunemente utilizzati in edifici della stessa area geografica con caratteristiche analoghe e posati con fuga di circa 2 cm, e intonaco (sia interno sia esterno), a comporre uno spessore murario complessivo di 32 cm.

Le tecnologie di isolamento

La scelta dei materiali isolanti è stata dettata dalla volontà di testare prodotti e soluzioni comunemente diffusi nel mercato italiano, utilizzati sia in edifici storici sia in edifici di nuova costruzione. Sono stati, quindi, selezionate soluzioni piuttosto diffuse sul mercato, di cui sono noti i vantaggi e gli svantaggi.

In fase di selezione, e poi di definizione dei metodi di installazione, sono stati organizzati veri e propri tavoli di lavoro con la Soprintendenza e le aziende produttrici. La scelta della stratigrafia finale deriva da un equilibrio tra:

- aspetti conservativi, seguendo i criteri di distinguibilità, compatibilità, reversibilità e "minimo intervento";
- lo spessore finale della stratigrafia, per garantire un buon livello di isolamento termico raggiungendo un valore di trasmittanza termica che giustifichi l'intervento da un punto di vista energetico, limitando al contempo lo spreco eccessivo di spazio interno;
- la facile reperibilità del materiale sul mercato, per fornire dati direttamente utilizzabili nella pratica quotidiana.

Al termine della discussione, la decisione finale ha portato alla selezione di tre soluzioni che permettessero di studiare un materiale con una finitura in continuità con quella storica, uno naturale e tradizionale utilizzato, però, in modo innovativo e un materiale molto diffuso sul mercato, caratterizzato da una "posa a secco". Nello specifico le stratigrafie installate sul muro storico sono (figura 2 a, b, c):

- a) isolante minerale, in blocchi (100 mm) incollati alla parete con una malta adesiva reversibile (spessore 8 mm), provvisti di uno strato di malta di finitura da 10 mm;
- b) sughero, in pannelli (50 mm) sostenuti da una propria struttura di ancoraggio in legno (rivesti-



Figura 2 – Fasi dell'installazione delle tre tecnologie di isolamento termico scelte per i test: blocchi in isolante minerale incollati con malta reversibile (a); pannelli in sughero montati a secco con struttura in legno (b); pannelli di lana di roccia con montanti in acciaio separati dal muro con uno dei due pannelli isolanti (c)

ta sulle due facce con un sottile strato di sughero per eliminare il ponte termico), con montanti fissati puntualmente alla parete storica, e con pannelli rifiniti con una lastra in gessofibra;
c) lana di roccia, in due strati (40+60 mm) con telaio in acciaio zincato (separato dalla parete dal pannello da 40 mm per evitare il ponte termico), e placcati con un pannello di cartongesso. Come premesso, nessuna soluzione prevede la barriera al vapore.

Il monitoraggio *in situ* e le simulazioni termoigrometriche

La campagna di monitoraggio *in situ* prevede una configurazione non commerciale di sensori che rilevano temperatura (T , °C) e umidità relativa (RH , %). Tali sensori sono stati collocati in diversi punti della stratigrafia delle tre tecnologie, ma nel presente articolo si presentano soltanto i risultati ottenuti nel punto più critico della stratigrafia, cioè quello dove è più probabile che si verifichi la condensazione, tra lo strato isolante e la parete storica (punto 1 in figura 3).

Il rilievo, condotto dal 15 novembre 2019 al 30 settembre 2020, è suddiviso in due fasi: la “fase di monitoraggio attivo”, tra il 15 novembre 2019 e il 12 marzo 2020, periodo durante il quale l’ambiente interno è stato adeguatamente riscaldato e umidificato, con un significativo ΔT e ΔRH tra interno ed esterno e una fase, a seguire, di “monitoraggio passivo”, con gli impianti spenti.

Parallelamente sono state condotte le simulazioni termoigrometriche, seguendo le raccomandazioni EN 15026, utilizzando il software Delphin 6.0.20 ⁽⁴⁾.

I modelli termoigrometrici sono stati progettati secondo le sezioni di stratigrafia presentate in figura 2 (a, b, c) e 3. I dati climatici interni (valori T e RH) derivano dai dati monitorati tra il 15 novembre 2019 e il 30 settembre 2020, mentre il file climatico esterno è stato ricostruito unendo i dati monitorati nel medesimo periodo a un dataset preesistente ⁽⁵⁾.

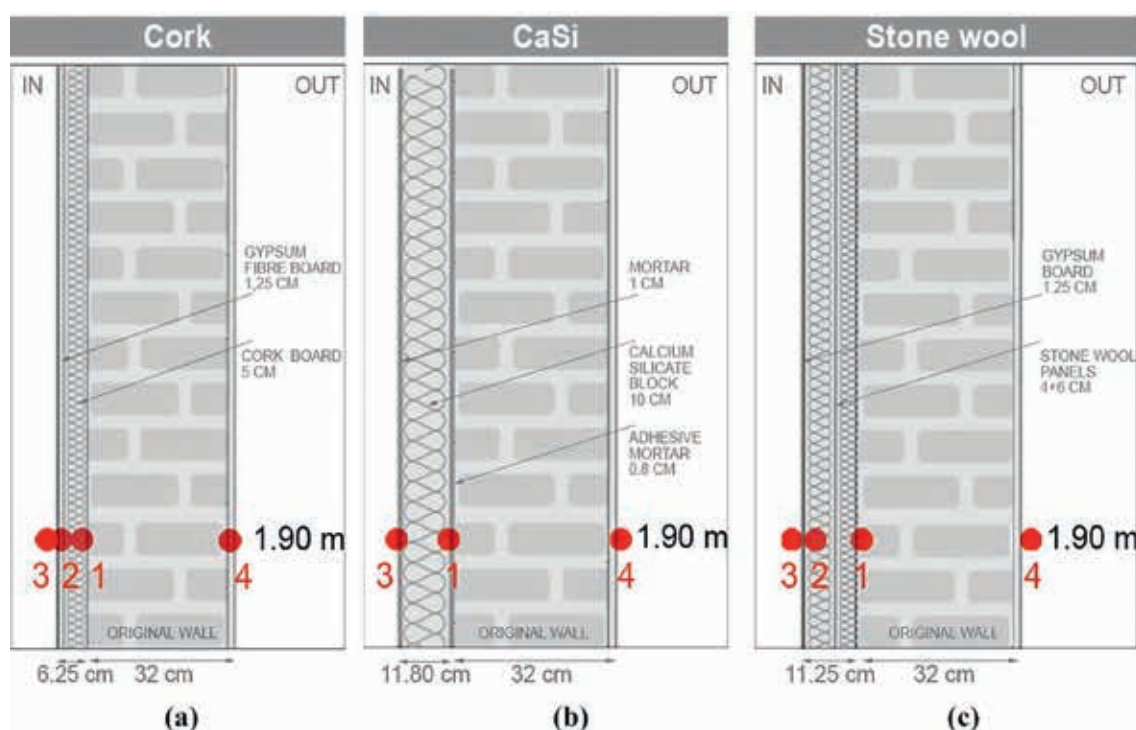


Figura 3 – Schemi a sezione verticale della posizione dei sensori: (i) sensore 4 - superficie esterna della parete storica originale; (ii) sensore 3 - superficie interna; (iii) sensore 1 - punto “critico” per la formazione di condensa interstiziale, tra la parete storica e lo strato isolante. Nelle stratigrafie che lo prevedono sono stati installati altri sensori tra strato isolante e pannelli di finitura (sensore 2). Materiali: (a) sughero; (b) isolante minerale; (c) lana di roccia

Per la costruzione del modello, tutti i dati relativi ai materiali sono stati selezionati dal database del software. In particolare, i parametri relativi ai mattoni e agli intonaci si riferiscono a materiali storici, come definiti dal Progetto europeo 3ENCULT ⁽⁶⁾. La caratterizzazione termoigrometrica degli strati isolanti, invece, nasce dalla discussione con le aziende coinvolte nel progetto HeLLO, che ha portato alle seguenti scelte:

- isolante minerale: il materiale è già disponibile nel database di Delphin's® e corrisponde esattamente al materiale installato. Per questo motivo è stato semplicemente selezionato dall'elenco;
- sughero: in assenza di test igrometrici di laboratorio effettuati sul materiale installato è stato selezionato il materiale disponibile nel database, anche se non perfettamente coincidente con quello posato;

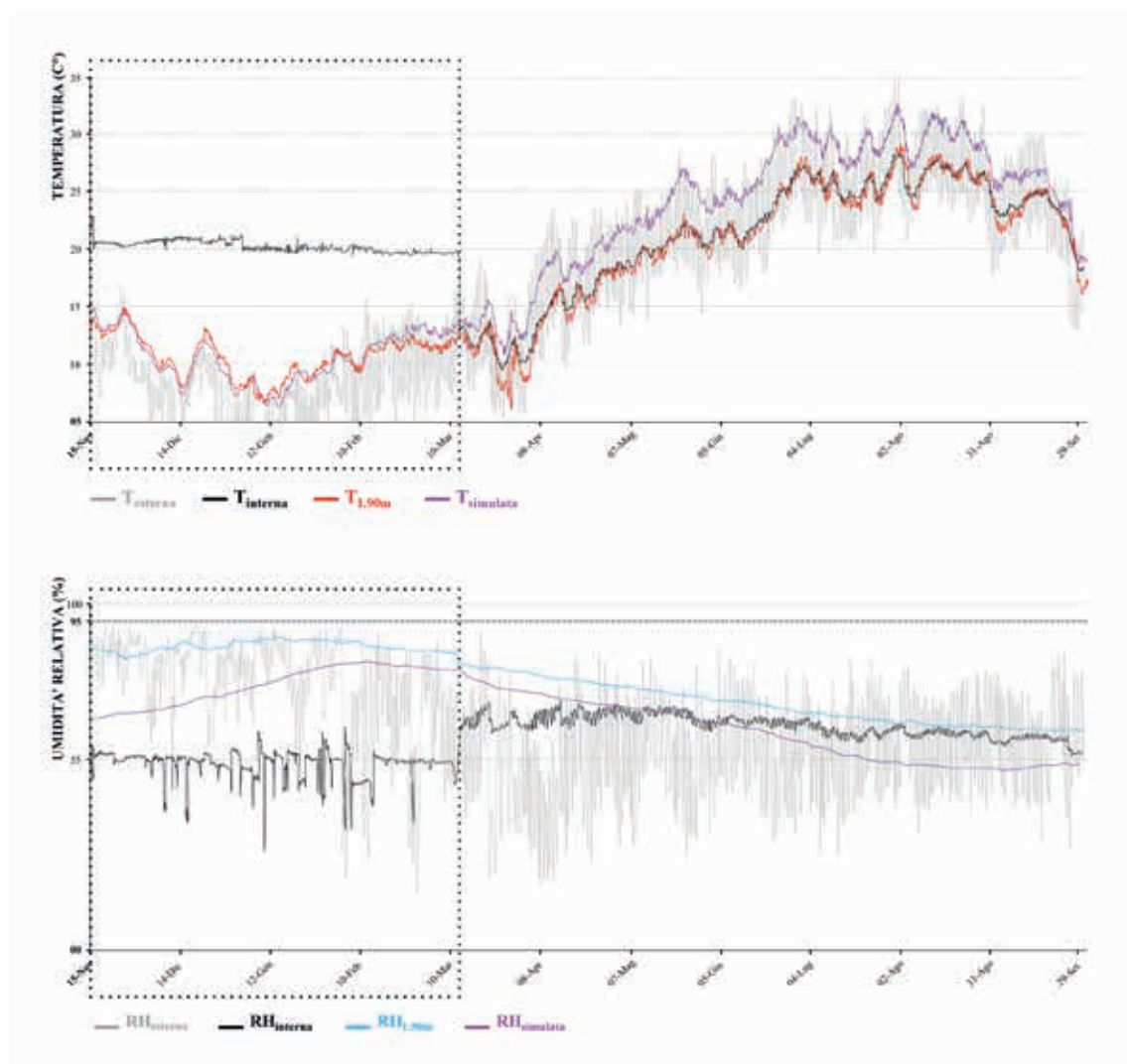


Figura 4 – Condizioni termoigrometriche monitorate e simulate tra il 15 novembre 2019 e il 30 settembre 2020 nella stratigrafia con l'isolante minerale. I valori mostrati si riferiscono al probabile punto di condensazione (sensore 1 – Figura 3). (sopra) T (°C); (sotto) RH (%). La linea nera corrisponde ai valori di temperatura T (°C) e umidità relativa RH (%) misurati all'interno, la linea grigia rappresenta le condizioni all'esterno, il punto critico è definito dalla linea rossa per T e azzurra per RH , mentre i dati simulati sono quelli indicati dalla linea viola

- lana di roccia: essendo stati condotti dall’azienda precedenti test di laboratorio per la caratterizzazione del materiale, sono stati utilizzati tali dati per la creazione di un “nuovo” materiale del database del software.

Grazie alla calibrazione del modello con i dati climatici reali e la definizione accurata dei materiali, si è raggiunta la migliore relazione possibile tra i risultati calcolati e i dati raccolti *in situ*.

I grafici di figura 4, 5 e 6 mostrano i risultati relativi alle tre soluzioni testate. In tutte le immagini è restituito l’intero periodo di monitoraggio/simulazione mentre il rettangolo tratteggiato evidenzia il periodo di riscaldamento (“fase di monitoraggio attivo”). Per ogni tecnologia sono riportati i valori di temperatura T (°C) e umidità relativa RH (%) misurati all’interno (linea nera), all’esterno (linea grigia), nel punto critico (punto 1 della figura 3, a 1,90m da terra, linea rossa per T e azzurra per RH) e i dati simulati (linea viola).

Poiché i valori della temperatura esterna non sono mai scesi sotto lo zero nell’intero periodo monitorato, in nessuna delle soluzioni analizzate si è verificato il rischio di fratturazioni da gelo, quan-

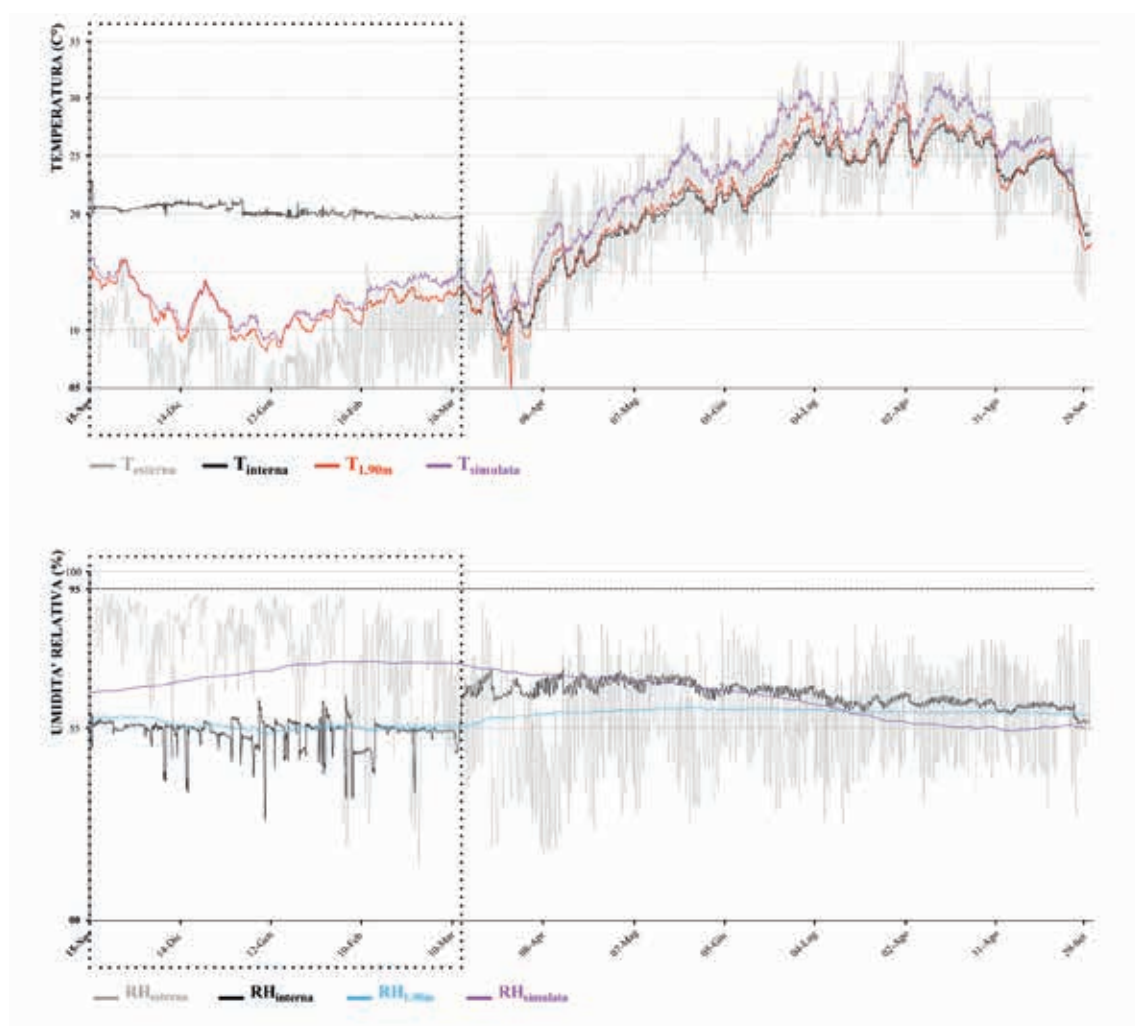


Figura 5 – Condizioni termoigrometriche monitorate e simulate tra il 15 novembre 2019 e il 30 settembre 2020 nella stratigrafia con l’isolante in sughero. I valori mostrati si riferiscono al probabile punto di condensazione (sensore 1 – Figura 3). (sopra) T (°C); (sotto) RH (%). La linea nera corrisponde ai valori di temperatura T (°C) e umidità relativa RH (%) misurati all’interno, la linea grigia rappresenta le condizioni all’esterno, il punto critico è definito dalla linea rossa per T e azzurra per RH, mentre i dati simulati sono quelli indicati dalla linea viola

do, cioè, l'acqua filtrata nella parete, gelando, aumenta di volume e rompe gli elementi della parete. Questo danno, frequente quando si prevede l'isolamento all'interno perché la parete rimane al freddo, è stato scongiurato nella particolare situazione studiata grazie, prevalentemente, a un inverno più caldo rispetto alle medie stagionali (uno degli effetti probabili del cambiamento climatico in atto). Per questa ragione, la discussione che segue pone l'attenzione sui dati di umidità relativa, che sono per di più quelli che prevalentemente determinano gli eventuali problemi di condensa interstiziale. Il grafico di figura 4 mostra i dati relativi all'isolante minerale. I valori di umidità relativa (RH, %) sono sempre inferiori al 95% (limite massimo oltre il quale può verificarsi formazione di condensa), anche nel periodo di monitoraggio attivo, quando il rischio è più alto a causa delle condizioni climatiche esterne. Considerando che la precisione del sensore di RH oltre l'80% diminuisce, la soglia del 95% potrebbe essere stata raggiunta. Nonostante questo, il grafico mostra chiaramente che la criticità è risolta dal momento che l'umidità relativa diminuisce nella stagione estiva, rag-

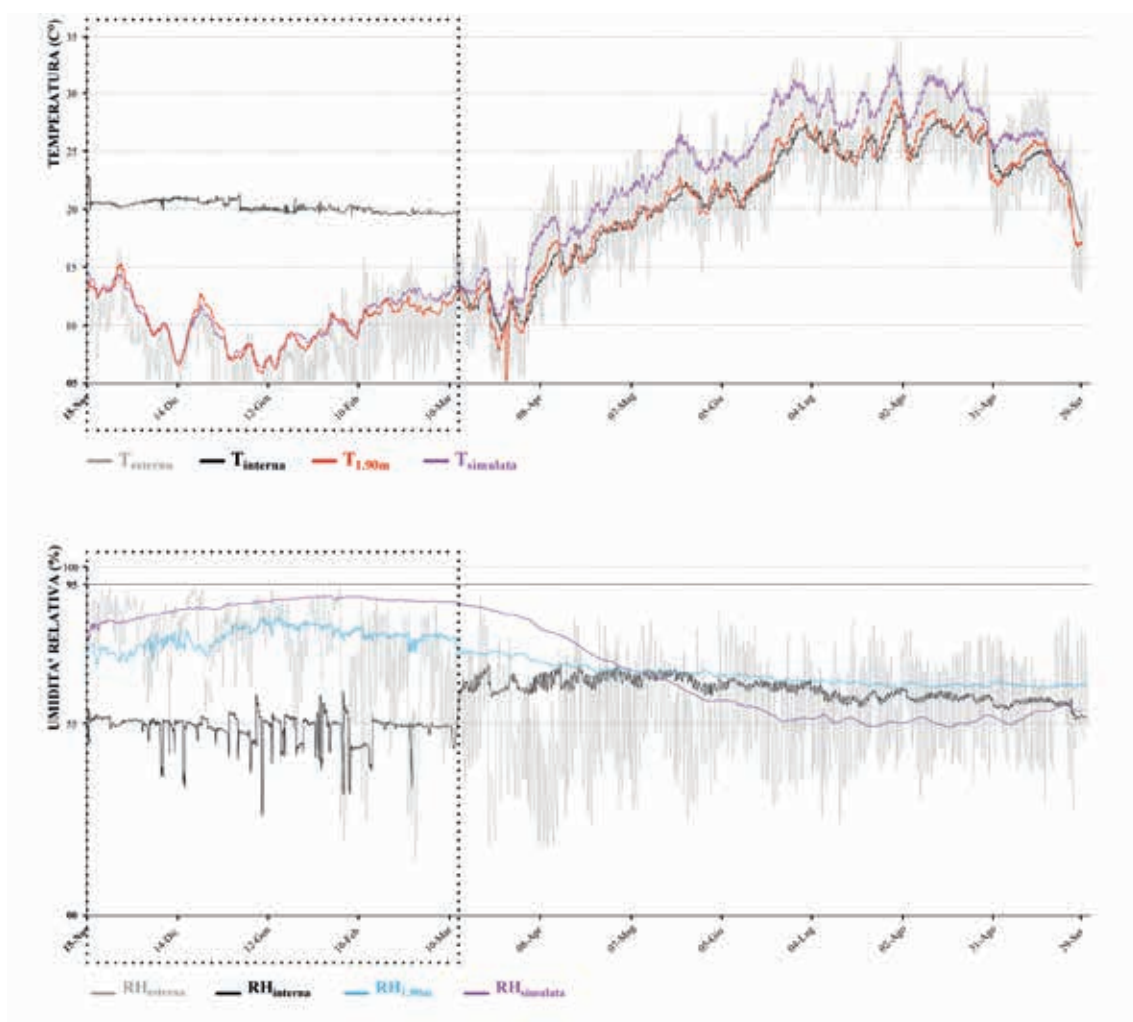


Figura 6 – Condizioni termoigrometriche monitorate e simulate tra il 15 novembre 2019 e il 30 settembre 2020 nella stratigrafia con l'isolante in lana di roccia. I valori mostrati si riferiscono al probabile punto di condensazione (sensore 1 – Figura 3). (sopra) T (°C); (sotto) RH (%). La linea nera corrisponde ai valori di temperatura T (°C) e umidità relativa RH (%) misurati all'interno, la linea grigia rappresenta le condizioni all'esterno, il punto critico è definito dalla linea rossa per T e azzurra per RH, mentre i dati simulati sono quelli indicati dalla linea viola

giungendo valori inferiori al 65%. Questo significa che la quantità di vapore acqueo accumulata durante la stagione invernale si asciuga durante il periodo primaverile/estivo.

Il confronto tra i dati raccolti *in situ* e la simulazione mostra due risultati contrastanti. I valori simulati sovrastimano la temperatura rispetto al profilo monitorato, soprattutto nella stagione primavera-estate. Questo è probabilmente dovuto all'inerzia termica della parete storica che sembra essere maggiore di quanto previsto.

Al contrario, i valori simulati di RH sono sottostimati. Questo risultato dipende da due ragioni: la prima è la previsione di temperature più alte del reale che induce un maggiore processo di asciugatura della parete, soprattutto d'estate, la seconda è relativa al sistema di posa adottato. Tale sistema di installazione con malta è "umido", pertanto nel primo periodo di monitoraggio sono stati certamente rilevati valori di umidità più alti dovuti alla presenza di acqua di posa. La simulazione, invece, restituisce la situazione dopo aver raggiunto un comportamento stazionario e non tiene più conto di questo problema.

L'esperimento condotto sulla stratigrafia con il sughero (figura 5) porta a risultati analoghi al caso precedente per quanto riguarda la temperatura. Il grafico mostra valori di umidità relativa sempre inferiori all'80%, dimostrando che il rischio di condensa non sussiste in nessuna stagione.

Guardando alla simulazione, essa ha sovrastimato i valori di temperatura, mentre per quanto riguarda l'umidità relativa, in alcuni momenti la simulazione ha sovrastimato il comportamento RH, in altri lo ha sottostimato. Questa differenza è particolarmente evidente nel periodo luglio/agosto. Infine, per quanto riguarda la terza analisi, condotta sulla stratigrafia con pannelli in lana di roccia (figura 6), i valori di umidità relativa si avvicinano al limite di condensazione, il 95%, senza mai raggiungerlo. Il ragionamento è però analogo a quanto fatto precedentemente: il processo di asciugatura che si attiva nella stagione estiva cancella ogni probabile criticità legata all'eventuale accumulo di condensa interstiziale.

Per quanto riguarda la simulazione, proprio come in tutte le tecnologie precedenti, quando si tratta della temperatura, la simulazione ha sovrastimato i valori soprattutto nella stagione più calda, mentre la curva di simulazione di RH è stata talvolta sovrastimata e altre sottostimata.

Riflessioni conclusive

In sintesi, sono state riscontrate differenze tra i dati simulati e monitorati in tutti i modelli. Generalmente, i dati simulati si adattano meglio ai dati monitorati *in situ* nella "fase attiva" piuttosto che in quella "passiva". Questa tendenza è più significativa per le temperature che per l'umidità relativa. Ciò può essere dovuto alle fluttuazioni giornaliere delle temperature esterne (giorno/notte) che sono meno pronunciate d'inverno ("fase attiva") rispetto ai periodi di temperature elevate e incontrollate della stagione estiva ("fase passiva").

Trovare, però, una spiegazione certa e puntuale a giustificazione di tali differenze è, senz'altro, molto difficile, perché le discrepanze tra i dati raccolti sul campo e quelli simulati possono essere dovute a molteplici fattori, tra cui la poca omogeneità della parete storica, che può presentare al suo interno fessurazioni, mattoni di diversa natura, interventi di restauro, oppure all'inerzia termica della parete, come abbiamo visto probabilmente superiore alle previsioni. In alternativa e in aggiunta a queste incertezze, le differenze possono dipendere dalle impostazioni della simulazione stessa, in particolare per quanto riguarda la caratterizzazione dei materiali storici.

I risultati ottenuti hanno, in ogni caso, permesso di trarre importanti informazioni circa il comportamento della parete storica con l'aggiunta di isolamento termico in assenza di barriera al vapore. Con l'obiettivo di arricchire la discussione e i dati derivanti dall'esperimento, sono state simulate alcune variazioni alle stratigrafie di base, in particolare agendo sullo spessore dell'isolante (ridotto nei casi di isolante minerale e lana di roccia) e sullo strato di finitura (si è testata l'aggiunta di un secondo pannello di cartongesso).

Rispetto alla prima variazione, i risultati hanno mostrato che lo spessore del materiale isolante è

un argomento molto delicato e va approfondito per comprendere l'equilibrio ideale tra miglioramento in termini energetici e l'accumulo di umidità. In tutti i casi analizzati, un maggiore spessore dell'isolamento corrisponde ovviamente ad una migliore performance durante il periodo invernale ma ad un periodo di asciugatura più difficile durante la stagione estiva. La scelta finale dipende quindi da molteplici fattori, ma soprattutto dal valore massimo di RH raggiunto durante l'inverno. La seconda variazione ha mostrato che, in situazioni critiche, come quando i valori di umidità relativa sono vicini a quelli massimi ammessi (circa il 95%), invece di aggiungere una barriera al vapore si può optare per un miglioramento della resistenza al vapore della finitura interna, ad esempio aggiungendo un secondo cartongesso. Le simulazioni mostrano, infatti, che l'azione potrebbe essere sufficiente a ridurre l'accumulo di umidità durante il periodo invernale, nel rispetto contestuale delle caratteristiche originali di trasporto della diffusione del vapore acqueo dei muri storici in mattoni, in un'ottica di maggior rispetto e conservazione dei materiali originali.

Dai risultati di questo studio si può affermare che isolare un edificio storico dall'interno senza barriera al vapore è un percorso plausibile, ovviamente purché la scelta venga accompagnata da opportune e dettagliate valutazioni iniziali. Ciò significa che, anche nel contesto storico, diverse tecnologie di isolamento possono essere prese in considerazione, a condizione di trovare un bilanciamento tra efficienza energetica, spessore della tecnologia, aspetti conservativi e valutazioni termoigrometriche di dettaglio.

I risultati delle varie fasi di ricerca hanno inoltre confermato diverse criticità riguardanti la simulazione termoigrometrica degli edifici storici (Akkurt *et al.*, 2020):

- l'utilizzo di sistemi di "installazione a umido" richiede un periodo di asciugatura più lungo, durante il quale la presenza di umidità può influenzare le prestazioni termoigrometriche originali della parete;
- la simulazione ha sovrastimato i valori di T (°C), soprattutto nelle stagioni primavera-estate, dimostrando che l'inerzia termica della parete storica è superiore a quanto previsto;
- poiché la temperatura T (°C) è stata sovrastimata per tutte le stratigrafie, i valori simulati di RH (%) variano conseguentemente da quelli monitorati;
- è necessario porre molta attenzione nella fase di caratterizzazione dei materiali nel software di simulazione, per ottenere risultati predittivi il più possibile vicini alla realtà. Infatti, i risultati monitorati ottenuti rafforzano i limiti già noti relativi alle librerie dei materiali dei software, suggerendo futuri studi parametrici avanzati per la definizione di vari coefficienti che possano meglio descrivere questi materiali.

Tutti questi aspetti sottolineano l'importanza dell'analisi *in situ* per aumentare la conoscenza relativamente al comportamento termoigrometrico degli involucri storici.

Il gruppo di ricerca conta di proseguire la campagna di monitoraggio per arricchire la raccolta dei dati durante un periodo più lungo e in futuro di testare nuove tecnologie di isolamento e nuove tipologie di involucro storico, diversi dal caso studio già investigato.

Finanziamenti e riconoscimenti

I risultati presentati in questo documento fanno parte del progetto HeLLO - Heritage energy Living Labs oniste che ha ricevuto finanziamenti dal programma di ricerca e innovazione Horizon 2020 dell'Unione europea nell'ambito del programma Marie Skłodowska-Curie n. 796712. *Research Fellow*: Luisa Dias Pereira. *Supervisor*: prof. Pietromaria Davoli. *Co-supervisor e team member*: Marta Calzolari.

Gli autori ringraziano Coverd srl e Rockwool® Italia S.p.A per i materiali e il supporto al progetto e l'INFN – Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (sede di Ferrara), nelle figure di Mirco Andreotti e Roberto Malaguti, per l'installazione dei dispositivi di monitoraggio e l'analisi dati. Gli autori ringraziano anche Dario Bottino-Leone di Eurac Research Bolzano per la collaborazione con le simulazioni iniziali della stratigrafia in lana di roccia. Infine un ringraziamento va all'Università di Ferrara per aver permesso l'accesso e l'uso di Palazzo Tassoni Estense come caso studio.

Bibliografia

- AKKURT, G.G., ASTE, N., BORDERON, J., BUDA, A., CALZOLARI, M., CHUNG, D., COSTANZO, V., DEL PERO, C., EVOLA, G., HUERTO-CARDENAS, H.E., LEONFORTE, F., LO FARO, A., LUCCHI, E., MARLETTA, L., NOCERA, F., PRACCHI, V. AND TURHAN, C., "Dynamic thermal and hygrometric simulation of historical buildings: Critical factors and possible solutions", *Renew. Renewable and Sustainable Energy Reviews* 118 (2020).
- ANDREOTTI M., CALZOLARI M., DAVOLI P. AND DIAS PEREIRA L. (2022), "Hygrothermal performance of an internally insulated masonry wall: Experimentations without a vapour barrier in a historic Italian Palazzo", *Energy and Buildings* 260, 1 April 2022, p 111896.
- CALZOLARI M. (2017), "Riqualificazione energetica del patrimonio edilizio pubblico storico ad elevato valore testimoniale. Panorama normativo, metodi di calcolo e valutazioni preliminari per un corretto progetto dell'isolamento termico dall'interno", *L'Ufficio Tecnico*, vol. 4/2017, p. 12-23, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna (RN).
- CALZOLARI M. AND LUCCHI E. (2018), "Monitorare sul campo la prestazione energetica di tecnologie compatibili con gli edifici storici", *L'Ufficio Tecnico*, vol. 4/2018, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna (RN).
- CALZOLARI M., DAVOLI P. AND DIAS PEREIRA L. (2020), Laboratori "aperti" per l'efficientamento energetico del patrimonio storico. La missione di disseminazione della ricerca europea HeLLO", *L'Ufficio Tecnico*, n. 6/2020, pp. 5-23, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna (RN).
- CALZOLARI, M. DAVOLI, P. AND DIAS PEREIRA L. (2020), "From the dynamic simulations assessment of the hygrothermal behavior of internal insulation systems for historic buildings towards the HeLLO project, *International Journal of Environmental Science and Development* 11.
- Commissione europea, direttiva (Ue) 2018/844 del Parlamento europeo e del Consiglio del 30 maggio 2018, Off. J. Eur. Union.
- Commissione europea, direttiva 2012/27/Ue del Parlamento europeo e del Consiglio del 25 ottobre 2012, Off. J. Eur. Union. L 315/1 (2012).
- Commissione europea, Questions and Answers on the Renovation Wave, Oct. 14. (2020) 1–4. <https://bit.ly/3ynz42w> Commissione europea, Factsheet. What is the European Green Deal?, (2019).
- Ente Italiano di Normazione (UNI), UNI EN 15026 Prestazione termoigrometrica dei componenti e degli elementi di edificio - Valutazione del trasferimento di umidità mediante una simulazione numerica, 2008. <https://bit.ly/2T4iwN7>
- ZAGORSKAS, J., KAZIMIERAS, E., TURSKIS, Z. and BURINSKIEN, M. (2014), Thermal insulation alternatives of historic brick buildings in Baltic Sea Region, *Energy and Buildings* 78 (2014) 35–42.

Note

- (¹) Progetto EU H2020 MSCA-IF-ES HeLLO (2018-2020), consultabile: <https://hellomscaproject.eu>.
- (²) Il progetto è la prosecuzione, poi estesa nei contenuti e nelle attività grazie al finanziamento europeo, di una precedente ricerca avviata dal Centro Ricerche Architettura>Energia del Dip. di Architettura dell'Università di Ferrara con Eurac Research Bolzano, in collaborazione con ROCKWOOL® Italia S.p.A documentata in UT 4/2018 (Calzolari, Lucchi, 2018), referenti scientifici arch. Marta Calzolari, prof. Pietromaria Davoli, arch. Elena Lucchi.
- (³) Per maggiori dettagli si veda: ANDREOTTI M., CALZOLARI M., DAVOLI P., DIAS PEREIRA L. (2022), *Hygrothermal performance of an internally insulated masonry wall: Experimentations without a vapour barrier in a historic Italian Palazzo*, *Energy & Buildings* 260, 1° april 2022, p 111896.
- (⁴) TU Dresda, Institut fur Bauklimatik. Delphin 6.0.20
- (⁵) Il dataset è stato creato partendo da dati monitorati nel giardino dello stesso complesso edilizio di Palazzo Tassoni Estense dal Prof. Michele Bottarelli del Dipartimento di Architettura dell'Università degli Studi di Ferrara.
- (⁶) 3ENCULT, *Efficient Energy for EU Cultural Heritage*, (n.d.). <http://www.3encult.eu/en/project/welcome/default.html>