

Integrazione di sistemi termo-attivi nella rigenerazione dell'involucro edilizio in area Mediterranea

RICERCA E
SPERIMENTAZIONE/
RESEARCH AND
EXPERIMENTATION

Alessandra Battisti, Egle Ministeri,

Dipartimento di Pianificazione, Design, Tecnologia dell'Architettura, Sapienza Università di Roma, Italia

alessandra.battisti@uniroma1.it

egle.ministeri@uniroma1.it

Abstract. Negli ultimi anni i sistemi di *Thermal Active Surface* hanno acquisito grande importanza nel panorama scientifico per la possibilità che offrono di alte capacità di risposte performative all'interno degli edifici dai punti di vista: architettonico, fisico-tecnico, economico. Tuttavia l'integrazione architettonica di questi sistemi non è stata completamente esplorata nella rigenerazione urbana in area mediterranea finché l'evoluzione di materiali tradizionali da una parte e l'introduzione di nano-materiali dall'altra non ne hanno reso possibili nuovi scenari di sviluppo.

Parole chiave: Nano-materiali; Thermal active surface; Sperimentazione; Riqualificazione urbana; Efficienza energetica.

Introduzione

I rapidi sviluppi delle tecniche e delle tipologie di produzione dei materiali – come laminati ceramici, e l'introduzione in edilizia di materiali specializzati (Liet et al., 2015), come i nanomateriali – hanno rappresentato negli ultimi decenni degli stimoli costanti per l'innovazione delle componenti da utilizzare nella rigenerazione urbana, ottimizzate in termini prestazionali (Schuler, 2010).

La progettazione di un prototipo Innovative Thermal Active Surface per la riqualificazione di edilizia residenziale pubblica in area mediterranea anni '70 è partita dallo studio dei TAS in letteratura e nelle sperimentazione di settore, e a indirizzare il processo progettuale e la scelta dei materiali impiegati sono stati: le linee teoriche classificate da Moe, che sintetizzano i principi alla base del funzionamento dei TAS (Moe, 2010); i riferimenti normativi sull'efficienza energetica e riqualificazione urbana; l'analisi delle più recenti realizzazioni: Zollverein School, 2010; Tea Water Pavilion, 2014; Hydroceramic, 2014; EcoCeramic BIDS, 2016 (Battisti, Ministeri, 2017).

La sperimentazione presentata è stata generata con una metodologia messa a punto per il controllo delle *performance* e la

Thermally active surface integration in the regeneration of building envelope in Mediterranean area

Abstract. In recent years, Thermal Active Surface systems have taken on key importance on the scientific landscape due to the possibility they offer because of their strong capacity for high-performance responses within buildings from the architectural, physical/technical, and economic standpoints. However, the architectural integration of these systems was not completely explored in urban regeneration in the Mediterranean area until the evolution of traditional materials on the one hand, and the introduction of nano-materials on the other, made new development scenarios possible.

Keywords: Nano-materials; Thermal active surface; Sperimentation; Urban requalification; Energy efficiency.

valutazione delle risposte di un TAS per l'involucro edilizio che incorpori sistemi di riscaldamento/raffreddamento aggregati con strati di nano-materiali e finiture superficiali in ceramiche innovative, consentendo il controllo delle caratteristiche di efficienza energetica in clima mediterraneo, e che permettesse velocità di esecuzione - semplificandone il montaggio in cantiere -, razionalizzazione dell'impiego dei materiali e riduzione dei costi degli interventi.

In particolare, la prototipazione si è concentrata su una stratificazione del componente assemblato in officina basata su modularità delle risposte (grazie all'uso di materiali termicamente attivi: materiali massivi, isolanti, e idrofilii) e minimizzazione degli spessori. Una stratificazione che vede protagonisti: componenti innovativi originati dalla sperimentazione su materiali tradizionali, come le ceramiche di grande dimensione a spessore ridotto; applicazione di nano-materiali isolanti come l'*Aerogel* sotto forma di pannello isolante; e l'*Idrogel* per la regolazione termo-igrometrica, concentrando la sperimentazione sulla capacità dell'involucro di assolvere le funzioni estetiche, di protezione dagli agenti atmosferici e di riscaldamento e raffrescamento in stretto legame con i processi di accumulo e rilascio termico, coniugati ai processi evapo-traspirativi, in grado di gestire correttamente i flussi termici ai nostri climi.

In questo senso è stato importante sondare le complesse implicazioni del rapporto tra l'evoluzione dell'involucro architettonico, e le masse d'aria presenti in un edificio (Olesen, 2002), che ha significato progettare in maniera integrata forma, colore, materia dei componenti edilizi, tenendo sotto controllo le proprietà superficiali al variare dei parametri macro-ambientali di temperatura, irraggiamento solare e gradienti di umidità relativa (Fio-

Introduction

In recent decades, rapid developments of production types and techniques for materials like ceramic laminates, and the introduction into construction of specialized materials (Liet et al., 2015) like nano-materials, have been constant stimuli for the innovation of the components to be used in urban regeneration and optimized in terms of performance (Schuler, 2010).

The design of a prototype Innovative Thermal Active Surface, optimized for the requalification of public residential construction in the Mediterranean area, began from the study of TASs in literature and in industry trials. The design process and the choice of materials used were guided by: the theoretical lines classified by Moe, which summarize the principles underlying the function of TASs (Moe, 2010); the regulatory references on en-

ergy efficiency and urban requalification; analysis of recent constructions: Zollverein School, 2010; Tea Water Pavilion, 2014; Hydroceramic, 2014; EcoCeramic BIDS, 2016 (Battisti, Ministeri, 2017).

The experimentation that was presented was generated using a methodology created to monitor performance and evaluate the responses of a TAS for the building envelope that incorporated heating/cooling systems aggregated with layers of nano-materials and surface finishings in innovative ceramics, thereby allowing energy efficiency characteristics in a Mediterranean climate to be monitored, and that permitted speedy execution by simplifying assembly at the work site, streamlined use of materials, and reduced costs for the interventions.

In particular, the prototyping concentrated on a stratification of the com-

rito, Santamouris 2017) e al contempo gestire le proprietà fisiche degli elementi costruttivi, dai materiali agli spessori (Ochoa, 2008), sollecitando ed innescando risposte, sotto forma di reazioni fisiche a breve o lungo termine, al fine di accelerare o ritardare il trasferimento del flusso termico naturale (Yannas, 1989).

Evoluzioni

Le evoluzioni principali dei componenti TAS sono state esaminate dal gruppo di ricerca a partire da alcune questioni cardine: efficienza energetica, *integrated design*, flessibilità, adattabilità e durata, innovando i sistemi per composizione, forma e applicazione, attraverso la variazione dei: materiali impiegati testandone di tipo opaco, massivo e trasparente; fluidi conduttori e additivi; numero di *layer* che sovrapponendosi potessero rispondere efficacemente ai criteri di sostenibilità ambientale, energetica ed economica da applicare nelle pratiche di riqualificazione in clima mediterraneo.

I componenti TAS vengono classificati dall'*ECBCS (Energy Conservation in Buildings and Community Systems)* in base all'azione di risposta delle superfici di cui si compongono e per comportamento termico, di cui le seguenti categorie rappresentano le quattro principali classi:

- *attivazione della massa*: l'elemento ha una capacità di immagazzinamento termico che rilascia dopo un certo scarto temporale in condizioni differenti di temperatura (Navarro et al, 2016; Hoes et al., 2016). Rientrano a far parte di questa categoria gli elementi con materiali ad elevata densità e/o a cambiamento di fase.
- *aumento o diminuzione dei flussi di calore*: la variabile adattiva riguarda le prestazioni di isolamento termico. I componenti

ponent assembled at the workshop and based on: modularity responses (thanks to the use of thermal active materials: massive, insulating, hydrophilic) and minimization of thicknesses. The main players in this stratification are: innovative components originating from experimentation on traditional materials, like large-sized ceramics with reduced thickness, application of insulating nano-materials like Aerogel in the form of an insulation panel, and Hydrogel to regulate heat and humidity, and concentrating the experimentation on the envelope's ability to perform the functions of aesthetics, of providing protection against atmospheric agents, and of heating and cooling, in a close relationship with the processes of heat storage and release, combined with evapotranspiration processes, capable of properly handling our climates' heat flows.

In this perspective, it was important to probe the complex implications of the relationship between the evolution of the architectural envelope and the masses of air present in a building (Olesen, 2002), which meant designing the shape, colour, and material of building components in an integrated way, maintaining the surface properties under control as the macro-environmental parameters of temperature, sunlight, and relative humidity gradients vary (Fiorito, Santamouris, 2017), while at the same time managing the physical properties of the construction elements, from materials to thicknesses (Ochoa, 2008), encouraging and triggering responses in the form of short- or long-term physical reactions, in order to speed or delay the transfer of the natural heat flow (Yannas, 1989).

tecnologici di questa categoria hanno un comportamento di tipo passivo, e la caratteristica di variare il flusso di calore proporzionalmente al livello di isolamento che consente una riduzione di riscaldamento invernale e di raffrescamento estivo (Gwerder et al., 2008).

- *variazione della trasparenza*: gli elementi termicamente attivabili correlati alla trasparenza sono legati ad impulsi elettrici, a cambiamenti di stato dei materiali usati, indotti da variazioni termiche o, a fattori compositivi (Gstoehl et al., 2011). Gli esempi di questo tipo consentono di regolare la trasmissione della radiazione incidente e permettono di lavorare sulle variabili differenza di temperatura e sfasamento all'interno della sezione dei componenti.
- *variazione della porosità*: questa classe definisce elementi a bassa, media o alta porosità. Tale caratteristica è legata al funzionamento estivo di determinati componenti, il cui grado di porosità contribuisce alla regolazione dei valori di umidità ed all'abbassamento della temperatura, controllando le variazioni termiche nella sezione tecnologica (Lehmann et al., 2007).

Dopo una fase di osservazione e studio analitico dei differenti TAS l'attenzione per lo sviluppo del prototipo è stata posta su tre tipologie di elementi, che risultavano essere quelle più promettenti per i miglioramenti in termini prestazionali di impiego delle risorse e consumi energetici, ovvero massa termica di attivazione (TMA); cambiamento di fase dei materiali (PCM); variazione dell'inerzia termica (DI).

Sulla base delle precedenti considerazioni è stato possibile enucleare quattro specifici filoni di TAS sperimentali (Gutai, 2014): il *massive design*, il *thin design*, il *ceramic design* ed il *liquid design* (Fig. 1).

Evolutions

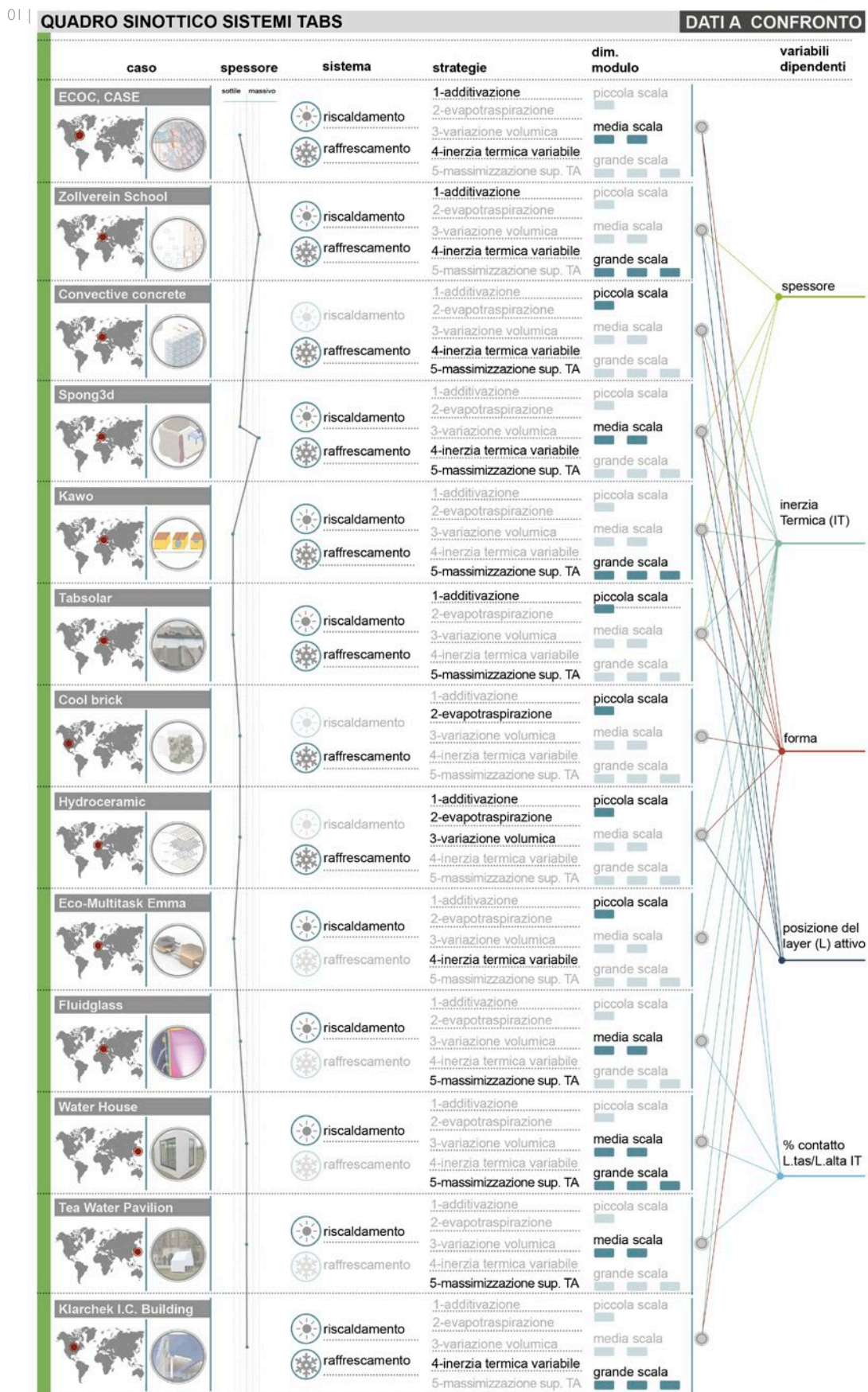
The main evolutions of TAS components were analysed by the research group starting from some key issues: energy efficiency, integrated design, flexibility, adaptability and duration, by innovating systems for composition, shape, and application; this was done through the variation of: the materials employed, testing opaque, massive, and transparent ones; conducting fluids and additives; and the number of overlapping layers, which might respond effectively to the criteria of environmental, energy, and economic sustainability to be applied in requalification practices in the Mediterranean climate.

The TAS's components are classified by ECBCS (Energy Conservation in Buildings and Community Systems) based on the response action of the surfaces they are composed of, and for

thermal behaviour, of which the following categories represent the four main classes:

- activation of the mass: the element has a thermal storage capacity that is released after a certain amount of time in different temperature conditions. This category includes the elements composed of high-density materials and/or phase-change materials;
- increased or decreased heat flows: the adaptive variable regards heat insulation performance. This category's technological components have a passive-type behaviour, and the characteristic of varying heat flow in proportion to the level of insulation, which allows winter heating and summer cooling to be reduced (Gwerder et al., 2008);
- variation of transparency: elements that can be thermally activated in

Synoptic diagram of the dimensional and material characteristics of the most recent TAS systems and components tests in relation to the main operating strategies adopted



Innovative TAS prototipazione

La parte sperimentale applicativa della ricerca ha prodotto un componente a secco finalizzato a un processo di riqualificazione efficiente dell'edilizia residenziale pubblica in area mediterranea, basato sulla riduzione dello spessore di un involucro edilizio che fosse così multifunzionale ed ibrido in equilibrio tra *massive e thin design* (Fig. 2).

Le caratteristiche morfologiche sono così sintetizzabili:

- modularità;
- grandi dimensioni del componente (perseguimento dell'obiettivo di copertura dell'interpiano tipico dell'ERP di 3 ml con un unico pannello);
- minimo spessore (al fine di minimizzare il peso e con lo scopo di ottenere una rapida messa a regime del sistema TA);
- flessibilità ed adattamento.

La normativa UNI1264 individua tre tipologie di sistemi (A, B, C) radianti che distinguono le soluzioni con serpentine annegate nello strato di supporto (A) da quelle a secco con serpentine inserite in apposite scanalature al di sotto dello strato di supporto (B, C).

La messa in opera nell'Innovative TAS della seconda categoria di sistemi ha consentito di usare, al meglio, le proprietà termiche dei materiali conduttori, riducendo lo spessore del componente tecnologico, alleggerendolo e rendendone possibile la prefabbricazione.

Un ulteriore aspetto è stato quello della compatibilità chimico-fisica tra i materiali di cui il sistema è stato composto al fine di arginare problematiche relative alla breve durata del funzionamento del TAS. Inoltre, un errato accostamento stratigrafico avrebbe comportato reazioni chimiche con perdite delle caratteristiche

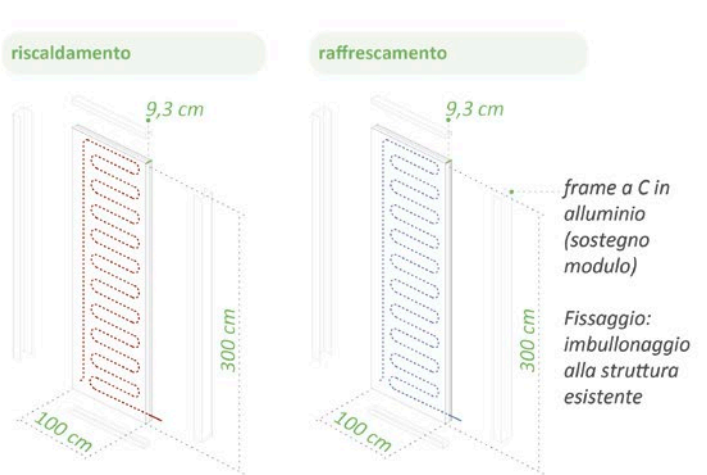
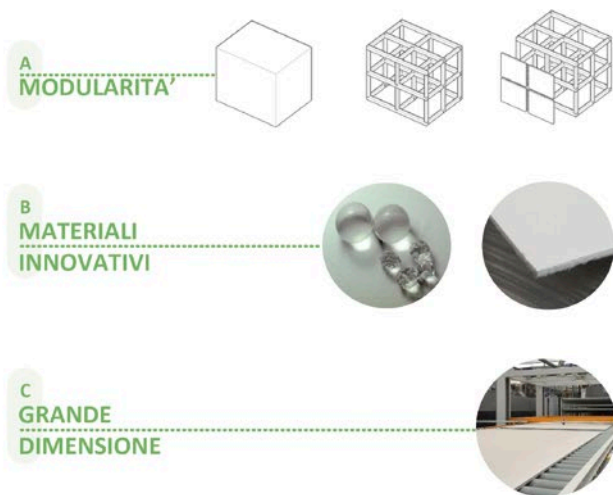
prestazionali, fisiche, chimiche o meccaniche del componente e tra i vantaggi legati all'impiego di componenti prefabbricati vi è stata la possibilità di poterle controllare con facilità e verificarne la qualità.

Dal quadro d'insieme che mette a confronto i casi studio è stato possibile definire quattro schemi funzionali, basati su sei variabili dipendenti dalle condizioni al contorno, climatiche e dalle *performance* energetiche da voler ottenere, (spessore, materiale, forma, inerzia termica, posizione del *layer* attivo, percentuale di superficie di contatto fra *layer* termicamente attivo e *layer* ad alta inerzia termica).

Osservando i quattro schemi funzionali (1-variazione dello spessore del componente tecnologico; 2-distanza dello strato termicamente attivo dalle superfici esterna ed interna; 3-variazione dell'inerzia termica lungo la sezione del componente tecnologico; 4-studio della forma: massimizzazione della superficie di contatto tra il fluido o strato attivo e il *layer* disperdente) sono stati estrapolati i due principali modelli compositivi alla base degli schemi adottati.

Le variabili dipendenti dalle prestazioni da voler raggiungere emerse dai casi di studio sono:

- *Spessore* - la UNI 8290 (4) descrive le parti di un sistema tecnologico distinguendo classi di unità tecnologica e classi di strati funzionali. Lo spessore assunto da ogni singolo strato funzionale determina effetti differenti nel funzionamento dell'intero sistema tecnologico.
- *Materiale* - una seconda azione strategica per ottenere una *performance* prefissata in termini di riscaldamento o raffrescamento è quella che lavora sulla variabile materiale a partire dalla considerazione di specifiche proprietà termi-



- che (capacità termica, espansione termica, conduttività termica).
- *Inerzia termica* - per garantire alte prestazioni termo-igrometriche la sperimentazione muove l'indagine verso la massimizzazione delle proprietà termiche dei materiali, attraverso la ricerca di soluzioni strategiche fondate sul principio di additivazione con materiali droganti.
 - *Posizione del layer attivo* - l'interesse per lo sviluppo di componenti tecnologici multistrato e multifunzionali dal punto di vista prestazionale è legato al posizionamento dei layer all'interno della sezione.
 - *Percentuale di superficie di contatto fra layer termicamente attivo e layer ad alta inerzia termica* - che attiene alla ricerca della maggiore superficie di contatto tra lo strato attivo e quello disperdente verso l'interno dell'ambiente con l'obiettivo di aumentare la superficie di scambio termico disponibile.
- I quattro schemi funzionali emersi si basano sulle variabili dipendenti appena descritte e possono essere così definiti:
- *Variazione dello spessore dei layer del componente tecnologico* - lo spessore dell'elemento influisce su diversi fattori, primo fra tutti sul peso del modulo ed inoltre sulle capacità di isolamento termico o di accumulo termico. Le variabili che maggiormente interessano questo schema funzionale sono: spessore, materiale, inerzia termica, posizione dello strato attivo.
 - *Distanza del layer termicamente attivo dalle superfici esterna ed interna* - per ridurre le dispersioni termiche e per massimizzare la resa degli strati termicamente attivi diviene centrale il posizionamento di questi all'interno della sezione del modulo tecnologico. Le variabili sono: materiale, forma, inerzia termica, posizione dello strato attivo.

correlation with transparency are linked to electrical impulses, to changes of state of the materials used, induced by thermal variations, or to compound factors (Gstoehl et al., 2011). Examples of this type make it possible to regulate the transmission of incident radiation, and to work on the variables of temperature difference and lag within the section of the components;

- variation of porosity: this class defines elements with low, average, or high porosity. This characteristic is linked to the summertime function of certain components, whose degree of porosity contributes towards regulating humidity levels and lowering the temperature, thus permitting good control over the thermal variations within the technological section (Lehmann et al., 2007).

After a phase of observation and ana-

lytical study of the different TASs, attention to the prototype's development focused on three types of elements, which were the ones most promising for improvement in terms of performance in employing resources and in energy consumption: thermal mass of activation (TMA); phase change of materials (PCM); variation of thermal inertia (DI). Based on the above considerations, it was possible to set out four specific lines of experimental TAS: massive design, thin design, ceramic design, and liquid design (Fig. 1).

Innovative TAS Prototyping

The applicative experimental part of the research produced a dry component aimed at a process of efficient requalification of public residential building in the Mediterranean area, based on reducing the thickness of a

- *Variazione dell'inerzia termica lungo la sezione del componente tecnologico* - lavorare sulla variabile inerzia termica, permette di migliorare il comfort indoor, grazie alle capacità di alcuni strati o dell'intero spessore dell'elemento di assorbire l'onda termica, ritardando il passaggio del calore da un estremo all'altro dell'elemento. Le variabili sono: spessore, materiale, forma, inerzia termica, posizione dello strato attivo, percentuale di superficie di contatto fra layer termicamente attivo e layer ad alta inerzia termica (Holmes et al., 2007).
- *Studio della forma: massimizzazione della superficie di contatto tra layer attivo e disperdente* - le caratteristiche di forma possono determinare un impiego innovativo sia a livello compositivo che tecnologico-energetico. A livello compositivo il fattore forma conferisce caratteristiche di flessibilità al componente, mentre tecnologicamente il fattore forma consente di massimizzare le prestazioni, agendo sulle proprietà fisiche. Le variabili sono: materiale, forma, posizione dello strato attivo, percentuale di superficie di contatto fra layer termicamente attivo e layer ad alta inerzia termica.

Alla fine è stato possibile ricondurre i sistemi TAS a due schemi compositivi: modello monolayer e multilayers. Lo schema compositivo per un TAS monolayer prevede la concezione del sistema tecnologico attraverso l'utilizzo di un unico materiale massivo, che ingloba lo strato termicamente attivo. Questo modello consente di lavorare sui vari aspetti (Alenei L. et al., 2015) quali: spessore/sfasamento; densità/sfasamento; densità/spessore. Il secondo schema compositivo, modello multistrato, si fonda sul processo di addizione di strati di materiali differenti, con l'obiettivo di definire un componente multifunzionale in cui

building envelope that was thus multifunctional and a balanced hybrid between massive and thin design (Fig. 2). The morphological characteristics may be summed up as follows:

- modularity;
- large size of the component (pursuing the objective of covering the 3 m inter-floor space typical of public residential building with a single panel);
- minimum thickness (in order to minimize weight, and with the purpose of bringing the TA system online quickly);
- flexibility and adaptation.

UNI1264 regulations in the matter of radiating heating systems, identifies three types of systems (A, B, C) belonging to two categories: solutions with coils sunken into the support layer (A) and dry solutions with coils inserted into grooves beneath the sup-

port layer (B, C).

The inclusion in innovative TAS of the second category of systems allowed the best possible use to be made of the thermal properties of the conducting materials, thereby reducing the thickness of the technological component, while making it lighter and offering the possibility of prefabrication.

An additional aspect was that of chemical/physical compatibility among the materials the system was composed of, in order to contain problems connected with the short duration of the TAS's function. Moreover, placing things in the wrong stratigraphic juxtaposition would have led to chemical reactions, with losses of the component's chemical, physical, or mechanical characteristics, and the benefits connected with the use of prefabricated components included the possibility of being able to monitor and verify the elements'

ogni singolo layer assolve un compito specifico. Questo modello consente di lavorare sugli aspetti: materiali/inerzia termica; densità/spessori e variazione dei volumi; superficie di contatto layer attivo/layer attivato e disperdente.

La selezione dei materiali e dei componenti da usare per la realizzazione del prototipo TAS scaturisce da valutazioni oggettive sulle proprietà e caratteristiche dei singoli materiali impiegati. La caratteristica della grande dimensione, congiuntamente al peso ed alla minimizzazione degli spessori, ha favorito la scelta di elementi ceramici sottili e di grande dimensione. Così come la soluzione pensata per costituire lo strato di isolamento termico che si compone di due parti: una di Aerogel in materassini rigidi con ottime proprietà di isolamento termico e leggerezza, l'altro layer che assolve la funzione di isolamento termico ed è composto da uno strato poroso in alveolato, entro il quale viene posto l'Idrogel, la cui funzione è quella di regolare l'umidità relativa e poi di seguito lo strato termicamente attivo ed il pannello di finitura interna (Fig. 3).

La lastra ceramica adoperata per la realizzazione del modulo prototipo è prodotta in formato 1000x3000x6mm per un peso di 14 Kg/m².

Il problema della formazione di condensa nei sistemi termoattivi costituisce una questione di difficile controllo che è stata affrontata con lo scopo di testare la validità di nuovi metodi di igro-regolazione, realizzando uno strato adiacente alla serpentina radiante, che svolga questo compito, costituito da Idrogel inglobato in un pannello alveolare forato sulla superficie irradiata dalla serpentina. Sul componente sono stati effettuati dei primi test utilizzando un sensore di rilevamento di umidità relativa e temperatura nell'aria, collegato ad un microcontrollore (tipo Ar-

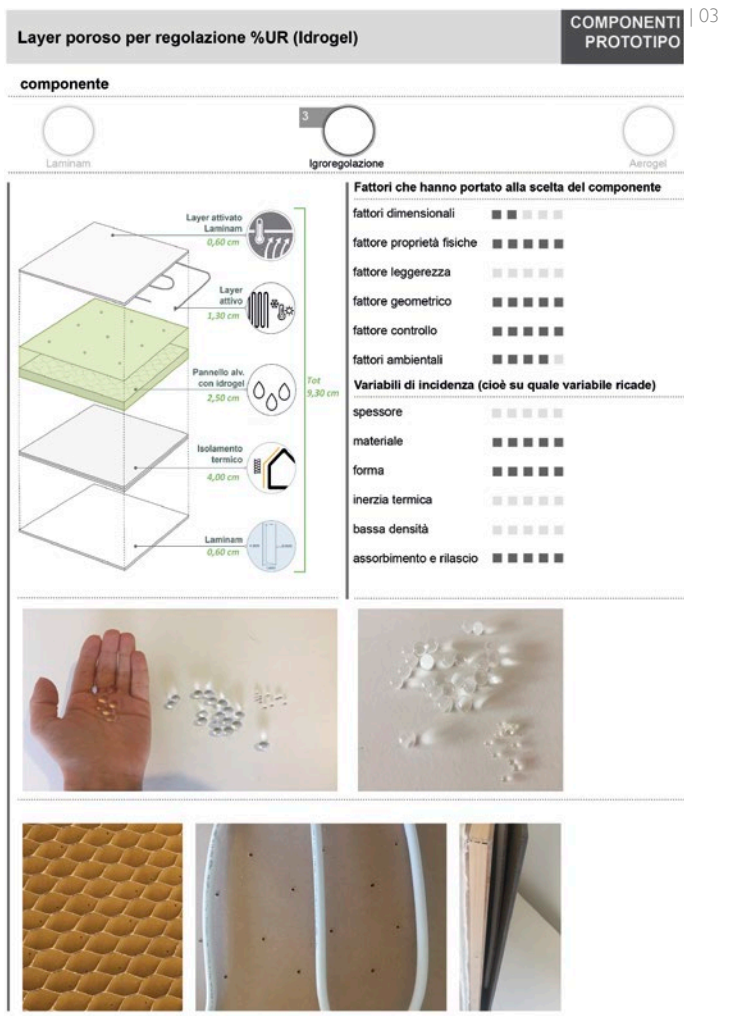
chemical and physical characteristics and quality.

The overview comparing case studies made it possible to define four functional schemes, based on six dependent variables of boundary conditions (thickness, material, form, thermal inertia, position of the active layer, percentage of contact surface between thermal active layer and high-thermal-inertia layer).

By observing the four functional schemes (1-variation of the thickness of the technological component; 2-distance of thermal active layer from the external and internal surfaces; 3-variation of thermal inertia along the section of the technological component; 4-study of shape: maximizing the contact surface between the fluid or active layer and the dispersant layer), the two main composition models underlying the adopted schemes were extrapolated.

The dependent variables emerging from the study cases are:

- *Thickness* - UNI 8290⁴ describes the parts of a technological system hierarchically, and defines the technological unit classes and functional layers. The thickness taken on by each functional layer determines different effects in the operation of the entire technological system.
- *Material* - A second strategic action in order to obtain a pre-established performance in terms of heating and cooling is the one that works on the material variable, starting from considerations of specific thermal properties (thermal capacity, thermal expansion, thermal conductivity).
- *Thermal inertia* - To guarantee high thermal and hygrometric performance, the new experimentation moves investigation towards



duino) a sua volta collegato a un PC per la registrazione e visualizzazione dei dati.

Lo scopo è stato quello di osservare i valori di umidità relativa all'interno della sezione tra strato attivo e il suo adiacente nelle

maximizing the thermal properties of materials, through the search for strategic solutions based on the principle of additives with dopant materials.

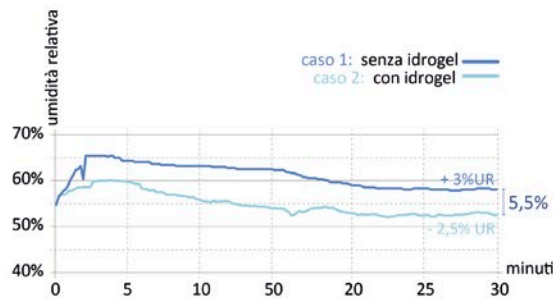
- *Position of the active layer* - Interest in the development of multilayer and multifunctional technological components from the perspective of performance is connected to the layers' positioning within the section.
- *Percentage of contact surface between thermal active layer and high-thermal-inertia layer*, which involves seeking a greater contact surface between the active layer and the dispersant layer towards the inside of the environment, with the objective of increasing the available heat exchange surface.

The four functional schemes that emerged are based on the dependent

variables just described, and may be described as follows:

- *Variation of the thickness of the layers of the technological component* - The element's thickness has an influence on a number of factors, first among which on the module's weight, and also on the thermal insulation or thermal storage capacity. The variables that most affect this functional scheme are: thickness, material, thermal inertia, and position of the active layer.
- *Distance of thermal active layer from the external and internal surfaces* - To reduce heat losses and maximize the performance of thermal active layers, their positioning within the section of the technological module takes on central importance. The variables are: material, shape, thermal inertia, position of the active layer.

Variazione di UR% nei due casi: senza idrogel/con idrogel



Osservazioni

	CASO 1e2 UR% stato iniziale: 55%
	CASO1 UR% stato finale: 58%
	+3% UR → 00:30 h
	CASO2 UR% stato finale: 52,5%
	-2,5% UR → 00:30 h

due condizioni in assenza di *Idrogel* ed in presenza di *Idrogel*. Dai dati registrati dai test emerge una netta differenza della variazione della percentuale di umidità relativa (Fig. 4).

Simulazioni e monitoraggio

Dapprima il modello è stato studiato attraverso strumenti per la simulazione a regime dinamico quali *Energy Plus* e la sua interfaccia di modellazione *Design Builder* (componente attivo); poi attraverso test di monitoraggio del comportamento passivo del prototipo TAS in *Test Box* condotti e validati secondo i codici UNI12664:2002/UNI12667/UNI12939 (prestazione termica dei materiali); UNI EN ISO 8990:1999 (trasmissione termica); UNI13187:2000 (rilevazione qualitativa delle irregolarità termiche negli involucri edilizi).

Il modello di simulazione è un cubo di lato 3,00 m alla cui superficie verticale d'involucro (interno/esterno) esposta a sud è stato applicato il componente tecnologico TAS sperimentale ai fini simulativi del suo comportamento termico estivo ed invernale. I calcoli sono stati effettuati ipotizzando l'applicazione in tre città rispettivamente del sud, centro e nord Italia.

L'iter dell'impostazione dei dati di input è lo stesso per le tre ipo-

- *Variation of thermal inertia along the section of the technological component* – Working on the thermal inertia variable allows indoor comfort to be improved, thanks to the ability of certain layers or of the entire thickness of the element to absorb the thermal wave, thus delaying the passage of heat from one end of the element to the other. The variables are: thickness, material, shape, thermal inertia, position of the active layer, percentage of contact surface between thermal active layer and high-thermal-inertia layer (Holmes et al. 2007).
- *Study of shape: maximizing the contact surface between the fluid or active layer and the dispersant layer* – Shape characteristics can determine an innovative use, both in terms of composition and at the technological/energy level. At the level of com-

position, the shape factor confers characteristics of flexibility to the component, while technologically, it allows performance to be maximized by acting on the physical properties. The variables are: material, form, position of the active layer, percentage of contact surface between thermal active layer and high-thermal-inertia layer.

In the end, it was possible to assign the TAS systems to two composition schemes: single-layer model and multi-layer model. The composition scheme for a single-layer TAS involves conceiving the technological system through the use of a single, massive material, that incorporates the thermal active layer. This model makes it possible to work on various aspects (Alenei et al., 2015): thickness/lag; density/lag; density/thickness. The multi-layer composition scheme is founded upon

tesi applicative, l'unico dato di input variabile nelle differenti simulazioni è rappresentato dai dati climatici.

I dati climatici IGDG inseriti per le tre simulazioni, presenti nel database di *Design Builder*, sono basati sugli standard ASHRAE. La temperatura esterna del progetto invernale impostata per la simulazione fa riferimento alla UNI 5364. L'attività impostata per la destinazione d'uso del locale di 9 m² è uno spazio residenziale. Per quanto riguarda la ventilazione è stato impostato un valore di aria minima di rinnovo pari a 11 l/s per persona e come indice di affollamento 0,04 persone/m², ai sensi della UNI 10339.

I set point sono stati impostati sulla base delle indicazioni presenti nella UNI EN 12831 (2) e nella UNI TS 11300 (3) al fine di limitare il valore di temperatura massima interna, per i set point estivi si fa inoltre riferimento al D.P.R. 59/09 (Attuazione del D. Lgs. 192/05).

Nella fase di definizione dei dati da ottenere nel corso della fase sperimentale del progetto di ricerca si ci si è posti l'obiettivo di acquisire informazioni in base ad un comportamento discrezionale per alcuni aspetti entro determinati margini delineati (Clarke, 2001).

La strategia adottata per la raccolta dei dati di output dei casi applicativi, vede nella scelta di precisi step temporali (in termini

the process of adding layers of different materials, with the objective of defining a multifunctional component in which each individual layer performs a specific task. This model makes it possible to work on various aspects: materials/thermal inertia; density/thicknesses and variation of volumes; surfaces of contact between active layer/active and dispersant layer.

The selection of the materials and of the components to be used for developing the TAS prototype arises from objective assessments of the properties and characteristics of the individual materials used. The characteristic of large size, along with weight and minimization of thicknesses, favoured the choice of thin, large-size ceramic elements. In the same way, the solution designed to constitute the layer of thermal insulation is composed of two parts: one of Aerogel in stiff mats

with excellent properties of thermal insulation and lightness, and the other layer providing the function of thermal insulation, composed of a porous honeycomb layer, in which Hydrogel is placed, with the function of regulating the relative humidity, followed by the thermal active layer and the internal finishing panel (Fig. 3).

The ceramic slab used to make the prototype module is produced in 1000 x 3000 x 6 mm format for a weight of 14 Kg/m².

The problem of the formation of condensation and thermal active systems is a hard-to-control issue that was faced with the purpose of testing the validity of new hygro-regulation methods, by making a layer adjacent to the radiating coil that performs this task, consisting of Hydrogel incorporated into a honeycomb panel perforated on the surface irradiated by the coil. The first tests

di stagionalità, mensilità, giorni ed ore) la chiave per una lettura chiara, semplice e comparabile dei dati afferenti i vari casi simulati (Tab. 1, 2).

Gli intervalli temporali scelti per le simulazioni sono stati: intero periodo invernale o estivo; mensile, orario e sotto-orario.

Le categorie di output riportate nei grafici sono per la simulazione invernale temperatura superficiale interna, temperatura esterna a bulbo secco ed umidità relativa; per la simulazione estiva temperatura superficiale interna; temperatura superficiale esterna; temperatura esterna a bulbo secco; umidità relativa.

Per la misurazione stazionaria dei flussi termici per il monitoraggio, al fine di testare lo stress caldo/freddo del componente, sono stati impostati i seguenti *setpoint*: 20 °C per il set caldo e 0 °C per il set freddo. Inoltre il deflettore di aria (4) è stato impostato al 60 %, valore normale, (quando lo si imposta allo 0 % l'aria è tutta dietro la piastra calda dunque il trasferimento di calore avviene solo per irraggiamento, mentre al 100 % è tutta sul campione quindi il trasferimento di calore avviene per convezione); infine il set del rilevamento dei dati misurati ha previsto la registrazione dei dati ogni 30 secondi.

Il componente Innovative TAS è stato testato nel suo comportamento passivo termico a regime stazionario sui flussi di calore distribuiti sulle due superfici esterne ed in assenza di sistemi impiantistici:

1. lastra ceramica dello spessore di 6 mm esposta al lato caldo;
2. pannello di isolamento termico in *Aerogel* dello spessore di 4 cm sul lato freddo.

Data la vicinanza di posizionamento tra le termocoppie a bordo campione e quelle situate a margine del termo-flussimetro, la stabilizzazione della varianza delle termocoppie (5) è avvenuta

were performed on the component using a sensor measuring UR% and T°C in the air, linked to a microcontroller (Arduino type) in turn connected to a PC to record and display the data.

The purpose was to observe the relative humidity values within the section between active layer and its adjacent layer on two conditions in absence of Hydrogel and in presence of Hydrogel. The data recorded by the test show a clear difference of variation of the relative humidity percentage (Fig. 4).

Simulations and monitoring

At first, the model was studied using simulation tools in dynamic operation, such as Energy Plus and its Design Builder modelling interface, and then with monitoring tests of the TAS prototype in a climate chamber, conducted and validated in accordance with the UNI12664:2002/UNI12667/

UNI12939/ 1946 (thermal performance of materials); UNI EN ISO 8990:1999 (thermal transmittance); and UNI13187:2000 (qualitative survey of thermal irregularities in building envelopes) codes.

The simulation model is a cube with a 3.00 m side, to whose southern-exposed vertical envelope surface (internal/external) the experimental TAS technological component was applied, for the purposes of simulating its summer and winter thermal behaviour. The calculations were done hypothesizing application in three cities in southern, central, and northern Italy. The process for setting the input data is the same for the three applicative cases; the only variable input datum in the different simulations was that of the climate data.

The inserted IGDG climate data, present in the Design Builder database,

in un *range* di tempo basso pari a un'ora e mezza, tempo oltre il quale le misurazioni dei dati hanno restituito in generale valori stabili.

Nella Tab. 3 vengono riportati i dati essenziali delle misurazioni effettuate riportando i valori delle temperature, dell'umidità relativa sul lato caldo e freddo a inizio e fine monitoraggio.

I test di misurazione condotti sul prototipo realizzato che evidenziano il comportamento termico a regime stazionario e dinamico del componente costituiscono solo un primo *step* di tutti i monitoraggi da dover effettuare al fine di controllare e migliorare la stratigrafia ed il comportamento termo-igrometrico del modulo Innovative TAS, indirizzando gli sviluppi futuri della ricerca verso la messa a punto di ulteriori test da effettuare e verso la definizione di un prototipo 2.0 di dimensioni maggiori e più accurato nella realizzazione degli strati materici di cui si compone e nei dettagli.

I test effettuati sulla base del metodo di *prova H* (analisi termica a regime stazionario) del *Test Box*, hanno confermato un buon comportamento del sistema multistrato avendo riportato un valore di conduttanza termica pari a 0,31 (W/m²-K). Dopo la prima ora e mezza di osservazione la varianza delle termocoppie sia sul lato caldo che sul lato freddo hanno iniziato il processo di stabilizzazione, riportando da quel momento in poi variazioni inferiori allo 0,1 °C.

Le simulazioni sul modello virtuale congiuntamente ai test effettuati sulla base del metodo di prova G del *Test Box* (sulla base della norma UNI 13786), hanno permesso di estrapolare delle prime osservazioni sui miglioramenti prestazionali in termini di flussi termici e controllo igrometrico del componente multistrato esaminato nel suo funzionamento passivo ed attivo ed in as-

pects within given outlined margins

(Clarke, 2001). The strategy adopted to collect the output data from the applicative cases sees the selection of precise temporal steps (in terms of season, month, times of day) as the key to a clear, simple, and comparable reading of the data pertaining to the various simulated cases (Tab. 1, 2).

The time intervals chosen for the simulations were: indoor winter or summer period; monthly, hourly, and sub-hourly. The output categories reported in the graphs are for winter simulation indoor surface temperature, dry bulb outdoor temperature and relative humidity; for the summer simulation indoor surface temperature, outdoor surface temperature, dry bulb outdoor temperature, relative humidity. For the stationary measurement of

are based on ASHRAE standards. The winter design outdoor temperature set for the simulation makes reference to UNI 5364. The activity set for the 9 m² location's intended use is a residential space. As for ventilation, a minimum fresh air value was set as equal to 11 l/s per person, with a crowding index of 0.04 persons/m², in accordance with UNI 10339. The set points were set based on the indications present in UNI EN 12831 and UNI TS 11300, for the purpose of limiting the indoor maximum temperature value; for the summer set points, reference is also made to Presidential Decree no. 59/09 (Implementation of Legislative Decree no. 192/05). The phase of defining the data to be obtained during the Research project's experimental phase has the objective of acquiring information on the basis of a discretionary behaviour for certain

aspects within given outlined margins

(Clarke, 2001). The strategy adopted to collect the output data from the applicative cases sees the selection of precise temporal steps (in terms of season, month, times of day) as the key to a clear, simple, and comparable reading of the data pertaining to the various simulated cases (Tab. 1, 2).

The time intervals chosen for the simulations were: indoor winter or summer period; monthly, hourly, and sub-hourly.

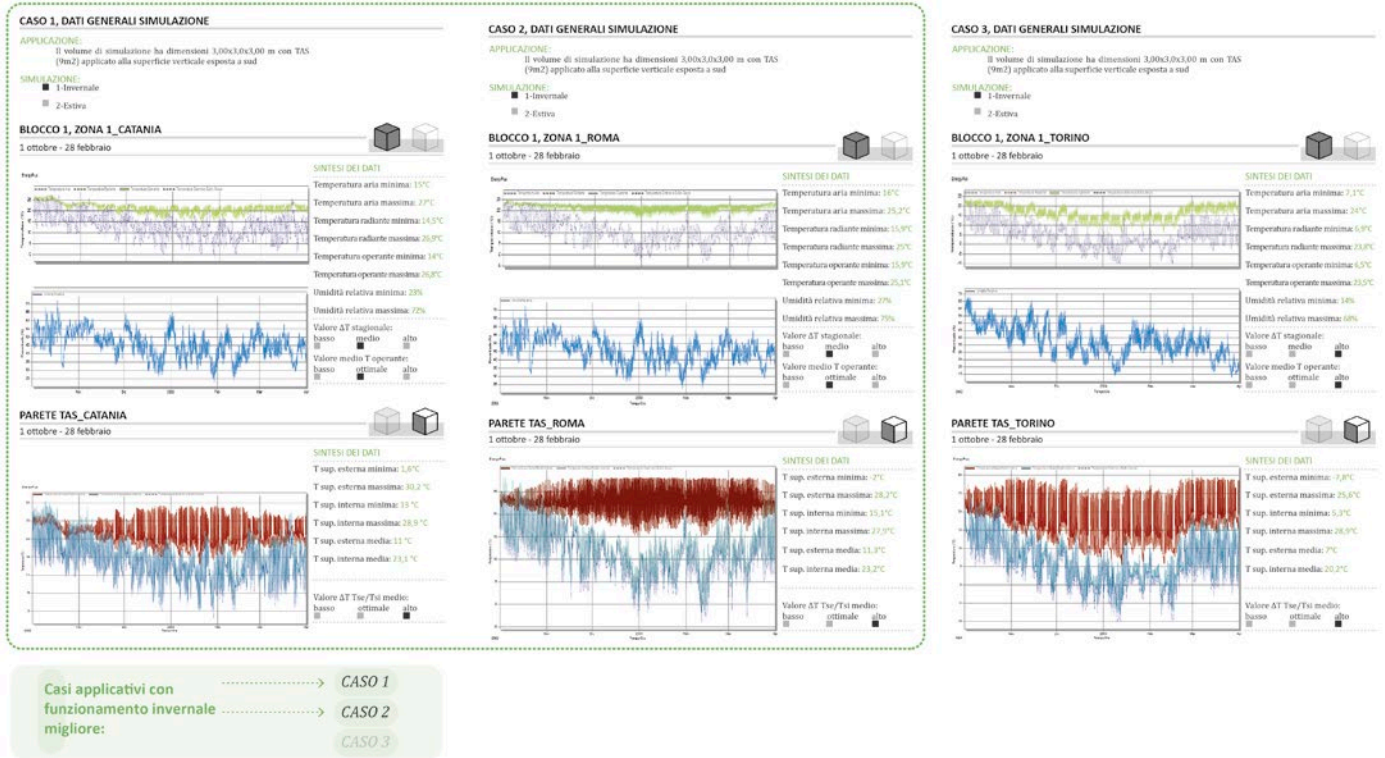
The output categories reported in the graphs are for winter simulation indoor surface temperature, dry bulb outdoor temperature and relative humidity; for the summer simulation indoor surface temperature, outdoor surface temperature, dry bulb outdoor temperature, relative humidity.

For the stationary measurement of

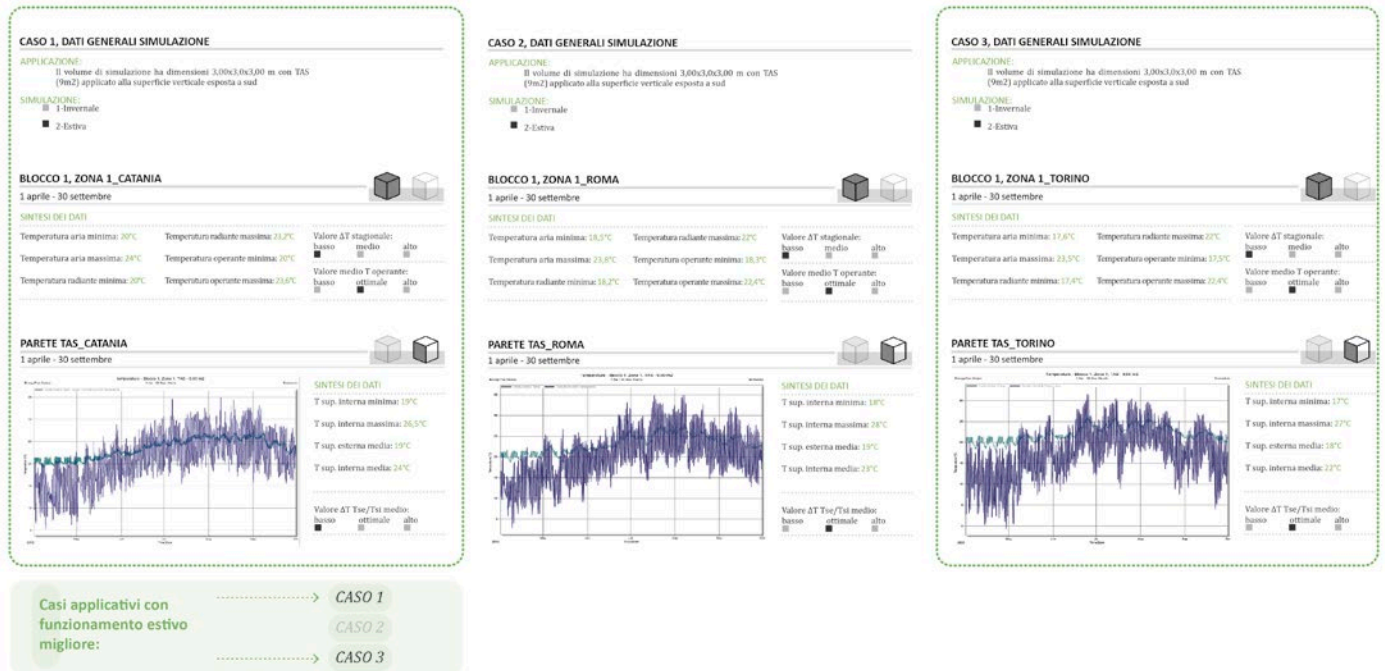
Tab. 1-2 | Simulazioni invernali ed estive stagionali del funzionamento del modulo *Innovative Tas* applicato ai tre casi: Catania, Roma, Torino. Dall'osservazione dei dati ottenuti è possibile evidenziare un miglior comportamento in termini di mantenimento delle Tsi per il primo ed il secondo caso applicativo (Catania; Roma) nel periodo invernale, mentre per il periodo estivo i miglior comportamenti, in riferimento alle Tsi si hanno per i casi 1 e 3 (Catania; Torino)

Simulation of winter and summer seasons of the functioning of the Innovative Tas module applied to the three cases: Catania, Rome, Turin. From the observation of the data obtained it is possible to highlight a better behavior in terms of Tsi maintenance for the first and second applicative cases (Catania, Rome) in the winter period, while for the summer the best behaviors, with reference to the Tsi, have for cases 1 and 3 (Catania, Turin)

Tab. 1 | Fase simulativa: funzionamento invernale dei tre casi applicativi



Tab. 2 | Fase simulativa: funzionamento estivo dei tre casi applicativi



Tab. 3 | Condizioni a inizio della fase di monitoraggio e dati essenziali registrati a fine monitoraggio
Conditions at the beginning of the monitoring phase and essential data recorded at the end of the monitoring

Condizioni iniziali e finali lato caldo							
data	ora	CALDO piastra [°C]	aria [°C]	campione [°C]	UR%	Vel aria [m/s]	
19/01/2018	16:03:09	15,31	14,843	15,293		45,6	0,15
19/01/2018	18:24:30	20,41	21,084	21,019		39,4	3,07

Condizioni iniziali e finali lato freddo							
data	ora	FREDDO piastra [°C]	aria [°C]	campione [°C]	UR%	Vel aria [m/s]	
19/01/2018	16:03:09	14,328	14,379	14,936		57,9	0,11
19/01/2018	18:24:30	2,14	4,05	5,644		47,1	3,04

| Tab. 3

senza e presenza del layer igro-regolatore, nonostante la presenza delle differenze di modelli di calcolo e dimensionali utilizzati per effettuare le prove virtuali e sul prototipo (Tab. 4).

Conclusioni

Per il proseguimento della ricerca si elencano le principali linee d'azione scaturite dalle problematiche constatate nel corso di questa fase applicativa:

1. bisognerebbe predisporre un prototipo di dimensioni maggiori al fine di poter ottenere dati più dettagliati riguardanti i tempi di raggiungimento di uniformità delle temperature superficiali del modulo e per avere dati misurati su un componente uguale a quello del modello virtuale;
2. andrebbero definiti dei tempi di monitoraggio più lunghi al fine di ottenere dati più accurati;
3. è necessario effettuare ulteriori osservazioni sul componente reale per poter confrontare i dati del comportamento termogrometrico simulato dell'Innovative TAS con i dati reali dei flussi termici e dell'umidità relativa.

heat flows for monitoring, to test the hot/cold stress of the component, the following set points were established: hot set: 20 °C and cold set: 0 °C. Moreover the air flap⁴ was positioned at 60%, normal value, (0% the air is entirely behind the hot plate; therefore, the heat transfer takes place only by irradiation; 100% entirely on the sample; therefore the heat transfer takes place by convection). Finally the measured data were recorded every 30 seconds.

The Innovative TAS component was tested in its passive thermal behaviour at stationary regime for a time of two and a half hours on heat flows distributed on the two external surfaces:

1. ceramic slab of a thickness of 6mm exposed to the hot side;
2. thermal insulation panel in Aerogel, of a thickness of 4 cm on the cool side.

Given the proximity of position between the thermocouples on the sample and those situated at the margin of the heat flowmeter, the stabilization of the variance of the thermocouples⁵ took place in a low time range equal to an hour and a half, after which the measurements of the data did not in general yield stable values.

The Tab. 3 shows the essential data of the measurements performed, reporting the values of temperatures, relative humidity, and flows (W/m²) at the start and end of monitoring.

The measurement tests done on the prototype that was made, which highlight the thermal behaviour at the component's stationary and dynamic regime, are just a first step in all the monitoring operations to be done in order to check and approve the stratigraphy and the thermo-hygrometric behaviour of the Innovative TAS module, by guiding

Una prova di monitoraggio del prototipo nel suo funzionamento termo-attivo potrebbe essere effettuata secondo il metodo di prova G del *Test Box* (trasmissione termica dinamica delle chiusure opache, sulla base della norma UNI 13786) al fine di determinare la capacità del campione di attenuare e sfasare il flusso termico proveniente dall'esterno nell'arco di 24h, con cella caldo/freddo o cella calda e monitoraggio outdoor.

NOTE

¹ Temperatura esterna invernale per la località Roma secondo la UNI 5364: 0 (°C).

² La UNI 12831 stabilisce le temperature interne di progetto in funzione delle destinazioni d'uso dei locali. Per i locali adibiti ad abitazioni tale temperatura è fissata per 20 °C (max +2 gradi).

³ La temperatura interna di progetto degli ambienti secondo la UNI 11300 si assume pari a 20°C durante la stagione invernale e pari a 26°C durante quella estiva.

⁴ Elemento di deviazione dell'aria all'interno della TestBox.

future research developments towards perfecting additional tests to be done, and towards defining a 2.0 prototype that is larger in size and more accurate in developing the material layers of which it is composed, and in its details. The tests done on the basis of Test Box's test H method (thermal analysis in stationary regime) confirmed good behaviour of the multilayer system, reporting a thermal conductance value of 0,31 (W/m²-K).

After the first hour and a half of observation, the variance of the thermocouples both on the hot side and on the cool one began the stabilization process, reporting from that moment on variations under 0,1 °C.

The simulations on the virtual model jointly with the tests performed based on the Test Box's test G method (based on UNI 13786 regulations) allowed initial observations to be extrapolated

in terms of heat flows and hygrometric control of the multilayer component observed in its passive and active operation and in the absence and presence of the hygro-regulating layer, despite the presence of differences in the calculation and dimensional models used to perform the virtual tests and the tests on the prototype (Tab. 4).

Conclusions

To pursue the research, the main lines of action emerging from the problems found over the course of this application phase are listed:

1. it would be necessary to have a larger prototype in order to be able to obtain more detailed data regarding the times for reaching uniformity of surface temperatures along the entire module, and to have measured data on a component equal to the one of the virtual model;

Tab. 4 | Messa a confronto dei dati raccolti in fase di simulazione e monitoraggio del prototipo Innovative TAS
 Compared to the data collected during simulation and monitoring of the Innovative TAS prototype

Tab. 4 | Messa a sistema dati (Tsi) componente passivo (Pas) e componente attivo (Tas)

ore di osservazione	Dimensione componente: 50x50 cm metodo: UNI EN ISO 13786 variazione: Te da 3 a 19°C setpoint: Te 11°C			Dimensione componente: 300x300 cm metodo: Energy Plus variazione: da 3,5 a 18,1°C			SINTESI DEI DATI
	componente passivo			Componente attivo			
	Tsi (°C)	Ti (°C)	UR (%)	Tsi (°C)	Ti (°C)	UR (%)	
0,00 h	14,00	14,80	55,60	14,00	15,00	55,00	
1,00 h	14,58	14,51	51,12	16,24	17,79	37,92	
2,00 h	14,96	14,83	48,24	26,09	19,47	34,44	
3,00 h	15,29	15,08	47,32	28,95	21,60	30,01	
4,00 h	15,57	15,40	46,90	25,02	21,82	31,02	
5,00 h	16,03	16,34	46,51	21,82	21,75	32,66	
6,00 h	16,71	16,80	45,08	20,66	20,33	33,23	
7,00 h	17,14	17,22	44,92	20,22	20,02	33,21	
8,00 h	17,99	18,06	44,81	19,99	19,89	33,04	
9,00 h	18,48	18,59	45,63	19,77	19,60	32,97	
10,00 h	19,57	19,62	44,28	28,42	21,57	29,58	
11,00 h	20,36	20,48	46,79	28,92	22,78	26,86	
12,00 h	21,01	21,08	47,13	25,19	23,00	26,96	

Messa a sistema dati (Tsi) componente passivo (Pas) e componente attivo (Tas)

ore di osservazione	Dimensione componente: 50x50 cm metodo: UNI EN ISO 13786 variazione: Te da 3 a 19°C setpoint: Te 11°C			Dimensione componente: 300x300 cm metodo: Energy Plus variazione: da 3,5 a 18,1°C			SINTESI DEI DATI
	componente passivo			componente attivo			
	Tsi (°C)	Ti (°C)	UR (%)	Tsi (°C)	Ti (°C)	UR (%)	
13,00 h	20,88	21,05	50,62	22,41	22,13	28,44	
14,00 h	20,62	20,99	52,10	21,06	21,58	29,79	
15,00 h	19,31	19,67	54,16	20,28	21,31	31,13	
16,00 h	18,89	19,06	53,62	19,58	20,42	31,13	
17,00 h	18,22	18,43	51,37	18,95	20,07	33,45	
18,00 h	18,10	18,15	49,50	18,49	19,45	34,90	
19,00 h	17,37	17,42	49,66	17,99	19,04	35,89	
20,00 h	16,55	16,98	49,51	17,50	18,40	36,87	
21,00 h	16,08	16,34	48,12	17,10	18,02	38,66	
22,00 h	15,41	15,89	47,91	16,78	17,88	40,20	
23,00 h	14,62	15,53	47,62	16,46	17,50	39,47	
24,00 h	13,98	15,02	46,40	16,30	17,31	37,80	

- longer monitoring times should be defined in order to obtain more accurate data;
- additional observations must be done on the real component in order to be able to compare the data on the simulated thermal/hygro-metric behaviour of the Innovative TAS with the real data of heat flows and relative humidity.

A monitoring test of the prototype in its thermal active operation might be performed in accordance with Test Box's test G method (dynamic thermal transmittance of opaque closures, based on UNI 13786 regulations) in order to determine the sample's ability to attenuate and delay the heat flow originating from the outside over the course of 24 hours, with a hot/cold cell or hot cell and outdoor monitoring.

NOTES

- Winter outdoor temperature for Rome according to UNI 5364: 0 (°C).
- UNI 12831 establishes the indoor design temperatures as a function of the intended use of the premises. For locations destined for residential buildings, this temperature is set for 20 °C (max +2 degrees).
- The indoor design temperature of the environments in accordance with UNI 11300 is assumed as equalling 20°C during the winter season, and 26°C during the summer.
- Element of air deviation inside the TestBox.
- As variance of thermocouples is intended the difference between superficial temperatures, measured at the same time, in every point of the surface on which the thermocouples are placed.

INVOLVED SUBJECTS

The work of theoretical experimental research and virtual simulation of thermal behaviors of the Innovative TAS module was carried out by the PDTA Department of Sapienza of Rome (coordination and supervision of Professor Arch. Alessandra Battisti with the PhD student Egle Ministeri), with the AMA Composites industries S.R.L. and Laminam S.p.A. System group with the collaboration for the monitoring aspects of the Innovative TAS prototype of the TCLab Research Laboratory Advanced testing center of the building envelopes of Reggio Calabria.

⁵ Per varianza delle termocoppie si intende la differenza dei valori delle temperature superficiali, allo stesso momento di osservazione, in tutti i punti di una stessa superficie sulla quale sono posizionate le termocoppie.

SOGGETTI COINVOLTI

Il lavoro di Ricerca sperimentale teorico e di simulazione virtuale dei comportamenti termici del modulo Innovative TAS è stato condotto dal Dipartimento PDTA della Sapienza di Roma (coordinamento e supervisione della Professoressa Arch. Alessandra Battisti con la Dottoranda Egle Ministeri), con le industrie AMA Composites S.R.L. e Laminam S.p.A. System groupe con la collaborazione per gli aspetti di monitoraggio del prototipo Innovative TAS del Laboratorio di Ricerca TCLab centro di testing Avanzato degli involucri edilizi di Reggio Calabria.

REFERENCES

- Li, R., Yoshidomi, T., Ooka, R. and Olesen, B.W. (2015), "Field evaluation of performance of radiant heating/cooling ceiling panel system". *Energy and Buildings*, Vol. 86, pp. 58-65.
- Schuler, M. (2010), "Foreword. Tradition, comfort, and conservation in Thermally active surfaces in architecture", Princeton Architectural Press, pp. 24-25.
- Moe, K. (2010), *Thermally active surfaces in architecture*, Princeton Architectural Press, Hudson, NY, USA.
- Battisti, A. and Ministeri, E. (2017), "Thermal-Active Systems between innovation and research in architecture", *SCM*, No. 6, pp. 48-53.
- Olesen, B.W. (2002), "Radiant floor heating in theory and practice", *Ashrae journal*, Vol. 44, No. 7, pp. 19.
- Fiorito, F. and Santamouris, M. (2017), "Tecnologie ad alta prestazione e il futuro della progettazione architettonica", *Techne Journal of Technology for Architecture and Environment*, Vol. 13, pp. 72-76.
- Ochoa, C.E. and Capeluto, I.G. (2008), "Strategic decision-making for intelligent buildings: Comparative impact of passive design strategies and active features in a hot climate", *Building and Environment*. Vol. 43, No. 11, pp. 1829-1839.
- Yannas, S. (1989), "Physics and architecture. Issues of knowledge transfer and translation to design", *Solar & Wind Technology*, Vol. 6, No 4, pp. 301-308.
- Ad van der Aa, Per Heiselberg and Perino, M. (2011), *Integrating Environmentally Responsive Elements in Buildings*, Designing with Responsive Building Elements, IEA-ECBCS, Annex 44, Published by Aalborg University, Aalborg, SE.
- Navarro, L., De Gracia, A., Colclough, S., Browned, M., McCormack, S., Griffiths, P. and Cabeza, L. (2016), "Thermal energy storage in building integrated thermal systems: A review. Part I. active storage systems", *Renewable Energy*, Vol. 88, pp. 526-547.
- Hoes, P. and Hensen, J.L.M. (2016), "The potential of lightweight low-energy houses with hybrid adaptable thermal storage: comparing the performance of promising concepts", *Energy and Buildings*, Vol. 110, pp. 79-93.
- Gwerder, M., Lehmann, B., Tödtli, J., Dorer, V. and Renggli, F. (2008), "Control of thermally-activated building systems (TABS)", *Applied energy*, Vol. 85, No. 7, pp. 565-581.
- Gstoehl, D., Stopper, J., Bertsch, S. and Schwarz, D. (2011), "Fluidised glass facade elements for an active energy transmission control", World Engineers' Convention 2011, Genova.
- Gutai, M. (2014), *Trans structures: fluid architecture and liquid engineering*, Actar, New York, USA.
- Lehmann, B., Dorer, V. and Koschenz, M. (2007), "Application range of thermally activated building systems tabs", *Energy and buildings*, Vol. 39, No. 5, pp. 593-598.
- UNI EN 1264 (2003), *Riscaldamento a pavimento - Impianti e componenti - Installazione*.
- UNI 8290 (4), *Edilizia residenziale. Sistema tecnologico*.
- Holmes, M.J and Hacker, J.N. (2007), "Climate change, thermal comfort and energy: Meeting the design challenges of the 21st century", *Energy and Buildings*, Vol. 39, No. 7, pp. 802-814.
- Alenei, L., Brzezicki, M., Knaack, U., Luible, A., Perino, M. and Wellershoff, F. (2015), *Adaptive facade Network-Europe*, TU Delft Open, Delft, NL.
- UNI 12664 / UNI 12667 / UNI 12939 (2002), *Prestazione termica dei materiali e dei prodotti per edilizia Determinazione della resistenza termica con il metodo della piastra calda con anello di guardia e con il metodo del termofluisimetro - Prodotti secchi e umidi con media e bassa resistenza termica*.
- UNI EN ISO 8990 (1999), *Isolamento termico - Determinazione delle proprietà di trasmissione termica in regime stazionario - Metodo della doppia camera calibrata e della doppia camera con anello di guardia*.
- UNI 13187 (2000), *Prestazione termica degli edifici - Rivelazione qualitativa delle irregolarità termiche negli involucri edilizi - Metodo all'infrarosso*.
- Standard ASHRAE 55 (2010), *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*.
- UNI 5364 (1976), *Impianti di riscaldamento ad acqua calda. Regole per la presentazione dell'offerta e per il collaudo*.
- UNI 10339 (1995), *Impianti aerulici a fini di benessere. Generalità, classificazione e requisiti. Regole per la richiesta d'offerta, l'offerta, l'ordine e la fornitura*.
- UNI EN 12831 (2018), *Prestazione energetica degli edifici - Metodo per il calcolo del carico termico di progetto - Parte 1: Carico termico per il riscaldamento degli ambienti, Modulo M3-3*.
- UNI TS 11300 (4) (2016), *Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 4: Utilizzo di energie rinnovabili e di altri metodi di generazione per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria*.
- D.P.R. 59 (2009), *Attuazione del D. Lgs. 192/05. Attuazione della direttiva 2002/91/CE sul rendimento energetico in edilizia*.
- Clarke, J.A. (2001), *Energy simulation in building design*, Routledge, London, UK.
- UNI 13786 (2008), *Prestazione termica dei componenti per edilizia - Caratteristiche termiche dinamiche - Metodi di calcolo*.