

# METODOLOGIA

## *- Cost-Optimal measures for renovation of existing school buildings towards nZEB [1]*

Lo scopo di questo paper è la messa a punto di un metodo per definire e confrontare diverse misure di retrofitting energetico, come interventi sull'involucro edilizio e il sistema di riscaldamento. La metodologia prevede un confronto in termini di costi e di rendimento energetico considerando differenti alternative costruttive; lo scopo è quello di definire un livello ottimale, ovvero definire la soluzione che presenta i minori costi totali. Questa soluzione può essere riportata in un grafico in cui sono presentati i costi globali (€/m<sup>2</sup>) rispetto consumi di energia primaria (kWh/m<sup>2</sup>y). I parametri richiesti riguardano il raggiungimento degli obiettivi NZEB e il calcolo degli incentivi.

Questo studio è condotto in conformità all'attuazione della EPBD, il decreto legislativo n. 244/2012 e le sue linee guida, per determinare il risultato costo-efficacia da un punto di vista tecnico ed economico. In particolare, il metodo comprende diverse fasi: (a) definizione degli edifici di riferimento; (b) definizione delle misure di efficienza energetica (misure basate sull'energia da fonti rinnovabili e/o pacchetti e varianti di tali misure per ciascun edificio di riferimento); (c) calcolo della domanda di energia primaria risultante dall'applicazione delle misure precedentemente selezionate; (d) calcolo dei costi globali in termini di valore attuale netto per ciascun edificio di riferimento; (e) analisi di sensibilità relativa ai dati di costo; (f) identificazione dei livelli di costo ottimali in ogni edificio di riferimento.

E' definito un edificio riferimento, e dal punto di vista di una ristrutturazione nella quale sono valutati i consumi energetici e i costi delle emissioni di anidride carbonica, sono considerate anche le misure di ristrutturazione richieste per mantenere la costruzione e la sua funzionalità. Per la determinazione e la valutazione degli effetti delle soluzioni di ristrutturazione connessi al consumo energetico, si presume che le misure legate all'energia siano intraprese nel momento in cui un edificio necessita di un retrofit a causa di motivi funzionali. Questa soluzione di ristrutturazione identifica una situazione di riferimento per la determinazione e la valutazione dell'impatto di una soluzione in relazione al consumo energetico, alle emissioni di carbonio, ai costi e ai possibili benefici. La soluzione nel settore energetico comprende, da un lato, tali misure di retrofit, e dall'altro, misure energetiche aggiuntive o che sostituiscono alcune misure. L'edificio riqualificato viene confrontato con il caso di riferimento per determinare gli effetti degli interventi energetici.

Gli interventi richiedono diverse fasi. Innanzitutto l'analisi dell'involucro: ogni elemento (parete esterna, tetto, finestre) è considerato in termini percentuali rispetto all'incidenza sull'intera superficie disperdente e sulle intere perdite termiche. Tre gruppi di misure di efficienza energetica (EEMS) vengono determinati in base ai valori di trasmittanza termica di riferimento fissati dal regolamento 2.0 Conto Termico (DM 16/02/16): interventi di isolamento a singolo componente dell'involucro; interventi su componenti tecnologici secondo l'incidenza percentuale sulla superficie termica; interventi su componenti tecnologici secondo l'incidenza percentuale di superficie termica.

In questo modo, sono definiti dieci EEMS sull'involucro, poi sono considerati interventi sull'illuminazione elettrica e di cablaggio con sostituzione del sistema di illuminazione con lampade a LED ad alta efficienza, al fine di raggiungere un numero di 40 combinazioni totali, e infine l'installazione di un sistema fotovoltaico per risparmiare il 50% di energia elettrica. Nell'ultima fase ogni EEMS considera la sostituzione del generatore termico esistente con tre caldaie differenti: caldaia a condensazione, caldaia a biomassa, pompa di calore elettrica, che impiegano differenti vettori energetici (gas naturale, biomasse, elettrico). In totale, la quantità totale di EEMS considerati sono circa 120 interventi, che sono stati analizzati in termini di consumo di energia primaria e costo globale, per un ciclo di vita di 30 anni.

Dopo la definizione degli edifici di riferimento e le misure di retrofit di efficienza energetica, la domanda di energia primaria è calcolata utilizzando un software per simulazione energetica dinamica.

I fabbisogni per il riscaldamento, raffrescamento, ventilazione, acqua calda sanitaria, illuminazione e ausiliari richiesti sono stimati in conformità alla norma tecnica italiana UNI/TS 11300, che attua le norme europee EN 15316 e EN 15243:2007. Le caratteristiche di produzione, distribuzione, emissione e controllo, così come il vettore energetico, sono impiegati per valutare il consumo finale di energia primaria, con il fattore di conversione basato sulla normativa nazionale. Il modello è calibrato mediante il consumo energetico degli ultimi anni.

La stima dei costi è effettuata secondo il regolamento EPBD, che richiede la valutazione del livello ottimale dei costi correlati sia a livello finanziario che a livello macroeconomico. Il costo globale è calcolato come somma dell'investimento iniziale, dei costi annuali (energia, manutenzione, funzionamento ed eventuali costi aggiuntivi), del costo per la sostituzione straordinaria di sistemi e componenti, del valore finale, ed i costi di smaltimento. Tutti i costi sono stati attualizzati, considerando una durata di 30 anni, tenendo conto del tasso di interesse e del tasso di inflazione. La metodologia si basa sul calcolo del valore attuale netto (VAN), effettuato secondo la norma EN 15459: 2007. Un'analisi di sensibilità è stata effettuata considerando il costo globale e il consumo di energia primaria per ogni EEMS rispetto allo scenario di riferimento, al fine di selezionare la soluzione costo ottimale.

**- *The role of the reference building in the evaluation of energy efficiency measures for large stocks of public buildings* [2]**

Un edificio di riferimento è stato definito per valutare i potenziali interventi di retrofit selezionati attraverso un modello di simulazione. L'obiettivo principale è quello di identificare le misure di ristrutturazione ottimali in termini di costo ottimale e di costo effettivo per un edificio di riferimento esistente, e di valutare un pacchetto di ristrutturazione che conferisce valore aggiunto anche in termini di benefici. L'edificio considerato è composto da 4 piani più un piano interrato, con una superficie totale di 12.605 m<sup>2</sup>, un volume riscaldato di 50.845 m<sup>3</sup> e una superficie di involucro trasparente di circa 2.074 m<sup>2</sup>. Si tratta di un edificio Scolastico Superiore a Conegliano (TV), nel nord-est d'Italia, situato nella zona climatica E. Gli audit energetici sono stati effettuati con il metodo Energy Signatures (ES) descritto nell'allegato B della norma EN 15603:2008. Il modello tridimensionale dell'edificio è stato realizzato con il software SketchUp, combinato con OpenStudio, implementando i componenti dell'edificio (es. involucro opaco e trasparente) e definendo le zone termiche. Successivamente, i guadagni interni e le modalità di funzionamento dell'impianto di riscaldamento sono stati definiti in EnergyPlus. Per una simulazione accurata EnergyPlus richiede: (a) dati ambientali: localizzazione e dati climatici (temperatura dell'aria, umidità relativa, radiazione solare globale sul piano orizzontale, velocità del vento); questi dati sono stati forniti dall'ARPAV per la stagione di riscaldamento 2017-2018; (b) Dati dell'edificio: geometrie, orientamento ed elementi costruttivi; (c) Dati relativi all'utenza: profili di occupazione e d'illuminazione (definiti dalla norma UNI 10339) e schede operative dell'impianto.

I pacchetti costruttivi dell'edificio sono stati definiti considerando i materiali di cui sono composti e le loro proprietà principali: spessore, conducibilità termica, densità, calore specifico e altre proprietà come emissività nella banda infrarossa, assorbimento nella banda solare. Le zone termiche dell'edificio sono state definite in base alla tipologia, alla funzione, e alla collocazione all'interno dell'edificio. Il modello finale comprende 55 zone termiche, appartenenti a 6 diverse tipologie principali di spazio (cioè zone con profilo professionale simile: aule, uffici, bagni, corridoi, auditorium e palestra). Per ogni misura è determinato il costo ottimo.

**- *Historical buildings retrofit: The city hall of the city of Motta di Livenza (TV)* [3]**

La metodologia per l'audit energetico degli edifici si compone di tre parti: l'analisi del rendimento energetico nella situazione attuale, l'analisi del rendimento energetico assicurato dagli interventi, e la valutazione economica di ogni intervento. La prima analisi prevede un'ispezione approfondita dell'edificio, con il rilievo di tutte le caratteristiche geometriche e prestazionali dei sistemi installati: la geometria dell'edificio, l'orientamento, la vicinanza ad altri edifici, le caratteristiche e gli spessori delle pareti e dei pavimenti, il tipo di serramenti, e le caratteristiche dell'impianto di riscaldamento e raffrescamento. Tutte le caratteristiche presenti sono impiegate in un modello matematico per la predizione del comportamento termico e la valutazione del rendimento energetico dell'edificio. Il modello è calibrato con i dati storici di consumo di energia ottenuti da bollette, e permette di quantificare gli effetti di ogni intervento sul rendimento energetico dell'edificio. Gli interventi che si riferiscono al sistema involucro edilizio sono: isolamento di pareti, pavimenti, tetti e la sostituzione dei serramenti. Miglioramenti nelle prestazioni dell'impianto possono essere ottenuti sostituendo il generatore, isolando i condotti di distribuzione, e rendendo efficace la regolazione dell'impianto. Un grande contributo alla riduzione dei consumi elettrici negli edifici è l'intervento sull'efficienza dei sistemi di illuminazione interna e l'impiego di fonti di energia rinnovabile. La convenienza dell'intervento può essere valutata in base al tempo di ritorno dell'investimento.

Negli ultimi anni, le direttive europee hanno promosso gli interventi di recupero edilizio nel settore privato. In Italia, oltre agli incentivi economici rivolti a privati, sono disponibili incentivi alle amministrazioni pubbliche, sia per quanto riguarda gli interventi di ristrutturazione architettonica, che quelli sulla riqualificazione degli impianti.

Grazie all'utilizzo di software specifico, è possibile valutare la conformità del rendimento energetico di un edificio con riferimento alla normativa di riferimento. Per questa operazione, è stato usato EnergyPlus con l'utilizzato del Design Builder come interfaccia grafica per la costruzione dell'edificio. Per aumentare la bontà dei risultati del modello matematico, è stata prevista una calibratura impiegando dati storici di consumo reale di energia. L'impatto dei vari interventi è stato simulato e valutato sulla base del confronto del consumo energetico e dei costi di costruzione prima e dopo l'intervento. La soluzione ottima è quella che assicura il minimo del consumo di energia e del costo globale.

Negli edifici storici di solito non è consentito intervenire all'esterno per la presenza di decori o materiali in vista. A volte non è possibile intervenire neanche all'interno. L'intervento di isolamento della copertura è molto diffuso, ma presenta situazioni diversificate. La sostituzione delle finestre e delle porte è molto importante soprattutto in presenza di telai metallici o vetri singoli, ma ciò non sempre è possibile. Il più semplice intervento riguarda la sostituzione del generatore e la sostituzione del sistema di illuminazione. L'installazione di queste tecnologie, tuttavia, è molto delicato e, nel caso di edificio storico richiede una molto attenta integrazione e impatto visivo. Anche l'uso di fonti rinnovabili quali fotovoltaico è una soluzione efficiente soprattutto in edifici non residenziali dove il consumo di energia è molto più elevata.

**- *A new concrete-glulam prefabricated composite wall system: thermal behaviour, life cycle assessment and structural response* [4]**

In questo studio è proposto un nuovo sistema di costruzione ibrido, il CGFP (Concrete Glulam Framed Panel) che combina due dei materiali più utilizzati nella tecnologia dei telai, legno e cemento, analizzando le proprietà termo-fisiche e

meccaniche e valutandone l'impatto ambientale. Il pannello ha una configurazione ibrida con una struttura in legno e una copertura in cemento armato assemblati insieme tramite collegamenti meccanici in acciaio.

Dopo una prima panoramica sulla tecnologia TCC (legname-calcestruzzo composito), tre aspetti sono affrontati al fine di caratterizzare il CGFP: (i) valutazione delle prestazioni strutturali del CGF attraverso un'indagine sperimentale, numerica e analitica finalizzata a caratterizzare la resistenza e la rigidità; (ii) valutazione della resistenza termica del sistema CGFP variando la tipologia dei materiali isolanti; (iii) impatto ambientale attraverso il calcolo della quantità di Carbon Footprint e Embody Energy. Per la stabilità strutturale, la forza, la capacità di spostamento e la capacità di dissipare energia sono state valutate sperimentalmente su pannelli RC con telaio di legno in scala reale e confrontate con le previsioni analitiche. Il metodo LCA è stato applicato per il calcolo delle emissioni di carbonio, secondo lo standard internazionale ISO14040. Sono state confrontate le prestazioni dei sistemi di costruzione convenzionali con quello del sistema di prefabbricazione considerato: circa il 44% del risparmio di energia incorporato può essere ottenuta dall'uso della tecnologia del calcestruzzo pressofuso.

#### ***- Environmental impacts for polyurethane panels [5]***

L'investimento in isolamento termico negli edifici è importante per la sostenibilità del settore delle costruzioni e per i benefici economici, ambientali e sociali tangibili. A tal fine, per effettuare i corretti investimenti edilizi, i metodi di valutazione economica e ambientale, come l'analisi LCA, sono gli strumenti più completi per il raggiungimento degli obiettivi fissati dalla Comunità Europea. In questo studio è stato valutato, secondo la norma ISO 14040, l'impatto delle fasi di produzione del materiale impiegato: dopo la schematizzazione del processo di ciclo di vita, sono stati raccolti i dati relativi ai flussi in ingresso e in uscita con riferimento alle ore di produzione. L'ingresso si riferisce alla materia prima, al materiale utilizzato per il confezionamento del prodotto finito, e al consumo annuale di energia termica ed elettrica nei diversi processi di lavorazione. I flussi in uscita si riferiscono alla produzione di rifiuti (la descrizione e la quantità sono indicati nel MUD - FES Dichiarazione Ambientale Form) e al rilascio di emissione in atmosfera (VOC - composti organici volatili). Nella fase di distribuzione, sono considerati la quantità di prodotto trasportato, il mezzo di trasporto utilizzato (camion o traghetto) e le distanze percorse, suddividendo l'analisi per province italiane, paesi europei e paesi extra europei. I dati raccolti, grazie all'utilizzo di software, sono stati impiegati per una valutazione degli impatti ambientali, quantitativa e qualitativa, utile per valutare gli effetti delle sostanze sulla salute umana e la conservazione dell'ambiente.

#### ***- Study of innovative solutions of the building envelope for passive houses in Mediterranean areas [10]***

In questo lavoro sono stati studiati involucri opachi, per case passive situate nell'area mediterranea, realizzati mediante muri a secco. Lo scopo è la definizione di un nuovo modello abitativo contestualizzato nel clima mediterraneo, che risponda maggiormente all'attuale esigenze del mercato immobiliare e, allo stesso tempo, alle sfide imposte dai temi della sostenibilità. I muri a secco, assemblati su appositi telai, possono essere costruiti direttamente in loco nell'edificio con riduzione degli sprechi e dei tempi di lavorazione, e con una disposizione appropriata degli strati e dei materiali consentono di realizzare involucri leggeri e robusti con elevata inerzia termica.

Simulazioni termiche dinamiche sono utilizzate per la determinazione delle proprietà stazionarie e dinamiche delle pareti studiate con differenti soluzioni stratigrafiche e condizioni al contorno, nel periodo di riscaldamento e raffreddamento, tipiche del clima mediterraneo. Gli effetti prodotti da questi involucri edilizi sono valutati confrontando i fabbisogni stagionali in un edificio di riferimento.

#### ***- Statistical analysis of the heating demand in residential buildings located in Mediterranean climate and proposals for refurbishment [11]***

Dati relativi al consumo di energia nelle abitazioni civili della Regione Calabria, negli anni 2010 - 2015, sono stati raccolti attraverso un sondaggio condotto tramite questionari, utilizzato un campione di studenti dei dipartimenti di ingegneria dell'Università della Calabria. L'indagine era finalizzata alla raccolta di informazioni sui consumi effettivi di energia termica ed elettrica, sulle caratteristiche del sistema edificio-impianto, e sui certificati energetici delle loro abitazioni. I dati raccolti sono relativi ad un campione 363 abitazioni situate in differenti zone climatiche. Sono state definite le variabili da impiegare nell'analisi statistica, che è stata effettuata con il software SPSS. Prima di qualsiasi valutazione, è stato verificato che la distribuzione statistica dei dati sia di tipo normale. Le variabili che non soddisfacevano la condizione di normalità sono state trasformate applicando l'operatore radice quadrata. Successivamente, è stata eseguita un'analisi di correlazione bivariata per identificare il legame tra le variabili. Infine, è stata sviluppata un'analisi di regressione lineare multipla per valutare l'effetto delle diverse variabili sui consumi energetici e per identificare le opportunità di riqualificazione.

#### ***- Thermal field and heat storage in a cyclic phase change process caused by several moving melting and solidification interfaces in the layer [9]***

La transizione di fase in un strato di PCM disposto all'interno di una parete di un edificio climatizzato modifica l'andamento della temperatura e del flusso termico con conseguente riduzione dei picchi di potenza termica e dell'energia trasferita nella parete. L'impiego di questa tecnologia per la riduzione dei fabbisogni energetici ha sollecitato studi e ricerche sul comportamento termico dei PCM che hanno prodotto modelli di diversa complessità risolti nella quasi totalità

dei casi numericamente. La formulazione matematica dello scambio termico in uno strato di PCM è nota come problema di Stefan e la soluzione analitica è disponibile solo per geometrie monodirezionali semi-infinite o infinite e condizioni al contorno di temperatura o di flusso termico costanti nel tempo. La complessità della risoluzione è dovuta alla discontinuità del flusso termico all'interfaccia bifase la cui posizione è variabile nel tempo con conseguente variazione del dominio della fase solida e liquida.

Nei modelli numerici il trasferimento termico in uno strato di PCM è risolto mediante metodi che descrivono il cambiamento di fase attraverso un artificio matematico che consiste nel modificare il calore specifico o l'entalpia nell'intorno della temperatura di melting in uno strato equivalente monofase con proprietà termofisiche variabili con la temperatura. Tali metodi, noti come il metodo della capacità termica effettiva, il metodo della capacità termica apparente e il metodo dell'entalpia, consentono di risolvere numericamente il problema dello scambio termico senza determinare la posizione dell'interfaccia bifase e conseguentemente la configurazione delle fasi nello strato.

Nelle pareti degli edifici le condizioni al contorno che caratterizzano l'ambiente esterno e l'ambiente interno climatizzato danno origine, in genere, a più interfacce bifase nello strato e ciò rende il problema ancora più complesso.

In questa ricerca è affrontato il problema della determinazione del campo termico in strati di PCM soggetti a condizioni al contorno variabili nel tempo nel caso di regime periodico stabilizzato, in presenza di una o più interfacce bifase. Tale regime è rappresentativo del comportamento delle pareti specialmente nel periodo estivo.

Il comportamento dello strato è schematizzato con un modello fisico che descrive la conduzione nella fase solida e nella fase liquida, aventi differenti proprietà termofisiche, e il cambiamento di fase mediante l'equazione di bilancio termico all'interfaccia bifase alla temperatura di melting. Il modello numerico alle differenze finite e l'algoritmo di risoluzione sono stati ottenuti modificando quelli proposti da Halford et al. In particolare, sono state rimosse alcune semplificazioni, tra le quali l'uniformità della discretizzazione spaziale dei sottovolumi dello strato e l'invarianza nello spazio e nel tempo delle resistenze e delle capacità termiche, per ottenere una rappresentazione più accurata della discontinuità del flusso termico nel sottostrato interessato al cambiamento di fase.

Le equazioni che descrivono lo scambio termico in uno strato soggetto a cambiamento di fase sono l'equazione generale della conduzione termica nella fase solida e nella fase liquida e le condizioni di Stefan, espresse dall'equazione di bilancio all'interfaccia bifase alla temperatura di melting. Le condizioni al contorno, sulla superficie esterna dello strato di PCM sono definite mediante gli scambi termici convettivi e radiativi a corta e a lunga lunghezza d'onda e, sulla superficie interna mediante gli scambi termici calcolati attraverso l'adduttanza superficiale unitaria.

Poiché le temperature sulle superfici di contorno dello strato di PCM possono fluttuare attorno alla temperatura di melting, è possibile la formazione nello strato di più interfacce bifase nel periodo considerato. In tali circostanze, le condizioni di Stefan devono essere formulate per ogni interfaccia bifase. Ad esempio, in presenza di due interfacce bifase, con una successione di fasi liquido-solido-liquido oppure solido-liquido-solido, il sistema di equazioni differenziali sarà costituito dall'equazione della conduzione scritta per ciascuna delle fasi e dalle condizioni di Stefan scritte per ciascuna interfaccia. A tali equazioni bisogna aggiungere le equazioni relative alle condizioni al contorno dello strato.

La discretizzazione numerica del sistema di equazioni differenziali secondo uno schema alle differenze finite esplicito, con la derivata temporale valutata con il relativo rapporto incrementale, conduce ad un sistema di equazioni algebriche che rappresenta il bilancio termico di ciascun nodo. Tali equazioni forniscono le temperature nei nodi non soggetti a cambiamento di fase e le frazioni di liquido nei nodi alla temperatura di melting all'istante temporale successivo attraverso grandezze calcolate all'istante temporale precedente.

Le resistenze tra i nodi e le capacità termiche dei nodi, differenti nella fase liquida e nella fase solida, sono aggiornate ad ogni istante tenendo conto delle posizioni delle interfacce bifasi di fusione o di solidificazione nello strato. Per il calcolo delle resistenze termiche tra due nodi occorre tener conto della posizione dell'interfaccia bifase.

L'algoritmo di calcolo messo a punto determina la configurazione delle fasi nei nodi dello strato ai diversi istanti temporali e consta di tre sottoprogrammi per il calcolo della temperatura e della frazione liquida presente nel nodo. A ogni istante temporale, in un nodo, a seconda che sia in fase solida, liquida oppure in cambiamento di fase è utilizzato il sottoprogramma corrispondente.

Ogni sottoprogramma utilizza i valori della temperatura e della frazione liquida in un nodo nei due istanti temporali precedenti per determinare correttamente lo stato termodinamico e gli istanti temporali in cui il cambiamento di fase si completa o inizia. I tre sottoprogrammi sono applicati quando:

- il nodo generico  $j$  all'istante  $n+1$  è in fase solida se la temperatura nei due istanti temporali precedenti  $n-1$  ed  $n$  è inferiore alla temperatura di melting, oppure se la frazione di liquido nel nodo nell'istante  $n-1$  è compresa tra zero e uno e nell'istante  $n$  diventa minore di zero ad indicare il completamento del cambiamento di fase liquido-solido. In tal caso, all'istante  $n+1$  la frazione liquida è posta pari a zero e la temperatura è calcolata a seconda della posizione del nodo nello strato.
- il nodo generico  $j$  all'istante  $n+1$  è in fase liquida se la temperatura nei due istanti temporali precedenti  $n-1$  ed  $n$  è superiore alla temperatura di melting, oppure se la frazione di liquido nel nodo nell'istante  $n-1$  è compresa tra zero e uno e nell'istante  $n$  diventa maggiore di uno ad indicare il completamento del cambiamento di fase solido-liquido. In tal caso, all'istante  $n+1$  la frazione liquida è posta pari a uno e la temperatura è calcolata a seconda della posizione del nodo nello strato.
- il nodo generico  $j$  all'istante  $n+1$  è interessato dal cambiamento di fase se la temperatura nei due istanti temporali  $n-1$  ed  $n$  è minore della temperatura di melting e nell'istante  $n+1$  risulta maggiore della temperatura di melting; oppure se la

temperatura nei due istanti temporali  $n-1$  ed  $n$  è maggiore della temperatura di melting e nell'istante  $n+1$  risulta minore della temperatura di melting; oppure se la frazione di liquido all'istante  $n$  è compresa tra zero e uno. Nel primo caso inizia il processo di fusione, nel secondo caso inizia il processo di solidificazione mentre nel terzo caso il cambiamento di fase è in atto. Se è verificata una delle tre condizioni la temperatura è posta pari alla temperatura di melting e la frazione di liquido è calcolata a seconda della posizione del nodo.

Il modello e l'algoritmo messo a punto differiscono da quelli utilizzati da Halford e Boehm per determinare il campo di temperatura all'interno di un strato di PCM interposto tra due strati di isolante. Questi autori adottano nel modello numerico formulato alcune semplificazioni:

(a) discretizzazione nodale uniforme dello strato; (b) proprietà termofisiche identiche nella fase solida e nella fase liquida; (c) resistenze termiche tra i nodi interessati al cambiamento di fase non dipendenti dalla posizione dell'interfaccia bifase; (d) l'algoritmo impiega i valori di temperatura e di frazione liquida in un nodo all'istante precedente  $n$  per determinare lo stato termodinamico all'istante successivo  $n+1$ ; (e) presenza di un'unica interfaccia bifase nello strato.

I risultati ottenuti con il codice numerico sono stati confrontati con quelli determinati impiegando la soluzione analitica esatta del problema di Stefan, in regime periodico stabilizzato, di uno strato finito di PCM soggetto su ambedue le facce di contorno a condizioni periodiche oscillanti. La soluzione analitica riguarda condizioni al contorno oscillanti tali da assicurare valori di temperatura superficiali su una faccia sempre superiori alla temperatura di melting e sull'altra faccia sempre inferiori. In queste condizioni si origina una sola interfaccia bifase la cui posizione oscilla all'interno dello strato attorno ad un valore medio stazionario. La verifica è stata ottenuta considerando uno strato di PCM di 6 cm soggetto a condizioni al contorno periodiche non sinusoidali di temperatura superficiali. Tale condizioni sono espresse come somma di una componente stazionaria e di una componente fluttuante, quest'ultima valutata come somma di sinusoidi di diverso periodo, ampiezza e argomento.

Nella simulazione numerica lo strato è stato modellato con 19 nodi ed è stato impiegato un passo temporale  $\Delta t = 5$  s che assicura la stabilità e la convergenza della soluzione. Il confronto tra gli andamenti calcolati con la soluzione analitica e con il codice numerico in termini di posizione dell'interfaccia bifase, di temperatura nello strato e di flusso termico nello strato hanno evidenziato un'eccellente accordo tra gli andamenti e giustificano l'utilizzo del codice numerico.

#### ***- Definition of a new set of parameters for the dynamic thermal characterization of PCM layers in the presence of one or more liquid-solid interfaces [8]***

È affrontato il problema della caratterizzazione dinamica di uno strato di PCM sede di una o più interfacce bifasi, nell'ipotesi che il regime termico sia periodico stabilizzato. Le condizioni al contorno dello strato sono quelle che caratterizzano le pareti esterne degli edifici climatizzati. Le analisi sono sviluppate con un modello numerico alle differenze finite esplicito, che risolve l'equazione della conduzione nella fase solida e nella fase liquida e le equazioni di bilancio termico alle interfacce bifase alla temperatura di melting.

In presenza di cambiamento di fase, per la completa caratterizzazione dinamica dello strato di PCM, è necessario l'impiego di più parametri, per identificare in modo completo la trasformazione che subisce la forma della grandezza termica fluttuante nel transito attraverso lo strato.

Gli andamenti della temperatura e del flusso termico sulla superficie esterna e sulla superficie interna, le energie in entrata e in uscita, e l'energia accumulata nello strato sotto forma sensibile e latente sono impiegati per definire nuovi parametri necessari per caratterizzare dinamicamente lo strato. I parametri definiti sono: l'efficienza di accumulo latente; la frazione di energia latente accumulata rispetto a quella totale; il fattore di attenuazione dell'escursione massima della temperatura e del flusso termico; il fattore di attenuazione dell'energia; gli sfasamenti del picco massimo e minimo della temperatura e del flusso termico; la frazione di periodo in cui il picco massimo o il picco minimo della temperatura e del flusso termico sono costanti nel tempo sulla superficie interna. L'efficienza di accumulo latente è il rapporto tra l'energia latente accumulata e l'energia latente massima accumulabile valutata supponendo che l'intero strato cambi di fase.

I parametri dinamici definiti consentono di quantificare l'attenuazione e lo sfasamento che subiscono le fluttuazioni di temperatura e di flusso termico nell'attraversare lo strato e l'entità dell'accumulo termico latente nello strato. Tali parametri sono da utilizzare per il dimensionamento termico dello strato, che riguarda la scelta del PCM e dello spessore, e anche per identificare il comportamento termico in opera dello strato.

In particolare, per quanto riguarda la fluttuazione della temperatura, il fattore di attenuazione dell'escursione massima, lo sfasamento del picco massimo e del picco minimo, e la frazione di periodo in cui il picco massimo o il picco minimo della temperatura e del flusso termico sono costanti nel tempo sulla superficie interna sono da impiegare per quantificare il discomfort termico a seguito della variazione della temperatura superficiale interna, sia nel periodo invernale che estivo. Se si considera il flusso termico, gli analoghi parametri, forniscono l'entità dell'attenuazione e dello sfasamento del picco di potenza, in entrata nel periodo estivo e in uscita nel periodo invernale, per la valutazione dei carichi massimi che operano sull'ambiente interno.

Se si considera, invece, l'energia fluttuante in transito nello strato, il fattore di attenuazione dell'energia permette di stimare la frazione di energia trasferita all'ambiente interno nella climatizzazione estiva ed invernale, per la determinazione dei fabbisogni termici.

Infine, l'efficienza di accumulo latente e la frazione di energia latente accumulata consentono di valutare il corretto utilizzo dello strato come sistema di accumulo termico latente.

Tutti i parametri definiti sono da impiegare sia in assenza che in presenza di cambiamento di fase.

***- A method for thermal dimensioning and for energy behavior evaluation of a building envelope PCM layer by using the characteristic days [7] [6]***

La procedura di calcolo per la simulazione dinamica di uno strato di PCM è stata impiegata per valutare le prestazioni energetiche di strati con differenti temperature di melting e proprietà termofisiche. Le condizioni climatiche considerate sono relative a due località, una con il clima continentale e l'altra con il clima mediterraneo, e sono rappresentate mediante il giorno medio mensile e modellate con fluttuazioni periodiche non sinusoidali. Gli andamenti della temperatura e del flusso termico sulla superficie esterna ed interna dello strato di PCM sono impiegati per valutare il comportamento dello strato in termini di energia trasferita e di energia immagazzinata nella forma sensibile e latente. Per ogni mese dell'anno è determinato il numero di interfacce bifase che si formano nello strato, i valori dell'energia trasferita, dell'energia immagazzinata in forma latente e sensibile. Tali dati sono impiegati per valutare le corrispondenti energie stagionali e annuali, e le temperature di melting ottimali a livello stagionale e annuale. L'andamento del flusso termico e della temperatura può essere espresso come somma di un componente stazionaria e di un componente fluttuante. L'energia fluttuante giornaliera media mensile sulla superficie interna e sulla superficie esterna dello strato è calcolata come metà dell'integrale numerico nel tempo, esteso ad un periodo, del valore assoluto delle relative fluttuazioni superficiali. I flussi termici fluttuanti superficiali sono uguali alla differenza tra i relativi valori del flusso termico totale e del flusso termico stazionario. L'energia totale immagazzinata è determinata come metà dell'integrale numerico nel tempo, esteso ad un periodo, della differenza in valore assoluto del flusso termico in entrata e in uscita dallo strato. Allo stesso modo, la velocità di avanzamento di una interfaccia bifase è utilizzata per valutare l'energia latente associata alla relativa interfaccia. L'energia sensibile è pari alla metà dell'integrale numerico nel tempo della differenza, in valore assoluto, tra l'energia totale immagazzinata per unità di tempo e l'energia latente immagazzinata nell'unità di tempo. Inoltre, i flussi termici superficiali sono utilizzati per calcolare l'energia: (i) attraverso la superficie interna, entrante nell'ambiente interno ed uscente dall'ambiente interno; (ii) attraverso la superficie esterna, entrante nello strato ed uscente dallo strato. I valori giornalieri medi mensili dell'energia trasferita attraverso lo strato e i valori dell'energia immagazzinata nei vari mesi sono stati utilizzati per il calcolo dei relativi valori stagionali e annuali.

***- Optimal Design of PCM in Internal Walls for nZEB Buildings [12]***

Sono stati valutati gli effetti prodotti dalla presenza di strati di PCM disposti nelle pareti divisorie interne di un edificio sulle prestazioni energetiche. Mediante simulazioni numeriche eseguite in ambiente TRNSYS è stata sviluppata una analisi parametrica per determinare gli effetti sui fabbisogni termici dell'edificio, e la capacità del PCM ad attenuare le deviazioni di temperatura dell'aria interna rispetto a quella di set-point quando il sistema di climatizzazione è spento.

Il comportamento termico dell'edificio è stato modellato dal type 56, mentre il comportamento termico dei muri contenenti PCM sono stati implementati attraverso il type 1270, progettato per interagire con il modello di edificio. Il type 1270, validato in ricerche recenti, richiede come dati input la densità, la capacità termica specifica, la temperatura di fusione e calore latente dello strato PCM. Il modello matematico ipotizza che la capacità termica specifica del PCM non è dipendente dalla temperatura nella fase solida o liquida, e che il processo di cambiamento di fase sia isoterma.

Le simulazioni sono state eseguite considerando un edificio di due piani con dimensioni 10 m x 10 m x 6 m.

Ogni piano è composto da quattro zone termiche divise da pareti contenenti strati di PCM. Le superfici vetrate costituiscono il 50% della superficie totale esterna con doppio vetro 4/12/4 basso emissivi. L'edificio è utilizzato per attività d'ufficio ed è dotato di un sistema di climatizzazione con temperatura di set point di 20 °C in inverno e 26 °C in estate. Il sistema di riscaldamento/raffrescamento funziona dalle 08:00 alle 18:00 dal lunedì al venerdì e non è operativo durante i fine settimana. La presenza di persone e i guadagni interni sono definiti mediante appropriate schedule. Le simulazioni orarie sono state condotte per la località di Roma, Italia ( $L = 49^\circ 54'$ ) per la quale sono prese in considerazione le condizioni climatiche riportate nella norma nazionale UNI 10349-1. Il PCM utilizzato nella simulazione è un sale idrato.

L'influenza sulle prestazioni termiche dell'edificio dell'integrazione del PCM nelle pareti interne sulle prestazioni, è stata valutata mediante una analisi parametrica di ottimizzazione. Tre edifici con diversi livelli di isolamento sono stati considerati. Le temperature di fusione del PCM adottate nello studio variano nell'intervallo 16°C - 30°C con un passo di 1°C, e sono state scelte in relazione con le temperature di comfort richieste all'interno sia nella stagione di riscaldamento che di raffrescamento. Tre diversi spessori di PCM sono stati analizzati con un impiego complessivo rispettivamente di 2 m<sup>3</sup>, 4 m<sup>3</sup> e 6 m<sup>3</sup>, distribuendolo in tutte pareti interna con uno spessore costante.

Nelle valutazioni delle prestazioni termiche dell'edificio rivalutato attraverso l'uso di PCM, l'energia termica richiesta per il riscaldamento e quella per il raffrescamento, per mantenere le temperature di set point, sono state utilizzate come indicatori di performance. Questi indicatori consentono di determinare la combinazione che massimizza il risparmio energetico, sia a livello stagionale che annuale. Ulteriori risultati sono stati ottenuti considerando la capacità del PCM di mantenere la temperatura dell'aria interna, quando il sistema non è in funzione, a livelli accettabili, vicini alle corrispondenti temperature di comfort, per periodi lunghi rispetto alla configurazione senza PCM. Al tal fine è stato definito un indice orario di deviazione della temperatura interna, ed è stato valutato per ciascuna zona dell'edificio. A partire dai valori orari, un indice stagionale dell'intero edificio nel periodo invernale e nel periodo estivo è stato calcolato,

sommando i corrispondenti valori orari per una singola zona e per tutte le zone. Questi indici sono stati valutati per tutti gli scenari considerati.

**- *EnergyPlus, IDA ICE and TRNSYS predictive simulation accuracy for building thermal behaviour evaluation by using an experimental campaign in solar test boxes with and without a PCM module (under revision: Energy and Buildings). [13], [14]***

Nella ricerca sono comparate le predizioni di differenti strumenti di simulazione dinamica termica di edifici con misure sperimentali. Le misure sono state rilevate in due test-box dell'Università Tor Vergata di Roma, una di riferimento e l'altra munita di materiale a cambiamento di fase (PCM) posizionato su una porzione del pavimento. Gli strumenti di simulazione considerati sono TRNSYS, EnergyPlus e IDA ICE. L'obiettivo è di identificare i modelli di simulazione di strati di PCM più accurati da un punto di vista qualitativo e quantitativo. Per il confronto sono state impiegate le più comuni metriche, vale a dire l'RMSE e il coefficiente di determinazione R-square, sia in assenza che in presenza di PCM. Le test-box sono dotate di una stazione meteorologica per la misura dell'umidità e temperatura dell'aria esterna (sensore Rotronic Hygroclip2,  $\pm 0,1$  °C,  $\pm 0,8\%$ ), della radiazione solare diretta normale (pireliometro Kipp e Zonen CH1 montato su un inseguitore solare 2AP,  $\pm 2\%$ ), della radiazione solare diffusa orizzontale (piranometro Kipp e Zonen schermato CM21 montato su un sole 2 AP tracker,  $\pm 3\%$  a  $1000 \text{ W/m}^2$ ) e dell'intensità e direzione della velocità del vento (anemometro modello 7911,  $\pm 1 \text{ m/s}$ ,  $\pm 7^\circ$ ). A partire da questi misurazioni, altri dati climatici sono stati generati mediante modelli di calcolo adeguati, come ad esempio per la temperatura apparente del cielo (modello Dagueuet), la radiazione solare incidente sul piano inclinato (modello di Perez per la componente diffuso) e la temperatura della superficie del terreno impostata uguale alla temperatura dell'aria esterna.

Le dimensioni esterne e interne sono rispettivamente  $1.00 \times 0.550 \times 0.600 \text{ m}$  e  $0.872 \times 0.374 \times 0.424 \text{ m}$ , mentre la parete vetrata esposta a Sud occupa una area di  $0,06 \text{ m}^2$ , con dimensioni  $0.30 \times 0.20 \text{ m}$ .

Il pannello di PCM installato sul pavimento è il CSM prodotto da Rubitherm Technologies GmbH. Questo modulo è costituito da una custodia in alluminio di  $0.450 \times 0.300 \times 0.015 \text{ m}$ , rivestito con materiale anticorrosivo e riempito con  $2 \text{ kg}$  di PCM inorganico macroincapsulato SP21E. È caratterizzato da una capacità di accumulo di calore latente di  $129 \text{ kJ}/(\text{kg K})$  con una moderata isteresi: un intervallo di temperatura di fusione tra  $19^\circ \text{C}$  e  $23^\circ \text{C}$  con un picco di  $54 \text{ kJ}/(\text{kg K})$  a  $22^\circ \text{C}$  e un intervallo di temperatura di solidificazione compreso tra  $17^\circ \text{C}$  e  $20^\circ \text{C}$  con un picco di  $60 \text{ kJ}/(\text{kg K})$  a  $20^\circ \text{C}$ . Tutte le pareti esterne di entrambe le test-box sono isolate, tranne la parete esposta a Sud in cui è posizionata la superficie vetrata. Poiché le pareti opache sono quasi adiabatiche, i guadagni solari trasmessi attraverso la superficie vetrata rappresentano il maggiore apporto termico nella cavità.

Ogni test-box è dotata di termistori TT500 ( $\pm 0,2^\circ \text{C}$ ) per la misura della temperatura dell'aria interna, della temperatura superficiale interna ed esterna del vetro, e della temperatura superficiale interna del pavimento.

Un'ampia descrizione e un confronto tra i modelli conduttivi, convettivi, e radiativi a corta e lunga lunghezza d'onda, sia sulla superficie interna ed esterna delle pareti opache e vetrate, è stato sviluppato per poter imputare l'accuratezza dei risultati ottenuti con i tre strumenti di simulazione ai modelli impiegati. Nel caso della test-box con PCM, tale confronto è stato effettuato anche in termini di modellazione matematica impiegata per descrivere il fenomeno dell'accumulo latente.

## ***Risultati***

A cura delle singole UO.

I risultati delle attività di ricerca sono sintetizzati dalle pubblicazioni realizzate nell'ambito del PRIN. Di seguito sono riportati i sommari.

**- *Cost-Optimal measures for renovation of existing school buildings towards nZEB[1]***

Questo documento presenta i risultati dell'applicazione della metodologia costo-ottimale in due edifici scolastici esistenti situati nel Nord-Est dell'Italia. Gli edifici analizzati sono scuole primarie e secondarie che differiscono per il periodo di costruzione, per il rapporto di compattezza, per i materiali e per i sistemi di involucro. Sono state applicate diverse combinazioni di misure di retrofit al fine di ricavare soluzioni efficienti dal punto di vista dei costi per il retrofit, secondo la metodologia proposta dal progetto Annex 56 "Cost Effective Energy & CO<sub>2</sub> Emissions Optimization in Building Renovation". Il livello di costo ottimale è stato identificato per ogni edificio e le soluzioni più performanti sono state selezionate considerando un'analisi finanziaria e l'applicazione degli incentivi governativi "Conto Termico 2.0". I risultati mostrano l'idoneità della metodologia proposta per valutare l'ottimizzazione dei costi e l'efficienza energetica nella ristrutturazione degli edifici scolastici. Inoltre, questo studio mostra diverse possibilità che forniscono l'equilibrio più conveniente tra costi e risparmio energetico.

**- *The role of the reference building in the evaluation of energy efficiency measures for large stocks of public buildings [2]***

Con l'ultima Direttiva Europea 218/844/UE, gli Stati membri dell'UE sono chiamati a delineare strategie efficaci per il rinnovamento energetico degli edifici esistenti, in modo da raggiungere gli obiettivi fissati rispettivamente per il 2030, il 2040 e il 2050, sfruttando i nuovi strumenti di finanziamento. In questo processo, gli edifici pubblici sono identificati

come importanti motori per i cambiamenti comportamentali energetici tra i cittadini e, inoltre, possono beneficiare di incentivi economici per ristrutturazioni energeticamente certificate. Tuttavia, il problema della gestione degli edifici pubblici esistenti è la loro dimensione e la necessità di importanti ristrutturazioni. In questo scenario, l'edificio di riferimento assume un ruolo chiave come modello di partenza per la valutazione del fabbisogno di energia primaria e delle misure di retrofit. In questa ricerca, un edificio di riferimento selezionato in un precedente lavoro è analizzato, testando potenziali interventi di retrofit selezionati mediante un modello di simulazione. Le misure considerate vengono quindi valutate utilizzando l'approccio del costo ottimo, al fine definire le priorità in termini di rapporto costo-efficacia. Il lavoro propone di testare misure di retrofit selezionate su un prototipo di edificio, da estendere poi agli altri edifici simili per caratteristiche geometriche e termofisiche.

**- *Historical buildings retrofit: The city hall of the city of Motta di Livenza (TV) [3]***

Le problematiche relative al risparmio energetico, alla sostenibilità ambientale e alla sicurezza in caso di eventi sismici, sono sempre più al centro dell'attenzione dell'opinione pubblica e dei vari attori del settore delle costruzioni. Il patrimonio immobiliare italiano necessita di un forte adeguamento energetico, funzionale e sismico. La maggior parte degli edifici sono stati costruiti prima dell'entrata in vigore delle leggi sul risparmio energetico (1976) e delle direttive sulla progettazione antisismica (2003). L'intervento sugli edifici privati è favorito da vari sistemi di incentivazione finanziari, mentre l'intervento sullo stock di edilizia pubblica non è facile. La maggior parte degli edifici pubblici sono identificati come storici e quindi elencati dalla Soprintendenza per i beni culturali. Vincoli storici, facciate e decorazioni raffinate e disomogeneità delle tecniche di costruzione e dei materiali utilizzati rendono molto difficile intervenire in questi edifici. L'articolo analizza un caso di studio: il municipio del comune di Motta di Livenza (TV). Questo edificio storico, elencato dalla Soprintendenza, è stato sottoposto a un audit energetico che definisce quali sono le migliori misure di efficienza energetica e la loro sostenibilità economica. Il caso studiato è un vero esempio di ricerca di un equilibrio tra la necessità di un recupero sismico e di miglioramento energetico, con i vincoli posti dalla Soprintendenza, i vincoli provenienti da decorazioni e oggetti preziosi, non modificabili, e dalla necessità di migliorare il comfort termico all'interno degli ambienti.

**- *A new concrete-glulam prefabricated composite wall system: thermal behaviour, life cycle assessment and structural response [4]***

La doppia camera climatica è stata attrezzata per verificare sperimentalmente le risposte dinamiche di pareti composite soggette a sollecitazioni a gradino. Un primo esempio riguarda una parete composita costituita da un nuovo sistema di costruzione ibrido, il cosiddetto CGFP - Concrete Glulam Framed Panel - che unisce i due materiali maggiormente utilizzati nella tecnologia dei telai. Si tratta di una parete composita prefabbricata composta da una lastra in cemento armato e una struttura in legno lamellare. La resistenza e la rigidità del CGFP sono state studiate mediante prove di spostamento del carico, e le prestazioni termiche mediante prove sperimentali con apparecchi hot-box. Inoltre, è stato verificato l'impatto ambientale del sistema definendo la sua Carbon Footprint e l'Embodied Energy. L'efficacia del sistema proposto è stata convalidata da una analisi sperimentale e numerica. I risultati sperimentali e i risultati numerici ottenuti con le simulazioni sono stati confrontati sia in campo meccanico che termico mostrando un buon accordo. Dal punto di vista strutturale, la resistenza e la capacità di deformazione sono assicurate attraverso la risposta strutturale consecutiva e interattiva tra il telaio in legno e la soletta in calcestruzzo. Dal punto di vista termico e ambientale, sono state analizzate le resistenze termiche ottenute con diversi tipi di materiali isolanti e dal calcolo della quantità di Carbon Footprint e Embodied Energy. Il pannello CGFP ha presentato buone prestazioni termiche, un basso impatto ambientale rispetto a sistemi costruttivi simili e un comportamento strutturale promettente.

**- *Environmental impacts for polyurethane panels [5]***

Secondo gli obiettivi europei previsti per il 2030, per la gestione di una politica di miglioramento della sostenibilità ambientale degli edifici è essenziale valutare gli impatti degli edifici e dei componenti dell'edificio sia nelle fasi di costruzione che di utilizzo. Un utile strumento di supporto per produttori e progettisti per l'innovazione dell'eco-design di prodotti e processi produttivi è la Life Cycle Assessment: la valutazione consente di identificare e quantificare l'energia e i materiali consumati e residui rilasciati come impatto ambientale durante i processi. Il confronto dei dati di impatto ambientale dei diversi prodotti è possibile adottando l'approccio EPD - Environmental Product Declarations, che prevede, per ciascun gruppo di prodotti, l'elaborazione di una tecnica specifica, la RPC - Regole di Categoria di prodotto. Nel settore dell'edilizia, tra i materiali termoisolanti attualmente in uso, il poliuretano espanso rigido (prodotti isolanti polimerici termoindurenti con una struttura cellulare sostanzialmente chiusa comprendente entrambi i tipi di polimeri basati su PIR e PUR), consente di ottenere caratteristiche di densità molto bassa, con conseguente riduzione del consumo di energia derivante da trasporto, installazione e smaltimento o riciclaggio a fine vita. Numerosi studi sugli impatti ambientali durante il ciclo di vita del poliuretano hanno dimostrato che la quantità di risorse consumate per la produzione di schiuma poliuretana viene ammortizzata nella fase di utilizzo degli edifici grazie ai risparmi energetici determinati dall'isolamento termico. Una caratteristica molto importante del poliuretano è l'elevata durabilità nel tempo (superiore o uguale alla durata dell'edificio). Ciò è dimostrato a seguito di alcuni test di caratterizzazione fisica e verifica della durabilità dei pannelli isolanti in poliuretano rigido utilizzati in diversi tipi di edifici e costruzioni, senza alcun tipo di manutenzione: dalla determinazione della conducibilità termica e della resistenza a compressione è dimostrato che i valori

rimangono pressoché invariati nonostante gli anni di utilizzo (oltre 40 anni). L'articolo presenta la valutazione LCA di un pannello in poliuretano; la durata delle proprietà termiche è stata verificata da test sperimentali.

**- *Study of innovative solutions of the building envelope for passive houses in Mediterranean areas [10]***

Le case passive nei contesti climatici continentali sono progettate principalmente per ridurre il fabbisogno di energia termica, utilizzando uno spessore di isolamento elevato nella parete opaca e grandi superfici vetrate verso sud. Lo stesso approccio in climi caldi è inappropriato, perché il rischio di surriscaldamento dell'aria interna è marcato, soprattutto nel periodo estivo. Per questo motivo, le proprietà dinamiche delle pareti opache assumono un ruolo significativo. Simulazioni dinamiche realizzate dal software Design Builder ha messo in evidenza le buone proprietà dinamiche delle pareti studiate, e hanno consentito di identificare la migliore configurazione di involucro in grado di ridurre al minimo i fabbisogni annuali di energia termica. I risultati mostrano il ruolo significativo in estate dell'uso combinato dell'accumulo termico e il free-cooling notturno. Per l'esposizione a Sud, le finestre con pannelli tripli sono appropriate perché rappresentano un buon compromesso tra la riduzione delle perdite termiche e lo sfruttamento dei guadagni solari. In particolare, il decremento delle perdite termiche invernali prevale sulla riduzione dei guadagni solari per il limitato valore di trasmittanza solare. In estate, quest'ultimo rappresenta un vantaggio e la crescita del fabbisogno di raffreddamento è limitata e le perdite termiche sono compensate dall'impiego del free-cooling notturno. Un edificio di riferimento progettato per l'applicazione delle soluzioni identificate, localizzate nel Sud Italia, hanno fornito fabbisogni di energia termica inferiori a 15 kWh / m<sup>2</sup> y, sia in inverno che in estate, rispettando il limite suggerito dallo standard passivhaus nella sua formulazione estesa.

**- *Statistical analysis of the heating demand in residential buildings located in Mediterranean climate and proposals for refurbishment [11]***

Il documento riguarda l'indagine sui consumi di energia termica di un campione di edifici residenziali situati nel sud Italia. È stato condotto un sondaggio per la raccolta di dati relativi ai certificati di prestazione energetica, alle caratteristiche degli involucri edilizi, degli impianti di climatizzazione e dei consumi reali. È stata sviluppata un'analisi statistica finalizzata all'identificazione dei principali parametri che incidono sui requisiti energetici utilizzando il software SPSS. È stata applicata un'analisi di regressione multipla per ottenere uno strumento di previsione che può essere utilizzato per identificare strategie di azione adeguate per l'adeguamento degli edifici nell'area considerata.

**- *A method for thermal dimensioning and for energy behavior evaluation of a building envelope PCM layer by using the characteristic days [7], [6]***

In questo lavoro, è stata sviluppata un'accurata analisi energetica di strati di PCM con condizioni al contorno caratteristiche delle pareti esterne di edifici climatizzati, in regime periodico stabilizzato. L'analisi ha permesso di valutare gli effetti prodotti dal cambiamento di fase sul trasferimento di energia e sull'accumulo termico all'interno dello strato. La procedura sviluppata può essere utilizzata per selezionare il PCM più adatto nel raffrescamento estivo, e nel riscaldamento invernale, oppure con riferimento alla climatizzazione annuale. L'analisi sviluppata in termini di energia mensile immagazzinata, considerando differenti PCM con diverse temperature di fusione, e le condizioni climatiche di Torino e Cosenza, ha evidenziato: (a) La quantità di energia latente immagazzinata, durante i mesi in cui è registrato il cambio di fase, dipende dal numero di interfacce bifase, dalla dimensione della porzione di strato coinvolta nel cambio di fase, dalla densità e dal calore latente di fusione. (b) L'accumulo di energia sensibile si riduce durante i mesi in cui si verifica il cambiamento di fase, mentre negli altri mesi dipende dalla capacità termica specifica  $\rho c$  del PCM.

(c) L'energia totale immagazzinata aumenta durante i mesi in cui si verifica il cambiamento di fase, nonostante la riduzione del contributo sensibile; durante gli altri mesi, è determinata solo dall'energia sensibile. La presenza del cambiamento di fase provoca una brusca modifica delle energie in entrata ed in uscita attraverso lo strato. In particolare, l'analisi sintetizzata a livello stagionale in termini di energia trasferita, ha evidenziato che a Torino nel periodo invernale (a) la minore energia proveniente dall'ambiente interno è ottenuta con un PCM con temperatura di fusione di 15°C (S15). (b) Il massimo contributo di energia nell'ambiente interno, dovuto principalmente alla radiazione solare, è realizzato con un PCM con una temperatura di fusione di 26°C (SP26). Nel periodo estivo, ancora per Torino: il valore più basso di energia entrante nell'ambiente interno è ottenuto con SP26; il valore più alto dell'energia in uscita dall'ambiente interno è assicurato da LATEST20 (con una temperatura di fusione pari a 20°C). Per Cosenza, in entrambe le stagioni sono confermati i risultati precedenti, con valori più alti dell'energia che entra nell'ambiente interno e i valori più bassi dell'energia in uscita. Per entrambe le località, l'energia immagazzinata totale annua, che caratterizza l'uso del PCM, risulta massima con il PCM HS22P, il quale presenta una temperatura di fusione intermedia tra i valori di temperatura di set point invernali ed estivi dell'ambiente interno. Questo PCM rappresenta il miglior compromesso tra il fabbisogno energetico invernale ed estivo nella climatizzazione annuale.

**- *Thermal field and heat storage in a cyclic phase change process caused by several moving melting and solidification interfaces in the layer [9]***

Il paper fornisce progressi e nuovi avanzamenti rispetto alla letteratura esistente, in quanto presenta una descrizione dettagliata dei fenomeni che si verificano in un strato di PCM, in presenza di più interfacce bifase, in regime periodico non sinusoidale. Inoltre, il modello e l'algoritmo sviluppato costituiscono un'estensione dei modelli di Halford e Boehm,

e consentono di tenere conto della presenza contemporanea di più interfacce bifasi, della variabilità delle capacità termiche nodali e delle resistenze termiche, differenti nelle due fasi, in funzione della posizione e del tipo di interfacce bifase presenti nello strato. Il modello di calcolo messo a punto è stato utilizzato per un'analisi termica in condizioni di regime periodico stabilizzato di cinque differenti tipi di PCM di spessore pari a 0.06 m ed esposti a Sud. I PCM hanno differenti proprietà termofisiche e temperatura di melting variabile tra 15 °C e 32 °C. I dati di temperatura dell'aria esterna, di temperatura apparente del cielo e di irraggiamento solare sono relativi ai giorni medi mensili della città di Torino (Lat = 45° 7', Long = 7° 43') e di Cosenza (Lat = 37° 30', Long = 15° 05'). Le due località sono climaticamente differenti, la prima è rappresentativa di un clima continentale e la seconda di un clima mediterraneo. I dati utilizzati di temperatura dell'aria esterna e di irraggiamento solare sul piano orizzontale relativi al giorno medio mensile sono quelli dalla norma nazionale di riferimento. Le analisi degli strati PCM considerati hanno permesso di chiarire la dinamica di formazione, l'evoluzione e l'estinzione delle interfacce bifase nello strato ed i campi termici corrispondenti. In assenza di cambiamenti di fase, in regime periodico non sinusoidale, lo strato è omogeneo e ha un campo di temperatura con valori maggiori o minori della temperatura di fusione. Le fluttuazioni della temperatura e del flusso termico si attenuano all'avanzare nello strato, con uno sfasamento che si incrementa dalla superficie esterna verso quella interna. In presenza di un cambiamento di fase, la variabilità della temperatura superficiale esterna ed interna rispetto alla temperatura di fusione determina le ascisse di formazione del cambiamento di fase (sulle superfici di contorno o all'interno dello strato) e il numero, la tipologia (fusione o solidificazione) e la velocità di avanzamento della interfaccia bifase all'interno dello strato. Questa velocità di avanzamento determina la legge di accumulo e rilascio di energia latente alla temperatura di fusione ed è, inoltre, influenzata dall'eventuale presenza all'interno dello strato di altre interfacce bifase. La durata del processo di accumulo può essere differente dalla durata del processo di rilascio. Lo stoccaggio e il rilascio di energia latente durante il cambiamento di fase nei volumi interessati provoca cambiamenti significativi del campo di temperatura e del flusso termico nello strato. Nei nodi in cambiamento di fase, la costanza della temperatura e la variazione brusca del flusso termico, in relazione al numero e alla posizione delle interfacce bifase presenti nello strato, determina una netta riduzione delle ampiezze delle fluttuazioni della temperatura e del flusso termico sulla superficie esterna, o sulla superficie interna o su entrambe le superfici. Le analisi, sviluppate considerando diversi PCM e località, hanno dimostrato che all'aumentare della temperatura di fusione, il numero di mesi in cui è presente solo la fase solida cresce. I mesi in cui è presente solo la fase liquida, invece, aumentano al diminuire della temperatura di fusione. Negli altri mesi nello strato sono presenti una, due e tre interfacce bifase. I mesi in cui la fase è solo liquida risultano maggiori a Cosenza rispetto a Torino per la stessa temperatura di fusione e, nei mesi in cui si verifica il cambiamento di fase, la parte del materiale in fase liquida è maggiore. È possibile utilizzare il modello numerico e l'algoritmo di calcolo per il dimensionamento termico dello strato, o meglio per la scelta di PCM e il suo spessore. La procedura creata consente la caratterizzazione termica dinamica dello strato mediante lo studio delle modifiche subito dalle fluttuazioni termiche superficiali in transito attraverso il strato. Inoltre, nel settore della climatizzazione degli edifici, i risultati ottenuti sono utili per ottenere una riduzione sia dei carichi termici che del fabbisogno energetico nelle due stagioni di condizionamento dell'aria e di migliorare il comfort termico all'interno dell'ambiente attraverso il controllo della temperatura superficiale.

***- Definition of a new set of parameters for the dynamic thermal characterization of PCM layers in the presence of one or more liquid-solid interfaces [8]***

In questo lavoro è stata sviluppata un'accurata analisi termica dinamica di strati di PCM soggetti a condizioni al contorno caratteristiche delle pareti esterne degli edifici climatizzati, nel caso in cui una o più interfacce bifase sono presenti nello strato. L'analisi, condotta in condizioni periodiche stabilizzate, ha permesso di valutare gli effetti prodotti dal cambiamento di fase sul trasferimento delle fluttuazioni di temperatura, del flusso termico e dell'accumulo termico all'interno dello strato. In tali condizioni, per la completa caratterizzazione dinamica dello strato PCM, è stato necessario definire più parametri per identificare in modo completo la trasformazione che subisce la forma dell'andamento della temperatura e del flusso termico, nonché l'energia fluttuante trasferita e l'energia sensibile e latente immagazzinata. Per quanto riguarda la fluttuazione della temperatura, il fattore di attenuazione dell'escursione massima, lo sfasamento del picco massimo e del picco minimo e *la frazione di picco costante* sulla superficie interna sono impiegati per quantificare il comfort termico all'interno, a seguito della variazione della temperatura della superficie interna, sia durante la stagione invernale ed estiva. Se si considera il flusso termico, gli analoghi parametri forniscono l'entità dell'attenuazione e dello sfasamento del picco di potenza, in entrata nel periodo estivo e in uscita nel periodo invernale, per la valutazione dei carichi massimi che agiscono sull'ambiente interno. Se si considera, invece, l'energia fluttuante in transito nello strato, il relativo fattore di attenuazione consente di stimare la frazione di energia trasferita nell'ambiente interno nella climatizzazione estiva ed invernale per la determinazione dei fabbisogni termici. Infine, l'efficienza di accumulo latente e la frazione di energia latente accumulata consentono di valutare il corretto utilizzo dello strato come sistema di accumulo termico latente. Nel corso dell'anno, la variabilità della configurazione delle fasi nello strato modifica le caratteristiche dinamiche in funzione della quantità di energia latente accumulata. In particolare, si è riscontrato che i parametri dinamici sono correlati all'efficienza di accumulo latente. Indipendentemente dalla località e dalla tipologia di PCM e dalla configurazione delle fasi nello strato, all'aumentare dell'efficienza di accumulo latente: (a) il fattore di attenuazione dell'escursione massima della temperatura e del flusso termico, il fattore di attenuazione dell'energia si riducono; (b) la frazione di energia latente accumulata aumenta drasticamente; (c) gli sfasamenti del picco massimo e del picco minimo della temperatura e del flusso termico aumentano; (d) lo sfasamento del picco minimo del flusso termico diminuisce nella

stagione invernale e aumenta nella stagione estiva. Infine, i risultati mostrano che è sufficiente conseguire il cambio di fase in una porzione dello strato pari al 35% per ottenere: (a) una completa attenuazione sulla superficie interna dell'escursione massima della temperatura e del flusso termico; (b) un annullamento dell'energia fluttuante trasferita nell'ambiente interno; (c) valori unitari della frazione di energia latente. La ricerca di ulteriori dipendenze funzionali tra le caratteristiche dinamiche ha evidenziato una stretta correlazione tra il fattore di attenuazione dell'escursione massima del flusso termico e il fattore di attenuazione dell'energia, e tra lo sfasamento del picco massimo della temperatura e lo sfasamento del picco massimo del flusso termico. Infine, si può concludere che per identificare in modo completo il comportamento dinamico di uno strato di PCM sono necessari sette parametri dinamici indipendenti, da cui è possibile ottenere i parametri rimanenti.

#### **- *Optimal Design of PCM in Internal Walls for nZEB Buildings* [12]**

L'analisi parametrica sviluppata con l'obiettivo di valutare la riduzione del fabbisogno di energia termica e la variazione della temperatura interna in edifici altamente vetrati, con PCM integrato nelle pareti interne, ha evidenziato una forte dipendenza dalla stagione. In inverno, per gli involucri degli edifici i considerati, aventi differenti spessori di isolamento, di volume di PCM impiegato, e di temperatura di fusione, la presenza di PCM nelle pareti interne produce un aumento del fabbisogno di energia per la climatizzazione, indipendente dalla temperatura di melting e dal volume di materiale utilizzato. Tuttavia, allo stesso tempo, importanti riduzioni dello scostamento della temperatura interna rispetto al valore di set-point possono essere ottenuti. Ciò è dovuto alla grande quantità di radiazione solare che entra nell'ambiente interno attraverso le ampie superfici vetrate dell'involucro, la quale è immagazzinata nelle ore diurne nelle pareti interne con PCM, invece di contribuire a ridurre il fabbisogno per il riscaldamento, ed è rilasciato nel ore notturne consentendo di ridurre lo scostamento della temperatura. Di conseguenza, i risultati evidenziano come in inverno l'adozione di materiali a cambiamento di fase nelle pareti interne può contribuire alla attenuazione della temperatura interna quando il sistema di climatizzazione dell'aria è spento, grazie al rilascio durante la notte del calore latente immagazzinato. Per limitare questo svantaggio, un volume di PCM maggiore e una temperatura di fusione leggermente superiore alla temperatura di set point invernale, garantiscono una limitazione dell'incremento del fabbisogno energetico, ottenendo, però, una notevole riduzione dello scostamento della temperatura. I migliori risultati nella stagione invernale sono raggiunti con la parete esterna W3 e con l'utilizzo di 6 m<sup>3</sup> di PCM, ottenendo una riduzione dell'indice di scostamento della temperatura del 6,2% e un corrispondente incremento del fabbisogno per il riscaldamento del 9,8%. In estate, i risultati hanno dimostrato l'importante ruolo svolto da PCM per la significativa riduzione del fabbisogno di raffrescamento e dello scostamento della temperatura, indipendentemente dalla tipologia di involucro esterno. Ciò è dovuto all'accumulo della radiazione solare incidente sulle pareti interne che conduce alla riduzione del fabbisogno di raffreddamento complessivo. Quando l'impianto è spento, le pareti interne continuano a immagazzinare energia fino al tramonto, con una riduzione dello scostamento della temperatura interna. Il rilascio dell'energia latente nella notte non contribuisce alla riduzione dello scostamento della temperatura, poiché avviene quando la temperatura dell'aria interna si riduce a causa dello scambio attraverso le ampie superfici vetrate. Di conseguenza, la temperatura interna aumenta, senza superare 26 ° C. I risultati hanno dimostrato che una temperatura di fusione leggermente inferiore al valore di set-point dell'aria interna (26 ° C), consente lo sfruttamento dell'accumulo latente per la limitazione dell'aumento delle temperature superficiali interne e del conseguente scambio termico con l'aria, contribuendo così di ridurre il carico di raffreddamento. Al contrario, in termini di scostamento di temperatura, la migliore configurazione è caratterizzata da una temperatura di fusione leggermente superiore al valore di set point, poiché una volta spento l'impianto, il calore latente può essere meglio sfruttato per attenuare l'aumento delle temperature delle superfici interne, le quali tendono ad aumentare al di sopra del valore di 26 ° C a causa del calore accumulato nelle pareti. Nella stagione estiva, i migliori risultati si ottengono impiegando la parete esterna W2 e una temperatura di fusione di 26 ° C, ottenendo una riduzione della domanda di raffreddamento del 27,8% e dell'indice di scostamento della temperatura del 33,3%. Infine, queste analisi parametriche e di ottimizzazione hanno dimostrato che è possibile realizzare edifici ampiamente vetrati ad alte prestazioni nella stagione estiva del clima mediterraneo, aumentando l'inerzia termica delle pareti interne, con un peggioramento molto limitato previsto nella stagione invernale. Ciò richiede un'attenta progettazione dello strato di PCM in relazione allo spessore di isolamento impiegato nelle pareti esterne opache dell'edificio.

#### **- *EnergyPlus, IDA ICE and TRNSYS predictive simulation accuracy for building thermal behaviour evaluation by using an experimental campaign in solar test boxes with and without a PCM module (under revision: Energy and Buildings)* [13] [14]**

In questo paper è sviluppato un confronto tra i risultati ottenuti con i più popolari strumenti di simulazione delle prestazioni degli edifici, TRNSYS, EnergyPlus e IDA ICE, e misure sperimentali rilevati in due test-boxes (STB), solari esposte al clima di Roma. La prima test box è stata impiegata per la verifica sperimentale dei tool di simulazione in assenza di PCM; la seconda, è stata provvista di un pannello commerciale di PCM collocato a contatto con il pavimento per una verifica degli effetti prodotti da uno strato a cambiamento di fase. Per tale confronto, si è resa necessaria una disamina completa dei modelli matematici utilizzati dagli strumenti di simulazione per descrivere il trasferimento termico conduttivo, convettivo e radiativo, solare e infrarosso lungo, tra l'involucro e l'ambiente esterno ed interno. TRNSYS ed EnergyPlus possono essere considerati i più sofisticati nella modellizzazione della radiazione solare diretta attraverso la superficie vetrata, poiché considera le proprietà ottiche variabili con l'angolo di incidenza; inoltre TRNSYS all'interno

dell'ambiente valuta separatamente la distribuzione della radiazione solare diretta e della diffusa. Al contrario all'interno dell'ambiente, IDA ICE non tiene conto degli effetti della direzionalità della radiazione solare diretta, mentre EnergyPlus è il meno preciso dal punto di vista della modellizzazione della radiazione diffusa. Inoltre, IDA ICE ed EnergyPlus impiegano modelli di PCM molto più accurati di quelli di TRNSYS. Tutte queste considerazioni trovano conferma nell'indagine sperimentale effettuata: per il riferimento STB, TRNSYS fornisce la migliore previsione a settembre, quando gli effetti della direzionalità della radiazione solare attraverso il vetro sono rilevanti; per PCM STB, IDA ICE si è rivelato lo strumento più accurato poiché, a causa delle ridotte dimensioni dell'STB, il fenomeno di accumulo latente è predominante, rispetto agli altri meccanismi di trasferimento del calore, nella determinazione della temperatura dell'aria interna. Mediante un'analisi quantitativa, ottenuta valutando RMSE, NRMSE e  $R^2$ , è stata effettuata una classifica tra gli strumenti BPS, per l'STB privo di PCM e quello con il pannello PCM. La stima degli indici di accuratezza, valutati nei tre differenti periodi climatici, e inoltre, la valutazione di un indice di accuratezza complessivo, ha portato alle seguenti conclusioni: (a) In assenza di PCM, i tre strumenti BPS sono fortemente comparabili e il migliore risultato dipende prevalentemente dal periodo della campagna sperimentale. Infatti, gli indici di massima accuratezza sono forniti da TRNSYS nel periodo caldo e da IDA ICE nel periodo freddo. Invece, se si considera l'indice accuratezza generale, IDA ICE è lo strumento migliore in tutti i periodi. (b) In presenza di PCM, IDA ICE garantisce la migliore accuratezza, quasi pari a quella ottenibile in assenza di PCM, mentre gli altri strumenti offrono una precisione inferiore. Quindi, IDA ICE è fortemente raccomandabile per la simulazione dinamica, seguito, con una precisione inferiore, da EnergyPlus. Infine, TRNSYS è il meno accurato per le semplificazioni adottate nella modellazione del PCM. Infatti, non consente di prevedere esattamente gli andamenti della temperatura durante il cambio di fase, tuttavia, valuta abbastanza accuratamente il calore latente complessivo immagazzinato e rilasciato durante il cambiamento di fase, e inoltre richiede solo pochi dati termofisici e un costo computazionale ridotto.