

Experimental and numerical assessment of breathing walls performance for the improvement of air quality and comfort indoors

Elisa Di Giuseppe*, Marco D’Orazio

Highlights

This study focuses on “breathing” envelope as an alternative to “tight” envelope in nZEB to reach energy efficiency and IAQ targets. Breathing envelope lets the air enter through a dynamic thermal insulation able to pre-heat and filter it from possible pollutants. The filtration effectiveness of two dynamic insulation materials was experimentally assessed with an optical particle counter. The thermal performance was evaluated by finite elements simulations under transient conditions in three Italian climatic areas. Results obtained are very promising for the high effectiveness in pollutants filtration and thermal transmittance reduction.

Abstract

The construction of airtight building envelopes within nearly Zero Energy Buildings is likely to generate thermo-hygrometric discomfort indoors, that needs to be managed with air-conditioning and ventilation systems. In countertrend, some researches developed in northern Europe countries focused on the construction of “breathing” building envelopes that let in the air (passively or with mechanical devices) through dynamic thermal insulations able to pre-heat and filter it from possible pollutants. This study reports the results of experimental and analytical assessments of dynamic insulation systems, aimed to the design of a breathing wall system for the application in building renovation interventions.

Keywords

Breathing envelope, Dynamic insulation, Nearly Zero Energy Building, Indoor Air Quality, Filtration

1. INTRODUCTION

This paper reports the preliminary results of a study aimed to the design and performance assessment of a wall system with air filtration capacity for the improvement of health conditions in nearly Zero Energy Buildings (nZEB). The research draws inspiration from the fact that in the past two decades the construction industry focused in the creation of more and more energy-efficient buildings, but paradoxically carriers of problems connected to the indoor air quality (IAQ) that fall within the so-called “sick building syndrome” [1]. The “radicalization” of the building energy performance, assumed as the primary objective, instead of reducing the risks to human health (real aim of the European Directives EPBD [2] and EPBD recast [3]), is in fact leading to a paradox. The reduction of heat losses by transmission and ventilation through the building envelope, obtained with a progressive

Elisa Di Giuseppe

DICEA - Dipartimento di
Ingegneria Civile Edile e
Architettura, Università
Politecnica delle Marche, via
Brecce Bianche 12, Ancona,
60131, Italia

Marco D’Orazio

DICEA - Dipartimento di
Ingegneria Civile Edile e
Architettura, Università
Politecnica delle Marche, via
Brecce Bianche 12, Ancona,
60131, Italia

* Corresponding author
Tel.: +39-071-2204380;
e-mail: e.digiuseppe@univpm.it

reduction of the limit values of thermal transmittance and air permeability, makes the buildings more and more “tight”, threatening to exacerbate the health problems indoors because of the limited air changes. The problem is of great interest in the context of existing buildings renovation interventions, where the envelope is often retrofitted by external insulation systems but the installation of a mechanical ventilation equipment is not always possible.

In countertrend, some studies developed in northern European countries focused on the construction of “breathing” building envelopes that, during the cold season, let in the air in buildings (passively or with mechanical devices) through “dynamic” thermal insulation systems (DI), able to pre-heat and filter it from possible pollutants [4]. This study reports the results of experimental and analytical assessments of dynamic insulation systems, aimed to the design of a breathing wall system for the application in building renovation interventions. The filtration effectiveness of two fibrous insulating materials, cellulose and polyester fibre, was assessed through a continuous analysis using an optical particle counter. The thermal performance was assessed by a finite elements simulation software, in transient conditions, in three different Italian climatic areas. The breathing wall simulated model was preliminarily calibrated with the experimental results obtained on a prototype by Hot Box tests [5]. The results obtained are very encouraging, both in terms of efficacy of pollutants filtration, that of thermal performance during the heating season with the “passive” use, revealing promising future applications as low energy systems for the control of indoor humidity and pollutants.

2. LITERATURE REVIEW

Despite the growing attention for air quality in living spaces (IAQ), the airtight building envelope of energy-efficient buildings is likely to create high loads of moisture and pollutants indoors, which, if not adequately managed by a ventilation system, may have consequences on the durability of finishing materials and the inhabitants’ comfort and health [6,7]. The ventilation systems still find many difficulties in real utilization today, especially in residential buildings, for psychological reasons (the need for windows kept closed), economic reasons (energy consumption), and practical reasons (the need for periodic cleaning and maintenance). Furthermore, the installation of such systems is not always possible in historical buildings subject to renovation.

In recent decades, some authors proposed alternative strategies for buildings ventilation, related to the use of “breathing” envelope. Numerous studies, mainly related to the work of Taylor and Imbabi developed since the 90s, deepen the technology, mainly through heat and mass transport models in

1. INTRODUZIONE

L'articolo riporta i risultati preliminari di uno studio volto alla progettazione ed alla verifica sperimentale di un dispositivo di parete con capacità di filtrazione dell'aria ai fini del miglioramento delle condizioni di salubrità in “edifici a energia quasi zero” (NZEB). Tale studio prende le mosse dalla constatazione che negli ultimi due decenni il settore edile si è concentrato nella realizzazione di edifici sempre più energeticamente efficienti, ma paradossalmente portatori di problematiche connesse all'indoor air quality (IAQ) che rientrano nell'ambito della cosiddetta “sindrome da edificio malato” [1]. L'estremizzazione della prestazione energetica dell'edificio, assunta quale obiettivo primario, in luogo della riduzione dei rischi per la salute umana (reale obiettivo delle direttive comunitarie EPBD [2] e EPBD recast [3]), sta infatti determinando un paradosso. La riduzione delle dispersioni di calore per trasmissione e ventilazione, ottenuta con una progressiva riduzione dei valori limite di trasmittanza termica e impermeabilità all'aria dell'involucro, rende gli edifici sempre più “impermeabili”, rischiando di acuitizzare i problemi di salute all'interno degli ambienti a causa dei limitati ricambi d'aria. Il problema è di grande interesse nell'ambito della riqualificazione del patrimonio edilizio esistente, laddove l'involucro viene spesso ristrutturato energeticamente con l'apposizione di cappotti isolanti “impermeabili”, ma non sempre è possibile l'installazione di impianti di ventilazione meccanica. In controtendenza, alcune ricerche sviluppate in paesi nordici si sono focalizzate nella realizzazione di involucri edilizi “traspiranti” che, durante la stagione fredda, lasciano entrare l'aria negli edifici (passivamente o con dispositivi meccanici) attraverso isolanti termici “dinamici” (DI), in grado di preriscaldarla e filtrarla dai possibili agenti inquinanti [4]. Questo studio riporta i risultati di valutazioni sperimentali ed analitiche su isolanti dinamici, volte alla progettazione di un sistema di parete traspirante per l'applicazione nell'ambito del recupero edilizio. L'efficacia di filtrazione di due isolanti fibrosi, cellulosa e fibra di poliestere, è stata valutata con analisi in continuo mediante contatore ottico di particelle. La prestazione termica è stata analizzata tramite software di simulazione agli elementi finiti, in condizioni transitorie, in tre diverse località climatiche italiane. Il modello di parete traspirante simulato è stato preliminarmente calibrato con i risultati sperimentali ottenuti su un prototipo con prove Hot Box [5]. I risultati ottenuti sono molto incoraggianti, sia in termini di efficacia di filtrazione di inquinanti, sia in termini di prestazione termica durante la stagione di riscaldamento con utilizzo di tipo “passivo”, lasciando intravedere promettenti applicazioni future come sistemi a basso consumo per il controllo dell'umidità interna e degli inquinanti indoor.

stationary conditions and in temperate climates of northern Europe [4,8–13]. In breathing envelopes, during the heating season, the cold outdoor air is conveyed (passively by pressure difference, or actively with mechanical systems) within the building envelope featured by a dynamic fibrous insulation, before being introduced in the indoor environment, preheated and filtered [10]. DIs can work in “pro-flux” mode if the airflow and heat have the same direction; if the direction is the opposite, they work in “contra-flux” mode. The latter way, the most widespread and investigated, is typical during the heating season. From the energy balance point of view, the system is based on the fact that the heat lost by conduction through the envelope is recovered by ventilation through the air introduced, which penetrates into the insulation perpendicularly to the conductive heat flux [8,12] (Figure 1). The mentioned studies show the effectiveness of breathing envelopes mainly in terms of energy performance, due to the reduction of the thermal transmittance compared to a tight envelope, which occurs in “contra-flux” mode. The term “dynamic” insulation comes right from the system’s ability to vary its thermal transmittance in situ due to the airflow (“dynamic” thermal transmittance), while “breathing” envelope refers to its filtering capacity. The effectiveness of the system in terms of heat recovery and filtration is a function of the airflow volume and increases with it [12].

Only some more recent works have analysed the use of breathing walls in warmer climates, however, always in stationary conditions models [14–16]. Recently Ascione et al. investigated the performance of a DI under transient conditions in synergy with a night ventilation strategy, focusing on the cooling season [17]. The analysis of the heat and vapour flows on a wall with dynamic insulation was performed with a finite differences method. During the cooling period, when the outdoor temperature is lower than the internal one (for example, during summer nights), the outside air is introduced into the room through a mechanical ventilation system and then expelled through the porous insulation. In this way DI works in “pro-flux” mode, namely with the same direction of the air and the heat flow (outgoing). In this condition, the authors demonstrated the dynamic insulation effectiveness in speeding up the night cooling process and consequently in reducing internal temperatures. The use of DI during cooling seasons in “contra-flux” mode, with heat flow from outside to inside (typical situation of summer days, when the outdoor temperature is generally higher than the inner one) and air flow in the opposite direction, is not investigated by the authors and constitutes a research field of great interest, in order to establish the effectiveness of the technology during all the seasons of the year in hot and temperate climates.

2. STATO DELL'ARTE

Nonostante la crescente attenzione per la qualità dell'aria negli spazi abitativi (AQ), gli involucri edilizi “ermetici” degli edifici energeticamente efficienti rischiano di creare internamente elevati carichi di umidità ed inquinanti, che, se non adeguatamente gestiti da un sistema di ventilazione, possono avere conseguenze sulla durabilità dei materiali e sul comfort e la salute degli abitanti [6,7]. I sistemi impiantistici per il ricambio dell'aria interna negli edifici trovano ancora oggi numerose difficoltà di utilizzo, soprattutto in ambito residenziale, per ragioni psicologiche (la necessità di tenere chiuse le finestre), economiche (il consumo energetico, seppur modesto, dell'impianto stesso) e per ragioni pratiche (la necessità di pulizia e manutenzione periodica). Inoltre l'installazione di tali sistemi non sempre è possibile negli edifici storici oggetto di interventi di riqualificazione energetica.

Negli ultimi decenni, alcuni autori hanno proposto strategie alternative per la ventilazione degli edifici, legate all'utilizzo di involucri “traspiranti”. Numerosi studi, principalmente riferiti al lavoro di Taylor e Imbabi sviluppato a partire dagli anni '90, approfondiscono tale tecnologia, attraverso modelli di trasporto di calore e massa in condizioni stazionarie e riferendola principalmente a contesti climatici temperati nel nord Europa [4,8–13]. Negli involucri traspiranti, durante la stagione di riscaldamento, l'aria fredda esterna è convogliata (passivamente, per differenza di pressione, o attivamente, con sistemi meccanici) all'interno dell'involucro edilizio dotato di un isolante termico fibroso dinamico prima di essere immessa nell'ambiente interno, così da essere preriscaldata e filtrata [10]. I DI possono lavorare in modalità “pro-flux” se il flusso d'aria e quello di calore hanno la stessa direzione; se la direzione è opposta lavorano in modalità “contra-flux”. Quest'ultima, più diffusa e investigata, è tipica del funzionamento durante la stagione di riscaldamento. Dal punto di vista del bilancio energetico, il sistema si basa sul fatto che il calore perso per conduzione attraverso l'involucro viene recuperato per ventilazione attraverso l'aria immessa, che penetra nell'isolante in direzione perpendicolare al flusso termico conduttivo [8,12] (Figura 1). Gli studi citati evidenziano l'efficacia degli involucri traspiranti principalmente in termini di prestazione energetica, grazie alla riduzione della trasmittanza termica dell'involucro traspirante, a confronto con uno “ermetico”, che si verifica in modalità “contra-flux”.

L'espressione isolante “dinamico” deriva proprio dalla capacità del sistema di variare la propria trasmittanza termica in opera a causa del passaggio di aria (trasmittanza termica “dinamica”), mentre involucro “traspirante” si riferisce alla sua capacità filtrante. L'efficacia del sistema in termini di recupero del calore e di filtrazione è funzione del volume d'aria immesso e aumenta con esso [12].

Solo alcuni lavori più recenti

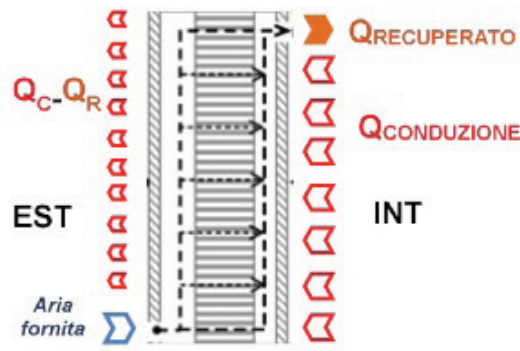


Figure 1. Working scheme of a DI in "contra-flux" mode in the winter phase.

3. METHODOLOGY

The breathing wall analysed in this work is configured as an internal wall for the energy retrofitting of existing buildings, and consists of several functional layers: an interior finishing plasterboard, an air gap, the DI, a second air gap adjacent to the original building structure (that can be variously shaped). The outside air inlet in the envelope is ensured by openings installed at the base of the wall (openable vents), while inside openings are placed in the upper part of the plasterboard panel. In this study, we compared the filtration performance of two different porous materials to be used as possible DI: cellulose and polyester fibre.

Both permeable insulating materials have a fibrous nature, which makes them ideal candidates for the filtration of particulate matter (PM) in the volume of air for the internal ventilation. The filtration effectiveness of the two insulating materials was assessed through a continuous analysis using an optical particle counter (OPC) Fluke 983 with a 50% counting efficiency for particles of 0.3 μm and 100% for particles $>0.45 \mu\text{m}$. The OPC returns the cumulative sum of the particles, according to their equivalent diameter, contained in 2.83 litres of air drawn in a minute. A synthetic powder composed of talc, zinc oxide, hydrated silica, liquid paraffin was realized as a source of particulates with equivalent diameter of 2, 5, 10 μm . Insulating samples 47 cm x 47 cm were positioned on special wooden frames within a test chamber, connected to a system of air supply and suction with a speed of 10-2 m/s. Through the air supply, a controlled precipitation of the synthetic powder was realized using a funnel dispenser. At the centre of the test chamber, the air sampling tube of the OPC was positioned. During a first experimental phase, 5 measurements with controlled dust concentration were carried out to register the amount of PM in the test chamber before the installation of the filter. During a second phase, after the filter installation, 5 new measurements were carried out to detect via

hanno analizzato l'utilizzo di pareti traspiranti in climi più caldi, tuttavia sempre con modelli in condizioni stazionarie [14–16]. Recentemente Ascione et al. hanno investigato la prestazione di un DI in condizioni transitorie in sinergia con una strategia di ventilazione notturna, focalizzandosi sulla stagione di raffreddamento [17]. L'analisi dei flussi di calore e vapore su un modello di parete con isolamento dinamico è stata condotta con un metodo alle differenze finite. Durante il periodo di raffreddamento, quando la temperatura esterna è inferiore quella interna (ad esempio, durante le notti d'estate), l'aria esterna è introdotta in ambiente attraverso un sistema di ventilazione meccanica e poi espulsa attraverso l'isolamento poroso. In questo modo il DI funziona in modalità "pro-flux" ovvero con la stessa direzione del moto dell'aria e del flusso termico (uscenti). In tale condizione, gli autori hanno dimostrato l'efficacia dell'isolamento dinamico nel rendere più veloce il processo di raffreddamento notturno dell'involucro e conseguentemente nel ridurre le temperature ambientali interne. Un utilizzo del DI nelle stagioni di raffreddamento in modalità "contra-flux", ovvero con flusso di calore dall'esterno all'interno e flusso dell'aria in direzione opposta (funzionamento tipico delle giornate estive, in cui la temperatura esterna è generalmente superiore a quella interna) non viene approfondito dagli autori e costituisce un ambito di ricerca di sicuro interesse per poter stabilire l'efficacia della tecnologia durante tutte le stagioni dell'anno in climi caldi e temperati.

3. METODOLOGIA

La parete traspirante analizzata in questo lavoro è configurata come una controparete interna per la riqualificazione energetica di edifici esistenti, e consiste in diversi strati funzionali: un pannello di finitura interna in cartongesso, una intercapedine d'aria, il DI, una seconda intercapedine d'aria adiacente alla struttura edilizia originaria, che può essere variamente conformata. L'entrata dell'aria esterna nell'involucro è assicurata da aperture installate alla base della parete (bocchette apribili), mentre l'uscita è realizzata con aperture poste nella parte superiore del pannello in

optical counter the concentration of particulates

The thermal performance of a breathing wall with cellulose DI was assessed through a two-dimensional modelling with the simulation program for the calculation of heat and air transport Delphin 5.6.8 [18], calibrated against experimental results obtained on a DI small prototype using a Hot Box test facility. Details on the experimental tests carried out and on the model calibration results are reported in a previous publication of the authors [5].

cartongesso. In questo studio si sono confrontate le prestazioni di filtrazione di due differenti materiali porosi da utilizzare come possibili DI: cellulosa e fibre di poliestere. Entrambi i materiali isolanti permeabili, cellulosa e fibre di poliestere, hanno una natura fibrosa, che li rende candidati ideali per la filtrazione del particolato atmosferico (PM) nel volume d'aria passante per la ventilazione dell'ambiente interno. L'efficienza di filtrazione dei due materiali è stata valutata attraverso una analisi in continuo utilizzando

Materiale	Spessore s [m]	Conducibilità termica λ [W/mK]	Capacità termica c [J/KgK]	Densità ρ [Kg/m ³]	Permeabilità Φ [s]	Resistenza al vapore μ [-]
Parete esistente (forati di laterizio)	0.35	0.385	833.761	1200	-	45
Intercapedine d'aria	0.08	0.278	1000	1.29	0.1	0,35
Cellulosa - isolante	0.12 (Bolzano)	0.038	2544	45	0.000068556	5
	0.10 (Ancona)					
	0.08 (Palermo)					
Intercapedine d'aria	0.08	0.278	1000	1.29	0.1	0,35
Cartongesso	0.012	0.2	850	850	-	10

Figure 2. Main thermal properties of the materials in the simulated breathing wall.

The breathing wall analytical model was compared with a traditional wall (with the same materials layers, but in absence of vents for the air inlet), and in transient weather conditions in the Italian cities of Bolzano, Ancona and Palermo. Coherently with the different climatic zones, the DI thickness was established to ensure a stationary thermal transmittance under the limits imposed by the actual Italian law D.M. 26/06/2015. Details on the stratigraphy of the wall modelled are shown in Figures 2 e 3.

una contatore ottico di particelle (OPC) Fluke 983 con un'efficienza di conteggio del 50% per particelle di 0,3 μm e del 100% per particelle $>0,45 \mu\text{m}$. L'OPC restituisce la somma cumulativa delle particelle secondo il loro diametro equivalente contenuta in 2,83 litri di aria aspirata in un minuto. Come sorgente di particolato con diametro equivalente di 2, 5, 10 μm è stata realizzata una polvere sintetica composta da talco, ossido di zinco, silice idratata e paraffina liquida. I campioni di isolanti di dimensioni 47 cm x 47 cm, montati su apposti

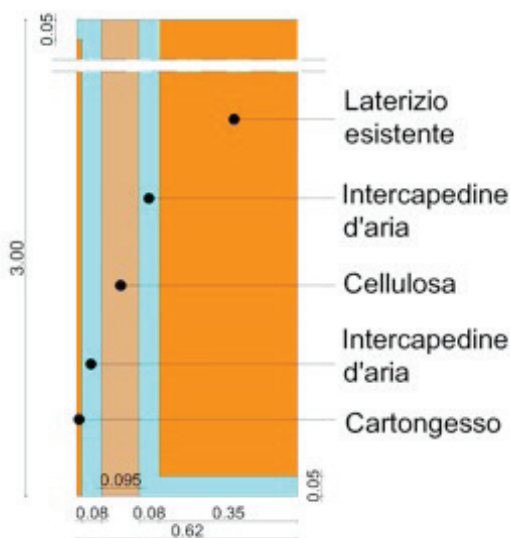


Figure 3. Model of the breathing wall simulated.

The values of temperature and relative humidity within the environment were fixed at 20°C and 60% respectively. The values of the external atmospheric pressure were established constant, while the internal air pressure was calculated considering the contributions of stack effect, wind pressure on the wall, and the pressure drops in the vents and through the permeable material.

4. RESULTS

Figure 4 represents the percentage collection efficiency of the DI tested (cellulose and polyester fibre), in relation to the diameter of PM particles. A very good performance of both materials can be observed. The polyester fibre shows a better behaviour in the capture of PM10 (100%) compared to cellulose (99,94%); the intermediate particle diameters are captured from both samples with a 99,95% efficiency (points B and E). However, the most significant difference on the filtration efficiency occurs for PM2, which is the most dangerous particulates to human health. Cellulose is able to guarantee an efficiency equal to 99,94%, while polyester reaches 99,41%. Consequently, cellulose, which provides a high filtration performance for all PM diameters, was established as DI of the breathable wall model simulated.

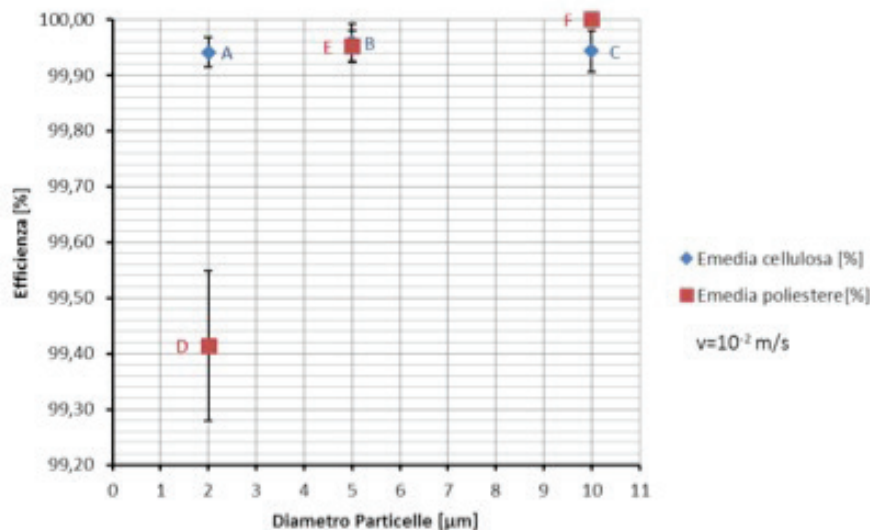


Figure 4 Percentage collection efficiency of the DI tested (cellulose and polyester fibre), in relation to the diameter of PM particles.

The simulations in dynamic conditions allowed obtaining the heat flux through the wall and the temperatures at all points. From these data, we calculated the “in situ” thermal transmittance values of the breathing wall in comparison with the traditional wall, using the Average Method reported in standard ISO 9869:1994.

telai in legno, sono stati posizionati all'interno di una camera di prova, collegata ad un sistema di immissione e prelievo d'aria con una velocità di 10-2 m/s. Attraverso l'alimentazione dell'aria, è stata immessa nella camera di prova una precipitazione controllata della polvere sintetica. Il tubo di campionamento dell'aria del contatore OPC è stato posizionato al centro della camera di prova. Durante una prima fase della prova, in assenza del materiale filtrante, sono state effettuate 5 misurazioni con concentrazione controllata di polvere per registrare la quantità di PM in camera di prova. Durante una seconda fase, dopo il posizionamento di ciascun materiale isolante, sono state effettuate 5 nuove misurazioni per rilevare la concentrazione di particolato a valle di ciascun materiale filtrante. La prestazione termica di una parete traspirante dotata di in cellulosa è stata valutata attraverso un modello bidimensionale ad elementi finiti con il programma di simulazione del trasporto di massa e calore Delphin 5.6.8. [18], calibrato con i risultati sperimentali ottenuti su un piccolo prototipo di DI utilizzando un impianto di prova Hot Box. Dettagli sulle prove sperimentali condotte e i risultati della calibrazione del modello sono riportati in una precedente pubblicazione degli autori [5]. Il modello analitico di parete traspirante è stato posto a confronto con una parete tradizionale (con la stessa stratigrafia, ma in assenza di bocchette per l'ingresso dell'aria), in

condizioni climatiche dinamiche nelle località di Bolzano, Ancona e Palermo (coerentemente con le diverse zone climatiche è stato calcolato lo spessore di DI necessario a garantire una trasmittanza termica stazionaria inferiore ai limiti più restrittivi imposti dal D.M. 26/06/2015). Dettagli sulla stratigrafia della parete traspirante modellata sono riportati nelle Figure 2 e 3.

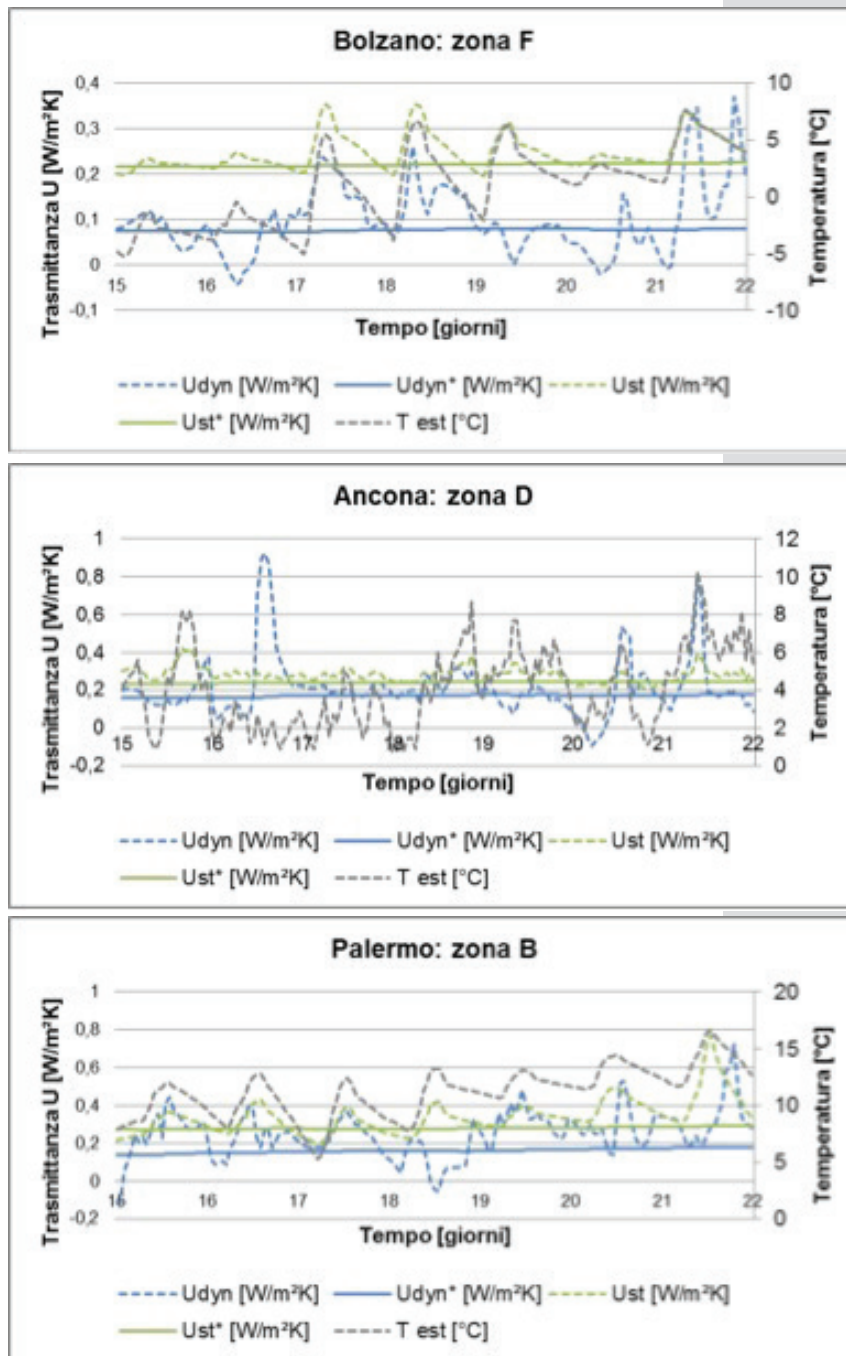


Figure 5 Trends of the external air temperature (T_{est}) and of thermal transmittances (U -value) of the breathing wall (U_{dyn}) and of traditional wall (U_{st}) and their average value (respectively, U_{dyn}^* e U_{st}^*), in each climatic area, during a typical winter week.

The graphs in Figure 5 show the trends of the thermal transmittance and their average values, obtained in the breathing and the traditional wall, during a typical winter week in the three climatic zones considered. They highlight how the breathing wall allows obtaining transmittance values substantially lower than the traditional wall. Figure 6 summarizes the mean values obtained and the percentage differences. Especially in the colder climate zone (Bolzano), the breathing wall allows to obtain a reduction of the stationary transmittance of about 55%.

I valori di temperatura e umidità relativa all'interno dell'ambiente sono stati fissati rispettivamente a 20°C e 60%. I valori della pressione atmosferica esterna sono stati stabiliti costanti, mentre la pressione dell'aria interna è stata calcolata considerando i contributi dell'effetto camino, della pressione del vento sulla parete, delle perdite di carico nelle bocchette e attraverso il materiale permeabile.

4. RISULTATI

La Figura 4 rappresenta l'efficienza di collezione percentuale dei DI testati, in cellulosa e fibra di poliestere, in relazione al diametro

Zona	Comune	GG gradi giorno	U _{dyn} * [W/m ² K]	U _{st} * [W/m ² K]	Differenza percentuale [%]
B	Palermo	601 - 901	0,232	0,325	28,62
D	Ancona	1401 - 2101	0,163	0,233	30,04
F	Bolzano	> 3000	0,105	0,232	54,74

Figure 6 Average thermal transmittance values of the breathing wall (U_{dyn}*) in comparison with the traditional wall (U_{st}*) obtained during a typical winter week, and their percentage difference, for each climatic area.

5. CONCLUSIONS

This paper reports the results of experimental and analytical assessments of dynamic insulations, aimed at the design of a breathing and filtering wall system for the application in buildings renovation interventions.

The filtration effectiveness of two fibrous insulating materials, cellulose and polyester fibre, was experimentally assessed through a continuous analysis using an optical particle counter. The thermal performance of a breathing wall with cellulose DI compared to a traditional wall was assessed in transient conditions, in three different Italian climatic areas, using a finite elements simulation software, preliminarily calibrated with the experimental results obtained on a prototype with Hot Box tests. The results obtained are very encouraging, both in terms of efficacy of pollutants filtration (over 100% for PM10, over 99% for PM2 and PM5), both in terms of thermal performance during the heating season with the “passive” use (reduction of the thermal transmittance of the traditional wall among 28% and 55%, depending on the climatic area).

However, the performance of the breathing wall must be further investigated in order to declare such technology really effective even in hot and temperate climate contexts. Future studies should especially investigate:

- the thermal performance in summer phase in “contra-flux” mode (incoming heat flow, outgoing airflow through the wall), when outdoor temperatures are higher than internal ones;
- the thermal performance in summer phase in “contra-flux” mode (outgoing heat flow, incoming airflow through the wall), when outdoor temperatures are lower than internal ones.

Moreover, this work has not intended to deepen some practical aspects related to the application of technology (method of assembly and installation, maintenance, management of the fans for the air inlet system, hygrometric issues), focusing on the only aspects related to the filtration and the theoretical thermal performance. These issues should certainly be the subject of future analytical and experimental research works.

delle particelle di PM. Si può osservare una ottima prestazione da parte di entrambi i materiali. La fibra di poliestere mostra un migliore comportamento nella cattura di PM10 (100%) rispetto alla cellulosa (99,94%); i diametri particellari intermedi sono catturati da entrambi i campioni con una efficienza di 99,95% (punti B ed E). Tuttavia la differenza più significativa nell'efficienza di filtrazione si verifica per il PM2, che è il particolato più pericoloso per la salute umana. La cellulosa è in grado di garantire una efficienza pari al 99,94 %, mentre il poliestere raggiunge il 99,41%. Di conseguenza, si è deciso di utilizzare la cellulosa, che offre un rendimento elevato di filtrazione per tutti i diametri di PM, come DI nel modello di parete traspirante oggetto di simulazione analitica.

Le simulazioni in condizioni dinamiche hanno consentito di ottenere il flusso termico attraverso la parete e le temperature in tutti i punti. Da questi dati, si sono calcolati i valori di trasmittanza termica “in opera” della parete filtrante a confronto con la parete tradizionale, utilizzando il metodo Average Method riportato nella norma ISO 9869:1994. I grafici nella Figura 5 riportano gli andamenti delle trasmittanze e il valore medio ottenuto nella parete traspirante e in quella tradizionale durante una tipica settimana invernale nelle tre zone climatiche considerate. Si evidenzia come la parete traspirante permette di ottenere valori di trasmittanza termica sensibilmente inferiori rispetto alla parete tradizionale. In figura 6 sono riassunti i valori medi ottenuti e le differenze percentuali. In particolare nella zona climatica più fredda (Bolzano) la parete traspirante permette di ottenere una riduzione della trasmittanza stazionaria del 55%.

5. CONCLUSIONI

L'articolo riporta i risultati di valutazioni sperimentali ed analitiche su isolanti dinamici, volte alla progettazione di un sistema di parete traspirante e filtrante per l'applicazione nell'ambito della riqualificazione energetica. L'efficacia di filtrazione del particolato atmosferico da parte di isolanti fibrosi in cellulosa e fibra di poliestere è stata valutata sperimentalmente con analisi in continuo mediante contatore ottico di particelle. La prestazione termica di una parete traspirante con isolante in cellulosa è stata valutata in tre zone climatiche italiane, a confronto con una parete tradizionale, tramite software di simulazione agli elementi

6. REFERENCES

- [1] Araki A., Kanazawa A., Kawai T., Eitaki Y., Morimoto K., Nakayama K., et al., The relationship between exposure to microbial volatile organic compound and allergy prevalence in single-family homes, "The Science of the total environment", 423 (2012), p. 18–26, doi:10.1016/j.scitotenv.2012.02.026.
- [2] Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2002 on the energy performance of buildings.
- [3] Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings.
- [4] Taylor B., Imbabi M., The application of dynamic insulation in buildings, "Renewable Energy", 15 (1998), p. 377-382, doi:10.1016/S0960-1481(98)00190-6.
- [5] Di Giuseppe E., D'Orazio M., Di Perna C., Thermal and filtration performance assessment of a dynamic insulation system, "Energy Procedia", 78 (2015), p. 513-518, doi:10.1016/j.egypro.2015.11.721.
- [6] World Health Organization. WHO guidelines for indoor air quality: Dampness and Mould. Germany: Foxit Reader, 2009.
- [7] Di Giuseppe E., *Nearly Zero Energy Buildings and Proliferation of Microorganisms: A Current Issue for Highly Insulated and Airtight Building Envelopes*. Cham: Springer International Publishing, 2013.
- [8] Taylor B., Cawthorne D., Imbabi M., Analytical investigation of the steady-state behaviour of dynamic and diffusive building envelopes, "Building and Environment", 31 (1996), p. 519–525, doi:10.1016/0360-1323(96)00022-4.
- [9] Taylor B., Imbabi M., The effect of air film thermal resistance on the behaviour of dynamic insulation, "Building and Environment", 32 (1997), p. 397-404, doi:10.1016/S0360-1323(97)00012-7.
- [10] Taylor B., Webster R., Imbabi M., The building envelope as an air filter, "Building and Environment", 34 (1998), p. 353-361, doi:10.1016/S0360-1323(98)00017-1.
- [11] Taylor B., Imbabi M., The Application of Dynamic Insulation in Multi-Storey Buildings. In: World Renewable Energy Congress VI, Brighton: Elsevier, 2000, p. 466–471.
- [12] Taylor B., Imbabi M., Environmental design using dynamic insulation, "ASHRAE Transactions", 106 (2000) p. 15–26.
- [13] Imbabi M., Modular breathing panels for energy efficient, healthy building construction, "Renewable Energy", 31 (2006), p. 729–738, doi:10.1016/j.renene.2005.08.009.
- [14] Elsarrag E., Al-Horr Y., Imbabi M., Improving building fabric energy efficiency in hot-humid climates using dynamic insulation, "Building Simulation", 5 (2012), p. 127–134, doi:10.1007/s12273-012-0067-6.
- [15] Elsarrag E., Al-Horr Y., Modelling the thermal energy demand of a Passive-House in the Gulf Region: The impact of thermal insulation, "International Journal of Sustainable Built Environment", 1 (2012), p. 1–15, doi:10.1016/j.ijbsbe.2012.07.002.
- [16] Imbabi M., A passive–active dynamic insulation system for all climates, "International Journal of Sustainable Built Environment", 1 (2012), p. 247–258, doi:10.1016/j.ijbsbe.2013.03.002.
- [17] Ascione F., Bianco N., De Stasio C., Mauro G.M., Vanoli G.P., Dynamic insulation of the building envelope: Numerical modelling under transient conditions and coupling with nocturnal free cooling, "Applied Thermal Engineering", 84 (2015), p. 1–14, doi:10.1016/j.applthermaleng.2015.03.039.
- [18] Delphin, Simulation program for the calculation of coupled heat, moisture, air, pollutant, and salt transport, <<http://bauklimatik-dresden.de/delphin/index.php>>. (Last access: 15/10/2015).

finiti preliminarmente calibrato con i risultati sperimentali di prove Hot Box.

I risultati ottenuti sono molto incoraggianti, sia in termini di efficacia di filtrazione (sopra il 100% per il PM10, sopra il 99% per i PM2 e PMS), sia in termini di prestazione termica durante la stagione di riscaldamento (riduzione della trasmittanza termica della parete tradizionale tra il 28% e il 55%, a seconda della zona climatica considerata).

Tuttavia, la prestazione della parete traspirante deve essere ulteriormente indagata per poter dichiarare tale tecnologia realmente efficace anche in contesti climatici caldi e temperati. In particolare studi futuri dovranno approfondire:

- la prestazione termica in fase estiva in modalità "contra-flux" (flusso termico entrante, aria uscente attraverso la parete), quando le temperature esterne sono maggiori di quelle interne;
- la prestazione termica in fase estiva in modalità "contra-flux" (flusso termico uscente, aria entrante attraverso la parete), quando le temperature esterne sono minori di quelle interne.

Si evidenzia inoltre che questo lavoro non ha inteso approfondire gli aspetti pratici legati all'applicazione della tecnologia (modalità di assemblaggio ed installazione, manutenzione, gestione del sistema di ventole per l'ingresso dell'aria, problematiche di natura igrometrica), focalizzandosi sugli aspetti legati alla filtrazione e alla prestazione termica teorica. Tali aspetti dovranno sicuramente essere oggetto di futuri lavori di indagine analitica e sperimentale.