

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Architettura per il progetto sostenibile

Tesi di Laurea Magistrale

“Gli elementi responsivi d’involucro tra ricerca e applicazione:
Comparazione fra involucro tradizionale e responsivo attraverso
la modellazione energetica dinamica”



Relatore:

Prof. Vincenzo Corrado

Correlatore:

Prof. Ilaria Ballarini

Candidata:

Margherita Ghisalberti

Matricola: s235681

Anno accademico 2018/2019

A tutti coloro che si sforzano
per ridurre l'impatto umano sull'ambiente.
Il futuro delle prossime generazioni è nelle nostre mani.

INDICE

- ABSTRACT	3
- ABSTRACT ENGLISH VERSION	5
- CAPITOLO 1: INTRODUZIONE	7
- 1.1 L'INVOLUCRO EDILIZIO	7
- 1.2 SVILUPPO STORICO DELL'INVOLUCRO EDILIZIO	9
- 1.3 OBIETTIVI E MOTIVAZIONI DELLA TESI	11
- CAPITOLO 2: CONSUMI ENERGETICI DEGLI EDIFICI: LE NORMATIVE E IL CONCETTO DI nZEB	14
- 2.1 INQUADRAMENTO NORMATIVO	14
- 2.2 IL CONCETTO DI NZEB	18
- CAPITOLO 3: GLI ELEMENTI RESPONSIVI D'INVOLUCRO	21
- 3.1 DEFINIZIONI E REQUISITI	21
- 3.2 CLASSIFICAZIONE	24
- 3.3 LE FACCIATE ATTIVE	28
- 3.4 I PHASE CHANGE MATERIALS	37
- 3.5 IL SOLAIO VENTILATO	52
- CAPITOLO 4: IL CASO STUDIO	62
- 4.1 L'EDIFICIO TIPO PER USO UFFICIO	62
- 4.2 IL PRIMO MODELLO ENERGETICO: L'EDIFICIO CON INVOLUCRO TRADIZIONALE	66
- 4.3 IL SECONDO MODELLO ENERGETICO: L'EDIFICIO IMPLEMENTATO CON L'ELEMENTO RESPONSIVO	75

- CAPITOLO 5: LE SIMULAZIONI ENERGETICHE DINAMICHE	78
- 5.1 PRESENTAZIONE E ANALISI DEI RISULTATI	78
- 5.2 CONCLUSIONI	94
- BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA	97
- RINGRAZIAMENTI	103

ABSTRACT

L'involucro edilizio al giorno d'oggi costituisce frequentemente un oggetto di ricerca e sviluppo nel settore delle costruzioni, con l'obiettivo di ridurre i consumi energetici e le emissioni inquinanti degli edifici. Questo settore infatti, detenendo il 40% del consumo di energia primaria a livello europeo, negli ultimi anni ha visto la necessità di sforzarsi per rimediare a questo dato sia in termini di riduzione dei consumi energetici sia in termini di passaggio da fonti fossili a rinnovabili.

All'interno di questo contesto economico-sociale, in questa tesi si è scelto di trattare l'implementazione dell'involucro edilizio attraverso gli elementi responsivi, che sono tecnologie di recente sviluppo atte a migliorare la responsività della pelle di un edificio rispetto alle condizioni esterne, per ottenere un maggior comfort interno con il minimo impiego energetico.

L'edificio energeticamente efficiente, infatti, deve essere dotato di un involucro che interagisce con le sollecitazioni esterne e le sfrutta quando possibile, invece di isolare completamente l'ambiente interno per ridurre al minimo le interazioni con l'esterno.

Gli elementi responsivi d'involucro sono qui intesi come componenti costruttivi usati attivamente o passivamente che agiscono sul trasferimento e l'immagazzinamento dei flussi di calore, sulla ventilazione e sul pre-riscaldamento o raffreddamento dell'aria.

In particolar modo, sono qui approfonditi tre elementi responsivi d'involucro che sono stati giudicati i più promettenti per l'applicazione pratica all'edificio: le facciate attive, il solaio ventilato e i *Phase Change Materials* (PCM).

A seguito dell'approfondimento teorico di questi tre elementi, la ricerca è poi passata allo studio applicativo di uno di essi attraverso la modellazione energetica dinamica, scelto per la sua compatibilità con il programma di simulazione a disposizione per questa ricerca: il solaio ventilato.

Questa fase pratica è innanzitutto partita dalla scelta di un caso studio, ricaduta su un edificio ipotetico ma rappresentativo della realtà, ovvero il prototipo del tipico edificio ad uso uffici in Italia risultato della ricerca di ENEA e CRESME che, attraverso un'indagine sul parco edilizio nazionale, ha decretato i tratti dell'edificio tipo per uffici presente in Italia ed è stato il punto di partenza di questa ricerca.

Al fine di capire come gli elementi responsivi influenzassero il comportamento energetico dell'edificio, il caso studio è stato modellato in due modi diversi: dapprima, attraverso il software *Design Builder* è stato creato il modello energetico dell'edificio con un involucro edilizio tradizionale, basato sulle indicazioni della ricerca di partenza. Poi, tale

modello è stato importato sul software *Energy plus* per farne la simulazione energetica ed osservare, in particolare, l'andamento delle temperature.

Successivamente, sempre con questo programma, l'involucro di partenza dell'edificio è stato implementato con il solaio ventilato per poi farne nuovamente la simulazione energetica.

I risultati ottenuti dalle simulazioni hanno permesso di comparare le due versioni di involucro dello stesso edificio, in termini di *free-floating* delle temperature. L'efficacia dell'elemento responsivo inserito è stata riscontrata ottenendo temperature tendenzialmente più basse, in periodo estivo, all'interno dell'edificio con il solaio ventilato rispetto all'edificio con involucro tradizionale.

ABSTRACT – ENGLISH VERSION

Nowadays, the building envelope is frequently a research and development object in the constructions field, with the goal of reducing energy consumptions and pollutant emissions of buildings.

This field is, in fact, responsible of 40% of the primary energy consumption in Europe and for this reason, lately, there has been an effort in order to fix this datum in terms of both energy consumption reduction and passage from fossil fuels to renewables.

In this context, for this thesis it's been chosen to study the responsive building elements, which are new technologies able to somehow react to the outside conditions in order to have better comfort conditions in the indoor environment and have a minimal energy consumption.

A building that collaborates with the outdoor environment and harnesses it, when possible, is in fact more energy efficient than one that is as most isolate as possible from the outside.

Responsive building elements are here intended as parts of the building system which work either passively or actively on heat fluxes, energy storage, pre-heating and cooling of air and ventilation.

Three of them are particularly deepened here, which are the most promising for building application: double skin facades, ventilated slab and phase change materials (PCM).

This research has a first part that presents and explains these three chosen elements and a second part that describes the practical phase of this thesis: the energy dynamic simulation of a building implemented with the ventilated slab.

The starting point of the practical phase was the choice of the case study: a hypothetical though reality-representative building taken from a research of ENEA and CRESME in which the typical office building in Italy with all of its features is represented. The building described in this research was the initial case study of my thesis.

The goal of this practical phase was to understand how the energetic behavior of a building changes from a traditional building envelope to a responsive one. For this reason, the first step was to model the building with the traditional envelope on the software Design Builder, then, this model was passed on a second simulation software, Energy Plus, where the energy dynamic simulation was run in order to observe the indoor temperatures of this building.

Lastly, on Energy Plus, the ventilated slab system was added to the building with the traditional envelope and the simulation was run again in order to be able to compare the obtained results.

The comparison was among the different temperatures in free floating conditions of the two building versions. The responsive building element of the ventilated slab turned out to be effective since it generally caused a decrease in the temperatures of the building where it was modeled in.

CAPITOLO 1: INTRODUZIONE

1.1

L'involucro edilizio

L'involucro edilizio da sempre è uno dei componenti architettonici con un ampio potenziale di ricerca, miglioramento e sviluppo e per questo motivo la tesi si fonda su questo tema e approfondisce la strada dell'implementazione dell'involucro edilizio attraverso gli elementi responsivi.

Questo componente architettonico costituisce la frontiera di separazione tra l'ambiente esterno e quello interno, dando vita ad uno spazio delimitato controllabile per il benessere dell'uomo che vive al suo interno. A tale frontiera tuttavia, si affida non solo la funzione di separazione tra i due ambienti, ma anche tante altre, tra cui:

- la funzione estetica, poiché l'involucro è ciò che conferisce l'immagine e la forma dell'edificio che si percepisce dall'esterno.
- la funzione di riparo dalle intemperie.
- la funzione di filtro acustico, visivo, olfattivo e dei flussi energetici.

Nel tempo sono stati impiegati molti concetti e termini di paragone diversi per spiegare l'involucro edilizio, spesso anche contrastanti tra di loro. Ad esempio, da un lato ci si è riferiti all'involucro come scudo protettivo, guscio, confine, separazione e barriera, quindi come a un qualcosa di fortemente scollegato e quanto più possibile isolato dall'ambiente esterno. Dall'altro invece ci sono stati anche riferimenti all'involucro come pelle traspirante, filtro, confine permeabile ecc... definendolo quindi come un elemento di collegamento tra esterno e interno.

Risulta quindi chiaro che c'è una forte dicotomia intrinseca al significato di involucro edilizio che porta principalmente a due diverse interpretazioni contrastanti tra di loro. A. Van Der Aa, P. Heiselberg e M. Perino nella loro ricerca [1] pubblicata dalla International Energy Agency individuano e descrivono due approcci che classificano le due diverse interpretazioni dell'involucro edilizio che si sono diffuse nel tempo sopra descritte.

Il primo approccio è quello esclusivo, secondo cui un edificio è energeticamente efficiente se è dotato di un involucro il più possibile isolato dall'ambiente esterno e con una forte tenuta all'aria, in modo da ridurre al minimo qualsiasi rapporto tra interno e esterno. Il

benessere dell'ambiente indoor in questo caso è affidato completamente al sistema di impianto. Il secondo approccio invece è quello selettivo, secondo cui, al contrario del primo, un edificio per essere energeticamente efficiente ha bisogno del massimo sfruttamento delle caratteristiche dell'ambiente esterno e dunque l'involucro edilizio deve essere un intermediario attivo e, appunto, selettivo, tra i due ambienti. Il benessere dell'ambiente interno in questo caso dipende dall'impianto ma anche dalle strategie passive messe in atto grazie alle caratteristiche dell'involucro che rispondono in diversi modi ai cambiamenti e alle sollecitazioni esterne.

“La zona tra interno e esterno qui diventa una zona più o meno ibrida dove gli apporti di energia sono non solo respinti, ma anche accumulati, temperati, ammessi o reindirizzati, in base alle condizioni indoor desiderate” [1].

1.2

Sviluppo storico dell'involucro edilizio

Quando l'uomo ha cominciato a costruire le case per fornirsi di una protezione dall'ambiente esterno, ciò che determinava la forma e l'aspetto dell'abitazione era la necessità di adattamento al clima in cui essa andava costruita. L'edificio doveva adattarsi al luogo per creare le migliori condizioni possibili di comfort interno usando al meglio i mezzi messi a disposizione dalla natura per sfruttare le condizioni climatiche favorevoli e per gestire quelle sfavorevoli.

Gli edifici venivano quindi dotati di stratagemmi come atrii per la luce, corridoi per la ventilazione, muri perimetrali spessi per accumulare il calore, colori di rivestimento mirati all'assorbimento o alla riflessione della luce ecc.

Alcuni esempi sono visibili ancora oggi nei luoghi meno intaccati dalle tecnologie moderne, basti pensare ai trulli pugliesi, progettati per accumulare il calore nell'alto dell'abitazione e mantenere la parte bassa più fresca, alle torri del vento dei paesi arabi che sfruttavano i venti, le luci e le ombre per portare la ventilazione nelle parti abitate della casa, oppure ancora agli igloo che sfruttano la massima compattezza possibile e le proprietà del ghiaccio per minimizzare le dispersioni di calore, o alle case dipinte di bianco della Grecia per assorbire meno radiazione solare possibile. Tutto ciò che il clima offriva, veniva sfruttato a favore del benessere interno.

Con l'avvento del XX secolo tuttavia, vennero introdotte le innovative tecnologie degli impianti di riscaldamento, raffrescamento e ventilazione e la luce artificiale. Si scoprirono man mano materiali sempre più innovativi, processi costruttivi sempre più avanzati e industrializzati e la possibilità di dividere le funzioni strutturali da quelle meccaniche, termiche ecc.

Queste innovazioni hanno ribaltato il modo di costruire messo in pratica fino ad allora, portando in primo piano l'estetica e gli aspetti formali delle costruzioni a sfavore dell'efficienza energetica, dello sfruttamento delle risorse naturali, dell'adattamento alle condizioni climatiche e del benessere dell'ambiente interno. L'architettura è diventata prima di tutto espressione dell'estro e del gusto dell'architetto, a cui le soluzioni impiantistiche dovevano adattarsi per fornire all'edificio le condizioni di comfort interno, obiettivo comunque spesso difficilmente raggiunto a causa della differenza tra la temperatura delle superfici confinanti con l'esterno e quella dell'aria interna.

Negli ultimi anni, tuttavia, si è verificata una presa di coscienza della situazione climatica ed energetica odierna che si è concretizzata prima di tutto nell'emanazione di numerose normative, sia internazionali che nazionali, mirate alla regolazione dei consumi e delle

emissioni. Questo, insieme ad altri fattori come l'aumento dei costi dell'energia, lo sviluppo della ricerca sulle fonti di energia rinnovabile e lo scontento degli utenti delle architetture sopra descritte, senz'altro moderne ma non confortevoli, stanno riportando la progettazione edilizia nuovamente a considerare i fattori climatici come un elemento caratterizzante del progetto e, insieme a questo, a sfruttare le conoscenze odierne per ridurre i consumi energetici, favorire le energie rinnovabili e ridurre le emissioni inquinanti del settore.

1.3

Obiettivi e motivazioni della tesi

Come si può dotare un edificio affinché interagisca con l'ambiente esterno, sfruttandolo per migliorare quello interno?

Questa è la domanda all'origine dello sviluppo di questa tesi e a cui la ricerca mira a rispondere approfondendo le tecnologie responsive per l'involucro edilizio prima a livello teorico e poi con una sperimentazione pratica. La domanda nasce da un duplice motivo: da una parte, per la necessità nel mondo dell'edilizia odierna di adattare gli edifici al contesto climatico per il risparmio energetico e, dall'altra, per un interesse allo sfruttamento dell'interazione edificio-ambiente finalizzata al minimizzare i consumi e dunque l'impatto ambientale.

In questa ricerca vi è dunque un'evidente presa di posizione verso l'approccio selettivo alla progettazione (cfr. capitolo "L'involucro edilizio"), secondo cui un edificio energeticamente efficiente non è quello completamente isolato dall'ambiente esterno ma, al contrario, è quello che lo sfrutta a favore del comfort dell'ambiente interno.

La cooperazione tra edificio e ambiente è un tema molto vasto e per metterla in atto sono molte le soluzioni applicabili all'edificio, e, più precisamente, all'involucro. Diversi sono anche i livelli di integrazione e la quantità di elementi che conferiscono la capacità di tale cooperazione all'edificio, per esempio L. Bianco e V. Serra hanno pubblicato, in un articolo su questo tema [2], una schematizzazione dell'integrazione tra involucro edilizio e nuove tecnologie per la performance energetica, di seguito riportata:

- “- Passivo basico: Rispondenza ai requisiti di legge
- Passivo avanzato: Ottimizzazione delle strategie convenzionali di controllo dei flussi termici, solari e luminosi
- Dinamico – livello componente: Materiali aventi proprietà termofisiche e ottiche variabili
- Dinamico: Involucro integrato con impianti HVAC”.

Nell'ambito di questa tesi verranno approfonditi gli elementi responsivi d'involucro con i relativi sistemi di integrazione all'intero impianto dell'edificio che li rendono in grado di rispondere in vari modi alle condizioni climatiche esterne e di interagire con l'edificio, sia (e soprattutto), a livello passivo, sia in abbinamento all'impianto, laddove necessario. La ricerca e l'applicazione relative a queste tecnologie che sfruttano il contesto climatico con una richiesta di energia minima se non, in molti casi, nulla, possiedono infatti il più

grande potenziale di sviluppo verso l'obiettivo di rendere gli edifici sempre meno energivori e impattanti nei confronti dell'ambiente.

Gli elementi responsivi, che verranno approfonditi con maggiore dettaglio più avanti, sono qui intesi come dei costituenti dell'involucro che hanno la capacità di variare le proprie caratteristiche fisiche, termiche o chimiche in base al tempo e alle condizioni esterne per apportare un maggiore comfort all'ambiente interno. In relazione all'energia, questi elementi possono dunque assorbirla, trasportarla, immagazzinarla o rilasciarla.

L'obiettivo della presente ricerca è dunque quello di descrivere e presentare gli elementi responsivi d'involucro e poi mostrare l'applicazione pratica di uno di essi ad un edificio, per studiare l'influenza che ha sul suo comportamento energetico grazie allo strumento della modellazione energetica dinamica.

Per perseguire questi obiettivi, la tesi si può dunque considerare divisa in tre parti: una prima parte che presenta il contesto normativo nazionale e internazionale relativo al mondo dei consumi energetici dell'edificio e una seconda parte in cui si descrivono gli elementi responsivi in modo completo, così da fornirne una rappresentazione a 360 gradi con definizioni, funzionamento, classificazioni, usi, vantaggi e limiti.

Come precedentemente accennato, tali elementi responsivi sono tre e sono quelli giudicati come i più promettenti nel mondo della ricerca per l'effettiva applicazione all'edificio. Si tratta delle facciate attive, dei PCM e del solaio ventilato, tre tecnologie di recente sviluppo che, in modi diversi, agiscono sull'involucro edilizio in modo da renderlo capace di adattarsi alle sollecitazioni climatiche in favore del comfort interno. Questi tre elementi sono presentati attraverso un capitolo approfondito e critico, che cerca di mettere insieme quanto più possibile le informazioni sul tema presenti in letteratura fino al giorno d'oggi. Infine, vi è una terza parte che riporta i passaggi più importanti della fase pratica di questa tesi, ovvero quella dell'applicazione di un elemento responsivo d'involucro ad un caso studio. L'elemento scelto in questo contesto è il solaio ventilato, data la sua compatibilità con i programmi a disposizione.

In questa parte si presentano innanzi tutto le caratteristiche del caso studio e a seguire si descrivono la modellazione del primo modello con involucro tradizionale e del secondo modello con involucro implementato con solaio ventilato. In ultimo, viene presentata la comparazione tra i due modelli al fine di mostrarne le differenze dovute all'azione dell'elemento responsivo.

Per quanto riguarda la fase di applicazione di questa ricerca, il suo obiettivo è la comparazione tra involucro tradizionale e involucro responsivo applicati ad uno stesso

edificio, in modo che, analizzando i risultati delle simulazioni, sia possibile vedere se ci sia una differenza nel loro comportamento energetico.

Basando le impostazioni del modello con solaio ventilato sulla ricerca fatta nella prima fase della tesi e riportata nei suoi primi capitoli, è auspicabile che l'elemento responsivo rispecchi il comportamento lì descritto. Tuttavia, trattandosi di una ricerca esplorativa, che indaga un campo poco approfondito, la tesi non si pone l'obiettivo di dimostrare che il solaio ventilato sia perfettamente adeguato all'applicazione sull'edificio del caso studio con un notevole risparmio energetico, ma si pone l'obiettivo di studiare le differenze tra i due modelli e di dedurne delle conclusioni, a prescindere dal risultato in termini di consumi.

CAPITOLO 2:

CONSUMI ENERGETICI NEGLI EDIFICI: LE NORMATIVE E IL CONCETTO DI NZEB

2.1

Inquadramento normativo

Il panorama normativo vigente in materia di consumi energetici degli edifici è molto vasto ed è costituito sia da normative a livello comunitario che nazionale. Tra queste, il presente capitolo di tesi riporta le norme più importanti a cui riferirsi nel campo dello studio energetico degli edifici.

La Direttiva 2002/91/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio, nota anche come EPBD (Energy Performance Building Directive), emanata il 16 Dicembre 2002 [3], è uno dei primi e dei principali riferimenti normativi promossi dall'Unione Europea in materia di rendimento energetico dell'edificio. A seguito della presa di coscienza che il settore edilizio è responsabile del 40% dei consumi finali di energia, nonché del 30% delle emissioni di CO₂, l'Unione Europea ha recepito l'urgenza di emanare uno strumento giuridico per regolare il rendimento energetico degli edifici e incentivare la riduzione dei consumi e delle emissioni.

La normativa si divide in 17 articoli, i cui punti salienti prescrivono:

- l'istituzione di un metodo di calcolo a livello regionale e nazionale per il rendimento energetico degli edifici, con il rispetto di determinati requisiti minimi;
- Il rispetto dei requisiti minimi sia per gli edifici di nuova costruzione che per quelli soggetti a ristrutturazioni importanti con metratura superiore ai 1000 m²;
- L'introduzione dell'attestato di prestazione energetica;
- La periodica ispezione degli impianti degli edifici.

I contenuti di questa norma evidenziano chiaramente la volontà della Comunità Europea di costituire delle precise condizioni di rispetto e controllo dell'efficienza energetica dell'edificio, valide non solo al momento della costruzione ma per tutto il suo ciclo di vita.

La recezione a livello nazionale della EPBD è avvenuta attraverso il decreto legislativo del 19 Agosto 2005, n.° 192 [4], che costituisce dunque un importante pilastro normativo di riferimento a livello italiano in tema di energia nell'edificio.

Il decreto disciplina, in particolare, 8 punti salienti per la prestazione energetica in edilizia, di seguito riportati:

- a) la metodologia per il calcolo delle prestazioni energetiche integrate degli edifici;
- b) l'applicazione dei requisiti minimi In materia di prestazioni energetiche degli edifici;
- c) i criteri generali per la certificazione energetica degli edifici;
- d) le ispezioni periodiche degli impianti di climatizzazione;
- e) i criteri per garantire la qualificazione e l'indipendenza degli esperti incaricati della certificazione energetica e delle ispezioni degli impianti;
- f) la raccolta delle informazioni e delle esperienze, delle elaborazioni e degli studi necessari all'orientamento della politica energetica del settore;
- g) la promozione dell'uso razionale dell'energia anche attraverso l'informazione e la sensibilizzazione degli utenti finali, La formazione e l'aggiornamento degli operatori del settore" [4].

Si definiscono inoltre tutti gli elementi da considerare nella metodologia di calcolo della prestazione energetica e i valori limite del fabbisogno di energia primaria annuo per il riscaldamento invernale, delle trasmittanze e dei rendimenti, suddivisi in base alle zone climatiche.

Il 19 Maggio 2010 venne pubblicata dal Parlamento Europeo e dal Consiglio una nuova versione della EPDB emanata nel 2002: la cosiddetta EPBD Recast [5], che costituisce l'aggiornamento della sua precedente versione ed è la normativa europea attualmente in vigore a cui riferirsi per la progettazione.

Questa nuova versione della Energy Performance Building Directive presenta obiettivi più ambiziosi e requisiti minimi più stringenti per i consumi energetici dell'edificio. Ciò è rappresentativo di un maggiore impegno da parte dell'Unione Europea per ridurre i consumi energetici del settore edilizio e raggiungere con successo gli obiettivi del Piano 20-20-20 introdotto dalla normativa 2009/29/CE [6] che propone per questo settore l'intento di ridurre le emissioni di CO₂ del 20%, ridurre il consumo di energia primaria del 20% e incrementare la percentuale di energia da fonti rinnovabili del 20% entro il 2020.

Tale normativa [5] inoltre introduce per la prima volta due concetti che traducono in modo molto concreto l'obiettivo europeo di avere edifici ambientalmente ed economicamente sostenibili. Questi due concetti, definiti all'articolo 2 della normativa, sono l'edificio a energia quasi zero (*Nearly Zero Energy Building*, abbreviato *nZEB*) e il livello ottimale in funzione dei costi (*Cost-Optimal level*).

Il primo concetto si riferisce ad un nuovo standard di costruzione, approfondito in seguito in questa tesi, che prevede il rispetto di determinati requisiti energetici minimi raggiungibili sia attraverso strategie passive (quali per esempio l'orientamento, l'involucro edilizio, gli apporti gratuiti ecc...) sia attraverso una scelta oculata di determinati impianti di riscaldamento, raffrescamento e ventilazione.

Il secondo concetto viene definito dalla normativa come “livello di prestazione energetica che comporta il costo più basso durante il ciclo di vita economico stimato, dove: il costo più basso è determinato tenendo conto dei costi di investimento legati all’energia, dei costi di manutenzione e di funzionamento (compresi i costi e i risparmi energetici, la tipologia edilizia interessata e gli utili derivanti dalla produzione di energia), se del caso, e degli eventuali costi di smaltimento. [...] Il livello ottimale in funzione dei costi si situa all’interno della scala di livelli di prestazione in cui l’analisi costi-benefici calcolata sul ciclo di vita economico è positiva” [5].

Si spiega dunque l’importanza dell’aspetto economico, chiarendo che costruire edifici molto performanti non vuol dire automaticamente costruire edifici sostenibili, perché la sostenibilità e la fattibilità economica vanno considerate. Il livello di *cost-optimal* è dunque il giusto compromesso tra la performance energetica e il costo onnicomprensivo dell’edificio.

Oltre a questi importanti aspetti positivi, tuttavia, il testo della normativa risulta poco chiaro ed esaustivo in alcune parti, che invece di dare indicazioni e definizioni precise, lasciano un margine di libera interpretazione che ha causato critiche e dibattiti. I principali punti che sono stati oggetto di criticità sono riportati di seguito:

All’articolo 4 si dichiara che “Gli Stati membri adottano le misure necessarie affinché siano fissati requisiti minimi di prestazione energetica per gli edifici o le unità immobiliari al fine di raggiungere livelli ottimali in funzione dei costi.” ma anche che “Gli Stati membri non sono tenuti a fissare requisiti minimi di prestazione energetica che non siano efficaci sotto il profilo dei costi rispetto al ciclo di vita economico stimato” [5].

In questi punti il testo potrebbe dunque condurre uno stato membro a interpretare che laddove non ci sia convenienza economica, si possa essere giustificati a non rispettare i requisiti minimi energetici.

Il nome stesso di edificio a energia quasi zero inoltre, lascia molto indefinito il valore del consumo di energia accettabile di un edificio per poter essere definito “a energia quasi zero”. La normativa dunque forse rimanda in qualche modo ai singoli stati membri il compito di interpretare e definire più precisamente e responsabilmente queste criticità.

La EPBD Recast viene recepita in Italia attraverso la Legge 90 e attuata con il decreto ministeriale del 26 Giugno 2015 [7], che ha come obiettivo la definizione delle modalità di calcolo della prestazione energetica dell’edificio comprensiva di sfruttamento delle fonti di energia rinnovabile e la definizione dei requisiti minimi energetici.

Nel decreto si dice come determinare la prestazione energetica di un edificio nel seguente modo:

“la prestazione energetica degli edifici è determinata sulla base della quantità di energia necessaria annualmente per soddisfare le esigenze legate a un uso standard dell’edificio e corrisponde al fabbisogno energetico annuale globale in energia primaria per il riscaldamento, il raffrescamento, per la ventilazione, per la produzione di acqua calda sanitaria e, nel settore non residenziale, per l’illuminazione, gli impianti ascensori e scale mobili” [7].

Le prescrizioni e i requisiti per gli edifici sono suddivisi, nel decreto, in base alla categoria di edificio o di intervento. Le nuove costruzioni e le ristrutturazioni importanti di primo livello hanno quindi requisiti e prescrizioni diverse dalle ristrutturazioni di secondo livello e dalle riqualificazioni energetiche.

Sono riportati di seguito, a titolo di esempio, i requisiti per gli edifici di nuova costruzione, che devono essere determinati sulla base del confronto con l’edificio di riferimento. I parametri, gli indici e le efficienze di progetto che vanno comparati ai rispettivi valori dell’edificio di riferimento sono:

- Il coefficiente medio globale di scambio termico per trasmissione per unità di superficie disperdente (H_T)
- L’area solare equivalente estiva per unità di superficie utile ($A_{sol,est} / A_{sup\ utile}$)
- Gli indici di: prestazione termica utile per riscaldamento ($EP_{H,nd}$), prestazione termica utile per raffrescamento ($EP_{H,nd}$), prestazione energetica globale dell’edificio (EP_{gl})
- Le efficienze η_H , η_W e η_e

Per determinare la classe energetica di un edificio, si prescrive di calcolare l’indice di prestazione energetica globale dell’edificio, espresso in energia primaria non rinnovabile $EP_{gl,nren}$. Si definiscono inoltre le condizioni per la definizione di un edificio a energia quasi zero, che sono: il rispetto dei parametri di comparazione con l’edificio di riferimento e l’obbligo di integrazione di fonti rinnovabili secondo determinate quantità minime.

2.2

Il concetto di nZEB

L'articolo 2 della normativa del Parlamento Europeo e del Consiglio del 19 Maggio 2010, n.° 2010/31/UE [5], dà per la prima volta in ambito normativo la definizione di edificio nZEB nel seguente modo: “Edificio ad altissima prestazione energetica [...]. Il fabbisogno energetico molto basso o quasi nullo dovrebbe essere coperto in misura molto significativa da energia da fonti rinnovabili, compresa l'energia da fonti rinnovabili prodotta in loco o nelle vicinanze” [5].

All'articolo 9 inoltre, si sanciscono le scadenze entro cui tutti gli edifici di nuova costruzione dovranno tutti essere costruiti secondo gli standard nZEB:

“Gli Stati membri provvedono affinché:

- a) entro il 31 Dicembre 2020 tutti gli edifici di nuova costruzione siano edifici a energia quasi zero;
- b) a partire dal 31 Dicembre 2018 tutti gli edifici di nuova costruzione occupati da enti pubblici e di proprietà di questi ultimi siano edifici a energia quasi zero.

Gli stati membri elaborano piani nazionali destinati ad aumentare il numero di edifici a energia quasi zero. Tali piani nazionali possono includere obiettivi differenziati per tipologia edilizia” [5].

A livello più pratico, è poi il decreto legislativo del 26 Giugno 2015, n.° 162 [7] che definisce più precisamente i requisiti e i parametri che un edificio deve rispettare per essere definito a energia quasi zero. In particolare, dato l'edificio di riferimento rispetto all'edificio di progetto che mira ad essere un nZEB, sia esso un caso di nuova costruzione o di ristrutturazione, due sono le condizioni affinché possa essere definito a energia quasi zero.

La prima, è che rispetti tutti i requisiti sopra descritti presentati nel decreto come requisiti e prescrizioni per edifici di nuova costruzione, di ristrutturazione importante e, appunto, ad energia quasi zero. Ciò significa che il coefficiente medio globale di scambio termico per trasmissione (H'_T), l'area solare equivalente estiva per unità di superficie utile ($A_{sol,est}/A_{sup\ utile}$), gli indici di prestazione termica utile per riscaldamento ($EP_{H,nd}$), prestazione termica utile per raffrescamento ($EP_{H,nd}$), prestazione energetica globale dell'edificio (EP_{gl}) e le efficienze η_H , η_w e η_c , siano tutti minori dei relativi valori dell'edificio di riferimento. Questi valori si riferiscono ai parametri tabellari presenti in normativa vigenti dal 1° Gennaio 2019 per gli edifici pubblici e dal 1° Gennaio 2021 per tutti gli altri.

La seconda riguarda invece gli obblighi di introduzione di energia da fonte rinnovabile secondo i requisiti minimi prescritti in un altro decreto, quello del 3 Marzo 2011, n.° 28.

La normativa europea definisce le linee guida generali del concetto di nZEB con la definizione e le scadenze, ma sta poi agli stati membri istituire nel dettaglio i propri parametri e requisiti.

Con l'introduzione di questo concetto di edificio a consumo quasi zero e l'obbligo di rendere tali tutte le nuove costruzioni, in tempi relativamente brevi per il settore dell'edilizia, la EPBD Recast introduce una grande innovazione nel modo di costruire per cui d'ora in poi lo sforzo per ridurre i consumi non sarà più opzionale ma obbligatorio. Si noti, tuttavia, che l'edificio nZEB, nonostante miri ad avere una domanda di energia estremamente ridotta, non deve essere per forza un edificio completamente passivo. Realisticamente infatti, anche questo tipo di edificio sarà dotato di un impianto che sarà performante e in più sfrutterà una larga parte di energia prodotta da fonti rinnovabili.

Per Heiselberg, in uno dei documenti dell'Annex 44 della International Energy Agency [8] propone diversi schemi progettuali (*Concepts*) per la progettazione architettonica integrata e onnicomprensiva che mira ad ottenere edifici che abbiano un ottimale equilibrio tra il benessere in ambiente interno e la performance energetica.

Gli schemi proposti rispecchiano dunque quello che dovrebbe essere l'iter progettuale di un professionista che intende progettare un edificio nZEB. Si riporta quindi, a titolo esemplificativo, lo schema progettuale della Piramide di Kyoto, che riporta gli step della progettazione integrata nel modo più chiaro e lineare rispetto agli altri schemi proposti.

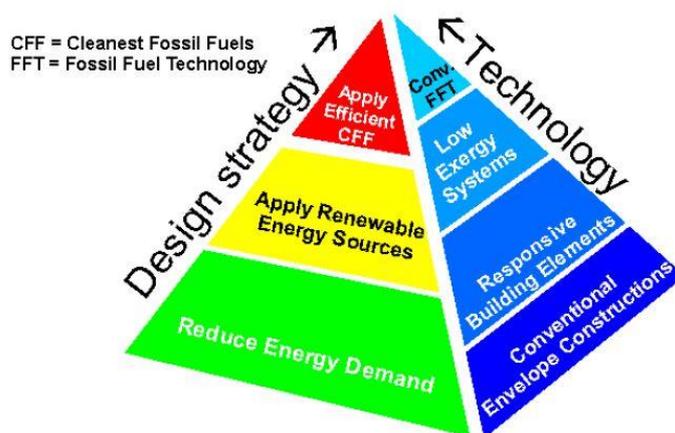


Fig. 1: La Piramide di Kyoto. Fonte: P. Heiselberg, *Expert guide: Part 1. Responsive building concepts*, in *Integrating environmentally responsive elements in buildings (Annex 44)*, IEA-ECBCS, Aalborg University, Novembre 2009

La Piramide di Kyoto è una strategia progettuale sviluppata da due studiosi norvegesi (Dokka e Rødsjø) che propone un processo per step successivi rappresentati dal basso all'alto nell'immagine rappresentativa di Fig. 1. A sinistra sono mostrate le strategie a livello teorico che, nel giusto ordine, corrispondono a: ridurre il fabbisogno di energia, utilizzare fonti di energia rinnovabili e utilizzare combustibili fossili il più possibile efficienti e puliti.

Dunque, il concetto principale di questo metodo di progettazione è quello del minor impiego possibile di energia. A priori di tutto infatti, il punto di partenza è proprio quello di diminuirne il fabbisogno, che implica quindi la costruzione di un edificio che al di là degli impianti riesca a minimizzare le perdite di calore e a massimizzare gli apporti gratuiti di energia. Siccome realisticamente la costruzione di un edificio con fabbisogno di energia pari a zero in tutte le stagioni è insolita, la produzione di energia si rende necessaria. Il secondo step della piramide quindi consiglia, in questo senso, di utilizzare come prima soluzione fonti di energia rinnovabili. Laddove non fosse possibile o non fosse sufficiente affidare l'intera produzione di energia per il fabbisogno di un edificio alle fonti rinnovabili, il terzo step della piramide prescrive di affidarsi a questo punto ai combustibili fossili, ma di cercare quanto meno di utilizzare quelli con i minori livelli di inquinamento.

Nella parte destra della piramide sono riportati invece degli esempi di soluzioni tecniche da corrispondere alle indicazioni teoriche della colonna sinistra. Nell'ordine di lettura dall'alto verso il basso vengono presentate le seguenti soluzioni:

- Costruzione di un involucro tradizionale
- Introduzione di elementi responsivi d'involucro
- Sistemi con bassa exergia
- Combustibili fossili tradizionali

Anche qui la sequenza rispetta lo stesso schema di ragionamento della colonna sinistra, e le soluzioni tecniche presentate in questa colonna vanno di pari passo con le strategie teoriche della colonna precedentemente descritta.

CAPITOLO 3: GLI ELEMENTI RESPONSIVI D'INVOLUCRO

3.1

Definizioni e requisiti

Per rendere un edificio energeticamente efficiente e massimizzare le prestazioni dei suoi componenti in ogni condizione climatica dell'anno, esso dovrebbe idealmente potersi adattare al clima esterno, cambiando il suo involucro in base alle diverse sollecitazioni. Risulta spontaneo il paragone con il comportamento umano, che è proprio ciò a cui l'edificio dovrebbe ambire: così come gli esseri umani possono decidere il proprio abbigliamento in base alle temperature e alle condizioni esterne, l'edificio dovrebbe adattare il suo involucro analogamente. Ma come?

Se si pensa a un edificio infatti, si pensa naturalmente a qualcosa di statico, longevo, invariabile nel tempo e immobile. Tuttavia, esso si può comunque dotare di alcuni elementi di involucro che, seppur spesso in modo non visibile, mutano le loro caratteristiche fisiche, termiche o chimiche per adattarsi alle condizioni climatiche e dare il maggior comfort possibile all'ambiente interno. Per riprendere il paragone con le attività umane: è come se l'uomo potesse sempre indossare gli stessi indumenti perché essi sono intrinsecamente capaci di adattarsi alle variazioni esterne per mantenere pressoché costante la temperatura corporea.

Gli elementi di involucro edilizio che possono conferire queste caratteristiche all'edificio sono l'oggetto principale di questa tesi e saranno definiti come "elementi responsivi d'involucro".

Si tratta dell'applicazione di diverse tecnologie più o meno recenti applicate ai componenti edilizi in modo da conferire all'intero sistema edificio delle caratteristiche dinamiche. Tale dinamicità permette all'edificio di adattarsi a ciò che succede al suo esterno con una relazione di causa – effetto. Gli elementi responsivi infatti, sollecitati dalle condizioni esterne (causa) innescano i meccanismi di risposta unici per ognuno di essi e quindi cambiano le loro proprietà con delle conseguenze sulla prestazione energetica dell'intero sistema edificio (effetto).

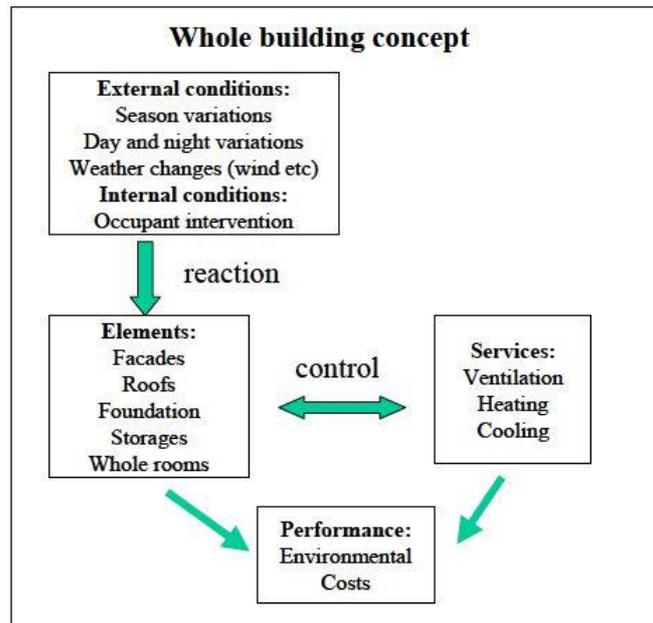


Fig. 2: Schema concettuale di un edificio con elementi responsivi. Fonte: I. Andresen et al., *State of the art review*, in *Integrating environmentally responsive elements in buildings (Annex 44)*, vol. 2B, IEA-ECBCS, Aalborg University, 2008

Traducendo dall'inglese, nella guida allo stato dell'arte degli elementi responsivi dell'Annex 44 della International Energy Agency [10] si riporta la seguente definizione per gli elementi responsivi d'involucro: "Gli elementi responsivi d'involucro si definiscono come componenti costruttivi che sono usati attivamente per il trasferimento e l'immagazzinamento di calore, luce, acqua e aria. Questo significa che gli elementi costruttivi (come solai, muri, tetti, fondazioni ecc.) sono combinati e integrati logicamente e razionalmente con le funzionalità dell'edificio come riscaldamento, raffrescamento, ventilazione e illuminazione. Lo sviluppo, l'applicazione e l'implementazione degli elementi responsivi sono considerate azioni necessarie per un ulteriore miglioramento dell'efficienza energetica nel parco edilizio."

Gli elementi responsivi possono essere applicati all'involucro in diverse modalità, quantità e posizioni a seconda della funzione che devono svolgere. Si possono tuttavia individuare delle caratteristiche comuni a tutti che sono considerabili come i requisiti che i componenti edilizi devono avere per essere considerati responsivi [11]:

- Adattabilità. È il primo e più importante requisito, poiché “rispondere” alle sollecitazioni climatiche, in termini di interazione edificio – esterno, significa che il componente edilizio è in grado di adattarsi al clima esterno.
- Dinamicità. Similmente all’adattabilità, indica che l’elemento edilizio deve avere delle proprietà dinamiche intrinseche che gli permettono di variare nel tempo.
- Capacità di svolgere diverse funzioni. Gli elementi responsivi infatti tendenzialmente svolgono più di una funzione, dal momento che sono pensati per adattarsi alle diverse condizioni climatiche. La funzione che svolgono durante il periodo di riscaldamento per esempio, sarà diversa da quella che svolgono durante il periodo di raffrescamento.
- Collaborazione con il sistema di controllo. Per l’ottimale funzionamento degli elementi responsivi, è molto importante che essi siano collegati ad un sistema di controllo intelligente, con una programmazione adatta all’uso dell’edificio.

3.2

Classificazione

Dal momento che la definizione di elementi responsivi non è univoca e delinea un concetto abbastanza generale, sono molti quelli che possono essere considerati tali e, conseguentemente, le classificazioni di questi elementi sono diverse e si basano su criteri differenti.

Nell'ambito di questa tesi sono approfonditi quelli che rappresentano i più importanti e promettenti elementi responsivi sviluppati ad oggi, ovvero:

- Le facciate attive, e più in particolare, la doppia pelle vetrata
- I *Phase Change Materials* (PCMs)
- Il solaio ventilato e, in generale, le tecnologie per l'attivazione dinamica dell'inerzia termica dei componenti edilizi

Si tratta di tre tecnologie sviluppate in tempi recenti, che traducono altrettanti principi di funzionamento delle possibili interazioni tra edificio e ambiente esterno.

Tra le possibili classificazioni esistenti di questi componenti d'involucro, quella più adatta in questo ambito è quella presentata da P. Heiselberg [8] che raggruppa gli elementi responsivi sulla base della loro funzione nell'interazione edificio – ambiente esterno.

Secondo questo criterio, la classificazione divide gli elementi responsivi in base alla loro relazione con: flussi di calore, immagazzinamento di energia, trasparenza e ventilazione. Vi sono dunque quattro gruppi di elementi responsivi:

- Elementi responsivi legati ai flussi di calore: Si tratta di elementi d'involucro sia opachi che trasparenti che hanno proprietà di isolamento termico variabili e dunque gestiscono gli scambi di calore tra indoor e outdoor. Essi sono in grado di ridurre i fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento o di controllare i flussi di calore da apporti esterni, variando le loro proprietà isolanti. Un esempio di questo tipo di componenti d'involucro è costituito dalle facciate a doppia pelle vetrata e dall'isolamento dinamico.
- Elementi responsivi legati all'immagazzinamento di energia: Sono componenti d'involucro tendenzialmente opachi che hanno proprietà tali per cui il calore che assorbono viene immagazzinato per periodi di tempo più o meno lunghi e rilasciato successivamente. Si prestano ad una vasta gamma di usi e generalmente sono impiegati

per assorbire il calore di giorno in estate, trattenerlo, e rilasciarlo nelle ore più fresche della notte. Questi elementi rappresentano l'evoluzione della classica proprietà di inerzia termica dei muri di spessori importanti. Alcuni esempi: i *Phase Change Materials* (PCMs) e i sistemi di preriscaldamento via dotti interrati.

- Elementi responsivi legati alla trasparenza: Sono componenti d'involucro trasparenti in grado di variare il loro grado di visibilità, trasparenza e permeabilità alla radiazione solare. Alcuni esempi sono costituiti dalle doppie pelli vetrate, dai vetri elettrocromici e dai vetri prismatici.

- Elementi responsivi legati alla ventilazione: Si tratta di quegli elementi che coinvolgono l'uso della ventilazione sia meccanica che naturale. Alcuni di questi elementi creano le condizioni per creare un flusso di ventilazione, altri gestiscono la ventilazione in modo da regolarne l'ingresso in ambiente o la sfruttano per altri fini. Alcuni esempi sono le doppie pelli vetrate, le solette ventilate e i dotti interrati.

In Fig. 3 si riporta uno schema rappresentativo dei principali elementi responsivi che sono rappresentati incrociando diverse classificazioni e informazioni verticalmente ed orizzontalmente [8].

RBE		Responsive Action					
		Intervention		Physical behaviour			
Building system	Element	Surface	Internal	Heat flux	Thermal storage	Transparency	Permeability
Envelope	Wall						
	Roof						
	Ceiling						
	Fenestration						
Super structure	Column/beam						
	Load bearing wall						
	Load bearing floor						
Sub structure	Piles						
	Foundation beams						
Underground structure	Earth to air heat exchangers						
Renders and finishes	Partition wall						
	Floor						
	Ceiling						

Fig. 3: Categorie e funzioni di alcuni elementi responsivi. Fonte: P. Heiselberg, *Expert guide: Part 1. Responsive building concepts*, in *Integrating environmentally responsive elements in buildings (Annex 44)*, IEA-ECBCS, Aalborg University, Novembre 2009

Nelle prime due colonne a sinistra vengono classificati gli elementi responsivi per appartenenza al sistema costruttivo e poi al singolo elemento costruttivo, nelle altre colonne sono invece divisi per tipologia di funzionamento (superficiale o interno) e per le 4 classi sopra nominate: flussi di calore, immagazzinamento di energia, trasparenza e ventilazione.

Da questo schema risulta subito chiaro anche ad una prima occhiata che la maggior parte degli elementi responsivi qui presentati si riferisca al sistema di involucro, questo perché esso, in quanto frontiera che delimita interno ed esterno, è proprio ciò che più si presta all'inserimento degli elementi responsivi. Non è tuttavia escluso che molti altri elementi trovino, come rappresentato anche nello schema, un utile inserimento nei sistemi strutturali, sub-strutturali, nei sistemi delle fondazioni o anche quelli delle finiture.

I tre elementi responsivi che sono oggetto del focus di questa tesi sono presentati in modo dettagliato nei capitoli successivi.

3.3

Le facciate attive

Facciata attiva è un termine che generalmente abbraccia un ampio numero di significati ed interpretazioni ma in questo caso mira a rappresentare il concetto di una facciata architettonica dinamica, tendenzialmente trasparente, che, in linea con la definizione di elemento responsivo quale essa è, risponde alle sollecitazioni esterne al fine di garantire il massimo comfort interno.

Lo scopo di una facciata del genere è quello di procurare le classiche funzioni di confine tra interno ed esterno, sicurezza e privacy tipiche di una facciata e in più minimizzare i consumi energetici.

Questo concetto di facciata è declinato in tantissime varianti i cui funzionamenti possono differire tra loro da poco a tanto. Una delle tipologie maggiormente applicate agli edifici, nonché la tipologia scelta per l'approfondimento di questa tesi, è la doppia pelle vetrata.

Con questo termine si indica un sistema di facciata con due frontiere vetrate poste ad una distanza che varia generalmente tra i 10 e i 100 cm. Esse formano dunque un'intercapedine d'aria che generalmente viene messa in movimento da un sistema di ventilazione meccanica o naturale al fine di ridurre i carichi termici da apporti solari che entrano nell'ambiente interno in estate. A questo scopo inoltre, la doppia pelle viene solitamente anche fornita di una schermatura solare posta all'esterno oppure, più spesso, all'interno dell'intercapedine, dove rimane protetta dagli agenti esterni.

Gli obiettivi principali di questo sistema sono portare luce naturale in ambiente, sfruttare lo spazio interno ai due strati vetrate per diminuire i carichi termici in ambiente in estate e per creare un cuscinetto termico in inverno e ricambiare l'aria esausta interna portandola all'esterno.

Per progettare una doppia pelle vetrata, gli elementi più importanti a cui fare sempre attenzione sono: l'orientamento della doppia pelle, il tipo di vetro (che può essere uguale per entrambi gli strati oppure diverso), la distanza tra i due strati e quindi la dimensione dell'intercapedine affinché favorisca l'effetto di risalita dell'aria ma allo stesso tempo non trattenga il calore, la posizione e il materiale della schermatura, la posizione delle fessure per l'ingresso dell'aria e la ventilazione.

In generale, svolgendo una ricerca su questo tipo di sistemi di facciata, si intuisce che la fascia climatica più adatta al loro uso è quello dei climi moderati, in cui i carichi termici estivi non sono troppo alti da non riuscire ad essere ridotti con la ventilazione e quelli

invernali sono tali da non causare problemi di condensa o di freddo superficiale sulla la facciata.

Vi sono diverse configurazioni possibili per progettare e costruire una doppia pelle vetrata, che variano in base a molti criteri, tra cui: il tipo di costruzione, il tipo di struttura, la ventilazione, la posizione della schermatura, la posizione delle vetrate ecc.

Classificare le tipologie di doppia pelle vetrata non è dunque un procedimento univoco, ma esistono diverse classificazioni e diversi criteri per farlo.

In questa tesi si riportano tre classificazioni che rappresentano in modo adeguato gli aspetti salienti delle facciate a doppia pelle, pubblicate nell'Annex 44 dell'International Energy agency [12]. La prima classifica questo tipo di facciate in base al percorso del flusso dell'aria di ventilazione, la seconda le classifica in base al tipo di ventilazione e la terza in base alla composizione e al funzionamento della facciata.

Classificazione delle doppie pelli vetrate in base al percorso dell'aria [12]:

- Sistema a fuoriuscita di aria esausta (*Exhaust air*, EA): La frontiera interna è dotata di una bocchetta di fuoriuscita dell'aria alla base dell'edificio (o di ogni piano) e quella esterna ha invece una bocchetta in alto. Lo scopo del sistema è far uscire l'aria esausta dell'ambiente interno e farla passare nella cavità fino a portarla all'esterno.

- Sistema per l'apporto di aria esterna (*Supply air*, SA): Questo sistema funziona al contrario del primo. Il vetro esterno ha una bocchetta in basso per l'ingresso di aria esterna, quest'aria poi, scaldandosi, sale fino ad entrare nell'ambiente interno, attraverso la bocchetta posta in cima al vetro interno.

- Sistema a flusso d'aria reversibile (*Reversible air flow*, RAF): In questa soluzione si alternano i due funzionamenti precedentemente descritti in base alle condizioni esterne.

- Sistema a cortina d'aria esterno (*Outdoor air curtain*, OAC): Il vetro esterno è l'unico ad essere dotato di bocchette. In particolare, una alla base della facciata per l'ingresso di aria esterna ed una in cima per l'uscita dell'aria. Il funzionamento di questo sistema mira al "lavaggio" continuo dell'aria in intercapedine per raffreddare il vetro interno.

- Sistema a cortina d'aria interno (*Indoor air curtain*, IAC): Funzionamento contrario rispetto al precedente. L'aria dell'ambiente interno esce dalla base dell'edificio, passa

nell'intercapedine e torna in ambiente riscaldato, attraverso una bocchetta in alto. [10], [12].

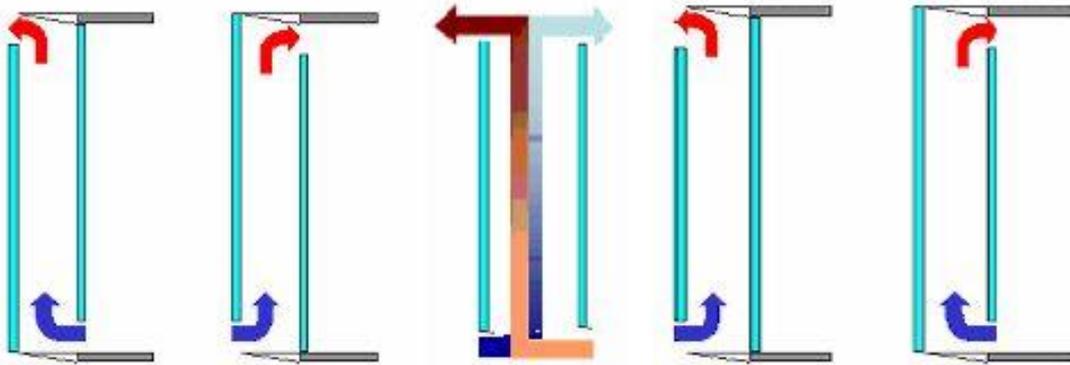


Fig. 4: Le tipologie di doppia pelle in base al percorso dell'aria. Fonte: M. Perino et al., *State of the art review*, in *Integrating environmentally responsive elements in buildings (Annex 44)*, vol. 2A, IEA-ECBCS, Aalborg University, 2008

Classificazione delle doppie pelli secondo il tipo di ventilazione [12]:

A seconda dei casi, la ventilazione nell'intercapedine di una doppia pelle può essere naturale (sfruttando quindi il naturale effetto camino di un'intercapedine stretta e alta e il vento esterno), meccanica (ovvero ottenuta grazie a un impianto meccanico di ventilazione) o ibrida, che vuol dire che si sfrutta la ventilazione naturale quando possibile e si innesca quella meccanica quando necessario.

Classificazione secondo la configurazione della facciata [12]:

- Facciata climatica (*Climate wall, CW*): Consiste in uno strato di doppio vetro esterno e uno interno con vetro singolo, tra cui c'è una cavità ventilata (solitamente in modo meccanico).

- Facciata con buffer (*Buffer window, Bf*): la frontiera interna può essere completamente o parzialmente vetrata, mentre quella esterna è vetrata ed è poco distante da quella interna. Si crea in questo modo un piccolo spazio buffer tra le due frontiere con aria tendenzialmente ferma che serve da cuscinetto termico.

- Facciata con finestre a box (*Box window*, BW): lo strato vetrato esterno è composto da singoli elementi, detti appunto “box”, ognuno dotato di bocchette alla base alla sommità. Nel caso di una facciata con finestre puntuali, la doppia pelle a box window si adatta perfettamente perché i box verranno posti esattamente nelle stesse posizioni delle finestre.

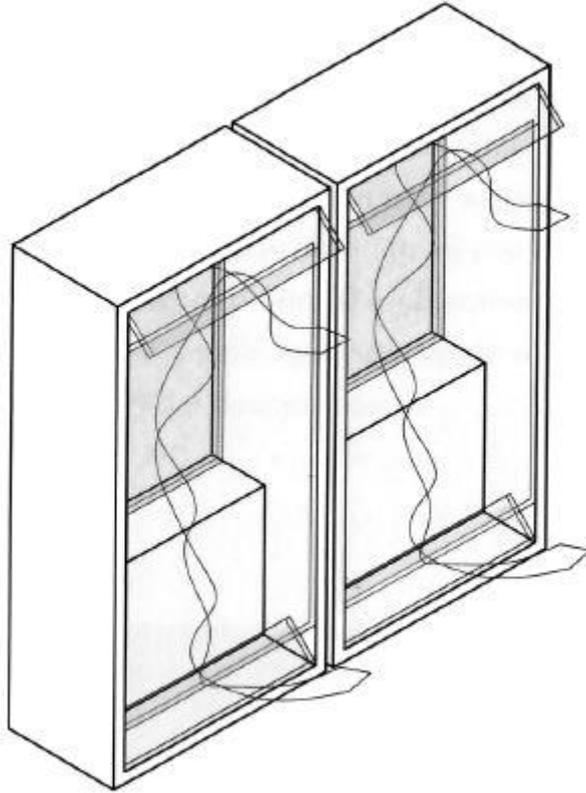


Fig. 5: Illustrazione del Box Window. Fonte: A. Mazzotta, *Spazi Buffer: tassonomia e principi 2*, Dispense della lezione 11 del corso *Principi di progettazione tecnologico-ambientale, Il paesaggio costruito tra tecnica e immagine oggi*, 18 Maggio 2016

- Facciata multipiano (*Multi-storey, MS*): La facciata vetrata si estende dalla base alla sommità dell'edificio senza interruzioni.

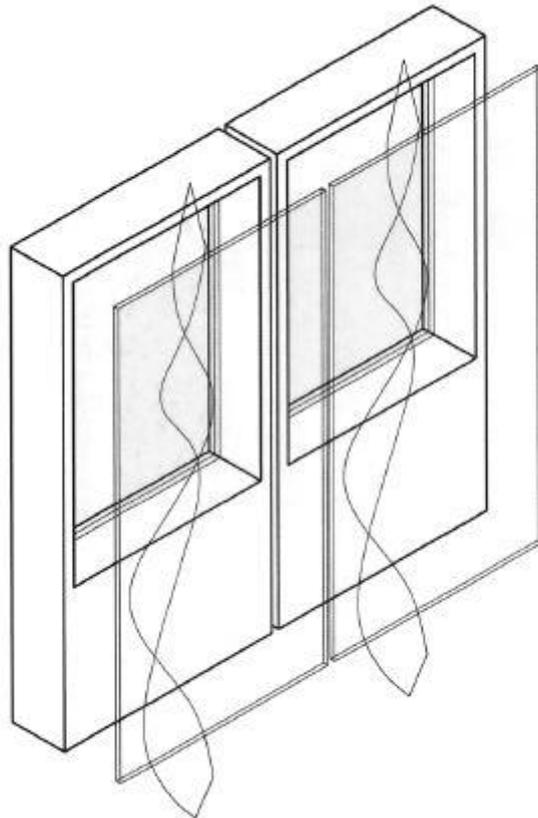


Fig. 6: Illustrazione della facciata multipiano. Fonte: A. Mazzotta, *Spazi Buffer: tassonomia e principi 2*, Dispense della lezione 11 del corso *Principi di progettazione tecnologico-ambientale, Il paesaggio costruito tra tecnica e immagine oggi*, 18 Maggio 2016

- Facciata con finestre a *Shaft Box* (*Shaft box*, SB): Si tratta della combinazione ibrida tra moduli a Box window e moduli a facciata multipiano continua. Il funzionamento prevede che l'aria passi, attraverso delle aperture, dai box alla facciata multipiano, che per effetto camino funge da sfiatatoio dell'aria esausta proveniente dai box.

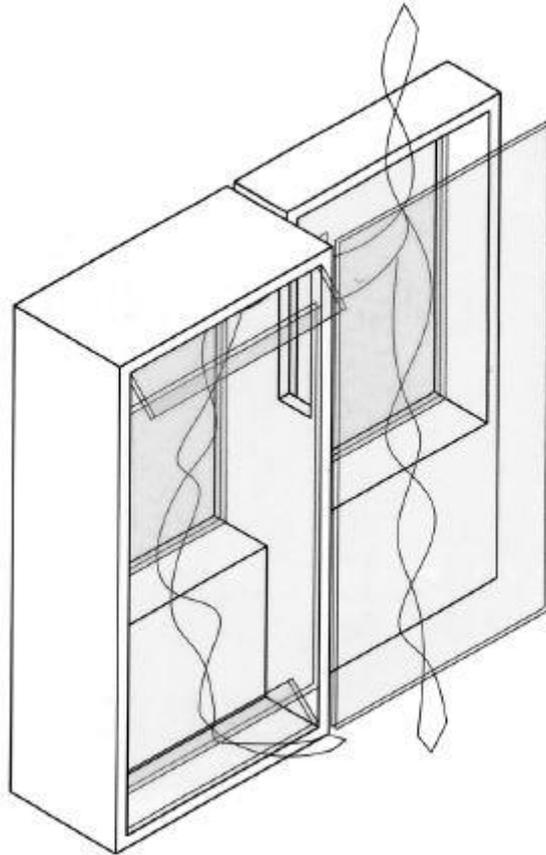


Fig. 7: Illustrazione della facciata Shaft box. Fonte: A. Mazzotta, *Spazi Buffer: tassonomia e principi 2*, Dispense della lezione 11 del corso *Principi di progettazione tecnologico-ambientale, Il paesaggio costruito tra tecnica e immagine*, 18 Maggio 2016

- Facciata a corridoio (*Corridor, C*): La frontiera vetrata esterna è divisa orizzontalmente ad ogni piano. I flussi di aria di ventilazione in questo modo tenderanno a muoversi sia in verticale che in orizzontale.

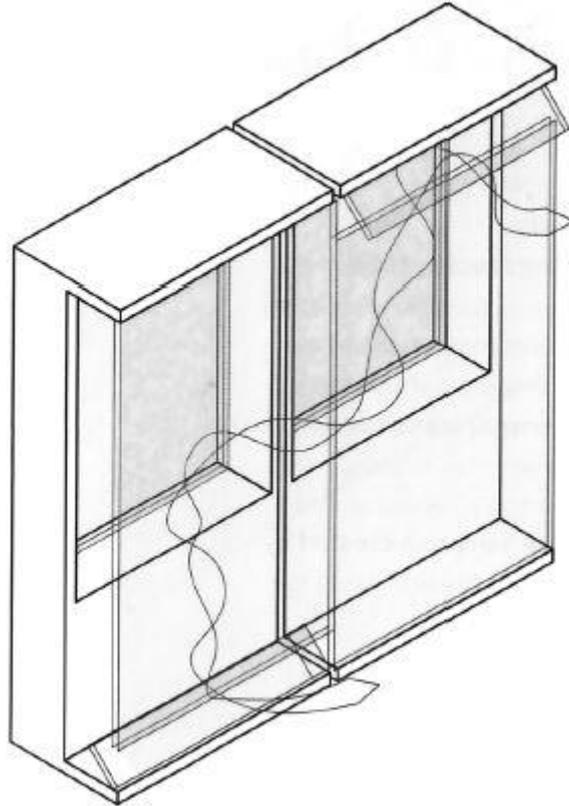


Fig. 8: Illustrazione della facciata a corridoio. Fonte: A. Mazzotta, *Spazi Buffer: tassonomia e principi 2*, Dispense della lezione 11 del corso *Principi di progettazione tecnologico-ambientale, Il paesaggio costruito tra tecnica e immagine oggi*, 18 Maggio 2016

Il principale vantaggio di una doppia pelle vetrata, se ben progettata, nonché l'obiettivo fondamentale per cui si applica, è sicuramente quello climatico. Essa può conferire all'edificio la capacità di ridurre le dispersioni di calore in inverno e gli apporti solari in estate consentendo il sottodimensionamento degli impianti e, conseguentemente, un risparmio sul costo degli impianti e dei consumi. Un altro vantaggio è l'entrata in ambiente di una maggiore quantità di luce naturale, grazie all'alta percentuale di superficie vetrata, che permette un maggiore comfort visivo per l'utenza e un risparmio energetico sul consumo elettrico per l'illuminazione artificiale. L'aspetto estetico esteriore dell'edificio inoltre può essere maggiormente gradevole con la presenza di ampie superfici vetrate. In ultimo, altri vantaggi possono essere: lo sfruttamento della ventilazione naturale, l'isolamento acustico e la temperatura superficiale non distante da quella dell'ambiente interno.

Invece tra gli svantaggi che può comprendere il sistema della facciata a doppia pelle, due in particolare costituiscono un problema che ancora oggi è oggetto della ricerca di una soluzione. Il primo riguarda la sicurezza antincendio: la presenza di una cavità areata tra i due vetri costituisce un passaggio preferenziale per i fumi dell'incendio, costituendo dunque un pericolo. Il secondo riguarda i costi: costruire due strati vetrate con la relativa struttura portante ha innegabilmente un costo elevato e anche la manutenzione e la pulizia costituiscono un prezzo non trascurabile. A questo proposito tuttavia è interessante fare la seguente riflessione: se è vero che i costi di costruzione e manutenzione sono elevati, è però anche vero che ci sono diversi aspetti per cui la presenza della doppia pelle può portare a un risparmio notevole. Ad esempio, se la doppia pelle lavora bene, gli impianti di riscaldamento e raffrescamento possono innanzitutto essere sottodimensionati e in più c'è un risparmio energetico sia in stagione invernale che estiva, grazie al contributo passivo della doppia pelle. Un altro fattore importante è che l'abbondante luce naturale che entra permette di risparmiare sulla luce artificiale e, con buona probabilità, influenza anche positivamente sulla produttività dell'utenza, se si parla di un edificio ad uso ufficio. È naturalmente difficile pesare tutti questi elementi per capire se alla fine dei conti la doppia pelle sia vantaggiosa o meno, perché molti di essi sono difficilmente quantificabili.

Altri svantaggi sono: la diffusione del rumore da un piano all'altro (nel caso di alcune configurazioni) e il rischio, in caso di doppie pelli vetrate mal progettate, che gli apporti solari estivi siano troppo alti e dunque l'impianto di raffrescamento debba essere sovradimensionato.

Per riassumere i vantaggi e gli svantaggi sopra descritti e presentare anche possibili potenzialità e rischi, si riporta di seguito un'analisi S.W.O.T. frutto dell'analisi di A. Van Der Aa, P. Heiselberg, M. Perino [1].

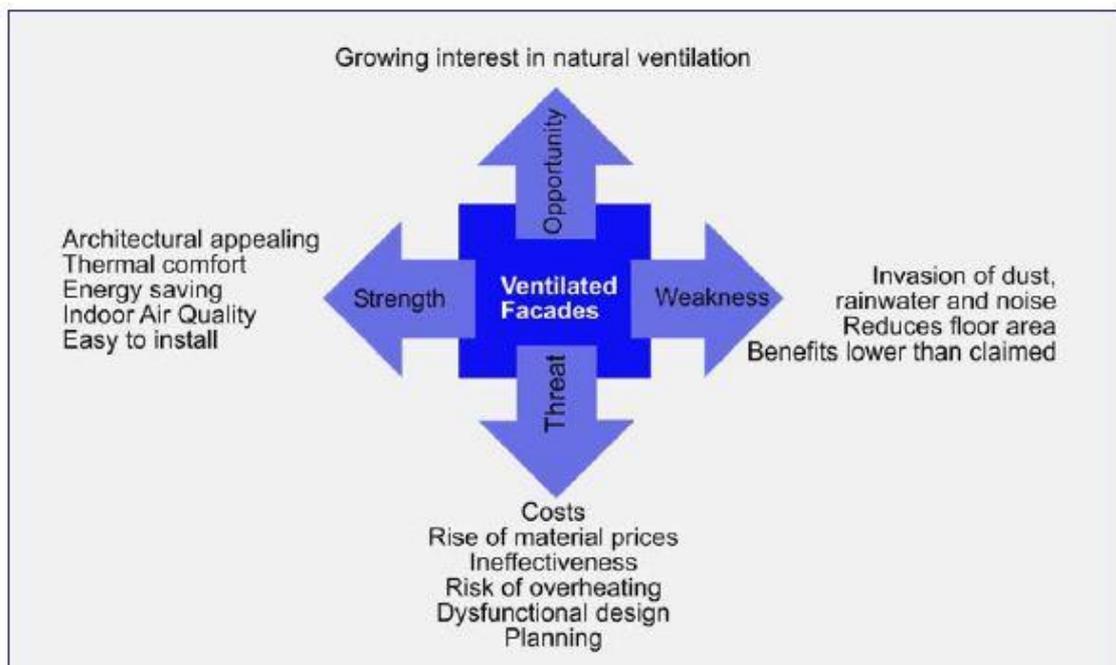


Fig. 9: SWOT della doppia pelle vetrata. Fonte: A. Van Der Aa, P. Heiselberg, M. Perino, *Designing with responsive building elements*, in *Integrating environmentally responsive elements in buildings (Annex 44)*, IEA-ECBCS, Aalborg University, Giugno 2011

3.4

I Phase Change Materials

I Phase Change Materials, abbreviati PCM, sono dei materiali che, raggiunta la loro temperatura di fusione, sono in grado di cambiare fase, solitamente passando da solido a liquido e viceversa, mantenendo la loro temperatura costante, pari quella di fusione (anche detta “temperatura di cambiamento di fase”). I PCM più usati solitamente fondono a una temperatura tra il 20 e i 36 °C. Durante il passaggio da solido a liquido essi immagazzinano una grande quantità di energia termica e durante quello da liquido a solido la rilasciano, attraverso il loro calore latente di fusione.

I PCM sono dunque considerabili dei veri e propri magazzini di calore latente, che usano i loro legami chimici per assorbire e rilasciare calore, senza bisogno di dispendio di energia, in quanto queste trasformazioni avvengono grazie al variare della temperatura. Questa importantissima proprietà li rende dei materiali unici e molto importanti nel settore dell’edilizia, in quanto sono dotati di grande inerzia termica che può essere sfruttata in vari modi per ridurre in modo assolutamente passivo i fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento degli edifici.

A parità di volume infatti, i PCM hanno un’inerzia termica perfino maggiore dei materiali solitamente usati in edilizia per questa caratteristica, come la pietra, i mattoni, il legno, il calcestruzzo ecc.

In linea con le caratteristiche che definiscono gli elementi responsivi dunque, i PCM sono dotati di dinamicità e adattabilità, in quanto in base alle escursioni termiche esterne, variano le proprie caratteristiche chimiche e fisiche. Grazie a ciò, essi sono in grado di migliorare le condizioni di comfort dell’ambiente interno in modo totalmente passivo.

In Fig. 10 è rappresentato il rapporto tra calore immagazzinato e temperatura di un materiale con calore latente di fusione e in Fig. 11 si riporta il confronto tra le proprietà di inerzia termica dei PCM e quelle di altri materiali.

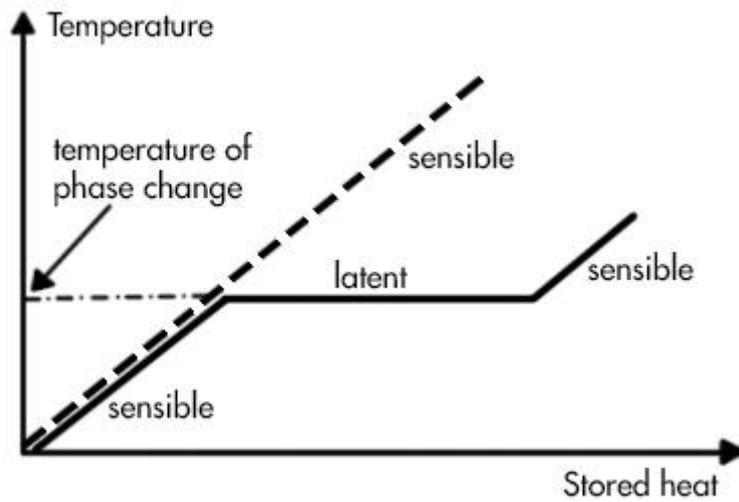


Fig. 10: Grafico del rapporto calore immagazzinato – temperatura. Fonte: L. Cabeza, H. Mehling, *Heat and cold storage with PCM: an up to date introduction into basics and applications*, Berlin, Springer, 2008

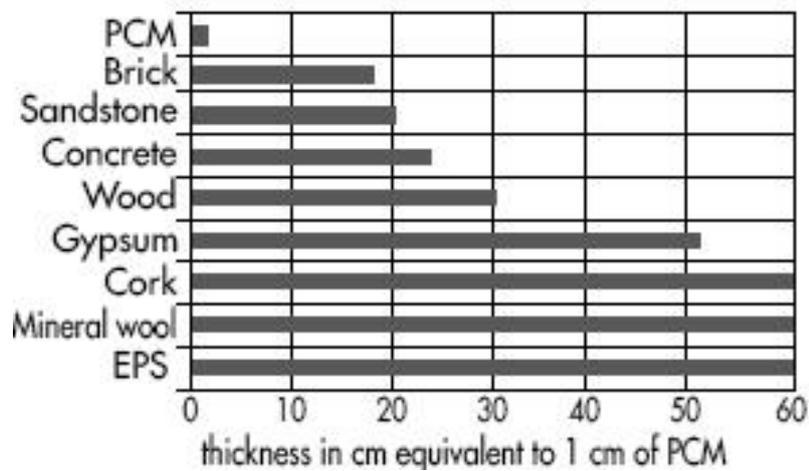


Fig. 11: Confronto della proprietà di inerzia termica tra i PCM e altri materiali. Fonte: L. Cabeza, H. Mehling, *Heat and cold storage with PCM: an up to date introduction into basics and applications*, Berlin, Springer, 2008

Per capire qual è il PCM più prestante, bisogna sceglierlo in base all'uso che se ne vuole fare, ma in generale, per la funzione di magazzino di calore latente tipica dell'uso che se ne fa in edilizia, è auspicabile che il PCM scelto abbia i tre seguenti requisiti [15]:

- un'alta densità
- un alto calore latente di fusione
- un alto calore specifico

Più in particolare, perché un PCM possa essere usato in modo ottimale nel complesso sistema dell'edificio, vi sono delle specifiche caratteristiche termo-fisiche, cinetiche, chimiche ed economiche che i PCM dovrebbero avere. Si riportano di seguito tali caratteristiche prese dalle pubblicazioni in inglese di A. Van Der Aa, P. Heiselberg, M. Perino [1] e D. Zhou, C.Y. Zhao, Y. Tian [16]:

Caratteristiche termo-fisiche:

- Temperatura di fusione compresa all'interno del range di temperatura operante desiderato
- Alto calore latente di fusione per unità di volume
- Alto calore specifico
- Alta conducibilità sia nella fase liquida che in quella solida
- Minima variazione di volume nel cambiamento di fase
- Fusione omogenea di tutto il PCM durante il cambiamento di fase

Caratteristiche cinetiche:

- Alta capacità di nucleazione
- Alta capacità di sviluppo dei cristalli

Caratteristiche chimiche:

- Cambiamento di fase completamente reversibile (da liquido a solido e viceversa)
- Assenza di degrado dovuto ai frequenti cicli di fusione e solidificazione
- Assenza di corrosione nei confronti dei materiali circostanti i PCM
- Assenza di caratteristiche di infiammabilità, tossicità e esplosività

Caratteristiche economiche:

- Disponibilità su larga scala
- Costo effettivo contenuto

Ad oggi vi sono diversi PCM adatti all'uso commerciale nel settore edilizio che hanno temperatura di fusione nel range richiesto tra i 20 e i 36 °C circa. Essi, nella classificazione più comunemente accettata e pubblicata, tra gli altri, in [12], si dividono in organici e inorganici e poi ulteriormente in composti ed eutettici.

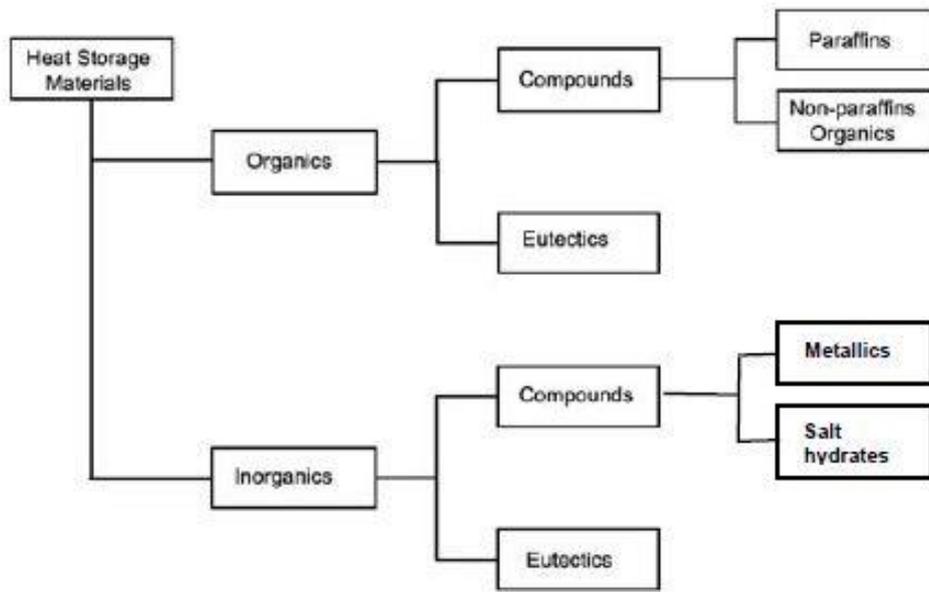


Fig. 12: Classificazione dei PCM. Fonte: Ø. Aschehoug, I. Andresen, *State of the art review*, in *Integrating environmentally responsive elements in buildings (Annex 44)*, vol. 1, IEA-ECBCS, Aalborg University, 2008

- I PCM organici: Si dividono in composti ed eutettici e tra i composti, i PCM di maggior rilievo sono paraffine o composti organici non-paraffine. Essendo la paraffina pura un idrocarburo ricavato dal petrolio molto costoso, viene spesso miscelato ad altri idrocarburi meno costosi per ottenere un prezzo commercialmente sostenibile, spesso anche più basso dei composti organici non-paraffine.

Tra questi ultimi, i più diffusi sono gli esteri, i glicoli e poi gli acidi grassi, che sono composti di origine naturale (vegetale o animale) la cui estrazione richiede un processo complesso, per questo sono molto costosi.

Vi sono molti vantaggi nei PCM organici che li rendono adatti all'uso come magazzini di calore latente: sono generalmente stabili come struttura chimica, fondono in modo omogeneo, hanno un alto calore latente di fusione e non sono tendenzialmente affetti dai tipici problemi di degrado che affliggono questi materiali come il *supercooling*.

Gli svantaggi invece comprendono: bassa densità e conducibilità (che potrebbe rendere i processi di assorbimento e rilascio del calore più lenti), infiammabilità, incompatibilità con i contenitori di plastica, variazioni di volume e in genere prezzi più alti dei PCM inorganici.

Compound	Melting point [°C]	Latent heat of fusion [kJ/kg]
Butyl stearate	19	140
Paraffin C16-C18	20-22	152
Capric-Lauric acid	21	143
Dimethyl sebacate	21	120
Polyglycol E 600	22	127.2
Paraffin C13-C24	22-24	189
(34% Myristic acid+66% Capric acid)	24	147.7
1-Dodecanol	26	200
Paraffin C18 (45-55%)	28	244
Vinyl stearate	27-29	122
Capric acid	32	152.7

Fig. 13: Esempi di paraffine con valori di temperatura di fusione e calore latente di fusione. Fonte: M. Perino et al., *Expert guide: Part 2. Responsive building elements*, in *Integrating environmentally responsive elements in buildings (Annex 44)*, IEA-ECBCS, Aalborg University, Novembre 2009

Compound	Melting point [°C]	Latent heat of fusion [kJ/kg]
KF · 4H ₂ O	18.5	231
Mn(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O	25.8	125.9
CaCl ₂ · 6H ₂ O	29	190.8
LiNO ₃ · 3H ₂ O	30	296
Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O	32	251

Fig. 14: Esempi di composti organici non paraffine con valori di temperatura di fusione e calore latente di fusione. Fonte: M. Perino et al., *Expert guide: Part 2. Responsive building elements*, in *Integrating environmentally responsive elements in buildings (Annex 44)*, IEA-ECBCS, Aalborg University, Novembre 2009

- i PCM inorganici: In generale, questo tipo di PCM è dotato di alti valori di calore latente di fusione per unità di volume e conducibilità. Inoltre, è la tipologia più economica di PCM, la meno infiammabile e quella maggiormente disponibile. Anch'essi si dividono in composti ed eutettici e le sostanze più usate sono i Sali idrati e, in piccola parte, i metalli, che però non sono adatti all'uso nel campo dell'edilizia. I Sali idrati presentano i vantaggi

sopra descritti comuni ai PCM inorganici in generale, ma hanno anche degli svantaggi, tra cui: proprietà corrosive e variazione di volume nel cambio di fase. Il più grande problema che caratterizza i Sali idrati tuttavia, è l'alta soggezione al degrado, che li colpisce dopo un certo numero di cicli di fusione e solidificazione. Questo degrado si traduce nei fenomeni di *supercooling* e separazione di fase.

Nonostante questi svantaggi, i Sali idrati rimangono, insieme alle paraffine, i PCM attualmente più usati in edilizia come magazzini di calore latente.

Compound	Melting point [°C]	Heat of fusion [kJ/kg]
KF · 4H ₂ O	18.5	231
Mn(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O	25.8	125.9
CaCl ₂ · 6H ₂ O	29	190.8
LiNO ₃ · 3H ₂ O	30	296
Na ₂ SO ₄ · 10H ₂ O	32	251

Fig. 15: Esempi di composti inorganici con valori di temperatura di fusione e calore latente di fusione. Fonte: M. Perino et al., *State of the art review*, in *Integrating environmentally responsive elements in buildings (Annex 44)*, vol. 2A, IEA-ECBCS, Aalborg University, 2008

In Fig. 16 è rappresentato uno schema che mette a confronto i diversi tipi di PCM in relazione alla temperatura di fusione e all'entalpia del cambiamento di fase. Questo permette di confermare che i PCM più adatti alla funzione di magazzini di calore latente negli edifici sono i Sali idrati, le paraffine, gli acidi grassi e gli eutettici, in quanto sono quelli con la temperatura di fusione più vicina al range di 20 – 36 °C.

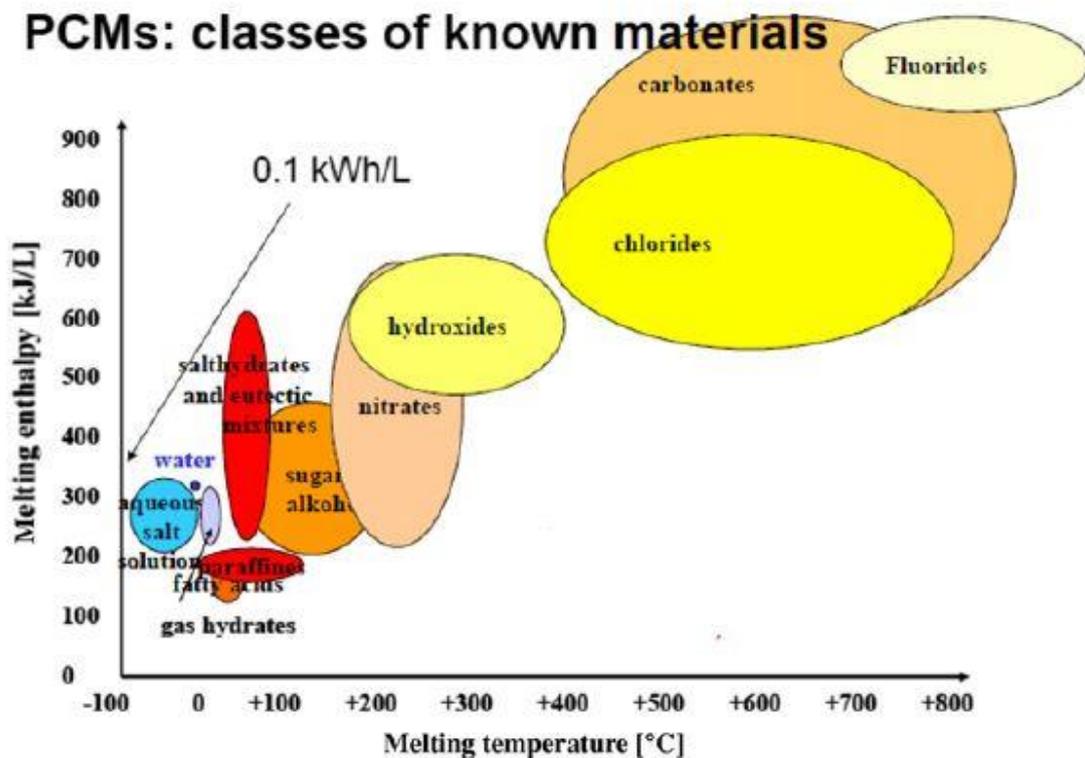


Fig.16: Rappresentazione dei PCM in base alla temperatura di fusione e all'entalpia del cambiamento di fase. Fonte: D. Zhou, C.Y. Zhao, Y. Tian, *Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications*, in *Applied Energy*, n.° 92, Elsevier, 2012, pg. 593-605

I potenziali limiti che affliggono maggiormente questo tipo di materiali sono rappresentati da problemi di tipo fisico-chimico che compaiono con il tempo, con l'usura e lo sfruttamento scorretto dei PCM. Questi problemi sono la segregazione e la separazione di fase e il *supercooling* [15].

La segregazione di fase consiste nella fusione/solidificazione disomogenea dei componenti di un PCM dovuta al loro scorretto bilanciamento all'interno del materiale (per esempio: mancanza di acqua nei sali idrati). Può infatti succedere che, dopo una serie di cicli di cambiamenti di fase, alcuni componenti non riescano più a sciogliersi e formano dei piccoli grani che si depositano sul fondo del contenitore del PCM causando una diminuzione della capacità di accumulo di calore. Il PCM risulta quindi, dopo un po' di tempo, compromesso e non svolge più la sua funzione nelle condizioni ottimali.

La separazione di fase affligge i PCM composti o eutettici che dunque non hanno una composizione completamente omogenea (sostanze pure) ma hanno due o più componenti. Questo fenomeno ha luogo quando una o più delle sostanze componenti, dopo diversi cicli di fusione e solidificazione, si separa dalle altre precipitando e causando una variazione delle proporzioni nel resto della sostanza. Questo causa una differenza di temperatura di fusione tra le varie componenti create e quindi una riduzione della prestazione del PCM.

Il *Supercooling* è la compromissione del PCM per cui il materiale non è più in grado di solidificarsi nonostante il raggiungimento della temperatura di solidificazione, rimanendo dunque liquido. Questo problema si instaura nella prima fase della solidificazione, detta nucleazione, ovvero: nel materiale non si riescono più a formare, o comunque si formano molto più lentamente, quei piccoli nuclei di materiale che da liquidi passano a solidi dando inizio alla solidificazione totale. Questo fenomeno è molto diffuso nei PCM e naturalmente è causa di una forte compromissione del materiale poiché i cicli di cambiamento di fase si rallentano molto e ne segue un minor comfort dell'ambiente interno.

Per tutti questi problemi tuttavia, è possibile ovviare alla totale compromissione dei PCM grazie a delle soluzioni mirate in base al fenomeno che essi causano. Nella maggior parte dei casi, la soluzione è rappresentata da degli additivi specifici che aiutano il materiale a mantenere le sue proprietà iniziali ed ottimali.

Per inserire i PCM nel sistema dell'edificio così che possano effettivamente lavorare come elementi responsivi, occorre incorporarli ad un componente edilizio che può essere una partizione esterna o interna, verticale o orizzontale. Essi vanno dunque posti in un contenitore in modo che non si disperdano nella fase liquida. Vi sono diversi modi e materiali per contenere o incorporare i PCM agli elementi edilizi, i più diffusi sono: micro e macro incapsulamento, incorporazione diretta, immersione in materiali porosi e stabilizzazione di forma.

L'incorporazione diretta è il metodo più facile ed economico: consiste nell'aggiungere il PCM in forma di polvere o di liquido nella pasta di un materiale poroso quale per esempio il cemento, il gesso o la malta, durante il suo processo di lavorazione. Il risultato è un prodotto edilizio in cui il PCM è sparso ed irreversibilmente incorporato. Il rischio che si corre con questo processo d'incorporazione è che le proprietà meccaniche del cemento

siano modificate e che con il tempo il PCM possa causare dei degni al cemento indurito come il dilavamento [15].

L'immersione è un processo altrettanto facile ed economico che prevede che un elemento edilizio fatto di materiale poroso come per esempio un mattone o una lastra di cartongesso venga immerso in un PCM liquido ad alta temperatura. Il PCM si incorpora al materiale immerso attraverso i suoi pori e lì si stabilisce allo stato liquido fino a che il materiale viene tolto e fatto raffreddare. In questa fase il PCM si solidifica rimanendo all'interno del materiale con un aumento di volume nullo o semi nullo [15].

Il macro-incapsulamento consiste nell'incapsulare la polvere di PCM in contenitori di dimensioni relativamente grandi (> 1 cm) che poi possono essere a loro volta inseriti in vari componenti edilizi. Questo processo conferisce il vantaggio di ovviare al problema dell'infiammabilità dei PCM e di incrementare il trasferimento di calore durante il processo di cambiamento di fase [15].

Con il micro-incapsulamento invece si lavora su minuscole dimensioni di PCM allo stato solido o liquido. Piccole particelle (nel caso solido) o gocce (nel caso liquido) di PCM vengono incapsulate da una membrana contenitiva solitamente polimerica per ottenere delle micro-capsule di diametro da 0.05 a 5000 μm [15].

Il processo è costoso e complesso e la bassa conducibilità termica delle membrane polimeriche può costituire uno svantaggio. Tuttavia, vi sono anche numerosi vantaggi, tra cui la protezione del PCM dal diretto contatto con i materiali edilizi, la maggiore sicurezza di maneggiamento, la ridotta infiammabilità e la possibilità di mischiare le micro-capsule con svariati materiali edilizi senza significative variazioni delle loro proprietà [15].

I PCM a stabilizzazione di forma, infine, sono ottenuti mischiando a caldo il PCM liquido ad un materiale di supporto, che può essere per esempio polietilene o polistirene. Il risultato finale, ottenuto dopo il raffreddamento e quindi la solidificazione del composto, è un tutt'uno di PCM e materiale di supporto in cui quest'ultimo, una volta irrigiditosi, conferisce la forma al composto e rimane strutturalmente stabile anche al cambiare di fase del PCM. La componente di PCM può arrivare fino all'80% [15].

L'uso dei PCM nel sistema dell'edificio non è univoco, essi possono essere inseriti in diversi componenti, con diverse modalità e quantità, con fini e obiettivi diversi. Possono

inoltre essere sfruttati passivamente o attivamente: l'uso attivo dei PCM prevede la loro integrazione con l'impianto HVAC, ma nella maggior parte dei casi, essi sono inseriti nelle partizioni verticali o orizzontali che confinano con l'ambiente esterno e sono dunque utilizzati passivamente sfruttando le sollecitazioni del sole o, più in generale, della temperatura. Come già detto infatti, essi sono in grado di adattarsi e attivarsi sulla base delle escursioni termiche esterne, senza l'utilizzo di energia.

In generale comunque, l'utilizzo passivo dei PCM nell'edificio si pone come obiettivi il risparmio energetico ed economico attraverso l'aumento dell'inerzia termica dell'involucro edilizio. Diminuisce di conseguenza il fabbisogno di riscaldamento ma soprattutto di raffrescamento e si favorisce lo sfruttamento di energia nei periodi "*Off-peak*", ovvero nei periodi in cui l'energia costa meno.

Un uso passivo tipico dei PCM nell'edificio con il fine di aumentare il comfort interno nel periodo estivo è quello di inserire questo materiale in una partizione verticale esterna (tendenzialmente un muro opaco) esposto alla radiazione solare. In questo modo è possibile innescare il processo di "caricamento" e "scaricamento" della massa termica costituita dal PCM, ovvero: durante il giorno (periodo "*On peak*", in cui il costo dell'energia è maggiore) il PCM viene colpito dalla radiazione solare incidente che provoca un aumento di temperatura fino a dare inizio alla fusione della sostanza. Questo processo è detto caricamento della massa termica perché il PCM, in questa fase, immagazzina energia termica grazie ad un primo aumento di temperatura sensibile e successivamente grazie al processo di fusione con calore latente. In questo modo il PCM fornisce un duplice contributo al comfort in ambiente interno: da un lato, trattiene il calore dovuto al carico solare invece di trasmetterlo in ambiente, dall'altro, permette di fare un uso minore dell'impianto di condizionamento dell'aria e quindi un risparmio energetico ed economico. Per completare il processo poi, vi è la fase notturna, in cui si innesca il processo di scaricamento della massa termica sfruttando il periodo "*Off-peak*" notturno in cui il prezzo dell'energia è più basso. Con il normale abbassamento delle temperature infatti, il PCM che si era fuso durante il giorno, avvia il processo di solidificazione rilasciando il calore che ha accumulato. Questo processo può essere completamente passivo se la temperatura notturna raggiunge quella di solidificazione del PCM, altrimenti si può aiutare il processo di solidificazione con la ventilazione meccanica.

Il primo vantaggio è che il calore proveniente dalla forte radiazione solare estiva viene rilasciato di notte, in cui le temperature sono più basse, invece che di giorno in cui la

temperatura è già alta. Il secondo vantaggio è che si sfrutta di meno l'energia per il raffrescamento durante il giorno in cui i prezzi sono più alti e si usufruisce invece eventualmente di energia di notte, in cui costa meno, per usare la ventilazione meccanica favorendo il rilascio di calore da parte del PCM.

I PCM inoltre possono essere utili anche nella stagione invernale, in cui i processi di caricamento e scaricamento della massa termica avvengono al contrario rispetto alla stagione estiva, ma comunque con il fine di risparmiare sul consumo energetico ed economico. Il componente con il PCM, che in questo caso è tendenzialmente un solaio di piano interno, si carica di notte facendo funzionare il riscaldamento radiante, il cui calore viene assorbito dai PCM e immagazzinato attraverso la loro fusione. Durante il giorno poi, questo calore viene rilasciato nell'ambiente interno, consentendo un risparmio sul consumo di riscaldamento diurno in cui i prezzi sono più alti.

In generale quindi, i PCM offrono diversi vantaggi che giovano in modo concreto al comfort dell'ambiente interno, portando dei benefici che sono unici dell'uso di questi materiali : permettono di sottodimensionare l'impianto di riscaldamento e raffrescamento, diminuiscono i picchi e le oscillazioni di temperatura in estate e rendono la temperatura dell'ambiente interno più uniforme, poiché minimizzano le differenze tra temperatura superficiale ed interna, eliminando le situazioni di discomfort locale.

Ma quali sono dunque, nello specifico, i componenti edilizi in cui inserire i PCM? e con quali modalità si inseriscono? Anche qui la risposta non può essere univoca. Essendo dei materiali relativamente nuovi, la ricerca è ancora in fase di sviluppo e non vi è una soluzione unica adatta per tutti i casi. Tuttavia, l'applicazione dei PCM è stata con più o meno successo fatta su partizioni sia opache che trasparenti, elementi di schermatura, elementi di finitura come intonaci e malte, pannelli porosi e persino elementi di arredo. Ad ogni modo, la posizione, l'integrazione e il sistema di inserimento di questi materiali dipendono da tanti fattori relativi all'edificio, tra cui per esempio: l'orientamento, la forma, la funzione, il tipo di costruzione, il tipo di impianto ecc.

Si riportano di seguito a titolo esemplificativo alcune soluzioni tra le più assodate di come è possibile abbinare i PCM a uno o più componenti edilizi e il loro funzionamento.

L'integrazione dei PCM al muro perimetrale di un edificio è uno dei modi più diffusi per sfruttare le loro proprietà e mira ad essere il meno invasiva possibile in modo da non portare grandi sconvolgimenti al modo di costruire un muro in cantiere. Il PCM può essere

posto in un contenitore che lo renda un normale pannello da porre all'interno della stratigrafia di un muro, con l'alternativa di porlo verso l'interno o l'esterno in base alle necessità specifiche dell'edificio. Normalmente, rispetto agli altri strati componenti del muro, tale pannello si pone verso l'interno se il fine è quello di ottimizzare la capacità termica dell'ambiente interno poiché i carichi con cui il PCM si relaziona sono quelli interni. Va invece posto verso l'esterno se il compito che deve svolgere è quello di assorbire la radiazione solare diurna per rilasciare calore durante la notte.

In Fig. 17 sono rappresentate diverse soluzioni per inserire lo strato di PCM in un muro e le relative conseguenze sullo scambio dei flussi di calore.

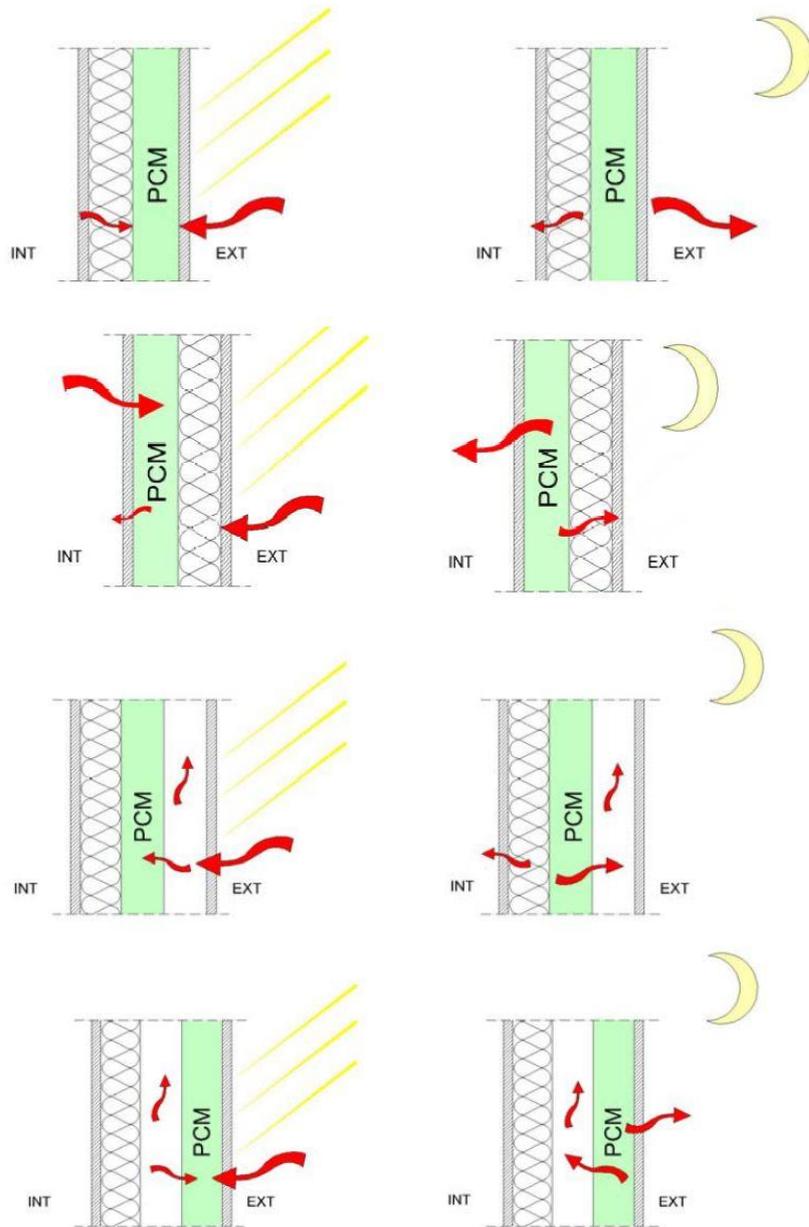


Fig. 17: Possibili posizioni dello strato di PCM nel muro. Fonte: M. Perino et al., *Expert guide: Part 2. Responsive building elements*, in *Integrating environmentally responsive elements in buildings (Annex 44)*, IEA-ECBCS, Aalborg University, Novembre 2009

Vi sono anche altri modi di integrare i PCM ad un muro verticale opaco che, a differenza del primo sopra descritto, prevedono un'integrazione irreversibile con le componenti del muro. Ad esempio, attraverso l'uso di blocchi costruttivi che hanno subito il processo d'immersione diretta nei PCM o in cui questi ultimi vi sono stati inseriti tramite micro/marco incapsulamento. Si possono altrimenti usare pannelli rigidi di cartongesso con PCM a stabilizzazione di forma, oppure ancora intonaci e malte con PCM micro-incapsulati o isolanti con PCM macro-incapsulati.

I PCM possono anche essere integrati in quei componenti dell'edificio che sono ibridi tra trasparente e opaco, ovvero i muri solari, anche detti *Trombe-walls*. In questi sistemi, i PCM solitamente si mischiano con i componenti del muro opaco che viene posto dietro alla camera d'aria e allo strato trasparente.

Queste e altre modalità di applicazione dei *Phase Change Materials* li rendono dunque dei materiali estremamente flessibili, che proprio grazie alla possibilità di integrarli senza invasività ai classici materiali e componenti edilizi, possono essere impiegati sia nelle nuove costruzioni che negli interventi di riqualificazione energetica e persino di restauro.

I PCM si possono integrare anche ai solai interpiano di un edificio, con una funzione naturalmente diversa rispetto a quella che ricoprono nei muri perimetrali. In questo caso essi vanno tendenzialmente posizionati all'interno della stratigrafia del solaio in modo che siano a contatto con il sistema radiante. La funzione che svolgono è, da un lato, quella di ridurre il surriscaldamento dei solai direttamente esposti alla radiazione in estate, dall'altro, in inverno, quella di assorbire calore dall'impianto radiante durante la notte e rilasciarlo di giorno.

Per riassumere i vantaggi e gli svantaggi sopra descritti e presentare anche possibili potenzialità e rischi, si riporta di seguito un'analisi S.W.O.T. frutto dell'analisi di A. Van Der Aa, P. Heiselberg, M. Perino [1].

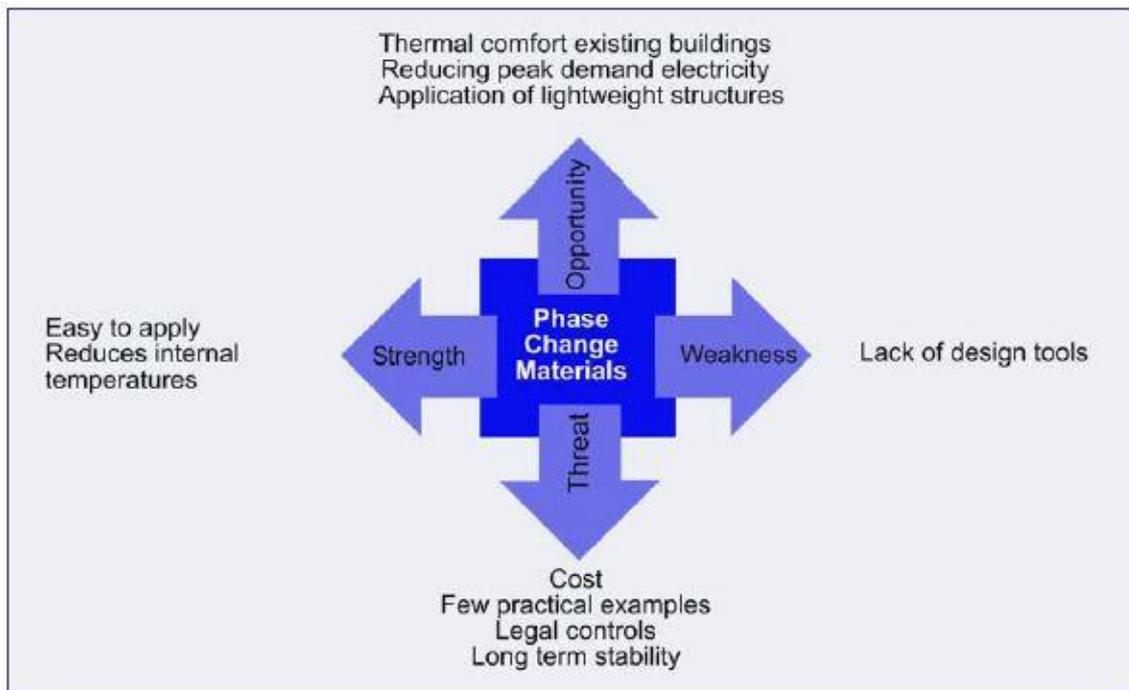


Fig. 18: SWOT dei Phase Change Materials. Fonte: A. Van Der Aa, P. Heiselberg, M. Perino, *Designing with responsive building elements*, in *Integrating environmentally responsive elements in buildings (Annex 44)*, IEA-ECBCS, Aalborg University, Giugno 2011

Tra gli svantaggi che non sono mostrati nell'analisi SWOT, ve ne sono alcuni che è bene sottolineare, perché evidenziano un limite dell'uso dei PCM che è giusto tener presente:

In primis, il funzionamento dei PCM si basa sulle escursioni termiche giornaliere e questo implica che la loro capienza di energia termica massima è limitata al ciclo giornaliero. Sarebbe teoricamente ottimale, se il massimo di energia accumulabile dal PCM fosse maggiore e non limitato dal passare del giorno e della notte. In secondo luogo, affinché avvenga il cambiamento di fase in modo completo sia da solido a liquido sia viceversa, è necessario avere una buona escursione termica dal giorno alla notte e questo implica che molte zone geografiche non sono purtroppo adatte all'uso di questi materiali.

3.5

Il solaio ventilato

Sfruttare la massa termica dell'involucro edilizio a favore dell'ambiente interno, come visto nel caso dei PCM, può essere un grosso vantaggio. Naturalmente, sono molti i modi per farlo, molti dei quali sono ancora oggi oggetto di ricerca e sviluppo e i PCM descritti nel capitolo precedente sono uno dei possibili esempi.

Un altro esempio riportato nell'ambito di questa tesi consiste in un elemento responsivo che rappresenta un ibrido rispetto a tre delle classi precedentemente descritte che raggruppano genericamente questi elementi (cfr. capitolo "Classificazione"): la classe degli elementi responsivi legati ai flussi di calore, quelli legati all'immagazzinamento di energia e quelli legati alla ventilazione.

Si tratta del solaio ventilato che, analogamente ai PCM, ha la funzione di assorbire i carichi termici dell'ambiente interno durante i periodi di picco e rilasciarli dopo un certo periodo di tempo, ma, in più, collabora nella maggior parte dei casi con la ventilazione meccanica, che regola e indirizza il rilascio del calore accumulato.

Se dunque uno dei limiti dei PCM è l'impossibilità di controllare i flussi di calore, per il solaio ventilato, come descritto più avanti nel capitolo, questo limite può essere in qualche modo superato. Al contrario tuttavia, se i PCM non richiedono alcun utilizzo di energia e lavorano in modo completamente passivo, il solaio ventilato, per il funzionamento ottimale necessita dell'energia elettrica per l'innescò della ventilazione meccanica, seppur nei periodi "*Off-peaks*".

Il solaio ventilato è una tecnologia relativamente recente e ancora poco applicata che consiste in un elemento prefabbricato costituente un solaio interpiano, generalmente in calcestruzzo, dotato di fori del diametro da 10 a 20 centimetri che corrono lungo la lunghezza maggiore del solaio formando una serpentina. Questi dotti servono al passaggio di un fluido termovettore che, nel caso del solaio ventilato è aria, ma in molti casi può essere anche acqua, passante in tubi naturalmente più piccoli, di pochi centimetri di diametro. L'obiettivo di questo sistema è mirato prevalentemente al periodo estivo ed è quello di "scaricare" la massa termica del calcestruzzo del solaio facendo scendere la sua temperatura, al fine di smorzare i picchi termici e diminuire il consumo di energia. Come?

Durante il giorno, in un edificio, un normale solaio interpiano riceve e accumula calore dall'ambiente interno, che fa aumentare la sua temperatura rendendolo un elemento che

irraggia calore durante la notte, quando la temperatura interna cala. Il risultato è che la temperatura del solaio non si abbassa mai del tutto e di conseguenza l'ambiente interno è sempre un po' più caldo, giorno dopo giorno, richiedendo maggiori consumi per il raffrescamento diurno.

Con il solaio ventilato, invece, l'accumulo di calore che avviene durante il giorno, viene smorzato durante la notte con l'attivazione della ventilazione meccanica, grazie a cui viene fatta passare dell'aria a temperatura relativamente bassa nei dotti del solaio. In questo modo, la massa termica calda del calcestruzzo cede calore all'aria passante nei dotti a temperatura inferiore, che viene poi portata fuori dall'ambiente, e riesce a raffreddarsi. Ciò permette che l'indomani non sia necessario un maggiore consumo di energia per il raffreddamento dal momento che durante la notte non vi è stato irraggiamento e dunque aumento di temperatura.

Il solaio ventilato, dunque, di solito è prettamente impiegato nel periodo estivo per ridurre i picchi e le fluttuazioni di temperatura e per permettere un sistema di raffreddamento sottodimensionato. In alcuni casi tuttavia, il solaio ventilato può essere impiegato anche nella stagione del riscaldamento, sfruttando il processo inverso rispetto a quello estivo.

In inverno infatti, la ventilazione meccanica viene comunque azionata durante la notte, ma in questo caso l'aria che passa nei dotti è aria riscaldata dall'impianto di riscaldamento. In questo modo, la soletta di calcestruzzo accumula calore che viene poi rilasciato lentamente durante il giorno in ambiente, permettendo un minor consumo di energia per riscaldamento durante le ore "*On-peak*" della giornata.

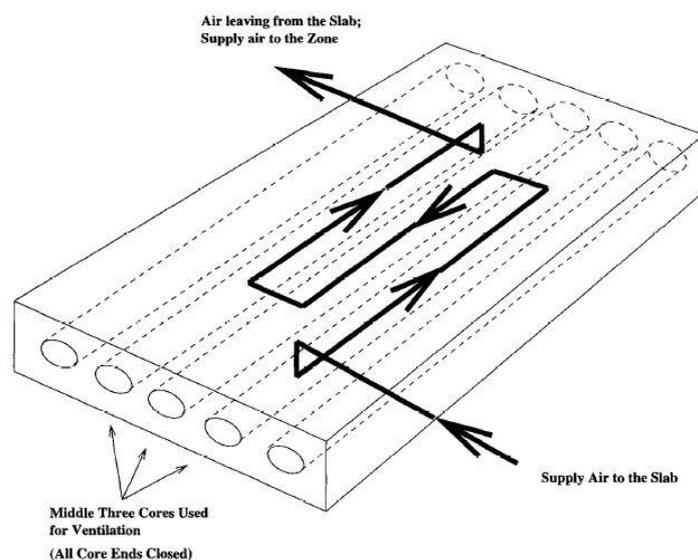


Fig. 19: Schema del funzionamento di un solaio ventilato. Fonte: M.J. Ren, J.A. Wright, *A ventilated slab thermal storage system model*, in *Building and Environment*, vol. 33, n.° 1, Elsevier, 1997, pg. 43-52

Per l'ottimale funzionamento di un solaio ventilato, che sfrutti al massimo le proprietà termiche degli elementi coinvolti, sono auspicabili due condizioni [11]:

La prima, è che il solaio di calcestruzzo sia abbastanza spesso da costituire una buona massa inerziale per l'accumulo di calore. Naturalmente, questo è un parametro non univoco, perché dipende dalle dimensioni dell'ambiente che il solaio copre, per questo va valutato caso per caso.

La seconda condizione è che il flusso di ventilazione sia abbastanza potente da riuscire a "scaricare" l'intera massa termica del calcestruzzo nel tempo utile, ovvero entro il momento in cui si riattivano i carichi interni in ambiente.

Si tratta di due condizioni non facili da soddisfare sempre, dal momento che dipendono da diversi fattori che possono essere imprevedibili e variabili, tra cui: le condizioni climatiche esterne, l'orientamento, l'occupazione, l'isolamento ecc. Tuttavia, queste condizioni rappresentano l'ottimale situazione di equilibrio per il progetto di un solaio ventilato.

Funzionando in questo modo, il solaio ventilato è dunque un elemento responsivo appartenente alla classe dei “*Core thermal mass activation*” in cui la massa termica del solaio viene attivata dal proprio *core*, appunto, ovvero dalla struttura centrale. La classe alternativa di elementi responsivi di attivazione dell’inerzia termica è detta “*Surface thermal mass activation*”, in cui l’inerzia termica è attivata superficialmente [11].

Rispetto al normale funzionamento del solaio ventilato sopra descritto, sono poi possibili alcune varianti che riguardano i diversi aspetti di questo elemento responsivo tra cui la ventilazione, la configurazione e il rapporto con l’ambiente interno.

La prima variante riguarda la ventilazione notturna, che comporta due diverse configurazioni possibili del solaio ventilato: la configurazione diretta e quella indiretta. Nella prima configurazione la massa termica del solaio è direttamente a contatto con l’aria interna, non vi sono quindi controsoffitti e per questo motivo il solaio scambia calore con l’ambiente interno sia per irraggiamento che per convezione. I tipici coefficienti di scambio termico sono $5.5 \text{ W/m}^2\text{K}$ per l’irraggiamento e $2-5.5 \text{ W/m}^2\text{K}$ per la convezione. Nella configurazione indiretta, vi sono degli elementi interposti tra il solaio e l’ambiente interno, il contatto non è diretto. Tali elementi possono essere per esempio controsoffitti, condotti, pannelli ecc. In questo caso vi è scambio termico praticamente solo per convezione ed il coefficiente di convezione si attesta tra i 10 e i $15 \text{ W/m}^2\text{K}$ [11].

La distribuzione di tale scambio termico tra solaio e aria interna avviene generalmente per più di $2/3$ dal lato del soffitto e per meno di $1/3$ dal lato del pavimento. Questo dato ovviamente, va ponderato rispetto alla stratigrafia di ogni singolo solaio, ma può considerarsi affidabile nella maggior parte dei casi [10].

Un’altra variante, riscontrabile nei casi studio disponibili ad oggi, riguarda il percorso dell’aria di ventilazione. Alcune configurazioni prevedono che l’aria passi attraverso i dotti, acquistando calore dal solaio, e poi sia portata al di fuori dell’edificio tramite i normali canali di ventilazione meccanica. In altre configurazioni, l’aria di ventilazione invece, dopo essere passata nei dotti del solaio ventilato, viene immessa nell’ambiente interno e, una volta riscaldata nuovamente, estratta e portata fuori.

In generale comunque, l’aria fornita al solaio ventilato può essere trattata oppure no, a seconda del clima in cui questo elemento responsivo va ad inserirsi. Se il clima è di tipo temperato ed è dunque soggetto a una buona escursione termica estiva tra il giorno e la notte, è probabile che la ventilazione possa servirsi semplicemente dell’aria esterna. In

questo caso infatti, nelle ore notturne, l'aria esterna ha sicuramente una temperatura inferiore del solaio interno all'edificio e dunque è in grado di raffreddarlo.

In un clima in cui, invece, l'aria esterna notturna non basta a svolgere questa funzione, bisogna servirsi dell'ausilio di un impianto che raffreddi l'aria prima di portarla al solaio ventilato.

In questo secondo caso bisogna dunque inserire un consumo di energia necessario al raffrescamento dell'aria, che si somma a quello della ventilazione. Tuttavia, il vantaggio è comunque presente poiché tale consumo, avvenendo di notte, ha un costo inferiore rispetto a quello diurno.

Un esempio di solaio ventilato oggi disponibile come prodotto commerciale si chiama *ThermoDeck* ed è un brevetto svedese. Il suo funzionamento prevede che l'aria di ventilazione venga portata inizialmente in un dotto principale, che corre al di sotto del solaio ed è coperto dai controsoffitti, solitamente situato in un corridoio. Da qui l'aria è poi distribuita ai dotti dentro i solai ventilati nelle stanze, in cui passa "a serpentina" scambiando calore con la superficie esposta del solaio, per poi essere immessa in ambiente. In questo caso il solaio costituisce uno scambiatore di calore tra l'aria fornita e l'ambiente indoor.

Le solette *ThermoDeck* sono componenti strutturali prefabbricate che hanno in genere una larghezza di 1.20 metri e una lunghezza fino a 18 metri. Lo spessore varia in base alla luce che il solaio deve coprire. Il montaggio in cantiere risulta semplificato poiché esse arrivano prefabbricate al sito e vanno assemblate in sequenza con l'ausilio di una gru.

I progetti in Europa in cui è stato applicato questo elemento responsivo hanno registrato un risparmio energetico fino al 40% per il consumo di riscaldamento rispetto a edifici con simili caratteristiche e senza il solaio ventilato. Questo risparmio energetico si è inoltre tradotto in un risparmio economico del 15.30% sulle bollette per il consumo di elettricità [11].

In Fig. 20 è rappresentato un esempio di applicazione di solaio ventilato di tipo *ThermoDeck*.

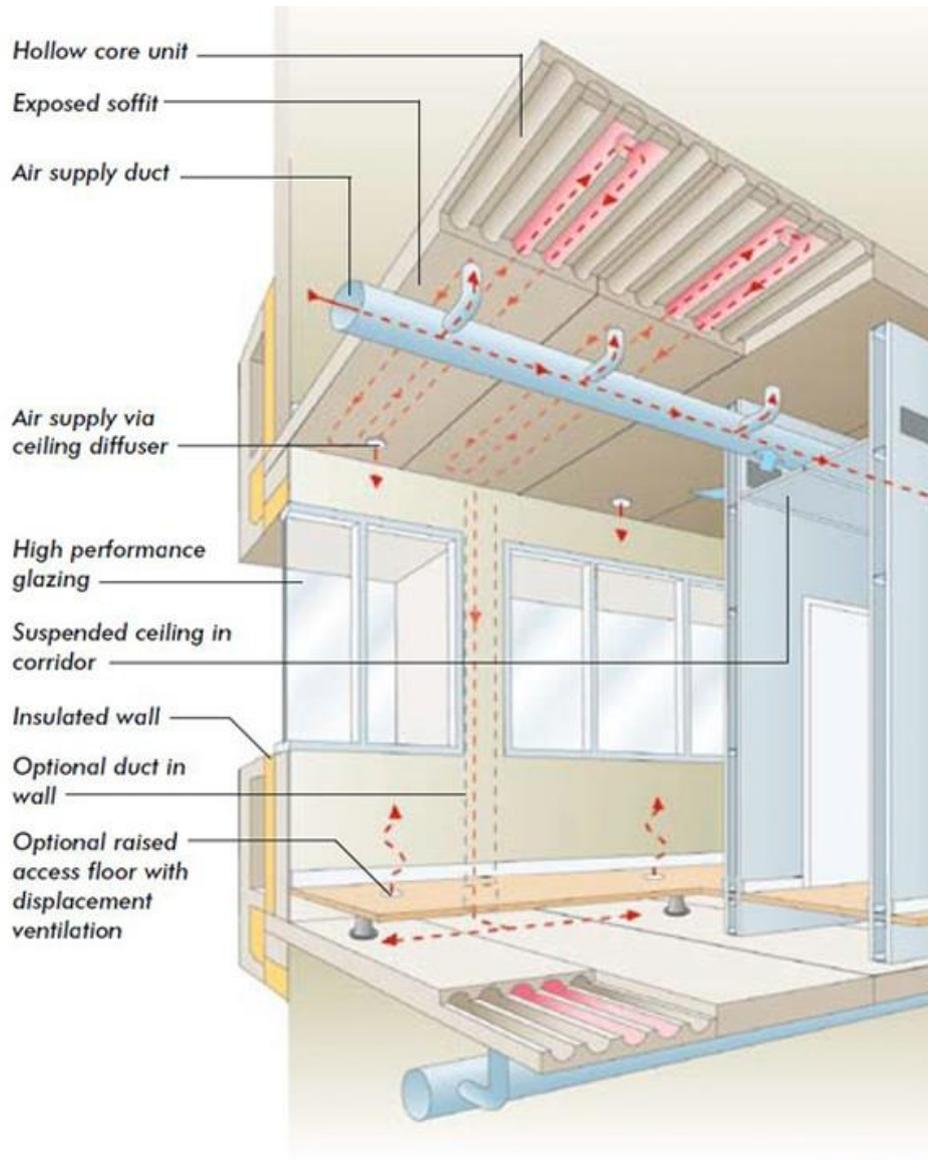


Fig. 20: Funzionamento del solaio ventilato *ThermoDeck*. Fonte: www.mesbuildingsolutions.co.uk

Pur essendo il solaio ventilato una tecnologia recente e relativamente poco diffusa perché, forse, poco conosciuta, vi sono in letteratura alcuni casi studio esemplificativi dell'applicazione del solaio ventilato. Tra questi casi studio ve ne sono tre riportati in [8] che mostrano, a mio parere, come questo elemento responsivo può essere utilizzato con successo, dal punto di vista energetico, sia nel caso di edifici ad uso terziario sia nel caso di abitazioni.

Il primo caso studio è un centro di cultura e logistica chiamato “*Christophorus Haus*” situato a *Nydalspynten*, in Norvegia, che ha pianta circolare e 3 piani fuori terra ed è stato costruito nel 2008. Il solaio ventilato in questo edificio è esposto direttamente all’ambiente interno ed ha funzionamento estivo senza introduzione di aria in ambiente, la ventilazione utilizza aria proveniente dall’esterno ma pre-raffreddata grazie ai dotti interrati per il pre-trattamento dell’aria. (Fig. 21)

Il secondo caso studio è un edificio residenziale, detto “*Kaswoningen*” che si trova nel nuovo sito di sviluppo ecologico “*EVA Lanxmeer*”, in Olanda. Si tratta di 6 villette a schiera, ciascuna con 2 piani fuori terra, costruite nel 2002. Le villette sono dotate di diverse tecnologie sostenibili, tra cui, anche in questo caso, il solaio ventilato. Esso ha un funzionamento prettamente estivo, che si innesca nelle ore notturne ed ha una ventilazione con aria esterna non trattata, grazie alla buona escursione termica offerta dal clima estivo olandese. (Fig. 22)

Il terzo ed ultimo caso studio si chiama “*Mabuchi Motor Industry Headquarters*” e si tratta di una palazzina per uffici a Chiba, Giappone, costruita nel 2004. Vi sono 4 piani fuori terra e l’edificio è fornito sia di doppia pelle vetrata che di solaio ventilato. Il funzionamento di quest’ultimo prevede la ventilazione notturna per raffreddare i solai, che permette di ottenere una riduzione dei picchi di temperatura diurni e un risparmio sul consumo di energia grazie all’uso notturno. Il sistema utilizza aria raffreddata in estate e aria non trattata nelle mezze stagioni. (Fig. 23)



Fig. 21: Caso studio 1 - *Christophorus Haus* in *Nydalspynten*, Norvegia. Fonte: www.architects.org



Fig. 22: Caso studio 2 – *Kaswoningen* in *EVA Lanxmeer*, Olanda. Fonte: www.ecnmooigebaar.nl



Fig. 23: Caso studio 3 – *Mabuchi Motor Industry Headquarters*, a Chiba, Giappone. Fonte: www.ibec.or.jp

Per progettare un solaio ventilato che funzioni in modo ottimale, soddisfacendo le due condizioni sopra descritte di spessore della soletta sufficiente ad accumulare il calore dall'ambiente interno e di potenza di ventilazione sufficiente a scaricare il solaio durante la notte, in letteratura si consiglia di calcolare questo elemento responsivo attraverso i modelli dinamici, vista la stretta relazione tra il tempo e il funzionamento di un solaio ventilato. L'oggetto del calcolo dinamico per un solaio ventilato con "*Core thermal mass activation*" è la capacità di riscaldamento e raffrescamento. In [11] si riassumono alcuni dei possibili modelli di calcolo della capacità termica dei sistemi ad attivazione della massa termica, tra cui quello riportato nella normativa EN 15377. Tale metodo consiste in un calcolo lineare delle resistenze termiche per ottenere la densità del flusso di calore e si chiama infatti metodo della resistenza termica in condizioni stazionarie. Lo scambio totale di calore tra il solaio e lo spazio interno è la somma dei flussi di calore dal soffitto al pavimento. Altri modelli proposti per questo calcolo sono: Il "*Finite element method*" (FEM) o "*Finite difference method*" (FDM) che sono solitamente i modelli impostabili nei software di calcolo dinamico, oppure il metodo empirico della misurazione attraverso test pratici.

Per quanto riguarda i vantaggi e gli svantaggi associabili a questa tecnologia, riassumendo ciò che è già stato riportato nelle precedenti pagine, i vantaggi sono: la possibilità di sottodimensionare gli impianti di riscaldamento e raffrescamento e quello della ventilazione, ridurre i picchi e le fluttuazioni di temperatura, risparmiare sul costo dell'energia grazie allo sfruttamento dei consumi notturni, il benessere acustico dato dal fatto che il calcestruzzo ammortizza i rumori dell'impianto di ventilazione, la flessibilità di distribuzione dello spazio data l'ampia luce dei solai e la possibilità di ridurre le altezze dei piani di un edificio grazie al fatto che non vanno inseriti controsoffitti.

Tuttavia, vi sono naturalmente anche delle implicazioni negative con l'uso di questo elemento responsivo, che rappresentano dei possibili limiti e svantaggi. L'assenza di controsoffittatura per esempio, implica che tutta una serie di elementi e impianti che solitamente occupano lo spazio tra solaio e controsoffitto, vanno spostati altrove. Anche la funzione di fono assorbimento, solitamente risolta con i controsoffitti, va gestita in un altro modo. In ultimo, tre ulteriori limiti sono costituiti dal fatto che questa tecnologia non sia facilmente adattabile a tutti i climi, che ci sia possibilità di formazione di condensa e che non vi sono, ad oggi, molti strumenti per la ricerca per poter stimare con maggiore certezza le effettive prestazioni del solaio ventilato.

Per riassumere i vantaggi e gli svantaggi sopra descritti e presentare anche possibili potenzialità e rischi, si riporta di seguito un'analisi S.W.O.T. riferita genericamente alle tecnologie di attivazione della massa termica, frutto dell'analisi di A. Van Der Aa, P. Heiselberg, M. Perino [1].

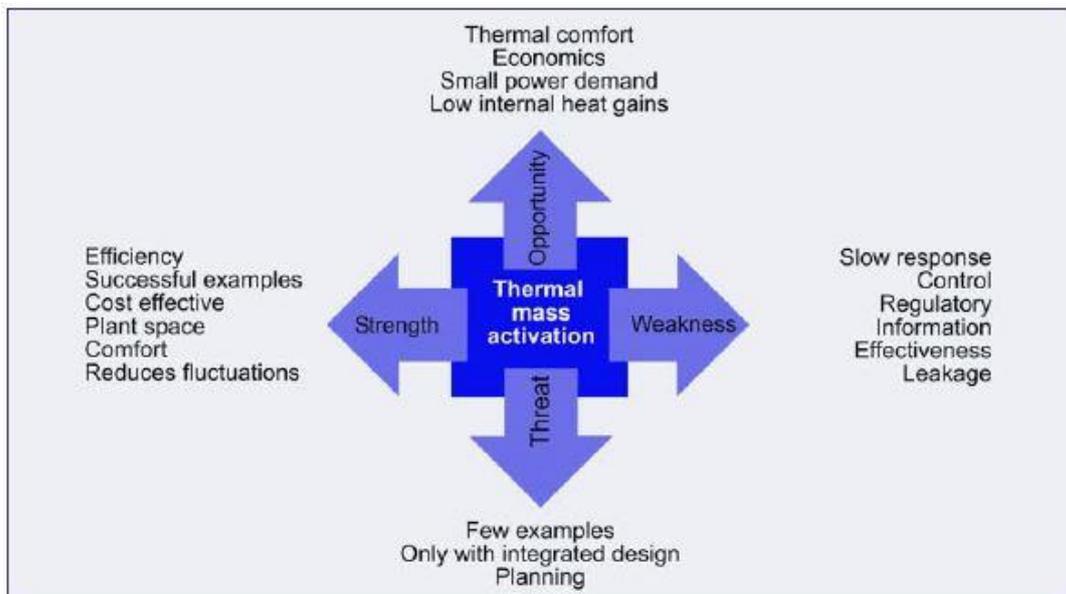


Fig.24: SWOT dei sistemi ad attivazione della massa termica. Fonte: A. Van Der Aa, P. Heiselberg, M. Perino, *Designing with responsive building elements*, in *Integrating environmentally responsive elements in buildings (Annex 44)*, IEA-ECBCS, Aalborg University, Giugno 2011

CAPITOLO 4: IL CASO STUDIO

4.1

L'edificio tipo per uso ufficio

A seguito dell'analisi e dell'approfondimento degli elementi responsivi per l'involucro edilizio, è stato possibile capire come essi potessero essere inseriti nel progetto di un edificio per studiarne il comportamento energetico. Si è dunque reso necessario trovare un caso studio di cui produrre un modello, in cui fosse possibile paragonare il comportamento energetico dell'involucro tradizionale e dell'involucro successivamente implementato con degli elementi responsivi selezionati *ad hoc* per il caso studio.

Nel presente capitolo si descrive dunque il passaggio del progetto di tesi dalla fase teorica a quella pratica, in cui è stato dapprima modellato un edificio con involucro tradizionale che rispetta i requisiti minimi imposti dal relativo decreto in vigore e successivamente è stato applicato, allo stesso edificio, uno degli elementi responsivi, per capire come il comportamento energetico potesse variare.

Per la selezione del caso studio, il criterio di scelta principale è stata la tipologia di edificio. Essendo l'obiettivo della ricerca quello di studiare i consumi energetici, la scelta doveva ricadere su una delle tipologie tipicamente più energivore, tra le quali si possono annoverare, per esempio: le strutture alberghiere, i centri commerciali e gli edifici per uffici. La scelta è poi ricaduta sulla tipologia dell'edificio per uso ufficio data dalla possibilità di studiarne facilmente il comportamento energetico date la linearità e la ripetitività dei profili dei carichi.

L'edificio ad uso ufficio scelto rispecchia la volontà della presente ricerca di non concentrarsi su un edificio specifico, ma di proporre un caso studio più generico che tenta di ergersi a esempio per diversi edifici confrontabili. Infatti, è stato scelto di lavorare sull'edificio per uffici rappresentativo del parco edilizio ad uso ufficio, frutto della ricerca dell'Ente per le Nuove tecnologie, l'Energia e l'Ambiente (ENEA) e del Centro Ricerche Economiche, Sociali e di Mercato per l'Edilizia e il Territorio (CRESME) [17], [18].

Questo studio, pubblicato nel 2009 da ENEA, ha sviluppato un'indagine dettagliata sul parco edilizio italiano per determinare, per ogni tipologia di edificio, un prototipo rappresentativo dell'intero parco immobiliare nazionale per quella tipologia. L'indagine si è basata su una metodologia analitica creata *ad hoc* per pervenire alla quantificazione e qualificazione degli edifici. Le fonti principalmente analizzate sono state i censimenti

ISTAT, le banche dati catastali, le rilevazioni dell'attività edilizia ISTAT e l'indagine empirica su alcuni edifici. Inoltre, sono stati somministrati dei questionari al fine di capire, direttamente dagli occupanti dell'edificio, quali fossero le sue funzioni e caratteristiche. L'obiettivo di questa ricerca era di fornire i dati geometrici di partenza delle varie tipologie di edifici utili a successive ricerche per la possibilità di risparmio energetico di questi edifici.

Il risultato di questo studio è dunque il punto di partenza di questa ricerca, che, a partire dalle indicazioni della ricerca di ENEA e CRESME sull'edificio per uffici rappresentativo del parco immobiliare italiano, sviluppa le tematiche energetiche, proponendo di collocare tale edificio in un generico quartiere cittadino di Torino per conferirgli dei dati climatici realistici utili all'indagine energetica.

La ricerca di ENEA e CRESME si fonda sin dall'inizio su una classificazione del parco edilizio in zone geografiche ed epoche di costruzione, al fine di rendere più semplice la lettura dei dati di indagine. La classificazione in zone geografiche prevede quattro zone che sono Nord Italia, Centro Italia, Sud Italia e Isole. La divisione in epoche di costruzione invece divide gli edifici costruiti ante 1920, quelli costruiti tra 1920 e 1945, tra 1946 e 1970, tra 1971 e 1990 e infine quelli costruiti dal 1991 ad oggi.

Si riportano di seguito brevemente i punti salienti di questo studio, per presentare le caratteristiche principali del risultante prototipo di edificio per uffici in Italia. Dal momento che, nell'ambito della tesi, tale edificio è stato ipoteticamente collocato a Torino, sono riportati per lo più i dati relativi alla zona del Nord-Italia.

Dai dati di indagine risulta che in Italia ci sono circa 64911 edifici ad uso ufficio esclusivo o prevalente, di cui il 45.5% è situato al nord, il 17.8% al centro e il 36.6% al sud e isole. In Figura 25 è mostrata la distribuzione degli edifici ad uso ufficio in Italia per provincie.

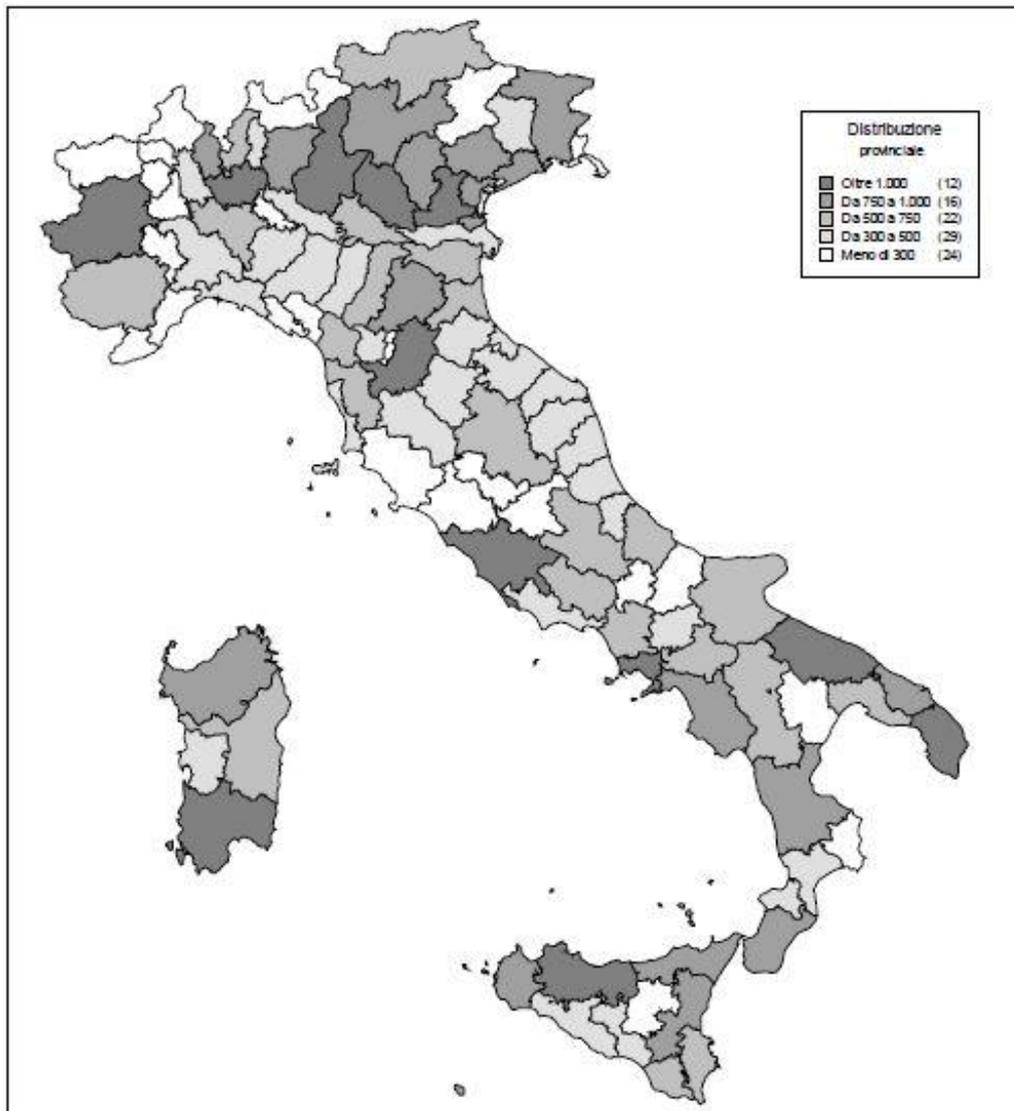


Fig. 25: Distribuzione provinciale degli edifici ad uso ufficio. Fonte: Ente per le Nuove tecnologie, l'Energia e l'Ambiente (ENEA), *Determinazione dei fabbisogni e dei consumi energetici dei sistemi edificio-impianto. Caratterizzazione del parco immobiliare ad uso ufficio*, Ministero dello sviluppo economico, Marzo 2009.

Per quanto riguarda il Nord Italia, la maggior parte degli edifici per uffici risulta costruita tra gli anni '70 e gli anni '90 (quasi il 30% del totale) ed è costituita da edifici con involucro tradizionale e finestre a vetro doppio con infissi in legno o in alluminio.

I principali materiali costituenti le strutture di questi edifici sono i forati in laterizio, il calcestruzzo armato, l'isolante in polistirene, le malte e gli intonaci cementizi.

Lo studio infine propone una pianta, frutto delle indagini sulla distribuzione spaziale degli edifici ad uso uffici, riferita in generale al territorio nazionale. La pianta, molto lineare,

prevede un edificio rettangolare di 30 metri per 16 con una zona centrale priva di finestre dedicata a scale e servizi, un corridoio di distribuzione di circa 1,20 m di larghezza e gli uffici distribuiti lungo il perimetro, per un totale di circa 14 uffici per piano, di cui 4 agli angoli, 2 per lato a Est e a Ovest e 3/4 a Sud e a Nord.

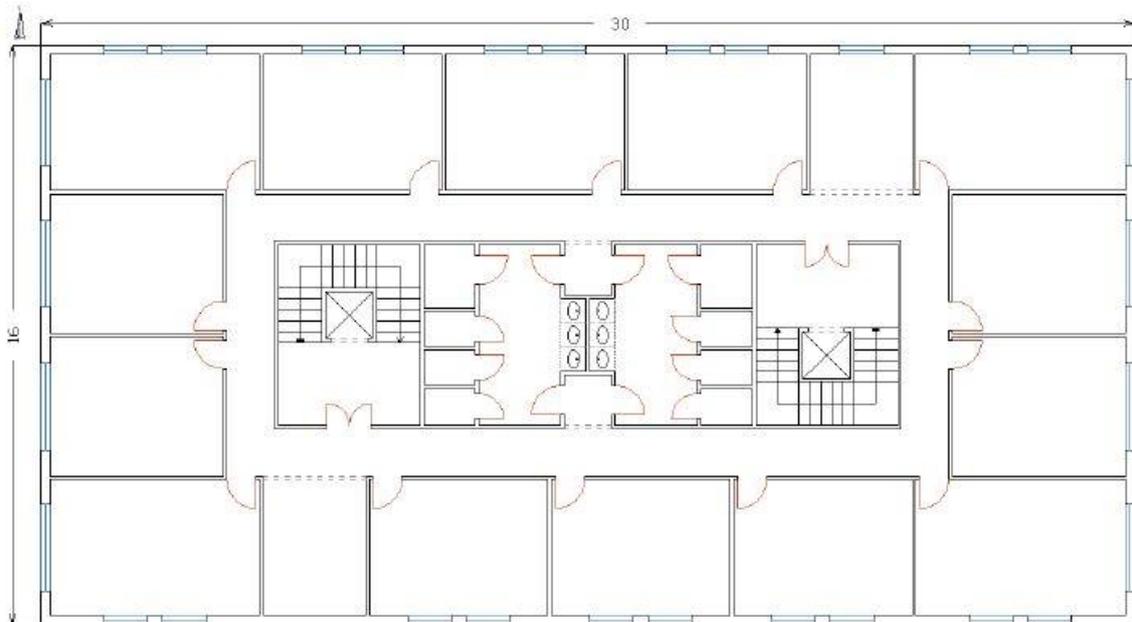


Fig. 26: Pianta dell'edificio ad uso uffici rappresentativo del parco edilizio italiano. Fonte: Ente per le Nuove tecnologie, l'Energia e l'Ambiente (ENEA), *Caratterizzazione del parco edilizio nazionale. Determinazione dell'edificio tipo per uso ufficio*, Ministero dello sviluppo economico, Marzo 2009

A completamento delle informazioni della pianta, per fornire un'idea tridimensionale dell'edificio, sono inoltre riportati una serie di dati basati sulle medie dei dati rilevati. Per esempio, considerando gli edifici ad uso uffici maggiormente presenti nel Nord Italia, ovvero quelli costruiti tra gli anni '70 e '90, si riporta un'altezza media di 15 metri (e dunque un numero medio di 5 piani), una superficie media per finestra di 3.50 m^2 e un rapporto S/V di 0,33.

In definitiva quindi, il prototipo di edificio ad uso uffici italiano è costituito da tutte queste caratteristiche appena descritte. Riassumendo, l'involucro edilizio e la struttura sono costituite da materiali tradizionali, occupa una superficie in pianta di 480 m^2 (16×30), ha 5 piani fuori terra per un'altezza di 15 metri e circa ha 14 uffici per piano.

4.2

Il primo modello energetico: l'edificio con involucro tradizionale

Il primo modello energetico è stato elaborato grazie al software di modellazione dinamica "Design Builder". Tutte le caratteristiche dell'edificio modellato hanno ripreso il più possibile fedelmente le prescrizioni dello studio di ENEA e CRESME sopra descritte in termini di proprietà geometriche, formali, termo-fisiche e costruttive. Per quanto riguarda le proprietà termo-fisiche, inoltre, l'edificio è stato leggermente adattato in modo da riportare le caratteristiche dell'edificio di riferimento definito nel DM 2015/06/26 [7], in questa maniera, il modello di partenza rappresentava un edificio che fosse già conforme ai requisiti e alle prescrizioni previsti per il 2021.

L'edificio di riferimento è definito nel decreto come un edificio uguale quello di progetto in termini di geometrie, collocazione, contesto, orientamento e tipologia, esso quindi ha un fabbricato di riferimento e degli impianti di riferimento. Nell'ambito di questa tesi, esso costituisce il vero e proprio caso studio che è collocato in un ipotetico contesto urbano della città di Torino (Zona climatica E) e possiede, in qualità di edificio di riferimento del decreto, i seguenti parametri termici:

- Trasmittanza termica U delle strutture opache verticali verso l'esterno, gli ambienti non climatizzati o contro terra pari a $0,26 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Trasmittanza termica U delle strutture opache orizzontali o inclinate di copertura verso l'esterno e gli ambienti non climatizzati pari a $0,22 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Trasmittanza termica U delle strutture opache orizzontali di pavimento verso l'esterno, gli ambienti non climatizzati o contro terra pari a $0,26 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Fattore di trasmissione solare g_{gl+sh} per i componenti finestrati orientati a Sud, Est e Ovest pari a $0,35$

Per i componenti costruttivi non nominati dal decreto, quali i tramezzi e i solai interpiano, si deduce che la trasmittanza termica U non ha valori standard da rispettare. Per questi elementi dunque la stratigrafia è stata impostata sulla base della ricerca di partenza e il valore di trasmittanza è risultato dal calcolo del programma di simulazione. In particolare, per i tramezzi è risultato $U = 2,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ e per il solaio interpiano $U = 1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Le stratigrafie dei pacchetti costruttivi dell'edificio all'interno del modello energetico sono state impostate in modo da rispettare, da un lato, le indicazioni dello studio di ENEA sui materiali costruttivi maggiormente usati in questo tipo di edifici, dall'altro, i requisiti di trasmittanza termica U sopra descritti, riportati nel DM 2015/06/26.

Si riporta di seguito una tabella rappresentativa delle stratigrafie dei componenti dell'edificio, con i relativi dati più importanti. Il primo strato è il più esterno e l'ultimo è quello più interno.

	STRATO 1	STRATO 2	STRATO 3	STRATO 4	STRATO 5	STRATO 6
PARETI PERIMETRALI	Intonaco	Mattone forato	Polistirene	Strato d'aria	Mattone forato	Intonaco
Spessore (m)	0,025	0,12	0,11	0,12	0,08	0,025
Conducibilità (W/mK)	1,4	-	0,034	-	-	1,4
calore specifico (J/kgK)	1000	-	1300	-	-	1000
densità (kg/m ³)	2000	-	1100	-	-	2000
Resistenza (m ² K/W)	-	0,13	-	0,156	0,09	-
PARTIZIONI INTERNE	Intonaco	Mattone forato	Intonaco			
Spessore (m)	0,025	0,08	0,025			
Conducibilità (W/mK)	1,4	-	1,4			
calore specifico (J/kgK)	1000	-	1000			
densità (kg/m ³)	2000	-	2000			
Resistenza (m ² K/W)	-	0,13	-			
SOLAI INTERNI	Rivesti- mento cemento	Massetto	Solaio latero- cemento	Intonaco		
Spessore (m)	0,03	0,03	0,18	0,03		
Conducibilità (W/mK)	1	1,4	-	0,7		
calore specifico (J/kgK)	1000	1000	-	1000		
densità (kg/m ³)	2000	2000	-	800		
Resistenza (m ² K/W)	-	-	0,3	-		
SOLAIO A TERRA	Piastrelle	Massetto	Polistirene	Solaio latero- cemento	Ciotoli	
Spessore (m)	0,02	0,03	0,1	0,3	0,18	
Conducibilità (W/mK)	1,0	0,9	0,034	-	-	
calore specifico (J/kgK)	800	1000	1300	-	-	
densità (kg/m ³)	2300	1800	1100	-	-	
Resistenza (m ² K/W)	-	-	-	0,41	0,257	
TETTO PIANO	Rivesti- mento cemento	Massetto	Polistirene	Solaio latero- cemento	Intonaco	
Spessore (m)	0,03	0,03	0,14	0,18	0,03	
Conducibilità (W/mK)	1	1,4	0,034	-	0,7	
calore specifico (J/kgK)	1000	1000	1300	-	1000	
densità (kg/m ³)	2000	400	1100	-	800	
Resistenza (m ² K/W)	-	-	-	0,3		

Per quanto riguarda le caratteristiche geometriche e contestuali, l'edificio del modello energetico presenta alcuni dati di quelli indicati dalla ricerca descritta nel capitolo precedente, come ad esempio la superficie di 480 m² per piano, i 5 piani fuori terra, nessun piano interrato, un'altezza di 15 metri ed il tetto piano. Altre caratteristiche sono poi state impostate secondo criteri alternativi, o per mancanza dei dati nello studio di ENEA o per la necessità di contestualizzare l'edificio in un luogo preciso per poter studiare l'influenza del clima su di esso. Ad esempio, l'altezza delle finestre non era indicata nella ricerca di partenza, pertanto è stata decisa sulla base della larghezza indicata in pianta. Per i prospetti Est e Ovest sono state previste delle finestre di 2,40 x 1,40 metri per un totale di 3,36 m² a finestra che vuol dire 67,2 m² di superficie finestrata per questi due prospetti. A Nord e a Sud invece la base delle finestre fornita dalla pianta era di 1,15 m² perciò è stata impostata un'altezza di 1,40 m come per le finestre degli altri prospetti, ottenendo 1,61 m² di area di ciascuna finestra per questi due prospetti. La facciata Sud in totale ha una superficie vetrata di 80,5 m² e quella Nord di 88,5 m².

Ogni finestra è dotata di schermatura di tipo veneziana, completamente esterna, che si attiva automaticamente quando la radiazione diretta è maggiore di 300 W/m². Nel modello le schermature non sono visibili perché non sono state modellate, ma sono comunque comprese nel calcolo perché il software permette di inglobare le proprietà di vetro e schermatura, comprendendo le caratteristiche della schermatura nei parametri del calcolo.

L'edificio è inserito in un contesto urbano a Torino ma rimane un edificio singolo, senza altri edifici adiacenti, nonostante forse la maggior parte degli edifici per uffici a Torino sia proprio ubicata in adiacenza ad altri edifici. Questo è dovuto al fatto che la pianta fornita dallo studio da cui sono partita presenta finestre su tutti i lati del perimetro dell'edificio e dunque, facendo fede ad essa, non era possibile modellare degli edifici di contesto adiacenti.

Nelle figure 27 e 28 si riportano due immagini per presentare la geometria complessiva dell'edificio.

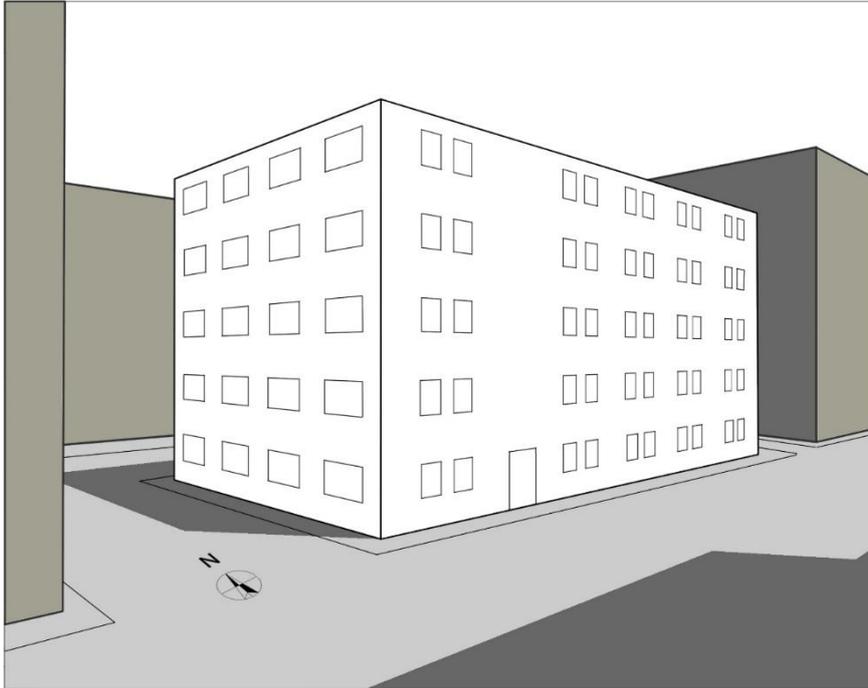


Fig. 27: Il modello dell'edificio con involucro tradizionale. Sono qui visibili il prospetto Sud e quello Ovest. Fonte: Immagine prodotta autonomamente.

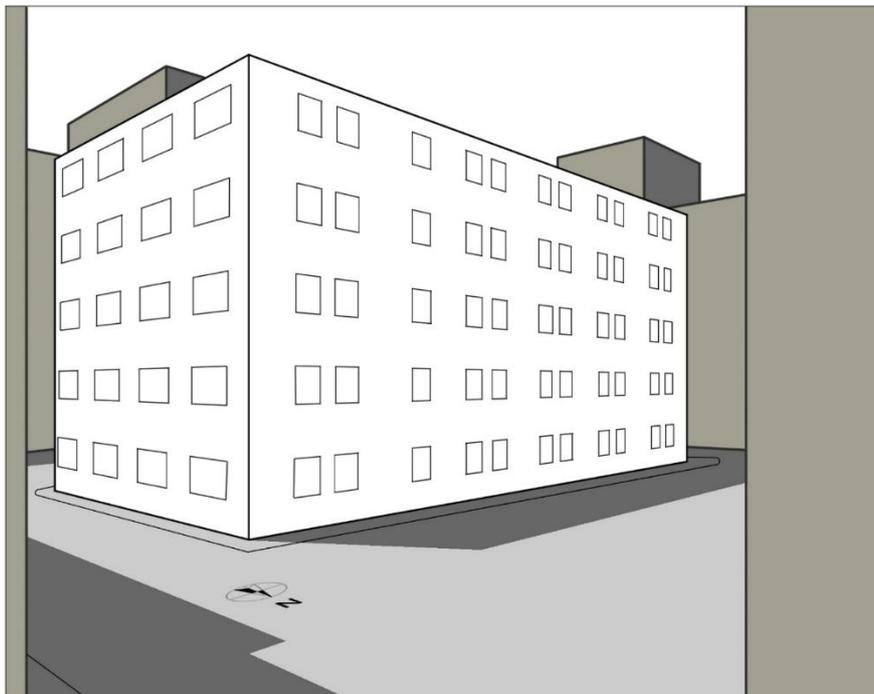


Fig. 28: Il modello dell'edificio con involucro tradizionale. Sono qui visibili il prospetto Nord e quello Est. Fonte: Immagine prodotta autonomamente.

Un'importante caratteristica da assegnare ad un modello per la simulazione energetica dinamica, oltre a quelle sopra descritte relative alla geometria e alla costruzione, è quella della zonizzazione termica. Dividere l'edificio in zone termiche vuole dire indicare quali parti di esso hanno proprietà termiche simili e raggrupparle all'interno di una stessa zona per semplificare e velocizzare il calcolo. Non si tratta di un processo univoco ma ci sono vari modi e criteri per farlo; tendenzialmente si raggruppano tra di loro le zone che hanno simili dispersioni termiche, simili condizioni al contorno, simile orientamento...ecc.

Nel caso di questa tesi, la divisione in zone termiche è stata fatta secondo un criterio che ha tenuto conto principalmente dell'orientamento e delle dispersioni e che ha portato al risultato di 25 zone termiche in totale. Una prima divisione, basata sulle dispersioni e dunque sul tipo di ambiente confinante alla zona, è stata fatta tra piano terra, piani intermedi e ultimo piano. È dunque risultato il raggruppamento delle prime tre macrozone sulla base del fatto che la prima confina con il terreno, la seconda confina con ambienti interni e l'ultima confina con il clima esterno. Successivamente ognuna di queste tre zone è stata ulteriormente suddivisa sulla base degli otto orientamenti: Nord, Nordest, Est, Sudest, Sud, Sudovest, Ovest e Nordovest.

Nel dettaglio dunque, le prime otto zone si trovano al piano terra, poi ce ne sono altre otto all'ultimo (quarto) piano, otto che comprendono tutti gli spazi dei piani intermedi e l'ultima zona è il blocco di corridoi, servizi e scale che va dal piano terra all'ultimo e raggruppa tutta la zona centrale contenente queste funzioni per semplicità.

La figura 29 riporta graficamente la divisione in zone termiche scelta per il modello, ogni colore corrisponde ad una zona.

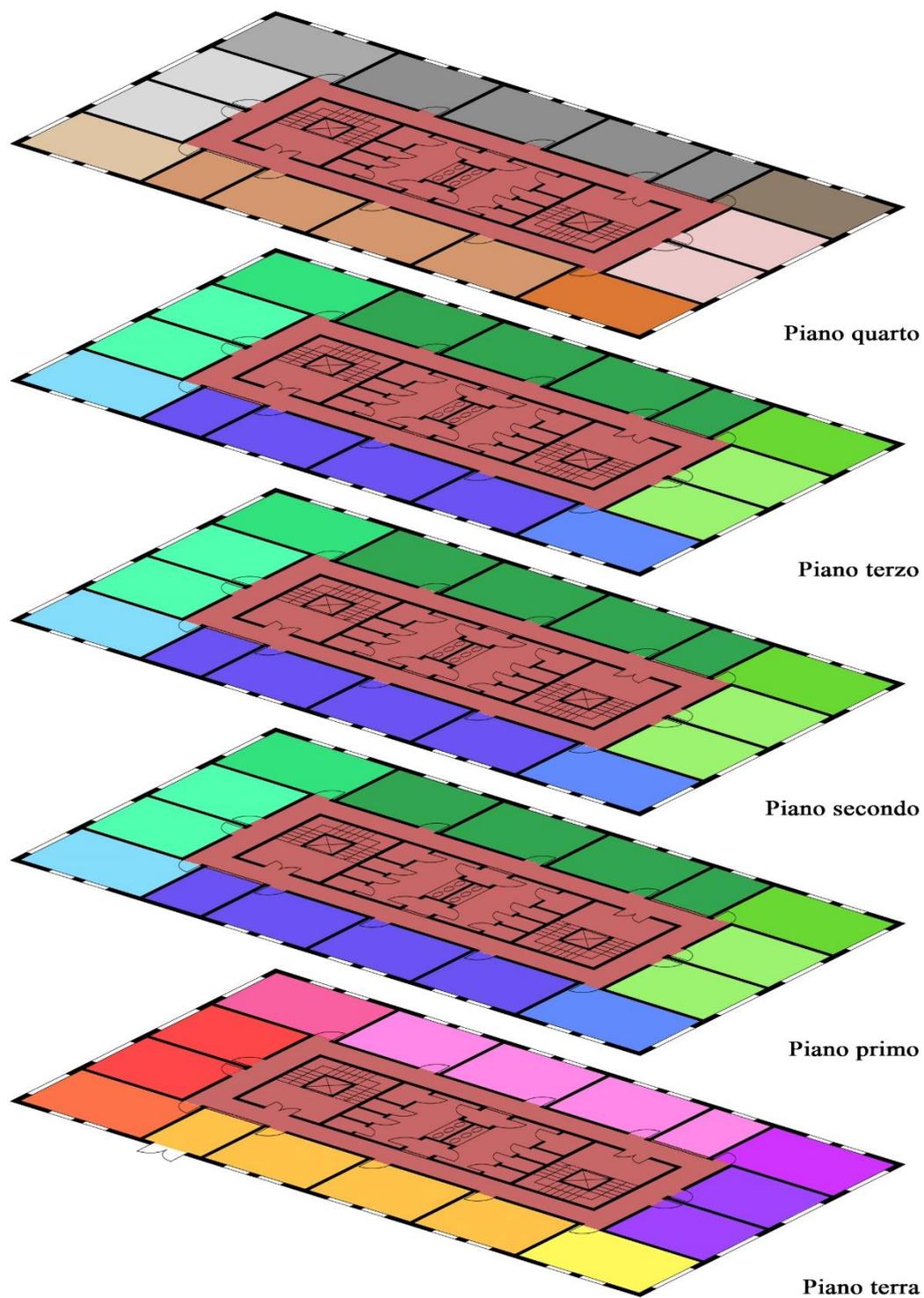


Fig. 29: La divisione dell'edificio nelle 25 zone termiche. Ogni colore corrisponde a una di esse. Fonte: Immagine prodotta autonomamente.

Un edificio ad uso uffici è tipicamente caratterizzato da profili dei carichi che si ripetono giorno per giorno in modo pressoché uguale, data la linearità e la ripetitività delle attività svolte al suo interno. Per questo motivo, all'interno del modello energetico i carichi principali sono stati impostati attraverso dei programmi, detti "schedule" nel caso di Design Builder, che stabiliscono come, quando e in quali quantità i carichi siano presenti nell'ambiente interno.

Essendo il caso studio un edificio teorico ma comunque rappresentativo della realtà, i profili dei carichi da inserire nel programma sono stati presi, dove possibile, dalla relativa normativa nazionale, come nel caso dei carichi di occupazione e delle apparecchiature. Dove non possibile per assenza di normative che regolano gli altri carichi negli edifici per uffici, sono stati utilizzati altri strumenti del mondo della ricerca come tesi di dottorato e bozze di allegati tecnici di prossima pubblicazione. Questo è stato il caso dei carichi di ventilazione e di illuminazione.

In figura 30 si riporta la tabella della normativa UNI-TS 11300-1 [19] con l'indicazione dei valori degli apporti termici dati da occupanti e apparecchiature divisi per fasce temporali. Come mostra la tabella, il valore di picco è pari a 20 W/m² e si verifica nei giorni feriali durante l'orario di lavoro, per il resto del tempo il valore è più basso.

Sulla base di questa tabella è stato impostato il programma relativo ai carichi di occupazione e apparecchiature nel software di modellazione energetica dinamica.

Giorni	Ore	Ambienti ufficio (60% della superficie utile di pavimento) $(\phi_{int,Oc} + \phi_{int,A}) / A_f$ [W/m ²]	Altre stanze, atri, corridoi (40% della superficie utile di pavimento) $(\phi_{int,Oc} + \phi_{int,A}) / A_f$ [W/m ²]
Lunedì – Venerdì	Dalle ore 07:00 alle ore 17:00	20,0	8,0
	Dalle ore 17:00 alle ore 23:00	2,0	1,0
	Dalle ore 23:00 alle ore 07:00	2,0	1,0
	Media	9,50	3,92
Sabato – Domenica	Dalle ore 07:00 alle ore 17:00	2,0	1,0
	Dalle ore 17:00 alle ore 23:00	2,0	1,0
	Dalle ore 23:00 alle ore 07:00	2,0	1,0
	Media	2,0	1,0
Media		7,4	3,1

$(\phi_{int,Oc} + \phi_{int,A})$ è il flusso termico dalle persone e dalle apparecchiature, in W;
 A_f è la superficie utile di pavimento.

Fig. 30: Tabella degli apporti termici da occupazione e apparecchiature. Fonte: Specifica tecnica UNI TS 11300, Parte 1, Ottobre 2014, in materia di prestazioni energetiche dell'edificio

Per quanto riguarda il profilo del tasso di ricambio d'aria negli uffici, in [20] si trova una tabella che, similmente a quella dei carichi di occupazione e apparecchiatura, riassume gli apporti della ventilazione tipici di un edificio per uffici in base alle fasce orarie. Il valore di picco in questo caso è $1,68 \text{ h}^{-1}$ e si verifica nei giorni feriali durante gli orari d'ufficio. Nelle altre fasce orarie, il tasso di ricambio d'aria è molto minore ma non è comunque mai pari a zero.

In figura 31 si riporta la tabella degli apporti di ventilazione.

GIORNI	ORE	UFFICI	ALTRE AREE
Lunedì - Venerdì	07:00 - 17:00	1,68	0,84
	17:00 - 23:00	0,24	0,24
	23:00 - 07:00	0,24	0,24
	Media	0,84	0,49
Sabato - Domenica	07:00 - 17:00	0,24	0,24
	17:00 - 23:00	0,24	0,24
	23:00 - 07:00	0,24	0,24
	Media	0,24	0,24
Media		0,67	0,42

Fig. 31: Tabella degli apporti di ventilazione. Fonte: I. Ballarini, relatore: V. Corrado, *Prestazione energetica degli edifici in condizioni estive: l'effetto dell'isolamento termico*, PhD Thesis, Politecnico di Torino, 2011.

Infine, l'ultima tipologia di carichi interni considerata per la simulazione energetica dinamica dell'edificio è quella dell'illuminazione artificiale, il cui profilo temporale è stato preso dalla proposta per l'allegato tecnico nazionale della normativa europea n°. EN16798-1 di prossima pubblicazione. In figura 32 si riporta la tabella che suddivide i carichi in base alle fasce orarie e presenta il picco di apporto massimo nei giorni feriali dalle 10:00 alle 13:00 e dalle 15:00 alle 17:00, che in questo caso è pari a 6 W/m^2 .

Occupants				
	Weekdays	Saturday	Sunday / festivity	
h				
1	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.0	0.0	0.0	0.0
4	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.0	0.0	0.0	0.0
6	0.0	0.0	0.0	0.0
7	0.0	0.0	0.0	0.0
8	0.0	0.0	0.0	0.0
9	0.5	0.0	0.0	0.0
10	1.0	0.0	0.0	0.0
11	1.0	0.0	0.0	0.0
12	1.0	0.0	0.0	0.0
13	1.0	0.0	0.0	0.0
14	0.5	0.0	0.0	0.0
15	1.0	0.0	0.0	0.0
16	1.0	0.0	0.0	0.0
17	1.0	0.0	0.0	0.0
18	0.5	0.0	0.0	0.0
19	0.0	0.0	0.0	0.0
20	0.0	0.0	0.0	0.0
21	0.0	0.0	0.0	0.0
22	0.0	0.0	0.0	0.0
23	0.0	0.0	0.0	0.0
24	0.0	0.0	0.0	0.0

Fig. 32: Tabella degli apporti di illuminazione. Fonte: Proposta per l'allegato tecnico nazionale della normativa europea n.° EN 16798-1, in materia di performance energetica degli edifici.

4.3

Il secondo modello energetico: L'edificio implementato con l'elemento responsivo

Dopo aver impostato il modello dell'edificio con involucro tradizionale sul software *Design Builder*, l'implementazione con l'elemento responsivo ha richiesto il passaggio al software *Energy Plus* poiché ritenuto molto più adatto alla lavorazione di elementi complessi, quali gli elementi responsivi di involucro. In generale, *Design Builder* è stato utile e adatto alla fase di definizione geometrica e costruttiva e dei profili dei carichi, grazie anche l'interfaccia maggiormente intuitiva e semplificata e rispetto ad *Energy plus*. Quest'ultimo invece, nonostante sia un software con un'interfaccia poco *user-friendly* si è reso necessario per la fase di simulazione e quella di modellazione dell'involucro responsivo grazie alla maggiore disponibilità di impostazioni al suo interno.

Tra gli elementi responsivi di involucro approfonditi nei capitoli precedenti è stato scelto il solaio ventilato per l'applicazione pratica attraverso la modellazione energetica dinamica. Rispetto agli strumenti a disposizione di questa ricerca infatti, il solaio ventilato si è rivelato essere il più compatibile, essendo un elemento presente tra le possibili applicazioni del software *Energy plus*.

Le caratteristiche impostate nel modello con involucro tradizionale sono state mantenute tutte al fine di poter comparare i due modelli, tuttavia l'aggiunta di un elemento responsivo quale il solaio ventilato ha inevitabilmente apportato alcune modifiche e alcune aggiunte, dovute all'impostazione di questo sistema.

Il programma classifica il solaio ventilato all'interno della famiglia delle unità radianti e convettive, il cui funzionamento è messo in moto da un sistema di ventilazione che prende aria dall'esterno e la porta all'interno dei fori dei solai. In Fig. 33 si vede uno schema semplificato di tale funzionamento:

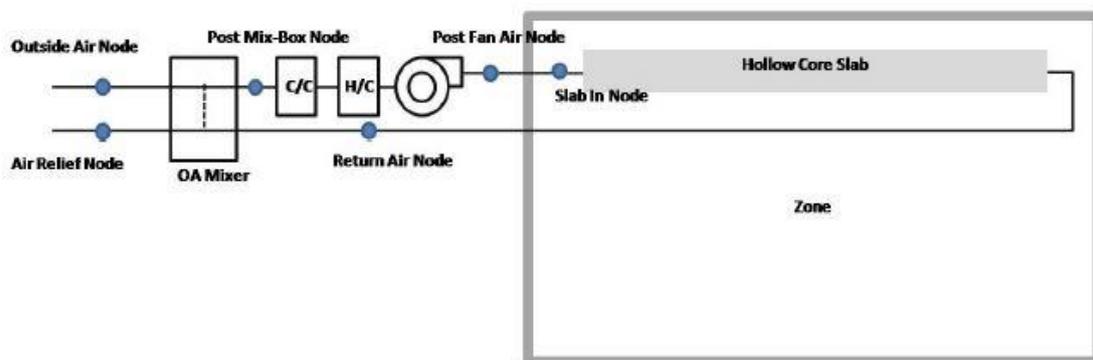


Fig. 33: Schema del funzionamento del solaio ventilato in Energy Plus. Fonte: U.S. Department of Energy, *Input Output Reference*, in *EnergyPlus™ Version 8.6 Documentation*, 2016

Sulla base di questo funzionamento, i parametri richiesti dal programma per impostare l'intero sistema sono diversi, tra questi, i più importanti sono:

- I solai all'interno dei quali va ad inserirsi l'elemento responsivo e la relativa nuova stratigrafia per passare da normale solaio interpiano o tetto piano a solaio ventilato
- Il programma di funzionamento del sistema (quando si innesca e quando si spegne)
- Le informazioni geometriche dei solai, quali: la lunghezza del solaio, il numero dei fori al suo interno, la distanza reciproca tra i fori e il diametro dei fori
- Il valore di portata massima e minima di aria per la ventilazione
- Il tipo di controllo per la quantità d'aria immessa nei fori
- Le informazioni sui ventilatori che servono ogni zona termica fornita di solaio ventilato, tra cui: efficienza, portata, aumento di pressione ecc.

Nell'ambito di questa tesi, tali parametri sono stati compilati sulla base delle informazioni ottenute dalla ricerca iniziale descritta al capitolo 3.4, in modo da ottenere un solaio ventilato con le seguenti caratteristiche:

Innanzitutto, il solaio ventilato è stato applicato a tutte le zone termiche dell'edificio relative agli spazi per uffici, ponendolo nei relativi solai interpiano e nel tetto piano. Tale sistema non è invece stato previsto per le zone di scale, servizi e corridoi per semplicità del calcolo dinamico.

Il suo funzionamento è stato impostato per il periodo estivo e in particolare dal 1° Giugno al 30 Settembre. Il sistema si innesca alle ore 21.00 e funziona fino alle 7.00 del giorno dopo in modo da raffreddare la massa termica dei solai interpiano e del tetto grazie all'aria esterna notturna a temperatura relativamente bassa.

Il funzionamento ottimale di un solaio ventilato infatti, come illustrato nei capitoli precedenti, mira ad introdurre aria esterna nei fori del solaio per scaricarne la sua massa termica in calcestruzzo che ha accumulato calore durante tutto il giorno. Raffreddando il solaio dunque, l'ambiente interno trae beneficio dal momento che viene sottratto calore a una superficie che altrimenti irraggerebbe tale calore in ambiente durante la notte.

Ogni solaio ventilato ha un numero di fori variabile da 16 a 23 in base alla sua lunghezza, ma essi hanno comunque sempre la stessa sezione di diametro 15 centimetri e una distanza reciproca di 10 centimetri.

A livello costruttivo le stratigrafie dei solai interpiano e del tetto piano hanno subito delle modifiche per potersi adattare a costituire il solaio ventilato. La nuova stratigrafia per il solaio interpiano comprende lo strato ventilato principale in calcestruzzo con i fori come strato centrale. Al di sopra e al di sotto di esso vi sono due sottili pannelli in cartongesso

e a seguire gli strati di rivestimento: l'intonaco verso l'ambiente sottostante e il massetto con la pavimentazione verso quello sovrastante. La stratigrafia del tetto piano è del tutto analoga a questa con l'aggiunta dello strato isolante e di quello impermeabile verso l'ambiente esterno.

Ogni zona termica fornita di questo sistema è dotata di un ventilatore per l'ingresso dell'aria nei fori, per un totale di 24 ventilatori aggiunti all'edificio. La velocità dell'aria stimata per il calcolo della portata massima necessaria ai ventilatori è di 1,5 m/s e la portata è stata dunque calcolata per ogni zona in base al numero di fori con la seguente formula:

$$\dot{V}_{\text{tot}} = n^{\circ}_c \cdot A_{\text{cx}} \cdot v_{\text{cx}}$$

In cui: \dot{V}_{tot} è la portata massima

n°_c è il numero dei fori di ciascuna zona termica considerata

A_{cx} è la sezione dei fori, sempre costante e pari a 0.017 m²

v_{cx} è la velocità dell'aria di ventilazione stimata, pari a 1,5 m/s

L'aria in ingresso al sistema non può quindi superare la portata calcolata e impostata con questa formula e, inoltre, è regolata da un tipo di controllo chiamato "Percentuale variabile" che regola l'ingresso dell'aria in base ai carichi presenti in ambiente interno, in modo da farne entrare un quantitativo adatto.

Il programma di modellazione associa il sistema del solaio ventilato ad ogni singolo solaio appartenente ad un ambiente circoscritto. Ciò significa che per le zone termiche comprendenti più di un ufficio, il numero di solai ventilati impostati nel programma è pari al numero di uffici compresi nella zona. Essendo uno il ventilatore fornito per ogni zona termica, la formula sopra descritta ha permesso di proporzionare la portata massima di aria fornita dal ventilatore in base alle dimensioni di ciascuna zona.

Il valore di portata d'aria minima, parametro sempre richiesto dal programma, è stato impostato come il 20% del valore di portata massima.

Il tipo di ventilatore obbligatoriamente associato al sistema di solaio ventilato in questo programma è quello "a volume costante" e prevede un'efficienza di 0,7 e un aumento di pressione basato sul calcolo del prodotto tra l'efficienza e la densità dell'aria in g/m³, diviso per la portata massima calcolata con la precedente formula.

Una volta compilati tutti i parametri richiesti dal programma in questo modo, è stato possibile fare la simulazione energetica dinamica del modello qui presentato, la cui descrizione approfondita è riportata nel capitolo seguente.

CAPITOLO 5: LE SIMULAZIONI ENERGETICHE DINAMICHE

5.1

Presentazione e analisi dei risultati

L'ultima fase di lavoro nell'ambito di questa tesi è stata quella delle simulazioni energetiche dinamiche finalizzate al confronto tra l'involucro tradizionale e quello responsivo di uno stesso edificio, ovvero il caso studio presentato nel capitolo 4.

Una volta modellato su *Design Builder*, infatti, il modello dell'edificio con involucro tradizionale è stato portato su *Energy plus* per svolgerne la simulazione energetica, in primo luogo per la maggior precisione di questo programma rispetto a *Design Builder* e in secondo luogo perché la simulazione dell'edificio con involucro responsivo sarebbe poi stata fatta con *Energy plus* e dunque in questo modo le simulazioni sarebbero state più allineate.

Lo svolgimento di questa parte di lavoro è stato impostato in tre step: innanzi tutto è stata fatta la simulazione energetica dell'edificio con involucro tradizionale al fine di studiarne alcuni parametri in ambiente interno. Il secondo step è stato quello di modellazione dell'elemento del solaio ventilato integrandolo ovviamente all'edificio con involucro tradizionale e il terzo step è stato quello di simulazione energetica dinamica di quest'ultimo modello con l'elemento responsivo per valutare nuovamente i parametri energetici e poter paragonare il comportamento dell'edificio nei due casi di diverso involucro.

Nell'ultima fase di lavoro le simulazioni dell'edificio implementato con l'elemento responsivo hanno però evidenziato una questione: i risultati segnalavano che l'impianto di tipo ideale, impostato nel primo modello e naturalmente mantenuto nel secondo, veniva in qualche modo sovrastato dall'inserimento del solaio ventilato e quindi non innescava il proprio funzionamento. Risultava infatti che il set-point di temperatura che doveva essere mantenuto da questo impianto non veniva mai rispettato e i fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento erano sempre pari a zero.

Tra la fase di simulazione del modello implementato con il solaio ventilato e quella di comparazione con il modello precedente, si è dunque introdotta una fase di prove per cercare di risolvere il problema dell'interazione tra impianto ideale ed elemento responsivo. Alla fine di questa fase tuttavia, la conclusione a cui numerosi tentativi hanno portato, è stata che *Energy plus* ha un limite per cui un impianto, come quello ideale in

cui la temperatura è limitata da dei valori di set-point impostati dal progettista, non può essere abbinato ad un sistema come quello del solaio ventilato.

Alla luce di questi risultati si è ipotizzato quindi che le caratteristiche di tale impianto, impostato per controllare la temperatura in ambiente, non sono compatibili con un elemento responsivo che comporta una variazione di temperatura in ambiente non controllabile da tale sistema.

Ciononostante, il fine della ricerca rimaneva comunque lo studio dell'influenza del solaio ventilato sul sistema dell'edificio e questo rimase comunque possibile, togliendo l'impianto ideale da entrambe le versioni degli edifici. L'impianto, sin dall'inizio della ricerca, era utile all'ottenimento dei fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento che potevano evidenziare alcune differenze tra i comportamenti energetici dei due edifici, ma, non essendo l'oggetto principale della ricerca, è stato comunque possibile toglierlo e quindi valutare le condizioni di *free-floating* delle temperature interne degli edifici.

Ciò vale a dire che l'impianto ideale è stato dunque tolto da entrambi i modelli energetici e sono state rifatte le simulazioni. Gli edifici in questo modo non erano più dotati di alcun impianto e quindi i risultati sono stati dati dalle sole caratteristiche d'involucro.

Sono stati ottenuti i valori di temperatura interna e operativa, ora per ora, ed è stato quindi possibile appurare le differenze nel comportamento energetico delle due versioni dell'edificio basandosi sulle diverse temperature in ambiente interno.

Il solaio ventilato impostato nel modello si attiva dal 1° Giugno al 30 Settembre e funziona dalle 21.00 alle 07.00. Questa fascia oraria è stata scelta nell'ipotesi che in questo intervallo di tempo le temperature esterne siano le più basse della giornata e quindi le più adatte per il funzionamento del solaio, inoltre alcuni dei carichi interni, come per esempio quelli dell'illuminazione, iniziano a partire dalle 07.00 e dunque si è pensato di interrompere il flusso d'aria nel solaio nel momento in cui si innescano gli apporti interni. Nel programma, le impostazioni di questo elemento responsivo offrono, volendo, anche la possibilità di prevedere che esso funzioni sia in periodo estivo che invernale. Il funzionamento invernale consiste nel fatto che durante la notte (periodo *Off-peak* della giornata) venga fatta passare nei fori del solaio aria calda, trattata ovviamente da un impianto di riscaldamento dell'aria, in modo che il calore venga accumulato dalla massa termica del solaio. Il sistema smette di funzionare la mattina e dunque da quel momento il solaio comincia a rilasciare lentamente calore durante il giorno in modo da ridurre il fabbisogno di riscaldamento diurno ed avere un risparmio economico.

Nell'ambito di questa tesi, la scelta è stata quella di far funzionare il solaio ventilato solo in periodo estivo per non introdurre impianti di trattamento dell'aria, ma solo ventilatori necessaria alla spinta dell'aria presa dall'esterno e non trattata. In questo caso però, il

programma ha un limite, ovvero, non prevede che il sistema si possa in qualche modo chiudere al passaggio dell'aria esterna nel periodo di non utilizzo del solaio (il periodo invernale, in questo caso) e dunque ne risulta che le temperature interne in inverno sono influenzate dall'ingresso di aria esterna.

Per questo motivo i risultati sono stati considerati solo per il periodo di funzionamento del solaio ventilato e dunque da Giugno a Settembre, periodo in cui è possibile paragonare le differenze di temperature dovute all'intervento di questo elemento responsivo nell'involucro.

In linea generale, i risultati in condizioni di *free-floating* delle temperature mostrano delle differenze apprezzabili e quindi tendenzialmente rispecchiano il comportamento auspicabile di questo elemento responsivo. Ciò significa che, dal mese di Giugno a quello di Settembre, i risultati mostrano che le temperature in ambiente interno dell'edificio con involucro tradizionale sono tendenzialmente più alte di quelle dell'edificio con il solaio ventilato.

Data la fitta divisione in zone termiche dell'edificio oggetto di questa ricerca, è stato scelto di presentare i risultati relativamente alle zone dei principali uffici dell'ultimo piano, nei quattro principali orientamenti di Nord, Sud, Est e Ovest. Per tutti i risultati presentati di seguito, si considerino essi rappresentativi dell'intero edificio.

Il fatto che, in linea generale, l'andamento delle temperature dell'edificio con il solaio ventilato sia minore rispetto a quello delle temperature dell'edificio con involucro tradizionale, può essere riscontrato dalla seguente tabella. Essa mostra, per ogni mese considerato, la differenza tra la temperatura ottenuta dalla simulazione dell'edificio con involucro tradizionale e quella dell'edificio con il solaio ventilato. Come precedentemente accennato, le temperature sono relative alle zone sopra descritte del quarto piano dell'edificio e sono rappresentative dell'intero edificio.

DIFFERENZE DI TEMPERATURE MEDIE MENSILI TRA L'INVOLUCRO TRADIZIONALE E L'INVOLUCRO CON SOLAIO VENTILATO	ΔT GIUGNO [°C]	ΔT LUGLIO [°C]	ΔT AGOSTO [°C]	ΔT SETTEMBRE [°C]
ZONA: UFFICI SUD, PIANO 4	5.32	4.45	6.73	7.92
ZONA: UFFICI NORD, PIANO 4	4.58	3.25	4.99	5.95
ZONA: UFFICI EST, PIANO 4	2.35	1.51	2.73	3.60
ZONA: UFFICI OVEST, PIANO 4	2.25	3.35	2.55	3.35

Dalla tabella risulta evidente che dunque c'è una diminuzione delle temperature grazie all'uso del solaio ventilato e quindi tale elemento apporta un effettivo miglioramento in termini di raffrescamento dell'ambiente interno.

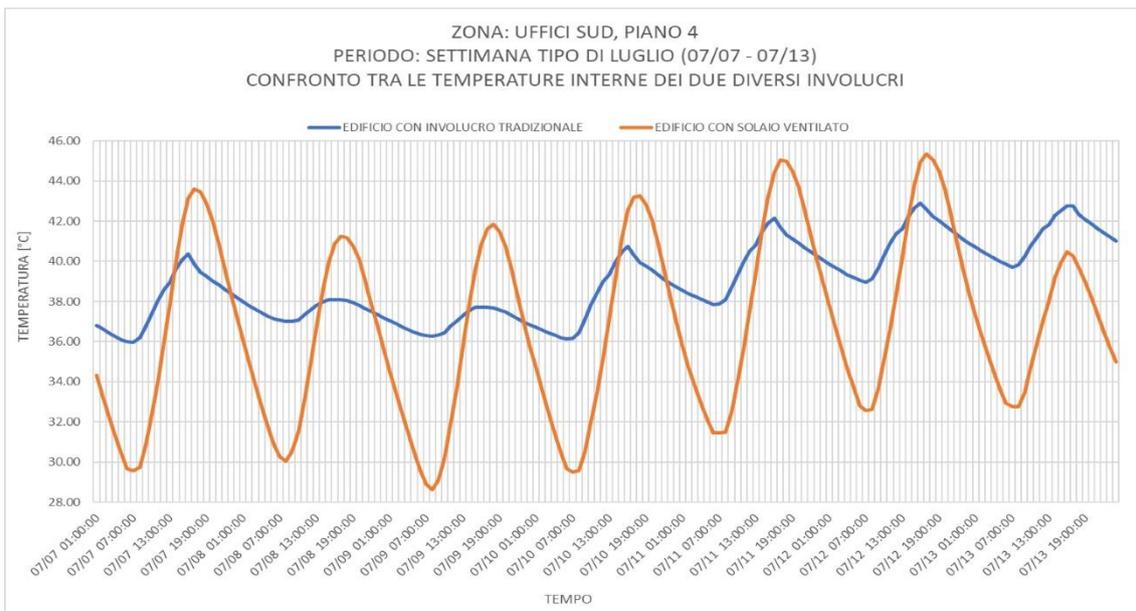
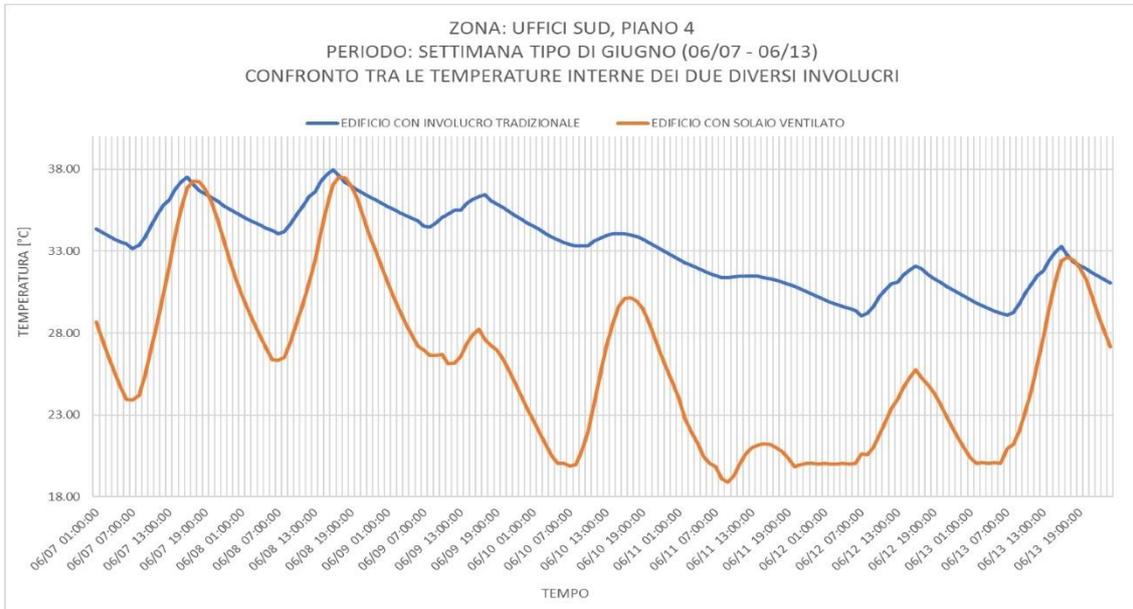
I mesi di Giugno, Agosto e Settembre hanno una notevole diminuzione delle temperature che va da un minimo di 2.25 °C ad un massimo di 7.92 °C. Il mese di Luglio presenta comunque una buona diminuzione delle temperature ma in misura minore rispetto agli altri mesi.

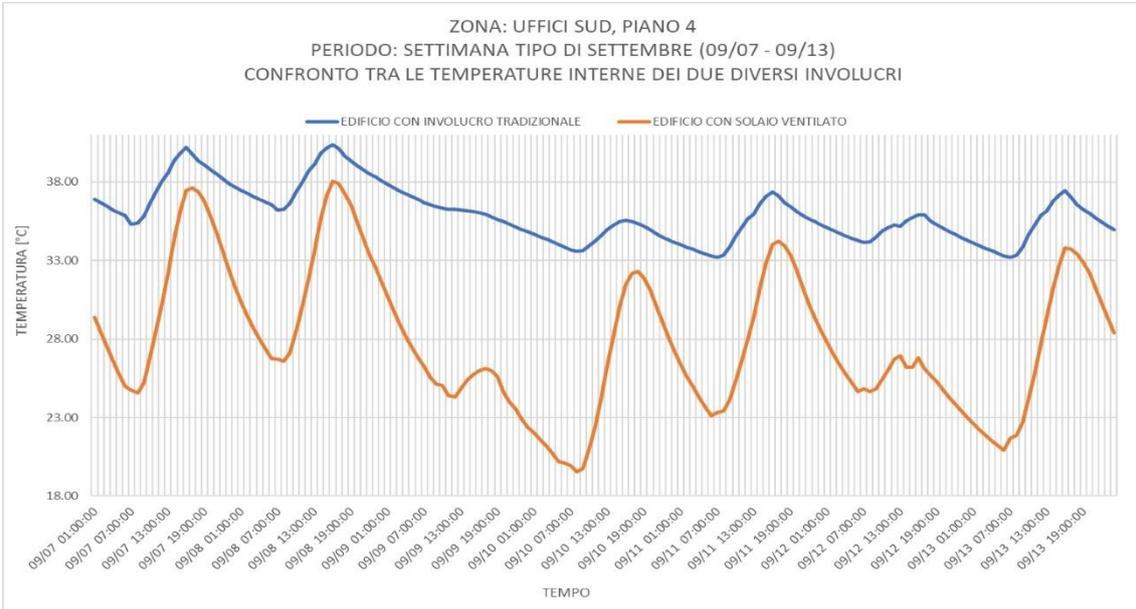
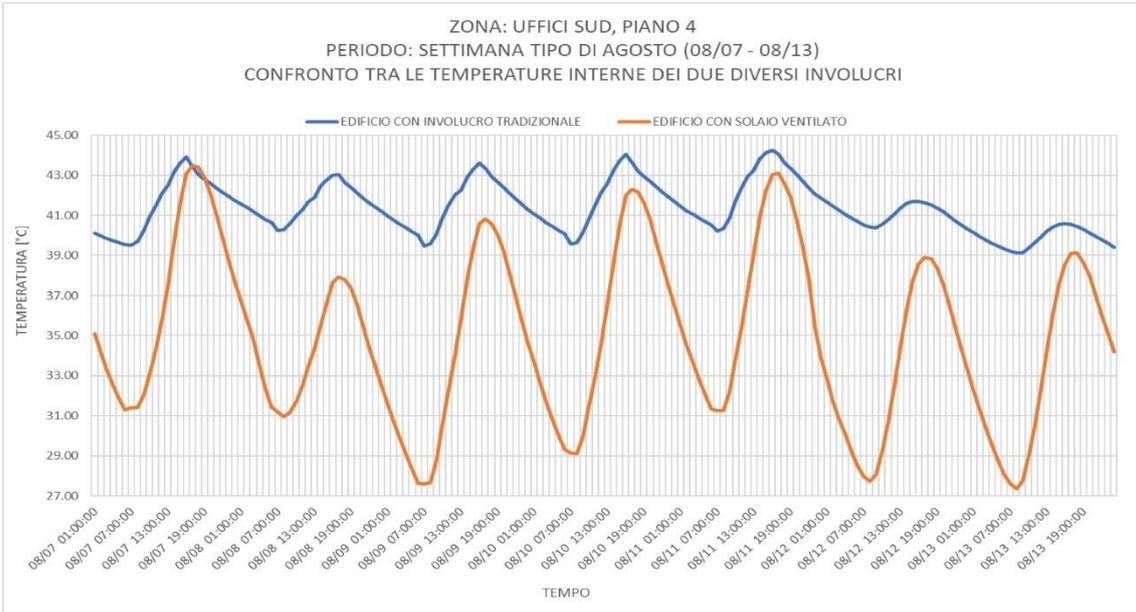
Per osservare i risultati con maggior dettaglio è stato inoltre utile produrre dei grafici, per ognuna delle quattro zone termiche rappresentative dell'edificio, che mostrano la comparazione tra gli andamenti delle temperature delle due versioni dell'edificio. Tali grafici sono stati riferiti a delle "settimane tipo", ovvero dei periodi di tempo giudicati significativi ai fini delle comparazioni. Le settimane scelte sono:

- La settimana dal 7 al 13 Giugno
- La settimana dal 7 al 13 Luglio
- La settimana dal 7 al 13 Agosto
- La settimana dal 7 al 13 Settembre

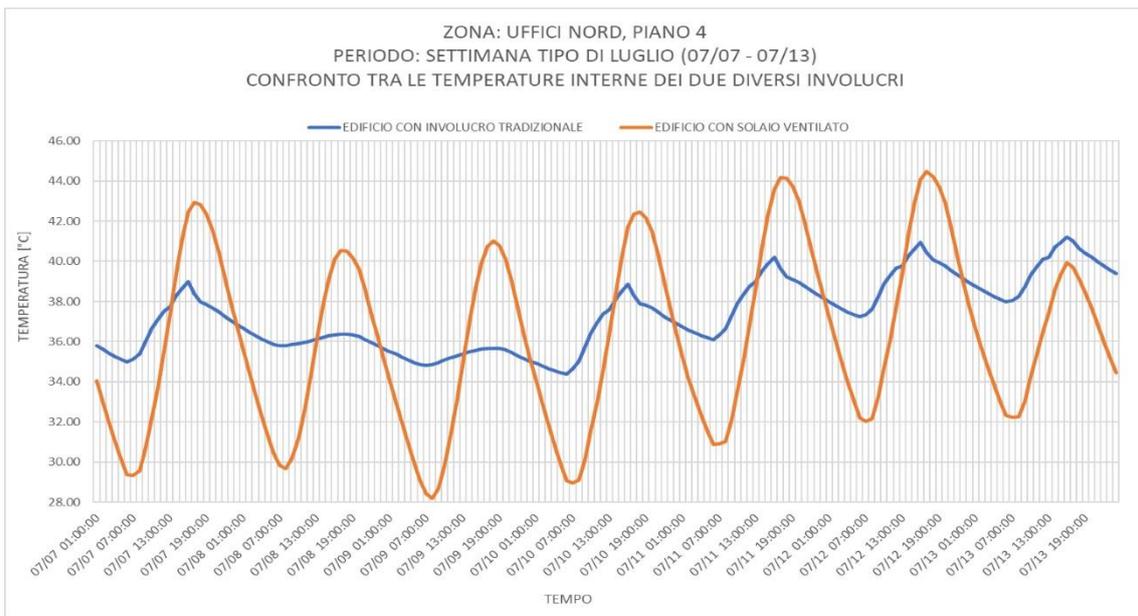
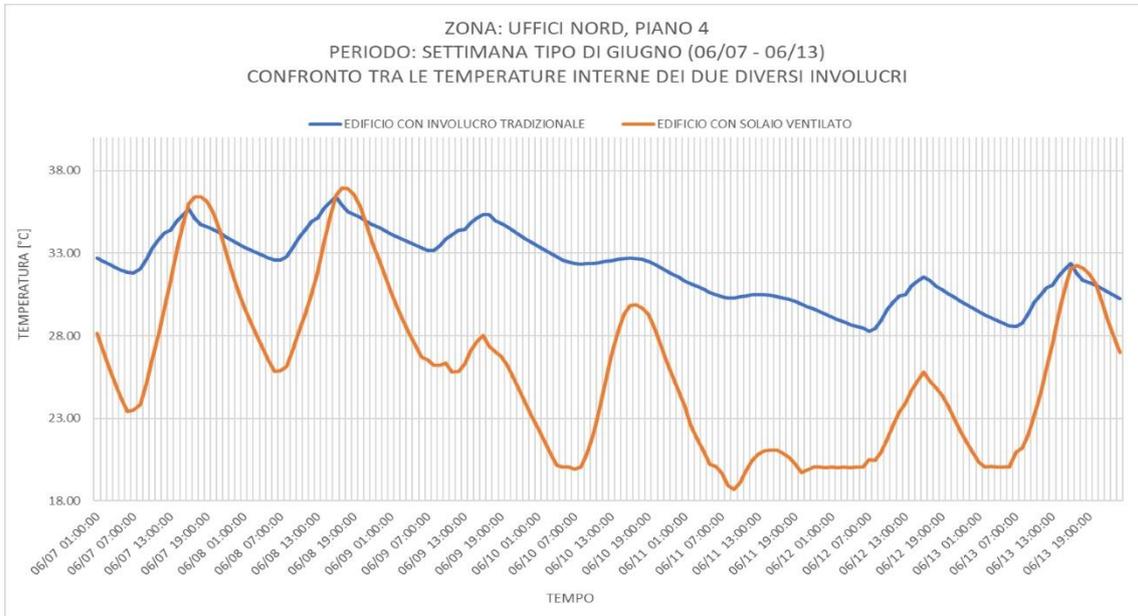
Di seguito si riportano i grafici prodotti ordinati in base alla zona a cui essi sono relativi. La sequenza è impostata in modo da presentare, per ogni zona, i risultati relativi a Giugno, poi a Luglio, poi ad Agosto e infine a Settembre. In ogni grafico la linea arancione rappresenta l'andamento delle temperature dell'involucro con solaio ventilato e la linea blu quelle dell'involucro tradizionale.

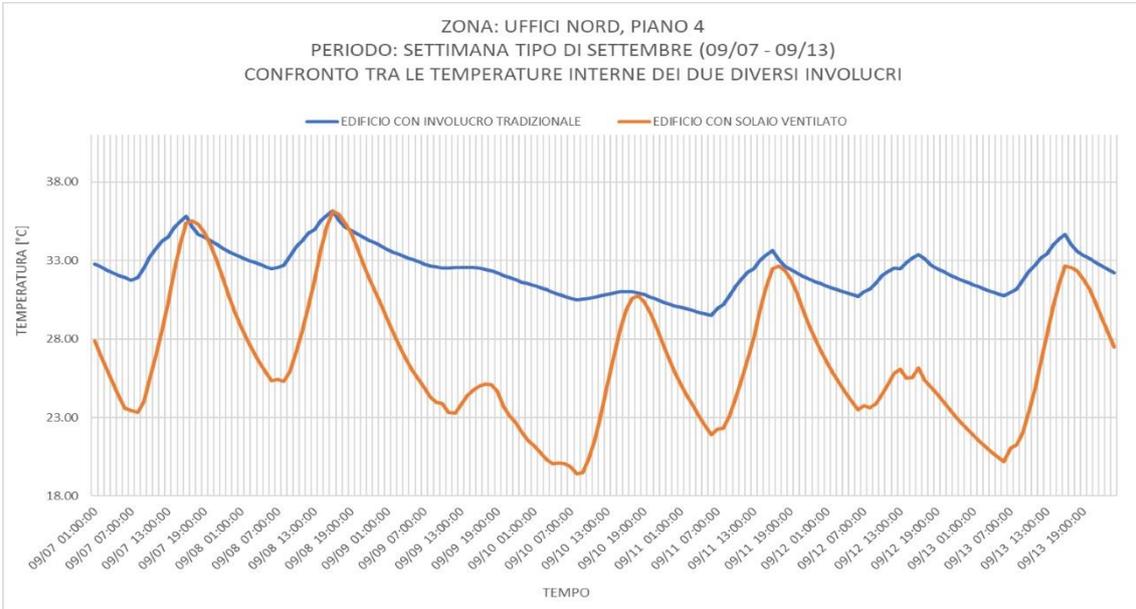
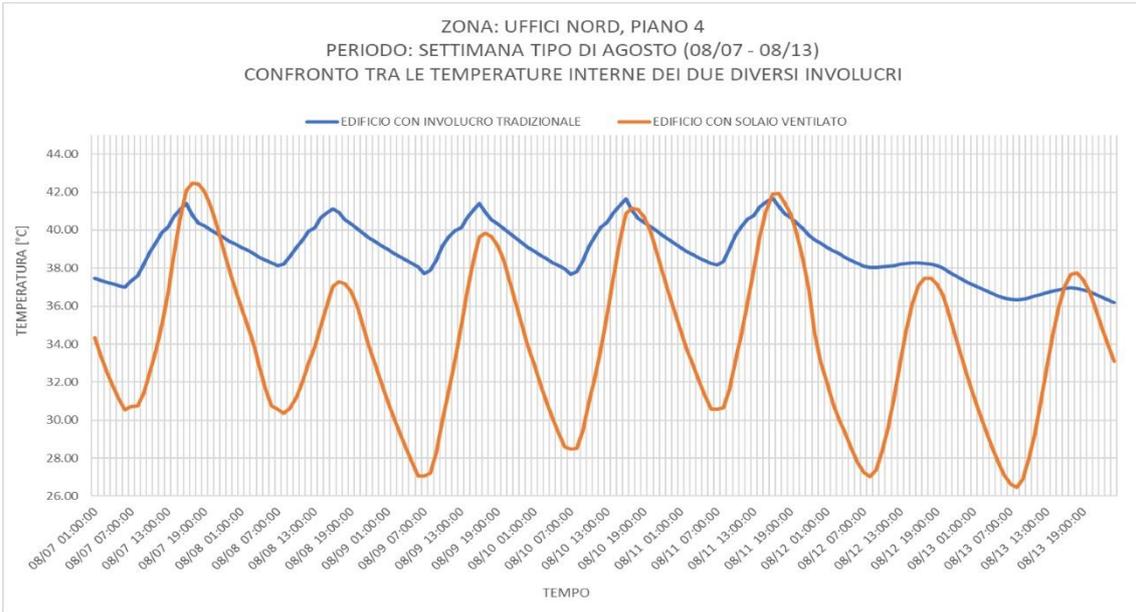
Zona termica degli uffici Sud al quarto piano:



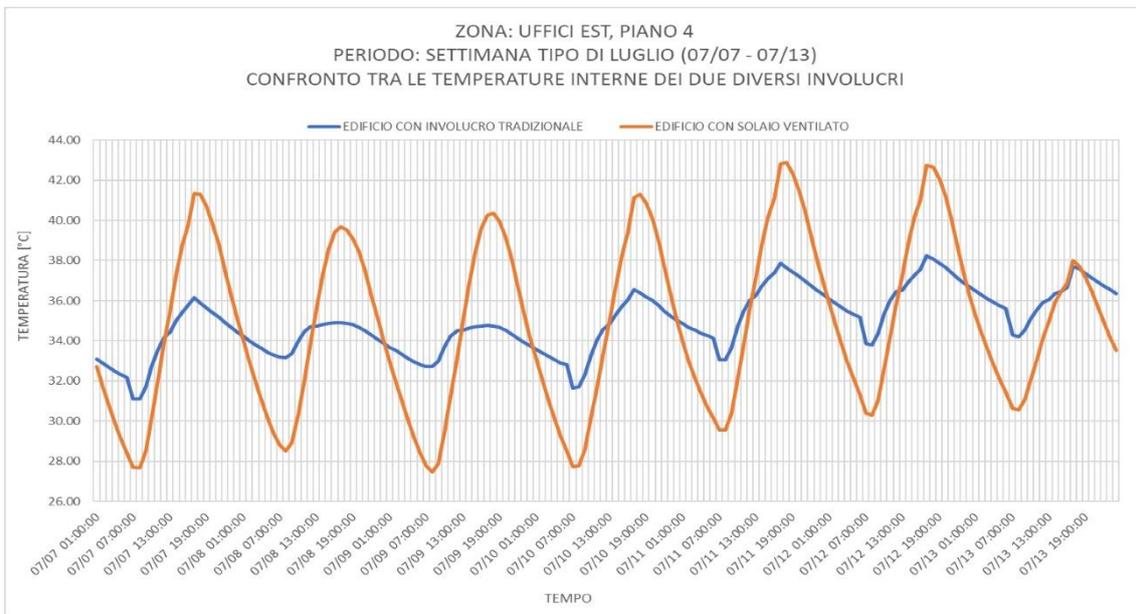
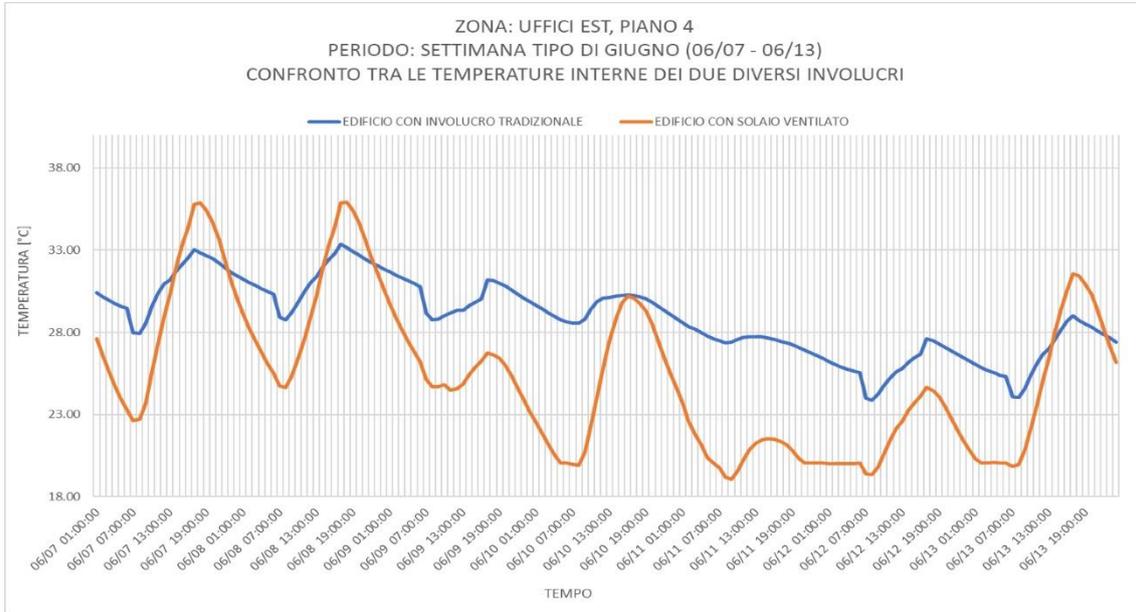


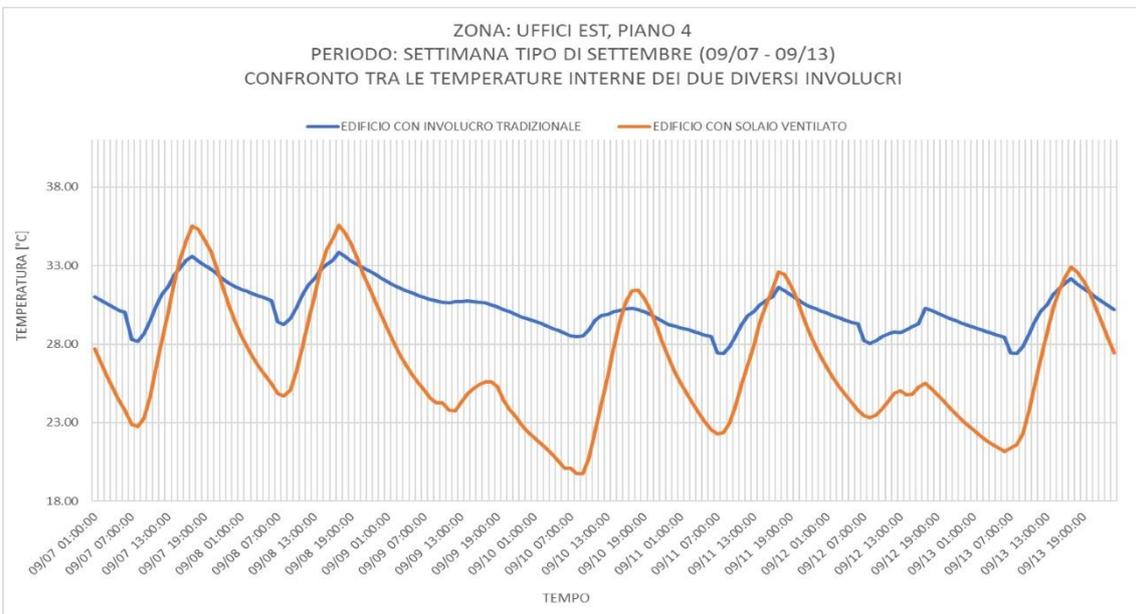
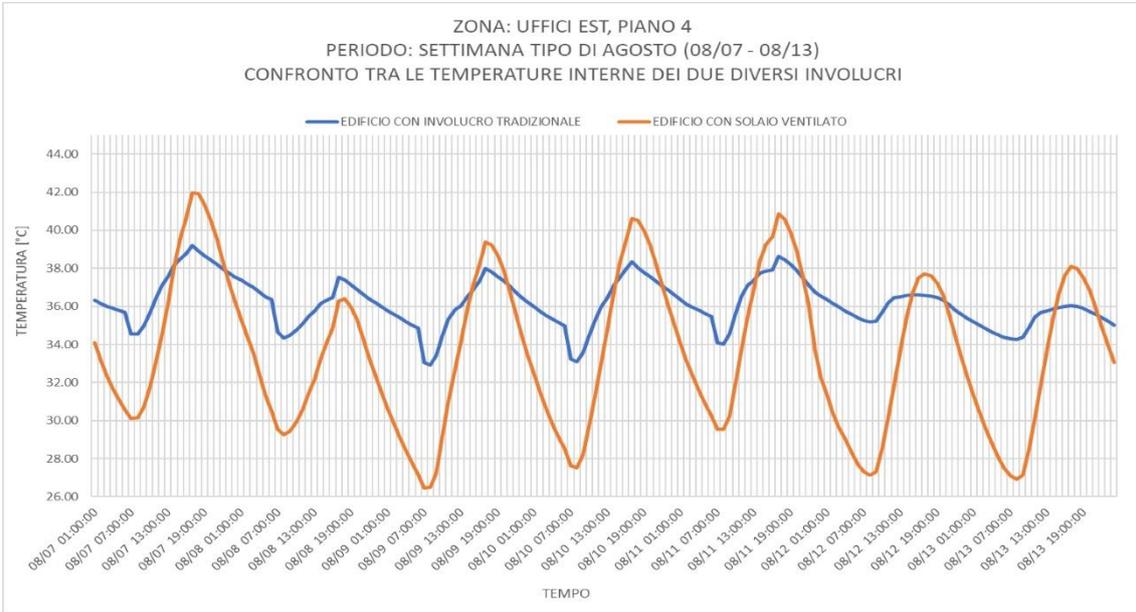
Zona termica degli uffici Nord al quarto piano:



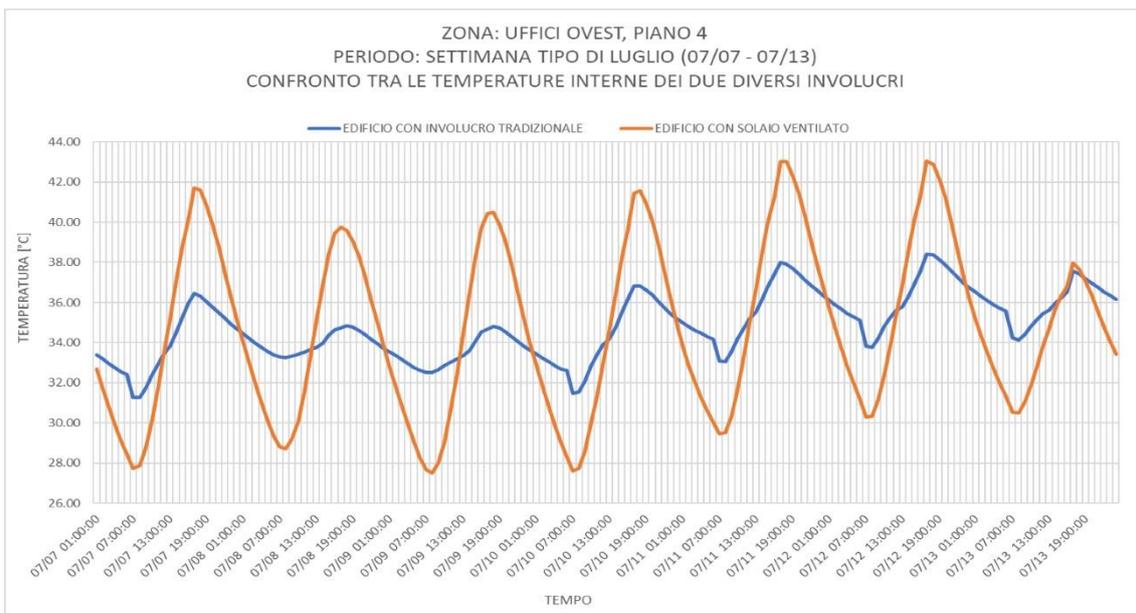
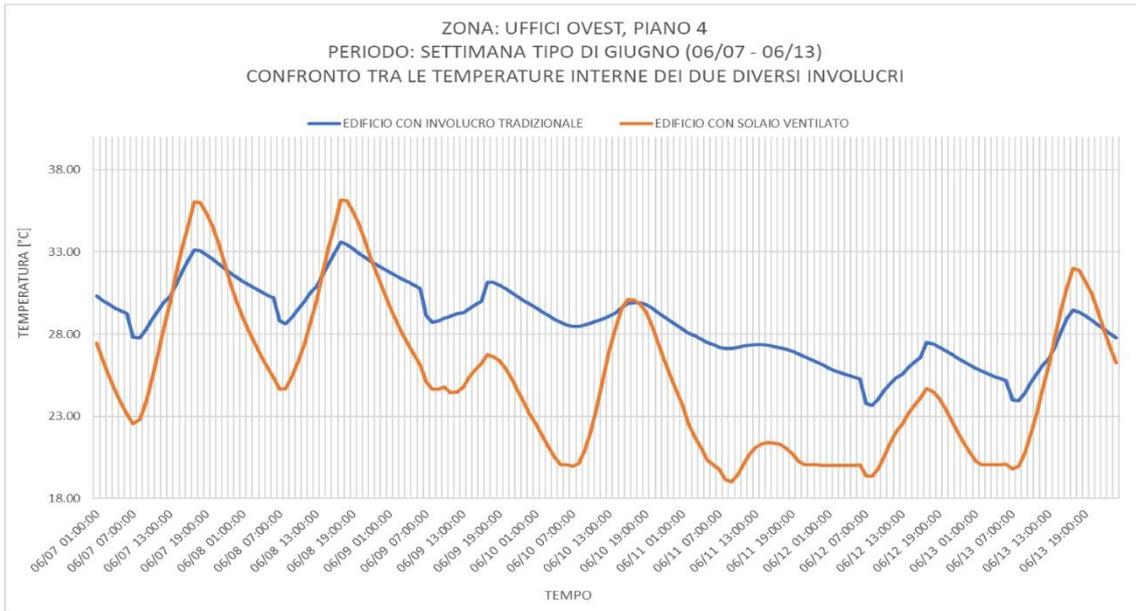


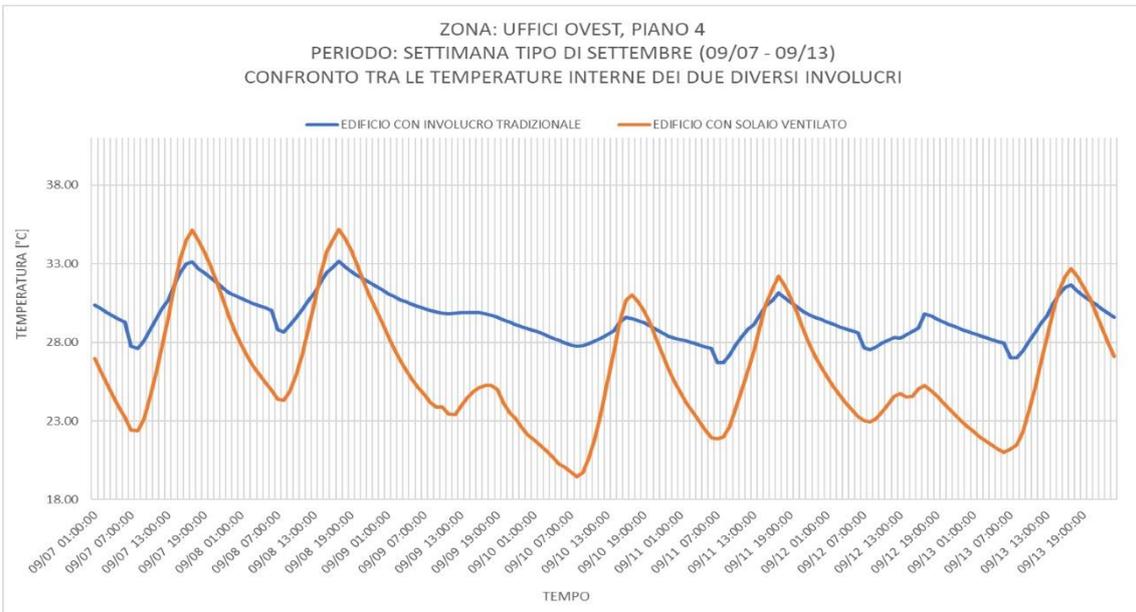
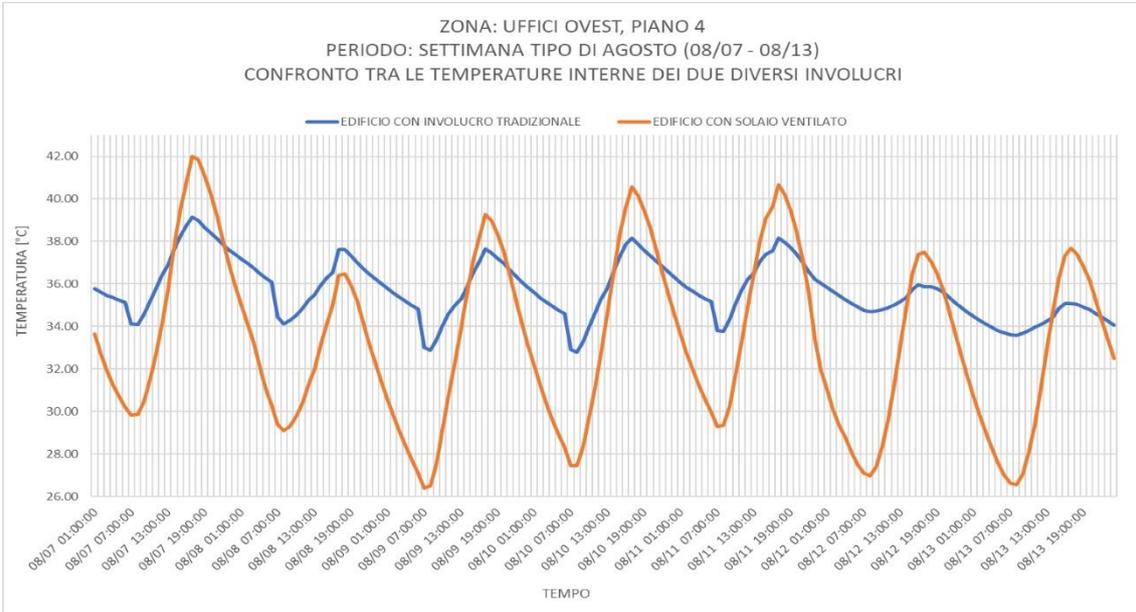
Zona termica degli uffici Est al quarto piano:





Zona termica degli uffici Ovest al quarto piano:





Attraverso l'osservazione dei dati dettagliati presentati in questi grafici, è possibile fare alcune considerazioni:

In linea generale, questi grafici confermano che nella maggior parte dei casi l'andamento delle temperature dell'involucro con solaio ventilato rimane più basso di quello dell'involucro tradizionale. La tendenza è dunque quella di un effettivo beneficio dell'uso di questo elemento responsivo.

L'eccezione più consistente è data dai grafici relativi al mese di Luglio, mese in cui, come già si intuiva dalla tabella delle differenze medie mensili, l'efficacia del solaio ventilato sembra non essere ottimale.

La peculiarità di quest'anomalia sta nel fatto che nel mese precedente e successivo, ovvero a Giugno e ad Agosto, i dati rispecchiano invece un buon funzionamento di questo sistema.

La motivazione potrebbe risiedere nel dato climatico utilizzato nella simulazione che, nell'ambito di questa ricerca, è fornito dal sito ufficiale di *Energy Plus* e si fonda sui dati dell'*American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers* (ASHRAE). Innanzi tutto, questo file influenza uno svariato numero di parametri all'interno del modello energetico e dunque è difficile definire con certezza quale sia il parametro maggiormente responsabile di una tale oscillazione dei valori.

Inoltre, c'è da dire che, stando ai valori delle condizioni climatiche medie mensili riportate nei risultati della modellazione, Luglio risulta avere, rispetto a tutti gli altri mesi, i valori più alti nella maggior parte dei parametri. Tra questi, ad esempio vi sono i più alti valori di radiazione solare diretta per area e di temperatura esterna a bulbo secco dell'anno.

Nella tabella di seguito si riportano i suddetti valori delle condizioni climatiche medie mensili:

MONTHLY AVERAGE DATA	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JULY	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
SITE OUTDOOR AIR DRYBULB TEMP. [°C]	1.78	3.85	8.13	11.86	16	19.48	23.04	21.98	18.2	12.4	6.32	2.62
SITE OUTDOOR AIR WETBULB TEMP. [°C]	-0.1	1.85	6.06	8.41	13.07	16.25	19.84	18.68	15.9	11.2	4.17	0.8
SITE OUTDOOR AIR DEWPOINT TEMP. [°C]	-3	-1	3.95	5.14	11.06	14.31	18.36	16.98	14.6	10.4	1.35	-1.9
SITE WIND SPEED [m/s]	1	0.4	0.53	1.78	1.82	2.27	0.47	0.44	0.16	0.25	1.32	1.23
SITE SKY TEMPERATURE [°C]	-12	-10.3	-4.9	-0.6	5.47	8.25	12.96	11.63	7.76	1.1	-6.3	-11.3
SITE DIFFUSE SOLAR RADIATION RATE PER AREA [W/m ²]	33.5	54.59	69.44	96.11	111.8	116.2	103.4	102.3	78.8	56.7	37.2	31.1
SITE DIRECT SOLAR RADIATION RATE PER AREA [W/m ²]	62.8	81.83	102.4	117.7	143.8	172.5	222.3	181.7	126	86.2	69	48.6

Visti i risultati dei grafici e visti questi valori climatici medi mensili, si potrebbe dunque supporre che in condizioni estive di alti valori di radiazione solare diretta e diffusa e di alta temperatura esterna a bulbo secco e umido, caratteristici come in questo caso del mese di Luglio della fascia climatica E in Italia, il solaio ventilato non abbia un funzionamento ottimale e dunque non apporti un totale beneficio ai consumi energetici dell'edificio.

Una possibile strategia di miglioramento in tal senso potrebbe essere quella di porre un controllo sulle condizioni di funzionamento del solaio ventilato, come ad esempio disattivarne il funzionamento in presenza di valori di temperatura esterna superiori ad un certo limite.

Per i restanti mesi estivi tuttavia, il comportamento del solaio ventilato rimane un elemento che agisce positivamente sulle temperature in *free-floating* dell'edificio e dunque ne rispecchia un funzionamento ottimale.

Un'altra considerazione valida per tutti i grafici riguarda le differenze tra le temperature. Innanzi tutto, nell'arco della settimana il movimento delle temperature si ripete in modo pressoché uguale per tutti i giorni della settimana: esse hanno andamento negativo dall'una di notte fino alle 9 circa, orario in cui iniziano gli apporti interni. Da qui fino alla fine della giornata lavorativa (e quindi anche fino alla fine dell'introduzione dei carichi), ovvero fino alle 19 – 20, le temperature hanno andamento tendenzialmente positivo. Infine, dalle 20 fino alla fine della giornata tendono nuovamente a scendere. Una considerazione importante a questo proposito, riscontrabile soprattutto nei casi di Giugno, Agosto e Settembre è che negli andamenti negativi la differenza tra la temperatura dell'edificio con solaio ventilato e quella dell'edificio con involucro tradizionale tende sempre ad amplificarsi, tant'è che nei grafici le due curve tendono separarsi o quanto meno ad avere un andamento parallelo.

Dal momento in cui l'andamento delle temperature cambia, e quindi passa da negativo a positivo, le temperature tendono ad avere una minore differenza e le curve del grafico si avvicinano fino ad avere dei valori molto simili negli orari di picco.

A proposito dei valori di picco delle temperature, sempre nei mesi di Giugno, Agosto e Settembre, quelli dell'involucro con solaio ventilato sono sempre minori o uguali a quelli dell'edificio tradizionale.

Luglio costituisce un'eccezione per quanto riguarda i valori di picco, dal momento che le temperature dell'edificio con solaio ventilato rispetto all'altro edificio hanno picchi più bassi negli andamenti negativi delle temperature, e fin qui è un comportamento prevedibile e auspicabile, ma hanno anche picchi più alti negli andamenti positivi delle temperature. A Luglio infatti, sembra che alla fine della giornata lavorativa (quindi tra le 16.00 e le 18.00) la temperatura interna sia più alta con il solaio ventilato.

C'è da dire tuttavia, che finché i picchi con il solaio ventilato sono più alti di quelli dell'involucro normale al di fuori degli orari di occupazione o comunque verso la loro fine, non ci sono problemi di discomfort per gli occupanti.

Ad ogni modo, dai risultati presentati è comunque sicuramente possibile dire che l'introduzione di questo elemento fa la differenza. Tale differenza inoltre, in termini di

temperature, non solo si nota, ma nella maggior parte dei casi risulta anche apportare un miglioramento all'edificio.

Il solaio ventilato è sicuramente una tecnologia che ad oggi presenta ancora diversi limiti e diversi aspetti con necessità di ulteriore ricerca e sviluppo, sia a livello di strumenti di studio, come ad esempio i programmi per la modellazione energetica, sia a livello pratico e applicativo.

Tuttavia, stando ai risultati dell'analisi qui presentata, si può giungere a due importanti conclusioni:

La prima è che intanto il solaio ventilato risulta costituire sicuramente uno strumento promettente e utile alla diminuzione dei consumi energetici dell'edificio nel periodo estivo.

La seconda, è che probabilmente la sua applicazione sia maggiormente efficace in contesti climatici caratterizzati da condizioni climatiche medie estive più moderate rispetto a quelle della fascia climatica E italiana, in cui è stato simulato il presente studio.

5.2 Conclusioni

La ricerca di questa tesi si è svolta sia sotto il punto di vista teorico che sotto quello pratico, approcciando la conoscenza degli elementi responsivi d'involucro a livello teorico, per poi applicarla al metodo della simulazione energetica dinamica.

L'obiettivo è stato innanzi tutto quello di approfondire la tematica di questi elementi e di proporre una descrizione sfaccettata e critica, che mettesse insieme le informazioni più salienti della letteratura ad oggi disponibile sul tema. A partire dalle ricerche bibliografiche sono stati scelti i tre elementi responsivi oggetto dell'approfondimento di questa tesi, quali: le facciate attive, i PCM e il solaio ventilato. Tra questi è poi stato scelto il solaio ventilato per la fase pratica di simulazione energetica dinamica data la sua compatibilità con i programmi a disposizione, quali *Design Builder* ed *Energy Plus*.

Lo scopo proprio della modellazione non era quello di dimostrare che il solaio ventilato conferisse un migliore comportamento energetico all'edificio, purché ciò fosse auspicabile, bensì di comparare i risultati ottenuti dall'involucro tradizionale e da quello implementato con questo elemento per capire come esso potesse agire sull'edificio, quali potessero essere i vantaggi e i limiti e poi ipotizzare delle deduzioni sulle possibili motivazioni.

Nonostante l'iniziale ostacolo dell'interazione tra l'impianto impostato e il solaio ventilato, la ricerca ha comunque prodotto dei risultati che permettono di comparare i comportamenti energetici delle due versioni dell'edificio e l'efficacia del solaio ventilato. La ricerca ha quindi portato innanzi tutto alla luce il fatto che il programma di simulazione energetica usato in questo ambito presenta ancora dei limiti in materia di simulazione di questo elemento responsivo, cosa tuttavia normale visto che questo tema in generale è un oggetto di ricerca recente, ancora in fase di sviluppo.

Inoltre, è stato presentato il confronto tra i due involucri in termini di *free-floating* delle temperature, che ha mostrato in generale un funzionamento auspicabile del solaio ventilato e la sua efficacia nel periodo di utilizzo. Le temperature estive all'interno dell'edificio sono infatti tendenzialmente più basse con l'utilizzo di questo elemento rispetto al normale edificio con involucro tradizionale.

Alla luce delle riflessioni sulle temperature, si può constatare che, in un edificio per uffici, abbinando questo elemento responsivo ad un normale impianto di raffrescamento, esso possa essere sottodimensionato garantendo un risparmio economico ed energetico.

In più, durante la fase di esercizio dell'edificio, vi sarebbero ulteriori risparmi energetici ed economici grazie al funzionamento notturno del sistema che sfrutta i periodi *Off-peak*

della giornata e permette minori consumi, vista la sua generale efficacia provata con lo studio delle sole temperature.

In termini di comfort inoltre, questo sistema porta l'ambiente ad una temperatura confortevole all'inizio del periodo di occupazione che si mantiene tendenzialmente sempre al di sotto di quella che sarebbe la temperatura di un edificio con involucro normale.

Il funzionamento del sistema infine, non causa problematiche di tipo acustico dovuto al funzionamento dei ventilatori, dal momento che essi sono in funzione al di fuori del periodo di occupazione.

In conclusione, il solaio ventilato, così come gli altri elementi responsivi, è uno strumento sicuramente promettente ma che ancora necessita di ulteriore ricerca e sviluppo. Ad ogni modo, la ricerca di soluzioni che permettano un minor consumo di energia e meno emissioni inquinanti nel settore delle costruzioni è diventata una necessità al giorno d'oggi, sia essa relativa al mondo degli impianti oppure a quello dell'involucro.

Gli elementi responsivi possono costituire una possibile soluzione in questo contesto, grazie alla loro capacità di rendere l'involucro edilizio in grado di rispondere alle sollecitazioni climatiche con un minor consumo di energia. Per questo è bene che la ricerca continui ad investire sull'ulteriore studio di questi elementi e li renda sempre più performanti.

Per il bene dell'ambiente in cui viviamo, ma soprattutto per il nostro e per quello delle generazioni future, saranno necessari tutti gli sforzi e gli investimenti possibili per ridurre l'impatto ambientale del settore delle costruzioni.

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

Bibliografia:

- [1] A. Van Der Aa, P. Heiselberg, M. Perino, *Designing with responsive building elements*, in *Integrating environmentally responsive elements in buildings (Annex 44)*, IEA-ECBCS, Aalborg University, Giugno 2011
- [2] L. Bianco, V. Serra, *Involucri opachi e trasparenti di ultima generazione: prestazioni energetiche e soluzioni tecniche*, in *Atti e rassegna tecnica*, vol. LXVI, n.° 1-2-3, Graphic Center Srl, Torino, 2012, pg. 61-68
- [3] Direttiva 16 Dicembre 2002, n.° 2002/91/CE del parlamento europeo e del consiglio in materia di rendimento energetico nell'edilizia (EPBD)
- [4] D. Lgs. 19 Agosto 2005, n.° 192, in materia di rendimento energetico nell'edilizia
- [5] Direttiva 19 Maggio 2010, n.° 2010/31/UE del parlamento europeo e del consiglio in materia di prestazione energetica nell'edilizia (EPBD Recast)
- [6] Direttiva 23 Aprile 2009, n.° 2009/29/CE del parlamento europeo e del consiglio in materia di emissione di gas a effetto serra
- [7] D. M. 26 Giugno 2015, in materia di certificazione energetica degli edifici
- [8] P. Heiselberg, *Expert guide: Part 1. Responsive building concepts*, in *Integrating environmentally responsive elements in buildings (Annex 44)*, IEA-ECBCS, Aalborg University, Novembre 2009
- [9] I. Andresen et al., *State of the art review*, in *Integrating environmentally responsive elements in buildings (Annex 44)*, vol. 2B, IEA-ECBCS, Aalborg University, 2008
- [10] M. Perino et al., *State of the art review*, in *Integrating environmentally responsive elements in buildings (Annex 44)*, vol. 2A, IEA-ECBCS, Aalborg University, 2008
- [11] M. Perino et al., *Expert guide: Part 2. Responsive building elements*, in *Integrating environmentally responsive elements in buildings (Annex 44)*, IEA-ECBCS, Aalborg University, Novembre 2009

- [12] Ø. Aschehoug, I. Andresen, *State of the art review*, in *Integrating environmentally responsive elements in buildings (Annex 44)*, vol. 1, IEA-ECBCS, Aalborg University, 2008
- [13] A. Mazzotta, *Spazi Buffer: tassonomia e principi 2*, Dispense della lezione 11 del corso *Principi di progettazione tecnologico-ambientale, Il paesaggio costruito tra tecnica e immagine oggi*, 18 Maggio 2016
- [14] L. Cabeza, H. Mehling, *Heat and cold storage with PCM: an up to date introduction into basics and applications*, Berlin, Springer, 2008
- [15] Y. Cascone, supervisor M. Perino, A. Capozzoli, *Optimisation of opaque building envelope components with phase change materials*, Politecnico di Torino, 2017
- [16] D. Zhou, C.Y. Zhao, Y. Tian, *Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications*, in *Applied Energy*, n.° 92, Elsevier, 2012, pg. 593-605
- [17] Ente per le Nuove tecnologie, l'Energia e l'Ambiente (ENEA), *Caratterizzazione del parco edilizio nazionale. Determinazione dell'edificio tipo per uso ufficio*, Ministero dello sviluppo economico, Marzo 2009
- [18] Ente per le Nuove tecnologie, l'Energia e l'Ambiente (ENEA), *Determinazione dei fabbisogni e dei consumi energetici dei sistemi edificio-impianto. Caratterizzazione del parco immobiliare ad uso ufficio*, Ministero dello sviluppo economico, Marzo 2009
- [19] Specifica tecnica UNI TS 11300, Parte 1, Ottobre 2014, in materia di prestazioni energetiche dell'edificio
- [20] I. Ballarini, *Prestazione energetica degli edifici in condizioni estive: l'effetto dell'isolamento termico*, PhD Thesis, Politecnico di Torino, 2011.
- [21] Proposta per l'allegato tecnico nazionale della normativa europea n.° EN 16798-1, in materia di performance energetica degli edifici.
- [22] D. Lgs. 29 Dicembre 2006, n.° 311, in materia di rendimento energetico nell'edilizia
- [23] D. Lgs. 4 Giugno 2013, n.° 63, in materia di rendimento energetico nell'edilizia

- [24] D. Lgs. 26 Giugno 2009, n.° 158, in materia di certificazione energetica degli edifici
- [25] L. 3 Agosto 2013, n.° 90, in materia di prestazione energetica dell'edificio
- [26] Allegato 1 (PANZEB) del D. M. 19 Giugno 2017, in materia di edifici a energia quasi zero
- [27] M. Lequio, relatori S. Corgnati e C. Becchio, *La replicabilità del modello nZEB all'interno del mercato immobiliare, attraverso l'analisi di Cost-Optimal*, Politecnico di Torino, Dicembre 2015
- [28] E. Bellini, relatori S. Corgnati, C. Becchio e V. Fabi, *Definizione di un piano di monitoraggio per un nZEB totalmente elettrico*, Politecnico di Torino, Dicembre 2017
- [29] E. Capuano, relatore C. Caldera, *Il futuro dell'edilizia sostenibile: edifici nZEB e la politica del 20-20-20. Sistemi di valutazione e confronto critico tra protocollo ITACA e LEED*, Politecnico di Torino, Marzo 2014
- [30] Building performance institute europe, *Principles for nearly zero energy buildings*, Brussel, Novembre 2011
- [31] Ente per le Nuove tecnologie, l'Energia e l'Ambiente (ENEA), *Analisi statistica sul parco edilizio non residenziale e sviluppo di modelli di calcolo semplificati*, Ministero dello sviluppo economico, Maggio 2009
- [32] F. Goia, *Dynamic building envelope components and nearly zero energy buildings*, NTNU Trondheim, 2013
- [33] P. Bevitori et al., *Progettazione sostenibile*, a cura di Paola Gallo, Firenze, Alinea, 2005
- [34] O. Eberhard, *Double skin facades*, Munich, Prestel book on architecture, 2001
- [35] F. Castelli, relatori G. Peretti, L. Fenzi, *L'involucro vetrato nell'edilizia per uffici dagli anni '60 ad oggi*, Politecnico di Torino, a.a. 1999/2000
- [36] A. Dama, D. Angeli, O. Larsen, *Naturally ventilated double-skin facade in modeling and experiments*, in *Energy and Buildings*, n.° 144, Elsevier, 2017, pg. 17-29

- [37] M. Zisa, relatori M. Perino, F. Goia, G. Lobaccaro, *Modeling and simulation of double skin façade using TRNSYS*, Politecnico di Torino, Marzo 2018
- [38] V. Tyagi, D. Buddhi, *PCM thermal storage in buildings: A state of art*, in *Science Direct*, n.° 11, Elsevier, 2007, pg. 1146-1166
- [39] L. Socaciu et al., *Review on phase change materials for building applications*, in *Leonardo electronic journal of practices and technologies*, n.° 13, Academic Direct, 2014, pg. 179-194
- [40] A. Sharma et al., *Review on thermal energy storage with phase change materials and applications*, in *Science Direct*, n.° 13, Elsevier, 2009, pg. 318-345
- [41] M.J. Ren, J.A. Wright, *A ventilated slab thermal storage system model*, in *Building and Environment*, vol. 33, n.° 1, Elsevier, 1997, pg. 43-52
- [42] B. Park, M. Krarti, *Development of a simulation analysis environment for ventilated slab system*, in *Applied thermal engineering*, n.° 87, Elsevier, 2015, pg. 66-78
- [43] Y. Tae Chae, R.K. Strand, *Modeling ventilated slab system using a hollow core slab: Implementation in a whole building energy simulation program*, in *Energy and Buildings*, n.° 57, Elsevier, 2013, pg. 165-175
- [43] X. Xu et al., *Research and application of active hollow core slabs in building systems for utilizing low energy sources*, in *Applied energy*, n.° 116, Elsevier, 2014, pg. 424-435
- [44] S. Corgnati, A. Kindinis, *Thermal mass activation by hollow core slab coupled with night ventilation to reduce summer cooling loads*, in *Science Direct*, n.° 42, Elsevier, 2007, pg. 3285-3297
- [45] N. Barnard, *Thermal mass and night ventilation – Utilising “hidden” thermal mass*, in *International journal of ventilation*, vol. 1, n.° 2, Taylor and Francis, 2002, pg. 81-90
- [45] S. Corgnati, A. Kindinis, *Thermal mass activation by hollow core slab coupled with night ventilation to reduce summer cooling loads*, in *Science Direct*, n.° 42, Elsevier, 2007, pg. 3285-3297

- [46] A. Faheem et al., *A numerical study on the thermal performance of night ventilated hollow core slabs cast with micro-encapsulated PCM concrete*, in *Energy and buildings*, n.° 127, Elsevier, 2016, pg. 892-906
- [47] Design Builder ©, *DesignBuilder EnergyPlus Simulation Documentation*, 2008-2011
- [48] U.S. Department of Energy, *Getting started*, in *EnergyPlus™ Version 8.6 Documentation*, 2016
- [49] U.S. Department of Energy, *Engineering Reference*, in *EnergyPlus™ Version 8.6 Documentation*, 2016
- [50] U.S. Department of Energy, *Input Output Reference*, in *EnergyPlus™ Version 8.6 Documentation*, 2016
- [51] U.S. Department of Energy, *Output Details and Examples*, in *EnergyPlus™ Version 8.6 Documentation*, 2016
- [52] C. Beccari et al., *Saper comunicare: Cenni di scrittura tecnico-scientifica*, Torino, Politecnico di Torino, 2011
- [53] L. Bianco, M. Perino, *Il ruolo dell'involucro nell'edificio a basso consumo energetico*, in *Atti e rassegna tecnica*, vol. LXVI, n.° 1-2-3, Graphic Center Srl, Torino, 2012, pg. 53-60
- [54] P. K. Dehdezi et al, *Thermal, mechanical and microstructural analysis of concrete containing microencapsulated phase change materials*, in *International Journal of Pavement Engineering*, Taylor and Francis, 2012, pg. 1-14

Sitografia (consultata tra Giugno 2018 e Febbraio 2019):

- www.uni.com
- www.iea-ebc.org
- www.thermodeck.it
- www.architects.org
- www.eenmooigebar.nl
- www.ibec.or.jp
- www.wikipedia.it
- www.designbuilder.com
- www.designbuilderitalia.it
- www.bigladdersoftware.com
- www.wikihow.it
- www.energyplus.com
- www.docsity.com
- www.cresme.it
- www.context.reverso.it
- www.matematicamente.it
- www.oppo.it
- www.treccani.it
- www.rubitherm.eu

RINGRAZIAMENTI

In merito al progetto di questa tesi vorrei ringraziare:

Il professor Vincenzo Corrado per aver interpretato la mia idea iniziale e averla saputa indirizzare verso la ricerca in cui si è sviluppata e per essere stato un relatore disponibile e chiaro.

La professoressa Ilaria Ballarini per aver seguito, controllato e corretto il mio lavoro con pazienza e cortesia ma soprattutto con grandissima disponibilità.

Giovanna De Luca per avermi aiutato nei passaggi più difficili.

A conclusione del mio percorso universitario vorrei inoltre ringraziare tutti coloro che, lontani o vicini, ne hanno fatto parte e mi hanno supportato e affiancato.

Ringrazio i miei compagni di gruppo e di corso con cui ho condiviso i giorni e le notti, i successi e gli insuccessi, gli esami, i progetti, le brutte figure e le risate.

Ringrazio le mie amiche di Bergamo che sono un pezzo del mio cuore e lo sono da anni, che mi sono sempre vicine e con cui ho condiviso tutto di questo percorso, anche se a distanza.

Ringrazio tutti i compagni conosciuti a Weimar che mi hanno affiancato nell'esperienza dell'Erasmus e tutti gli amici trovati a Torino che hanno condiviso con me questi anni.

Ringrazio il mio ragazzo che in questo percorso è stato il mio sostenitore numero uno, sempre.

Infine, un enorme grazie va alla mia famiglia e in particolare ai miei genitori che sono il mio esempio e il mio punto di riferimento. L'istruzione e la cultura sono il regalo più bello che una figlia possa ricevere e per me è un privilegio averlo avuto, ne farò buon uso.

