



## Ricerca di Sistema elettrico

Involucro trasparente a carattere dinamico e adattativo tramite l'integrazione di Phase Change Materials in elementi schermanti, ai fini della riduzione della domanda energetica per raffrescamento e illuminazione artificiale

V. Serra, L. Bianco, V.R.M. Lo Verso, S. Iennarella, I. Vigna, M. Zinzi

INVOLUCRO TRASPARENTE A CARATTERE DINAMICO E ADATTATIVO TRAMITE L'INTEGRAZIONE DI PHASE CHANGE MATERIALS IN ELEMENTI SCHERMANTI, AI FINI DELLA RIDUZIONE DELLA DOMANDA ENERGETICA PER RAFFRESCAMENTO E ILLUMINAZIONE ARTIFICIALE

V. Serra, L. Bianco, V.R.M. Lo Verso, S. Iennarella, I. Vigna (Dip. Energia, TEBE Research Group, Politecnico di Torino)  
M. Zinzi (ENEA)

Settembre 2015

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2014

Area: Razionalizzazione e Risparmio nell'uso dell'energia elettrica

Progetto: Sviluppo di modelli per la realizzazione d'interventi di efficienza energetica sul patrimonio immobiliare pubblico

Obiettivo: Tecnologie per involucri edilizi ad elevate prestazioni

Responsabile del Progetto: Gaetano Fasano, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Valutazioni di prestazione energetica degli edifici residenziali e non residenziali e sviluppo di metodologie per la valutazione dei consumi energetici"

Responsabile scientifico ENEA: Michele Zinzi

Responsabile scientifico Politecnico di Torino: Valentina Serra

Si ringrazia l'azienda Dott. Gallina per la fornitura dei pannelli in policarbonato e per la disponibilità nell'identificare soluzioni tecnologiche adeguate per la sigillatura dei pannelli e la messa in opera sull'apparato sperimentale TWINS

## Indice

|   |    |
|---|----|
| SOMMARIO.....   | 4  |
| 1 INTRODUZIONE.....   | 5  |
| 2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI .....                               | 8  |
| 2.1 ANALISI DELLO STATO DELL'ARTE .....   | 8  |
| 2.2 IL CONCEPT: UN DISPOSITIVO SCHERMANTE IN PC E PCM .....                         | 9  |
| 2.3 LA SCELTA DEI MATERIALI .....   | 10 |
| 2.4 LA REALIZZAZIONE DEI PROTOTIPI.....   | 18 |
| 2.5 VARIABILI DI PROGETTO .....   | 21 |
| 2.6 PROTOTIPI DI PANNELLI .....   | 24 |
| 2.7 QUADRO DI SINTESI DELLE DIVERSE VERIFICHE EFFETTUATE.....                       | 25 |
| 3 L'ATTIVITÀ SPERIMENTALE SUL COMPONENTE .....                                      | 26 |
| 3.1 MISURE IN LABORATORIO .....   | 26 |
| 3.1.1 <i>La misura della conducibilità termica</i> .....                            | 26 |
| 3.1.2 <i>La caratterizzazione spettrofotometrica</i> .....                          | 31 |
| 3.1.3 <i>I risultati della caratterizzazione spettrofotometrica</i> .....           | 32 |
| 3.2 MISURE IN TEST CELL.....  | 36 |
| 3.2.1 <i>Comportamento qualitativo della transizione di fase</i> .....              | 40 |
| 3.2.2 <i>I risultati delle analisi di prestazione energetica</i> .....              | 47 |
| 3.2.3 <i>Distribuzioni di luminanza sui componenti trasparenti analizzati</i> ..... | 64 |
| 4 LA MODELLAZIONE .....   | 75 |
| 4.1 DESCRIZIONE DEL MODELLO.....  | 75 |
| 4.2 VALIDAZIONE DEL MODELLO .....   | 78 |
| 4.3 RISULTATI DEL MODELLO.....  | 80 |
| 5 CONCLUSIONI.....  | 89 |
| 6 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....  | 89 |
| 7 NOMENCLATURA .....  | 91 |
| 8 INDICE DELLE FIGURE.....  | 92 |

## Sommario

Il progetto ha visto lo sviluppo di un elemento vetrato tradizionale con un sistema schermante in polycarbonato e materiale a cambiamento di fase integrato. Il sistema è costituito da un vetrocamera con un sistema schermante scorrevole che integra Phase Change Materials (PCM).

La tecnologia studiata aveva l'obiettivo di:

- modulare i carichi solari entranti, grazie alla presenza della schermatura con materiale a cambiamento di fase

- implementare l'inerzia termica del componente trasparente

- regolare la radiazione luminosa evitando fenomeni di abbagliamento e mantenendo livelli di illuminazione naturale adeguati.

Ad una prima fase di concept del sistema e messa in opera sono seguite le fasi di testing, condotte sia a livello di materiale in laboratorio (caratterizzazione termica e spettrofotometrica) che di componente/sistema (misure sull'apparato sperimentale TWINS - outdoor test cells) e di simulazione (accoppiamento Energy plus e Daysim).

Sono state testate due configurazioni mirate ad analizzare l'effetto del colore del polycarbonato (cristallo/opale/blu/verde) e di tre diverse tipologie di PCM (sali idrati, paraffina e biobased) sulla prestazione energetica e luminosa del sistema. L'ipotesi iniziale di studiare anche diverse temperature di transizione è stata condotta solo in laboratorio, anche a causa di una stagione estiva eccezionalmente calda per periodi di tempo molto lunghi.

A valle delle ricerche precedenti condotte dagli autori su vetrocamera inglobanti PCM, si è scelta, per il clima di Torino, la temperatura di transizione pari a 35°C. Per paraffina e biobased le misure sono state quindi condotte in campo con questa temperatura mentre si è dovuto utilizzare la temperatura di 31°C per i sali idrati, essendo questa la temperatura più prossima a 35°C reperibile sul mercato.

I dati ottenuti hanno dimostrato che il sistema ha una discreta potenzialità nel ridurre i carichi di raffrescamento (in condizioni ideali si arriva ad un abbattimento del 30% delle energie giornaliere entranti) ma molto variabile in funzione delle condizioni microclimatiche esterne (in presenza di cielo sereno, temperature esterne superiori a 30°C portano ad un melting del PCM troppo rapido rendendo inutile se non peggiorativa la sua presenza nel polycarbonato).

A livello tecnologico è inoltre importante sottolineare che risulta ad oggi ancora estremamente problematica (ad esclusione del biobased) la tenuta del materiale nel polycarbonato e che su questo tema è necessaria una ricerca specifica.

Ottime prestazioni di tenuta e comportamento sono state ottenute con il PCM biobased, di cui però si dispone di poca letteratura scientifica in relazione alla durabilità.

Dal punto di vista della prestazione energetica globale (riscaldamento/raffrescamento/illuminazione) il sistema non si rivela particolarmente efficace nella configurazione testata a temperatura di fusione unica, mentre l'accoppiamento di più lastre con temperature diverse renderebbe il sistema maggiormente "adattivo".

## 1 Introduzione

L'attività oggetto di studio si inserisce nel filone di ricerca sugli involucri edilizi di nuova generazione, caratterizzati da un comportamento dinamico e adattativo.

La ricerca sull'involucro non può infatti più essere semplicemente focalizzata nella direzione del miglioramento della singola prestazione (isolamento termico, controllo solare, controllo luminoso). Questa strategia è risultata vincente per lungo tempo, ma i suoi limiti si sono rivelati in tutta la loro consistenza quando utenti e progettisti, oltre che preoccuparsi dei consumi per il riscaldamento, hanno iniziato a considerare la domanda energetica nel suo insieme (includendo quindi l'illuminazione e la climatizzazione estiva) e a ricercare l'obiettivo di edifici ZEB o NZEB.

E' ormai evidente come l'ottenimento di traguardi così ambiziosi come quelli posti dalla *Direttiva EPBD Recast* del 2010 richieda cambiamenti radicali nel modo di concepire i componenti di involucro. Questi devono diventare dei sistemi integrati e multifunzionali, in grado di gestire dinamicamente gli scambi di massa ed energia fra ambiente esterno ed interno, accumulare energia e offrire opportunità di sfruttamento delle fonti rinnovabili.

Nell'ambito di due progetti di ricerca condotti dal Gruppo di Lavoro (PRIN 2007, *RES2 Responsive by Renewables* 2008-10 e *Polight Smartglass* 2010-2013) è stato sviluppato un nuovo concept di vetrata integrante materiali a cambiamento di fase (PCM) al fine di controllare i carichi solari entranti e di incrementare l'inerzia termica del sistema vetrato.

Le potenzialità di questa tecnologia si sono rivelate senza dubbio alte, tuttavia l'utilizzo di un unico strato di PCM con una sola temperatura di transizione ha fortemente limitato la dinamicità del sistema e l'ottimizzazione energetica in presenza di diverse condizioni al contorno. Al fine di superare alcune delle criticità emerse nei precedenti progetti si è identificato un nuovo concept in cui il PCM viene integrato nel sistema schermante. Nel quadro del progetto della ricerca del sistema elettrico Accordo di Programma MSE-ENEA tale concept è stato studiato nel dettaglio attraverso la progettazione, la verifica sperimentale e la modellazione di un sistema schermante dinamico in policarbonato (PC) integrante materiale a cambiamento di fase (PCM).

Come elemento schermante si è identificato un pannello scorrevole a celle, leggero, in grado di contenere agevolmente quantità sufficienti di PCM e che permettesse l'ingresso di luce naturale. Tra i vari materiali analizzati il policarbonato (PC) si è rivelato particolarmente rispondente ai requisiti richiesti.

Il policarbonato è un polimero termoplastico ottenuto dall'acido carbonico ed è parte della famiglia delle resine poliestere. I prodotti edilizi in policarbonato si presentano generalmente sotto forma di lastra: le lastre compatte vengono impiegate per la realizzazione di pensiline, coperture curve, verande, tettoie, parapetti e lucernari; le lastre alveolari estruse, disponibili in formato modulare e facilmente assemblabili, sono invece particolarmente indicate per la realizzazione di elementi di facciata, quali tamponamenti verticali e finestrate, e di sistemi di copertura piani, come lucernari, contro-soffittature, shed e serre.

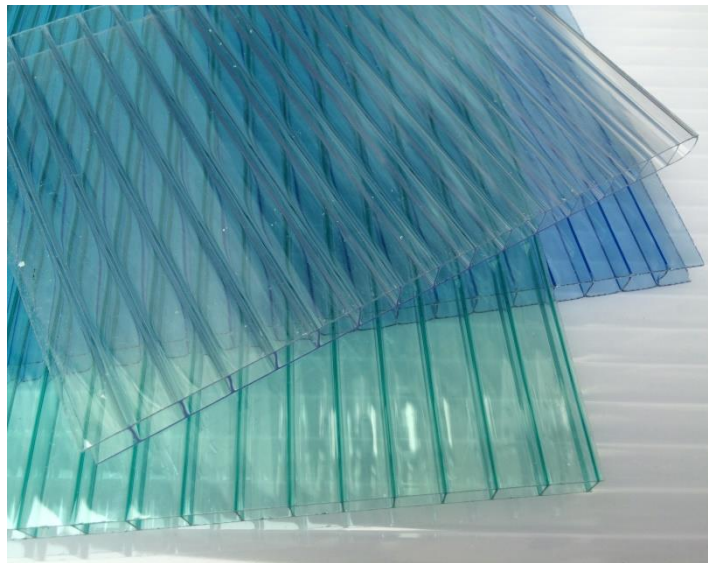


Figura 1 Lastre in policarbonato alveolare

Le lastre alveolari presentano una struttura multi-parete con sezione cava, costituita da una serie di lamine perpendicolari con funzione di irrigidimento e ottenute mediante un processo di estrusione. Questa tipologia di lastra garantisce elevate prestazioni di resistenza meccanica ed isolamento termico per la presenza di un'intercapedine d'aria e sono impiegate principalmente per finestrate, coperture, serre, lucernari, verande, pensiline e controsoffitti.

I sistemi di facciata in policarbonato alveolare presenti in commercio sono disponibili con un numero variabile di pareti interne e all'aumentare dello spessore della lastra e del numero di alveoli, diminuisce il valore della trasmittanza termica fino a raggiungere valori prossimi a  $1 \text{ W/m}^2\text{K}$  (nel caso di lastre con 11 pareti). L'utilizzo di queste tipologie di strutture comporta però una riduzione dell'ingresso di luce naturale negli ambienti e un decremento nella percezione dello spazio esterno da parte dell'utente che si trova nell'ambiente interno.

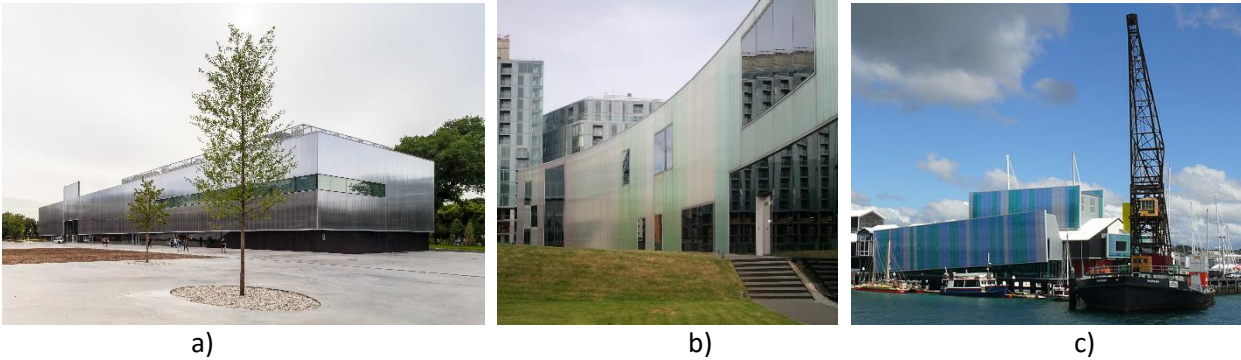
La trasparenza e le caratteristiche consente di creare suggestivi effetti di luce all'interno degli ambienti e sempre più spesso viene scelto come materiale innovativo negli edifici dai grandi studi di architettura contemporanea. Le qualità espressive di questo semilavorato garantiscono un'elevata potenzialità architettonica e, come il *Garage Museum of Contemporary Art* (2015) di Rem Koolhaas, da poco inaugurato a Mosca, il cui involucro è costituito da un doppio strato di policarbonato traslucido che collega visivamente l'edificio con il suo contesto, creando continuità tra l'elemento artificiale e il parco naturale che si sviluppa intorno.

Per il *Laban Dance Centre* (2003) a Londra Herzog e de Meuron hanno progettato le facciate esterne enfatizzando il tema del colore e della trasparenza, scegliendo di utilizzare pannelli in policarbonato montati davanti a lastre di vetro con funzione di elemento schermante per il controllo della radiazione solare e dell'abbagliamento e in grado di contribuire all'ottimizzazione dell'efficienza energetica complessiva.

I sistemi di rivestimento in policarbonato sono spesso selezionati per la loro capacità di cambiare la percezione visiva dell'edificio nelle diverse ore della giornata e creare continuità tra l'ambiente interno e quello esterno: durante il giorno le lastre permettono alla luce naturale diffusa di penetrare negli ambienti e di notte viene invertito l'effetto perché l'illuminazione artificiale interna rende gli spazi chiaramente visibili dal contesto. Un esempio interessante in cui si sfrutta l'illuminazione diurna e si ricrea un'immagine scenografica che aiuti a mantenere il significato simbolico dello spazio è l'*Ahn Jung Geun Memorial Hall* (2015) a Seoul dello studio D.LIM Architects, in cui nuovamente l'involucro esterno è stato realizzato in policarbonato trasparente.

Il *Voyager NZ Maritim Museum* (2010) è stato disegnato da Bossley Architects con una forma che contrasta con la tradizionale tipologia del capannone e l'impiego di lastre di policarbonato in continuo cambiamento di colore, trasparenza e riflessione, suggeriscono in termini di concept architettonico le condizioni mutevoli

di vento, luce ed onde, che sono parte integrante del mondo della vela. Inoltre, l'impiego di una doppia pelle in lastre alveolari permette di proteggere le imbarcazioni esposte dai raggi ultravioletti.



a)  
b)  
c)

**Figura 2** *Garage Museum of Contemporary Art*, Rem Koolhaas 2015 (credit Sergey Norin, flickr) a).  
*Laban Dance Centre*, Herzog e de Meuron 2003 (credit James Thorp, flickr) b).  
*Voyager NZ Maritim Museum*, Bossley Architects 2010 (credit Yasuhiro Chatani, flickr) c).

## 2 Descrizione delle attività svolte e risultati

### 2.1 Analisi dello stato dell'arte

Le ricerche sperimentali improntate sulla verifica del comportamento energetico estivo ed invernale di prototipi di componenti trasparenti contenente PCM destinati all'applicazione architettonica sono state condotte da diverse università internazionali a partire dal 2000.

| ANNO | AUTORE           | ARGOMENTO   |
|------|------------------|---|
| 2001 | Ismail et al.    | Efficienza termica di un componente trasparente contenente una schermatura mobile in PCM per la riduzione dei carichi termici nella stagione estiva   |
| 2005 | Weinläder et al. | Sistema di doppio vetro con layer di PCM posto sul lato interno per il miglioramento del comfort termico indoor nel periodo estivo  |
| 2008 | Hauer et al.     | Casi studio e progetti dimostrativi inerenti le applicazioni tecnologiche innovative dei PCM. Proposta di un sistema schermante di lamelle in alluminio contenenti PCM per la riduzione dell'aumento di temperatura indoor durante la stagione estiva |
| 2012 | Halawadhi        | Sistema schermante contenente PCM per la riduzione dei guadagni termici attraverso le finestre nel periodo estivo   |
| 2012 | Goia et al.      | Studio numerico e sperimentale dell'influenza del PCM nelle configurazioni vetrate, al fine di ridurre il picco di temperatura superficiale nella stagione estiva   |

**Tabella 1** Quadro riassuntivo dell'analisi bibliografica.

Lo studio condotto da *Ismail et al.* (2001) [1] proponeva l'inserimento di una schermatura mobile in PCM interna all'intercapedine (variabile tra 3-20 mm) di una vetrata a doppia lastra (6 mm ciascuna). Quando la differenza di temperatura raggiungeva il valore prefissato, il PCM allo stato liquido veniva estratto da un serbatoio per colmare la cavità tra le lastre vetrate. I risultati sperimentali e di modellazione numerica dimostrano che questo sistema è in grado di ridurre sia gli apporti solari che le dispersioni termiche attraverso la finestra. Nel lavoro emerge che l'utilizzo di PCM di colore verde determina un comportamento maggiormente efficiente nella riduzione dei guadagni termici.

La ricerca *Annex 17* [2] condotta nel 2001 su scala internazionale è stata promossa dal programma coordinato dall'Agenzia Internazionale per l'Energia (AIE), al fine di favorire la commercializzazione di sistemi di accumulo di energia termica e porre in evidenza le promettenti applicazioni empiriche inerenti i PCM attraverso l'esecuzione di casi studio e l'avvio di progetti dimostrativi. Il progetto *Innovative PCM Technology*, inserito nella tematica *Heating and Cooling of Buildings* dell'Annex 17 si è svolto in Germania (1999-2004). L'obiettivo era l'impiego innovativo dei PCM per ridurre i consumi energetici degli edifici e furono sviluppati sette sotto-progetti inerenti i nuovi PCM e i relativi prodotti applicabili in ambito edilizio ipotizzando integrazioni nei controsoffitti, nei pannelli di rivestimento, nei componenti di ombreggiamento e nei sistemi di accumulo di calore latente per il riscaldamento.

Nel 2004 in Turchia in occasione del VII Expert Meeting, viene esposto il rapporto sul *Shading-PCM compound system* [2], un progetto inerente le schermature solari integrate con il PCM per dirimere il problema del surriscaldamento degli schermi, posizionati sul lato interno durante il periodo estivo. Inserendo il PCM nelle cavità delle lamelle orizzontali in alluminio si incrementa la capacità termica del



componente rallentando l'aumento di temperatura delle schermature nelle ore pomeridiane, così da poter smaltire il calore accumulato ventilando verso l'esterno durante le ore serali.

I risultati mostrano un miglioramento del comfort termico indoor con una diminuzione della temperatura operante di circa 3°C e una riduzione della temperatura superficiale degli schermi di 10-15°C.

*Weinläder et al.*(2004) [3] hanno svolto un'analisi su dei pannelli di facciata costituiti da un vetrocamera con un layer interno di PCM contenuti in un elemento plastico posto ad una distanza di 10 mm dal vetro. I materiali PCM testati sono a base paraffina e sali idrati. Il confronto è stato condotto con un elemento vetrato privo di PCM, e si è determinata una riduzione di circa il 30% delle dispersioni termiche e del 50% degli apporti solari per le facciate orientate a sud. I risultati della sperimentazione mostrano una difficoltà nel contenere i PCM a base di Sali idrati e i pannelli spesso perdono il materiale durante la sua fase liquida. I risultati dimostrano inoltre un aumento del comfort termico dell'ambiente indoor grazie all'applicazione di questa tecnologia.

Lo studio di *Alawadhi* (2012) [4] è stato condotto in Kuwait nel mese di giugno su schermature contenenti PCM, con l'obiettivo di ridurre gli apporti solari. È stato inoltre effettuato uno studio parametrico per stimare gli effetti variando il tipo di PCM e la quantità di materiale all'interno della persiana. I risultati hanno mostrato che il guadagno termico attraverso le finestre può essere ridotto di circa il 23% quando la persiana contiene PCM con una temperatura di fusione compresa nell'intervallo 29-36°C e presenta uno spessore di 0.03 m.

*Goia et al.*(2012) [5] hanno eseguito uno studio numerico e sperimentale sull'influenza del materiale a cambiamento di fase nelle configurazioni vetrate, variandone sia la temperatura di fusione della paraffina che la posizione del PCM all'interno del triplo vetro –camera interna o esterna -. Considerando la stagione estiva, durante il giorno il PCM posto internamente al componente trasparente mostra una temperatura superficiale maggiore del sistema di riferimento, poiché il PCM agisce da collettore solare, assorbendo parte dell'irradianza solare che colpisce il vetro; la configurazione con PCM posto nella camera esterna del vetro invece smorza (in giorni nuvolosi) e dimezza (nelle giornate soleggiate) il picco della temperatura superficiale e garantisce il mantenimento delle condizioni di comfort dell'ambiente interno.

## 2.2 Il concept: un dispositivo schermante in PC e PCM

Dall'analisi degli edifici in policarbonato, delle proprietà del materiale e dal confronto con i produttori è emerso che i principali limiti e criticità nelle applicazioni architettoniche di questo materiale derivano dalla sua bassa massa superficiale (1,7 kg/m<sup>2</sup> per il pannello alveolare utilizzato nella ricerca, 2 pareti e spessore 10 mm). La ridotta massa termica del componente ne limita le prestazioni durante il periodo estivo e allo stesso tempo, dal punto di vista acustico, questo sistema presenta gli svantaggi tipici delle strutture leggere. A partire da questi punti deboli si è sviluppato il concept di integrare nel materiale il PCM al fine di aumentare la massa del sistema e trasformare così il componente in un elemento adattativo. Il progetto ha visto lo sviluppo di un componente schermante in policarbonato e materiale a cambiamento di fase per la schermatura di componenti trasparenti tradizionali. Il sistema è costituito da un vetrocamera con un sistema schermante scorrevole che integra PCM, da posizionarsi sul lato esterno. Lo scopo del sistema è di demandare l'incremento dell'inerzia termica all'elemento schermante mobile e la tecnologia sarà quindi in grado di:

- regolare i carichi solari incidenti sul componente trasparente, grazie alla presenza della schermatura con materiale a cambiamento di fase;
- regolare i carichi endogeni grazie alla presenza della schermatura interna integrante materiale a cambiamento di fase;
- implementare l'inerzia termica del componente;

- regolare la radiazione luminosa evitando fenomeni di abbagliamento e mantenendo livelli di illuminazione naturale adeguati.

## 2.3 La scelta dei materiali

### Policarbonato

#### 1. Scelta del tipo di lastra

Per la realizzazione del prototipo su cui effettuare l'attività sperimentale è stato selezionato un tipo di lastra alveolare presente in commercio, prendendo in considerazione alcuni aspetti ritenuti fondamentali:

- tipologia di larga diffusione e facilmente reperibile sul mercato;
- sezione semplice, evitando la presenza di elementi di rinforzo diagonali, in modo tale da facilitare il riempimento degli alveoli con PCM;
- disponibilità in una gamma di colori, per verificare la variazione della trasmissione luminosa;
- lastre con bordi lisci da inserire nell'apposito telaio posizionato sulla test-cell.

Si è optato quindi per la scelta delle lastre in polycarbonato alveolare caratterizzate da 2 pareti e uno spessore di 10 mm, nelle versioni di colore cristallo, ghiaccio, verde e blu.

#### 2. Caratteristiche dimensionali

La lastra in polycarbonato alveolare selezionata viene prodotta con le seguenti caratteristiche:

- n° pareti 2
- spessore 10 mm
- lunghezza prefissata a 6000 mm
- larghezza di 980 - 1250 - 2100 mm
- peso unitario di 1,7 kg/m<sup>2</sup>

#### 3. Le proprietà termofisiche

##### TRASMISSIONE LUMINOSA ( $\tau_v$ )

La percentuale di luce naturale, cioè la radiazione solare rientrante nello spettro del visibile che attraversa la lastra, nel caso della lastra nella versione cristallo viene indicata con un valore pari a 81%, mentre la presenza di pigmenti colorati o opacizzanti diminuisce notevolmente la percentuale. Ad esempio il pannello opale presenta una trasmissione visibile del 50%.

##### FATTORE SOLARE (g)

Il fattore solare, indica il rapporto tra l'energia termica globalmente trasmessa dalla lastra e quella incidente su di essa.

Per la versione cristallo della tipologia di pannello scelta, il fattore solare dichiarato è g=80%.

##### TRASMITTANZA TERMICA (U)

La lastra selezionata presenta un valore  $U=3 \text{ W/m}^2\text{K}$ ; l'aggiunta di PCM all'interno degli alveoli porta ad una riduzione delle proprietà isolanti del pannello.

### Materiali a cambiamento di fase

Per la realizzazione del prototipo da sottoporre a misurazioni fisiche sono stati selezionati diversi tipi di materiale a cambiamento di fase, per osservarne le prestazioni e stabilire un confronto nella risposta all'esigenza di mantenere le condizioni di comfort all'interno dell'ambiente nel corso dei mesi più caldi. Sia i PCM organici che quelli inorganici risultano compatibili dal punto di vista chimico con il polycarbonato e la scelta si è concentrata sulle temperature di fusione più elevate, capaci di assicurare il passaggio di fase durante la stagione estiva. In particolari le analisi sono state condotte su PCM delle seguenti tipologie:

- *Paraffine*, materiali a cambiamento di fase che presentano buone caratteristiche dal punto di vista termico, non sono corrosive e presentano fusione congruente in un ampio intervallo di cicli di liquefazione e solidificazione;
- *Sali idrati*, PCM con elevata conduttività termica e basso grado di infiammabilità;
- *Bio PCM*, materiali completamente riciclabili di origine naturale e basso impatto ambientale.



**Figura 3 – Provini dei diversi PCM utilizzati nella sperimentazione.**

### 1. Paraffine

Questi materiali mostrano un'adeguata capacità di accumulo termico anche in piccoli intervalli di temperatura. Durante il cambiamento di fase da solido a liquido assorbono una grande quantità di calore, noto come calore latente, ad una temperatura relativamente costante; quando questo processo si inverte, cioè nel passaggio da liquido a solido, il calore latente precedentemente immagazzinato viene invece rilasciato, sempre ad una temperatura pressoché costante.

Le principali caratteristiche di questi PCM organici sono:

- elevata capacità di accumulo di energia termica;
- prodotto di lunga durata;
- chimicamente inerte;
- assenza di fenomeni di supercooling;
- prestazioni costanti al ripetersi dei cicli di cambiamento di fase;
- range di temperatura di fusione variabile tra  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- atossicità;
- 100% riciclabili.

### 2. Sali idrati

Questa classe innovativa di PCM non infiammabili è costituita da una miscela di sali idrati che rende i passaggi di fase ciclici stabili e senza deterioramento nel tempo. I Sali idrati vengono ampiamente usati macroincapsulati per sistemi di raffreddamento e riscaldamento attivi e passivi, come ad esempio i condizionatori d'aria, e nel settore delle costruzioni in pannelli per soffitti e pareti.

I vantaggi che questo materiale a cambiamento di fase inorganico comporta sono:

- prestazione stabile durante i cambiamenti di fase ciclici;
- elevata capacità di accumulo termico;
- effetto di supercooling limitato;
- non infiammabilità/ bassa infiammabilità ;
- atossicità;
- range di temperature di fusione variabile tra  $-21\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### 3. Bio PCM

I Bio PCM sono materiali a cambiamento di fase al 100% rinnovabili e di origine biologica e vengono utilizzati in un'ampia gamma di applicazioni di controllo della temperatura; sono ottenuti completamente da fonti sostenibili, come grassi animali e oli vegetali, e risultano atossici e biodegradabili. Le temperature di fusione dei prodotti disponibili sul mercato variano tra i  $-40^{\circ}\text{C}$  e  $151^{\circ}\text{C}$ .

I principali vantaggi che questi materiali a cambiamento di fase offrono sono:

- atossicità;
- minima variazione volumica durante il passaggio di stato;
- stabilità delle loro proprietà al ripetersi dei cicli di cambiamento di stato;
- elevato calore latente;
- non infiammabili;
- chimicamente inerti;
- prodotti con materiali naturali, assenza di tracce di petrolio e derivati;
- 100% riciclabili.

La biodegradabilità è la misura di quanto efficientemente un prodotto può essere decomposto da microrganismi nel corso del tempo, in modo tale da ridurre progressivamente il suo impatto ambientale. Rispetto ai prodotti a base di paraffina, che richiedono anni per decomporsi completamente, i bio-materiali a cambiamento di fase richiedono pochi mesi per degradarsi completamente e non producono quindi effetti negativi di lungo termine sull'ambiente - piante, animali e corsi d'acqua -. Facendo un'analisi della biodegradabilità, considerando un arco temporale di 28 giorni, le paraffine si degradano in una percentuale che varia tra 21-55%, mentre i Bio PCM raggiungono il 75-100%.

Mentre alcuni dei solventi organici più comuni sono facilmente infiammabili a causa delle basse temperature del punto di infiammabilità, i composti bio, grazie al loro peso molecolare più elevato, risultano meno volatili e richiedono così una temperatura notevolmente più alta per generare una miscela di aria e vapori organici infiammabili.

### 4. Proprietà termofisiche

I requisiti che i materiali a cambiamento di fase dovrebbero presentare per poter essere impiegati in edilizia sono:

- temperatura di fusione in funzione dell'applicazione (per comportamento estivo  $25^{\circ}\text{C} - 35^{\circ}\text{C}$ );
- elevato calore di transizione di fase (liquefazione/solidificazione);
- basso costo;
- atossici, non corrosivi o igroscopici.

Attualmente i PCM più sperimentati in edilizia, perché rispondono a queste caratteristiche, sono i composti organici paraffinici e idrocarburi ottenibili come sottoprodotti della raffinazione del petrolio o per polimerizzazione, e alcuni inorganici come sali idrati. I sistemi di contenimento utilizzati sono il macro e micro incapsulamento e l'immersione in matrici porose.

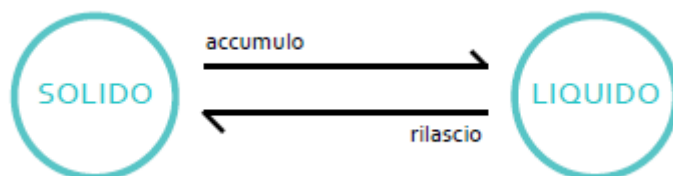


Figura 4 Rappresentazione schematica del passaggio di fase dei PCM

### TEMPERATURA DI FUSIONE

I PCM sono disponibili sul mercato in un vasto intervallo di temperature di fusione e dunque grazie alla loro capacità di assorbire o rilasciare calore possono essere impiegati per numerose applicazioni. I materiali che presentano temperature di fusione più elevate risultano adatti ad assorbire grandi quantità di energia e ritardare così la fase di scioglimento e conseguente rilascio di calore.

La tabella seguente riporta l'intervallo di temperatura di fusione caratteristico delle tre tipologie di PCM analizzate.

|                             | PARAFFINE |          |          | SALI IDRATI |           | BIO PCM  |
|-----------------------------|-----------|----------|----------|-------------|-----------|----------|
| Tipologia di PCM            | P_PCM 28  | P_PCM 35 | P_PCM 44 | SH_PCM 26   | SH_PCM 31 | B_PCM 35 |
| Temperatura di fusione [°C] | 27-29     | 34-36    | 41-44    | 25-27       | 31-33     | 35       |

**Tabella 2 Confronto tra i range di temperatura di fusione delle tre tipologie di PCM analizzate.**

### ACCUMULO DI CALORE

I materiali a cambiamento di fase sono accumulatori di calore latente e sfruttano il fenomeno della transizione di fase per assorbire i flussi energetici entranti, immagazzinando un'elevata quantità di energia e mantenendo costante la propria temperatura. I PCM sono solidi a temperatura ambiente ma quando questa sale e supera una certa soglia, che varia a seconda del materiale, essi si liquefanno accumulando calore (latente di liquefazione) che viene sottratto all'ambiente. Allo stesso modo, quando la temperatura scende, il materiale si solidifica e cede calore (latente di solidificazione).

La capacità termica specifica dei PCM è di circa 2,1 kJ/kgK e la loro entalpia di fusione è compresa tra 120 e 160 kJ/kg; quindi questi materiali offrono una capacità termica di quattro-cinque volte superiore a quella dell'acqua a basse differenze di temperatura operativa.

La tabella seguente riporta il valore del calore specifico caratteristico delle tre tipologie di PCM analizzate.

|                           | PARAFFINE |          |          | SALI IDRATI |           | BIO PCM   |
|---------------------------|-----------|----------|----------|-------------|-----------|---|
| Tipologia di PCM          | P_PCM 28  | P_PCM 35 | P_PCM 44 | SH_PCM 26   | SH_PCM 31 | B_PCM 35  |
| Calore specifico [kJ/kgK] | 2         | 2        | 2        | 2           | 2         | 2,44<br>(stato solido)<br>2,72<br>(stato liquido) |

**Tabella 3 Confronto tra i valori di calore specifico delle tre tipologie di PCM analizzate.**

**CONDUCIBILITÀ TERMICA**

I materiali a cambiamento di fase hanno una bassa conducibilità termica che deve essere compensata da ampie superfici di scambio per consentire il processo di trasferimento di calore.

La tabella seguente riporta il valore della conducibilità termica caratteristica delle tre tipologie di PCM analizzate.

| Tipologia di PCM             | PARAFFINE |          |          | SALI IDRATI |           | BIO PCM                         |
|------------------------------|-----------|----------|----------|-------------|-----------|---------------------------------|
|                              | P_PCM 28  | P_PCM 35 | P_PCM 44 | SH_PCM 26   | SH_PCM 31 | B_PCM 35                        |
| Conducibilità termica [W/mK] | 0,2       | 0,2      | 0,2      | 0,6         | 0,6       | 0,15 (liquido)<br>0,25 (solido) |

**Tabella 4 Confronto tra i valori di conducibilità termica delle tre tipologie di PCM analizzate.**

**ESPANSIONE VOLUMICA**

Durante il cambiamento di fase, il materiale cambia la propria densità e quindi il suo volume. Quando viene inserito all'interno di un contenitore chiuso, è quindi necessario tenere in considerazione una sua possibile espansione volumica, al fine di evitare una pressione eccessiva.

La tabella seguente riporta il valore dell'espansione volumica caratteristica delle tre tipologie di PCM analizzate.

| Tipologia di PCM        | PARAFFINE |          |          | SALI IDRATI |           | BIO PCM       |
|-------------------------|-----------|----------|----------|-------------|-----------|---------------|
|                         | P_PCM 28  | P_PCM 35 | P_PCM 44 | SH_PCM 26   | SH_PCM 31 | B_PCM 35      |
| Espansione volumica [%] | 12,5      | 12       | 12,5     | 3-4         |           | Dato mancante |

**Tabella 5 Confronto tra i valori di espansione volumica delle tre tipologie di PCM analizzate.**

**DENSITÀ**

Questa proprietà influisce sul peso globale del pannello.

La tabella seguente riporta il valore della densità caratteristica delle tre tipologie di PCM analizzate.

| Tipologia di PCM             | PARAFFINE           |                     |                     | SALI IDRATI         |                     | BIO PCM  |
|------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------|
|                              | P_PCM 28            | P_PCM 35            | P_PCM 44            | SH_PCM 26           | SH_PCM 31           | B_PCM 35 |
| Densità [kg/m <sup>3</sup> ] | 770 (stato liquido) | 700 (stato liquido) | 140 (stato liquido) | 110 (stato liquido) | 850 (stato liquido) |          |
|                              | 880 (stato solido)  | 800 (stato solido)  | 150 (stato solido)  | 130 (stato solido)  | 940 (stato solido)  |          |

**Tabella 6 Confronto tra i valori di densità delle tre tipologie di PCM analizzate.**

## INFIAMMABILITÀ

Al fine di rispettare le norme in materia di sicurezza, è necessario adottare alcune misure protettive nei confronti dei PCM, in particolare in ambito architettonico, per tutelare gli edifici da un possibile rischio di incendio. Oltre a scegliere materiali a cambiamento di fase con un'alta temperatura di infiammabilità, è possibile ricorrere all'impiego di additivi ritardanti di fiamma oppure incapsulare il PCM in contenitori ignifughi. La tabella seguente riporta il valore della temperatura di infiammabilità caratteristica delle tre tipologie di PCM analizzate.

| Tipologia di PCM             | PARAFFINE |          |          | SALI IDRATI      |                      | BIO PCM  |
|------------------------------|-----------|----------|----------|------------------|----------------------|----------|
|                              | P_PCM 28  | P_PCM 35 | P_PCM 44 | SH_PCM 26        | SH_PCM 31            | B_PCM 35 |
| Punto di infiammabilità [°C] | 165       | 177      | 186      | Non infiammabile | Bassa infiammabilità | >100     |

**Tabella 7 Confronto tra i valori di temperatura di infiammabilità delle tre tipologie di PCM analizzate.**

## SUPERCOOLING

Se il punto di fusione del materiale si trova molto al di sopra del suo punto di solidificazione, si osserva il fenomeno del sottoraffreddamento. Durante il cambiamento di fase l'intero calore trasportato dovrebbe essere disponibile alla stessa temperatura per entrambi, fusione e solidificazione.

## STABILITÀ

Durante il suo ciclo di vita, il PCM è sottoposto ad un elevato numero di cicli di accumulo e rilascio di energia termica. Idealmente, le proprietà termodinamiche del PCM non dovrebbero essere influenzate, vale a dire né la capacità di accumulo termico, né le temperature di fusione e solidificazione dovrebbero cambiare nel corso del tempo.

La stabilità a lungo termine è garantita dall'assenza di reazioni chimiche durante il processo di accumulo di energia termica, sia all'interno del materiale stesso, sia a contatto con i materiali usati nella costruzione. Fusione e solidificazione sono infatti processi puramente fisici e dunque la capacità di immagazzinamento di calore rimane ad un livello elevato per tutta la vita utile del prodotto.

## SURRISCALDAMENTO

Se la temperatura all'interno del sistema è superiore al previsto, potrebbe verificarsi il fenomeno di surriscaldamento del PCM. Su brevi periodi, il risultato è semplicemente che ulteriore calore sensibile sia accumulato nel sistema. Se il surriscaldamento si svolge nell'arco di un periodo di tempo più lungo, si potrebbe verificare un effetto negativo sul PCM stesso.

Vengono di seguito elencate le principali proprietà termofisiche delle tre tipologie di materiale a cambiamento di fase selezionate per l'inserimento all'interno dei prototipi di pannello schermante in policarbonato, analizzati con misure in laboratorio e monitorati sulla test cell.

|      |                                |                       |
|------|--------------------------------|-----------------------|
| P 28 | Range di fusione               | 27 - 29 °C            |
|      | Range di solidificazione       | 29 - 27 °C            |
|      | Entalpia di fusione            | 245 kJ/kg             |
|      | Densità (stato solido a 15°C)  | 880 kg/m <sup>3</sup> |
|      | Densità (stato liquido a 40°C) | 770 kg/m <sup>3</sup> |
|      | Conducibilità termica          | 0,2 W/mK              |
|      | Espansione volumica            | 12,5 %                |
|      | Calore specifico               | 2 kJ/kgK              |
|      | Punto di infiammabilità        | 165 °C                |

|      |                                |                       |
|------|--------------------------------|-----------------------|
| P 35 | Range di fusione               | 34 - 36 °C            |
|      | Range di solidificazione       | 36 - 34 °C            |
|      | Entalpia di fusione            | 240 kJ/kg             |
|      | Densità (stato solido a 15°C)  | 880 kg/m <sup>3</sup> |
|      | Densità (stato liquido a 40°C) | 770 kg/m <sup>3</sup> |
|      | Conducibilità termica          | 0,2 W/mK              |
|      | Espansione volumica            | 12 %                  |
|      | Calore specifico               | 2 kJ/kgK              |
|      | Punto di infiammabilità        | 177 °C                |

|      |                                |                       |
|------|--------------------------------|-----------------------|
| P 44 | Range di fusione               | 41 - 44 °C            |
|      | Range di solidificazione       | 44 - 40 °C            |
|      | Entalpia di fusione            | 255 kJ/kg             |
|      | Densità (stato solido a 15°C)  | 800 kg/m <sup>3</sup> |
|      | Densità (stato liquido a 40°C) | 700 kg/m <sup>3</sup> |
|      | Conducibilità termica          | 0,2 W/mK              |
|      | Espansione volumica            | 12,5 %                |
|      | Calore specifico               | 2 kJ/kgK              |
|      | Punto di infiammabilità        | 186 °C                |

Figura 5 Schede tecniche dei PCM a base di paraffina



SH 26

|                                |                       |
|--------------------------------|-----------------------|
| Range di fusione               | 25 - 27 °C            |
| Range di solidificazione       | 25 - 24 °C            |
| Entalpia di fusione            | 190 kJ/kg             |
| Densità (stato solido a 15°C)  | 150 kg/m <sup>3</sup> |
| Densità (stato liquido a 35°C) | 140 kg/m <sup>3</sup> |
| Conducibilità termica          | 0,6 W/mK              |
| Espansione volumica            | 3 - 4 %               |
| Calore specifico               | 2 kJ/kgK              |
| Punto di infiammabilità        | non infiammabile      |

SH 31

|                                |                       |
|--------------------------------|-----------------------|
| Range di fusione               | 31 - 33 °C            |
| Range di solidificazione       | 28 - 30 °C            |
| Entalpia di fusione            | 220 kJ/kg             |
| Densità (stato solido a 15°C)  | 130 kg/m <sup>3</sup> |
| Densità (stato liquido a 35°C) | 110 kg/m <sup>3</sup> |
| Conducibilità termica          | 0,6 W/mK              |
| Espansione volumica            | 3 - 4 %               |
| Calore specifico               | 2 kJ/kgK              |
| Punto di infiammabilità        | bassa infiammabilità  |

Figura 6 Schede tecniche dei PCM a base di Sali idrati

B 35

|                                       |   |
|---------------------------------------|---|
| Aspetto                               | Trasparente allo stato liquido<br>e cera bianca allo stato solido |
| Temperatura di fusione                | 35 °C   |
| Entalpia di fusione                   | 181 kJ/kg   |
| Densità (stato solido)                | 940 kg/m <sup>3</sup>   |
| Densità (stato liquido)               | 850 kg/m <sup>3</sup>   |
| Conducibilità termica (stato solido)  | 0,25 W/mK   |
| Conducibilità termica (stato liquido) | 0,15 W/mK   |
| Calore specifico (stato solido)       | 2,44 kJ/kgK   |
| Calore specifico (stato liquido)      | 2,72 kJ/kgK   |
| Punto di infiammabilità               | > 100 °C  |
| Durabilità nel tempo                  | 27,4 anni   |

Figura 7 Scheda tecnica Bio PCM.

## 2.4 La realizzazione dei prototipi

Per la realizzazione dei prototipi l'attività è stata divisa in due fasi: la sigillatura dei pannelli e il riempimento con il PCM.

### **Sigillatura del pannello**

Per la realizzazione del prototipo di pannello schermante, la questione della sigillatura diventa di primaria importanza, tenendo conto del fatto che gli alveoli della lastra in policarbonato devono essere riempiti con materiale a cambiamento di fase. La sigillatura può essere eseguita con diverse procedure, ma tutte devono assicurare sia la tenuta ermetica, per evitare la fuoriuscita del PCM quando si trova allo stato liquido, sia un'adeguata resistenza meccanica, per garantire una risposta corretta in caso di urti accidentali e della dilatazione termica del materiale. Una delle verifiche fondamentali per tutti i tipi di materiale usati per la chiusura del componente è quella della compatibilità chimica sia con il policarbonato che con il materiale a cambiamento di fase. Vengono di seguito illustrate le differenti tecniche di sigillatura sperimentate.

#### *1. La termosaldatura*

La termosaldatura è il procedimento che permette l'unione dei due bordi all'estremità delle lastre mediante la fusione degli stessi, realizzando un collegamento permanente. Il processo lavorativo consiste nel riscaldare le estremità del materiale fino a 140-150°C, per poi porre a contatto le due parti che, una volta che il policarbonato si solidifica, saranno unite in maniera continua e solidale, pur subendo comunque una deformazione.

I vantaggi che questo tipo di soluzione comporta sono:

- tempi estremamente ridotti per realizzare la giunzione;
- efficacia immediata (il pezzo è reso subito utilizzabile, senza dover aspettare il periodo di asciugatura necessaria per collanti e sigillanti);
- tenuta elevata, anche sulla giunzione le caratteristiche meccaniche sono simili a qualunque altro punto sulla lastra.

I principali svantaggi di questa tecnica sono:

- scarsa efficacia per lastre con spessori superiori a 10mm;
- deformazione delle estremità che rende difficile l'inserimento e la posa entro i più comuni profili di assemblaggio.

Questa soluzione risulta maggiormente efficace per lastre con spessore contenuto e viene utilizzata soprattutto per le lastre grecate o ondulate, per le quali la chiusura tradizionale con nastri adesivi in alluminio non è appropriata data la natura complessa della sezione.

I pannelli impiegati per l'attività di ricerca presentano tutti un'estremità termosaldata al fine di evitare la possibile presenza di fessure e poter così riempire gli alveoli con materiale a cambiamento di fase, evitando qualsiasi fuoriuscita.

#### *2. Silicone*

Per sigillare i prototipi di pannelli in policarbonato alveolare da riempire con PCM si è deciso di procedere analizzando dapprima la compatibilità e il grado di tenuta di due tipologie differenti di silicone commerciale. Il sigillante è stato inserito su uno dei due lati aperti all'interno degli alveoli di due campioni di lastra con due pareti color cristallo, spessore 10 mm e dimensioni 18x18 cm. L'operazione è stata eseguita manualmente utilizzando una pistola di calafataggio, caricata rispettivamente con le due cartucce di silicone e successivamente il sigillante è stato distribuito in modo uniforme con l'aiuto di una spatola metallica. Per garantire una maggior omogeneità, il sigillante è stato steso con uno spessore di 1- 2 cm, senza tuttavia fuoriuscire troppo dall'estremità esterna del pannello per evitare che sbordasse oltre il filo esterno delle pareti laterali.

L'operazione di iniezione richiede pochi minuti, ma sono invece necessari 2-3 giorni di asciugatura per assicurare un completo indurimento del materiale.

Di seguito sono riportate alcune fotografie che documentano le fasi di sigillatura del prototipo.



**Figura 8 Sigillatura con silicone acetico degli alveoli di un pannello in policarbonato**

### 3. Termosaldatura + silicone

Al fine di migliorare la tenuta dei pannelli si è deciso di combinare due tecniche diverse di sigillatura, la termosaldatura e l'impiego del silicone. Due lastre alveolari in policarbonato con due pareti, di spessore 10 mm e dimensioni 60x60 cm e con un'estremità termosaldata sono state utilizzate come prototipi e, per riuscire ad inserire negli alveoli inferiori lo strato di silicone, è stato utilizzato un trapano a colonna per praticare un foro in ogni alveolo della lastra, facilitando l'inserimento della punta della pistola di calafataggio per l'infiltrazione del silicone.

L'operazione di inserimento del sigillante è stata eseguita manualmente, impiegando due tipologie differenti di sigillante, in modo da testarne l'efficacia e il grado di tenuta:

- sigillante acrilico negli alveoli di una lastra di colore verde;
- sigillante acetico negli alveoli di una lastra color cristallo.

Il sigillante è stato iniettato negli alveoli per una profondità di 1- 2 cm, così da sigillare completamente il foro praticato ed evitare la fuoriuscita di materiale a cambiamento di fase. L'operazione di iniezione richiede pochi minuti, ma sono invece necessari 2 -3 giorni di asciugatura per assicurare un completo indurimento del materiale.

Di seguito sono riportate alcune fotografie che documentano le fasi di sigillatura del prototipo.



**Figura 9 Sigillatura con silicone inserito attraverso un foro praticato sul fondo degli alveoli di un pannello in policarbonato**

#### 4. Termosaldatura + binario in plastica + silicone

Per ottimizzare la tenuta dei pannelli e facilitarne l'assemblaggio sulla cella di prova, le lastre alveolari in policarbonato con due pareti, di spessore 10 mm e dimensioni 60x60 cm e con un'estremità termosaldata sono state inserite all'interno di un binario in materiale plastico e ad esso ancorate con del silicone, inserito mediante una pistola di calafataggio.

L'operazione di inserimento del sigillante è stata eseguita manualmente, impiegando del silicone acrilico iniettato nel binario in plastica con uno strato di spessore di 1 cm, così da evitare successivamente la fuoriuscita di materiale a cambiamento di fase. L'operazione di iniezione richiede pochi minuti, ma sono invece necessari 2 -3 giorni di asciugatura per assicurare un completo indurimento del materiale. Quest'ultima tecnica di sigillatura è risultata la più efficace e dunque è stata scelta per realizzare i prototipi da monitorare sulla cella di prova. Di seguito viene riportata una fotografia che documenta la fase di sigillatura del prototipo.



**Figura 10 Sigillatura con silicone acrilico inserito in un binario di plastica in cui viene fissata l'estremità termosaldata di un pannello in policarbonato alveolare**

#### Riempimento con PCM

I pannelli in policarbonato alveolare precedentemente sigillati sono stati sottoposti ad un test di tenuta, riempiendo gli alveoli con acqua. Dal momento che solo i campioni sigillati con silicone acetico si sono rivelati efficienti, si è deciso di procedere con questi ultimi per preparare i prototipi contenenti materiale a cambiamento di fase. Le tre tipologie di PCM sono state riscaldate fino all'ottenimento della fase liquida.

In una prima fase, i pannelli sono stati riempiti manualmente, trasferendo il liquido direttamente dalla tanica di contenimento agli alveoli, con l'aiuto di un piccolo imbuto metallico. Successivamente si è invece optato per trasferire il materiale a cambiamento di fase con un imbuto in plastica dalla tanica di contenimento a dei contenitori plastici più piccoli dotati di beccuccio, in modo tale da facilitare l'operazione di riempimento degli alveoli ed evitare di far fuoriuscire il materiale.

Dopo aver lasciato i pannelli per 24 ore ad una temperatura di 26°C, per ottenere la solidificazione della paraffina, si è proceduto alla chiusura della sommità superiore degli alveoli con uno strato ulteriore di sigillante acetico, in modo tale da garantire la tenuta ermetica ed evitare fuoriuscite per evaporazione. Le immagini seguenti mostrano le fasi di riempimento e i prototipi completati.



**Figura 11 Riempimento del pannello in policarbonato alveolare con materiale a cambiamento di fase**

## 2.5 Variabili di progetto

Nella fase preliminare del progetto si sono definite le variabili di progetto, per orientare la scelta dei materiali da utilizzare e individuare le configurazioni da monitorare. Le diverse variabili sono state verificate tramite l'attività sperimentale e di modellazione numerica. Le principali variabili sono elencate in Figura 12 e sono divise tra variabili del pannello in policarbonato e del PCM.

In Tabella 8 si sono riportate le principali attività svolte per le diverse variabili analizzate. In particolare per il pannello in policarbonato sono:

### - 1 Lo spessore della lastra in policarbonato

A livello sperimentale la lastra alveolare scelta presenta una singola camera (2 pareti) e uno spessore di 10 mm ed è stata selezionata per la facilità di termosaldare le sue estremità senza che si verifichino fessurazioni; inoltre, la presenza di una singola fila di alveoli permette di agevolare la fase di riempimento con materiale a cambiamento di fase rispetto alle sezioni con pareti multiple ed elementi diagonali. A livello di modellazione si è investigata l'influenza dello spessore del pannello in policarbonato sulla prestazione del componente.

### - 2 L'orientamento degli alveoli del policarbonato: orizzontali e verticali

Il comportamento rispetto all'orientamento dei capillari delle lastre è stato testato in laboratorio, tramite le misure spettrofotometriche mentre nelle misure in test cell si è misurato il solo orientamento verticale.

### - 3 Il colore dei pannelli in policarbonato

Al fine di analizzare sia l'influenza del colore del policarbonato che della tipologia di PCM, sono state definite due diverse configurazioni, individuando dapprima la *variabile colore* – pannelli di diverse colorazioni riempiti con materiale a cambiamento di fase dello stesso tipo - e successivamente la *variabile PCM* – pannelli dello stesso colore riempiti con materiale a cambiamento di fase di tre tipologie differenti.

Per quel che riguarda il PCM:

### - 1 La tipologia di materiale a cambiamento di fase: Paraffina, Sali idrati e Bio PCM

Per quanto riguarda la scelta del PCM, la volontà di confrontare diverse tipologie di materiale ha condotto alla selezione di Paraffine, Sali idrati e Bio PCM, con temperature di fusione compatibili all'impiego durante il periodo estivo e comprese tra 31 e 44°C.

### - 2 La temperatura di fusione del PCM

Il confronto tra diverse temperature di fusione è stato condotto a livello sperimentale con le misure spettrofotometriche e a livello di modellazione.



Figura 12 Schema variabili di progetto

| Policarbonato   | Misure  | Modellazione |
|---|---|--------------|
| 1 Lo spessore della lastra in policarbonato                               |   | x            |
| 2 L'orientamento degli alveoli del policarbonato: orizzontali e verticali | - Misure spettrofotometriche (laboratorio)<br>- Misure in test cell                           |              |
| 3 Il colore dei pannelli in policarbonato                                 | - Misure spettrofotometriche (laboratorio)  | x            |
| <b>PCM</b>  |   |              |
| 1 I tre tipi Paraffina, Sali idrati e Bio PCM                             | - Misure di conducibilità termica<br>- Misure spettrofotometriche<br>- Misure in test cell    | x            |
| 2 La temperatura di fusione del PCM                                       | - Misure di conducibilità termica (laboratorio)<br>- Misure spettrofotometriche (laboratorio) |              |

Tabella 8 Le varianti al progetto e le verifiche sperimentali e di modellazione effettuate.



Figura 13 I pannelli in policarbonato delle diverse colorazioni vuoti. Da sinistra: Opale, Verde, Cristallo e Blu.



Figura 14 Configurazione 1-variante colore con PCM a base paraffina, temperatura di fusione 35°C. Da sinistra pannello Blu P\_PCM 35, Verde P\_PCM 35, Opale P\_PCM 35 e il riferimento cristallo vuoto.



Figura 15 Configurazione 2 variante PCM pannelli verdi. Da sinistra pannello Verde\_B\_PCM\_35, Verde\_P\_PCM\_35, Verde\_SH\_PCM\_31 e pannello vuoto verde.



Figura 16 Configurazione 3 variante temperatura di fusione del PCM. Da sinistra Blu P\_PCM 35, Blu P\_PCM 44 e Blu vuoto.

## 2.6 Prototipi di pannelli

Due diverse dimensioni di pannelli sono state utilizzate durante l'attività sperimentale: i grandi di dimensione 70x82,5 cm sono stati impiegati nelle misure in test cell, mentre i piccoli di dimensione 40x40 cm sono stati utilizzati per le misure di conducibilità termica e spettrofotometriche. In Tabella 9 sono riportate le proprietà geometriche dei diversi pannelli, i codici identificativi, il peso del pannello vuoto (PC) e il peso del PCM.

|         | Nome   | Colore    | Dimensioni [cm] | Tipo di PCM | Peso PC [kg]    | Peso PC+PCM [kg] | Peso PCM [kg] |
|---------|--------|-----------|-----------------|-------------|-----------------|------------------|---------------|
| GRANDI  | 1_C_G  | cristallo | 70 x 82.5       | P_PCM 35    | 1.2             | 4.6              | 3.5           |
|         | 2_O_G  | opale     |                 | P_PCM 35    | 1.2             | 4.8              | 3.6           |
|         | 3_B_G  | blu       |                 | P_PCM 35    | 1.2             | 4.8              | 3.6           |
|         | 4_V_G  | verde     |                 | P_PCM 35    | 1.2             | 4.8              | 3.6           |
|         | 5_C_G  | cristallo |                 | vuoto       | 1.1             |                  |               |
|         | 7_V_G  | verde     |                 | vuoto       | 1.1             |                  |               |
|         | 8_V_G  | verde     |                 | B_PCM 35    | 2.2             | 6.2              | 4.1           |
|         | 9_V_G  | verde     |                 | SH_PCM 31   | 2.2             | 5.9              | 3.7           |
|         |        | Nome      |                 | Colore      | Dimensioni [cm] | Tipo di PCM      | Peso PC [kg]  |
| PICCOLI | 1_C_P  | cristallo | 40 x 40         | vuoto       | 0.3             |                  |               |
|         | 2_O_P  | opale     |                 | vuoto       | 0.3             |                  |               |
|         | 3_B_P  | blu       |                 | P_PCM 44    | 0.3             | 1.3              | 1.0           |
|         | 4_V_P  | verde     |                 | B_PCM 35    | 0.3             | 1.4              | 1.1           |
|         | 5_B_P  | blu       |                 | B_PCM 35    | 0.3             | 1.3              | 0.9           |
|         | 6_V_P  | verde     |                 | B_PCM 35    | 0.3             | 1.3              | 1.0           |
|         | 7_C_P  | cristallo |                 | B_PCM 35    | 0.4             | 1.4              | 1.0           |
|         | 8_O_P  | opale     |                 | B_PCM 35    | 0.3             | 1.3              | 1.0           |
|         | 9_V_P  | verde     |                 | SH_PCM 31   | 0.4             | 2.0              | 1.6           |
|         | 10_C_P | cristallo |                 | vuoto       | 0.3             |                  |               |
|         | 11_V_P | verde     |                 | vuoto       | 0.3             |                  |               |
|         | 14_B_P | blu       |                 | vuoto       | 0.3             |                  |               |

Tabella 9 Caratteristiche geometriche e peso dei diversi pannelli testati.



## 2.7 Quadro di sintesi delle diverse verifiche effettuate

| Configurazione               | Tipologia di misura                            | Date delle misure                               | Simulazioni                                    |
|------------------------------|--|---|--|
| 1 (variante colore)          | Misura di prestazione energetica test cell     | Dal 12.08.2015 al 16.08.2015                    | Prestazione globale (heating/cooling/lighting) |
|                              |  | 06.08.2015                                      |  |
|                              | Misure trasmissione luminosa in campo          | (stato liquido)<br>11.08.2015<br>(stato solido) |  |
|                              | Misura di luminanza                            | 06.08.2015                                      |  |
|                              | Misura spettrofotometriche                     | Dal 24.08.2015 al 27.08.2015                    |  |
| 2 (variante PCM)             | Misura di prestazione energetica               | Dal 18.08.2015 al 31.08.2015                    |  |
|                              | Misure trasmissione luminosa in campo          | 24.08.2015<br>(stato solido)                    |  |
|                              | Misura di luminanza                            | 20.08.2015 e 28.08.2015                         |  |
|                              | Misura spettrofotometriche in laboratorio      | Dal 24.08.2015 al 27.08.2015                    |  |
|                              | Misure di conducibilità termica in laboratorio | Dal 12.08.2015 al 21.08.2015                    |  |
| 3 (variante temperatura PCM) | Misura spettrofotometriche in laboratorio      | 23.08.2015 al 26.08.2015                        |  |

**Figura 17** Quadro di sintesi delle misure effettuate.

### 3 L'attività sperimentale sul componente

L'attività sperimentale è stata articolata in due parti:

- misure in laboratorio al fine di caratterizzare le proprietà del componente innovativo (misure di conducibilità termica e caratterizzazione spettrofotometrica), da utilizzarsi in fase di simulazione;
- misure in test cell per verificare la prestazione del componente quando esposto a condizioni al contorno reali (misure di prestazione energetica e di comportamento illuminotecnico).

#### 3.1 Misure in laboratorio

##### 3.1.1 La misura della conducibilità termica

###### La metodologia di misura della conducibilità termica

Al fine di determinare la conducibilità termica dei prototipi si sono effettuate delle misure in laboratorio con piastra calda con anello di guardia (LASERCOMP modello FOX 600) a singolo provino [6].

Lo strumento è stato realizzato e progettato seguendo le indicazioni della norma ASTM C518-91 "Standards Test Method for Steady-State Heat Flux Measurement and Thermal Transmission Properties by means of the Heat Flux Meter Apparatus". Lo strumento è stato tarato in fase di produzione utilizzando un provino di material tipo 1450b NIST SRM ed un provino di EPS testato e certificate dal NIST secondo lo standard ASTM C 1132-89.

Le principali caratteristiche dell'apparecchiatura di misura sono:

- dimensioni massima del campione 610x610 mm e minima 300x300 mm;
- spessore massimo del campione 203 mm e minima 0.3 mm;
- range massimo di temperatura delle piastre 85 °C e -15°C.

Il principio di misura consiste nel creare una differenza di temperatura costante tra la faccia superiore e quella inferiore della piastra. Una volta raggiunte le condizioni di regime stazionario, lo strumento misura le temperature delle due piastre e il flusso termico specifico che attraversa il campione. Mediante il principio di Fourier si determina il valore della conducibilità termica equivalente del campione testato:

$$\lambda_{eq} = \frac{s \cdot \dot{Q}}{\Delta t \cdot A} \quad \text{Equazione 1}$$

L'accuratezza nominale della misura come dichiarata dal costruttore è ±1% del valore misurato. Per ogni misura effettuata si è verificata l'accuratezza e il valore risultato è riportato nelle schede dei risultati. L'incertezza del risultato è indicato come Δλ e rappresenta l'incertezza in percentuale del risultato di conducibilità termica.

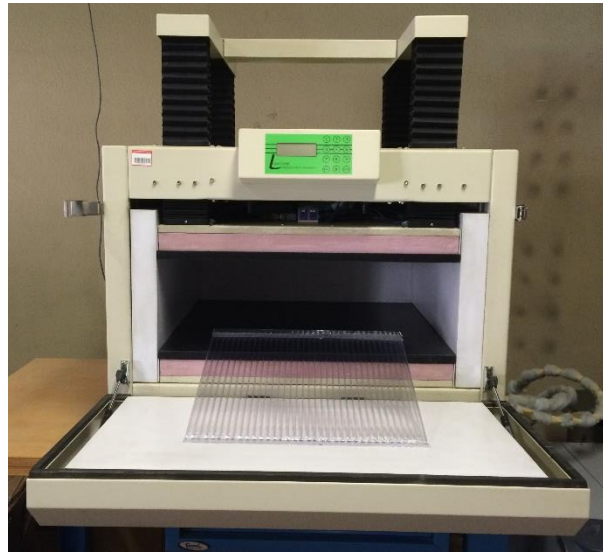
Le misure sono state effettuate per due diverse temperature medie per ogni campione e si è scelto di effettuare le misure in condizioni stazionarie. Lo scopo della misura era la caratterizzazione termica del componente per valutare le proprietà di riduzione dello scambio termico e si è quindi scelto di utilizzare delle differenze di temperature tale per cui il PCM era allo stato solido.

Le misure di conducibilità sono state effettuate su pannelli di dimensione 40x 40 cm con le seguenti caratteristiche:

- pannelli in PC vuoti di due colorazioni opale e cristallo;
- pannello in PC con PCM RT 35 HC, con PCM RT 44 HC, con SP 31, con PT 35.

Ogni misura è stata condotta su due diversi set-point, definiti in modo da evitare fenomeni di condensa (non ci si è potuti spingere a temperature più basse di 15 °C) e da mantenere il PCM allo stato solido:

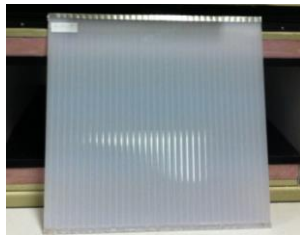
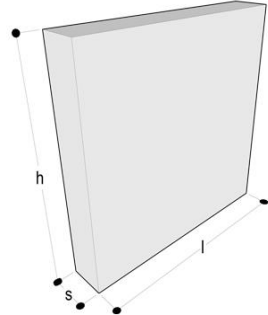
- Primo set point t upper 15 °C e t lower 29 °C;
- Secondo set point t upper 20 °C e t lower 35 °C.



**Figura 18 Piastra calda con anello di guardia.**

### I risultati delle misure di conducibilità termica

Si riportano di seguito le schede per i pannelli vuoti opale e cristallo, con bio based PCM (B\_PCM 35), con PCM a base paraffina (P\_PCM 35 e P\_PCM 44) e con PCM a base di sali idrati (SH\_PCM 31).

| PROGETTO ENEA   |  |                    |                    |                    |                    |                   |                          |                 |
|---|--|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------|--------------------------|-----------------|
| <b>Nome:</b>  | <b>Policarbonato vuoto opale</b><br>Pannello sigillato sui due lati 2_O_P  |                    |                    |                    |                    |                   |                          |                 |
| <b>CARATTERISTICHE GEOMETRICHE</b>                                    |  |                    |                    |                    |                    |                   |                          |                 |
|   | <i>(mm)</i>  |                    |                    |                    |                    |                   |                          |                 |
| s   | 10   |                    |                    |                    |                    |                   |                          |                 |
| l   | 400  |                    |                    |                    |                    |                   |                          |                 |
| h   | 400  |                    |                    |                    |                    |                   |                          |                 |
|   | standard   |                    |                    |                    |                    |                   |                          |                 |
| massa PC  | 0.323  | (kg)               |                    |                    |                    |                   |                          |                 |
| massa PCM   | 0  | (kg)               |                    |                    |                    |                   |                          |                 |
|   |   |                    |                    |                    |                    |                   |                          |                 |
| RISULTATI DELL'ANALISI ATTRAVERSO PIASTRA CALDA CON ANELLO DI GUARDIA |  |                    |                    |                    |                    |                   |                          |                 |
| <b>PROVA 1</b>  | <b>Condizioni di prova:</b>  |                    |                    |                    | <b>data prova:</b> |                   |                          |                 |
|   | Spessore misurato automaticamente: 9.7 mm  |                    |                    |                    | 21/08/2015         |                   |                          |                 |
|   | $\Delta T_{\text{nominale}}$   | $T_{\text{upper}}$ | $T_{\text{lower}}$ | $T_{\text{media}}$ | $\lambda$          | $E_{\text{test}}$ | $S_{\text{cal}}$         | $\Delta\lambda$ |
| TEST  | [°C]   | [°C]               | [°C]               | [°C]               | [W/(mK)]           | [μV]              | [(W/m <sup>2</sup> )/μV] | [%]             |
| a   | 14.01  | 15.01              | 29.02              | 22.02              | <b>0.069</b>       | 18930.5           | 0.00528                  | <b>2.41</b>     |
| b   | 15.01  | 20.01              | 35.02              | 27.52              | <b>0.072</b>       | 21162.0           | 0.00524                  | <b>2.39</b>     |
| $\lambda$ media   |  |                    |                    |                    | <b>0.070</b>       |                   |                          |                 |

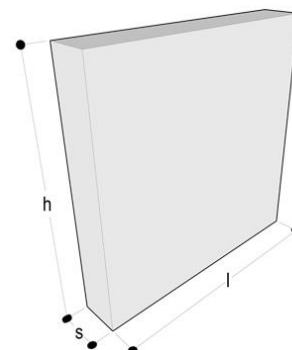
**Figura 19 Risultato della prova su pannello vuoto opale.**

**PROGETTO ENEA**

**Nome:** Policarbonato vuoto cristallo  
Pannello sigillato sui due lati 10\_C\_P

**CARATTERISTICHE GEOMETRICHE**

|           |          |      |
|-----------|----------|------|
|           | (mm)     |      |
| s         | 10       |      |
| l         | 400      |      |
| h         | 400      |      |
|           | standard |      |
| massa PC  | 0,287    | (kg) |
| massa PCM | 0        | (kg) |



**RISULTATI DELL'ANALISI ATTRAVERSO PIASTRA CALDA CON ANELLO DI GUARDIA**

**PROVA 1** Condizioni di prova:

Spessore misurato automaticamente: 9.8 mm

data prova:

12/08/2015  
21/08/2015

| TEST            | $\Delta T_{\text{nominale}}$<br>[°C] | $T_{\text{upper}}$<br>[°C] | $T_{\text{lower}}$<br>[°C] | $T_{\text{media}}$<br>[°C] | $\lambda$<br>[W/(mK)] | $E_{\text{test}}$<br>[μV] | $S_{\text{cal}}$<br>[(W/m <sup>2</sup> )/μV] | $\Delta\lambda$<br>[%] |
|-----------------|--------------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------|---------------------------|--|------------------------|
| a               | 14.01                                | 15.01                      | 29.02                      | 22.02                      | <b>0.070</b>          | 18893.5                   | 0.00528                                      | <b>2.40</b>            |
| b               | 15.01                                | 20.01                      | 35.02                      | 27.52                      | <b>0.072</b>          | 21067.3                   | 0.00524                                      | <b>2.38</b>            |
| $\lambda$ media | <b>0.071</b>                         |                            |                            |                            |                       |                           |  |                        |

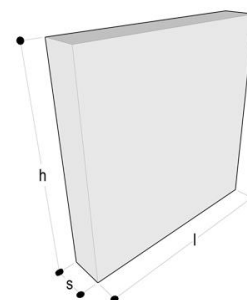
**Figura 20 Risultato della prova su pannello vuoto in cristallo.**

**PROGETTO ENEA**

**Nome:** Policarbonato verde con B\_PCM 35  
Pannello termosaldato su un lato e sigillato sull'altro 4\_V\_P

**CARATTERISTICHE GEOMETRICHE**

|                  |       |                      |
|------------------|-------|----------------------|
|                  | (mm)  |                      |
| s                | 10    |                      |
| l                | 400   |                      |
| h                | 400   |                      |
| massa PC         | 0.34  | (kg)                 |
| massa PCM        | 1.102 | (kg)                 |
| massa Pannello   | 1.441 | (kg)                 |
| densità PCM      | 850   | (kg/m <sup>3</sup> ) |
| densità Pannello | 900.6 | (kg/m <sup>3</sup> ) |



**RISULTATI DELL'ANALISI ATTRAVERSO PIASTRA CALDA CON ANELLO DI GUARDIA**

**PROVA 1** Condizioni di prova:

Spessore misurato automaticamente: 10.3 mm a  
10.2 mm b

data prova:

12/08/2015  
13/08/2015

| TEST            | $\Delta T_{\text{nominale}}$<br>[°C] | $T_{\text{upper}}$<br>[°C] | $T_{\text{lower}}$<br>[°C] | $T_{\text{media}}$<br>[°C] | $\lambda$<br>[W/(mK)] | $E_{\text{test}}$<br>[μV] | $S_{\text{cal}}$<br>[(W/m <sup>2</sup> )/μV] | $\Delta\lambda$<br>[%] |
|-----------------|--------------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------|---------------------------|--|------------------------|
| a               | 14.00                                | 15.02                      | 29.02                      | 22.02                      | <b>0.162</b>          | 41736.1                   | 0.00528                                      | <b>2.38</b>            |
| b               | 15.01                                | 20.01                      | 35.02                      | 27.52                      | <b>0.159</b>          | 44569.3                   | 0.00524                                      | <b>2.38</b>            |
| $\lambda$ media | <b>0.161</b>                         |                            |                            |                            |                       |                           |  |                        |

**Figura 21 Risultato della prova su pannello B\_PCM\_35.**

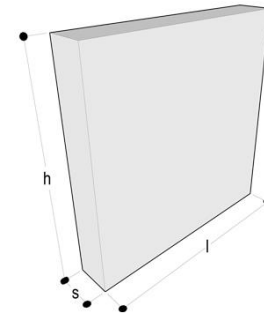
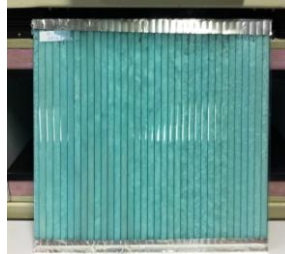
PROGETTO ENEA

**Nome:** Policarbonato verde con SH\_PCM 31  
Pannello termosaldato su un lato e sigillato sull'altro 9\_V\_P

**CARATTERISTICHE GEOMETRICHE**

(mm)  
s 10  
l 400  
h 400

massa PC 0.37 (kg)  
massa PCM 1.648 (kg)  
massa Pann 2.02 (kg)  
densità PCM 1100 (kg/m<sup>3</sup>)  
densità Panr 1262.5 (kg/m<sup>3</sup>)



RISULTATI DELL'ANALISI ATTRAVERSO PIASTRA CALDA CON ANELLO DI GUARDIA

**PROVA 1** Condizioni di prova: data prova: 20/08/2015  
Spessore misurato automaticamente: 9.9 mm a  
9.9 mm b

| TEST            | $\Delta T_{\text{nominale}}$<br>[°C] | $T_{\text{upper}}$<br>[°C] | $T_{\text{lower}}$<br>[°C] | $T_{\text{media}}$<br>[°C] | $\lambda$<br>[W/(mK)] | $E_{\text{test}}$<br>[μV] | $S_{\text{cal}}$<br>[(W/m <sup>2</sup> )/μV] | $\Delta\lambda$<br>[%] |
|-----------------|--------------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------|---------------------------|--|------------------------|
| a               | 14.00                                | 15.02                      | 29.02                      | 22.02                      | 0.3461                | 92202.1                   | 0.00528                                      | 2.40                   |
| b               | 15.00                                | 20.02                      | 35.02                      | 27.52                      | 0.3603                | 103697.7                  | 0.00524                                      | 2.38                   |
| $\lambda$ media |                                      |                            |                            |                            | 0.353                 |                           |  |                        |

Figura 22 Risultato della prova su pannello SH\_PCM\_31.

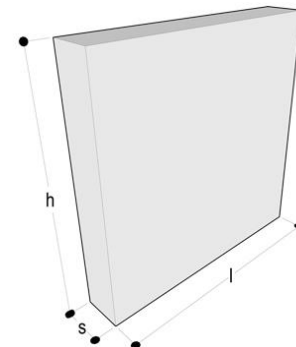
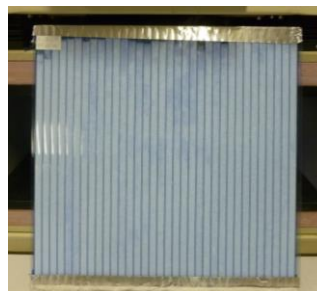
PROGETTO ENEA

**Nome:** Policarbonato blu con P\_PCM 35  
Pannello termosaldato su un lato e sigillato sull'altro 5\_B\_P

**CARATTERISTICHE GEOMETRICHE**

(mm)  
s 10  
l 400  
h 400

massa PC 0.33 (kg)  
massa PCM 0.924 (kg)  
massa Pann 1.255 (kg)  
densità PCM 770 (kg/m<sup>3</sup>)  
densità Panr 784.4 (kg/m<sup>3</sup>)



RISULTATI DELL'ANALISI ATTRAVERSO PIASTRA CALDA CON ANELLO DI GUARDIA

**PROVA 1** Condizioni di prova: data prova: 18/08/2015  
Spessore misurato automaticamente: 10.0 mm

| TEST            | $\Delta T_{\text{nominale}}$<br>[°C] | $T_{\text{upper}}$<br>[°C] | $T_{\text{lower}}$<br>[°C] | $T_{\text{media}}$<br>[°C] | $\lambda$<br>[W/(mK)] | $E_{\text{test}}$<br>[μV] | $S_{\text{cal}}$<br>[(W/m <sup>2</sup> )/μV] | $\Delta\lambda$<br>[%] |
|-----------------|--------------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------|---------------------------|--|------------------------|
| a               | 14.00                                | 15.02                      | 29.02                      | 22.02                      | 0.235                 | 56623.5                   | 0.00528                                      | 2.19                   |
| b               | 15.00                                | 20.02                      | 35.02                      | 27.52                      | 0.240                 | 61143.8                   | 0.00524                                      | 2.13                   |
| $\lambda$ media |                                      |                            |                            |                            | 0.237                 |                           |  |                        |

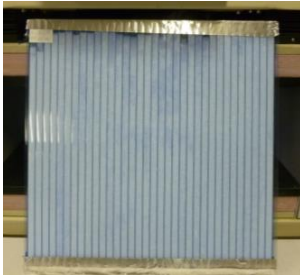
Figura 23 Risultato della prova su pannello P\_PCM\_35.

**PROGETTO ENEA**

**Nome:** Policarbonato blu con P\_PCM 44  
Pannello termosaldato su un lato e sigillato sull'altro 3\_B\_P

**CARATTERISTICHE GEOMETRICHE**

|                  |       |                      |
|------------------|-------|----------------------|
|                  | (mm)  |                      |
| s                | 10    |                      |
| l                | 400   |                      |
| h                | 400   |                      |
| massa PC         | 0.33  | (kg)                 |
| massa PCM        | 0.952 | (kg)                 |
| massa Pannello   | 1.286 | (kg)                 |
| densità PCM      | 787   | (kg/m <sup>3</sup> ) |
| densità Pannello | 803.8 | (kg/m <sup>3</sup> ) |




**RISULTATI DELL'ANALISI ATTRAVERSO PIASTRA CALDA CON ANELLO DI GUARDIA**

**PROVA 1**                      **Condizioni di prova:**                      **data prova:**                      **18/08/2015**  
Spessore misurato automaticamente:                      9.9 mm

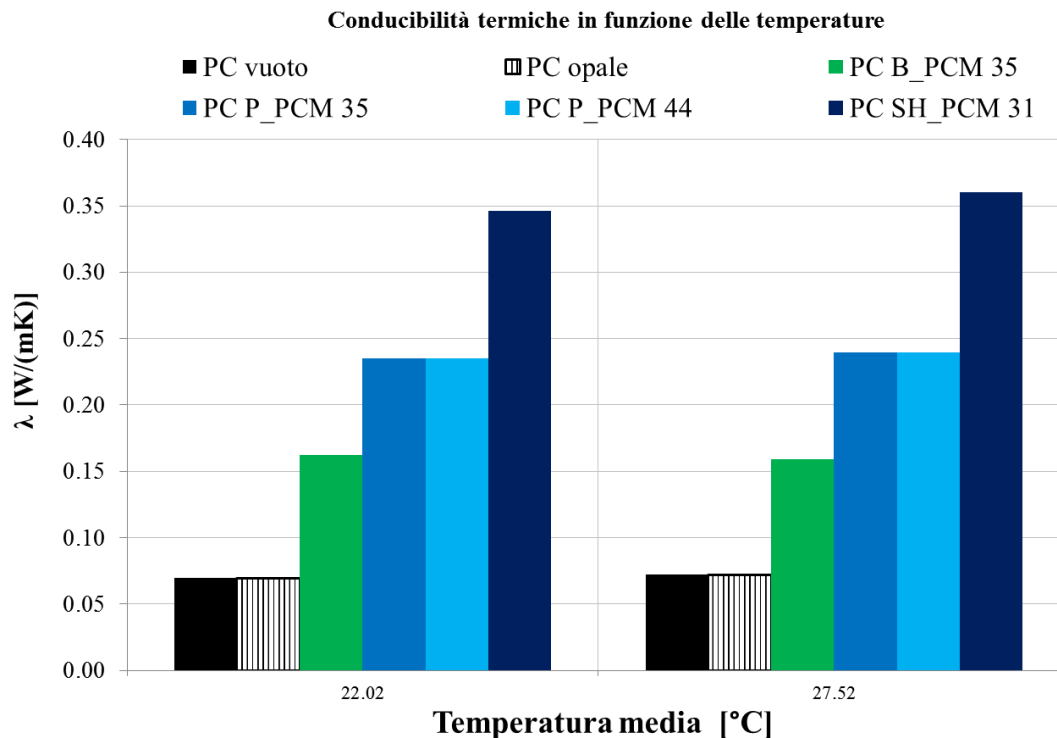
| TEST                              | $\Delta T_{\text{nominale}}$<br>[°C] | $T_{\text{upper}}$<br>[°C] | $T_{\text{lower}}$<br>[°C] | $T_{\text{media}}$<br>[°C] | $\lambda$<br>[W/(mK)] | $E_{\text{rest}}$<br>[μV] | $S_{\text{cal}}$<br>[(W/m <sup>2</sup> )/μV] | $\Delta\lambda$<br>[%] |
|-----------------------------------|--------------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------|---------------------------|--|------------------------|
| a                                 | 14.00                                | 15.02                      | 29.02                      | 22.02                      | <b>0.235</b>          | 62625.2                   | 0.00528                                      | <b>2.40</b>            |
| b                                 | 15.00                                | 20.02                      | 35.02                      | 27.52                      | <b>0.240</b>          | 68952.5                   | 0.00524                                      | <b>2.38</b>            |
| <b><math>\lambda</math> media</b> |                                      |                            |                            |                            | <b>0.237</b>          |                           |  |                        |

**Figura 24 Risultato della prova su pannello P\_PCM\_44.**

Nel quadro riassuntivo dei risultati (Figura 25 e Figura 26) è possibile notare che il valore di conducibilità termica equivalente del pannello in policarbonato vuoto (PC vuoto, cristallo o opale) è il più basso ed è pari a circa 0,07 W/mK. I pannelli con materiale a cambiamento di fase presentano valori di conducibilità termica più elevati. In particolare la conducibilità termica più elevata è stata misurato per il pannello con PCM con Sali idrati (PC SH\_PCM) con un valore pari a 0,353 W/mK mentre i pannelli contenenti PCM a base paraffina presentano una conducibilità termica di 0,237 W/mK per entrambe le temperature di fusione (35°C e 44°C). La prestazione migliore è stata misurata per i pannelli contenenti il Bio based PCM (B\_PCM 35) con una conducibilità termica del pannello con PCM di 0,161 W/mK. I risultati ottenuti dalla misura in piastra calda per i pannelli in policarbonato con PCM a base paraffina e sali idrati sono in linea con i valori di conducibilità termica dichiarati nelle schede tecniche dei PCM mentre il valore misurato per il pannello PC\_B\_PCM 35 è basso rispetto al valore di conducibilità dichiarata per il materiale allo stato solido (0,25 W/mK). Dall' analisi delle schede tecniche la prestazione del materiale B\_PCM avrebbe dovuto essere simile a quella del PCM a base paraffina, invece i risultati sperimentali mostrano un valore di conducibilità del pannello più basso. La differenza potrebbe essere imputabile alle diverse condizioni della prova.

|                        | $T_{\text{media}}$<br>[°C] | $\lambda$<br>[W/(mK)] | $\Delta\lambda$<br>[%] |                        | $T_{\text{media}}$<br>[°C] | $\lambda$<br>[W/(mK)] | $\Delta\lambda$<br>[%] |
|------------------------|----------------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|----------------------------|-----------------------|------------------------|
| <b>PC vuoto</b>        |                            |                       |                        | <b>PC opale</b>        |                            |                       |                        |
| a                      | 22.02                      | <b>0.070</b>          | 2.40                   | a                      | 22.02                      | <b>0.069</b>          | 2.41                   |
| b                      | 27.52                      | <b>0.072</b>          | 2.38                   | b                      | 27.52                      | <b>0.072</b>          | 2.39                   |
| $\lambda$ valore medio |                            | <b>0.071</b>          |                        | $\lambda$ valore medio |                            | <b>0.070</b>          |                        |
| <b>PC B_PCM 35</b>     |                            |                       |                        | <b>PC SH_PCM 31</b>    |                            |                       |                        |
| a                      | 22.02                      | <b>0.162</b>          | 2.38                   | a                      | 22.02                      | <b>0.346</b>          | 2.40                   |
| b                      | 27.52                      | <b>0.159</b>          | 2.38                   | b                      | 27.52                      | <b>0.360</b>          | 2.40                   |
| $\lambda$ valore medio |                            | <b>0.161</b>          | 2.38                   | $\lambda$ valore medio |                            | <b>0.353</b>          |                        |
| <b>PC P_PCM 44</b>     |                            |                       |                        | <b>PC P_PCM 35</b>     |                            |                       |                        |
| a                      | 22.02                      | <b>0.235</b>          | 2.40                   | a                      | 22.02                      | <b>0.235</b>          | 2.19                   |
| b                      | 27.52                      | <b>0.240</b>          | 2.38                   | b                      | 27.52                      | <b>0.240</b>          | 2.13                   |
| $\lambda$ valore medio |                            | <b>0.237</b>          |                        | $\lambda$ valore medio |                            | <b>0.237</b>          |                        |

**Figura 25 Quadro riassuntivo dei risultati di conducibilità termica.**



**Figura 26** Quadro riassuntivo dei valori di conducibilità termica misurati.

### 3.1.2 La caratterizzazione spettrofotometrica

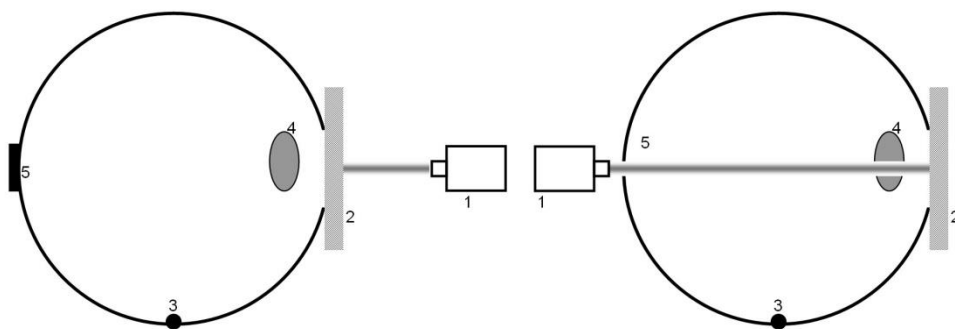
Per la caratterizzazione dei parametri ottici si è utilizzata un apparato sperimentale con spettrofotometro e sfera integratrice di grandi dimensioni [7], presso il Centro di Ricerca ENEA Casaccia di Roma. Al fine di misurare le proprietà ottiche dei materiali a notevole complessità geometrica e strutturale, sono state eseguite delle misure con una sfera integrante (realizzata da Labsphere) con diametro di 75 centimetri, caratterizzata da un rivestimento esterno in alluminio e internamente da Spectralon, con un coefficiente di riflessione del 97- 98% nel intervallo visibile (380-780 nanometri) e superiore all'85% nel resto dell'intervallo solare.

La sfera è provvista di diverse porte, necessarie per una corretta esecuzione delle misure e la sample port ha diametro variabile tra i 12.5, 20, 25 e 30 centimetri. La sorgente luminosa è montata su un braccio mobile che ha permesso di effettuare misure ad incidenza non normale, con angoli di 0°, 30°,45° e 60°.

Per l'esecuzione delle misure è stata impiegata una sorgente luminosa con lampada ad arco di xenon, con potenza di 300 W. Lo spettro osservato va da 380 a 1700 nanometri, comprendo interamente il range visibile e il 93% dello spettro solare.

Le misure sono state condotte sui:

- pannelli vuoti dei diversi colori;
- pannelli pieni configurazione 1, 2 e 3;
- per diversi angoli di incidenza 0°, 30°, 45° e 60°;
- per lo stato liquido e solido del PCM.



**Figura 27** L'apparecchiatura di misura a sinistra in modalità trasmissione e a destra in modalità riflessione. 1- sorgente luminosa, 2- sample port, 3-connessione con il sistema di acquisizione 4-port ausiliaria 5- port per misure di riflessione.

Le misure sono state condotte in modalità trasmissione e riflessione modificando opportunamente il set-up dell'apparato sperimentale. Il sistema a singolo raggio richiede la procedura di correzione ausiliaria, per tenere conto in modo accurato la variazione della riflettività media della sfera integratrice in condizioni misura sul riferimento e sul campione in osservazione. Le misure eseguite sono di tipo beam-hemippherical, ossia radiazione incidente collimata e radiazione trasmessa/riflessa emisferica, essendo quest'ultima la radiazione globalmente trasmessa/riflessa - somma delle componenti diretta e diffusa. A partire dai valori spettrali i coefficienti di trasmissione visibile e solare sono calcolati con le equazioni sotto riportate seguendo il metodo della ISO 9050:2003, analogamente si procede per il coefficiente di riflessione. La stessa metodologia viene applicata per calcolare i coefficienti di riflessione.

$$\rho_e = \rho_e^{b-hem} = \frac{\int_{380}^{1700} \rho(\lambda) S(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{1700} S(\lambda) d\lambda} \quad \text{Equazione 2}$$

$$\rho_v = \rho_v^{b-hem} = \frac{\int_{380}^{780} \rho(\lambda) D(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} D(\lambda) V(\lambda) d\lambda} \quad \text{Equazione 3}$$

Con:

$S(\lambda)$  Distribuzione spettrale normalizzata della radiazione solare globale;

$D(\lambda)$  Distribuzione spettrale relativa dell'illuminante D65;

$V(\lambda)$  Curva di visibilità spettrale dell'occhio umano.

Le misure spettrofotometriche sono state condotte con il fine di misurare i pannelli :

- PC vuoti
- PC pieni allo stato solido e liquido

Per ogni pannello e configurazione della misura si sono effettuate delle misure:

- angolari
- a diversa giacitura degli alveoli

### 3.1.3 I risultati della caratterizzazione spettrofotometrica

#### I PANNELLI IN POLICARBONATO VUOTI

Il primo risultato delle misure riguarda la verifica delle proprietà ottiche solari sui due lati del pannello. Non si sono rilevate differenze nel range di lunghezza d'onda in analisi sui due lati del pannello (uno dei due lati presenta un coating anti UV). Nella tabella Figura 10 si sono riportati i valori dei coefficienti di trasmissione e riflessione solare e luminosa per i pannelli testati vuoti. Si può notare che il valore più alto si è misurato per il pannello cristallo con un coefficiente di trasmissione luminosa di 0,8 e solare di 0,79. Per il pannello opale si è misurato un valore del coefficiente di trasmissione solare di 0,53. Il pannello verde presenta un valore di trasmissione nel visibile maggiore di quello blu (rispettivamente 0,69 e 0,61) e un comportamento



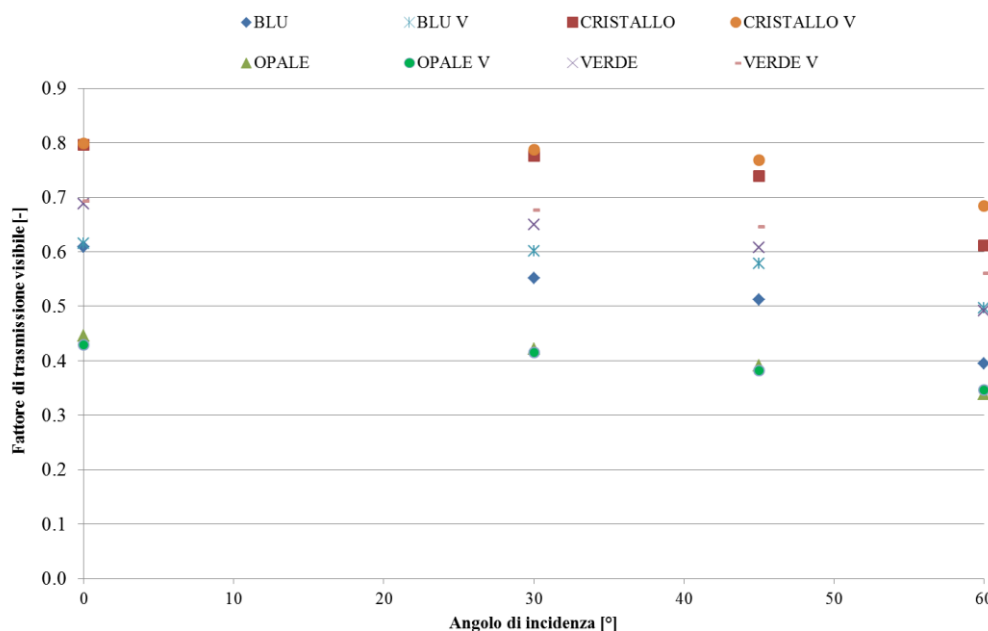
contrario per quel che riguarda il solare: una trasmissione del pannello verde di 0,70 contro i 0,73 del blu. Questo risultato mostra la capacità selettiva del pannello di colore verde e per questo motivo è stata selezionata questa colorazione per i test della configurazione 2.

La caratterizzazione angolare dei pannelli vuoti come noto dimostra un andamento del fattore di trasmissione solare e luminoso che diminuisce all'aumentare dell'angolo di incidenza.

Al fine di valutare l'influenza della posizione degli alveoli (orizzontale vs verticale) sono state condotte misure tra 0° e 60° nelle due posizioni. Per angoli di incidenza di 0° la posizione degli alveoli è ininfluente, mentre per angoli di incidenza maggiori si rilevano delle leggere differenze per la colorazione blu, verde e cristallo. In generale il valore di trasmissione degli alveoli posizionati in verticale è maggiore di quello con alveoli in orizzontali. Per l'opale, date le caratteristiche diffondenti, non si sono misurate differenze tra l'orientamento orizzontale e verticale. I dati di sintesi che sono stati rilevati, per incidenza normale, sono riportati in tabella 10.

|                 | $\tau_e$ | $\rho_e$ | $\tau_v$ | $\rho_v$ |
|-----------------|----------|----------|----------|----------|
|                 | [-]      | [-]      | [-]      | [-]      |
| Blu Vuoto       | 0.73     | 0.16     | 0.61     | 0.14     |
| Verde Vuoto     | 0.70     | 0.14     | 0.69     | 0.16     |
| Cristallo Vuoto | 0.79     | 0.17     | 0.80     | 0.18     |
| Opale Vuoto     | 0.53     | 0.40     | 0.45     | 0.45     |

**Tabella 10 Fattore di trasmissione luminosa e solare dei pannelli vuoti ad incidenza normale.**



**Figura 28 Fattore di trasmissione visibile pannelli vuoti per diversi angoli di incidenza al variare dell'orientamento degli alveoli, orizzontali e verticali (V).**

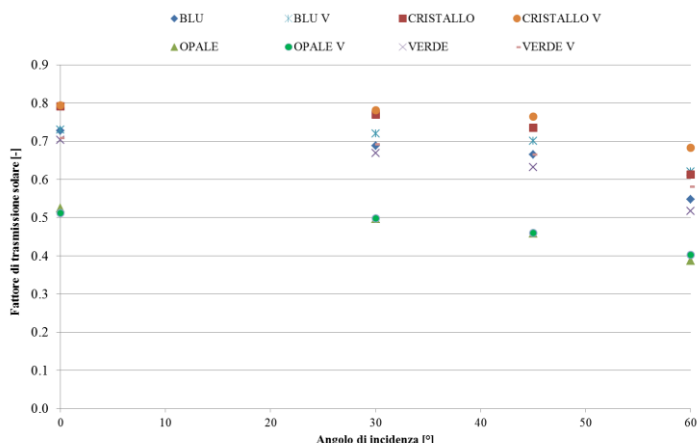


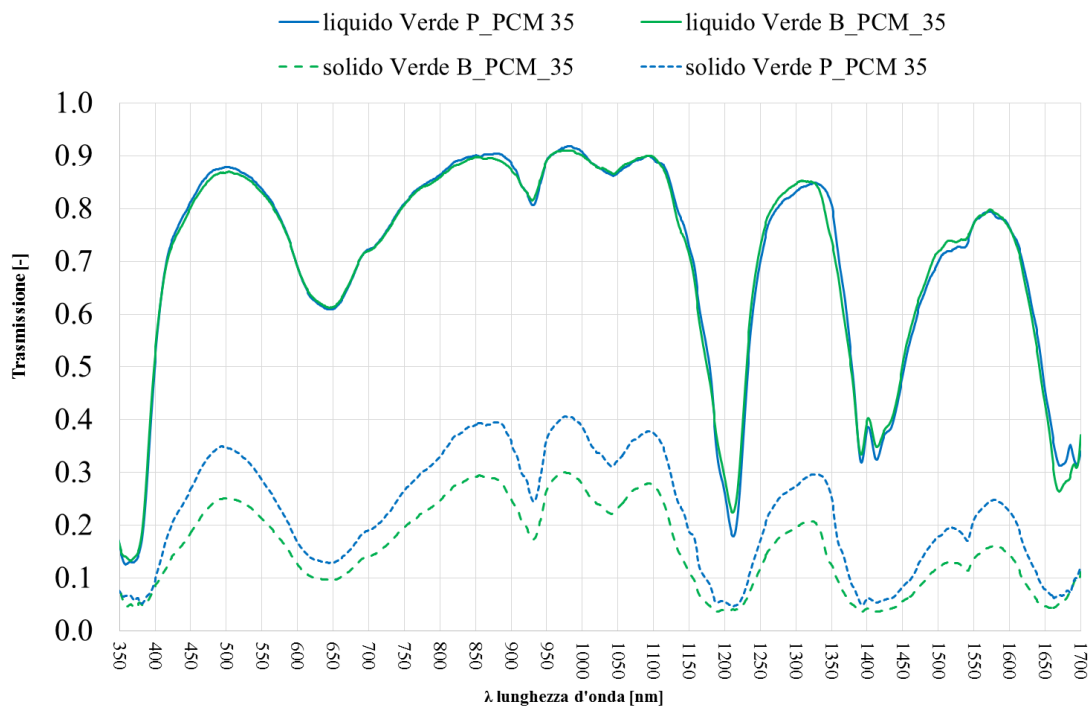
Figura 29 Fattore di trasmissione solare pannelli vuoti per diversi angoli di incidenza al variare dell’orientamento degli alveoli, orizzontali e verticali (V).

**I PANNELLI IN POLICARBONATO CON PCM STATO SOLIDO e LIQUIDO**

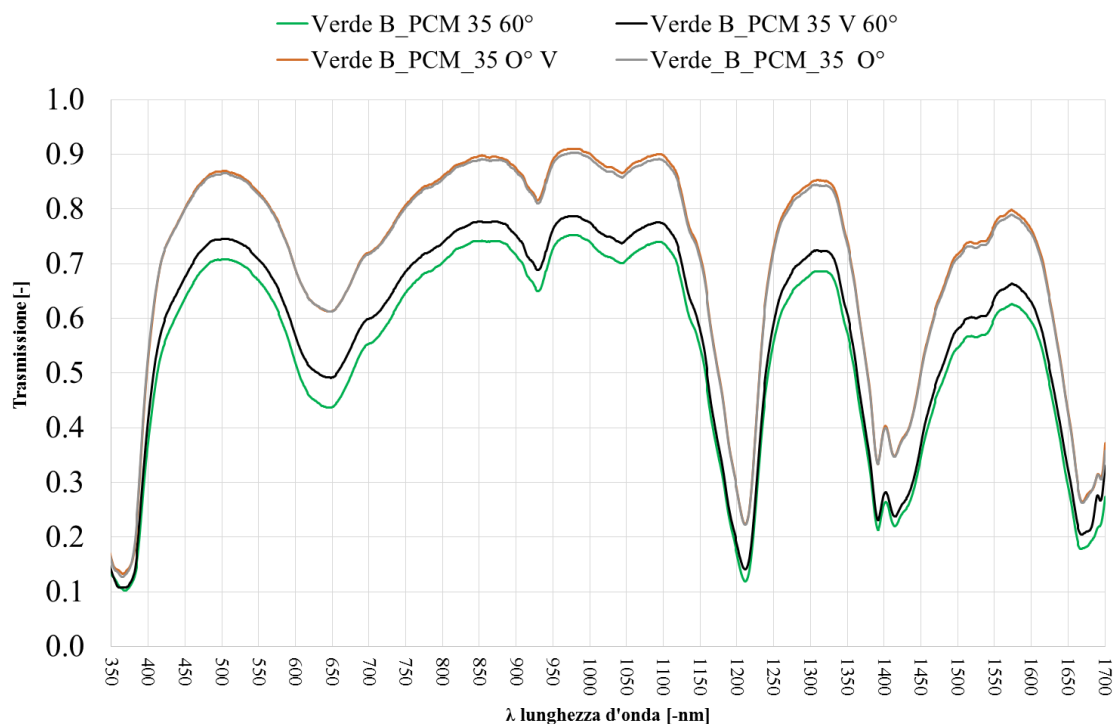
Si rileva che i valori misurati per lo stato liquido dei materiali a cambiamento di fase a base paraffina sono superiori di quelli dei pannelli vuoti per le colorazioni dei pannelli blu, verdi e cristallo. Per l’opale la trasmissione solare allo stato liquido è uguale a quella nello stato liquido. Il comportamento del pannello verde con PCM base paraffina è confrontabile con quello a base bio per lo stato liquido mentre nello stato solido i valori misurati per il bio based sono inferiori di quelli a base paraffina. In Figura 30 è possibile notare che l’andamento per le diverse lunghezze d’onda allo stato liquido del pannello con PCM base paraffina è confrontabile con quello bio based. Nello stato solido si rilevano valori più alti sull’intero spettro di misura per il PCM base paraffina. In Figura 31 è possibile notare che la differenza nell’orientamento degli alveoli si misura solo per angoli di incidenza elevati (60°) mentre per incidenza normale non si rilevano differenze per orientamento degli alveoli orizzontali e verticali. L’orientamento dei pannelli verticali in condizioni di PCM liquido garantisce una trasmissione più alta per le diverse lunghezze d’onda. Allo stato solido non si sono misurate differenze per l’orientamento degli alveoli.

|                    |         | $\tau_e[-]$ | $\rho_e[-]$ | $\tau_v[-]$ | $\rho_v[-]$ |
|--------------------|---------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Blu Vuoto          |         | 0,73        | 0,16        | 0,61        | 0,14        |
| Blu P_PCM35        | liquido | 0,78        | 0,06        | 0,70        | 0,06        |
| Blu P_PCM35        | solido  | 0,31        | 0,49        | 0,21        | 0,39        |
| Verde Vuoto        |         | 0,70        | 0,14        | 0,69        | 0,16        |
| Verde B_PCM 35     | liquido | 0,76        | 0,07        | 0,79        | 0,07        |
| Verde B_PCM 35     | solido  | 0,19        | 0,45        | 0,20        | 0,47        |
| Verde P_PCM 35     | liquido | 0,76        | 0,06        | 0,79        | 0,06        |
| Verde P_PCM 35     | solido  | 0,27        | 0,45        | 0,28        | 0,47        |
| Cristallo Vuoto    |         | 0,79        | 0,17        | 0,80        | 0,18        |
| Cristallo P_PCM 35 | liquido | 0,85        | 0,08        | 0,90        | 0,08        |
| Cristallo P_PCM 35 | solido  | 0,32        | 0,53        | 0,36        | 0,58        |
| Opale Vuoto        |         | 0,53        | 0,40        | 0,45        | 0,45        |
| Opale P_PCM 35     | liquido | 0,53        | 0,27        | 0,50        | 0,33        |
| Opale P_PCM 35     | solido  | 0,24        | 0,59        | 0,25        | 0,64        |

Tabella 11 Fattore di trasmissione luminosa e solare dei pannelli vuoti, pieni (stato liquido e solido) ad incidenza normale.



**Figura 30** Confronto tra PCM base paraffina e base BIO, in pannello verde, stato solido e liquido.



**Figura 31** Stato liquido, pannello verde con bio PCM. Misura spettrale angolo di incidenza 0° e 60° per alveoli orizzontali e verticali.

### 3.2 Misure in test cell

Le misure in test cell sono state effettuate al fine di verificare la prestazione del componente quando esposto a condizioni al contorno reali. Si sono indagate le prestazioni dei prototipi a due livelli:

- energetico;
- illuminotecnico.

La test cell TWINS è posizionata sulla copertura del Politecnico di Torino, dip. Energia, e presenta le dimensioni definite in IEA-SHC TASK 27 di 1,6 m x 3,6m x 2,5 m di altezza [6]. La facciata sud è interamente vetrata e per la sperimentazione sui prototipi di PC con PCM è stata suddivisa in tre parti. Le due specchiature più in alto sono state oggetto della sperimentazione e presentano le seguenti dimensioni : 1435 mm x 850 mm e 1435 mm x 780 mm quella in alto.

La stratigrafia del vetrocamera è:

- 6mm vetro chiaro;
- 15 mm argon al 90%;
- 6 mm vetro chiaro con trattamento basso emissivo (Top N).

Le proprietà ottico-solari e termiche dei vetrocamera sono state determinate a calcolo (secondo EN 410 e EN 673) e riportate in Tabella 12.

L’ambiente all’interno della cella è mantenuto alla temperatura di set point di 26 °C da un impianto a tutt’aria.

Le misure sono iniziate verificando che i dati monitorati per i soli vetrocamera fossero confrontabili. Si sono confrontati i dati rilevati dai piranometri e dai termoflussimetri per le due specchiature con vetrocamera dove sarebbero poi stati montati i pannelli con PC e PCM.

| $\tau_v$ | $P_v$ | $\tau_e$ | $\rho_e$ | $g$  | $U_g$                |
|----------|-------|----------|----------|------|----------------------|
| [-]      | [-]   | [-]      | [-]      | [-]  | [W/m <sup>2</sup> K] |
| 0,79     | 0,13  | 0,53     | 0,32     | 0,63 | 1,1                  |

Tabella 12 Proprietà dei vetrocamera



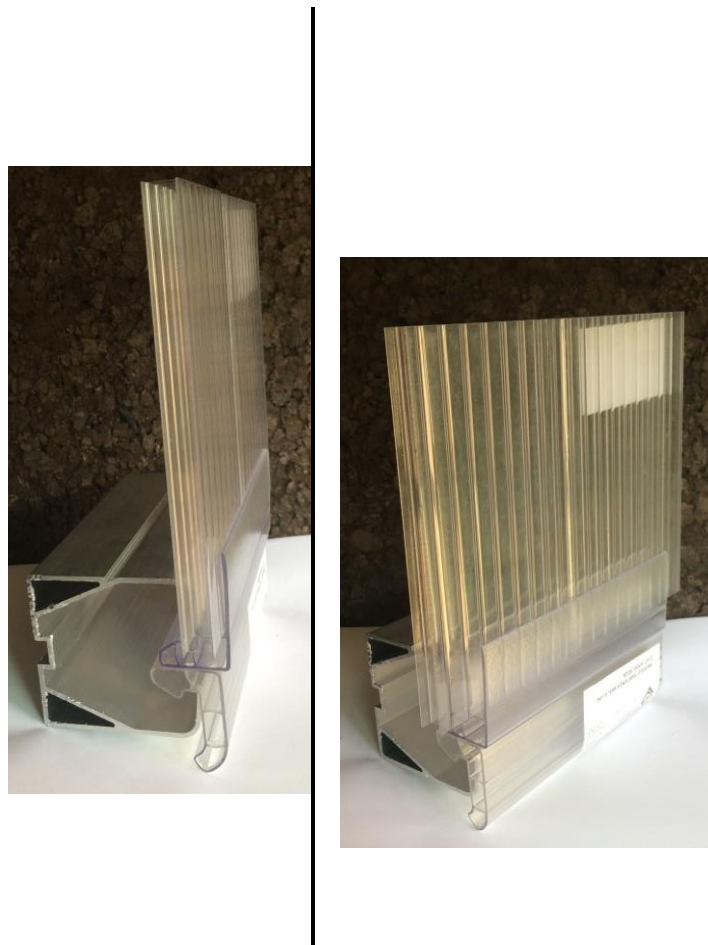
Figura 32 Test cell con i soli vetrocamera vista interna ed esterna.

Le misure in test celle sono state condotte su due diverse configurazioni:

- CONFIGURAZIONE 1 (Figura 34) : *variante colore*, analizzando l'influenza del colore del PC sulle prestazioni del componente schermante mediante il monitoraggio dei pannelli in polycarbonato alveolare di colore blu, verde e opale riempiti con lo stesso tipo di PCM (paraffina P35), utilizzando come riferimento una lastra di PC vuota di colore cristallo;
- CONFIGURAZIONE 2 (Figura 35): *variante PCM*, analizzando l'influenza del tipo di PCM sulle prestazioni del componente schermante mediante il monitoraggio dei pannelli in polycarbonato alveolare di colore verde riempiti con tre tipologie di PCM (paraffina P35, Sali idrati SH31 e Bio PCM B35), utilizzando come riferimento una lastra di PC vuota di colore verde.

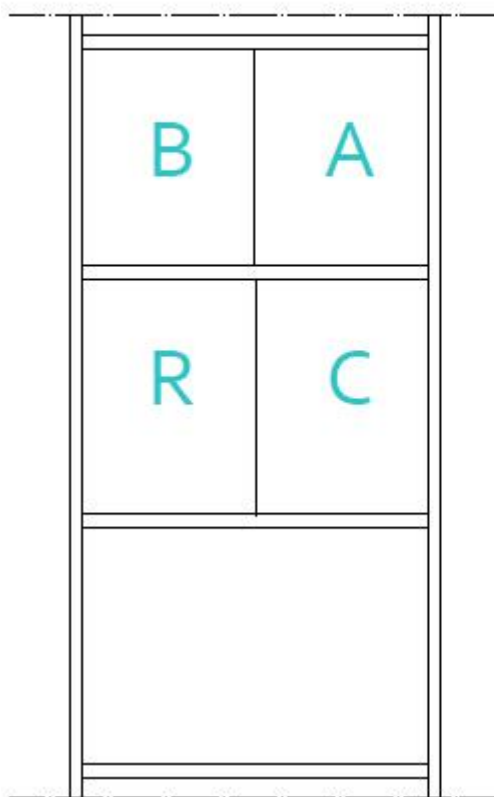
I prototipi montati sulla test cell sono pannelli in polycarbonato alveolare di dimensioni 800 x 700 mm e sono stati posizionati davanti ed esternamente alle specchiature della cella di prova. Al fine di monitorare i diversi campioni simultaneamente e con le stesse condizioni al contorno, la specchiatura intermedia e quella superiore sono state ulteriormente suddivise in due, così da riuscire a raccogliere i dati dei pannelli e confrontarli con il riferimento.

Per l'ancoraggio alla cella, è stato montato un sistema di telai in modo tale da facilitare lo scorrimento orizzontale dei pannelli e rendere il sistema adatto ad ospitare le differenti configurazioni. I pannelli in PC con PCM si trovano ad una distanza di 13,5 cm dal vetrocamera. Vengono di seguito riportate alcune immagini che illustrano il sistema utilizzato.



**Figura 33 Sistema di telai di ancoraggio alla cella di prova**

Misura Interna



## VARIANTE COLORE CONFIGURAZIONE 1

C DGU+PC opale P\_PCM 35(2\_O\_G)

R DGU+PC cristallo vuoto (5\_C\_G)

A DGU+PC verde P\_PCM 35 (4\_V\_G)

B DGU+PC blu P\_PCM 35 (3\_B\_G)

Distanza vetro-pannello = 13,5 cm

Vista interna

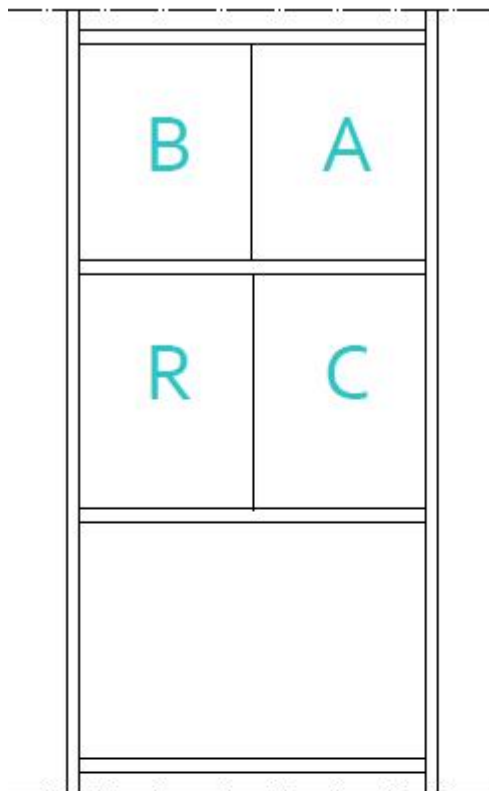


Vista esterna



Figura 34 Schema e foto della configurazione 1

### Misura Interna



## VARIANTE PCM CONFIGURAZIONE 2

C DGU+PC verde P\_PCM 35 (4\_V\_G)

R DGU+PC verde vuoto (7\_V\_G)

A DGU+PC verde SH\_PCM 31 (9\_V\_G)

B DGU+PC verde B\_PCM 35 (8\_V\_G)

Distanza vetro-pannello = 13,5 cm

### Vista interna



### Vista esterna



Figura 35 Schema e foto della configurazione 2

3.2.1 Comportamento qualitativo della transizione di fase

Di seguito si riportano dei fotogrammi che riprendono la transizione di fase dei pannelli. Attraverso una webcam in test cell si è ripreso il comportamento dei pannelli durante una giornata di cielo sereno con elevata radiazione solare. I fotogrammi riportano la fase di solidificazione e di scioglimento della configurazione 1 e 2.



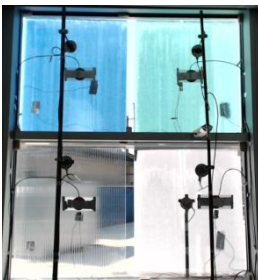













| Configurazione 1   | Configurazione 2   | Configurazione 1  | Configurazione 2   |
|--|--|---|--|
| <b>Solidificazione</b><br><b>06.08.2015</b>  | <b>Solidificazione</b><br><b>31.08.2015</b>  | <b>Scioglimento</b><br><b>07.08.2015</b>  | <b>Scioglimento</b><br><b>31.08.2015</b>   |
| h 18.00<br>   | h 19.00<br>   | h 11.00<br>   | h 10.00<br>   |
| h 20.00<br> | h 19.30<br> | h 12.00<br> | h 12.20<br> |
| h 20.30<br> | h 20.00<br> | h 12.40<br> | h 12.40<br> |
| h 0.00<br>  | h 22.00<br> | h 14.00<br> | h 13.30<br> |

Figura 36 Fotogrammi delle fasi di solidificazione e scioglimento del PCM delle due configurazioni.



Osservando la transizione di fase dei PCM a base paraffina della configurazione 1 in Figura 37, è possibile notare che lo scioglimento del materiale avviene in maniera graduale, a partire dalle due estremità quella inferiore e superiore del pannello schermante. Il PCM allo stato liquido appare perfettamente trasparente e privo di imperfezioni o bolle d'aria e, a parità di condizioni esterne e di temperatura di fusione del PCM, la colorazione blu del pannello in polycarbonato è quella che porta ad passaggio di fase più rapido della paraffina. I PC di colore verde e blu consentono di avere una perfetta visione della transizione di fase sia dall'esterno che dall'interno, mentre il pannello opale risulta quasi invariato sia nella colorazione che nel grado di trasmissione della luce, preservando la sua caratteristica di elemento diffondente.



a)

b)

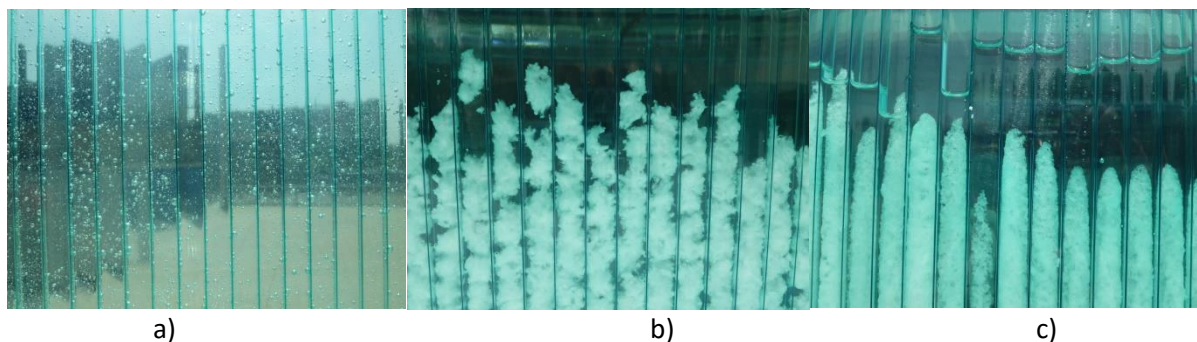
c)

**Figura 37 Configurazione 1. Analisi della transizione di fase. Polycarbonato alveolare verde contenente P\_PCM 35 a). Polycarbonato alveolare blu contenente P\_PCM 35 b). Polycarbonato alveolare opale contenente P\_PCM 35 c).**

Analizzando invece il passaggio di fase delle diverse tipologie di PCM nella configurazione 2 in Figura 38, si notano la differenze sia nell'aspetto che nella modalità di scioglimento dei tre materiali. I sali idrati (SH) sono interessati da una transizione di fase irregolare: allo stato liquido risultano torbidi e incorporano un elevato numero di bolle d'aria che conferiscono al pannello un aspetto opaco e scarsamente trasparente; durante la fase di solidificazione hanno invece un comportamento incongruente e al ripetersi dei cicli di transizione si formano cristalli di diverse dimensioni che fuoriescono dalla sommità del pannello, a causa di una notevole espansione volumica del materiale. Il Bio PCM è risultato quello con il comportamento migliore dal punto di vista percettivo, mostrando omogeneità sia allo stato solido che liquido, con un'ottima trasparenza e fusione congruente del materiale; durante il passaggio di fase questo PCM forma dei piccoli agglomerati distribuiti uniformemente in tutta la lastra di PC che lo rendono gradevole alla vista

anche dall'ambiente interno. La paraffina, come già riscontrato nella configurazione 1, si scioglie a partire dalle estremità del pannello e dimostra un perfetto grado di trasparenza una volta completato il passaggio di fase.

Dal punto di vista delle tempistiche di scioglimento, la paraffina e il Bio PCM hanno un comportamento simile, mentre i Sali idrati sono i materiali che impiegano più tempo sia per sciogliersi che per solidificarsi rispetto alle altre due tipologie testate. Il pannello che conteneva i Sali idrati ha iniziato a perdere materiale dopo poco tempo dall'applicazione.



**Figura 38 Configurazione 2. Analisi della transizione di fase. Policarbonato alveolare verde contenente SH\_PCM 31 a). Policarbonato alveolare verde contenente B\_PCM 35 b). Policarbonato alveolare verde contenente P\_PCM 35 c).**

### La metodologia di misura

Si sono posizionati 33 sensori secondo lo schema riportato in figura (Figura 40, Figura 41) per misurare in continuo le seguenti grandezze:

- temperature dell'aria interna e esterna in °C ( $T_I$  e  $T_E$ );
- temperature superficiali (interne ed esterne) dei vetrocamera ( $T_{A_I}$ ,  $T_{A_E}$ ,  $T_{B_I}$ ,  $T_{B_E}$ ,  $T_{C_I}$ ,  $T_{C_E}$ ,  $T_{R_I}$  e  $T_{R_E}$ );
- temperature superficiali (interne ed esterne) delle schermature ( $T_{SH_{A_I}}$ ,  $T_{SH_{A_E}}$ ,  $T_{SH_{B_I}}$ ,  $T_{SH_{B_E}}$ ,  $T_{SH_{C_I}}$ ,  $T_{SH_{C_E}}$ ,  $T_{SH_{R_I}}$ ,  $T_{SH_{R_E}}$ );
- flussi termici superficiali trasmessi attraverso i vetrocamera in  $W/m^2$  ( $HF_{A_I}$ ,  $HF_{B_I}$ ,  $HF_{R_I}$ ,  $HF_{C_I}$ );

- radiazione solare trasmessa attraverso le quattro specchiature ( S\_A\_I, S\_B\_I, S\_C\_I, S\_R\_I);
- radiazione solare trasmessa attraverso il solo pannello in PC con PCM (S\_C);
- radiazione solare incidente sulla facciata (S\_E).

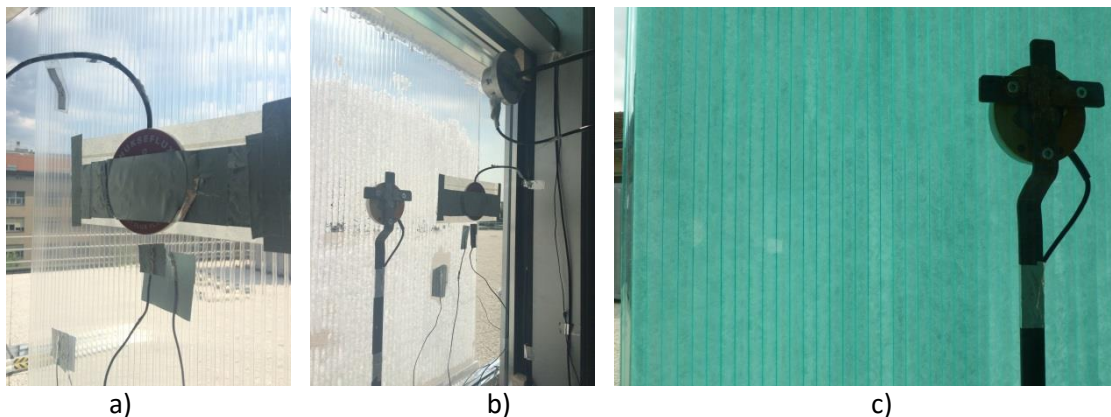
I sensori sono stati connessi a un data taker per l'acquisizione dei dati e il sistema è stato programmato per registrare le letture ogni 15 minuti. Durante la fase di elaborazione dei dati sperimentali si è passati a dei valori orari composti dalla media di 4 letture.

I sensori prima di essere posizionati sono stati testati in laboratorio. Per le misure di temperatura si sono utilizzate delle termocoppie del tipo TT. Per ogni termocoppia si è effettuata la taratura con il metodo del bagno termostatico e termoresistenza di riferimento (PT100). I flussi termici sono stati misurati in corrispondenza del centro di metà specchiatura sul lato interno del vetrocamera. Il dato registrato dai termoflussimetri (modello Hukseflux HFPO1) rappresenta il flusso termico superficiale che attraversa il componente trasparente e comprende la quota ad alta lunghezza d'onda e la quota convettiva scambiata dalla superficie del vetro con l'ambiente. I 4 termoflussimetri posizionati nella sperimentazione sono quindi in grado di definire il flusso termico che attraversa il vetrocamera a seconda delle diverse configurazioni dei pannelli in PC con PCM (A,B,C e R) posizionati all'esterno.

La radiazione solare trasmessa attraverso i vetrocamera e i pannelli in PC con PCM è stata misurata da 4 piranometri (con un range spettrale tra i 305–310 nm e i 2800 nm) posizionati sul lato interno. Questi sensori sono stati posizionati sufficientemente vicini alla superficie interna, in modo che il fattore di vista sia elevato e sia ridotta al minimo la superficie di ambiente interno vista dal sensore. Solo per il pannello C si è posizionato un piranometro tra il vetrocamera e il pannello in PC con PCM, per verificare la quota di radiazione solare trasmessa attraverso il componente schermante innovativo.

Le termocoppie e i termoflussimetri esposti a radiazione solare sono state schermate per evitare errori nella misura.

Durante alcune giornate tipiche (condizioni di cielo sereno e coperto) si sono misurati i valori di illuminamento verticali incidenti sulla facciata e trasmessi attraverso i diversi sistemi testati. Si è utilizzato un luxmetro/spettrofotometro portatile (Konica Minolta CL-500A) rilevando i valori ogni 30 minuti internamente sul piano verticale in corrispondenza dei diversi pannelli testati e all'esterno.



**Figura 39 Termoflussimetro e termocoppie a). La posizione dei solarimetri del pannello C b) e c).**

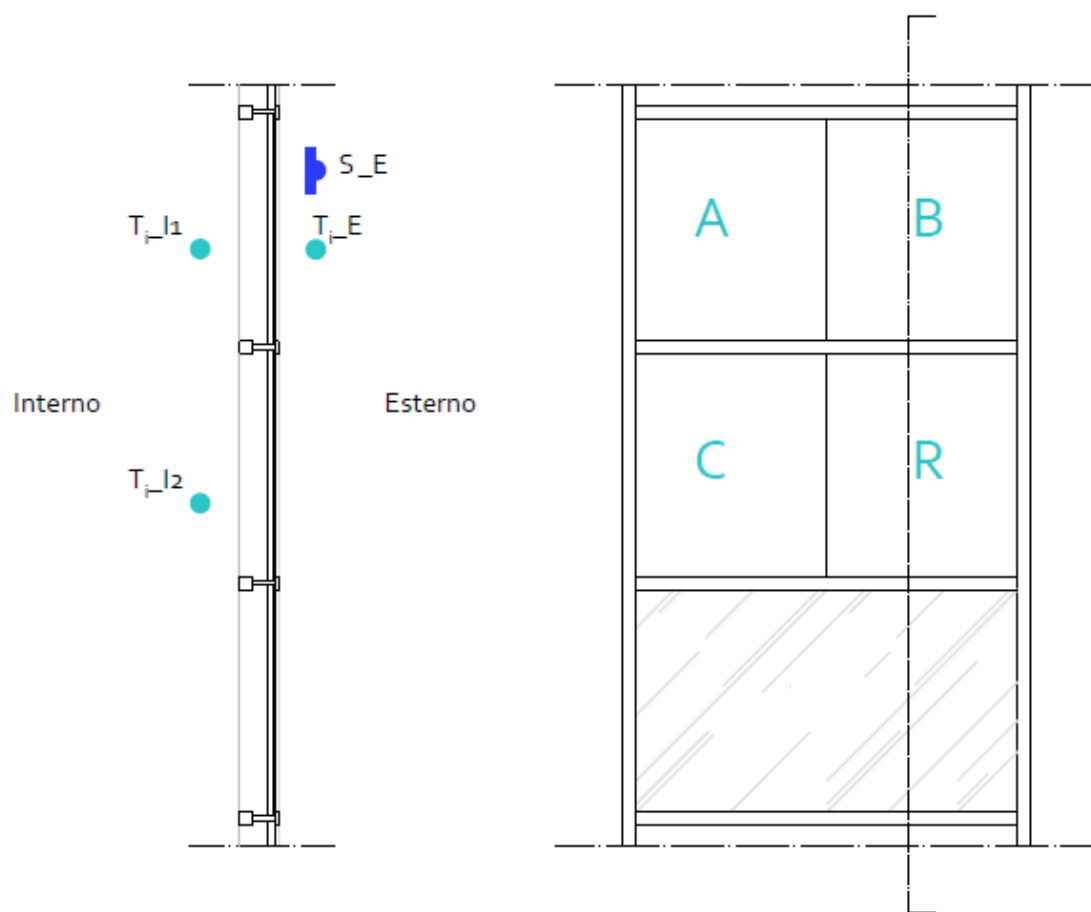
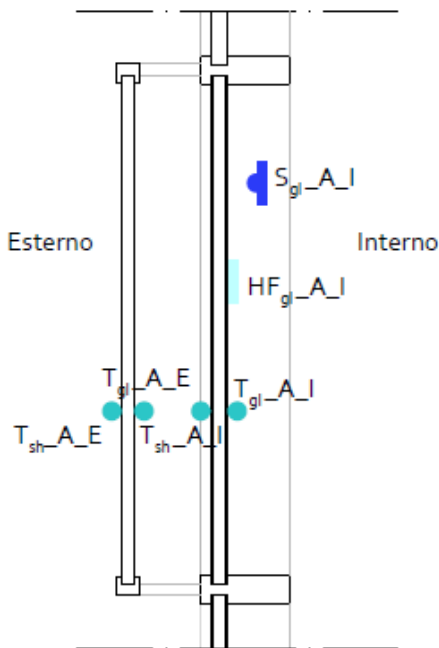
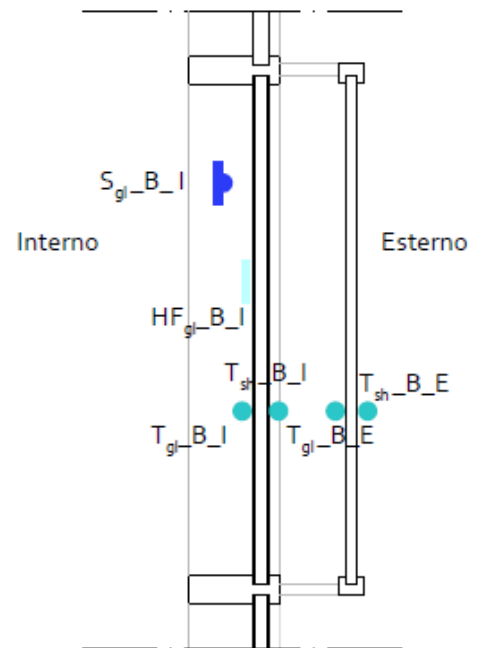


Figura 40 Posizione dei sensori sulle specchiature e sui pannelli della cella di prova

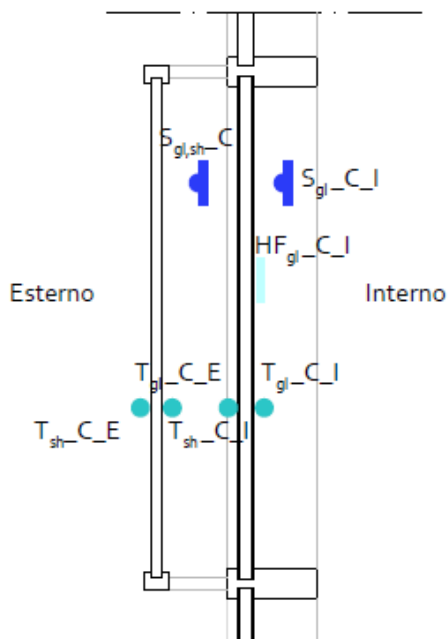
### POSIZIONAMENTO SENSORIA A



### POSIZIONAMENTO SENSORI B



### POSIZIONAMENTO SENSORI C



### POSIZIONAMENTO SENSORI R

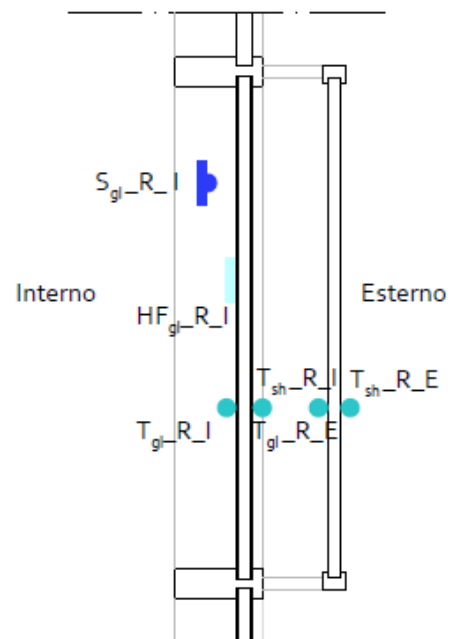


Figura 41 Dettaglio delle singole specchiature e posizione dei sensori.

## Gli indicatori prestazionali

### TRASMISSIONE SOLARE

Il coefficiente di trasmissione solare delle facciate è stato calcolato attraverso i dati sperimentali come rapporto tra i valori di irradianza trasmessi ( $S_{X_I}$ ) e quelli incidenti sulla facciata ( $S_E$ ).

$$\tau_e = \frac{S_{X_I}}{S_E} \quad [-] \quad \text{Equazione 4}$$

### FATTORE DI TRASMISSIONE LUMINOSA

Il coefficiente di trasmissione luminosa delle facciate è stato calcolato attraverso il rapporto tra i valori di illuminamento trasmesso internamente ( $E_{X_I}$ ) e di illuminamento incidente ( $E_E$ ) entrambi misurati sul piano della facciata.

$$\tau_v = \frac{E_{X_I}}{E_E} \quad [-] \quad \text{Equazione 5}$$

### FLUSSI TERMICI ED ENERGIE ENTRANTI

La prestazione energetica dei sistemi schermanti è stata valutata considerando i flussi long-wave misurati dai termoflussimetri ( $HF_{X_I}$ ), i flussi short-wave misurati dai piranometri ( $S_{X_I}$ ), sommandoli (flussi totali) e calcolandone le rispettive energie, ottenute integrando i flussi tra le 8:00 e le 20:00, assunto come periodo di utilizzo di un edificio per uffici.

$$E_{tot} = \int_{8AM}^{8PM} \dot{q}_{tot}(\tau) d\tau \quad [Wh/m^2] \quad \text{Equazione 6}$$

Con il termine “long-wave” ci si riferisce solo ai flussi (ed alle energie) trasmessi per convezione ed irraggiamento ad elevata lunghezza d’onda (e rilevati tramite i termoflussimetri posti sulla superficie interna dell’anta interna, indicati con  $HF_{X_I}$ ).

Con il termine “short-wave” ci si riferisce ai flussi (ed alle energie) dovuti alla radiazione solare entrante attraverso le specchiatura (e rilevati tramite i piranometri posti all’interno  $S_{X_I}$ ).

Con il termine “totale” ci si riferisce alla somma dei due contributi, andando a costituire quindi il carico totale trasmesso all’interno attraverso le facciate.

$$\dot{q}_{tot} = HF_{X_I} + S_{X_I} \quad [W/m^2] \quad \text{Equazione 7}$$

Si segnala che è stata utilizzata la convenzione per cui i flussi termici e le energie presentano un segno positivo quando il flusso di calore è entrante in ambiente ed un segno negativo quando il flusso di calore è uscente dall’ambiente interno.

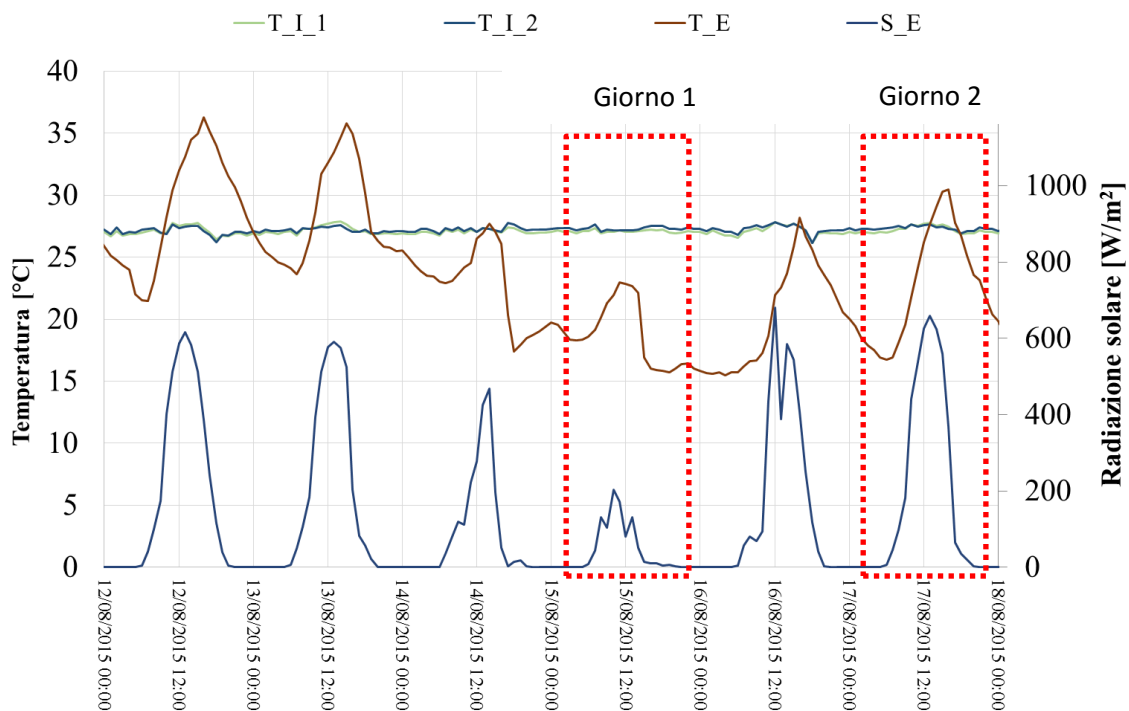
Si sono anche condotte analisi sull’andamento delle temperature superficiali interne e esterne del vetrocamera e delle schermature.

### 3.2.2 I risultati delle analisi di prestazione energetica

#### Risultati della configurazione 1 – variante colore pannello in PC

##### Condizioni al contorno

Le misure della configurazione 1 sono iniziate il 12/08/15 e terminate il 18/08/2015. Le misure illuminotecniche sono state effettuate durante due giorni rappresentativi dello stato liquido (06/08/2015) e dello stato solido (11/08/2015). In Figura 42 sono riportati gli andamenti orari, per il periodo di misura, delle grandezze delle condizioni al contorno; temperatura dell'aria interna (T\_I\_1 e T\_I\_2), temperatura dell'aria esterna (T\_E) e radiazione solare incidente sul piano verticale della facciata (S\_E). In Tabella 13 si sono riportati i valori medi giornalieri delle grandezze che definiscono le condizioni al contorno.



**Figura 42 Condizioni al contorno delle giornate di misura della configurazione 1.**

| Analisi giornaliera             | T_I<br>[°C] | T_E<br>[°C] | H<br>[Wh/m <sup>2</sup> ] |
|---------------------------------|-------------|-------------|---------------------------|
| 12/08/15                        | 27,1        | 28,6        | 7001                      |
| 13/08/15                        | 27,2        | 28,1        | 5128                      |
| 14/08/15                        | 27,1        | 22,9        | 3339                      |
| <b>15/08/15</b> <b>Giorno 1</b> | 27,2        | 18,6        | 1852                      |
| 16/08/15                        | 27,2        | 20,1        | 5540                      |
| <b>17/08/15</b> <b>Giorno 2</b> | 27,3        | 22,4        | 6610                      |

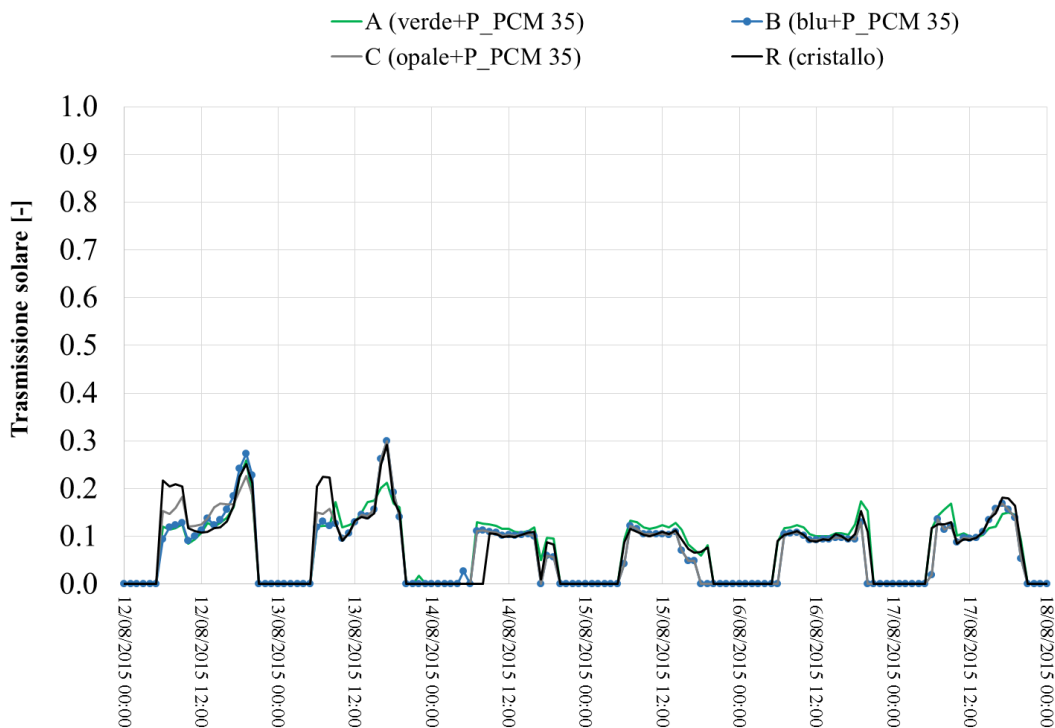
**Tabella 13 Condizioni al contorno. Valori medi giornalieri configurazione 1.**

Di seguito si riportano gli andamenti del periodo di misura per la configurazione 1.

Le analisi sono state svolte su giornate tipo selezionate tra il periodo di misura. Si è selezionata la giornata del 17/08/2015 come giornata a cielo sereno (giorno 2) e quella del 15/08/2015 (giorno 1) come giornata a cielo coperto.

**Proprietà ottico solari**

In Tabella 14 è possibile notare che il coefficiente di trasmissione solare giornaliero medio, calcolato tra le 09:00 e le 18.00 è simile per i quattro pannelli testati e non si rilevano particolari differenze rispetto al risultato del pannello vuoto. I valori medi giornalieri calcolati variano tra 0,08 e il 0,17.



**Figura 43 Andamento giornaliero, orario del coefficiente di trasmissione solare.**

|                                 | $\tau_e$<br>[-]  | $\tau_e$<br>[-] | $\tau_e$<br>[-]  | $\tau_e$<br>[-] |
|---------------------------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|
|                                 | verde + P_PCM 35 | blu + P_PCM 35  | opale + P_PCM 35 | R cristallo     |
| 12/08/15                        | 0,13             | 0,14            | 0,15             | 0,14            |
| 13/08/15                        | 0,16             | 0,17            | 0,17             | 0,16            |
| 14/08/15                        | 0,11             | 0,09            | 0,09             | 0,09            |
| <b>15/08/15</b> <b>Giorno 1</b> | 0,11             | 0,08            | 0,08             | 0,09            |
| 16/08/15                        | 0,11             | 0,10            | 0,10             | 0,10            |
| <b>17/08/15</b> <b>Giorno 2</b> | 0,12             | 0,12            | 0,12             | 0,13            |

**Tabella 14 Coefficiente di trasmissione solare giornaliero.**

In Figura 44 è riportato l’andamento del fattore di trasmissione luminosa durante la giornata in esame. E’ possibile notare che il valore del fattore di trasmissione luminosa dei pannelli con PCM è più basso del riferimento nelle prime ore del giorno quando il PCM si trova allo stato solido. A Partire dalle 12.30 il materiale è fuso e il fattori di trasmissione luminosa dei pannelli verde e blu aumentano passando da valori di circa 0,15 a valori superiori a 0,45. Durante l’intera giornata i valori più alti si misurano per il pannello verde mentre quello opale presenta un andamento costante durante tutto il giorno con valori dell’ordine di



0,2-0,35. In Tabella 15 si sono riportati i valori del fattore di trasmissione luminosa per una giornata di cielo coperto durante la quale il PCM non ha cambiato di fase. Anche in questo caso si può notare che il valore più alto si è misurato per il pannello verde pari a 0,29 mentre il pannello opale e blu sono confrontabili rispettivamente 0,21 e 0,20.

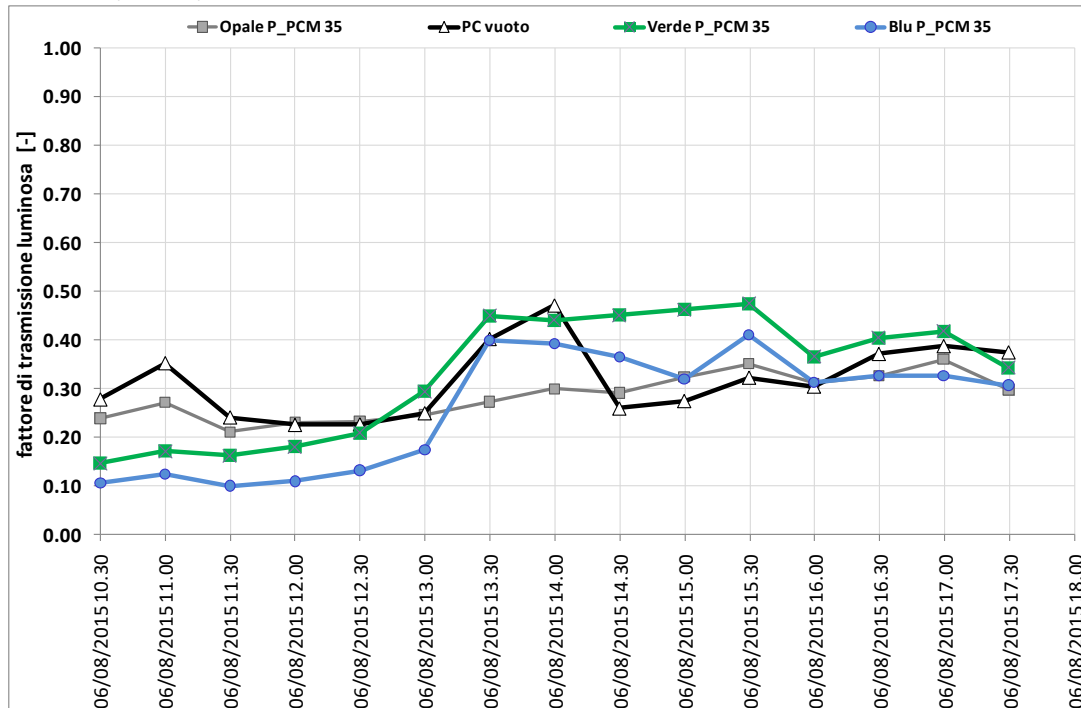


Figura 44 Andamento giornaliero del fattore di trasmissione luminosa configurazione 1.

|                         | $\tau_v$<br>[-]  | $\tau_v$<br>[-] | $\tau_v$<br>[-]  | $\tau_v$<br>[-] |
|-------------------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|
|                         | verde + P_PCM 35 | blu + P_PCM 35  | opale + P_PCM 35 | R cristallo     |
| 11.08.2015<br>(h 13.15) | 0,29             | 0,20            | 0,21             | 0,57            |

Tabella 15 Fattore di trasmissione luminosa stato solido configurazione 1.

### Flussi termici e solari

La radiazione solare trasmessa attraverso il vetrocamera con i sistemi schermanti studiati è confrontabile durante tutte le giornate di prova. Si rileva che i valori misurati attraverso il riferimento ( $S_{R_I}$  cristallo) sono simili a quelli misurati attraverso i pannelli in PC con PCM.

L'analisi dei flussi termici superficiali mostra un comportamento differente durante i sei giorni di misura. Durante le prime due giornate di analisi le temperature misurate e l'irraggiamento giornaliero sono molto elevati con valori al di fuori delle medie stagionali. I pannelli con PCM presentano un comportamento simile a quello del pannello di riferimento vuoto causato dal fatto che il PCM si liquefa molto velocemente durante le prime ore di sole esaurendo in poche ore la sua proprietà schermante. Si legge una piccola differenza nel comportamento del pannello opale che grazie alle sue diverse proprietà ottico-solari è attraversato da flussi termici inferiori. Durante gli ultimi due giorni di analisi si misurano giornate di cielo sereno con condizioni al contorno che tornano ad essere più rappresentative della stagione estiva per la latitudine di Torino. L'effetto positivo del pannello schermante con PCM è visibile dall'andamento dei flussi termici superficiali in queste due giornate. I valori rilevati per il riferimento sono più elevati durante le ore

centrali della giornata. I flussi che attraversano i vetrocamera schermati con pannelli con PCM sono inferiori e sfasati rispetto a quelli del riferimento. In condizioni di cielo coperto il contributo del sistema schermante non è rilevante.

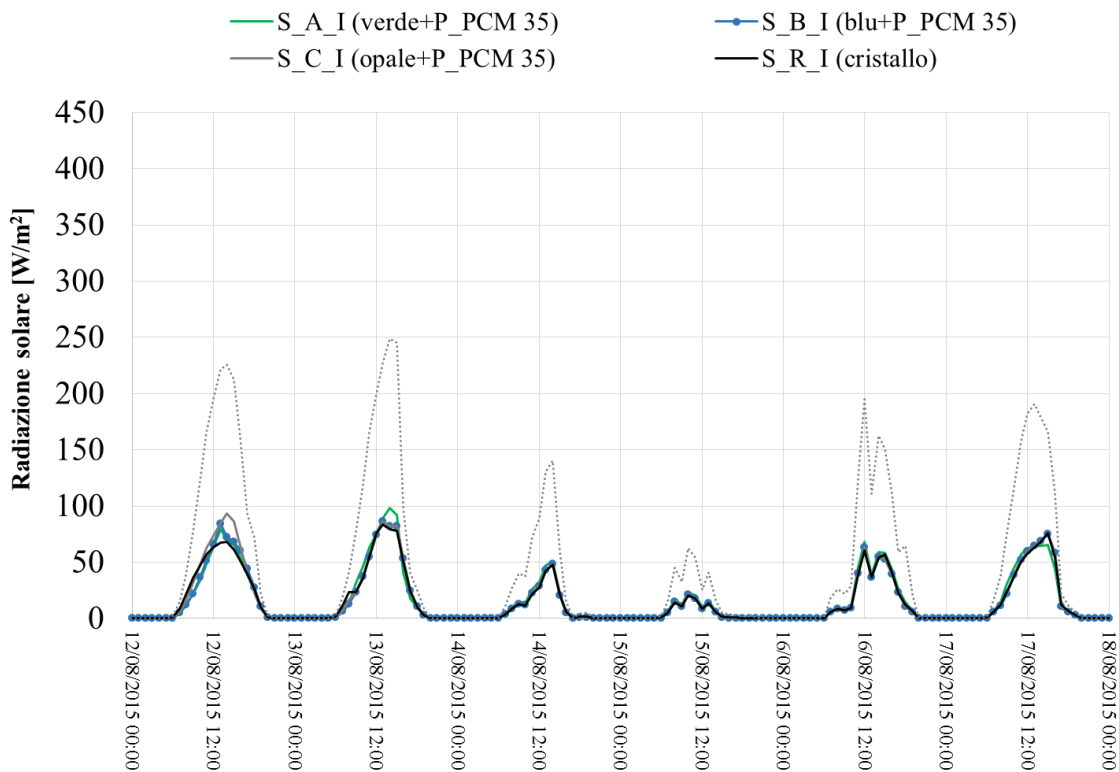


Figura 45 Configurazione 1. Radiazione solare trasmessa attraverso il vetrocamera + il sistema schermante (S\_A\_I, S\_B\_I, S\_C\_I e S\_R\_I) e attraverso il solo sistema schermante (S\_C).

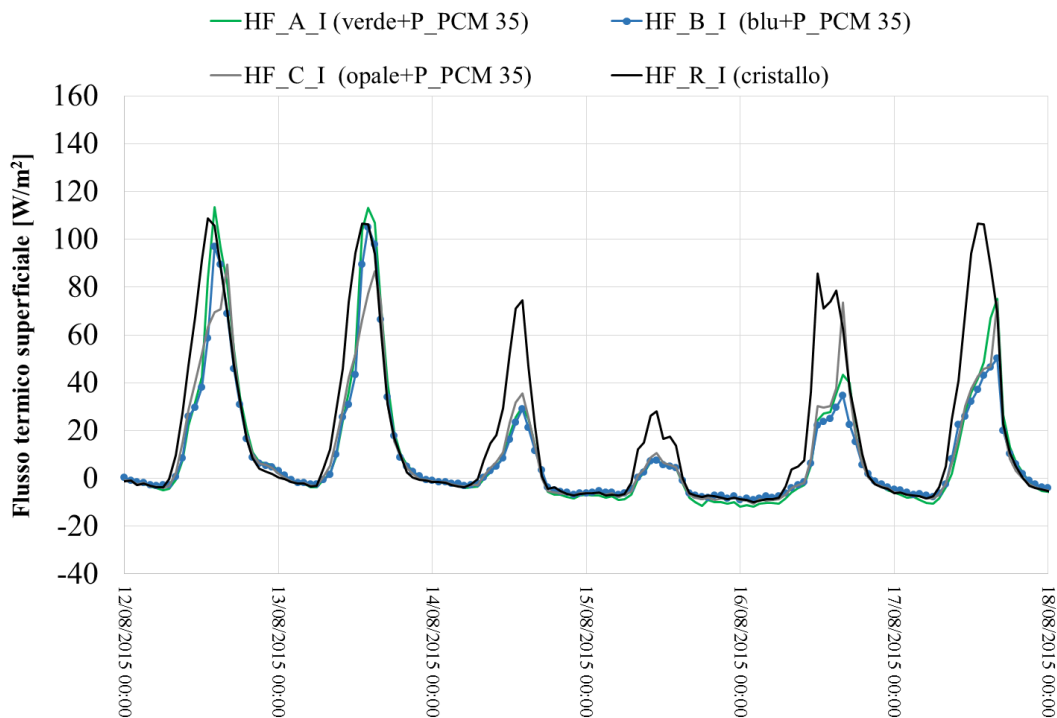
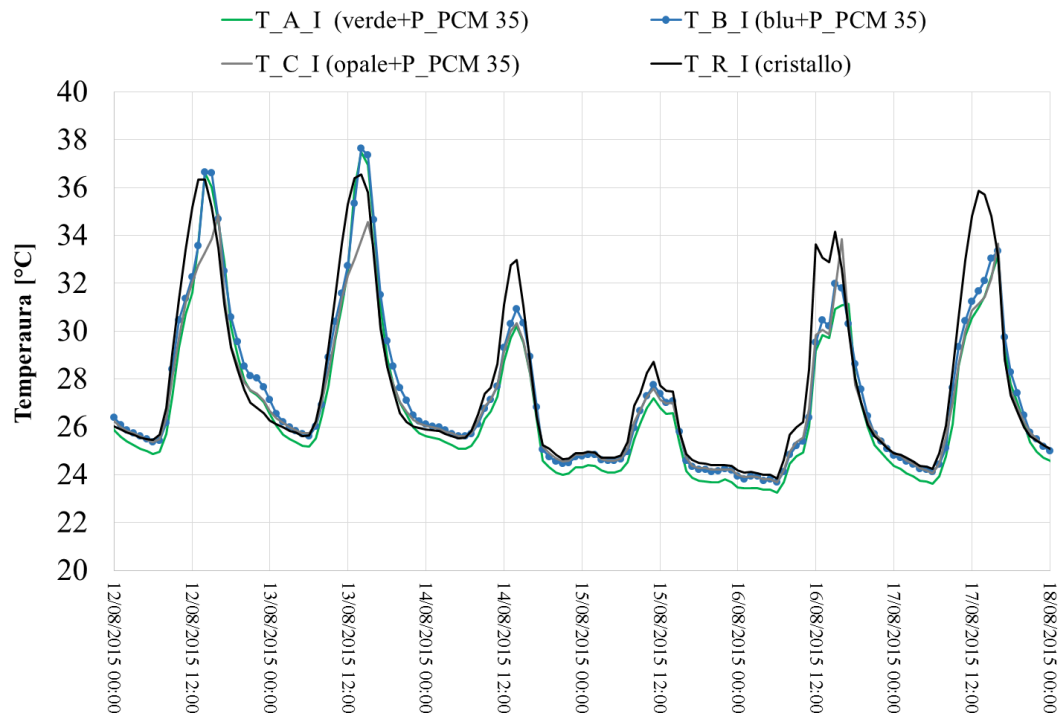


Figura 46 Configurazione 1. Flussi termici trasmessi attraverso il vetrocamera + il sistema schermante (HF\_A\_I, HF\_B\_I, HF\_C\_I e HF\_R\_I).

## Temperature superficiali vetrocamera

Le temperature superficiali rilevate sul lato interno del vetrocamera con presenza di schermature con PCM presentano valori inferiori rispetto al riferimento negli ultimi quattro giorni mentre durante i primi due giorni, come già rilevato per i flussi termici, le prestazioni dei pannelli non sono migliori di quelle del pannello in polycarbonato vuoto. Per la giornata del 13/08/2015 la temperatura superficiale interna più elevata si misura sui vetrocamera con schermature con PCM e PC verde e blu, pari a circa 38°C. Per queste condizioni al contorno sarebbe stato più performante applicare i pannelli con PCM con una temperatura di fusione più alta.



**Figura 47 Configurazione 1. Temperature superficiali interne del vetrocamera con le diverse tipologie di schermatura.**

## Energie totali giornaliere

In Figura 48 sono riportati gli andamenti giornalieri delle energie totali che attraversano i vetrocamera con i pannelli testati. Si può notare che durante i 5 giorni di analisi le energie totali più elevate si sono misurate per il campione di riferimento privo di PCM (R – polycarbonato vuoto cristallo). In Tabella 16 si sono riportati i valori di energia giornaliera totale rappresentati in Figura 48. Si è calcolata la riduzione percentuale dell'energia totale che attraversa i componenti rispetto al riferimento (R cristallo). Durante le giornate soleggiate la maggior riduzione di energia totale rispetto al riferimento si è misurata per il pannello Blu + P\_PCM 35. In particolare il 16/08/2015 la riduzione è pari al 41%. Si rileva inoltre che l'andamento degli altri due pannelli con PCM durante il periodo di misura è simile a quello blu. Durante la giornata di cielo coperto le energie che attraversano i vetrocamera con schermatura sono molto vicine allo zero e in un caso negative (pannello verde), mentre per il riferimento si misurano valori intorno a 114 Wh/m<sup>2</sup>.

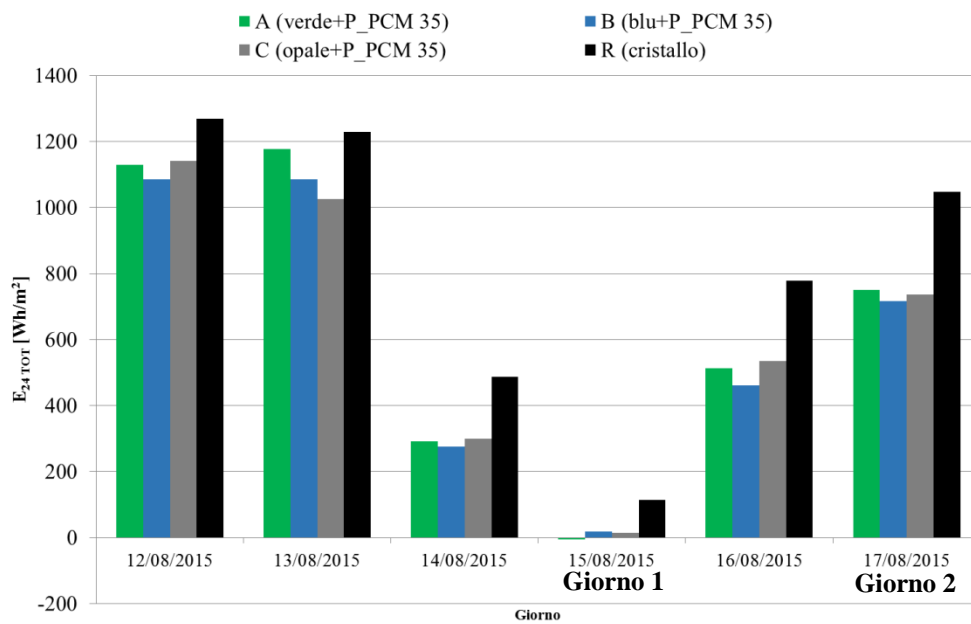


Figura 48 Configurazione 1. Energie totali giornaliere che attraversano globalmente vetrocamera + pannello schermante.

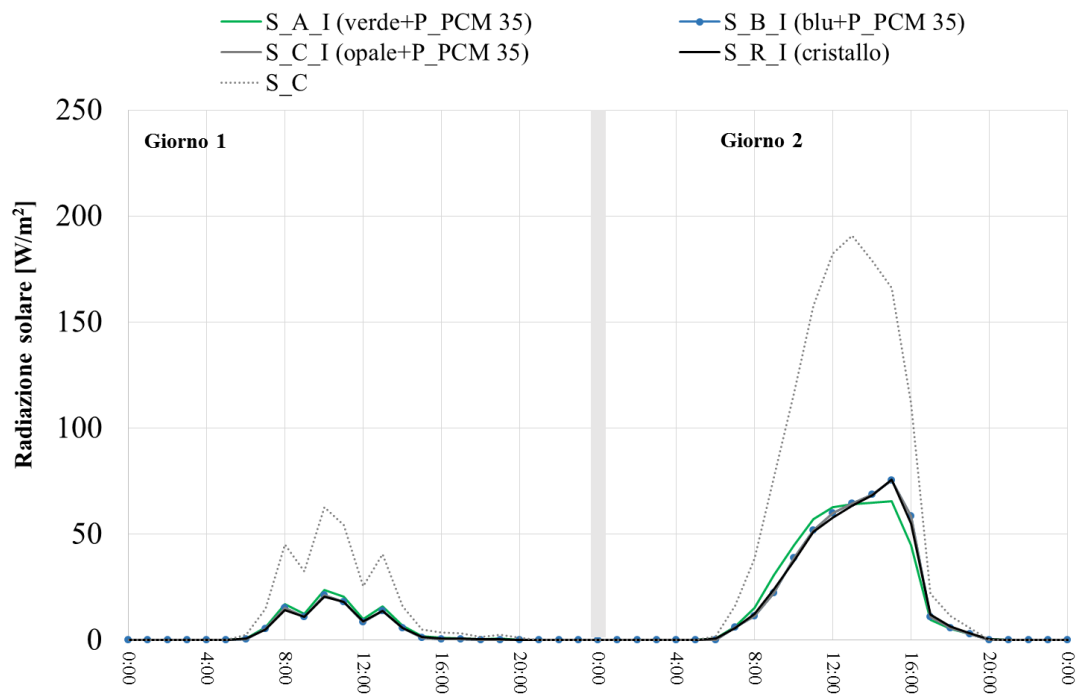
|          | $E_{24,TOT}$<br>A<br>(verde+ P_PCM 35) | $\Delta E_{24,tot}$<br>A | $E_{24,TOT}$<br>B<br>(blu+ P_PCM 35) | $\Delta E_{24,tot}$<br>B | $E_{24,TOT}$<br>C<br>(opale+ P_PCM 35) | $\Delta E_{24,tot}$<br>C | $E_{24,TOT}$<br>R<br>(cristallo) |
|----------|--|--------------------------|--------------------------------------|--------------------------|--|--------------------------|----------------------------------|
|          | [Wh/m <sup>2</sup> ]                   |                          | [Wh/m <sup>2</sup> ]                 |                          | [Wh/m <sup>2</sup> ]                   |                          | [Wh/m <sup>2</sup> ]             |
| 12/08/15 | 1128.4                                 | 11%                      | 1085.7                               | 14%                      | 1140.4                                 | 10%                      | 1268.8                           |
| 13/08/15 | 1177.2                                 | 4%                       | 1085.0                               | 12%                      | 1026.0                                 | 17%                      | 1229.0                           |
| 14/08/15 | 290.7                                  | 40%                      | 275.5                                | 43%                      | 299.8                                  | 38%                      | 487.1                            |
| 15/08/15 | -6.0                                   | 105%                     | 18.7                                 | 84%                      | 14.3                                   | 87%                      | 114.2                            |
| 16/08/15 | 513.8                                  | 34%                      | 461.2                                | 41%                      | 534.9                                  | 31%                      | 778.9                            |
| 17/08/15 | 749.6                                  | 28%                      | 716.4                                | 32%                      | 735.6                                  | 30%                      | 1047.0                           |

Tabella 16 Configurazione 1. Energie totali giornaliere.

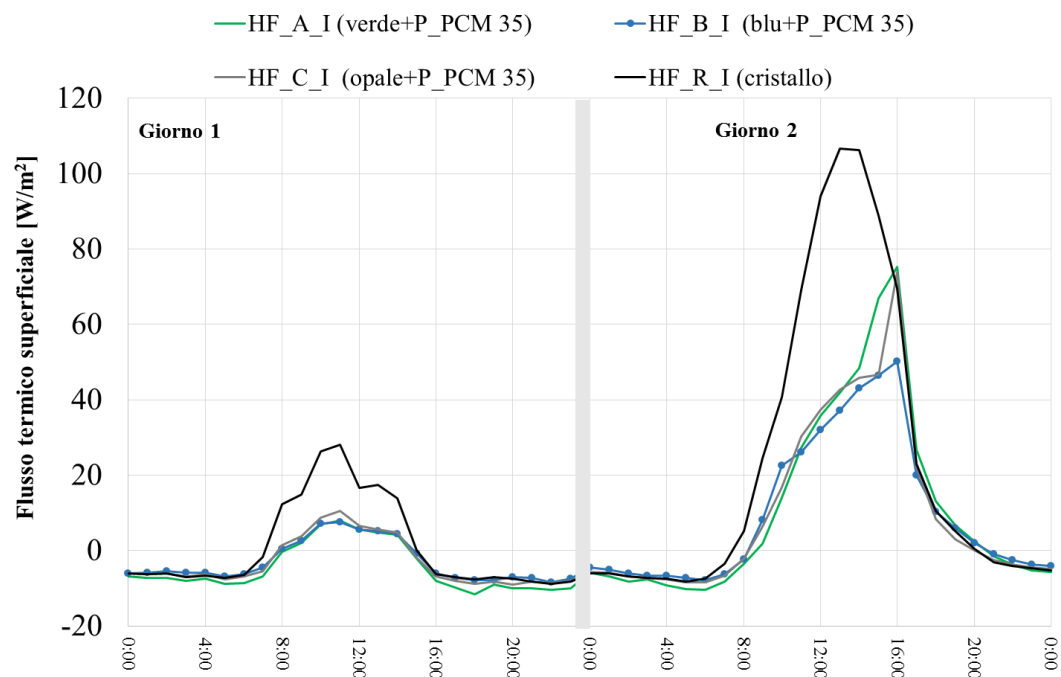
### Analisi giornaliera configurazione 1

Dall'analisi giornaliera della radiazione solare trasmessa (Figura 49) è possibile notare che i valori misurati attraverso le quattro specchiature sono confrontabili e che il pannello schermante opale con PCM è in grado di schermare circa il 70% della radiazione solare incidente durante l'ora di picco (13:00). In condizioni di cielo coperto non si rilevano differenze tra i quattro pannelli a livello di radiazione solare trasmessa.

Per quel che riguarda i flussi termici si può notare in Figura 50 che il valore misurato per i vetrocamera con PCM è inferiore rispetto al riferimento grazie all'effetto schermante del PCM allo stato solido. Mentre in condizioni di cielo sereno si può notare che il flusso termico superficiale che attraversa i vetrocamera con schermatura in PCM sono inferiori e sfasati rispetto a quelli del riferimento che arriva alle ore 13:00 al valore massimo di poco inferiore a 110 W/m<sup>2</sup>. I valori rilevati per i vetrocamera con i pannelli con PCM sono simili fino alle 11:00, a partire da quel momento si rilevano flussi inferiori per il pannello blu, mentre i valori misurati per gli altri due pannelli (opale e verde) sono confrontabili. Verso le 16:00 il valore misurato per il pannello opale e verde mostra un picco.



**Figura 49 Configurazione 1. Radiazione solare trasmessa.**



**Figura 50 Configurazione 1. Flussi termici superficiali.**

Durante la giornata di cielo sereno si rileva la maggior differenza di temperatura superficiale interna, di circa 4 °C, tra il riferimento e i vetrocamera con i pannelli con PCM. La temperatura di picco sulla superficie

interna del vetrocamera con schermature con PCM si misura alle 16:00, 3 ore dopo il picco misurato per il riferimento.

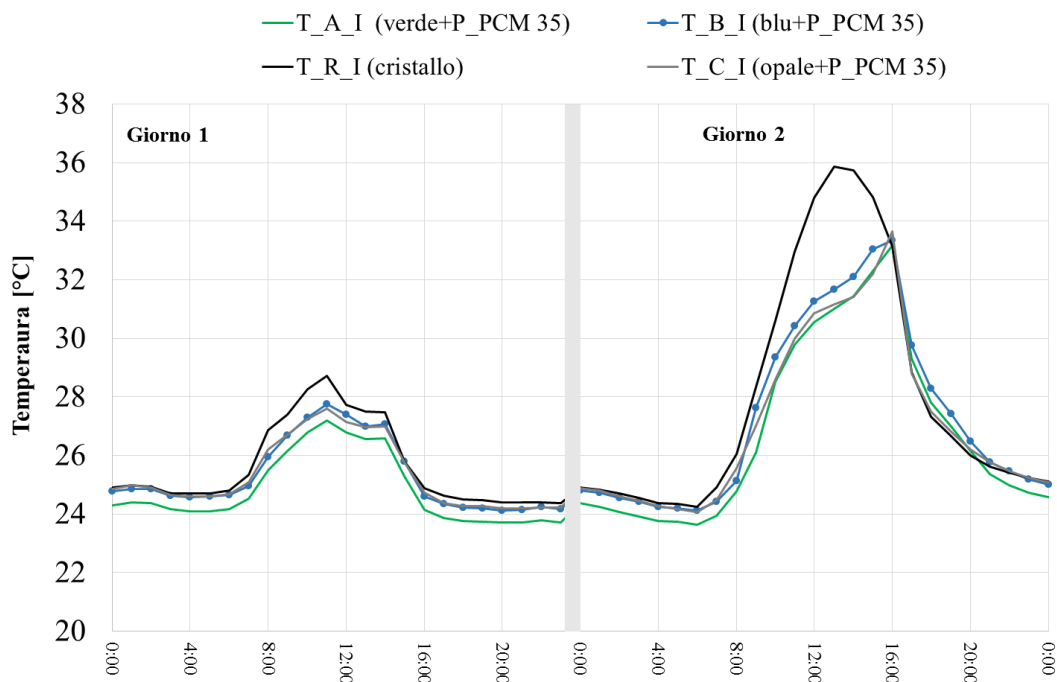


Figura 51 Configurazione 1. Temperature superficiali interne del vetrocamera con le diverse tipologie di schermatura.

Dall’analisi delle temperature superficiali interne della schermatura Figura 52 e si può notare l’effetto del PCM sul ritardo del picco di temperatura. Nelle ore serali quando il materiale a cambiamento di fase si sta solidificando si misura una coda termica dovuto all’inerzia del sistema.

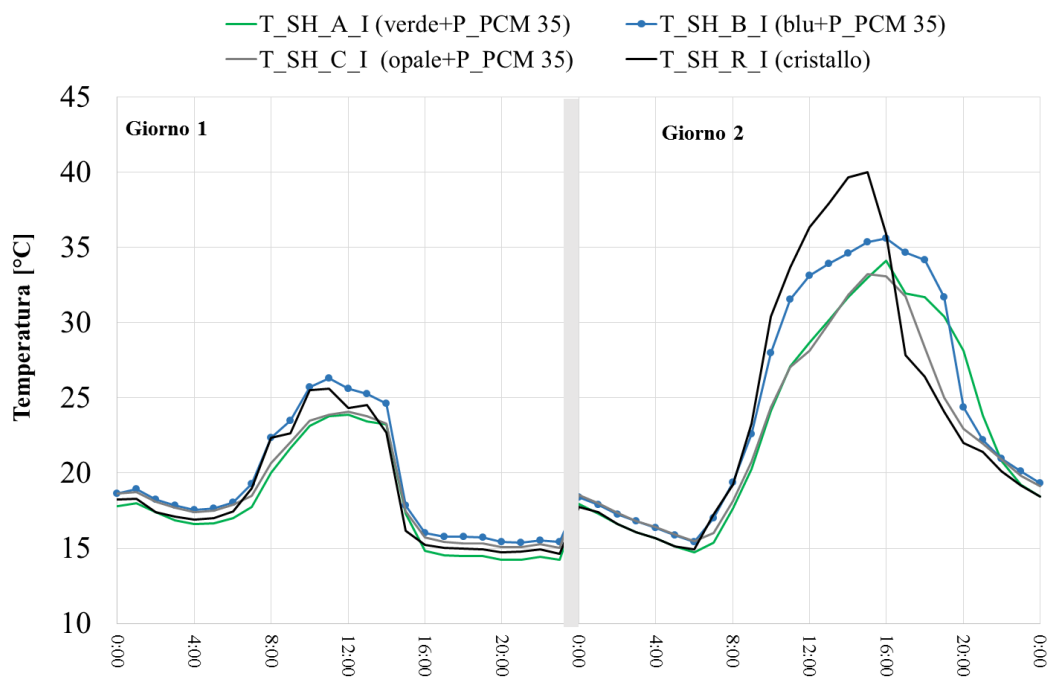


Figura 52 Configurazione 1. Temperature superficiali interne della schermatura per le diverse tipologie di schermatura.

## Risultati della configurazione 2 - variante tipologia PCM in pannello verde

### Condizioni al contorno

Le misure della configurazione 2 sono iniziate il 18/08/15 e terminate il 31/08/2015. In Figura 53 e Figura 54, sono riportati gli andamenti orari, per il periodo di misura, delle grandezze delle condizioni al contorno; temperatura dell'aria interna ( $T_{I_1}$  e  $T_{I_2}$ ), temperatura dell'aria esterna ( $T_E$ ) e radiazione solare incidente sul piano verticale della facciata ( $S_E$ ). In Tabella 17 si sono riportati i valori medi giornalieri delle grandezze che definiscono le condizioni al contorno.

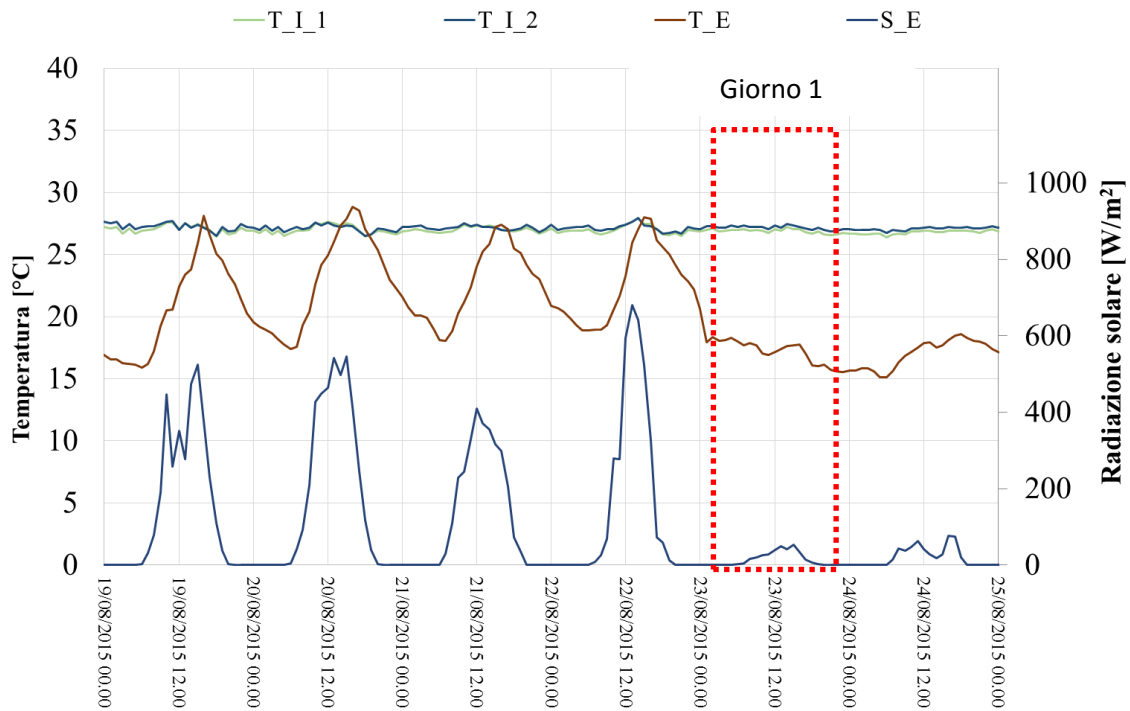


Figura 53 Condizioni al contorno delle giornate di misura della configurazione 2.

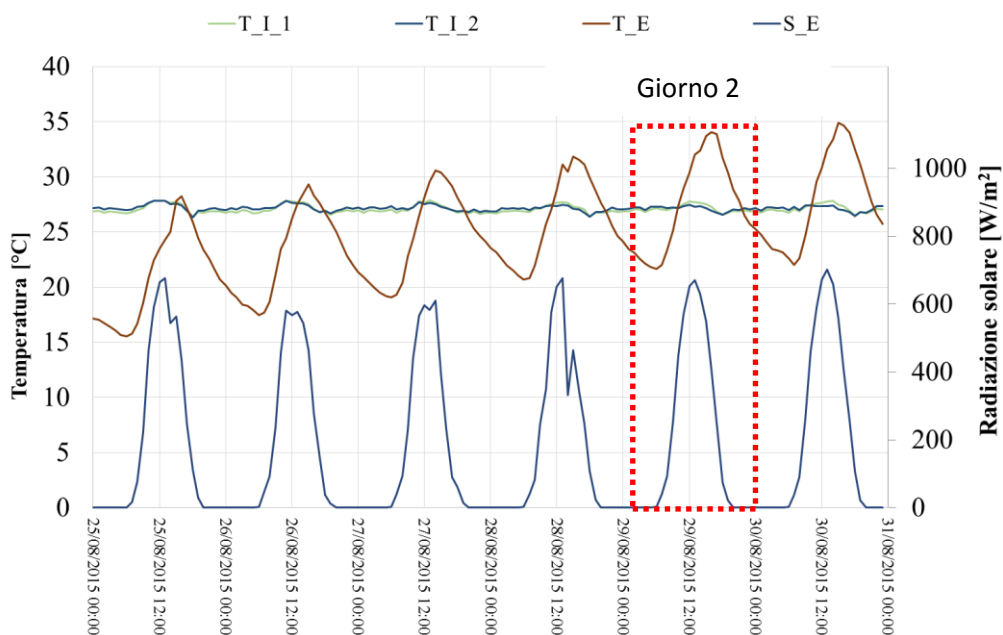


Figura 54 Condizioni al contorno delle giornate di misura della configurazione 2.

| Analisi giornaliera |                 | T_I         | T_E         | H                    |
|---------------------|-----------------|-------------|-------------|----------------------|
|                     |                 | [°C]        | [°C]        | [Wh/m <sup>2</sup> ] |
| 19/08/2015          |                 | 27.2        | 20.7        | 5704                 |
| 20/08/2015          |                 | 27.1        | 22.7        | 6478                 |
| 21/08/2015          |                 | 27.1        | 22.5        | 5189                 |
| 22/08/2015          |                 | 27.1        | 22.5        | 5234                 |
| <b>23/08/2015</b>   | <b>Giorno 1</b> | <b>27.0</b> | <b>17.4</b> | <b>660</b>           |
| 24/08/2015          |                 | 26.9        | 17.0        | 1001                 |
| 25/08/2015          |                 | 27.2        | 21.0        | 6854                 |
| 26/08/2015          |                 | 27.1        | 22.9        | 6001                 |
| 27/08/2015          |                 | 27.1        | 24.5        | 5843                 |
| 28/08/2015          |                 | 27.1        | 25.9        | 5998                 |
| <b>29/08/2015</b>   | <b>Giorno 2</b> | <b>27.1</b> | <b>27.2</b> | <b>6406</b>          |
| 30/08/2015          |                 | 27.1        | 27.7        | 6402                 |

Tabella 17 Condizioni al contorno. Valori medi giornalieri configurazione 2.

Di seguito si riportano gli andamenti del periodo di misura per la configurazione 2.

Le analisi sono state svolte su giornate tipo selezionate tra il periodo di misura. Si è selezionata la giornata del 29/08/2015 come giornata a cielo sereno (giorno 2) e quella del 23/08/2015 (giorno 1) come giornata a cielo coperto.

### Proprietà ottico solari

Il coefficiente di trasmissione solare misurato per i pannelli verdi con Bio PCM e paraffina sono confrontabili durante l'intero periodo di prova. Si sono invece misurati dei valori leggermente più elevati per i pannelli che contenevano i Sali idrati. Il motivo è duplice: il materiale presenta una temperatura di fusione leggermente più bassa (31°C contro i 35 °C) e quindi si liquefa più rapidamente. In secondo luogo il materiale non era omogeneamente distribuito negli alveoli. In alcuni alveoli la componente dei Sali non era presente e in altri alveoli invece il materiale è andato perso durante la misura a causa di perdite nel pannello.

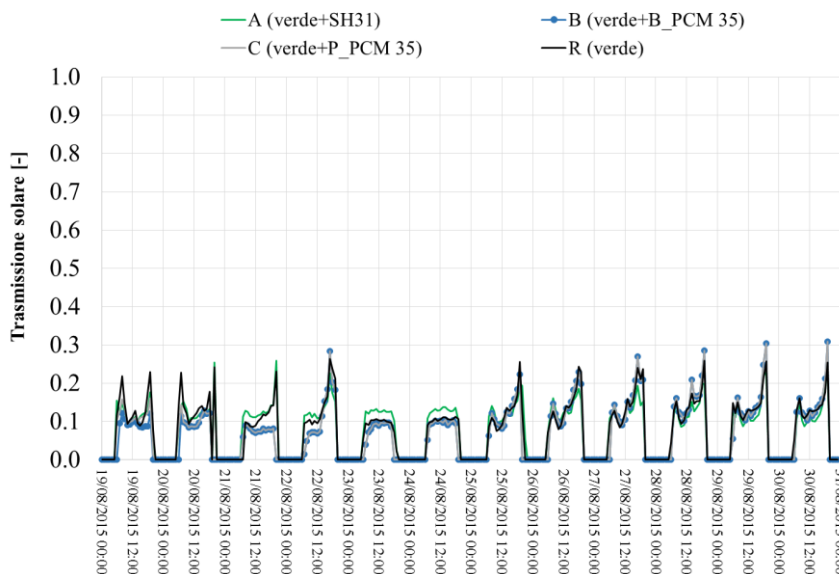


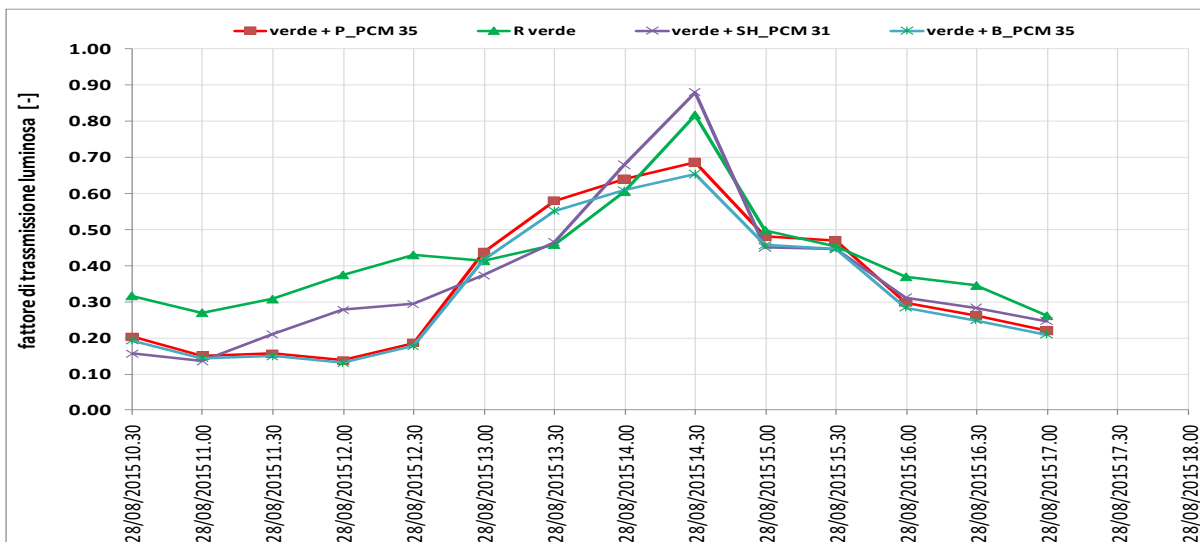
Figura 55 Andamento giornaliero, orario del coefficiente di trasmissione solare configurazione 2.



|                                   | $\tau_e$<br>[-] | $\tau_e$<br>[-]  | $\tau_e$<br>[-]  | $\tau_e$<br>[-] |
|-----------------------------------|-----------------|------------------|------------------|-----------------|
|                                   | verde + SH 31   | verde + B_PCM 35 | verde + P_PCM 35 | R verde         |
| 19/08/2015                        | 0.11            | 0.10             | 0.11             | 0.12            |
| 20/08/2015                        | 0.12            | 0.10             | 0.10             | 0.12            |
| 21/08/2015                        | 0.12            | 0.08             | 0.08             | 0.10            |
| 22/08/2015                        | 0.13            | 0.11             | 0.11             | 0.13            |
| <b>23/08/2015</b> <b>Giorno 1</b> | 0.13            | 0.09             | 0.09             | 0.10            |
| 24/08/2015                        | 0.13            | 0.10             | 0.10             | 0.11            |
| 25/08/2015                        | 0.12            | 0.11             | 0.11             | 0.11            |
| 26/08/2015                        | 0.13            | 0.14             | 0.14             | 0.13            |
| 27/08/2015                        | 0.13            | 0.15             | 0.15             | 0.14            |
| 28/08/2015                        | 0.12            | 0.15             | 0.15             | 0.14            |
| <b>29/08/2015</b> <b>Giorno 2</b> | 0.11            | 0.13             | 0.13             | 0.13            |
| 30/08/2015                        | 0.11            | 0.13             | 0.13             | 0.13            |

**Tabella 18 Coefficiente di trasmissione solare giornaliero.**

Per quel che riguarda le misure di luce in Figura 56 si riportano gli andamenti misurati in una giornata di cielo sereno (28/08/2015) in cui nelle ore centrali della giornata il PCM si presenta totalmente fuso, mentre in Tabella 19 si riportano i valori medi in una giornata di cielo coperto in cui il PCM è rimasto allo stato solido.



**Figura 56 Andamento giornaliero del coefficiente di trasmissione luminosa configurazione 2.**

|                         | $\tau_v$<br>[-]   | $\tau_v$<br>[-]  | $\tau_v$<br>[-] | $\tau_v$<br>[-] |
|-------------------------|-------------------|------------------|-----------------|-----------------|
|                         | verde + SH_PCM 31 | verde + B_PCM 35 | verde+ P_PCM 35 | R verde         |
| 24.08.2015<br>(h 10.20) | 0,18              | 0,20             | 0,25            | 0,49            |

**Tabella 19 Fattore di trasmissione luminosa stato solido configurazione 2.**

Flussi termici e solari

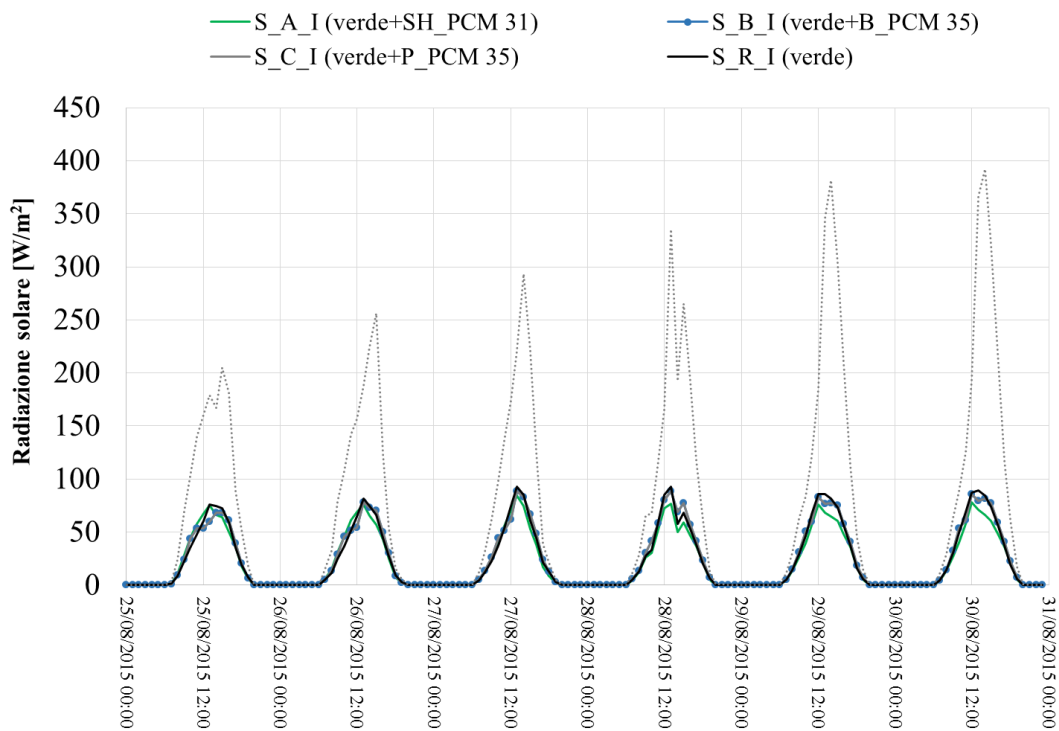
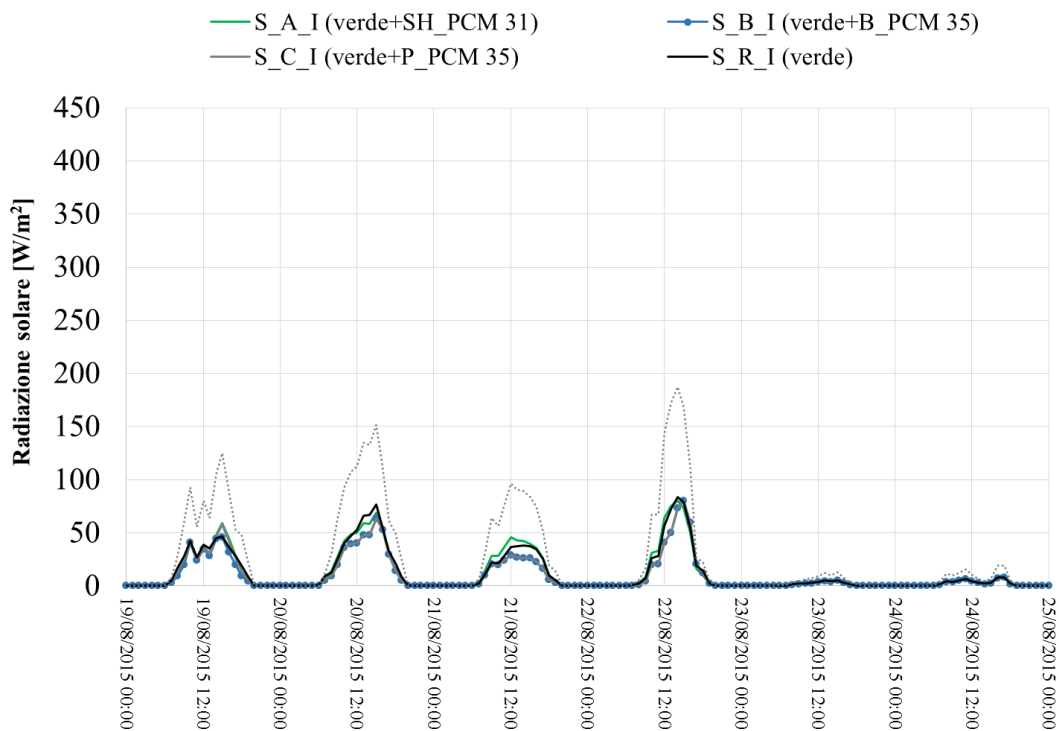
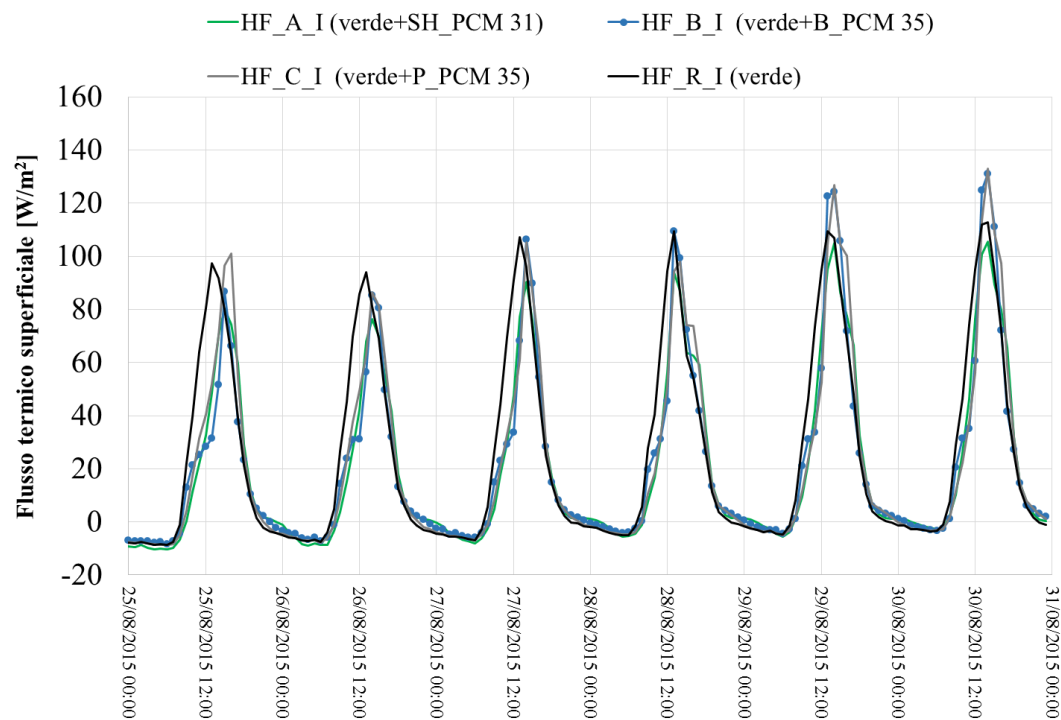
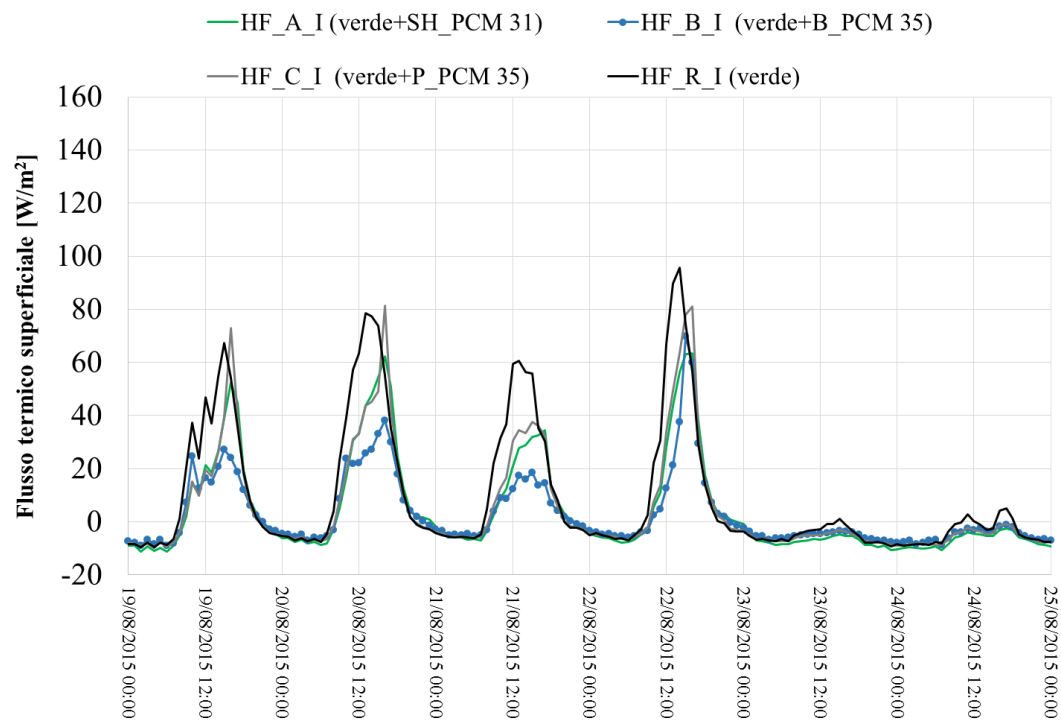


Figura 57 Configurazione 2. Radiazione solare trasmessa attraverso il vetrocamera + il sistema schermante (S\_A\_I, S\_B\_I, S\_C\_I e S\_R\_I) e attraverso il solo sistema schermante (S\_C).



**Figura 58 Configurazione 2. Flussi termici trasmessi attraverso il vetrocamera + il sistema schermante (HF\_A\_I, HF\_B\_I, HF\_C\_I e HF\_R\_I).**

Temperature superficiali vetrocamera

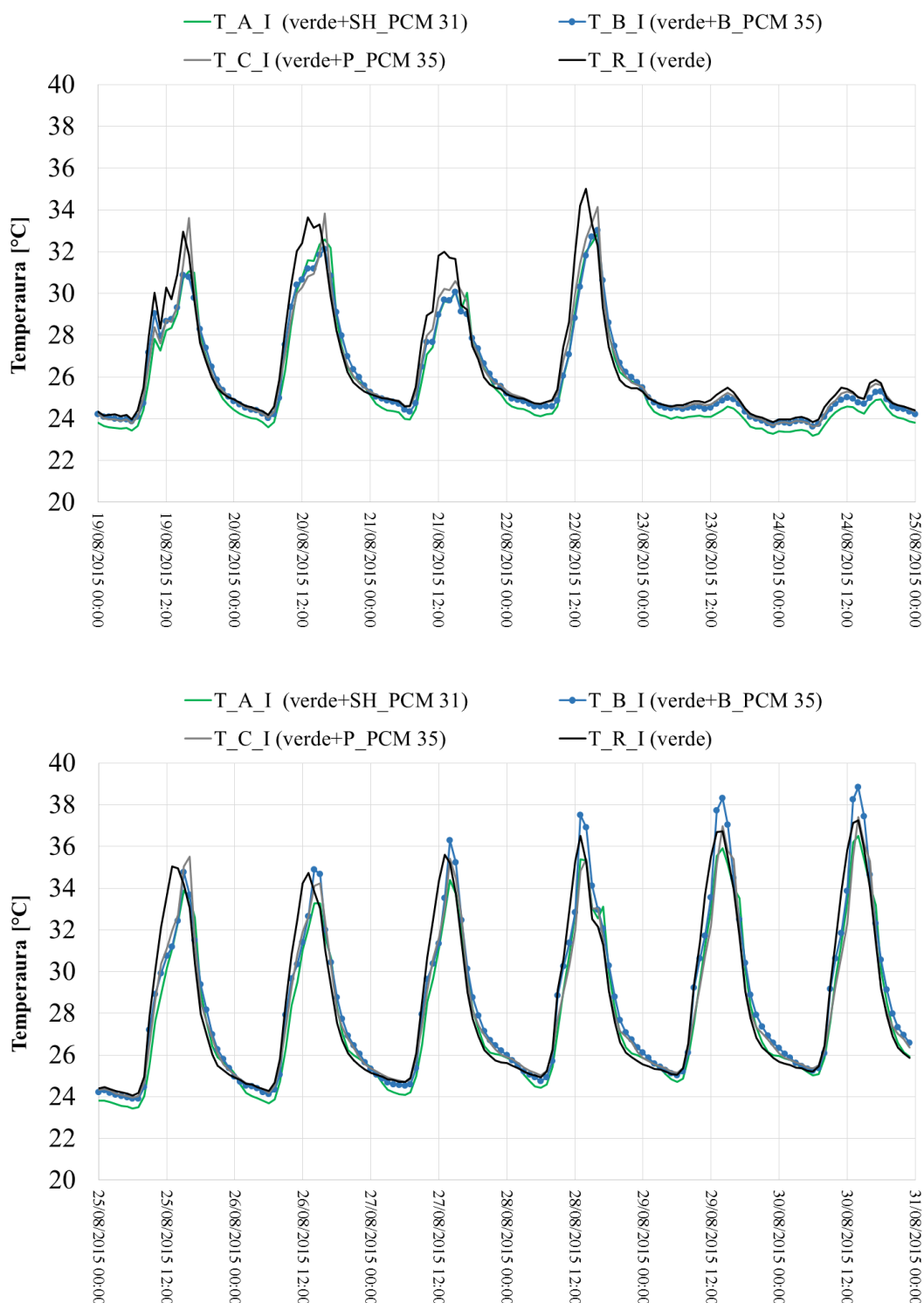
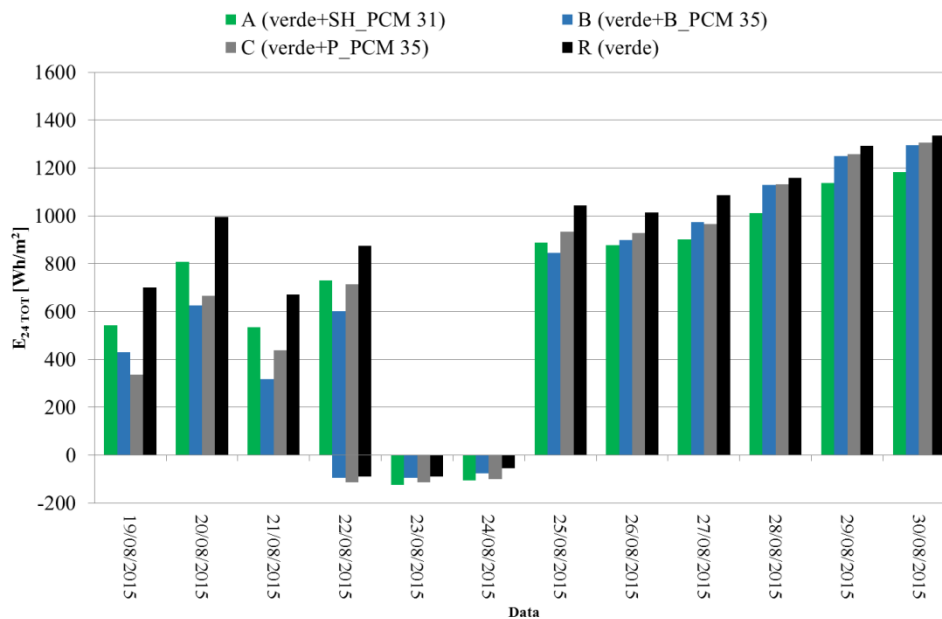


Figura 59 Configurazione 2. Temperature superficiali interne del vetrocamera con le diverse tipologie di schermatura.

## Energie totali giornaliere

In Figura 60 si riporta l'andamento delle energie totali durante le giornate di analisi della configurazione 2. E' possibile notare che il comportamento dei pannelli varia tra il primo periodo di prova, quando le temperature dell'aria esterna erano elevate, ma non superiori ai 30 °C e il secondo periodo (dal 25/08/15) quando le temperatura dell'aria esterna sono maggiormente elevate. Durante l'intero periodo le energie misurate in corrispondenza del riferimento (pannello verde vuoto) sono sempre più alte.

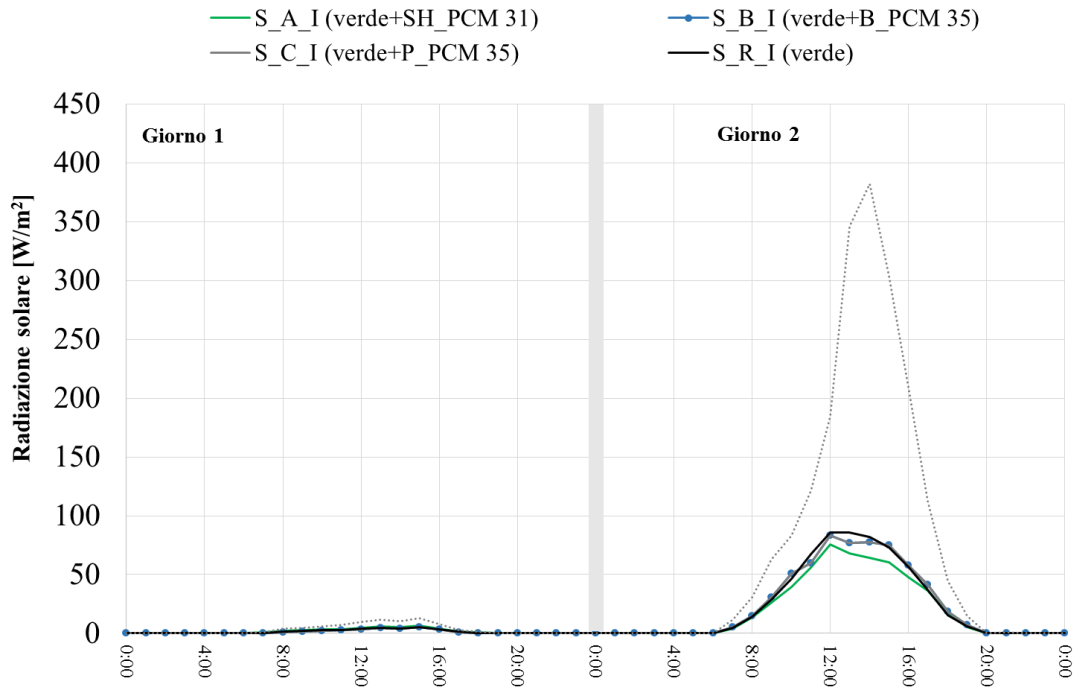


**Figura 60 Configurazione 2. Energie totali giornaliere che attraversano globalmente vetrocamera + pannello schermante.**

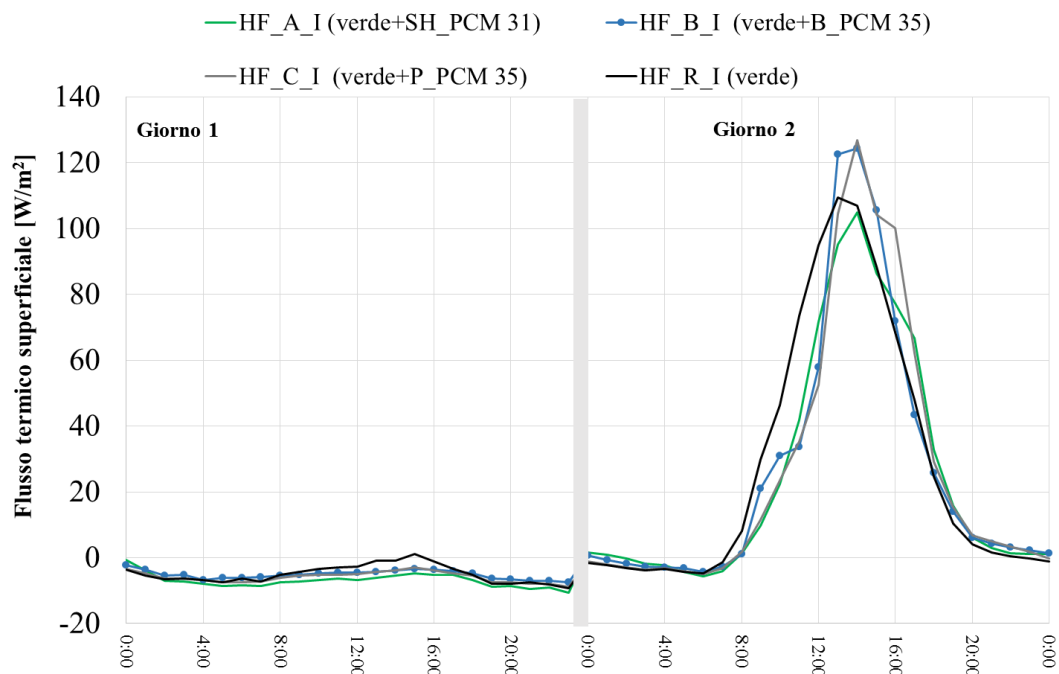
|                   | $E_{24,TOT}$<br>A<br>(verde+<br>SH_PCM 35)<br>[Wh/m <sup>2</sup> ] | $\Delta E_{24,tot}$<br>A | $E_{24,TOT}$<br>B<br>(verde+<br>B_PCM 35)<br>[Wh/m <sup>2</sup> ] | $\Delta E_{24,tot}$<br>B | $E_{24,TOT}$<br>C<br>(verde+<br>P_PCM 35)<br>[Wh/m <sup>2</sup> ] | $\Delta E_{24,tot}$<br>C | $E_{24,TOT}$<br>R<br>(verde)<br>[Wh/m <sup>2</sup> ] |
|-------------------|--|--------------------------|---|--------------------------|---|--------------------------|--|
| 19/08/2015        | 541.9  | 23%                      | 429.7   | 39%                      | 335.9   | 52%                      | 699.9  |
| 20/08/2015        | 808.8  | 19%                      | 626.0   | 37%                      | 666.8   | 33%                      | 995.8  |
| 21/08/2015        | 533.4  | 21%                      | 318.0   | 53%                      | 437.9   | 35%                      | 672.1  |
| 22/08/2015        | 731.2  | 16%                      | 602.8   | 31%                      | 713.8   | 18%                      | 874.9  |
| <b>23/08/2015</b> | <b>-124.7</b>  | <b>-39%</b>              | <b>-94.2</b>  | <b>-5%</b>               | <b>-114.5</b>   | <b>-27%</b>              | <b>-89.8</b>   |
| 24/08/2015        | -104.4   | -93%                     | -76.0   | -40%                     | -98.9   | -83%                     | -54.2  |
| 25/08/2015        | 889.2  | 15%                      | 846.3   | 19%                      | 933.0   | 11%                      | 1044.3   |
| 26/08/2015        | 878.5  | 13%                      | 898.3   | 11%                      | 929.2   | 8%                       | 1014.2   |
| 27/08/2015        | 901.5  | 17%                      | 973.5   | 10%                      | 966.0   | 11%                      | 1087.6   |
| 28/08/2015        | 1010.5   | 13%                      | 1127.8  | 3%                       | 1131.6  | 2%                       | 1157.4   |
| <b>29/08/2015</b> | <b>1136.4</b>  | <b>12%</b>               | <b>1249.3</b>   | <b>3%</b>                | <b>1258.0</b>   | <b>3%</b>                | <b>1292.6</b>  |
| 30/08/2015        | 1184.0   | 11%                      | 1295.2  | 3%                       | 1306.0  | 2%                       | 1334.0   |

**Tabella 20 Configurazione 2. Energie totali giornaliere.**

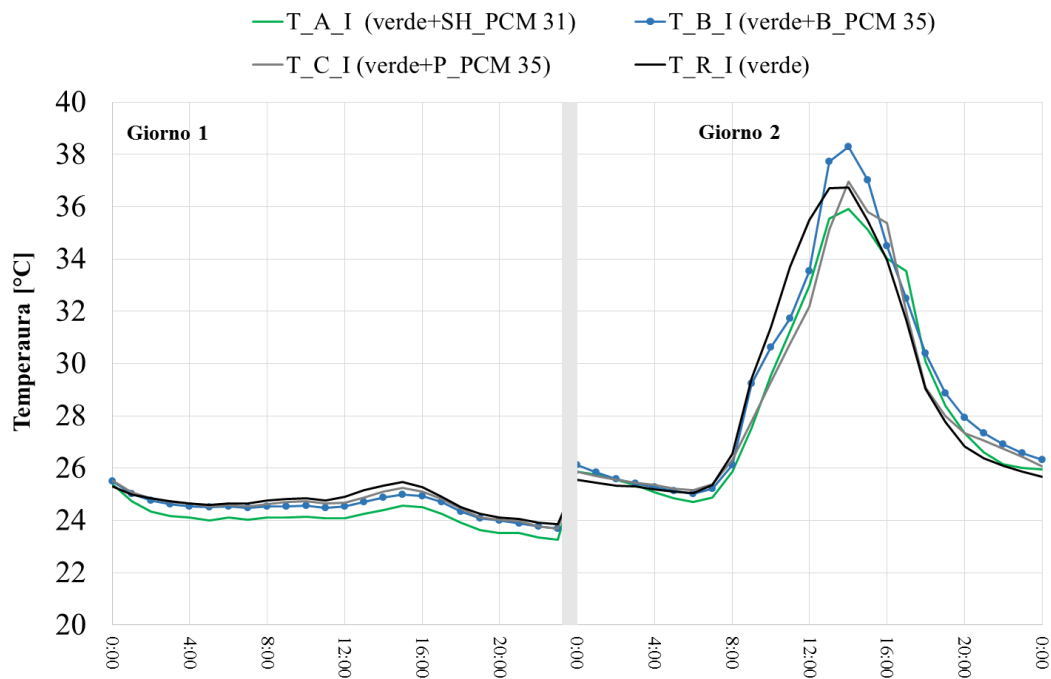
**Analisi giornaliera configurazione 2**



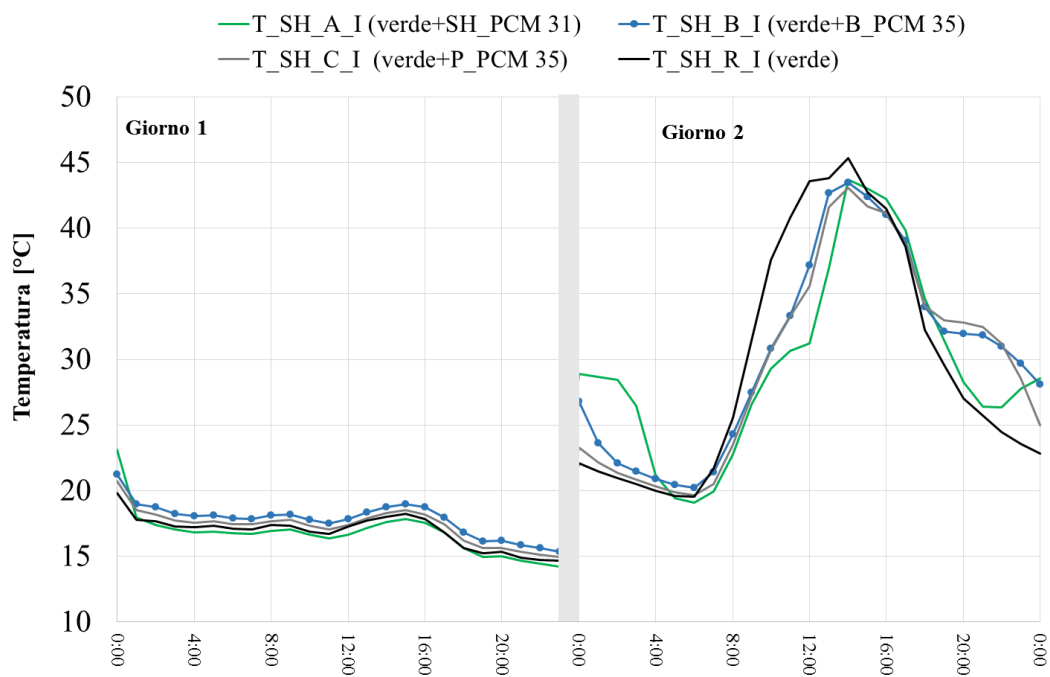
**Figura 61 Configurazione 2. Radiazione solare trasmessa.**



**Figura 62 Configurazione 2. Flussi termici superficiali.**



**Figura 63 Configurazione 2. Temperature superficiali interne del vetrocamera con le diverse tipologie di schermatura.**



**Figura 64 Configurazione 1. Temperature superficiali interne della schermatura per le diverse tipologie di schermatura.**

### 3.2.3 Distribuzioni di luminanza sui componenti trasparenti analizzati

All'interno della test cell, si sono effettuate delle mappature delle luminanze in ambiente dovute alla luce naturale entrante attraverso i sistemi testati, al fine di determinare e comparare la luminanza su alcune superfici in relazione alle diverse caratteristiche di trasmissione luminosa dei due pacchetti e della posizione di montaggio all'interno della facciata. Queste differenze potrebbero infatti determinare una diversa percezione di comfort/discomfort visivo all'interno degli ambienti da parte degli occupanti. A questo scopo, si è utilizzata una macchina fotografica opportunamente tarata da TechnoTeam le cui immagini elaborate con il software LMK Laboratory Software permette di restituire un'immagine digitale della scena inquadrata in cui ad ogni pixel corrisponde un valore di luminanza. Le misure sono state effettuate con un filtro neutro Neutral Density TTF601-1 con trasmissione nel visibile del 2%, che permette di acquisire valori di L nel range  $0 - 3 \cdot 10^6 \text{ cd/m}^2$  (valori tipici quando si inquadra la volta celeste in giornate serene). Si sono scelte delle giornate tipo e la misura è stata condotta ogni 30 minuti. Per ogni momento di misura si sono effettuate due misure all'interno della cella (A e B) e un'immagine esterna (C). Lo strumento è stato collocato in 2 posizioni all'interno dell'ambiente, in modo da verificare le diverse distribuzioni di luminanza al variare dalla distanza dalle superfici finestrate. La posizione del cavalletto per la misura A era ad una distanza di 1,9 m dalla specchiatura e ad un'altezza di 1,6 m mentre per la misura B ad una distanza di 2,7 m e altezza di 1,6 m. La direzione di osservazione dello strumento è stata assunta perpendicolare rispetto alle finestre, al fine inquadrare la superficie delle finestre e le aree ad esse circostanti.

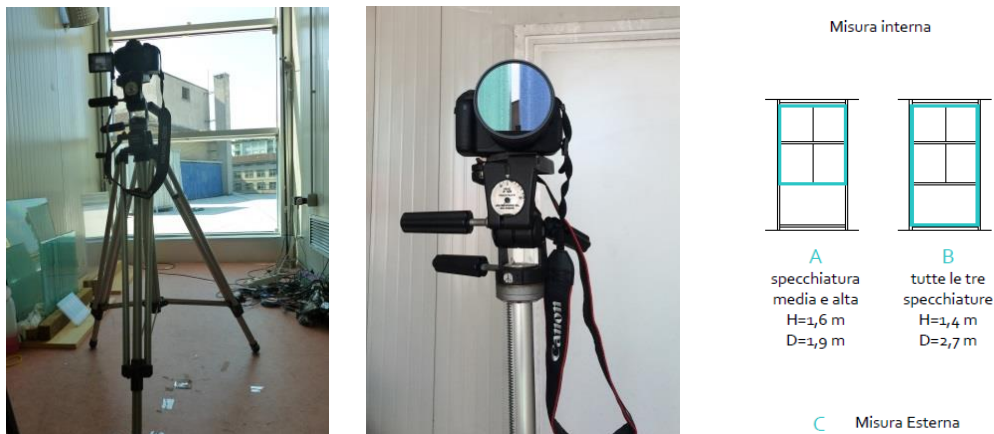


Figura 65 immagini dello strumento di misura e schema delle acquisizioni.

Durante la campagna di misure sperimentali in campo, sono state misurate le seguenti configurazioni:

- A. Misure condotte sfruttando la ripartizione della facciata della twin-cell in 3 strisce orizzontali (dalla striscia inferiore a quella superiore):

A1) 3 vetrocamera tradizionali (chiaro + bassoemissivo):

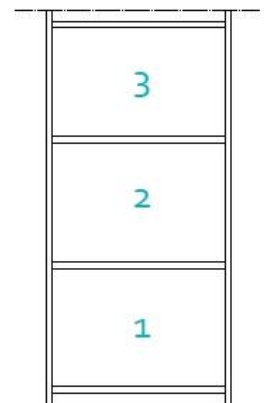
1. vetrocamera
2. vetrocamera
3. vetrocamera

A2) vetro termocromico + policarbonato di colore blu + vetrocamera:

1. vetro termocromico (non analizzato ai fini della presente ricerca)
2. policarbonato di colore blu
3. vetrocamera

A3) vetro termocromico + policarbonato di colore blu + policarbonato di colore verde:

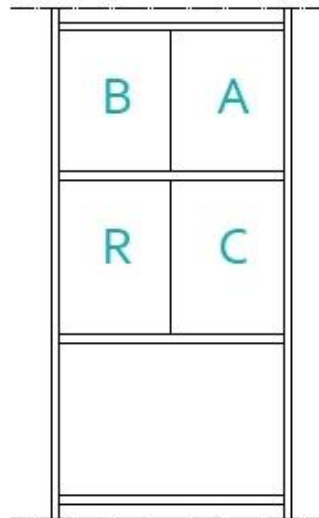
1. vetro termocromico (non analizzato ai fini della presente ricerca)
2. policarbonato di colore blu
3. policarbonato di colore verde





B. Misure condotte dividendo la striscia centrale e quella superiore in 2 sottomoduli in modo da alloggiare un totale di 5 pannelli:

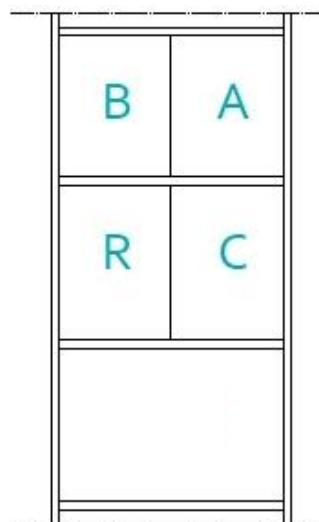
- 1) configurazione 1 – variante colore:  
per la stessa tipologia di PCM (P\_PCM 35), misura di pannelli di policarbonato di diverso colore:  
C PC opalino (*Opale P\_PCM 35*)  
R PC vuoto (*PC vuoto*)  
A PC verde (*Verde P\_PCM 35*)  
B PC blu (*Blu P\_PCM 35*)



**CONFIGURAZIONE 1  
VARIANTE COLORE**

- C DGU+PC opale RT35HC (2\_O\_G)  
R DGU+PC cristallo vuoto (5\_C\_G)  
A DGU+PC verde RT35HC (4\_V\_G)  
B DGU+PC blu RT35HC (3\_B\_G)

- B2) configurazione 1 – variante PCM:  
per lo stesso pannello di policarbonato verde, misura di diversi tipi di PCM:  
C PC verde con PCM con paraffina (*verde + P\_PCM 35*)  
R PC verde vuoto (*R verde*)  
A PC verde con sali idrati (*verde + SH\_PCM 31*)  
B PC verde con materiale biologico (*verde + B\_PCM 35*)



**CONFIGURAZIONE 2  
VARIANTE PCM**

- C DGU+PC verde RT35HC (4\_V\_G)  
R DGU+PC verde vuoto (7\_V\_G)  
A DGU+PC verde SP31 (9\_V\_G)  
B DGU+PC verde PureTemp35 (8\_V\_G)

Le misure sono state effettuate in diversi giorni di luglio – agosto 2015, prevalentemente in condizioni di cielo sereno senza nuvole o di cielo parzialmente coperto.

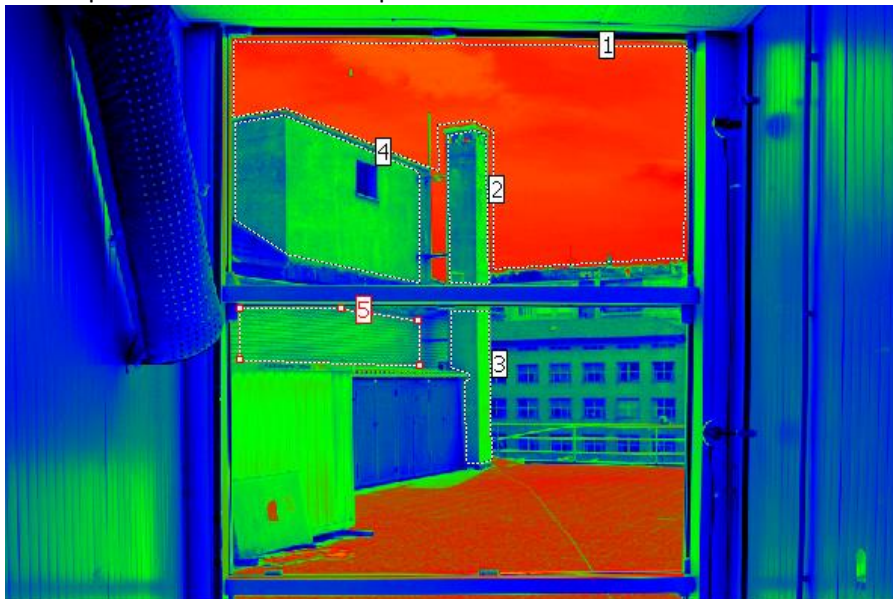
Per una stessa configurazione, sono state rilevate le mappe di luminanza in diversi momenti della giornata, in modo da analizzare l'effetto del cambiamento dinamico delle condizioni di illuminazione esterne (soprattutto in relazione alla posizione del sole nella volta celeste). Le immagini misurate per mezzo della videocamera sono state successivamente elaborate attraverso lo specifico software in dotazione con lo strumento: in particolare, è stata calcolata la luminanza media relativa a ciascun pannello vetrato.

In relazione alla scelta delle aree da misurare per le analisi, si è tenuto in considerazione come la posizione del singolo pannello all'interno della facciata svolga un ruolo importante sulla luminanza del pannello stesso, a causa dei diversi angoli solidi con cui il pannello 'vede' gli elementi di ostruzione circostanti. Il pannello inferiore, per esempio, è influenzato maggiormente dalla riflessione sulla pavimentazione della terrazza, mentre il pannello superiore da una maggiore porzione di volta celeste non ostruita. Nel caso di finestra penta-partita (configurazioni B, 1 e 2), l'influenza dei diversi angoli solidi delle scene inquadrature si applica anche ai due pannelli collocati alla stessa quota (A-B; C-R).

Di conseguenza, si sono individuate aree relative ad elementi verticali che risultassero visibili attraverso almeno due pannelli vetrati: la torretta verticale e la facciata dell'edificio di fronte alla facciata della test-cell. Le aree in esame sono descritte nei paragrafi successivi.

*In relazione alle configurazioni A (A1, A2, A3)*

La figura sottostante mostra, su un'immagine campione, le aree di cui è stata mappata la luminanza ai fini di confrontare i diversi pannelli della finestra tripartita.



In particolare, sono state misurate le seguenti distribuzioni di luminanza sulle seguenti aree

Area 1: cielo

Area 2: parte superiore della torretta, vista attraverso la vetrata superiore

Area 3: parte inferiore della torretta, vista attraverso la vetrata centrale

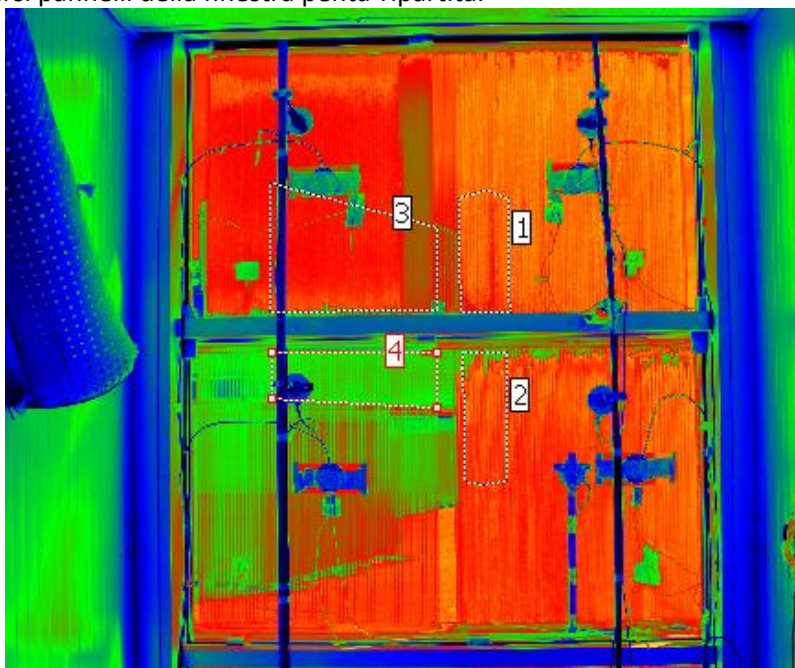
Area 4: parte superiore della facciata dell'edificio, vista attraverso la vetrata superiore

Area 5: parte inferiore della facciata dell'edificio, vista attraverso la vetrata centrale

I 2 rapporti di luminanza (media sull'area) dell'area 2 rispetto alla 3 e dell'area 4 rispetto alla 5 forniscono un confronto della diversa prestazione di trasmissione dei due componenti, montati in posizione 2 e in posizione 3 con riferimento allo schema precedente.

*In relazione alle configurazioni B (configurazioni 1, 2)*

La figura sottostante mostra, su un'immagine campione, le aree di cui è stata mappata la luminanza ai fini di confrontare i diversi pannelli della finestra penta-ripartita.



In particolare, sono state misurate le seguenti distribuzioni di luminanza sulle seguenti aree

Area 1: parte superiore della torretta, vista attraverso la vetrata superiore

Area 2: parte inferiore della torretta, vista attraverso la vetrata centrale

Area 3: parte superiore della facciata dell'edificio, vista attraverso la vetrata superiore

Area 4: parte inferiore della facciata dell'edificio, vista attraverso la vetrata centrale

Il rapporto di luminanza (media sull'area) dell'area 1 rispetto alla 2 fornisce un confronto della diversa prestazione di trasmissione dei due componenti montati in posizione A, C, mentre il rapporto di luminanza (media sull'area) dell'area 3 rispetto alla 4 fornisce un confronto della diversa prestazione di trasmissione dei due componenti montati in posizione B, R.

### Risultati

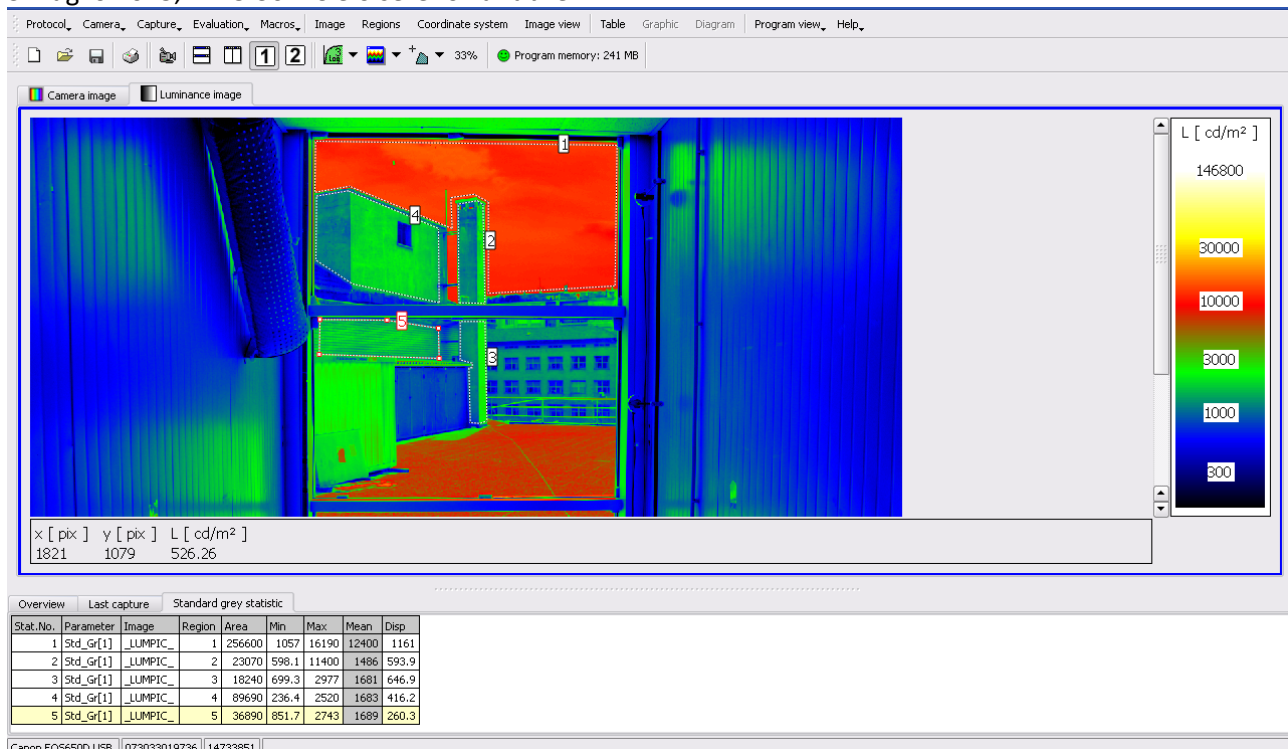
Di seguito, vengono riportate alcune delle più significative distribuzioni di luminanza misurate durante la campagna sperimentale in campo.

Le mappature di luminanza, pur evidenziando la difficoltà a individuare aree idonee per confrontare le prestazioni di trasmissione luminosa di diversi componenti, a causa della posizione degli stessi nella facciata e dei diversi angoli solidi con cui questi sottendono le aree esterne (ostruzioni), confermano i rapporti di trasmissione fra vari componenti già evidenziati dalle misure, in campo e in laboratorio, del fattore di trasmissione luminosa.

Il valore aggiunto delle mappature di luminanza è nel fornire dei dati di L superficiali di aree che ricadono nel campo visivo di eventuali utenti di un ambiente: potrebbero pertanto essere utilizzati per successive analisi di comfort visivo percepito da utenti all'interno di un ambiente.

### Configurazione A1 - 3 vetrocamera semplici di tipo tradizionale (chiaro + bassomissivo)

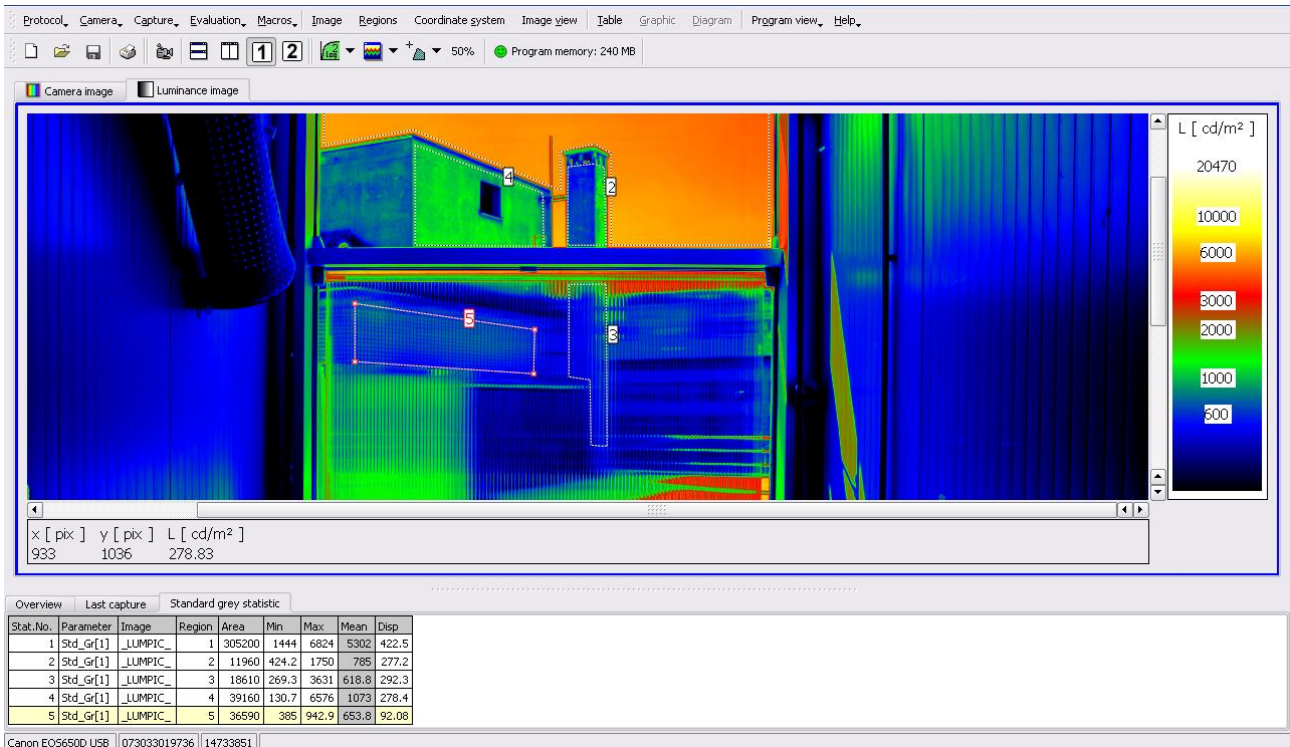
31 luglio 2015, h. 15:30 – Cielo sereno variabile



$L_{\text{cielo}} = 12400 \text{ cd/m}^2$ . Rapporti di luminanza:  $L_2/L_3 = 0.88$ ;  $L_4/L_5 = 1.00$ .

**Configurazione A2 - Vetro termotropico + policarbonato blu + vetrocamera**

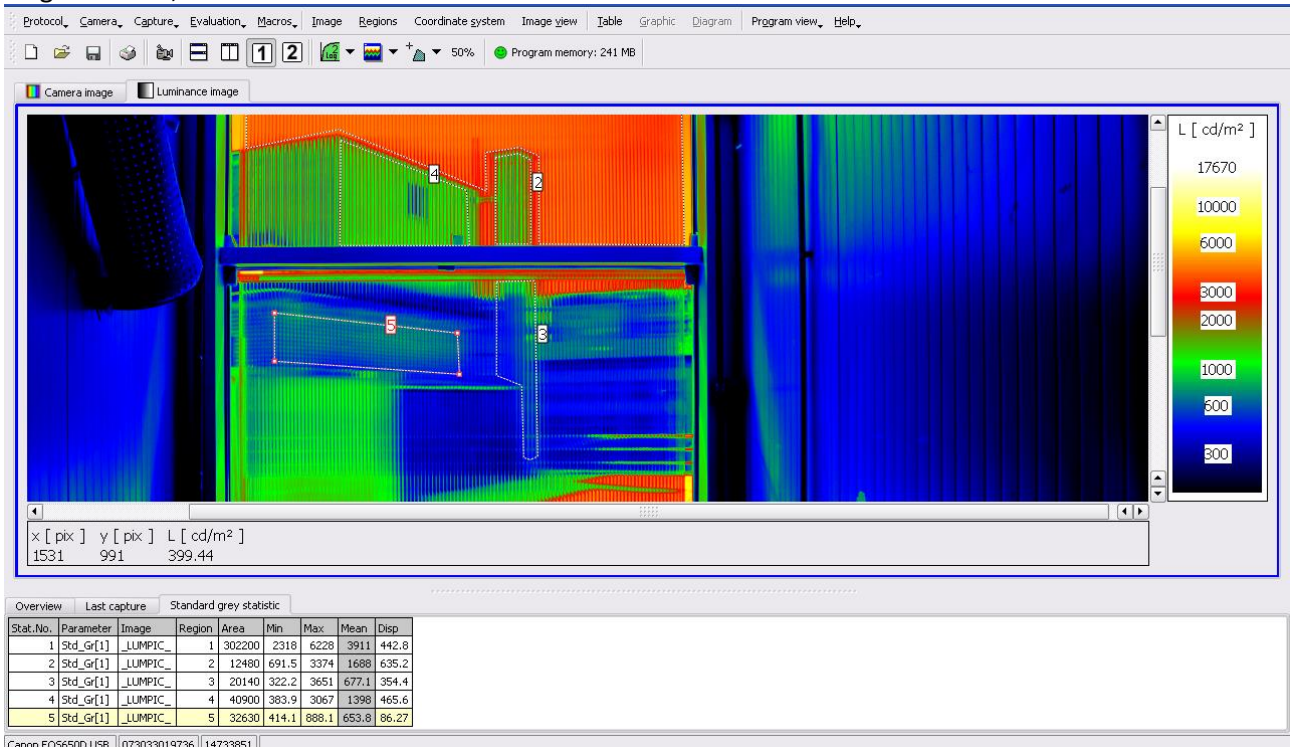
3 agosto 2015 h. 11:30 – Cielo sereno senza nuvole



$L_{\text{cielo}} = 5302 \text{ cd/m}^2$ . Rapporti di luminanza:  $L_2/L_3 = 1.03$ ;  $L_4/L_5 = 1.05$ .

**Configurazione A3 - Vetro termotropico + policarbonato blu + policarbonato verde**

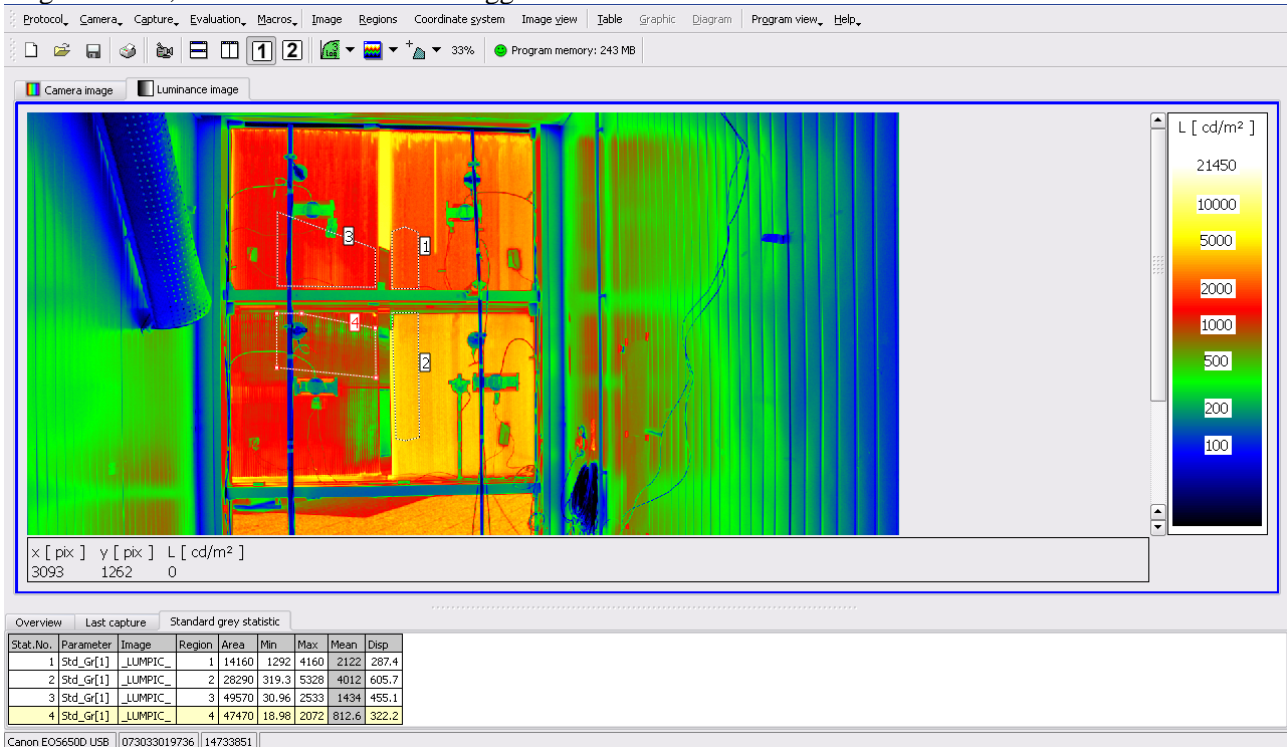
3 agosto 2015, h. 12:00 – Cielo sereno senza nuvole



$L_{\text{cielo}} = 3911 \text{ cd/m}^2$ . Rapporti di luminanza:  $L_2/L_3 = 2.49$ ;  $L_4/L_5 = 2.13$ .

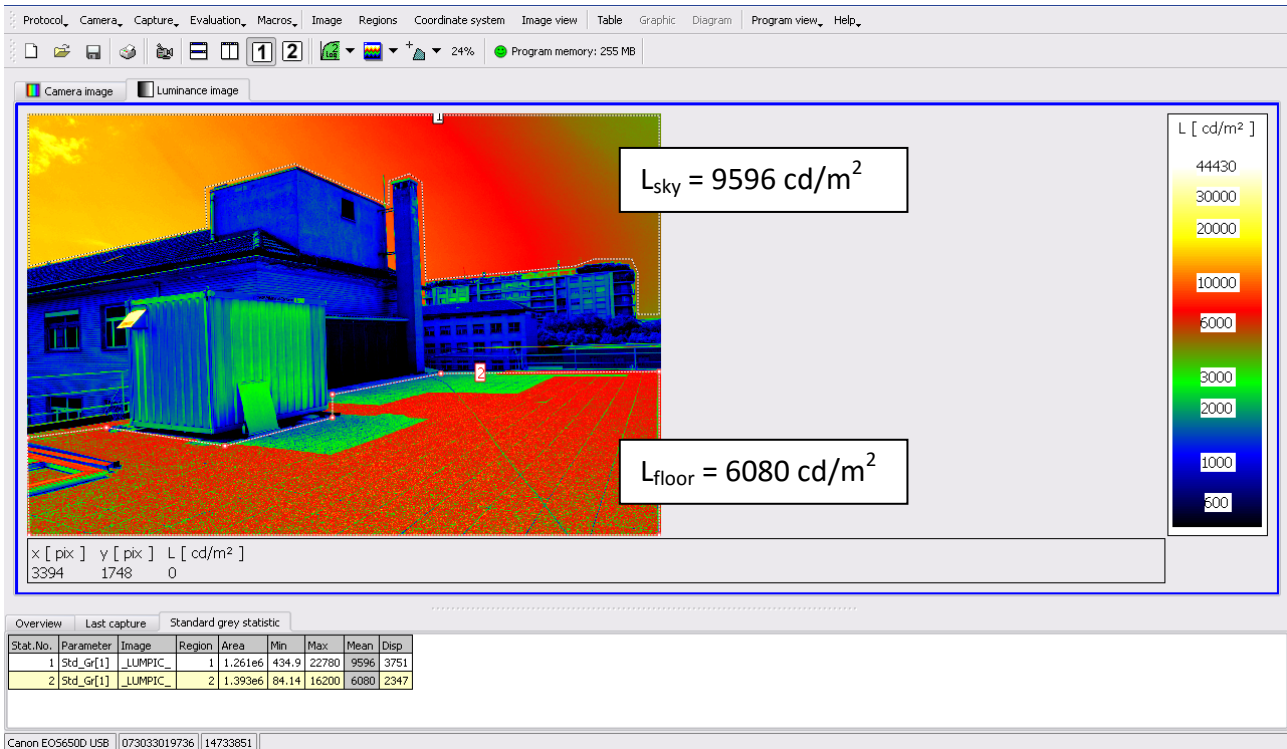
### Configurazione B1 - Policarbonato di diverso colore abbinato allo stesso PCM

6 agosto 2015, h. 10:00 – Cielo sereno leggermente velato



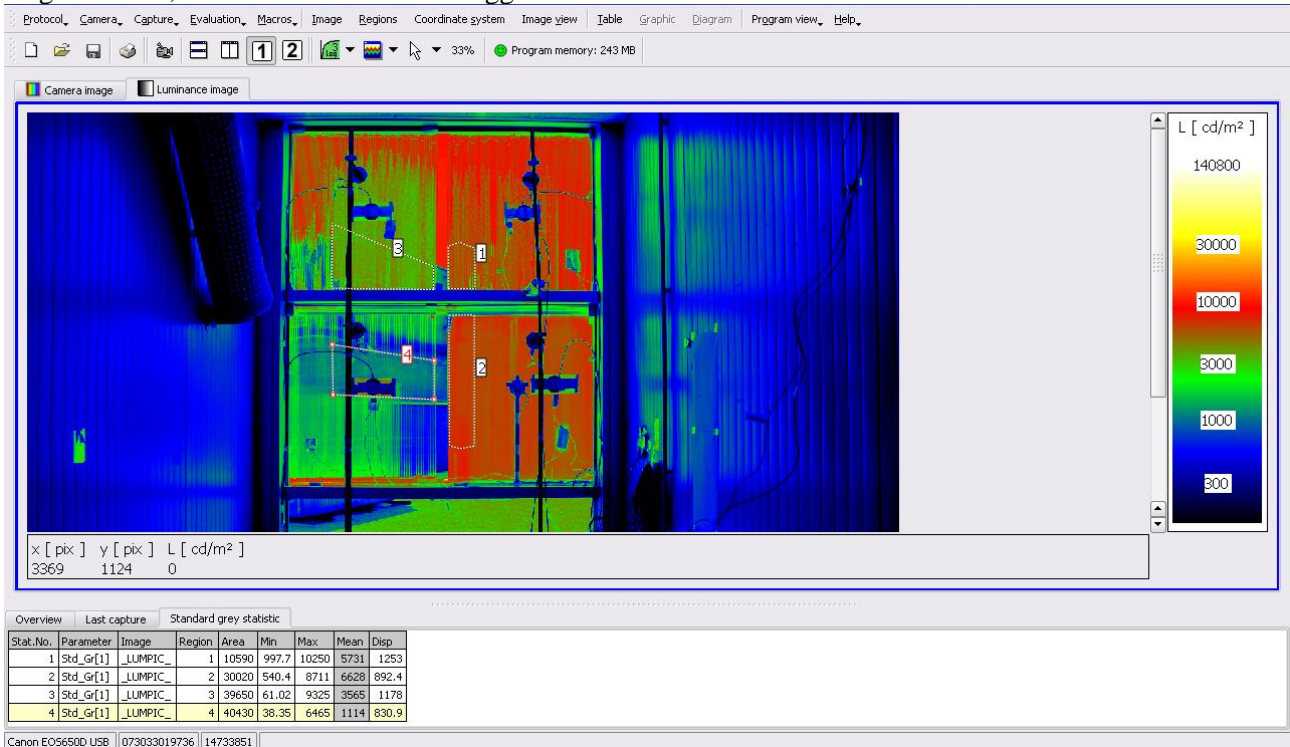
Rapporti di luminanza:  $L_1/L_2 = 0.53$ ;  $L_3/L_4 = 1.77$ .

### Vista esterna



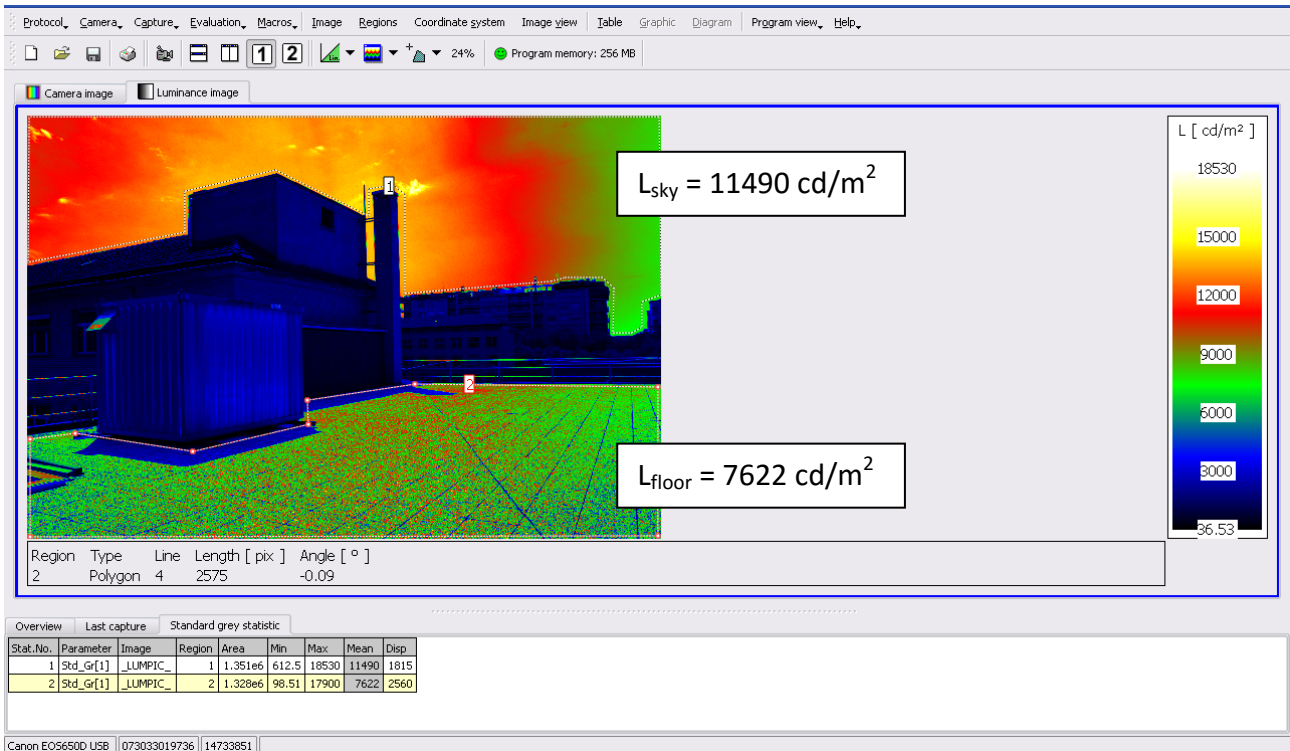
### Configurazione B1 - Policarbonato di diverso colore abbinato allo stesso PCM

6 agosto 2015, h. 13:30 – Cielo sereno leggermente velato



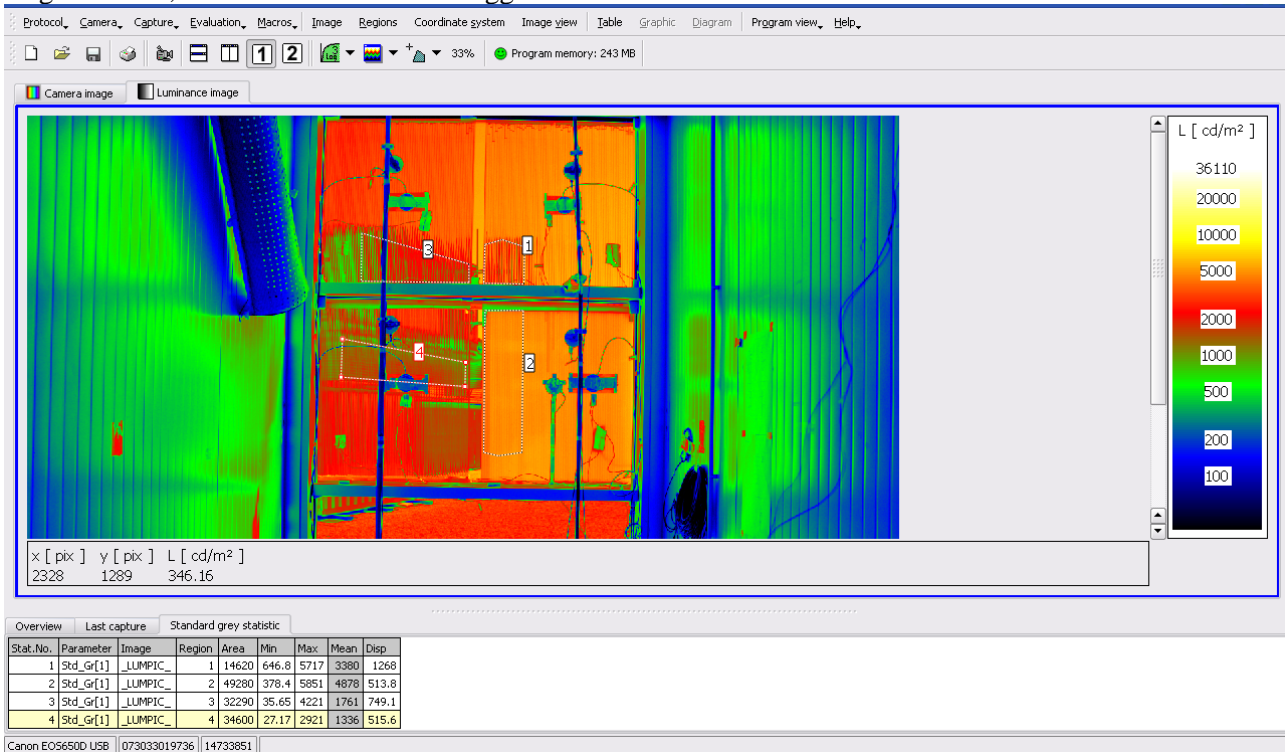
Rapporti di luminanza:  $L_1/L_2 = 0.87$ ;  $L_3/L_4 = 3.20$ .

### Vista esterna



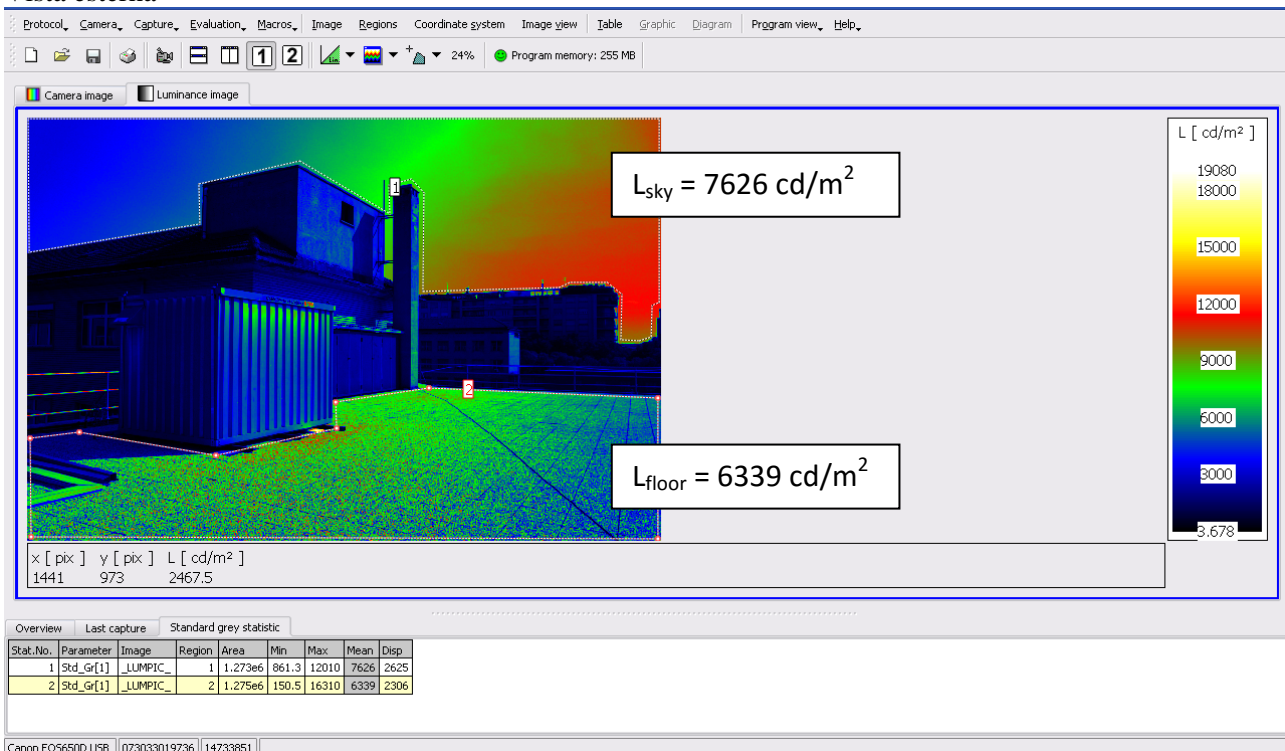
## Configurazione B1 - Policarbonato di diverso colore abbinato allo stesso PCM

6 agosto 2015, h. 17:00 – Cielo sereno leggermente velato



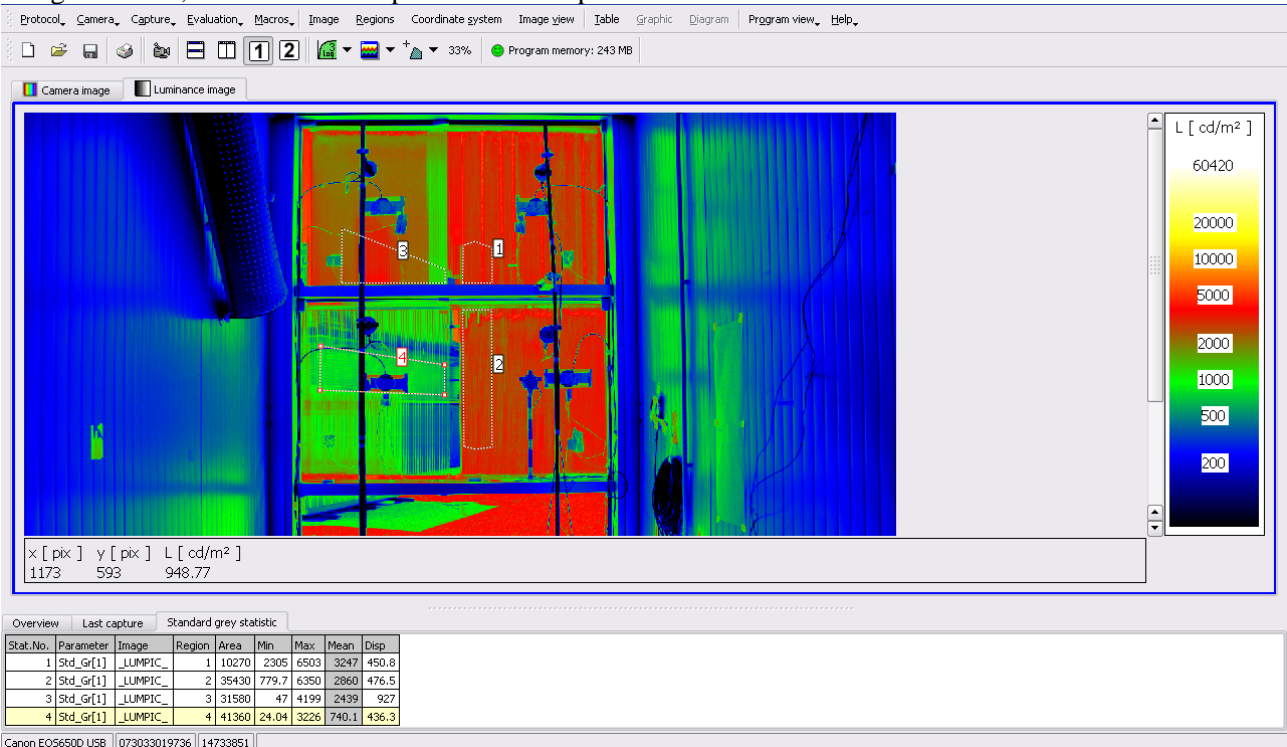
Rapporti di luminanza:  $L_1/L_2 = 0.69$ ;  $L_3/L_4 = 1.32$ .

## Vista esterna



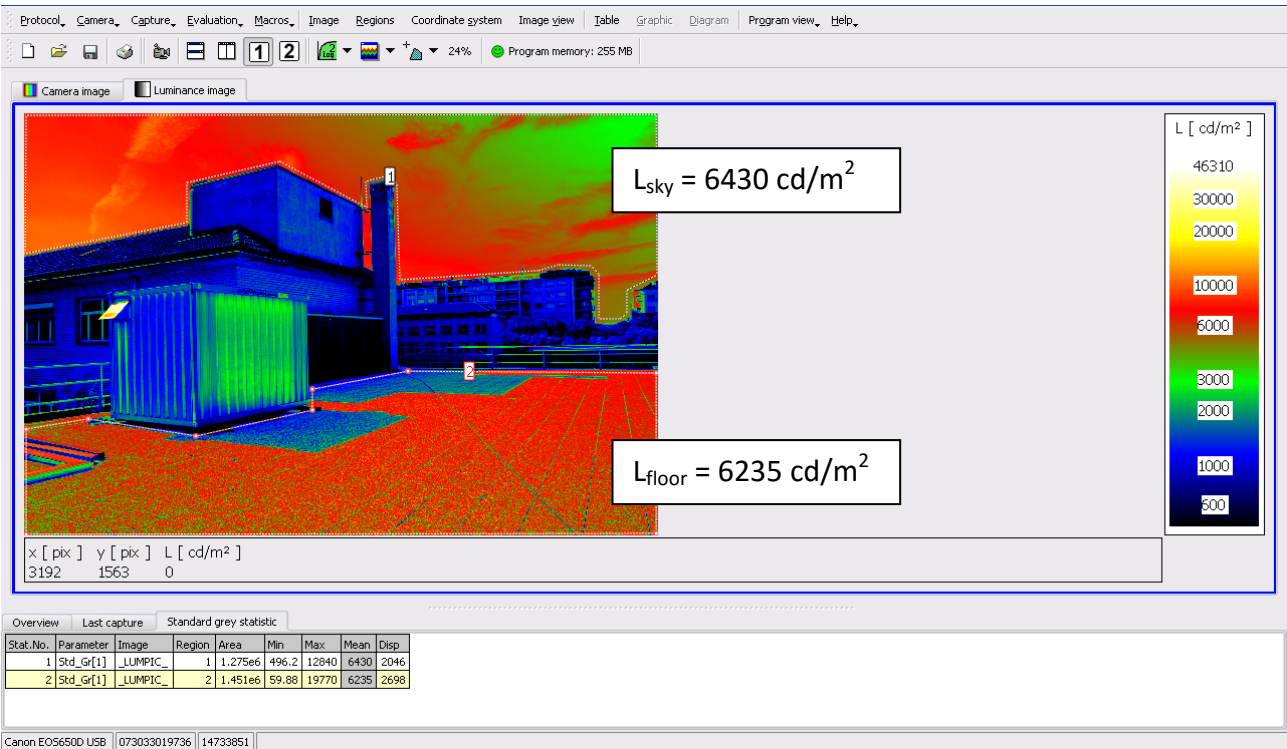
**Configurazione B2 - Diversi tipi di PCM abbinato allo stesso pannello di policarbonato verde**

20 agosto 2015, h. 10:00 – Cielo parzialmente coperto



Rapporti di luminanza:  $L_1/L_2 = 1.14$ ;  $L_3/L_4 = 3.29$ .

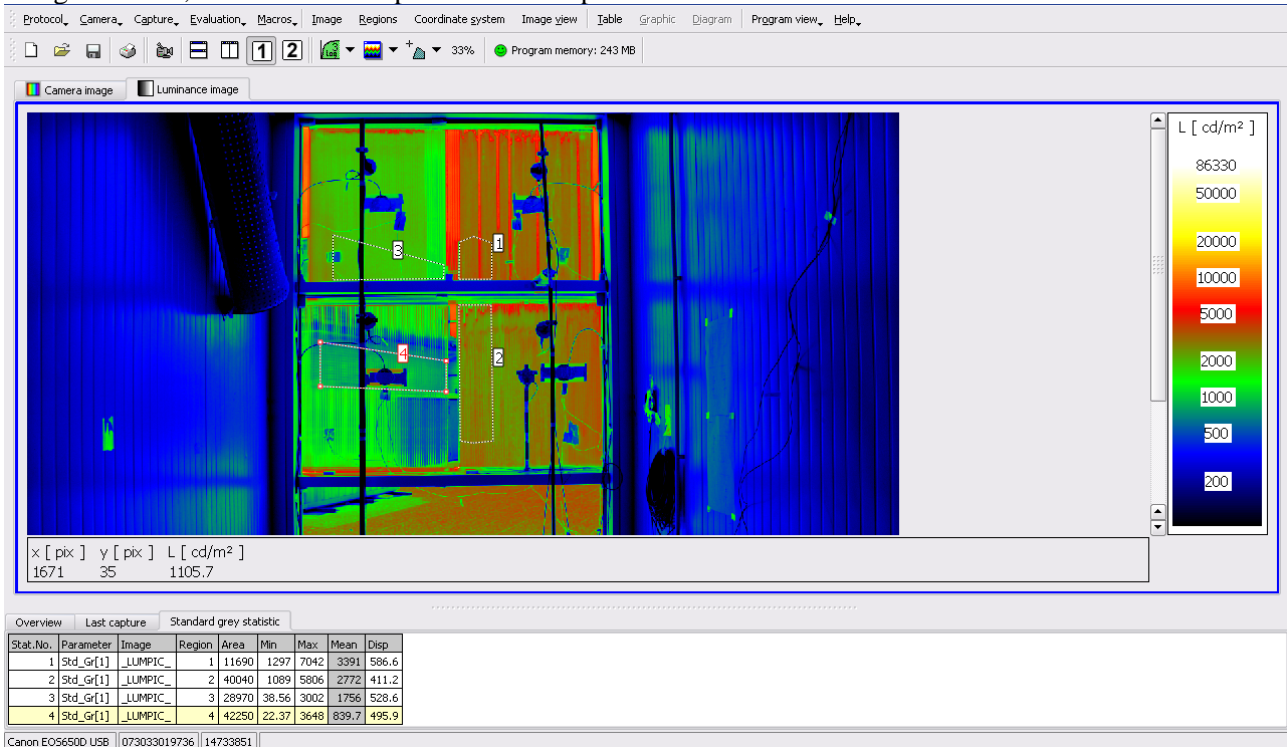
**Vista esterna**





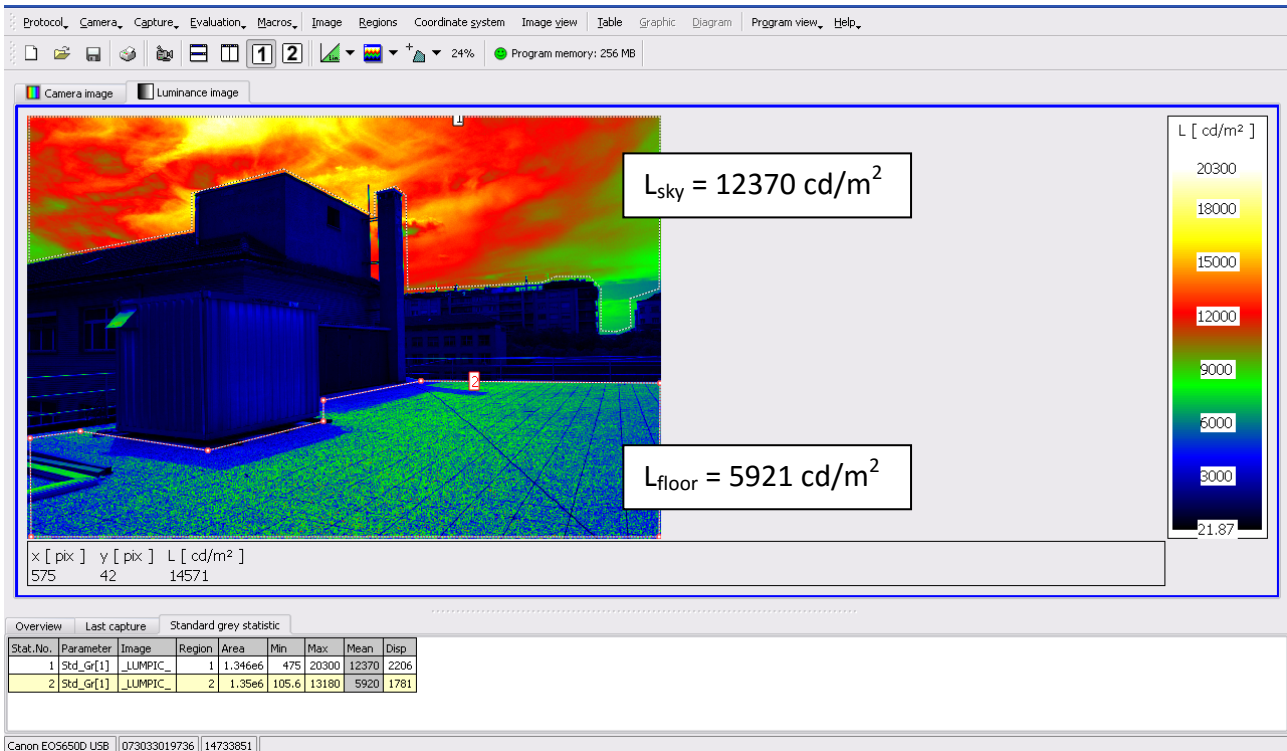
### Configurazione B2 - Diversi tipi di PCM abbinato allo stesso pannello di policarbonato verde

20 agosto 2015, h. 13:30 – Cielo parzialmente coperto



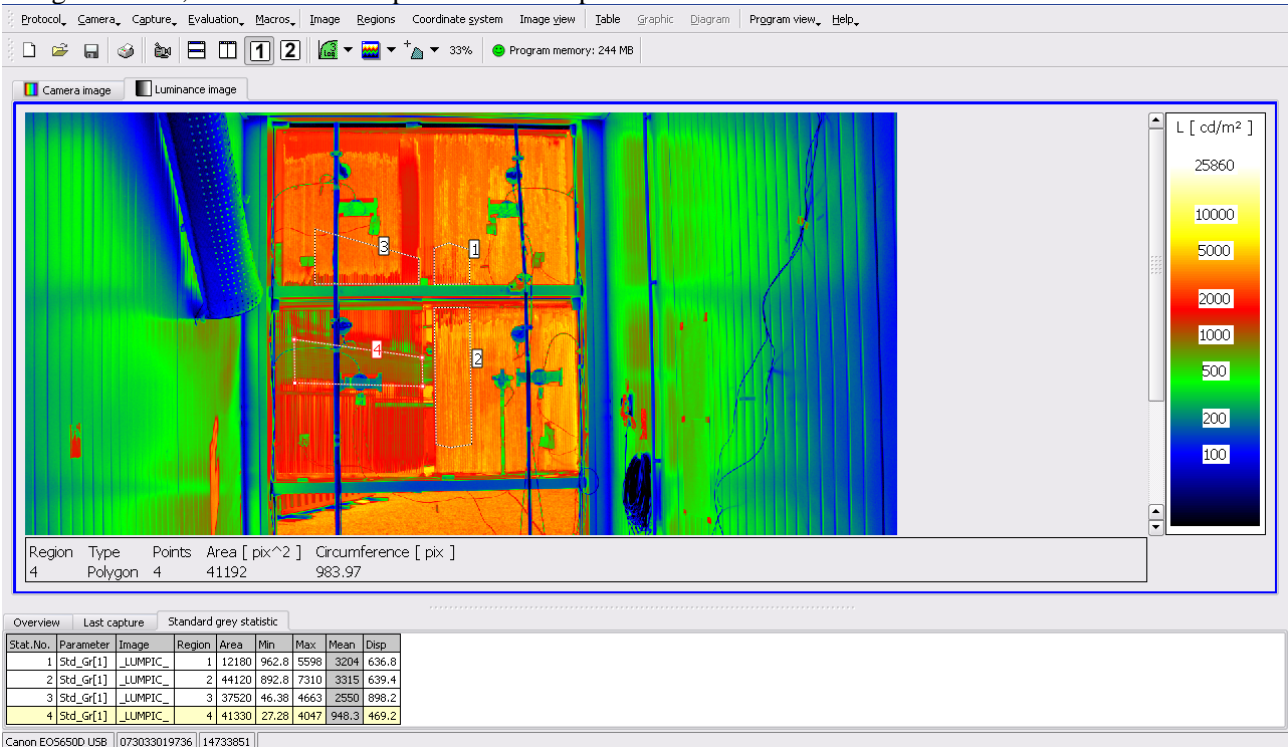
Rapporti di luminanza:  $L_1/L_2 = 1.22$ ;  $L_3/L_4 = 2.10$ .

### Vista esterna



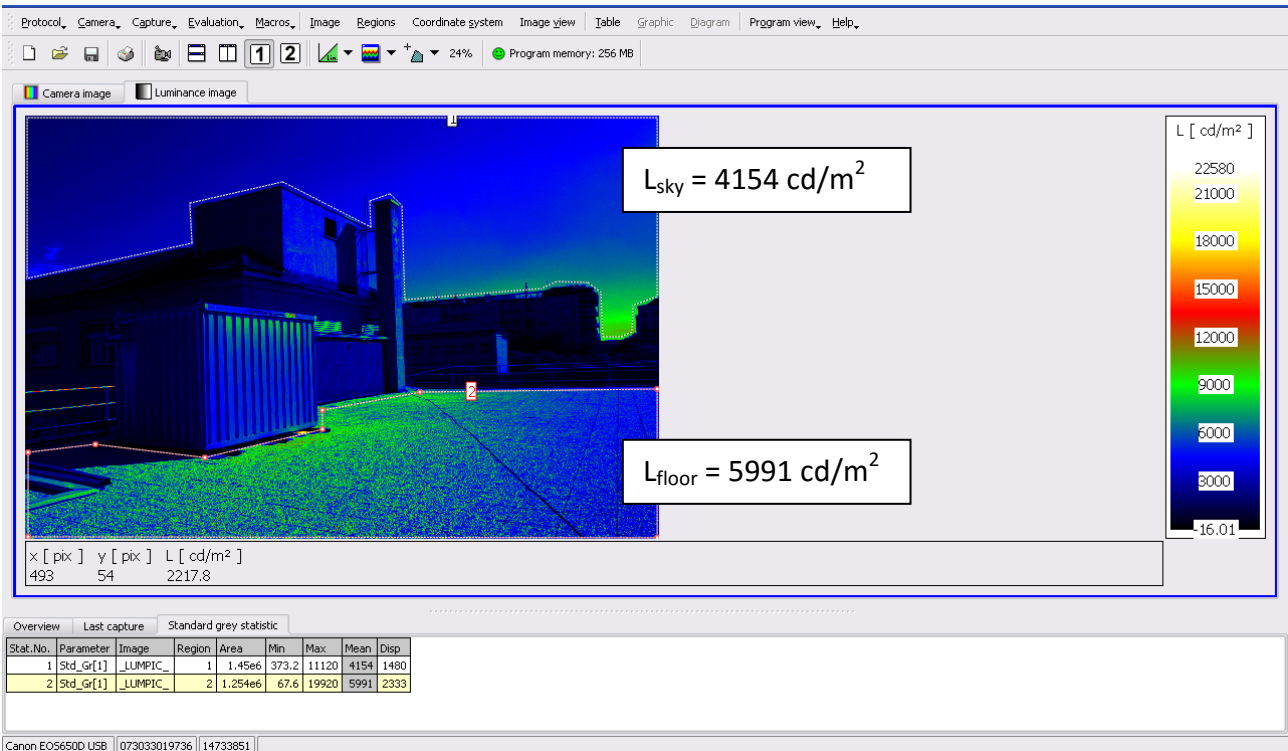
**Configurazione B2 - Diversi tipi di PCM abbinato allo stesso pannello di policarbonato verde**

20 agosto 2015, h. 17:00 – Cielo parzialmente coperto



Rapporti di luminanza:  $L_1/L_2 = 0.97$ ;  $L_3/L_4 = 2.69$ .

**Vista esterna**



## 4 La modellazione

### 4.1 Descrizione del modello

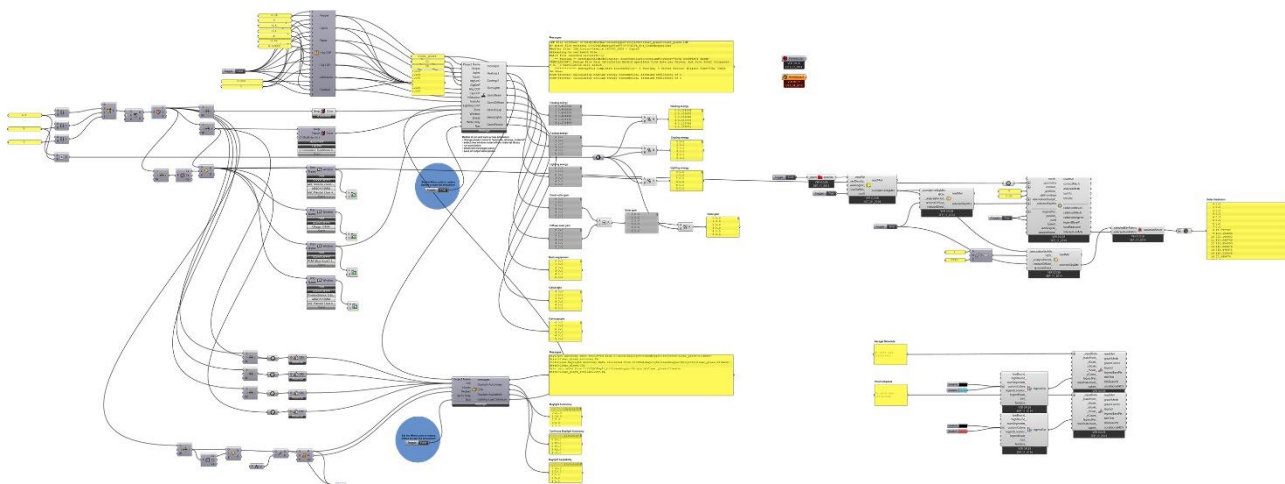
L'attività di modellazione e simulazione energetica ha avuto come obiettivo principale la caratterizzazione del sistema schermante in diverse configurazioni, talvolta differenti da quelle oggetto di misurazione.

Lo studio è avvenuto in due fasi principali:

- i) costruzione di un modello numerico (con accurata definizione dei materiali trasparenti sulla base dei dati misurati in campo) e validazione dei risultati delle simulazioni attraverso il confronto con dati misurati in due giornate tipo:
  - 12 agosto 2015 in relazione alla *configurazione 1 - variante: colore del polycarbonato*
  - 29 agosto 2015 in relazione alla *configurazione 2 - variante: tipo di PCM*
- ii) usando il modello validato, è stata effettuata una serie di simulazioni energetiche integrate su base annua per valutare i fabbisogni di energia primaria per riscaldamento, raffrescamento ed illuminazione, al fine di ottimizzare la tecnologia impiegata. In questa fase, sono state effettuate 3 serie di analisi, mirate a:
  - confrontare le prestazioni energetiche di diversi colori di polycarbonato, abbinati allo stesso PCM P\_PCM 35 (*configurazione 1 - variante: colore del polycarbonato*)
  - confrontare le prestazioni energetiche di diversi tipi di PCM, abbinati allo stesso polycarbonato verde con spessore 10 mm (*configurazione 2 - variante: tipo di PCM*).
  - confrontare (per la configurazione 1 - variante: colore del polycarbonato) le prestazioni di un pannello di polycarbonato con spessore maggiore (16 mm rispetto ai 10 mm usati nelle altre fasi di analisi) per quantificare come, a parità di colore del pannello (verde) e di tipologia di PCM (P\_PCM 35) la quantità di materiale a cambiamento di fase incida sulla prestazione energetica.

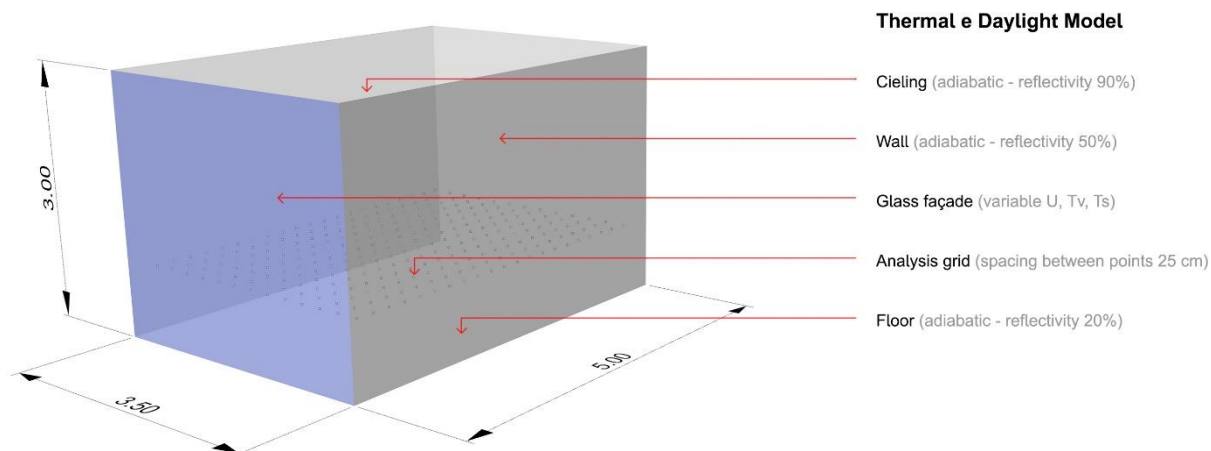
A questo scopo, le prestazioni energetiche dei vari componenti sono state analizzate attraverso una simulazione dinamica su base oraria sull'intero anno, potendo così fornire un risultato più completo rispetto a quello ottenuto con le misurazioni eseguite in uno spot temporale ristretto alla sola stagione estiva.

Il modello geometrico è stato costruito usando DIVA for Rhino, un'interfaccia che collega i software di analisi e modellazione energetica Energy Plus e Daysim con Rhinoceros, un programma di modellazione NURBS. La modellazione geometrica, nell'ottica di lanciare un'analisi parametrica, è avvenuta direttamente all'interno del tool Grassoppher, che permette attraverso un visual scripting (Fig. 66) di gestire in maniera semplice geometrie tridimensionali anche piuttosto complesse. Questo tool ha anche il vantaggio di mettere in comunicazione Energy Plus e Daysim, rendendo così possibile la realizzazione di un'analisi energetica integrata. Il vantaggio di questa scelta consiste altresì nel poter riportare in forma grafica i diversi linguaggi di modellazione geometrica dei due software di analisi ed evitare quindi di dover modellare l'ambiente in modo "numerico".



**Fig. 66 Visual scripting: definizione del modello geometrico e tools di simulazione energetica (Energy Plus e Daysim) in ambiente Grassopper.**

L’oggetto di analisi è stato individuato in un ufficio di tipo cellulare di dimensioni in pianta pari a 3.5 m x 5 m, con un’altezza interna netta di 3 m. Tutte le superfici, ed esclusione di quella che affaccia verso l’esterno, completamente vetrata con un’area di 10.5 m<sup>2</sup>, sono considerate adiabatiche (Fig. 67). In questo modo, i risultati delle analisi ambientali (fabbisogni energetici per riscaldamento e raffreddamento) non risentono dell’influenza di altre condizioni al contorno e riflettono la presettazione energetica del componente vetrato analizzato.



**Fig. 67 Modello utilizzato per le analisi energetiche integrate.**

La caratterizzazione del modello per le simulazioni illuminotecniche prevede dei coefficienti di riflessione delle superfici interne pari al 50% per le pareti (colorazione media), 90% per il soffitto (bianco riflettente) e 20% per il pavimento (colorazione medio-scura). La griglia di analisi è posta all’altezza del piano di lavoro (70 cm dal piano pavimento) e si scosta dalle pareti di 60 cm. La distanza tra i punti di analisi, per rendere più accurata la simulazione energetica, è stata fissata a 25 cm.

Oltre alla caratterizzazione geometrica del modello sono stati inseriti all’interno dei software di analisi i seguenti dati per completare il quadro delle condizioni al contorno:

- Dati di input Energy Plus:
  - File climatico (Weather file): ITA\_Torino-Caselle.160590\_IGDG
  - Profilo di occupazione: dal lunedì al venerdì dalle ore 8:00 alle ore 18:00, con pausa pranzo dalle ore 13:00 alle ore 14:00 (ora legale dall’ultima domenica di marzo all’ultima domenica di ottobre)
  - People [n°/m<sup>2</sup>]: 0.06 (UNI 10339)
  - Light [W/m<sup>2</sup>]: 8 (UNI/TS 11300 parte 1)

- Equipment [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]: 8.6 (UNI/TS 11300 parte 1)
- HtgSetP [ $^{\circ}\text{C}$ ]: 21 (UNI/TS 11300 parte 1)
- ClgSetP [ $^{\circ}\text{C}$ ]: 26 (UNI/TS 11300 parte 1)
- HtgCOP [-]: 0.9 (UNI/TS 11300 parte 1)
- ClgCOP [-]: 4 (UNI/TS 11300 parte 1)
- Infiltration [rate per hour]: 0.48 (UNI 10339)
- FreshAir [ $\text{m}^3/\text{s}/\text{person}$ ]: 0.00693 (UNI 10339)
- Dati di input Daysim:
  - Weather file: ITA\_Torino-Caselle.160590\_IGDG
  - Simulation type: Climate based (analisi annuale basata su dati climatici registrati all'interno del file climatico che caratterizzano ad esempio le condizioni del cielo o la posizione del sole e l'intensità della radiazione luminosa)
  - Profilo di occupazione: dal lunedì al venerdì dalle ore 8:00 alle ore 18:00, con pausa pranzo dalle ore 13:00 alle ore 14:00 (ora legale dall'ultima domenica di marzo all'ultima domenica di ottobre)
  - Illuminamento medio mantenuto: 500 lux (UNI EN 12464-1, valore minimo richiesto per locali ad uso ufficio, CAD, workstation e scrittura)
  - Lighting control: Photosensor Controlled Dimming (sistema di controllo che prevede la continua dimmerazione del flusso luminoso in ambiente per garantire il livello di illuminamento minimo desiderato)
  - Standby Power [ $\text{W}$ ]:  $0.12 \text{ W}/\text{m}^2$  (potenza parassita assorbita dal sistema di controllo anche quando l'impianto elettrico risulta spento)
  - Ballast Loss Factor [%]: 10 (percentuale di energia che viene dispersa all'interno del ballast o del sistema di alimentazione e trasformazione della tensione elettrica di alimentazione dei sistemi di illuminazione).

Ad essi vanno aggiunti i parametri impostati per le simulazioni in Radiance (algoritmo usato da Daysim):

- ab = 3 (number of ambient bounces)
- ad = 1000 (number of ambient divisions)
- as = 20 (number of ambient super-samples)
- ar = 300 (ambient resolution)
- aa = 0.1 (ambient accuracy).

## 4.2 Validazione del modello

Ai fine della validazione, si sono confrontati i dati, misurati in campo e simulati, dei flussi energetici attraversanti il componente per ogni time step del periodo di monitoraggio, ovvero un giorno completo (00:00 – 23:59).

Sono stati identificati tre giornate di riferimento, due in cui il melting del PCM è stato totale e molto rapido (condizioni di elevata irradianza e elevate temperature esterne), una in cui si è potuto osservare l'effetto di sfasamento dovuto alla presenza del materiale a cambiamento di fase nel polycarbonato.

Per ogni caso, vengono anche riportati i valori di due coefficienti statistici calcolati per quantificare la differenza statistica fra dati misurati in campo e simulati: il Root Mean Square Error RMSE, in  $[W/m^2]$ , e il Coefficient of Variation CV [%]. Questi coefficienti sono stati determinati attraverso le seguenti formule:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{24} (\Phi_{\text{simulato}} - \Phi_{\text{misurato}})^2}{24}} \quad [W/m^2] \quad (\text{equazione ??})$$

$$CV = \frac{RMSE}{\text{media}(\Phi_{\text{misurato}})} \quad [\%] \quad (\text{equazione ??})$$

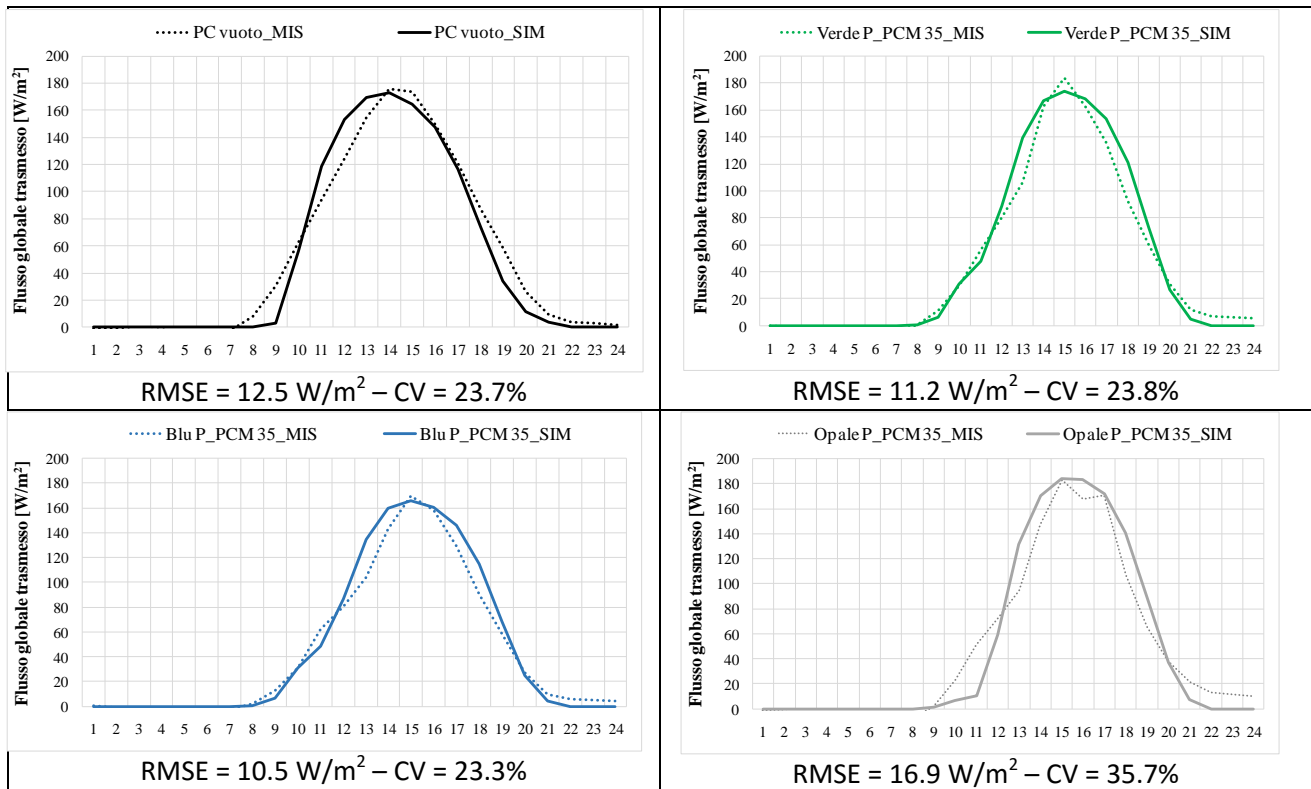
Il valore RMSE sintetizza in un valore unico la magnitudine di tutti gli errori legati, per ciascuna ora della giornata di analisi, ai dati simulati rispetto a quelli misurati. Un ridotto valore RMSE pertanto dimostra l'affidabilità delle simulazioni. Il valore CV esprime in percentuale la magnitudine degli errori dei dati simulati rispetto a quelli misurati. Anche in questo caso, tanto minore il valore CV, tanto migliore il risultato della simulazione che permette pertanto di validare il modello numerico.

In relazione alla prima campagna di validazione, condotta il 12 Agosto 2015, si sono confrontati i risultati delle misurazioni con quelli delle simulazione energetiche dei pannelli in polycarbonato di diversi colori riempiti con il P\_PCM 35 (*configurazione 1 – variante: colore polycarbonato*). La Fig. 68 mostra le curve relative ai flussi globali entranti (flussi termici superficiali e irradianza trasmessa) ottenute per ciascun pannello analizzato.

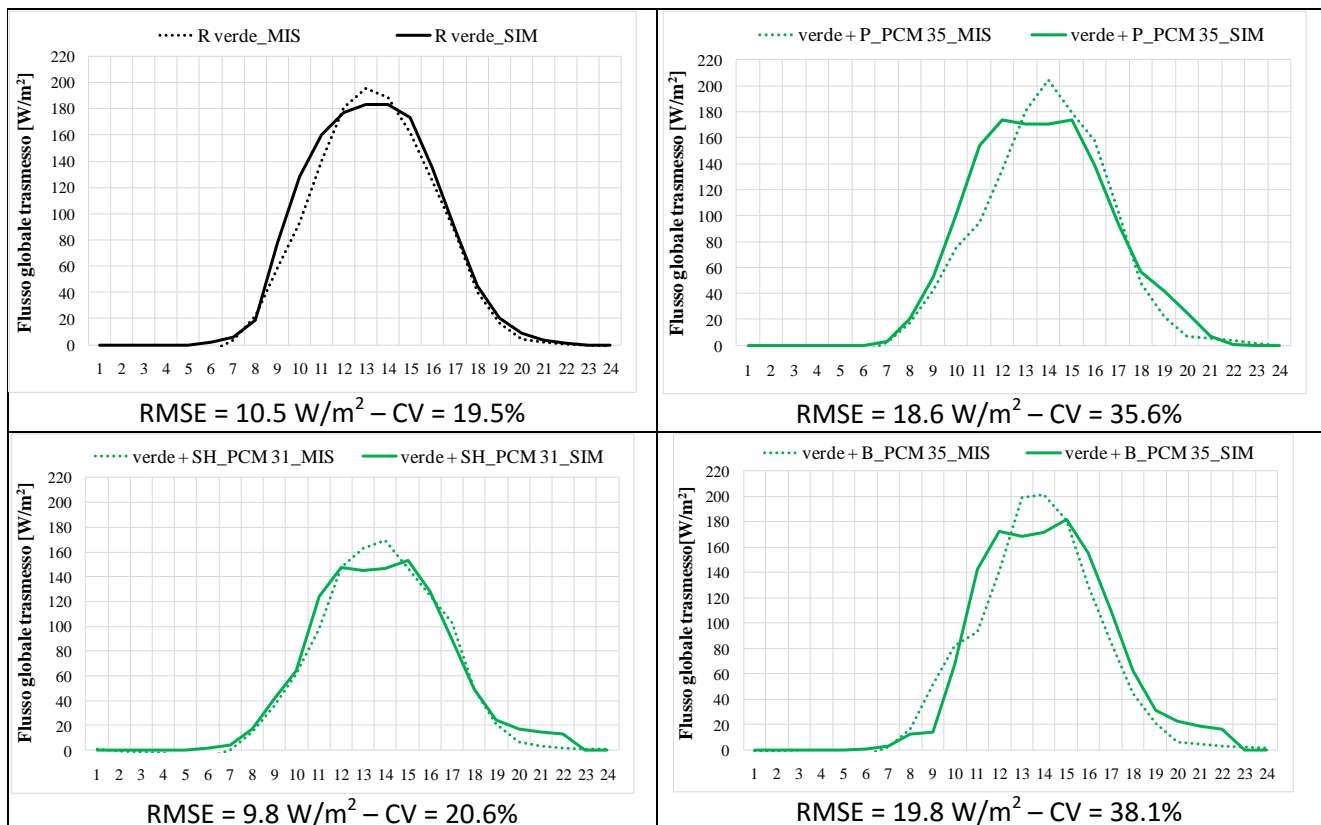
In relazione alla seconda campagna di validazione, condotta il 29 Agosto 2015, si sono confrontati i risultati misurati e simulati per tre pannelli in polycarbonato verde riempiti con tre diversi tipi di PCM (*configurazione 2 – variante: tipo PCM*). La Fig. 69 mostra le curve ottenute, sempre relative ai flussi globali entranti, per ciascun pannello analizzato.

In Fig. 70 si riporta invece il confronto dei flussi termici superficiali, tra pannello vuoto e due tipologie di PCM (biobased e Sali idrati), al fine di osservare meglio la capacità del modello di seguire la dinamica.

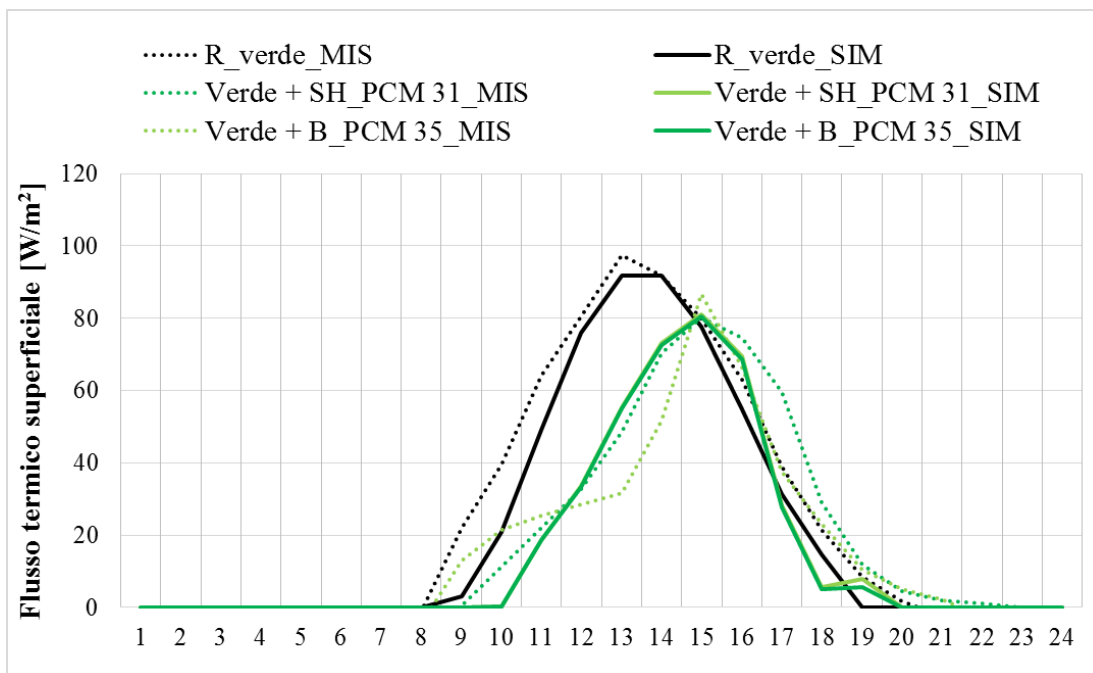
I risultati ottenuti sono ritenuti accettabili, in considerazione anche del fatto che alcuni dati di ingresso sono stati assunti e non direttamente misurati (relativamente al file climatico, in cui radiazione normale diretta e scomposizione tra diretta e diffusa sono state derivate tramite modello, a partire dall'irradianza misurata su un piano orizzontale e ai dati di caratterizzazione dei materiali, quale l'entalpia di fusione assunta da scheda tecnica).



**Fig. 68** Confronto fra flussi globali simulati e misurati per la configurazione 1 – variante: colore (giornata serena, elevate temperature esterne)



**Fig. 69** Confronto fra flussi globali simulati e misurati per la configurazione 2 – variante: PCM (giornata serena, elevate temperature esterne)



|             | Verde + P_PCM 35 | Verde + SH_PCM 31 | Verde + B_PCM 35 | verde vuoto  |
|-------------|------------------|-------------------|------------------|--------------|
| <b>RMSE</b> | <b>8,1</b>       | <b>10,2</b>       | <b>10,5</b>      | <b>8,5</b>   |
| <b>CV</b>   | <b>44,5%</b>     | <b>66,0%</b>      | <b>74,8%</b>     | <b>38,2%</b> |

Fig. 70 Confronto fra flussi termici superficiali simulati e misurati per la configurazione 2 – variante: PCM – giornata serena, temperatura max 30°C

### 4.3 Risultati del modello

Vengono di seguito presentati i risultati delle simulazioni per le configurazioni analizzate.

#### Prestazioni energetiche annuali (energia primaria) delle diverse configurazioni

- confronto delle prestazioni energetiche per diversi pannelli in policarbonato di diverso colore riempiti di P\_PCM 35 (configurazione 1 - variante: colore del policarbonato)



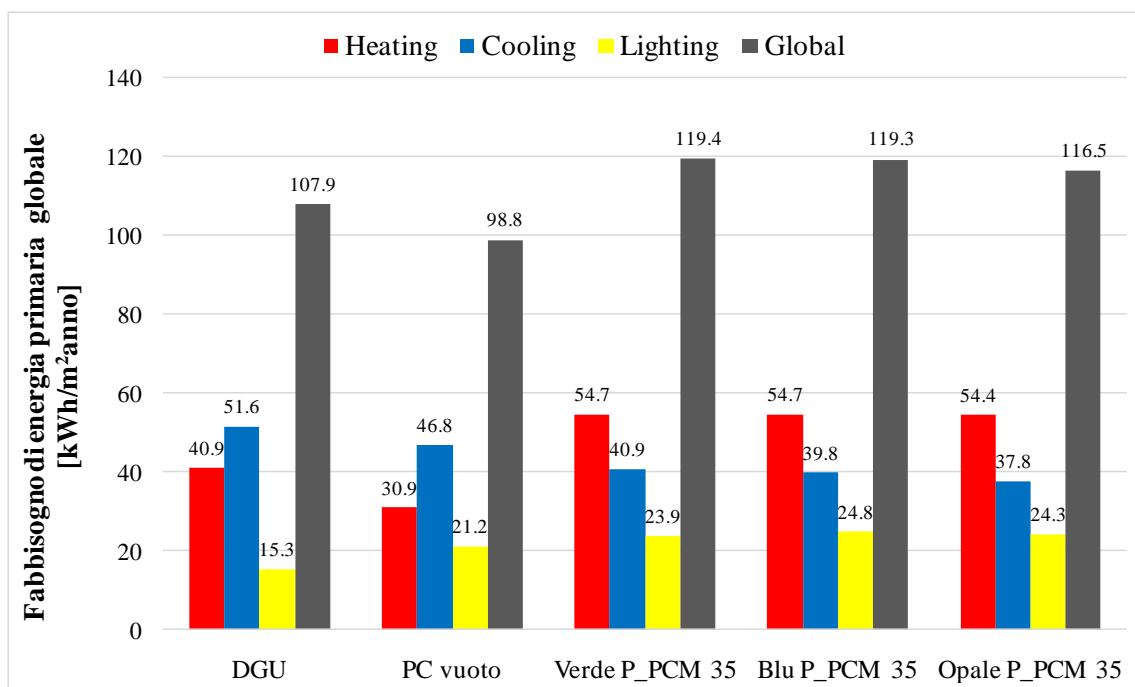


Fig. 71 Fabbisogni di energia primaria su base annua

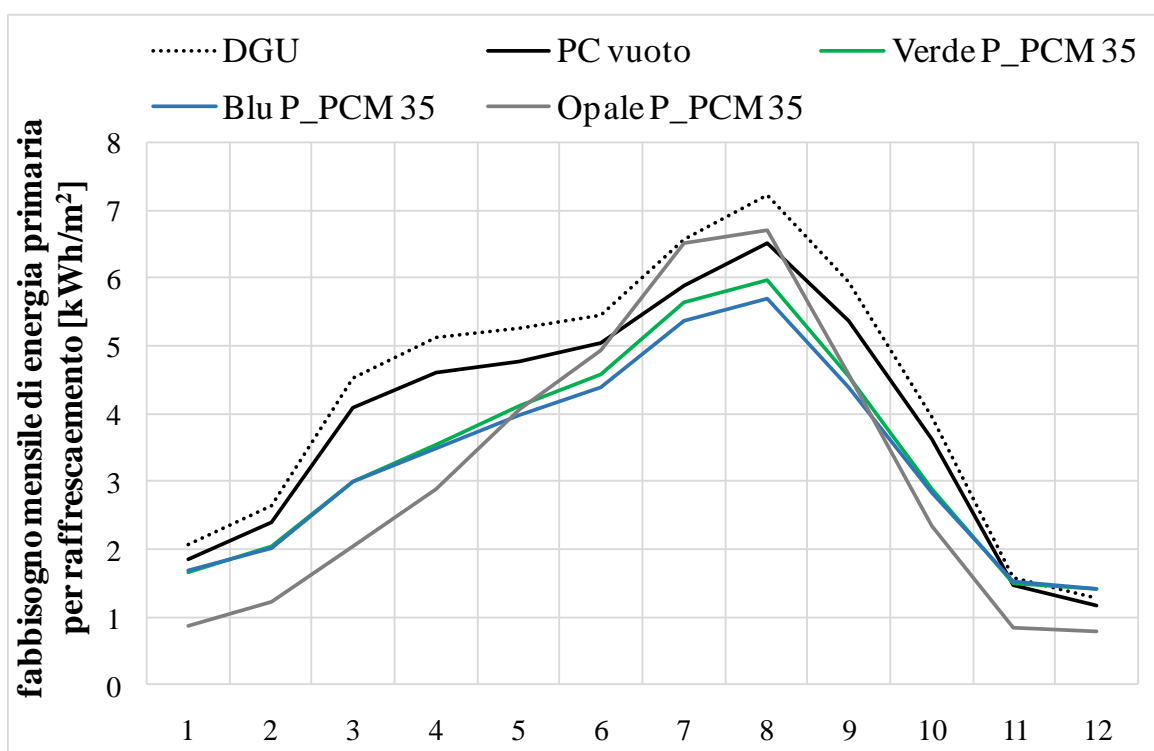


Fig. 72 Fabbisogni di energia primaria per raffreddamento su base mensile

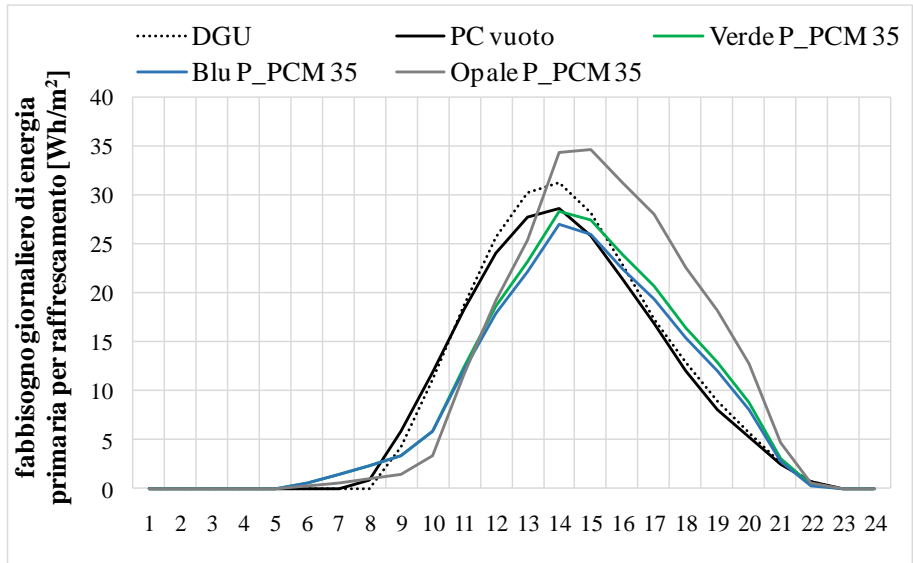


Fig. 73 Fabbisogni di energia primaria per raffreddamento su base giornaliera (21 giugno)

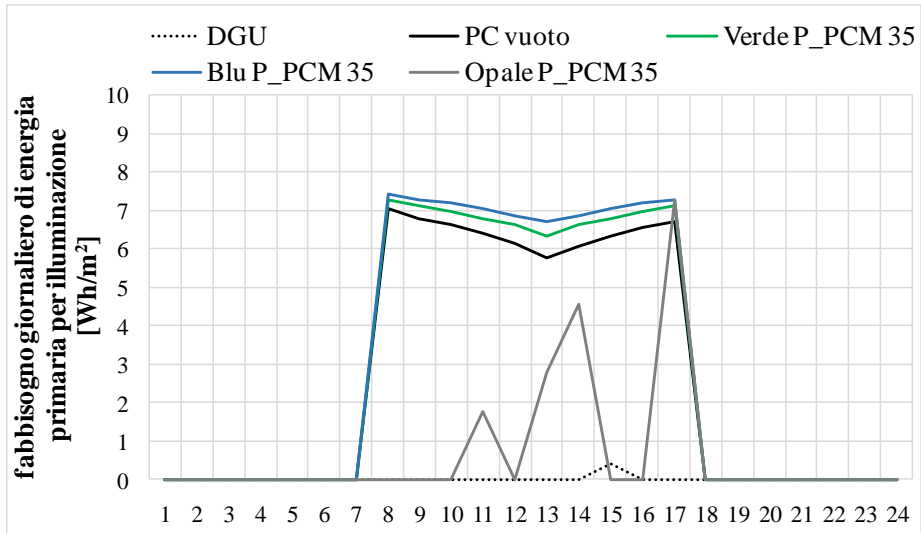


Fig. 74 Fabbisogni di energia primaria per illuminazione su base giornaliera (21 giugno)

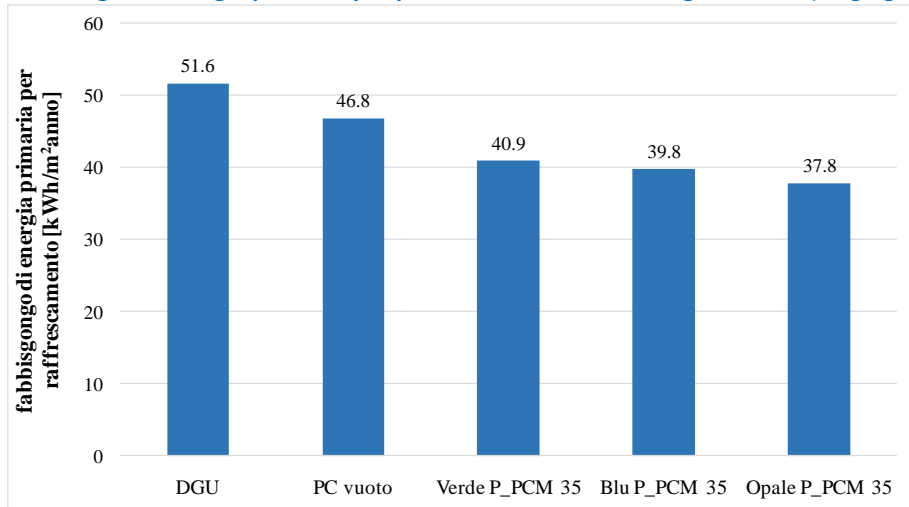


Fig. 75 Fabbisogni annuali di energia primaria per raffreddamento

- confronto delle prestazioni energetiche per diversi tipi di PCM abbinati allo stesso pannello in policarbonato verde (configurazione 2 - variante: tipo di PCM)

Questa serie di simulazioni ha permesso di valutare, mantenendo invariato il tipo di pannello (colore verde e spessore 10 mm), la prestazione energetica (in termini di energia primaria) con due diversi tipi di materiale a cambiamento di fase diversi dal P\_PCM 35: SH\_PCM31 e B\_PCM 35.

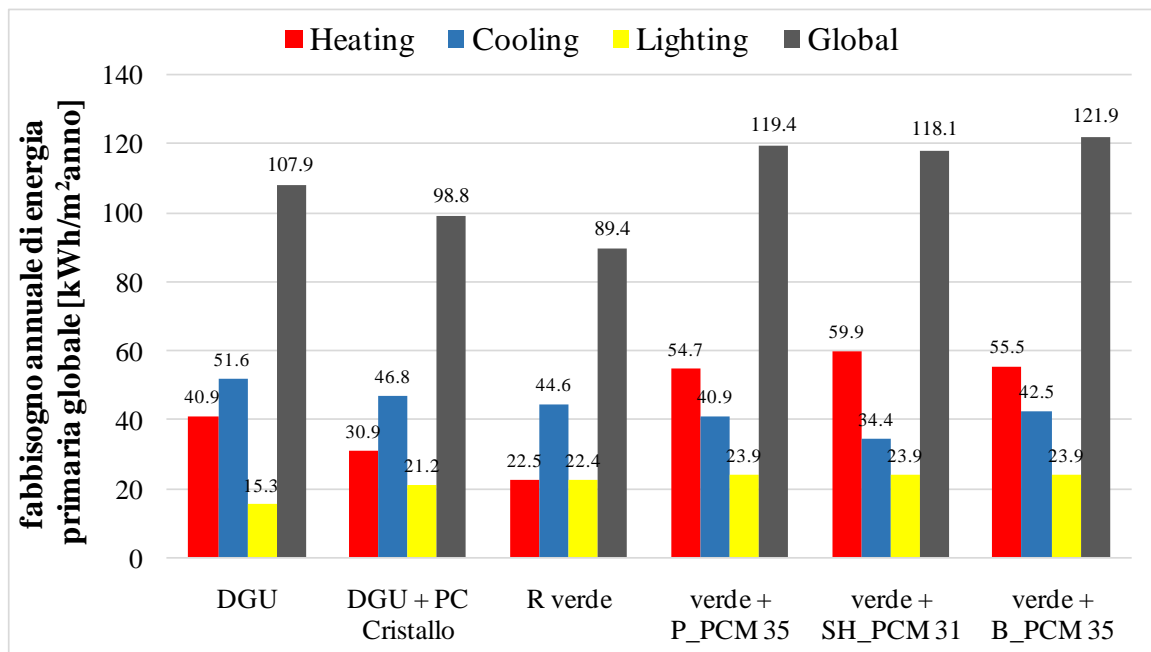


Fig. 76 Fabbisogni di energia primaria su base annua

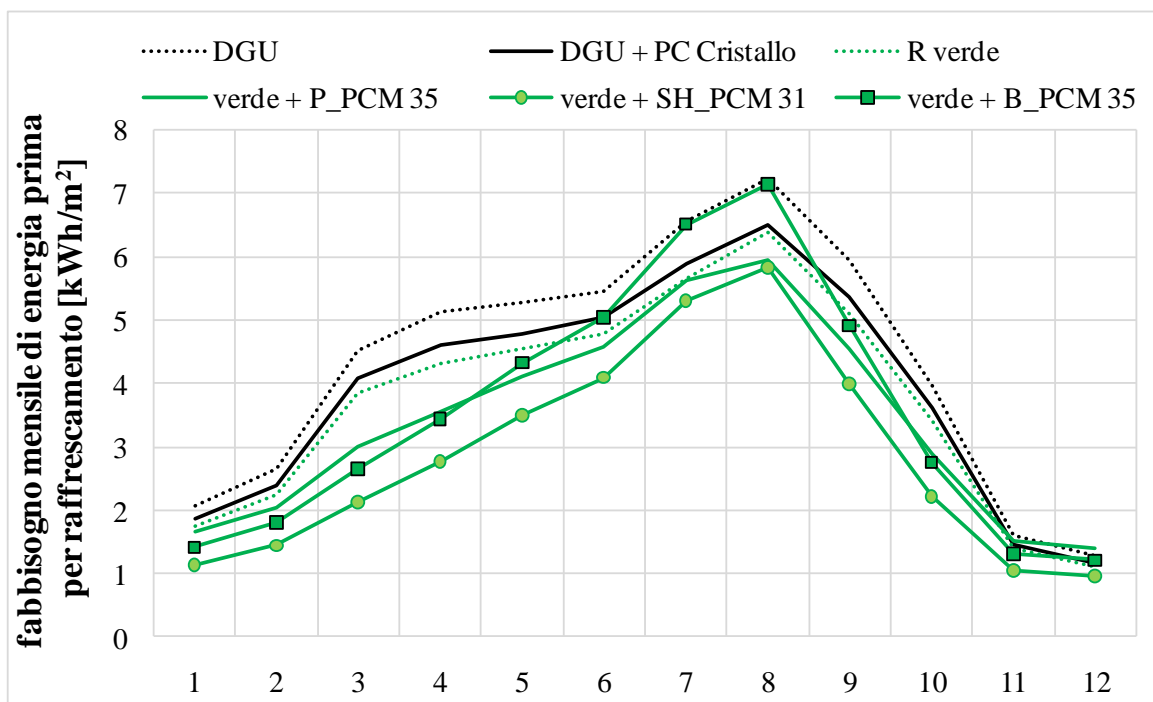


Fig.77 Fabbisogni di energia primaria per raffrescamento su base mensile

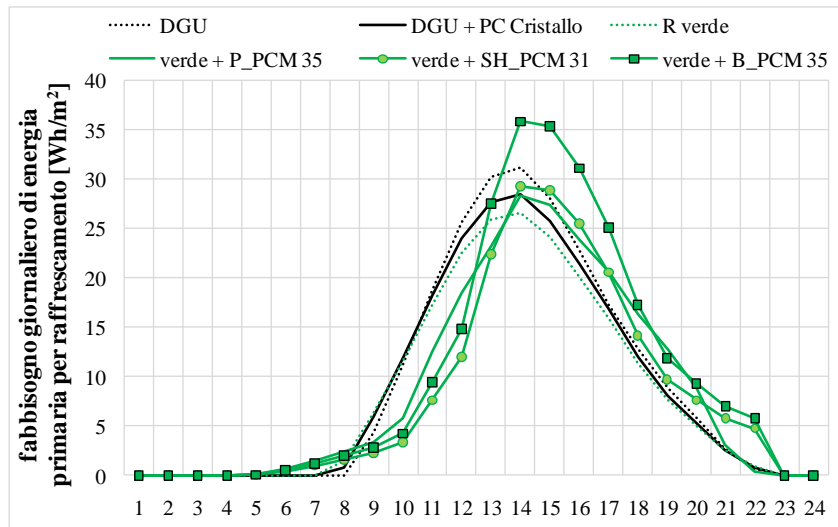


Fig.78 Fabbisogni di energia primaria per raffreddamento su base giornaliera (21 giugno)

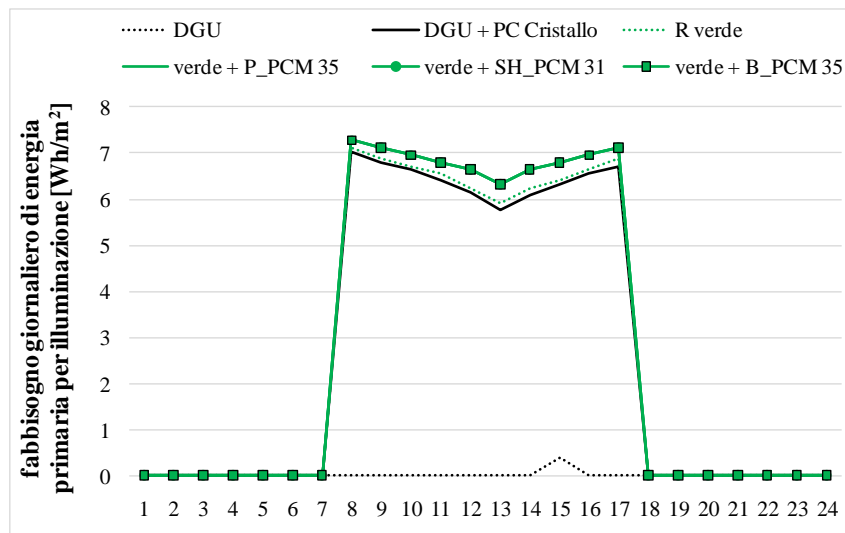


Fig.79 Fabbisogni di energia primaria per illuminazione su base giornaliera (21 giugno)

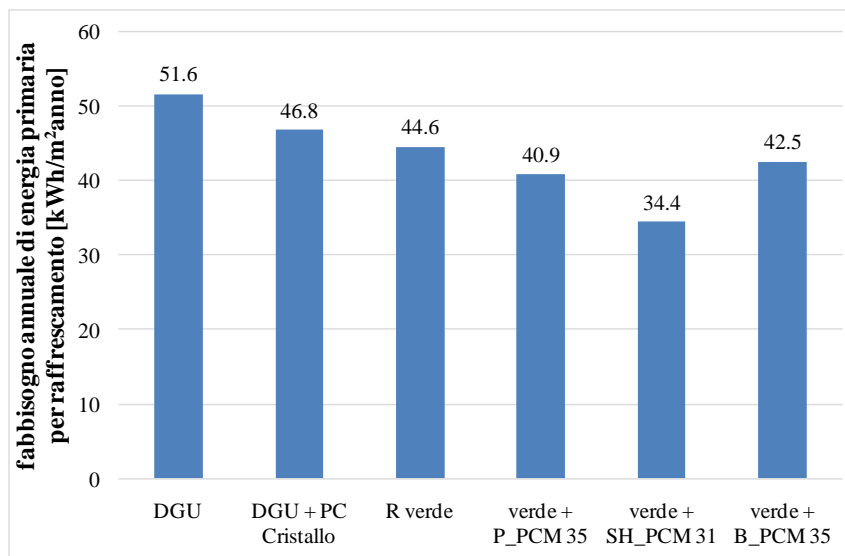
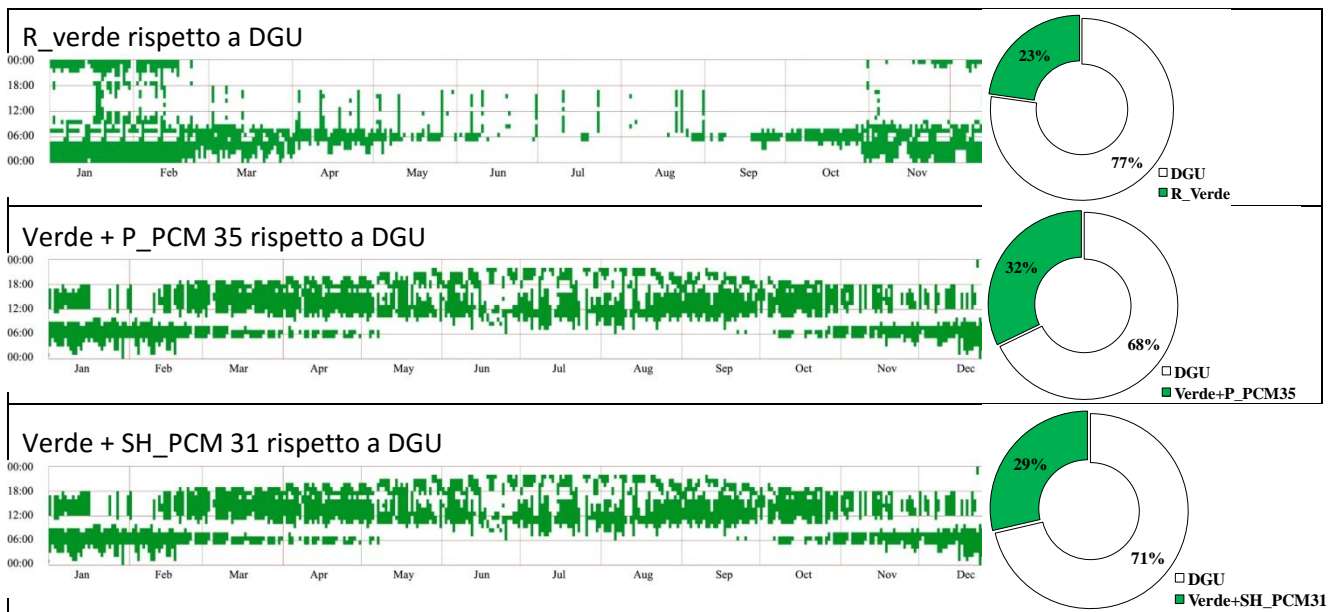


Fig.80 Fabbisogni annuale di energia primaria per raffreddamento)

Come ulteriore elaborazione dei dati ottenuti dalle simulazioni, la Fig.81 sintetizza il comportamento dinamico annuale del PC verde vuoto e riempito con due diversi PCM rispetto all'utilizzo di una vetrata con vetrocamera semplice (DGU): in particolare, in base al profilo orario delle temperature nel corso dell'anno, viene visualizzato in che momento e in che percentuale (rispetto all'intero anno) sia più vantaggioso l'utilizzo di un componente con PCM rispetto al DGU.

Dalla figura emerge come la soluzione con inserimento del P\_PCM 35 sia più vantaggiosa rispetto al PC verde riempito con SH\_PCM 31 o lasciato vuoto.



**Fig.81** Comportamento dinamico di PC verde vuoto e riempito con due diversi PCM rispetto ad una vetrata con vetrocamera semplice

- confronto delle prestazioni energetiche per diverso spessore del pannello in policarbonato (16 mm – 10 mm) per la configurazione 1

Questa fase, che ha previsto la simulazione di un pannello di policarbonato con spessore maggiore (16 mm invece di 10 mm) ha permesso di valutare come, a parità di colore del pannello (verde) e di tipologia di PCM (P\_PCM35) la quantità di materiale a cambiamento di fase incida sulla prestazione energetica.

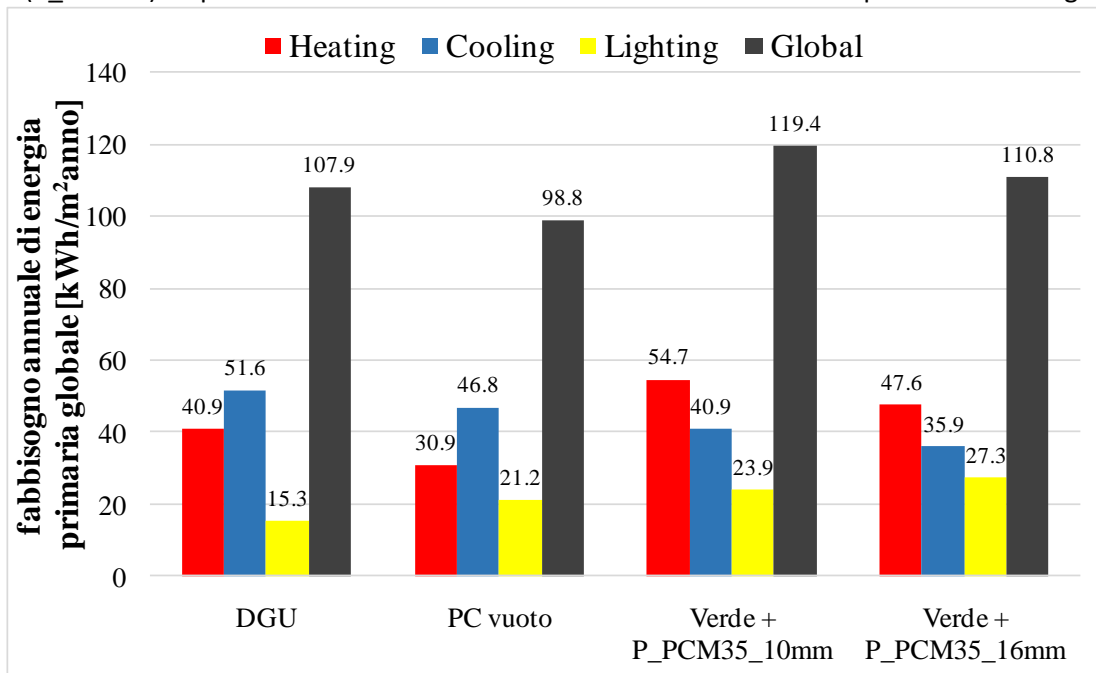


Fig.82 Fabbisogni di energia primaria su base annua

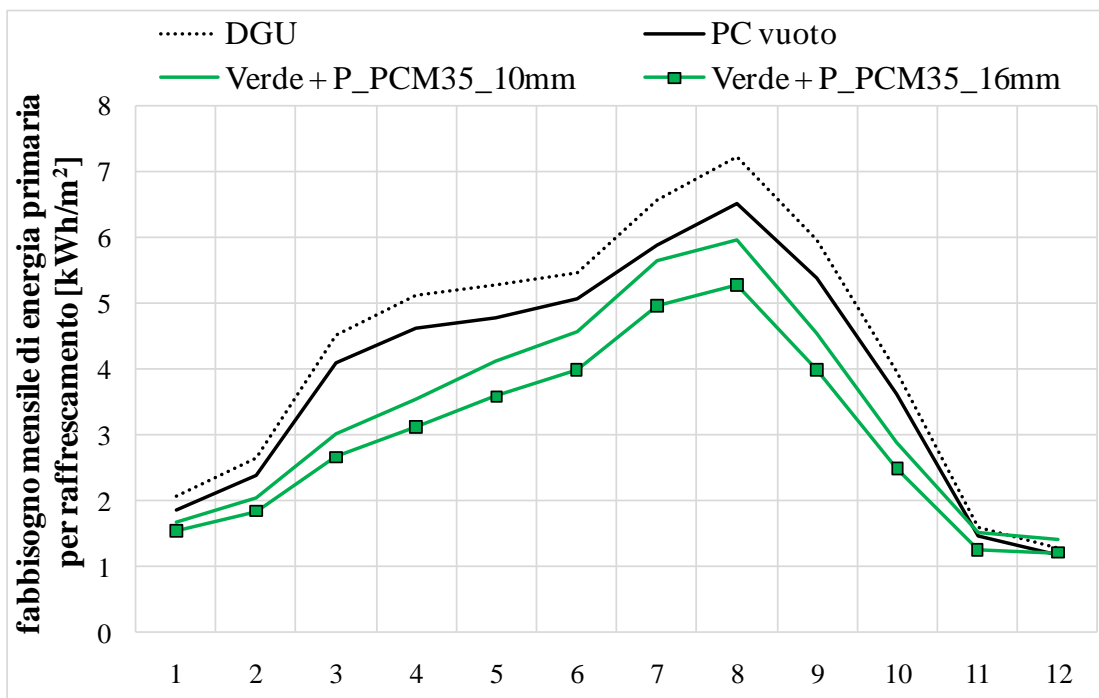
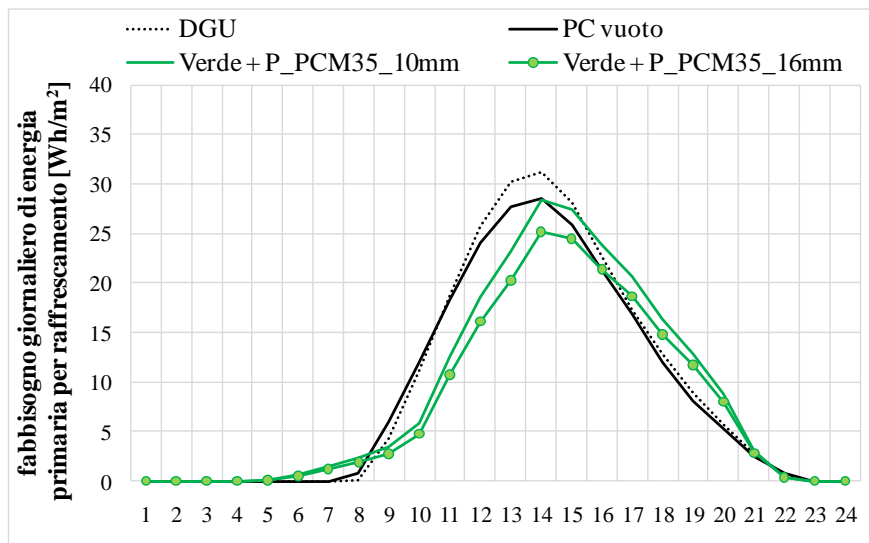
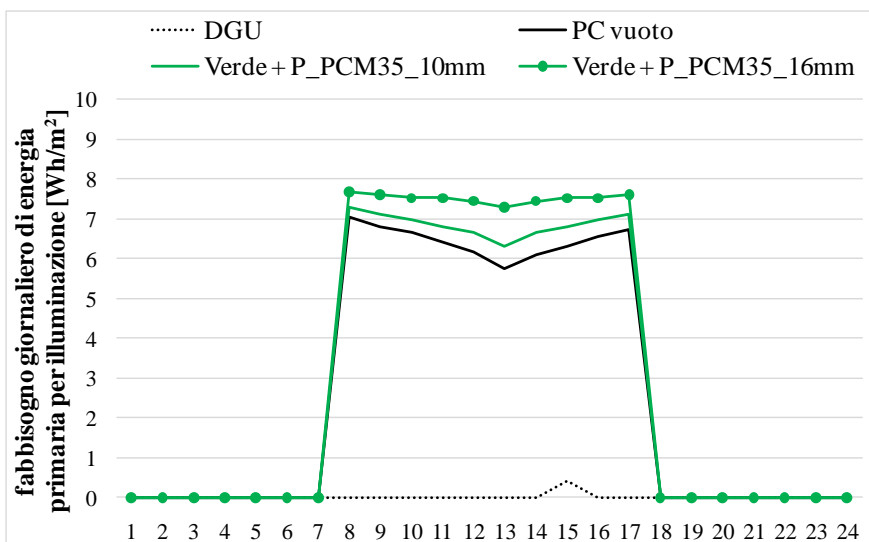


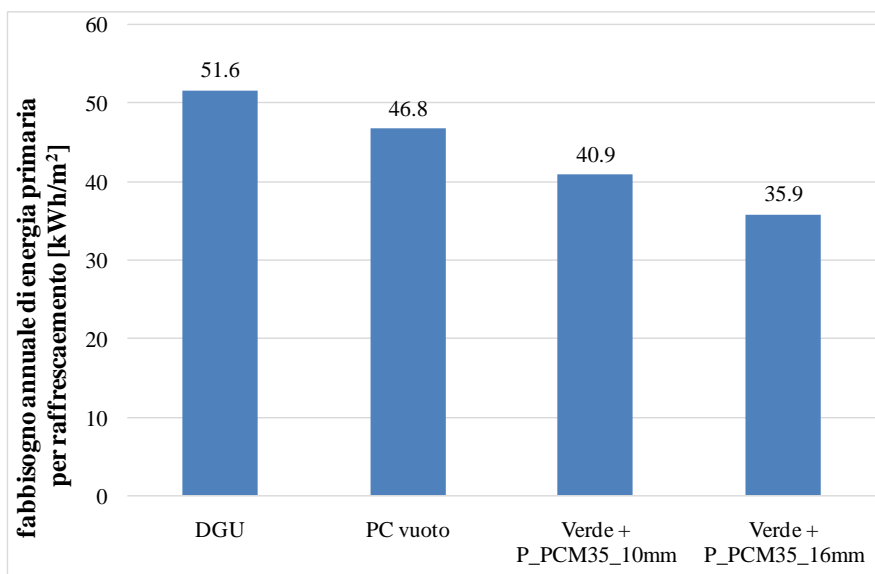
Fig.83 Fabbisogni di energia primaria per raffrescamento su base mensile



**Fig.84** Fabbisogni di energia primaria per raffrescamento su base giornaliera (21 giugno)



**Fig.85** Fabbisogni di energia primaria per illuminazione su base giornaliera (21 giugno)



**Fig.86** Fabbisogni annuale di energia primaria per raffrescamento

### Commenti

In relazione alla *configurazione 1 – variante colore*:

- l'inserimento del materiale a cambiamento di fase P\_PCM 35 determina, rispetto al caso di policarbonato vuoto:
  - un incremento del fabbisogno annuale di energia primaria per riscaldamento, nel range: +75.6%-76.6%
  - una riduzione del fabbisogno annuale di energia primaria per raffrescamento, nel range: -12.6%-19.2%
  - un incremento del fabbisogno annuale di energia primaria per illuminazione, nel range: +12.8%-15.1%
  - un incremento del fabbisogno annuale di energia primaria globale consumata (heating + cooling + lighting), nel range: + 17.9%-20.8%
- il diverso colore del policarbonato determina prestazioni confrontabili, con valori leggermente migliori per il pannello opale (Opale P\_PCM 35): il fabbisogno annuale di energia primaria globale consumata risulta inferiore del -2.4%

In relazione alla *configurazione 2 – variante PCM*:

- il pacchetto verde + B\_PCM35 presenta i consumi maggiori in termini di energia primaria globale annua, rispetto ai pacchetti verde + P\_PCM 35 e verde + SH\_PCM 31, anche se questo non corrisponde a quanto rilevato sperimentalmente (alcuni valori di entalpia di fusione, assunti da scheda tecnica sono da verificare, è previsto di effettuare una DSC per tutti i campioni)
- rispetto al caso di riferimento R\_verde, tutte e 3 le tecnologie con PCM presentano un incremento del fabbisogno di energia primaria per riscaldamento (range: +143.5-147.3%) e illuminazione (+6.0%) e un decremento del fabbisogno di energia primaria per raffrescamento (range: -4.5-8.3%); il fabbisogno annuale di energia primaria globale consumata risulta superiore (range: +33.6-35.4%)

In relazione alla *configurazione – variante spessore (16 mm vs. 10 mm)*:

- l'inserimento di uno spessore maggiore (16 mm) di materiale a cambiamento di fase P\_PCM 35 determina, rispetto al caso dello stesso materiale in spessore 10 mm:
  - un decremento del -13.0% del fabbisogno annuale di energia primaria per riscaldamento
  - un decremento del -12.2% del fabbisogno annuale di energia primaria per raffrescamento
  - un incremento del 14.5% del fabbisogno annuale di energia primaria per illuminazione
  - un decremento del 7.2% del fabbisogno annuale di energia primaria globale consumata (heating + cooling + lighting).



## 5 Conclusioni

La ricerca condotta al fine di verificare le potenzialità di abbattimento dei carichi solari di un dispositivo schermante contenente Phase Change Materials, preservando al contempo l'ingresso di luce naturale in ambiente, ha evidenziato alcune potenzialità ma anche numerose criticità.

I dati ottenuti hanno dimostrato che il sistema ha una buona potenzialità nel ridurre i carichi di raffrescamento (in condizioni ideali si arriva ad un abbattimento del 30% delle energie giornaliere entranti) ma in condizioni specifiche non così ricorrenti sul lungo periodo. Il comportamento è infatti molto variabile in funzione delle condizioni microclimatiche esterne.

In presenza di cielo sereno, temperature esterne superiori a 30°C portano ad un melting del PCM troppo rapido rendendo inutile se non peggiorativa la sua presenza nel policarbonato, considerato anche il fatto che quando il materiale è fuso la trasmissione solare del pannello subisce un incremento dell' 8%, come rilevato dalle misure spettrofotometriche in ENEA. Lo shift e abbattimento dei flussi termici superficiali non è molto elevato, anche in considerazione dello spessore ridotto del pannello (definito anche in base a considerazioni tecnologiche di movimentazione).

Risulta ad oggi ancora estremamente problematica (ad esclusione del biobased) la tenuta del materiale nel policarbonato. Termosaldatura e siliconi di vario tipo per alcuni composti paraffinici si sono rivelati inefficaci sul lungo periodo.

Ottime prestazioni di tenuta e comportamento sono state ottenute invece con il PCM biobased, di cui però in letteratura è presente ancora poca documentazione scientifica in relazione alla durabilità.

Dal punto di vista della prestazione energetica globale (riscaldamento/raffrescamento/illuminazione) dalle simulazioni emerge che il sistema non si rivela particolarmente efficace nella configurazione testata a temperatura di fusione unica, mentre l'accoppiamento di più lastre con temperature diverse renderebbe il sistema maggiormente "adattivo" e performante.

In relazione ai risultati ottenuti si ritiene quindi che sia utile perseguire in questa direzione ma introducendo un livello di complessità maggiore nel sistema. Dal punto di vista energetico globale è necessario procedere ad una ottimizzazione, in termini soprattutto di utilizzo di PCM con più temperature di transizione, per non limitare la trasmissione luminosa e solare nel periodo invernale e nelle mezze stagioni (possibilità di fluidizzare i materiali nel pannello tramite slurry PCM, accoppiamenti di più lastre, tipologie, colori e spessori differenti) e identificando opportune strategie di accoppiamento, nel periodo di riscaldamento, con dispositivi di ventilazione, per il recupero o il preriscaldamento dell'aria in ingresso.

## 6 Riferimenti bibliografici

- [1] K.A.R. Ismail, J.R. Henríquez, "Thermally effective windows with moving phase change material curtains", *Applied Thermal Engineering*, 21 (2001), pp. 1909-1923
- [2] A.Hauer, H.Mehling, P. Schossig, M. Yamaha, L. Cabeza, V. Martin, F. Setterwall, "Annex 17. Advanced Thermal Energy Storage through Phase Change Materials and Chemical Reactions – Feasibility Studies and Demonstration projects". Final Report IEA on Implementing Agreement on Energy Conservation through Energy Storage, 2008
- [3] H. Weinsläder, A. Beck, J. Fricke, "PCM-facade-panel for daylighting and room heating", *Solar Energy*, 78 (2005), pp. 177-186
- [4] E.M. Halawadhi, "Using phase change materials in window shutter to reduce the solar heat gain", *Energy and Buildings*, 47 (2012), pp. 421-429
- [5] F. Goia, "Thermo-physical behaviour and energy performance assessment of PCM glazing system configurations: A numerical analysis", *Frontiers of Architectural Research*, 1 (2012), pp. 341-347.

- [6] L. Bianco, V. Serra, S. Fantucci, M. Dutto, M. Massolino, "Thermal insulating plaster as a solution for refurbishing historic building envelopes: First experimental results", *Energy and Buildings*, 95 (2015), pp. 86-91.
- [7] M. Zinzi, "Caratterizzazione e valutazione di materiali trasparenti innovativi e sistemi schermanti", RICERCA SISTEMA ELETTRICO, Report RSE/2009/9, marzo 2009.
- [8] V. Serra, F. Zanghirella, M. Perino, "Experimental evaluation of a climate façade: Energy efficiency and thermal comfort performance", *Energy and Buildings*, 42 (2010), pp. 50-62.
- [9] F. Goia, M. Zinzi, E. Carnielo, V. Serra, "Spectral and angular solar properties of a PCM-filled double glazing unit", *Energy and Buildings*, vol. 87 n. 1 (2015), pp. 302-312.
- [10] S. Iennarella, V. Serra, V.R.M. Lo Verso, "A novel concept of a responsive transparent façade module: optimization of energy performance through parametric design", 6th International Building Physics Conference, IBPC 2015, *Energy Procedia* (in press)
- [11] A. Komerskaa, V. Serra, L. Bianco, S. Fantucci, M. Rosińska, "Experimental analysis of an external dynamic solar shading integrating PCMs: first results", 6th International Building Physics Conference, IBPC 2015, *Energy Procedia* (in press)

## 7 Nomenclatura

|                 |  |
|-----------------|--|
| A               | area [m <sup>2</sup> ]   |
| $D(\lambda)$    | Distribuzione spettrale relativa dell'illuminante D65                |
| E               | illuminamento [lux]  |
| $E_{tot}$       | energia giornaliera totale [Wh/m <sup>2</sup> ]                      |
| $\dot{Q}$       | flusso termico [W]   |
| $\dot{q}$       | flusso termico specifico [W/m <sup>2</sup> ]                         |
| $\dot{q}_{tot}$ | flusso termico specifico totale [W/m <sup>2</sup> ]                  |
| g               | fattore solare [-]   |
| H               | irraggiamento solare [Wh/m <sup>2</sup> ]                            |
| s               | spessore [m]   |
| $S(\lambda)$    | Distribuzione spettrale normalizzata della radiazione solare globale |
| $V(\lambda)$    | Curva di visibilità relativa dell'occhio umano                       |
| $U_g$           | trasmittanza del vetro [W/m <sup>2</sup> K]                          |
| V               | orientamento degli alveoli verticali                                 |
| $\Delta t$      | differenza di temperatura [°C]                                       |
| $\lambda_{eq}$  | conducibilità termica [W/mK]   |
| $\rho$          | riflessione [-]  |
| $\tau$          | trasmissione [-]   |
| $\alpha$        | assorbimento [-]   |

### Pedici

|   |          |
|---|----------|
| v | luminosa |
| e | solare   |

### Abbreviazioni e acronimi

|     |                         |
|-----|-------------------------|
| PC  | policarbonato           |
| PCM | Phase Change Material   |
| P   | paraffin based          |
| B   | bio based               |
| SH  | salt hydrate based      |
| HF  | Heat Flux               |
| S   | solarimetro/piranometro |

## 8 Indice delle figure

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 Lastre in policarbonato alveolare .....   | 6  |
| Figura 2 <i>Garage Museum of Contemporary Art</i> , Rem Koolhaas 2015 (credit Sergey Norin, flickr) a). .....  | 7  |
| Figura 3 – Provini dei diversi PCM utilizzati nella sperimentazione. ....  | 11 |
| Figura 4 Rappresentazione schematica del passaggio di fase dei PCM .....   | 12 |
| Figura 5 Schede tecniche dei PCM a base di paraffina.....  | 16 |
| Figura 6 Schede tecniche dei PCM a base di Sali idrati .....   | 17 |
| Figura 7 Scheda tecnica Bio PCM. ....  | 17 |
| Figura 8 Sigillatura con silicone acetico degli alveoli di un pannello in policarbonato .....  | 19 |
| Figura 9 Sigillatura con silicone inserito attraverso un foro praticato sul fondo degli alveoli di un pannello in policarbonato .....  | 19 |
| Figura 10 Sigillatura con silicone acrilico inserito in un binario di plastica in cui viene fissata l'estremità termosaldata di un pannello in policarbonato alveolare .....   | 20 |
| Figura 11 Riempimento del pannello in policarbonato alveolare con materiale a cambiamento di fase .....  | 21 |
| Figura 12 Schema variabili di progetto.....  | 22 |
| Figura 13 I pannelli in policarbonato delle diverse colorazioni vuoti. Da sinistra: Opale, Verde, Cristallo e Blu. ....  | 23 |
| Figura 14 Configurazione 1-variante colore con PCM a base paraffina, temperatura di fusione 35°C. ....   | 23 |
| Figura 15 Configurazione 2 variante PCM pannelli verdi. Da sinistra pannello Verde_B_PCM_35, Verde_P_PCM_35, Verde_SH_PCM_31 e pannello vuoto verde.....   | 23 |
| Figura 16 Configurazione 3 variante temperatura di fusione del PCM. Da sinistra Blu P_PCM 35, Blu P_PCM 44 e Blu vuoto.....  | 23 |
| Figura 17 Quadro di sintesi delle misure effettuate.....   | 25 |
| Figura 18 Piastra calda con anello di guardia. ....  | 27 |
| Figura 19 Risultato della prova su pannello vuoto opale. ....  | 27 |
| Figura 20 Risultato della prova su pannello vuoto in cristallo. ....   | 28 |
| Figura 21 Risultato della prova su pannello B_PCM_35.....  | 28 |
| Figura 22 Risultato della prova su pannello SH_PCM_31.....   | 29 |
| Figura 23 Risultato della prova su pannello P_PCM_35.....  | 29 |
| Figura 24 Risultato della prova su pannello P_PCM_44.....  | 30 |
| Figura 25 Quadro riassuntivo dei risultati di conducibilità termica. ....  | 30 |
| Figura 26 Quadro riassuntivo dei valori di conducibilità termica misurati. ....  | 31 |
| Figura 27 L'apparecchiatura di misura a sinistra in modalità trasmissione e a destra in modalità riflessione. 1- sorgente luminosa, 2- sample port, 3-connessione con il sistema di acquisizione 4-port ausiliaria 5- port per misure di riflessione. .... | 32 |
| Figura 28 Fattore di trasmissione visibile pannelli vuoti per diversi angoli di incidenza al variare dell'orientamento degli alveoli, orizzontali e verticali (V).....   | 33 |
| Figura 29 Fattore di trasmissione solare pannelli vuoti per diversi angoli di incidenza al variare dell'orientamento degli alveoli, orizzontali e verticali (V).....   | 34 |
| Figura 30 Confronto tra PCM base paraffina e base BIO, in pannello verde, stato solido e liquido.....  | 35 |
| Figura 31 Stato liquido, pannello verde con bio PCM. Misura spettrale angolo di incidenza 0° e 60° per alveoli orizzontali e verticali. ....   | 35 |
| Figura 32 Test cell con i soli vetrocamera vista interna ed esterna. ....  | 36 |
| Figura 33 Sistema di telai di ancoraggio alla cella di prova .....   | 37 |
| Figura 34 Schema e foto della configurazione 1 .....   | 38 |
| Figura 35 Schema e foto della configurazione 2 .....   | 39 |
| Figura 36 Fotogrammi delle fasi di solidificazione e scioglimento del PCM delle due configurazioni.....  | 40 |
| Figura 37 Configurazione 1. Analisi della transizione di fase. Policarbonato alveolare verde contenente P_PCM 35 a). Policarbonato alveolare blu contenente P_PCM 35 b). Policarbonato alveolare opale contenente P_PCM 35 c). ....                        | 41 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 38 Configurazione 2. Analisi della transizione di fase. Policarbonato alveolare verde contenente SH_PCM 31 a). Policarbonato alveolare verde contenente B_PCM 35 b). Policarbonato alveolare verde contenente P_PCM 35 c). ..... | 42 |
| Figura 39 Termoflussimetro e termocoppie a). La posizione dei solarimetri del pannello C b) e c).....   | 43 |
| Figura 40 Posizione dei sensori sulle specchiature e sui pannelli della cella di prova .....  | 44 |
| Figura 41 Dettaglio delle singole specchiature e posizione dei sensori. ....  | 45 |
| Figura 42 Condizioni al contorno delle giornate di misura della configurazione 1. ....  | 47 |
| Figura 43 Andamento giornaliero, orario del coefficiente di trasmissione solare. ....   | 48 |
| Figura 44 Andamento giornaliero del fattore di trasmissione luminosa configurazione 1.....  | 49 |
| Figura 45 Configurazione 1. Radiazione solare trasmessa attraverso il vetrocamera + il sistema schermante (S_A_I, S_B_I, S_C_I e S_R_I) e attraverso il solo sistema schermante (S_C). ....   | 50 |
| Figura 46 Configurazione 1. Flussi termici trasmessi attraverso il vetrocamera + il sistema schermante (HF_A_I, HF_B_I, HF_C_I e HF_R_I). ....  | 50 |
| Figura 47 Configurazione 1. Temperature superficiali interne del vetrocamera con le diverse tipologie di schermatura. ....  | 51 |
| Figura 48 Configurazione 1. Energie totali giornaliere che attraversano globalmente vetrocamera + pannello schermante.....  | 52 |
| Figura 49 Configurazione 1. Radiazione solare trasmessa. ....   | 53 |
| Figura 50 Configurazione 1. Flussi termici superficiali. ....   | 53 |
| Figura 51 Configurazione 1. Temperature superficiali interne del vetrocamera con le diverse tipologie di schermatura. ....  | 54 |
| Figura 52 Configurazione 1. Temperature superficiali interne della schermatura per le diverse tipologie di schermatura. ....  | 54 |
| Figura 53 Condizioni al contorno delle giornate di misura della configurazione 2. ....  | 55 |
| Figura 54 Condizioni al contorno delle giornate di misura della configurazione 2. ....  | 55 |
| Figura 55 Andamento giornaliero, orario del coefficiente di trasmissione solare configurazione 2. ....  | 56 |
| Figura 56 Andamento giornaliero del coefficiente di trasmissione luminosa configurazione 2. ....  | 57 |
| Figura 57 Configurazione 2. Radiazione solare trasmessa attraverso il vetrocamera + il sistema schermante (S_A_I, S_B_I, S_C_I e S_R_I) e attraverso il solo sistema schermante (S_C). ....   | 58 |
| Figura 58 Configurazione 2. Flussi termici trasmessi attraverso il vetrocamera + il sistema schermante (HF_A_I, HF_B_I, HF_C_I e HF_R_I). ....  | 59 |
| Figura 59 Configurazione 2. Temperature superficiali interne del vetrocamera con le diverse tipologie di schermatura. ....  | 60 |
| Figura 60 Configurazione 2. Energie totali giornaliere che attraversano globalmente vetrocamera + pannello schermante.....  | 61 |
| Figura 61 Configurazione 2. Radiazione solare trasmessa. ....   | 62 |
| Figura 62 Configurazione 2. Flussi termici superficiali. ....   | 62 |
| Figura 63 Configurazione 2. Temperature superficiali interne del vetrocamera con le diverse tipologie di schermatura. ....  | 63 |
| Figura 64 Configurazione 1. Temperature superficiali interne della schermatura per le diverse tipologie di schermatura. ....  | 63 |
| Figura 65 immagini dello strumento di misura e schema delle acquisizioni.....   | 64 |
| Fig. 66 Visual scripting: definizione del modello geometrico e tools di simulazione energetica (Energy Plus e Daysim) in ambiente Grassopper. ....  | 76 |
| Fig. 67 Modello utilizzato per le analisi energetiche integrate. ....   | 76 |
| Fig. 68 Confronto fra flussi globali simulati e misurati per la configurazione 1 – variante: colore (giornata serena, elevate temperature esterne) .....  | 79 |
| Fig. 69 Confronto fra flussi globali simulati e misurati per la configurazione 2 – variante: PCM (giornata serena, elevate temperature esterne) .....   | 79 |
| Fig. 70 Confronto fra flussi termici superficiali simulati e misurati per la configurazione 2 – variante: PCM – .....   | 80 |

|   |    |
|---|----|
| Fig. 71 Fabbisogni di energia primaria su base annua.....   | 81 |
| Fig. 72 Fabbisogni di energia primaria per raffrescamento su base mensile.....  | 81 |
| Fig. 73 Fabbisogni di energia primaria per raffrescamento su base giornaliera (21 giugno).....  | 82 |
| Fig. 74 Fabbisogni di energia primaria per per illuminazione su base giornaliera (21 giugno).....                                     | 82 |
| Fig. 75 Fabbisogni annuale di energia primaria per raffrescamento .....   | 82 |
| Fig. 76 Fabbisogni di energia primaria su base annua.....   | 83 |
| Fig.77 Fabbisogni di energia primaria per raffrescamento su base mensile.....   | 83 |
| Fig.78 Fabbisogni di energia primaria per raffrescamento su base giornaliera (21 giugno).....   | 84 |
| Fig.79 Fabbisogni di energia primaria per per illuminazione su base giornaliera (21 giugno).....                                      | 84 |
| Fig.80 Fabbisogni annuale di energia primaria per raffrescamento) .....   | 84 |
| Fig.81 Comportamento dinamico di PC verde vuoto e riempito con due diversi PCM rispetto ad una vetrata con vetrocamera semplice ..... | 85 |
| Fig.82 Fabbisogni di energia primaria su base annua .....   | 86 |
| Fig.83 Fabbisogni di energia primaria per raffrescamento su base mensile.....   | 86 |
| Fig.84 Fabbisogni di energia primaria per raffrescamento su base giornaliera (21 giugno).....   | 87 |
| Fig.85 Fabbisogni di energia primaria per illuminazione su base giornaliera (21 giugno) .....   | 87 |
| Fig.86 Fabbisogni annuale di energia primaria per raffrescamento .....  | 87 |

GRUPPO DI RICERCA POLITECNICO DI TORINO

Gli autori afferenti al Politecnico di Torino, appartengono al gruppo di ricerca TEBE del Dipartimento Energia ([www.tebe.polito.it](http://www.tebe.polito.it)), in particolare Valentina Serra (professore associato di Fisica Tecnica Ambientale) Lorenza Bianco (PhD, assegnista post doc), Simone Iennarella (borsista laureato) e Ilaria Vigna (MSc Student) fanno capo all'Unità di Ricerca Building Envelope, Valerio Lo Verso (ricercatore di Fisica Tecnica Ambientale) lavora nell'UR Lighting.