
sintesi di tesi di laurea

Università degli Studi di Firenze - Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea: Scienze dell'Ingegneria Edile, A.A. 2010 - 2011

"STUDIO DELLE PRESTAZIONI TERMOFISICHE DI UNA COPERTURA CON APPLICAZIONE DI NUOVE TECNOLOGIE: FOTOVOLTAICO INTEGRATO E PCM"

Autore: Giuseppe Guarneri

Relatori: Dott.ssa Arch.PhD Carla BALOCCO,

Questo lavoro costituisce sintesi di una Tesi di Laurea in Scienze dell'Ingegneria Edile Triennale svolta presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi di Firenze che ha avuto come Relatori la sottoscritta, Dott.ssa Carla Balocco, nell'Anno Accademico 2010/2011.

Il titolo della tesi, "Studio delle prestazioni termofisiche di una copertura con applicazione di nuove tecnologie: fotovoltaico integrato e PCM", è emblematico e significativo dell'approccio metodologico e di ricerca definito e seguito in questo lavoro. Il settore di indagine è quello edilizio ma destinato alla vendita che rappresenta oggi uno dei settori in cui è possibile ottimizzare l'impiego delle risorse e definire interventi e/o soluzioni progettuali energeticamente sostenibili sul sistema integrato edificio-impianto. La ricerca è stata finalizzata alla valutazione delle prestazioni termo fisiche ed energetiche delle più attuali tecnologie quali il fotovoltaico integrato e l'impiego di materiali a cambiamento di fase (Phase Change Materials, PCM). Nel settore edilizio i PCM possono venire utilizzati sfusi, con microincapsulamento, con macroincapsulamento, immersi in matrici porose. L'obiettivo dei PCM è di utilizzare il loro alto valore di calore latente per assorbire il calore attraverso il processo di fusione prima che raggiunga gli spazi più interni oppure rilasciandolo durante il processo di solidificazione. Le modalità di utilizzo sono molteplici a seconda delle finalità che si vogliono ottenere. Una prima grande distinzione riguarda l'applicazione. Si sono distinte le seguenti principali applicazioni edilizie:

- involucro opaco: PCM inseriti in aggiunta ai normali isolanti nell'interfaccia tra interno ed esterno oppure in alcuni casi (molto rari) nelle pareti interne;*
- controsoffittatura o in pavimenti radianti: elementi inseriti in controsoffitti o pavimenti radianti che permettono di ottenere da questi sistemi di climatizzazioni risultati migliori;*
- involucro trasparente: in sostituzione dell'intercapedine d'aria presente tra lastre di vetro oppure in aggiunta ad essa, con opportune lastre schermanti o riflettenti;*
- sistemi tecnologici e di climatizzazione: PCM inseriti all'interno di scambiatori di calore a fascio tubiero che ne incrementano le prestazioni, oppure inseriti direttamente nella parte terminale dell'impianto di ventilazione nel caso di impianti a tutt'aria.*

In particolare la tesi ha analizzato l'applicazione di queste due tecnologie attraverso combinazioni ottimali di esse alla copertura di un edificio destinato alla vendita di automobili che si caratterizza per la massiccia presenza di elementi vetrati a tutta altezza e soprattutto per un grande e complessa struttura reticolare spaziale a traliccio in acciaio verniciato, costituita da aste a sezione circolare, visibile dall'esterno. Gli elementi portanti sono costituiti da setti in calcestruzzo armato, sui quali poggia il complesso sistema reticolare in acciaio, che sostiene le travi che portano la copertura, e a cui è collegato anche l'orditura di arcarecci in acciaio per il fissaggio del controsoffitto. Le reticolari spaziali sono interamente poste all'esterno e quindi il piano di copertura sottostante risulta sovrastato da queste. Lo studio è stato condotto attraverso molte simulazioni di tipo CFD (Computational Fluid Dynamics) basate sul metodo agli elementi finiti (Finite Element Method, FEM) ed in condizioni di regime semistazionario, utilizzando i dati sperimentali presenti in letteratura e le correlazioni empiriche suggerite per trattare in modo semplificato il cambiamento di fase. I risultati delle simulazioni sulla distribuzione di temperatura nel mezzo e su ciascuna superficie dei componenti il sistema, sull'andamento del flusso di calore e la sua distribuzione, in regime estivo, attraversante la soluzione proposta di copertura con PCM integrato e la soluzione di copertura con fotovoltaico integrato, indicano che l'accumulo di calore è significativamente ridotto quando il PCM è presente nella stratigrafia e che il suo aumento percentuale ha un effetto positivo sulle condizioni microclimatiche interne e quindi sulle potenze richieste all'impianto per il condizionamento e la ventila-

zione estive. Infatti la soluzione che prevede la copertura con lucernario vetrato isolante BIPV, a montanti e traversi in alluminio, nelle varianti standard e BIPV/PCM, cioè accoppiato a un PCM (inserito nel sub-componente più esterno di protezione delle celle PV) detto BIPV/PCM, ha dimostrato di apportare importanti ed apprezzabili vantaggi dal punto di vista termo fisico ed energetico rispetto al BIPV, in particolare poi per la soluzione con copertura inclinata, sia sul comportamento termico estivo e invernale che per l'efficienza del ottenuta sul sistema fotovoltaico, confermando in gran parte le previsioni sulla funzione principale di interesse di riduzione della temperatura superficiale. Questo lavoro costituisce una base di studio ed approfondimento sulle caratteristiche termofisiche e sulle prestazioni energetiche di soluzioni di copertura per l'edilizia. In particolare, disponendo di maggiori dati empirici e di risultati sperimentali sulle prestazioni termofisiche dei PCM, sarebbe possibile valutare l'efficienza di diverse applicazioni in ambito edilizio, finalizzate ad un miglioramento delle prestazioni termiche degli involucri (opachi e trasparenti) comprese la coperture, ma anche delle partizioni interne oltre attraverso ulteriori simulazioni di tipo CFD-FEM in regime dinamico, fino a costruire un abaco circa sistemi architettonicamente integrati e di diversi prodotti e tecnologie innovative.

Dott.ssa Carla Balocco

RIASSUNTO

Il tema cardine di questo lavoro di tesi concerne la valutazione del comportamento termofisico di soluzioni edilizie per coperture leggere caratterizzate da sub-componenti che includono tecnologie innovative, ad elevate prestazioni termofisiche ed energetiche, finalizzate alla riduzione dei consumi energetici e alla realizzazione di edifici energeticamente sostenibili. Queste valutazioni specifiche sono state effettuate per mezzo dei risultati ottenuti con simulazioni di Computational Fluid Dynamics basate su metodologie di tipo Finite Element Method (CFD-FEM) in condizioni di regime semistazionario. Il presupposto teorico di base trae origine dalla constatazione che il fronte più avanzato della ricerca per gli edifici energeticamente efficienti, nell'ambito dei quali gli involucri hanno una funzione determinante, è rappresentato ad oggi da materiali, spesso piuttosto comuni e compatibili con le odierne tecniche costruttive, a scala nanometrica e/o ultrasottili, in grado di superare alcune limitazioni tipiche di quelli tradizionali; per questi, infatti, il potenziale di isolamento è solitamente affidato alle capacità ponderali, cioè legati alla massa e soprattutto alla capacità termica dinamica frontale, incrementando quindi l'isolamento complessivo mediante coibenti, posizionati sul lato interno o esterno della parete. Il lavoro si è articolato attraverso le seguenti parti interconnesse: 1) Indagine sui materiali mediante approfondimento dello stato dell'arte in materia, delle correlazioni analitiche tra grandezze termofisiche e reperimento dei dati anche sperimentali disponibili e reperibili da varie fonti; 2) Individuazione di una copertura moderna

esistente di riferimento ed esame delle alternative costruttive adattabili alla struttura; 3) Definizione dei modelli solidi e dei modelli fisici e quindi individuazione dei dati e parametri fisici e termofisici di ingresso e delle condizioni al contorno; simulazioni basate sulle equazioni generali di scambio termico in regime semistazionario, per mezzo di una simulazione di tipo CFD-FEM con un software commerciale basato su un approccio multi fisico (Comsol-Multiphysics vs4.2); 4) Valutazione, analisi e confronto dei risultati. 5) Conclusioni e sviluppi perseguibili.

Gli obiettivi fondamentali del lavoro di tesi e ricerca che ci siamo posti, sono stati: determinare il comportamento termofisico di coperture con l'inserimento delle tecnologie oggetto di studio; indagare le prestazioni di PCM paraffinici interclusi in una copertura opaca a pannelli sandwich; valutare il contributo alla trasmittanza termica della tecnologia BIPV applicata in una copertura vetrata isolante e i vantaggi dell'accoppiamento PV/PCM, soprattutto come effetto di riduzione dell'incremento della temperatura operativa delle celle PV. Quest'ultimo aspetto parte dalla conoscenza che all'aumentare della temperatura operativa nominale della cella solare (Nominal Operative Cell Temperature, **NOCT**) oltre la soglia standard di 25 °C si verifica un decadimento progressivo dell'efficienza di conversione elettrica, e quindi della potenza, variabile a seconda del materiale costituente (cfr.fig. 1).

INTRODUZIONE

Le tecnologie oggetto di studio e di approfondimento di questo lavoro possono fornire un vali-

do contribuito alla progettazione del cosiddetto E3: Edificio Energeticamente Efficiente. Partendo dalle categorie di Sustainable e Low Energy Buildings, il traguardo finale in termini di performance energetiche complessive è rappresentato dai Net Zero Energy Buildings o dagli edifici a energia quasi zero e addirittura dai cosiddetti edifici attivi.

La valutazione del progetto in funzione della razionalizzazione dei consumi energetici, per soddisfare standard più restrittivi, e dell'edificio come sistema integrato involucro-impianto, affiancati a una progettazione a sua volta integrata fin dalle fasi preliminari, sono alcuni dei presupposti imprescindibili. A questi vanno aggiunti gli obblighi della certificazione energetica e dello sfruttamento delle fonti rinnovabili per i fabbisogni energetici in edilizia, preferibilmente mediante sistemi completamente integrati, nella consapevolezza che la prima fonte rinnovabile è il risparmio energetico, condizionato anche dalla forma architettonica dell'edificio, ma soprattutto dal funzionamento e dalle prestazioni termofisiche ed energetiche del sistema integrato edificio-impianto. L'efficienza e gli obiettivi di riduzione degli impatti ambientali vanno orientati secondo gli standard stabiliti dalla Direttiva Europea EPBD 2010.



Fig.1- Lucernario vetrato con sistema BIPV Schüco FW 60+ (IPS Meckenheim, Germania)

L'involucro, e quindi la copertura, ha un'influenza determinante sul comportamento termico ed energetico di una costruzione, tanto maggiore quanto maggiore è la sua superficie in rapporto al volume sottostante. Ormai è convinzione ampiamente condivisa che l'approccio ottimale allo sfruttamento dell'energia solare nelle costruzioni civili, soprattutto laddove si debbano preservare o migliorare le peculiarità estetiche, implichi solitamente la totale integrazione architettonica (si parla in tal senso, per il solare fotovoltaico o ibrido, di Building Integrated PhotoVoltaics, BIPV). L'avanzamento tecnologico e la concomitante

commercializzazione di una vasta gamma di prodotti estremamente versatili (si pensi, ad esempio, a membrane impermeabilizzanti, elettrotegole e coppi con moduli fotovoltaici, rivestimenti ceramici fotonici, film sottili flessibili, etc.). Le tipologie dell'architettura contemporanea, in termini formali e di tecnologie costruttive, che prevedono grandi superfici vetrate risultano perfettamente idonee alla totale integrazione in copertura del fotovoltaico, inteso non più come impianto indipendente che grava sulla struttura di un edificio, ma come sub-componente delle varianti tipologiche: questo può contribuire a rendere tali superfici a più alte prestazioni sia dal punto di vista termofisico ed energetico, consentendo soprattutto una produzione di elettricità a costo zero per le richieste dell'utenza finale, conferendo all'architettura la funzione di centrale energetica (anche per sistemi termici o ibridi).

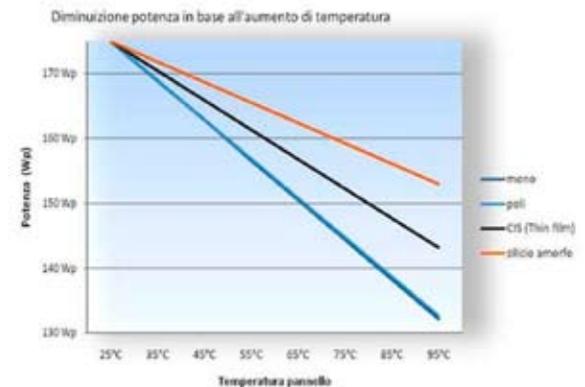


Fig.2- Grafico dell'andamento della potenza di un pannello in funzione della temperatura oltre 25°C per le tecnologie PV attualmente impiegate

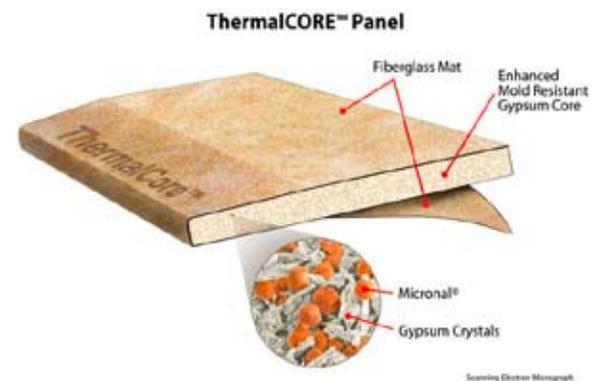


Fig.3- Lastra in gesso con PCM paraffinici Micronal rivestita in fibra di vetro (ThermalCore Panel)

A parte quelli legati all'approvvigionamento energetico "on site" da fonti rinnovabili, i vantaggi sono ovviamente di tipo estetico ed economico, in quanto nel calcolo del tempo di ritorno dell'in-

vestimento per l'impianto PV bisogna tener conto del risparmio legato all'acquisto di un prodotto facente parte di un componente architettonico, più o meno complessivo, indispensabile per il completamento dell'edificio. E' importante ricordare che di recente è stato formalizzato il recepimento della **Direttiva Europea RES** (Renewable Energy Sources), sull'obbligo di utilizzo delle fonti rinnovabili, promulgando una norma attuativa nazionale. Inoltre, con il **IV Conto Energia (2011)/V Conto Energia (Bozza, Aprile 2012)** sono stati apportati adeguamenti alle tabelle tariffarie, utili per il calcolo dell'investment back time, che riconoscono, fin dalla prima edizione, tariffe incentivanti superiori per gli impianti BIPV.

I materiali a cambiamento di fase o Phase Change Materials (PCM), il più semplice e a minimo impatto ambientale dei quali è l'acqua, sono generalmente ottenuti da miscele di composti organici o inorganici; sono stati utilizzati dall'industria aerospaziale, possono essere sfruttati come accumulatori di calore latente, in quanto hanno la capacità di assorbirlo (solidificandosi) e rilasciarlo (solidificandosi), attivando naturalmente meccanismi di termoregolazione. Queste transizioni sono ovviamente reversibili. In ambito edile, si impiegano principalmente PCM paraffinici o sali idrati (soprattutto sali di Glauber), applicati in intonaci, lastre/pannelli in cartongesso per S/R, finestre e facciate trasparenti (anche con selettori della radiazione solare inseriti nel vetrocamera), trapuntine/tende a controllo solare, sistemi a pannelli radianti, pannelli sandwich. La caratteristica che li rende vantaggiosi è l'inerzia termica artificiale programmabile sulla temperatura, per cui è possibile scegliere il PCM in funzione del campo termico per il microclima interno o esterno in funzione dello specifico contesto applicativo.

Tab.1: Dati essenziali sui principali PCM per applicazioni edilizie ad oggi in commercio

Nome commerciale	Tipo di prodotto	Punto di fusione [°C]	Calore latente di fusione [kJ kg ⁻¹]	Produttore
RT 20	Paraffina	22	172	Rubitherm GmbH
Climsel C23	Sale idrato	23	148	Climator
Climsel C24	Sale idrato	24	216	Climator
RT 26	Paraffina	25	131	Rubitherm GmbH
RT 25	Paraffina	26	232	Rubitherm GmbH
STL 27	Sale idrato	27	213	Mitsubishi chimica
S 27	Sale idrato	27	207	Cristopia
RT 30	Paraffina	28	206	Rubitherm GmbH
RT 27	Paraffina	28	179	Rubitherm GmbH
TH 29	Sale idrato	29	188	TEAP
Climsel C32	Sale idrato	32	212	Climator
RT 32	Paraffina	31	130	Rubitherm GmbH

Nel corso della ricerca sullo stato dell'arte sono state individuate alcune importanti referenze su edifici realizzati, ricordando inoltre che le prime esperienze applicative risalgono al 1948, negli Stati Uniti: unità residenziale autonoma con accumulatore di paraffina inserito in componenti trasparenti – una parete solare leggera, con spessore di soli 106 mm e $U= 0.40 \text{ W.m}^{-2}\text{K}^{-1}$ e altri edifici complessi con differente destinazione d'uso in Svizzera, residenze nel quartiere CasaNova a Bolzano (dotate di serramenti esterni integrati con sali di Glauber), edificio bifamiliare in Classe Oro CasaClima a Colognola (BG) aventi lastre in cartongesso rivestito integrato con microcapsule di paraffina Micronal di Basf.

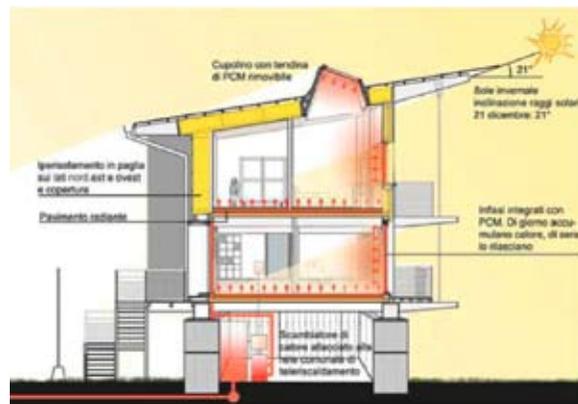


Fig.4- Sezione di un edificio E3 tipo, con tendine e infissi esterne contenenti PCM, avente struttura/rivestimento in acciaio (quartiere CasaNova, Bolzano)

In generale, il ciclo carico/scarico termico, cioè di completa liquefazione e successiva ricristallizzazione, è diurno. Un aspetto determinante da affrontare per le applicazioni su larga scala dei PCM in edilizia attiene al loro incapsulamento, ossia il sistema di contenimento (packaging); le caratteristiche a cui questo deve rispondere sono svariate, ma essenzialmente deve possedere un'adeguata resistenza meccanica e impedire perdite o fuoriuscite del PCM. Le alternative finora proposte, a livello sperimentale e di produzione industriale, prevedono il micro e macro incapsulamento o l'immersione in matrici porose (ad esempio calcestruzzi).

I PCM posti sul lato interno possono essenzialmente agevolare lo smorzamento dei picchi termici, mentre se inseriti sul lato esterno ridurre gli apporti termici gratuiti, proteggendo dall'irraggiamento solare estivo.

I prodotti attualmente in commercio sono: intonaci, lastre/pannelli in cartongesso per S/R, finestre e facciate trasparenti (anche con selettori della radiazione solare inseriti nel vetrocamera), trapuntine/tende a controllo solare, pannelli sandwich.

IL CASO DI STUDIO

Dal punto di vista architettonico, geometrico e di contestualizzazione climatica e topologica si è preso come oggetto di studio la copertura a grande luce di un moderno edificio esistente in acciaio e calcestruzzo armato. Il corpo di fabbrica, in cui questa copertura è collocata, seppur indipendente, è parte di un complesso edilizio formato anche da un altro volume: i due sono collegati da un ampio corridoio vetrato sospeso a pianta rettangolare, caratterizzato in facciata da grandi archi reticolari in acciaio, che copre uno spazio esterno a servizio esclusivo della concessionaria. Si tratta di un intervento di nuova realizzazione, la cui costruzione è stata avviata nel 2000. Lo spazio considerato è di proprietà di Co.Bra.Ma S.r.l. operante nella commercializzazione, assistenza tecnica, vendita di ricambi e nel servizio officina di vetture del Gruppo Volkswagen. Si tratta di un ampio volume quadrato su due livelli totali, di cui il seminterrato accoglie l'officina e l'assistenza, mentre il superiore è in gran parte organizzato in un ampio open space a doppia altezza per la vendita e il front office, con piccoli uffici e servizi collocati su un soppalco. Questo piano terreno ha un'altezza interna netta di circa 5.50 m. L'edificio presenta una forma quadrata, con i lati di dimensioni pari a circa 29-60 m, esposti ciascuno verso le quattro direzioni geografiche; la superficie coperta lorda è 876 m² si caratterizza per la massiccia presenza di elementi vetrati a tutta altezza e soprattutto per un grande e complessa struttura reticolare spaziale a traliccio in acciaio verniciato, costituita da aste a sezione circolare, visibile dall'esterno.



Fig.5- Vista esterna della sede di CoBraMa (fronte principale)



Fig.6- Vista interna dal basso della copertura dell'autosalone CoBraMa

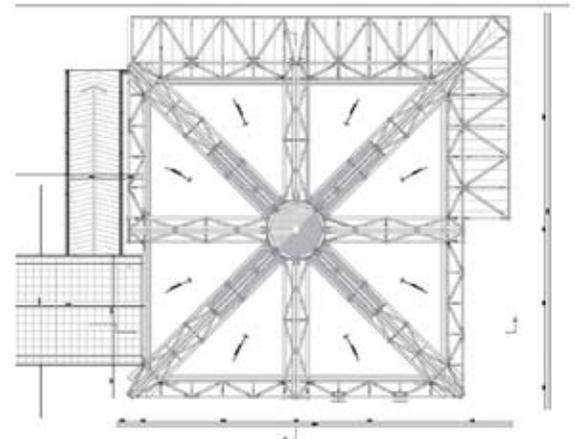


Fig.7- Pianta strutturale della copertura dell'edificio CoBraMa

Gli elementi portanti sono costituiti da setti in calcestruzzo armato, sui quali poggia il complesso sistema reticolare in acciaio, che sostiene le travi che portano la copertura, e a cui è collegato anche l'orditura di arcarecci in acciaio per il fissaggio del controsoffitto. Le reticolari spaziali sono interamente poste all'esterno e quindi il piano di copertura sottostante risulta sovrastato da queste. Le dimensioni, la forma, i volumi a tutta altezza e la caratterizzazione degli ambienti interni sono apparsi perfettamente corrispondenti alle tipologie di cui si voleva proporre la sperimentazione. Il grande open-space, caratterizzato da elevate altezze che ne risaltano le peculiarità architettoniche e offrono una buona illuminazione naturale, presenta solo alcune piccole aree delimitate. Questo ambiente è sovrastato da una struttura a pannelli prefabbricati in acciaio, alternati a componenti vetrati. La copertura piana, con pendenza del 3%, è realizzata con pannelli sandwich, di spessore 50/40 mm, in lamiera grecata d'acciaio ed è dominata al centro da un oculo vetrato piramidale a pianta ottagonale, che favorisce l'ingresso della luce naturale.

Da quattro lati di base di questo elemento sporgente si diramano quattro grandi rettangoli inclinati a 45°, anch'essi vetrati, tripartiti in elementi più piccoli. Il controsoffitto interno è composto da pannellature piane in acciaio con finitura a doghe nella colorazione grigio chiaro. Le facciate e gli elementi di tamponamento esterno, nelle parti non occupate dai setti in calcestruzzo armato, sono realizzati in vetro e metallo. Considerando la scarsa qualità complessiva della copertura esistente e la possibilità di migliorarne sia l'efficienza energetica, sia i requisiti estetici, in relazione anche a un cambiamento della destinazione d'uso che richieda una valorizzazione architettonica e più qualificanti condizioni illuminotecniche, sono state riscontrate alcune criticità principali: ampie superfici disperdenti; elevati consumi di energia elettrica; necessità di controllo della luce entrante, dal punto di vista termico e luminoso.

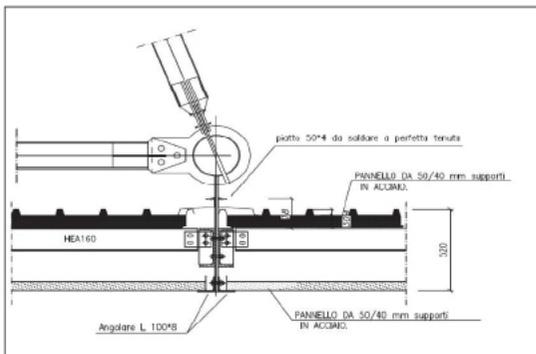


Fig.8- Dettaglio della copertura dell'edificio CoBraMa (sezione)

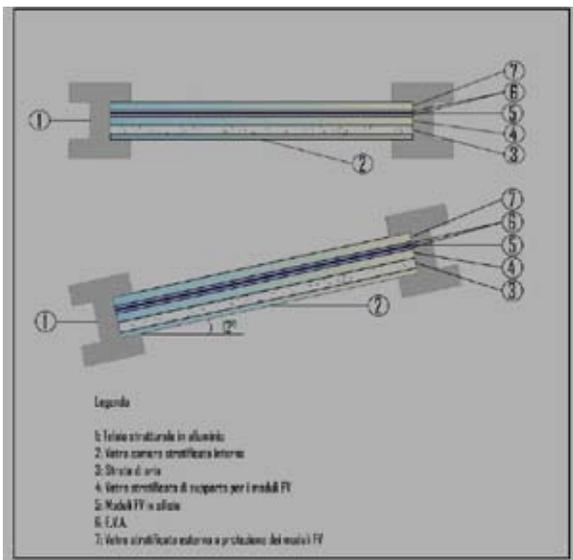


Fig.9- Sezione dei modelli di lucernario vetrata isolante BIPV, orizzontale e inclinato

Inoltre, sebbene allo stato attuale questa verifica i limiti di trasmittanza previsti per le partizioni orizzontali opache, prima del 2010, dal DPR 59/09, non risulta soddisfatta la verifica di con-

densazione interstiziale secondo Glaser (come previsto dalla UNI EN ISO 13788). Per l'autosalone al piano terra è stata quindi proposta una nuova soluzione progettuale di copertura, che prevede l'inserimento integrato di tecnologie innovative, che è stata quindi analizzata e verificata sia dal punto di vista termico che in termini di peso energetico sul sistema edificio-impianto, conducendo il calcolo del carico termico di picco estivo, dei carichi termici invernali e quindi la verifica della rispondenza in termini di requisiti di ventilazione e di condizioni di benessere termico interno, dell'impianto di climatizzazione che prevede sistemi ad aria con ricircolo.

MODELLAZIONE MULTIFISICA

Per definire un modello fisico che possa essere studiato da un punto di vista termofisico con approccio agli elementi finiti (FEM) sussistono due fasi principali: l'individuazione del problema, per passare dal sistema fisico reale ad un modello fisico pertinente e rappresentativo descritto da opportune condizioni al contorno; la discretizzazione, consistente nella definizione della geometria allo scopo di renderlo discretizzato, caratterizzandolo con un numero finito di gradi di libertà.

Tab.2: Condizioni climatiche esterne di progetto per le simulazioni

BIPV e BIPV/PCM		
	ESTATE 21 GIUGNO h: 13	INVERNO 21 DICEMBRE h: 13
Temperatura di bulbo secco dell'aria T_{bs}	29.8 °C	3.2 °C
Umidità relativa dell'aria ϕ_R	52%	$\phi_R = 62\%$
Radiazione solare su orizzontale (SUD)	$I_{sol} = 1053 \text{ W m}^{-2}$	$I_{sol} = 445 \text{ W m}^{-2}$
SSPCM		
	ESTATE 31 Luglio 1) h:16 , 2) h: 5	INVERNO 9 Febbraio h: 8
Temperatura di bulbo secco dell'aria T_{bs}	1) 36,6 °C 2) 17,2 °C	-5,4 °C
Umidità relativa dell'aria ϕ_R	1) 36 % 2) 88%	52%
Radiazione solare su orizzontale (SUD)	1) $I_{sol} = 1267 \text{ W m}^{-2}$	$I_{sol} = 140 \text{ W m}^{-2}$

L'indagine sul comportamento termofisico delle due tecnologie d'interesse è stata estesa a tre possibili alternative di copertura rispetto all'attuale, tutte caratterizzate da struttura portante metallica (acciaio o alluminio), quindi in linea con le tendenze più recenti dell'architettura per grandi spazi: 1) una copertura piana a pannelli sandwich con

Tab.3: Condizioni di benessere termoigrometrico per ambiente interno secondo ASHRAE

PARAMETRICI TERMOIGROMETRICI DI PROGETTO PER AMBIENTE INTERNO	
REGIME ESTIVO, ORE DIURNE	
Temperatura di bulbo secco dell'aria	$T_{db} = 26^{\circ}\text{C}$
Umidità relativa dell'aria	$U_{r} = 50\%$
REGIME ESTIVO, ORE NOTTURNE	
Temperatura di bulbo secco dell'aria	$T_{db} = 20^{\circ}\text{C}$
Umidità relativa dell'aria	$U_{r} = 50\%$
REGIME INVERNALE	
Temperatura di bulbo secco dell'aria	$T_{db} = 20^{\circ}\text{C}$
Umidità relativa dell'aria	$U_{r} = 50\%$

interposto uno strato di materiale a cambiamento di fase in forma stabile (shape stabilized-PCM, **SSPCM**), basata su quella di riferimento; 2-3) un lucernario vetrato isolante **BIPV**, a montanti e traversi in alluminio, nelle varianti standard e **BIPV/PCM**, cioè accoppiato a un PCM (inserito nel sub-componente più esterno di protezione delle celle PV). Due importanti progetti di ricerca italiani hanno fornito i basilari riferimenti per lo sviluppo della seconda e della terza soluzione e per l'individuazione di alcuni dati: il primo relativo ad analisi numeriche e sperimentali su pannelli sandwich contenenti PCM per prefabbricazione, condotto presso l'Università Politecnica delle Marche e rientrante nel programma di ricerca europea Changeable Thermal Inertia Dry Envelopes (C-TIDE), e il secondo riguardante un modello alle differenze finite di un pannello fotovoltaico accoppiato a PCM, messo a punto presso il Dipartimento di Ricerche Energetiche e Ambientali dell'Università degli Studi di Palermo (DREAM).

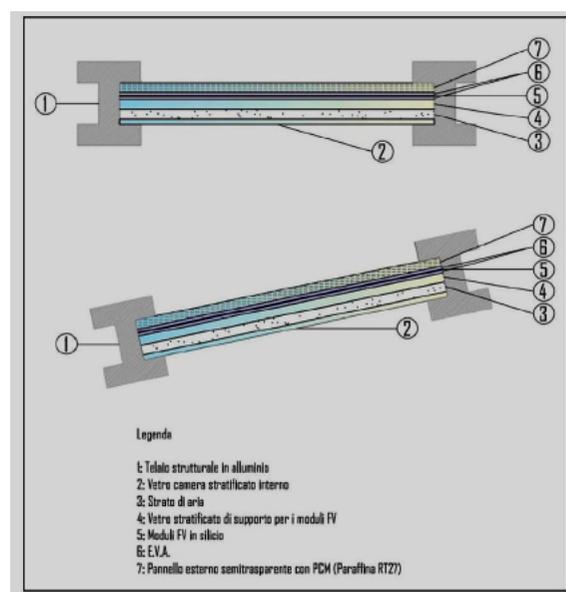


Fig.10- Sezione dei modelli di lucernario vetrato isolante BIPV/PCM, orizzontale e inclinato

Di queste tre soluzioni è stata verificata la rispondenza alla normativa, sotto il profilo termoigrometrico (trasmissione termica e condensazione interstiziale valutate con le rispettive normative UNI vigenti), secondo i limiti prescritti dal D.P.R. 59/09 e applicando la verifica alla formazione di condensa con il metodo di Glaser.

Tab.4: Trasmissioni termiche secondo UNI 6946 e da simulazioni per i modelli più performanti

U [W/m ² K] da simulazione	U [W/m ² K] da UNI 6946
BIPV (incl.12°) : 3	BIPV: 0.7
BIPV/PCM: 2.8	BIPV/PCM : 0.75
SSPCM : 0.32	SSPCM : 0.11
STATO ATTUALE: 0.61	STATO ATTUALE: 0.45

Sono stati realizzati 5 modelli bidimensionali (BIPV orizzontale e inclinato, SSPCM piano, BIPV/PCM orizzontale e inclinato) semplificati, considerando una porzione centrale di una sezione trasversale delle varie soluzioni nel loro insieme; tenendo conto delle differenziazioni tra analisi invernali ed estive, nonché dei due possibili stati fisici del SSPCM. Sono state effettuate molte simulazioni in condizioni di regime semi-stazionario, prevedendo sempre l'esposizione a Sud per la valutazione dell'irraggiamento solare e quindi considerando le diverse possibili soluzioni di accoppiamento ed inclinazione per tutti i giorni tipo dell'anno.



Fig.11- Lastra commerciale di paraffina e HDPE per impieghi in edilizia, assunta a riferimento per la trattazione del modello SSPCM

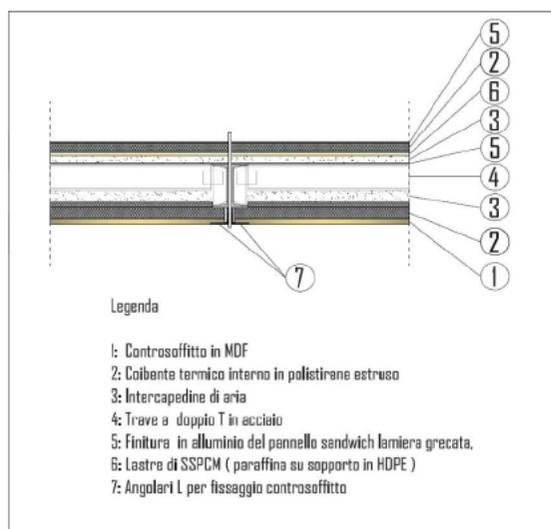


Fig.12- Sezione del modelli di copertura vetrata isolante SSPCM

E' stata condotta l'analisi termica fondamentale considerando in modo semplificato il cambiamento di fase del PCM. L'algoritmo di calcolo si basa su equazioni con variabili lagrangiane T (temperatura) e J (flusso termico).

Le grandezze termofisiche richieste come input sono state la densità, la conducibilità termica e il calore specifico a pressione costante (in alcuni casi anche la grandezza ad esso legata, la capacità termica). Per i confini interni e esterni, corrispondenti all'intradosso e all'estradosso della copertura, si è ricorsi all'approssimazione che la temperatura superficiale coincida, rispettivamente, con quella media dell'ambiente interno, assunta secondo le indicazioni per il benessere termometrico riportate in letteratura, e con quella di bulbo secco dell'aria esterna, come riassunte in Tabella 3.

I dati climatici sono riferiti alla città di Firenze ed estratti come giorni tipo da quelli dell'Anno Tipo. In particolare, si è considerato, per le analisi invernali ed estive dei modelli BIPV e BIPV/PCM, il giorno e l'ora, rispettivamente, con minore e maggiore soleggiamento solare con sollecitazioni dovute alle variazioni di temperatura esterna piuttosto importanti nell'arco delle 24 ore. Tali condizioni si verificano al 21 Dicembre, h: 13 e al 21 Giugno, h: 13. Nel caso dei modelli SSPCM, invece, ci si è riferiti, per l'anno tipo, al giorno e l'ora peggiore, in regime invernale (9 Febbraio, h: 8), limitandosi il caso di PCM solido, mentre in regime estivo al giorno peggiore e all'ora in cui si registra la temperatura più elevata (picco estivo, 31 Luglio, h: 16) e a quella in cui si registra la temperatura più bassa (31 Luglio, h: 5), studiando quindi corrispondentemente il PCM allo stato liquido e solido.

La valutazione dei valori relativi all'irraggiamento solare ha previsto il calcolo della radiazione totale incidente su superficie comunque orientata ed inclinata, mediante implementazione della norma UNI 8477/1.

La stratigrafia delle sezioni BIPV (cfr. fig.9) non si discosta molto da quella delle vetrate isolanti a taglio termico con fotovoltaico integrato attualmente commercializzate (vedi la produzione delle aziende EnergyGlass, Metra o Schüco, per citarne alcune), le quali consentono di solito un alto tasso di personalizzazione (in termini di numero, spessore e caratteristiche dei vetri, nonché del riempimento per le intercapedini) e prevede, partendo dal lato interno, un doppio vetro camera, moduli PV (supporti in silicio monocristallino), protetti inferiormente e superiormente da film in EVA, e infine un vetro temprato di protezione come ricorrente nei comuni pannelli PV stand alone.

Le sezioni BIPV/PCM sono identiche, ad eccezione dell'ultimo strato, costituito in questo caso da un pannello trasparente riempito di paraffina RT27 (come nello studio del DREAM) e per entrambe la geometria è stata ripartita in 9 domini.

La semplificazione principale nell'analisi ha riguardato l'identificazione delle proprietà delle celle PV con quelle del silicio di grado solare, dovuta alla mancanza di dati ed informazioni sia sperimentali che di letteratura (in particolare, sulla conducibilità termica e sul calore specifico, per i quali l'errore tra il prodotto finito e il solo silicio è più significativo): tale adattamento, oltre che necessario, è stato ritenuto comunque lecito dato l'esiguo spessore dei moduli PV rispetto all'intero involucro.

Il modello SSPCM, è costituito da pannelli sandwich su struttura in acciaio, esattamente come nella copertura attuale. Le differenze si riscontrano nelle stratigrafie: quello interno è essenzialmente un controsoffitto, formato da una parte superiore con coibente termico e una in MDF, rivolta verso l'ambiente, con funzione di fonoassorbimento. Lo strato esterno è costituito, oltre che dalle lamie intermedie, superiore e inferiore, da un intercapedine d'aria, da isolante termico in polistirene estruso e soprattutto da uno strato di composto paraffina-polietilene (Paraffin-Polyethylene Compound, PPC, C18 (75%) + HDPE (25%)), caratterizzato da temperatura di fusione di 28°C. A livello industriale quest'ultimo può essere prodotto in lastre modulari (come per gli isolanti termici) di spessore variabile, con tecniche di posa piuttosto semplici. Si è proceduto alla valutazione della densità, in fase solida e liquida, ponderando il comportamento termico del materiale sulla percentuale di massa. Le altre due grandezze termo-

fisiche sono state assimilate a quella della paraffina C18 considerata. I domini di ripartizione della geometria, in questo caso, sono risultati 12.

Per i modelli, sia opaco che vetrato, contenenti PCM al fine di stabilire la fase fisica di quest'ultimo, perché in funzione di questa variano i valori delle proprietà termofisiche di input, si è considerata nota e costante sui confini esterni il valore della temperatura. Nel caso i risultati ottenuti avessero fornito un dato difforme da quelli sperimentali, si sarebbero dovute reiterare le simulazioni considerando l'altro dei due stati fisici per il PCM; di fatto ciò non è stato necessario. Questo ha quindi permesso la validazione del modello fisico e del metodo di risoluzione numerica utilizzato. Il dato di partenza sul PCM di più difficile reperimento dalla letteratura, nonché da indagini sui risultati attualmente ottenuti dai centri di ricerca in questo settore, è il calore specifico allo stato liquido; per determinarlo sono state utilizzate alcune correlazioni analitiche ricavate da indagini empiriche e suggerite dalla letteratura (equazioni 1, 2, 3 e 4), imponendo T_0 pari al limite inferiore (per le analisi invernali e estive) e T pari al limite superiore (solo per le analisi estive) di temperatura media oraria per il giorno peggiore.

Per comprendere il significato delle equazioni, bisogna precisare che l'entalpia totale, quando tutto il materiale si è completamente liquefatto, cioè quella corrispondente al valore di temperatura per il quale si considera la transizione completa nello stato liquido, risulta dalla somma dei contributi entalpici specifici al termine della fase solida H_s e della fase di fusione H_m :

$$H_l = H_s + H_m \quad (1)$$

Si può pertanto introdurre un fattore di fusione f , dato dal rapporto tra la massa fusa e la massa totale, che consente di calcolare il contributo del calore latente di fusione associato alla variazione entalpica per una dato gradiente termico, in una specifica fase fisica. Il valore dell'entalpia associato a ciascuna delle tre condizioni possibili sullo stato di aggregazione del PCM (solido, fuso, liquido) può essere calcolato attraverso queste integrazioni:

$$H_s = \int_{T_0}^{T_m} \rho_s C_{ps} dT + \rho \lambda f \quad \text{per } f=0 \quad (2)$$

$$H_m = \int_{T_m}^{T_{liq}} \rho_s C_{ps} dT + \rho \lambda f \quad \text{per } 0 < f < 1 \quad (3)$$

$$H_l = \int_{T_{liq}}^T \rho_l C_{pl} dT + \rho \lambda f \quad \text{per } f=1 \quad (4)$$

RISULTATI

I risultati ottenuti dalle simulazioni modellazioni dei diversi modelli fisici studiati permettono una visualizzazione immediata del comportamento termico e dunque del comportamento termofisico del componente e delle sue prestazioni. Ne riportiamo in questa sede i più significativi in forma di immagini e diagrammi. I primi forniscono le distribuzioni di: temperatura, flusso termico totale, temperatura con sovrapposizione delle linee di flusso totale. I secondi mostrano gli andamenti di temperatura e flusso termico totale nello spessore del mezzo.

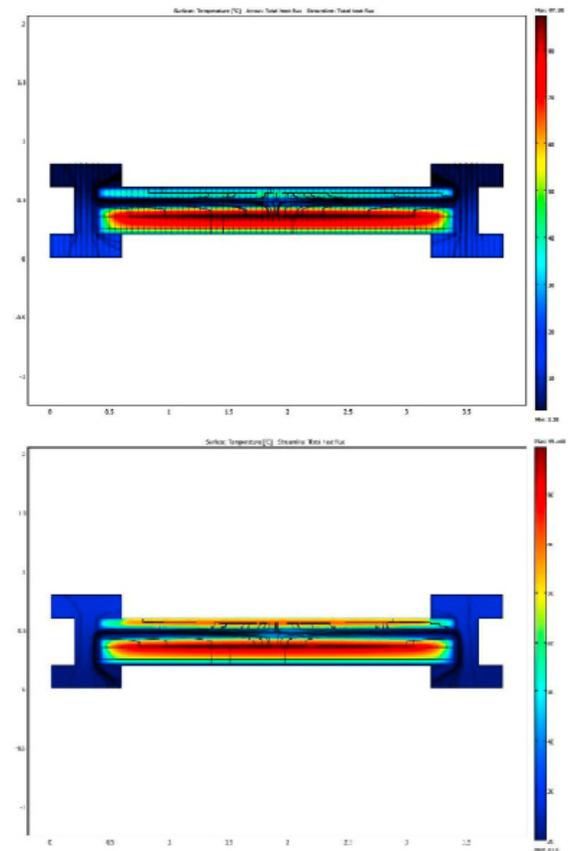


Fig.13- Distribuzione di temperatura e linee del flusso termico totale nel modello di copertura BIPV orizzontale

Inoltre, si sono ottenuti risultati specifici per integrazione dei valori sia su determinati punti caratteristici che su zone-superfici di interesse, indicativi della condizione termica e quindi della distribuzione della variazione di temperatura. Per i modelli BIPV sono state rilevate anche la temperatura puntuale sulla superficie di estradosso del vetro esterno e al centro dello strato di silicio; per i modelli BIPV/PCM, oltre a quest'ultime, quella al centro dello strato di PCM; per i modelli SSPCM, al centro dello strato di PCM.

La distribuzione di temperatura e del flusso di ca-

lore sono state ottenute per tutto il modello bidimensionale, e contemporaneamente la curva dell'andamento della temperatura e dell'andamento del flusso termico sono state derivate lungo il confine.

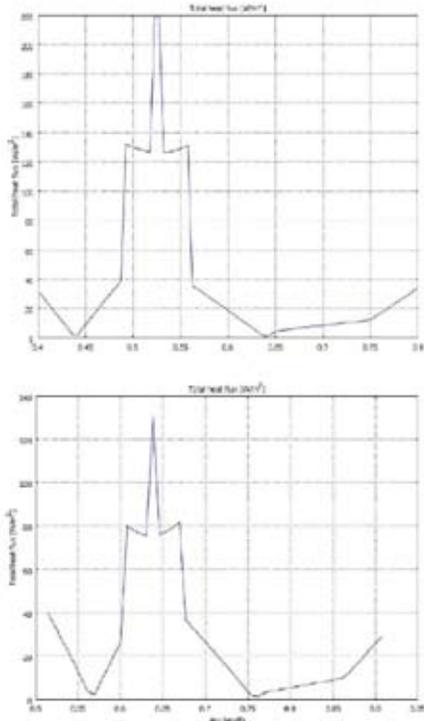


Fig.14- Andamento del flusso termico totale nello spessore (regime estivo), dall'esterno verso l'interno, nei modelli BIPV orizzontale (sopra) e inclinato (sotto)

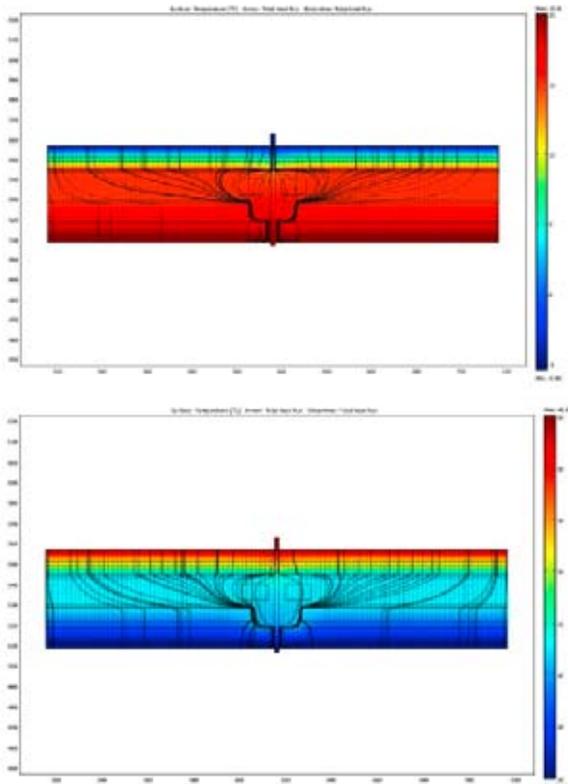


Fig.15- Distribuzione di temperatura e linee del flusso termico totale nel modello di copertura SSPCM per il giorno peggiore invernale con PCM solido (sopra) e per il giorno peggiore estivo con PCM liquido (sotto)

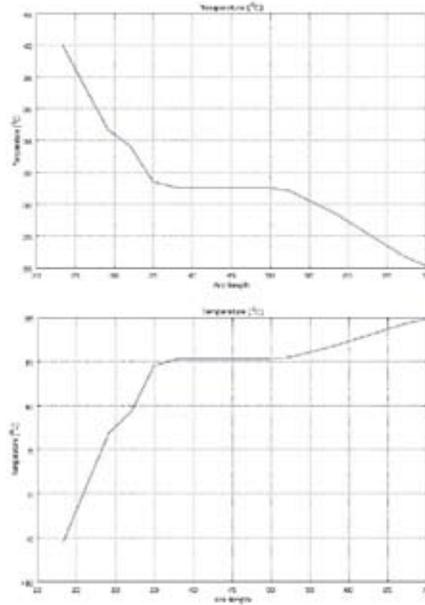


Fig.16- Andamento del flusso termico totale nello spessore, dall'esterno verso l'interno, nel modello SSPCM, in regime estivo con PCM liquido (sopra) e in regime invernale con PCM solido (sotto)

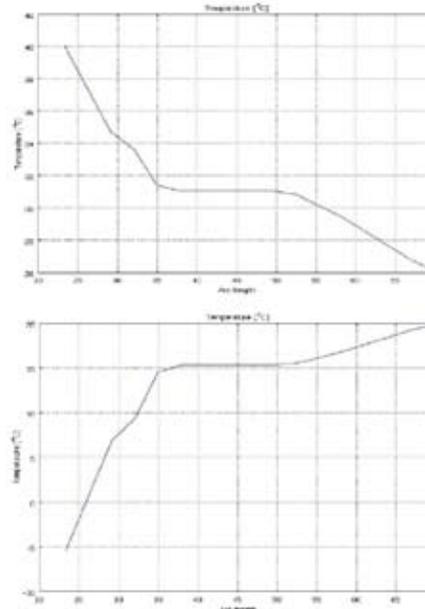


Fig.17- Andamento della temperatura nello spessore, dall'esterno verso l'interno, nel modello SSPCM, in regime estivo con PCM liquido (sopra) e in regime invernale con PCM solido (sotto)

Vengono quindi analizzati e confrontati i risultati più significativi, ripartendoli tra analisi invernali e estive. Per i confronti in termini di trasmittanze termiche si è ritenuto conveniente adottare uno schema comparativo sulla base di analogie tra sub-componenti, come segue:

- **BIPV – BIPV/PCM** (coperture trasparenti piane e a 4 falde)
- **SSPCM – Caso di Riferimento** (coperture opache piane)

L'evidenza e differenza più rilevante è sul valore calcolato per il modello SSPCM, del quale il valore trasmittanza ottenuto con la simulazione risulta circa la metà rispetto a quello dello stato attuale. In condizioni estive i confronti sono stati condotti tra le temperature superficiali nei sub-componenti di interesse, cioè i moduli PV e lo strato di PCM (cfr. Tab.5 e 6). Il dato più rilevante è sicuramente la significativa riduzione ($\Delta T \approx 4^\circ\text{C}$) della temperatura nel silicio (T_{PV}) nel caso piano con fotovoltaico accoppiato a PCM, rispetto al corrispondente modello con solo fotovoltaico.

Tab. 5: Dato medio di temperatura nel dominio silicio TPV (assimilabile ai moduli fotovoltaici) - regime estivo

BIPV orizzontale $39.5 < T_{PV} < 39.7^\circ\text{C}$	BIPV/PCM orizzontale $34.5 < T_{PV} < 34.7^\circ\text{C}$
BIPV inclinato (12°) $40.3 < T_{PV} < 40.5^\circ\text{C}$	BIPV/PCM inclinato (12°) $40.2 < T_{PV} < 40.4^\circ\text{C}$

Tab. 6: Dato medio di temperatura nello strato di PCM - regime estivo

BIPV/PCM orizzontale $36.6 < T_{PCM} < 37^\circ\text{C}$	BIPV/PCM inclinato $34 < T_{PCM} < 34.2^\circ\text{C}$
SSPCM liquido (h:16) $41 < T_{PCM} < 41^\circ\text{C}$	SSPCM solido (h:5) $18 < T_{PCM} < 18.2^\circ\text{C}$

Per quanto concerne la valutazione del rendimento di produzione elettrica da fonte solare nel caso di copertura BIPV e BIPV/PCM, va precisato che, in termini quantitativi, la superficie totale dei moduli con pannelli fotovoltaici integrati è approssimativamente pari a 130 m^2 , quasi un settimo dell'area lorda del lucernario, tenendo presente che tali dimensionamenti sull'area coperta con pannelli vetrati BIPV sono stati determinati anche dalla necessità di lasciare una fascia di rispetto tutto intorno alla linea di gronda, per favorire le operazioni manutentive della copertura in generale e degli elementi con il sistema fotovoltaico integrato. Pertanto in tutta la fascia perimetrale è stata ipotizzato l'alloggiamento di vetri senza moduli fotovoltaici. Se si considera che un pannello in silicio monocristallino con potenza di picco pari a 1 kW ha un ingombro di circa 7 m^2 , secondo una stima attendibile, un impianto con queste caratteristiche può raggiungere una potenza di picco intorno a 18.5 kW_p .

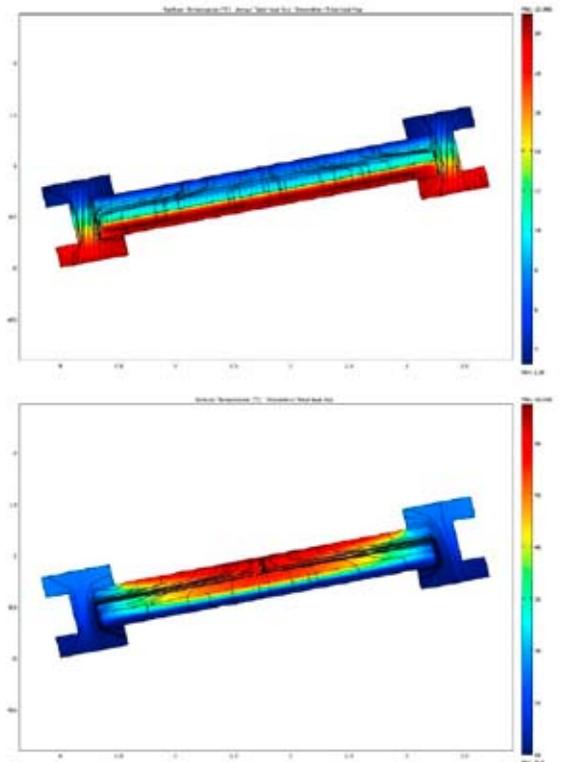


Fig.18- Distribuzione di temperatura e linee del flusso termico totale nel modello di copertura BIPV/PCM inclinato, in regime invernale (sopra) e estivo estivo con PCM liquido (sotto)

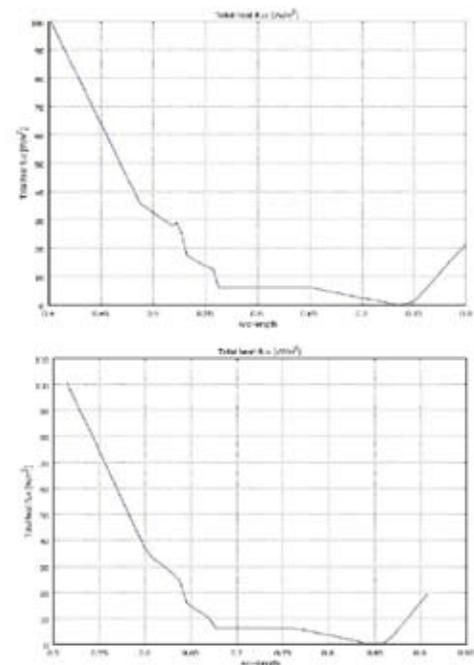


Fig.19- Andamento del flusso termico totale nello spessore, dall'esterno verso l'interno, nel modello BIPV/PCM, in regime invernale, nel caso orizzontale (sopra) e inclinato

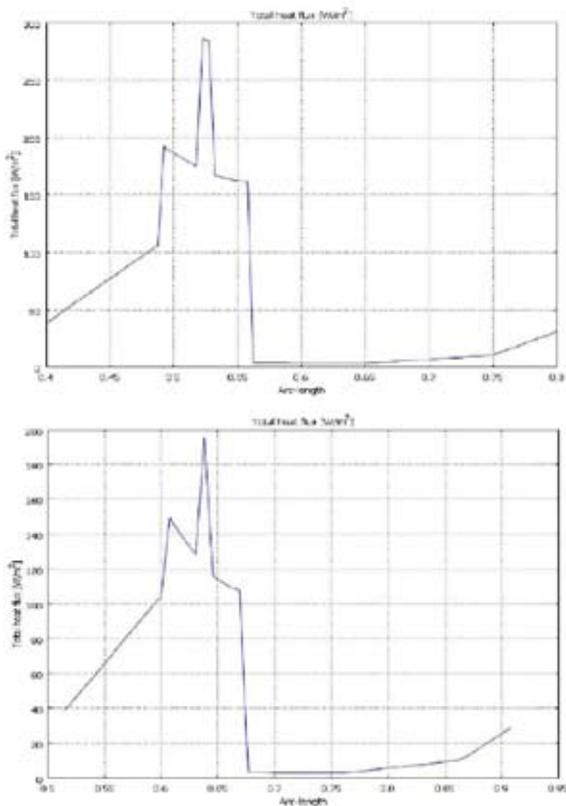


Fig.20- Andamento del flusso termico totale nello spessore, dall'esterno verso l'interno, nel modello BIPV/PCM, in regime estivo, nel caso orizzontale (sopra) e inclinato (sotto)

CONCLUSIONI

In riferimento alle prestazioni termofisiche valutate dalle simulazioni, tutta la procedura ha consentito di ricavare i flussi sui perimetri esterni di ogni modello e conseguentemente il valore del flusso di calore totale. Tale grandezza è stata assunta come principale dato comparativo, contribuendo a individuare la migliore soluzione progettuale, sia per calcolare il coefficiente globale di scambio termico, definibile come "simulato" perché derivato dalla soluzione del software, da confrontare con quello calcolato analiticamente.

Si sono considerati dei confronti finali sulle soluzioni ottenute dalle simulazioni termofisiche, in termini di trasmittanza, tra quella simulata ricavata da un calcolo semplificato per i gradienti termici interno-esterno di progetto, rielaborando i risultati sul flusso termico, ed il valore di trasmittanza limite imposto dalla normativa vigente.

Il modello BIPV/PCM ha dimostrato di apportare importanti ed apprezzabili vantaggi dal punto di vista termo fisico ed energetico rispetto al BIPV, in particolare poi per la soluzione con copertura inclinata, sia sul comportamento termico estivo e invernale che per l'efficienza del ottenuta sul si-

stema fotovoltaico, confermando in gran parte le previsioni sulla funzione principale di interesse di riduzione della temperatura superficiale.

Per quanto riguarda il sistema BIPV si ritiene più soddisfacente la soluzione inclinata, perché le simulazioni hanno indicato valori di temperatura superficiale nelle condizioni critiche estive del componente fotovoltaico che ridurrebbero meno l'efficienza di conversione delle celle.

Per il modello opaco accoppiato a PCM si è constatato che le trasmittanze, calcolate con due metodi semplificati, di normativa e analitico sulla base delle soluzioni delle simulazioni, sono plausibili e confrontabili con quelli simili reperibili in letteratura o da dati tecnici di prodotti certificati, e soddisfano i limiti della normativa.

I valori di trasmittanza ottenuti dai risultati delle simulazioni, determinati da condizioni sul flusso molto più critiche rispetto alla situazione tipo prevista dalla normativa europea UNI 6946, appaiono più peggiorativi nel primo caso per i sistemi BIPV rispetto ai sistemi BIPV/PCM.

Per il modello di componente opaco accoppiato a PCM si è verificato che le trasmittanze, calcolate con due metodi semplificati, di normativa e numerico sulla base delle soluzioni, sono plausibili e confrontabili con quelli simili reperibili in letteratura, e soddisfano i limiti della normativa.

Relativamente al vantaggio dell'inserimento della tecnologia fotovoltaica, in termini di rapporto costi/benefici, sebbene sia evidente l'ammortamento dei costi nel caso di totale integrazione architettonica, sono state affrontate delle valutazioni preliminari approssimative essenzialmente sulla potenza totale di picco ottenibile dalle celle e sul rendimento di produzione da conversione elettrica. Questo lavoro può costituire una base di studio ed approfondimento sulle caratteristiche termofisiche e prestazioni energetiche di soluzioni di copertura per l'edilizia. Da questo ulteriori approfondimenti potrebbero essere sviluppati tramite analisi in regime transitorio, che messe a confronto con i risultati mostrati in questo lavoro di tesi possono contribuire a costruire un abaco in ambito edile circa i sistemi solari attivi (fotovoltaico o termico) architettonicamente integrati e diversi prodotti innovativi. In quest'ottica disponendo infatti di maggiori dati empirici e di risultati sperimentali sulle prestazioni termo fisiche dei PCM sarebbe possibile valutare applicazioni edili finalizzate ad un miglioramento delle prestazioni termiche in regime dinamico anche delle pareti esterne e ripartizioni interne dell'edificio, oltre che di diverse soluzioni di copertura.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- AA.VV., *Handbook of photovoltaic science and engineering*, ed. WILEY, Chippenhams, 2003.
- AA.VV., Programma di ricerca "Efficienza energetica e ambientale nella trasformazione sostenibile dei sistemi insediativi" (responsabile: Prof. Ing. Mario De Grassi), Università Politecnica delle Marche.
- Abhat A., *Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage materials*, Solar Energy 30 (1983), pp. 313-332.
- AICARR JOURNAL, anno 1, dic. 2010/ gennaio 2011, Milano, QUINE 2011.
- Aste N., *Il fotovoltaico in architettura: l'integrazione dei sub-sistemi a energia solare negli edifici*, ed. Esselibri, Napoli, 2002:120-124.
- Baetens R., Jelle B.P., Gustavsen A., *Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review*, Energy and Buildings 42 (2010), pp.1361-1368.
- Briganti A., Cavallini A., Pelló P.M., *Manuale della climatizzazione*, Vol.I-II, Tecniche Nuove, Milano.
- Cellura M., Lo Brano V., Orioli A., Ciulla G., *Un modello alle differenze finite di un pannello fotovoltaico accoppiato a materiale a cambiamento di fase*, 65° Congresso Nazionale ATI – Domus de Maria (CA), 13-17 Settembre 2010.
- Cengel A.Y., *Termodinamica e trasmissione del calore*, McGraw-Hill.
- De Grassi M., Carbonari A., Di Perna C., Principi P., *Numerical and experimental analyses of PCM containing sandwich panels for prefabricated walls*, Energy and Buildings 38 (2006), pp. 472-483.
- Goia F., Perino M., Serra V., Zanghirella F., *Analisi sperimentale di un componente vetrato responsivo con materiali a cambiamento di fase*, 65° Congresso Nazionale ATI – Domus de Maria (CA), 13-17 Settembre 2010.
- Hong Y., Xin-shi G., *Preparation of polyethylene-paraffin compound as a form-stable solid-liquid phase change material*, Solar Energy Materials & Solar Cells 64 (2000), pp.37-44.
- Huang M. J., Eames P. C., Norton B., *Thermal regulation of building-integrated photovoltaics using phase change materials*, International Journal of Heat and Mass Transfer 47, 2004, pp. 2715-2733.
- Huang M.J., Eames P.C., Norton B., *Phase change materials for limiting temperature rise in building integrated photovoltaics*, Solar Energy. 80, 9, 2006, pp. 1121-1130.
- Medina M. A., King J.B., Zhang M., *On the heat transfer rate reduction of structural insulated panels (SIPs) outfitted with phase change materials (PCMs)* Energy 33 (2008), pp. 667-678.
- Manuale del vetro Saint-Gobain, Saint-Gobain Glass, Milano, 2006.
- Pasupathy A., Athanasius L., Velraj R., Seeniraj R.V., *Experimental investigation and numerical simulation analysis on the thermal performance of a building roof incorporating phase change material (PCM) for thermal management*, Applied Thermal Engineering 28, 2008, pp. 556-565.
- Schwarz D., *Gewinn-Speicher-Wand, Tagungsband zur 6. Europäischen Passivhaustagung (2002)* Basel, pp. 299-304.
- Schwarz D., Nussbaumer Th.: *Eine Wand, die schmilzt. Speicherung von Solargewinnen in einer Parafin-Latentspeicher-Wand*; TEC21, n. 24, 24 giugno 2002, pp. 7-13.
- Zhou G., Zhang Y., Lin K., Xiao W., *Thermal analysis of a direct-gain room with shape-stabilized PCM plates*, Renewable Energy 33 (2008), pp. 1228-1236;

Siti web consultati:

www.edilportale.com/csmartnews
www.nordbitumi.it
www.gbcitalia.org
www.wikipedia.com
www.mygreenbuilding.com
http://tesi.cab.unipd.it
www.gse.it
www.energyglass.eu
www.metra.it
www.schueco.com/web/it
www.theoptimizer.it/innovazione/lucenergia
www.basf.it
www.miniwatt.it
www.sistemicostruttivi.com/eps.html
www.casaclima.info
www.sciencedirect.com
www.elsevier.com
www.teappcm.com/products.html
www.rubitherm.com

Principali riferimenti normativi:

- D. Lgs. 192/2005 e s.m.i.
- D.P.R. 59/2009, *Linee Guida Nazionali per la Certificazione Energetica*
- UNI/TS 11300-1 e UNI/TS 11300-2
- UNI 10339 *Ricambi di aria orari*
- UNI 10351 :1997, *Materiali da costruzione-Conduktività termica e permeabilità al vapore*
- UNI EN ISO 6946:1999 e s.m.i. "Componenti e elementi per edilizia-Resistenza termica e trasmittanza termica-Metodi di calcolo"
- UNI 8477/1 (*Energia solare "Calcolo degli apporti per applicazioni in edilizia, valutazione dell'energia radiante ricevuta"*)

Normativa generale e tecnica, nazionale ed europea, relativa ai vetri per BIPV:

- Decreto Legislativo 115/1995 : *“Attuazione della direttiva 92/59/CEE relativa alla sicurezza generale dei prodotti”*;
- Decreto Legislativo 206/2005, parte IV(Artt. 102-135): *Sicurezza e qualità dei prodotti*
- D.M. del 19 febbraio 2007 art.2, comma 1, lettera b3: *“Tipologie di interventi valide ai fini del riconoscimento dell'integrazione architettonica”*
- UNI 7697 :*“Criteri di sicurezza nelle applicazioni vetrarie”*. E' cogente su tutto il territorio italiano per via del Decreto Legislativo n. 206 del 6 settembre 2005 e precedenti.

- UNI EN ISO 12543 1-6: Norme generali e definizione dei vetri stratificati e stratificati di sicurezza;
- UNI EN 673 2011: Metodo di calcolo per la determinazione della trasmittanza termica (valore U) delle vetrate con superfici piane e parallele in edilizia;

Certificazioni per il fotovoltaico e la compatibilità con gli elementi architettonici:

- CEI EN 61215 e CEI 82-8: Moduli fotovoltaici in silicio cristallino per applicazioni terrestri. Qualifica del progetto e omologazione del tipo;
- CEI EN 61730: accertamento della piena compatibilità funzionale e della sicurezza dei pannelli fotovoltaici inseriti negli elementi architettonici (Building Integrated PhotoVoltaics, BIPV).

