

# Sistemi di copertura che riducono il fabbisogno energetico

**Verificate dall'Istituto di ricerca ITC-CNR le prestazioni di diverse tipologie coibentate e ventilate in condizioni estive**

Le sempre maggiori esigenze di comfort stanno rendendo la climatizzazione estiva, anche degli edifici residenziali, una soluzione di normale pratica costruttiva.

Ovviamente il condizionamento dell'aria comporta un considerevole aumento dei consumi energetici dovuto ai carichi ambientali esterni ed interni indotti.

La prima azione per migliorare le prestazioni dell'edificio in condizioni estive è quindi di ridurre il fabbisogno energetico determinato inizialmente dalle soluzioni di involucro utilizzate.

Di seguito sono presentati i risultati delle sperimentazioni condotte nell'ambito di un contratto di ricerca tra ITC-CNR e MAZZONETTO SPA finalizzato alla valutazione del sistema di copertura denominato "LARES<sup>®</sup> PLUS". Sono state verificate le prestazioni di differenti tipologie di copertura ventilata, in un contesto reale di funzionamento e definite specifiche valutazioni analitiche.

## 1) I campioni considerati per le analisi

Il sistema di copertura oggetto delle analisi è costituito da:

- canale di base composto da sagoma in rame spessore 6/10 mm (o alluminio) accoppiato al pannello isolante in polistirene espanso sinterizzato 30 kg/m<sup>3</sup> fornito

in pezzi da 2,10 m cadauno;

- modulo di copertura profilato e stampato in laminato di rame naturale spessore 6/10 mm (o alluminio) accoppiato al pannello isolante e ventilato in polistirene espanso sinterizzato stampato con densità pari a 30 kg/m<sup>3</sup> in n° di 3 moduli al m<sup>2</sup> (fig. 1 e fig. 2);
- ancoraggio del canale di base Plus sul piano di posa, in relazione alla tipologia dello stesso;
- fissaggio dei moduli LARES<sup>®</sup> PLUS sul canale di base Plus con viti di cucitura in acciaio inox AISI 304 di lunghezza 20 mm, in n° 6 al m<sup>2</sup>;
- rete di ventilazione per sistema LARES<sup>®</sup> PLUS in laminato di rame naturale spessore 6/10 mm (o alluminio) e relativi fissaggi a seconda della tipologia del piano di posa.

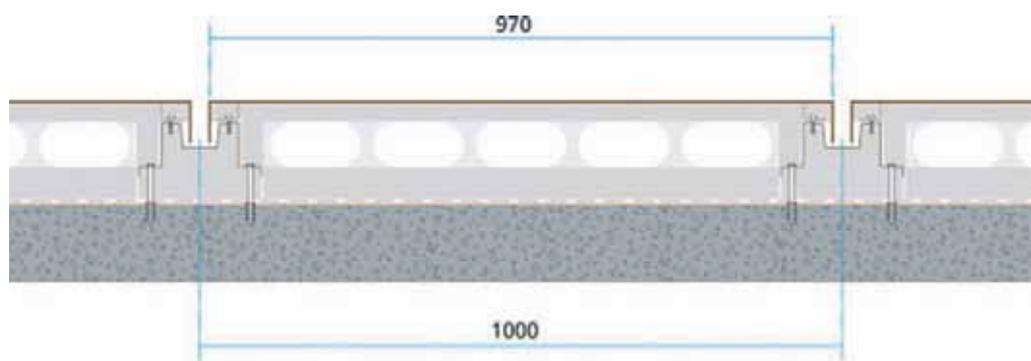


Fig. 1 - Sezione trasversale del sistema LARES<sup>®</sup> PLUS;  
Fig. 2 - Sezione longitudinale di un modulo LARES<sup>®</sup> PLUS

La stratigrafia del componente è costituita da:

- strato di isolamento termico in polistirene espanso densità 30 kg/m<sup>3</sup>, spessore 5 cm;
- strato di ventilazione, spessore 6,5 cm; strato di irrigidimento, spessore medio 2,5 cm;
- manto di copertura in metallo, spessore 6/10 mm per il rame e 7/10 per l'alluminio.

I parametri che caratterizzano il sistema sono:

- sezione ventilata continua, area 406 cm<sup>2</sup>/m;
- canali di ventilazione, altezza minima 6,5 cm;
- peso del sistema: finiture rame e zinco-titanio 11 kg/m<sup>2</sup>, finitura alluminio 7 kg/m<sup>2</sup>.

Il sistema di copertura testato presentava tre variabili principali:

- il tipo di finitura (in alluminio o in rame);
- il tipo di griglia di protezione antinsetti sia in corrispondenza della linea di gronda che di colmo dell'intercapedine ventilata (con fori, con asole);
- la presenza di ventilazione nell'intercapedine.

La combinazione di queste variabili ha prodotto diverse configurazioni, che sono state valutate per confronto rispetto ad una copertura ventilata definita "tradizionale" con la medesima stratigrafia di base di quella in prova: struttura di supporto e materiale isolante, ma finitura in tegole cementizie.

Le configurazioni analizzate sono riportate

in tab. 1.

Gli indicatori prestazionali per le valutazioni termo-energetiche previste sono riportati nella tab. 2

## 2) Descrizione dell'approccio metodologico utilizzato

La sperimentazione è stata condotta parallelamente sia in opera, misurando direttamente specifici indicatori prestazionali, sia con metodi analitici, calcolando le variabili non direttamente misurabili, al fine di estendere la valutazione delle prestazioni del sistema in esame anche a casi differenti da quelli analizzati.

### a) descrizione delle celle di prova

Relativamente alla verifica prestazionale in opera presso l'ITC di San Giuliano Milanese sono state appositamente realizzate, monitorate e climatizzate celle di prova di dimensioni 3,00 x 5,00 x 2,70 m, costituite da blocchi isolati e struttura del tetto con orditura in legno.

Le celle sono state realizzate in opera nelle stesse modalità e con i medesimi dettagli costruttivi al fine di evitare variazioni prestazionali non controllabili nella fase di sperimentazione.

Pavimento e pareti sono composti da pannelli isolanti che garantiscono un adeguato isolamento termico, la porta di ingresso (isolata) è sulla parete nord e su un assito in legno sono fissate le coperture con inclina-

Configurazione	1 <sup>a</sup> Cella			2 <sup>a</sup> Cella		
	Finitura della copertura	Ventilazione	Griglia	Finitura della copertura	Ventilazione	Griglia
Calibrazione	Alluminio	Sì	Fori	Alluminio	Fori	Sì
1	Alluminio	Sì	Fori	Alluminio	Asole	Sì
2	Alluminio	Sì	Fori	Tradizionale	Fori	Sì
3	Rame	Sì	Fori	Tradizionale	Fori	Sì
4	Rame	No	Fori	Tradizionale	Fori	Sì
5	Rame	Sì	Asole	Tradizionale	Fori	Sì

Tab. 1 - Elenco delle configurazioni sperimentali

Tipologie di analisi	Indicatore prestazionale	Unità di misura
Analisi energetiche	Consumi energia elettrica cumulati	kWh/g
Analisi fluidodinamiche	Velocità media intercapedine	m/s
	Temperatura media intercapedine	°C
	Calore asportato	kJ/h
Analisi termiche	PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied)	-

Tab. 2 - Indicatori prestazionali scelti per le analisi

Fig. 3 - Alcune fasi del montaggio

zione del 30%. Le pareti verticali esterne sono state rasate con intonaco e il pavimento è stato impermeabilizzato con materiali idonei. Nelle quattro immagini che compongono la fig. 3 sono evidenziate alcune fasi della costruzione.

Nelle celle di prova sono stati installati dis-

- monitoraggio interno
  - temperatura ambiente;
  - temperatura superficiale del soffitto;
  - temperatura operativa;
  - umidità relativa;
  - consumi di energia elettrica;
- monitoraggio dei sistemi di copertura nel-



Fig. 3

positivi di termostatazione della temperatura ambiente interna che controllano, nella stagione estiva, un apposito sistema di climatizzazione.

Le celle sono adeguatamente ventilate per assicurare l'omogeneizzazione della temperatura dell'aria interna e per evitare stratificazioni. Sono inoltre state calibrate e attrezzate per la valutazione delle prestazioni delle differenti configurazioni di copertura ventilata, per confronto rispetto al sistema di riferimento.

#### b) descrizione sistema di acquisizione

Per la conduzione delle analisi sono stati considerati i seguenti parametri:

- monitoraggio esterno
  - velocità e direzione del vento lungo le componenti cartesiane  $u, v, w$ ;
  - temperatura;
  - umidità relativa;
  - irraggiamento solare sul piano della copertura;

l'intercapedine

- velocità dell'aria;
- temperatura dell'aria;
- pressione dell'aria.

#### c) conduzione delle analisi

Precedentemente alla sperimentazione vera e propria è stata condotta la calibrazione delle celle di prova, con l'obiettivo di verificare che i valori della contribuzione energetica globale  $Cg^*$  delle due celle nelle medesime configurazioni (copertura, involucro verticale, impianto) fossero uguali. In questa fase, su entrambe le celle, è stato montato il sistema di copertura con finitura in alluminio. La prova ha richiesto l'utilizzo di sistemi di climatizzazione, di cui sono stati confrontati i consumi necessari per sottrarre calore dalle celle e mantenere la temperatura di termostatazione impostata. Verificata tale analogia in termini del parametro citato, è stato possibile installare i sistemi di copertura con finitura metallica e

quello di riferimento e condurre le analisi per confronto.

#### d) procedura di valutazione delle prestazioni energetiche

Allo scopo di confrontare le prestazioni delle celle di prova sulle quali erano montati sistemi di copertura differenti è stata valutata la contribuzione energetica globale necessaria a mantenere le celle in condizioni di termostatazione a 24 °C. La contribuzione energetica ha le caratteristiche dimensionali del coefficiente volumico globale di dispersione termica, ed è definita con l'equazione riportata di seguito.

dove:

$$Cg^* = \frac{q}{h \cdot V \cdot \Delta T}$$

$Cg^*$  = coefficiente volumico di contribuzione energetica ( $W/m^3°C$ );

$q$  = energia di contribuzione per la durata del rilievo (Wh);

$h$  = durata dei rilievi (h);

$V$  = volume della cella ( $m^3$ );

$\Delta T$  = differenza media fra la temperatura interna ed esterna durante il periodo di rilievo considerato ( $°C$ ).

Per verificare l'analogia del comportamento termico ed energetico delle due celle sono stati inoltre rilevati e confrontati i dati, relativi alle condizioni ambientali indoor e al consumo, in termini di pendenza della retta di interpolazione delle coppie di valori "consumi cumulati/gradi ora estivi cumulati", calcolati con l'equazione riportata di seguito.

dove:

$$GH_e = \bar{T}_{sa} - T_b$$

$GH_e$  = gradi ora estivi;

$\bar{T}_{sa}$  = temperatura media sole-aria in un'ora ( $°C$ );

$T_b$  = temperatura media interna nell'intero periodo ( $°C$ ).

La temperatura media sole-aria, indicatore prestazionale della quantità di calore che un corpo (dato il coefficiente di assorbimento della radiazione solare della finitura) è in grado di assorbire, è calcolata secondo l'equazione riportata di seguito.

$$\bar{T}_{sa} = T_e + \frac{\alpha I}{h_e}$$

dove:

$T_e$  = temperatura media esterna in un'ora ( $°C$ );

$\alpha$  = coefficiente di assorbimento della finitura esterna (-);

$I$  = irraggiamento medio in un'ora ( $W/m^2$ );

$h_e$  = coefficiente liminare superficie esterna ( $W/m^2K$ ).

#### e) procedura di calcolo delle caratteristiche fluidodinamiche

L'aria all'interno dell'intercapedine assorbe il calore captato dal rivestimento esterno e per effetto camino si genera un moto convettivo naturale.

Tuttavia solo la parte di fluido a contatto con le pareti scambia calore attivamente con esse; inoltre è facile intuire come l'aria non abbia una temperatura uniforme lungo la sezione trasversale dell'intercapedine, ma distribuita puntualmente in maniera complessa.

È possibile valutare la capacità del componente ventilato di asportare calore attraverso l'intercapedine, e quindi di ridurre gli apporti gratuiti e contribuire di conseguenza a mantenere un livello di comfort migliore, attraverso l'equazione riportata di seguito.

$$Q_a = c_p p_s S \bar{v} (T_u - T_e)$$

dove:

$c_p$  = calore specifico dell'aria ( $kJ/kgK$ );

$p_s$  = peso specifico ( $kg/m^3$ );

$S$  = superficie ( $m^2$ );

$\bar{v}$  = velocità media in un'ora ( $m/s$ );

$T_u$  = temperatura media in uscita dall'intercapedine in un'ora ( $°C$ );

$T_e$  = temperatura media esterna in un'ora ( $°C$ ).

#### f) comfort termo-igrometrico

Per definire il comfort termo-igrometrico di un ambiente si è fatto riferimento alla norma UNI EN ISO 7730.

La norma definisce la procedura per determinare la sensazione termica in funzione del bilancio di energia termica sul corpo umano visto nel suo complesso.

Tale bilancio è influenzato dall'attività fisica e dall'abbigliamento, oltre che dai seguenti parametri ambientali: temperatura dell'aria, temperatura media radiante, velocità ed umidità dell'aria.

Quando questi parametri sono stati tutti misurati o stimati, si può prevedere la sensazione termica per il corpo nel suo complesso calcolando l'indice PMV (voto medio previsto dall'inglese "Predicted Mean Vote").

L'indice PPD (percentuale prevista di insoddisfatti dall'inglese "Predicted Percentage of Dissatisfied") fornisce invece informazioni sul disagio termico, o malessere termico, prevedendo la percentuale di per-

sono che percepirebbe una sensazione di discomfort in un certo ambiente. Il PPD può essere ottenuto a partire dal PMV.

### 3) Risultati delle analisi sperimentali

A titolo esemplificativo si riportano alcuni dei risultati del periodo sperimentale che prevedeva il confronto tra una cella (C6) con copertura ventilata con finitura in alluminio e una cella (C5) con copertura ventilata tradizionale (finitura esterna in tegole modello "Coppo di Francia") come mostrato in fig. 4.

### a) analisi energetiche

Il grafico in fig. 5 riporta il valore di  $C_g^*$  calcolato considerando il consumo cumulato e i valori medi delle temperature dalle ore 10 alle ore 16 dei giorni scelti per le analisi.

Esso evidenzia come all'aumentare dell'irraggiamento medio diurno la cella con copertura metallica assorba mediamente meno calore rispetto alla cella con copertura tradizionale ( $C_g^*$  minore).

Mettendo in relazione i consumi orari cumulati rispetto ai gradi ora su tutto il perio-



Fig. 4 - Le due coperture a confronto

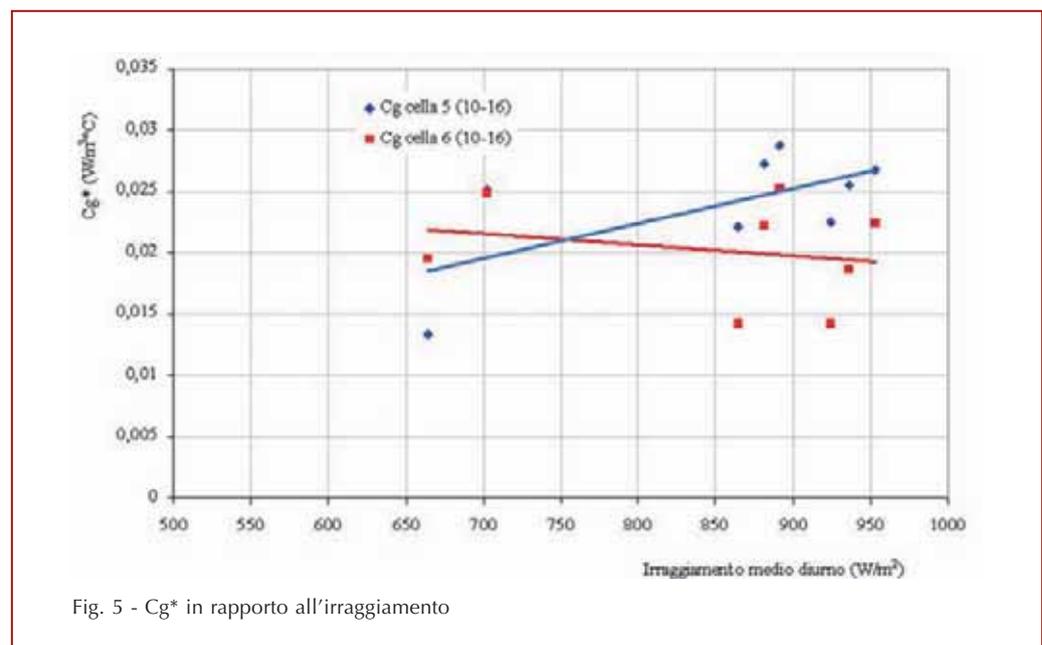


Fig. 5 -  $C_g^*$  in rapporto all'irraggiamento

do relativo a questa configurazione, si può notare nel grafico riportato in fig. 6 un andamento divergente tra i comportamenti energetici delle due celle.

Infatti, all'aumentare dei gradi ora cumulati e i consumi energetici cumulati della cella 6, sulla quale è montata la copertura metallica, sono risultati inferiori di una percentuale pari al 20% circa rispetto a quelli della cella 5 (copertura tradizionale).

Nel grafico di fig. 7 i consumi cumulati sono rapportati ai gradi ora con riferimento alla temperatura sole-aria, che tiene conto

della temperatura esterna, dell'irraggiamento e del coefficiente di assorbimento della finitura esterna della copertura.

Il grafico evidenzia come la copertura in alluminio assorba meno calore (lo si deduce dai ridotti gradi-ora cumulati), per via del ridotto coefficiente di assorbimento dell'alluminio ( $\alpha = 0,07$ ) rispetto a quello delle tegole ( $\alpha = 0,92$ ), e di conseguenza produca un minore carico sull'impianto e minori consumi di energia elettrica per raffrescare l'ambiente interno corrispondente.

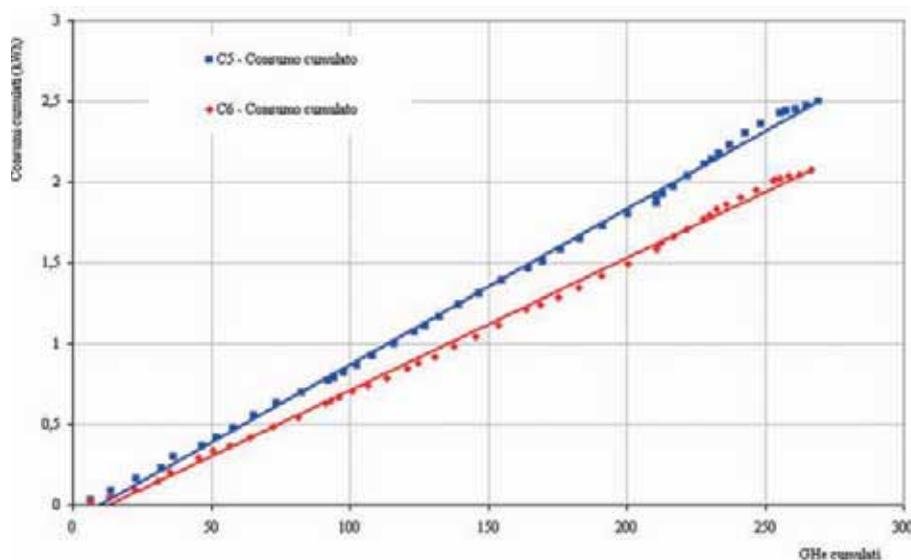


Fig. 6 - Andamento dei consumi orari cumulati relativi alla temperatura esterna (configurazione 2)

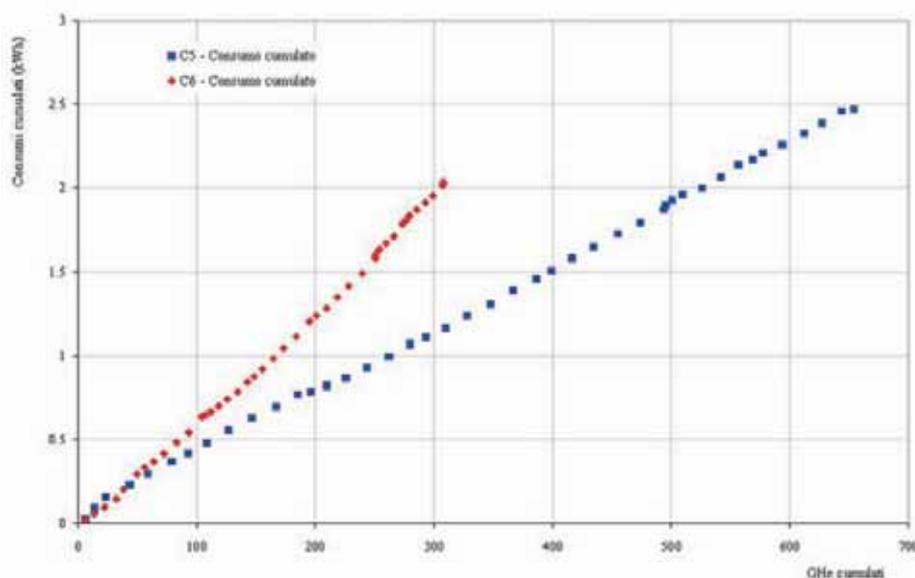


Fig. 7 - Andamento dei consumi orari cumulati relativi alla temperatura sole-aria (configurazione 2)

### b) analisi termo-fluidodinamiche

Nel grafico di fig. 8 sono riassunte le velocità e le temperature medie nelle intercapedini delle due coperture, riferite ad un giorno tipo (nello specifico il 22 agosto).

La temperatura media nell'intercapedine del tetto tradizionale raggiunge di circa 44 °C contro i 38 °C della copertura in alluminio. Come già detto, il diverso coefficiente di assorbimento delle due finiture comporta una notevole differenza tra la quantità di energia assorbita che produce un diverso surriscaldamento dell'intercapedine e di conseguenza una diversa temperatura superficiale dell'intradosso del pacchetto di copertura. Si nota infine una temperatura inferiore del soffitto della copertura in alluminio che si traduce in migliori condizioni di comfort

e minore consumo di energia elettrica.

Il grafico in fig. 9 mostra l'andamento del calore asportato e cioè dell'energia contenuta nell'aria che passa all'interno delle intercapedini.

In questa configurazione, asportare più calore non significa consumare meno energia per la climatizzazione, perché come abbiamo visto questo parametro dipende fortemente dal coefficiente di assorbimento della finitura esterna e quindi dal calore assorbito dall'intercapedine.

È utile notare che, nelle prime ore della giornata, la copertura metallica si riscalda molto più rapidamente di quella tradizionale (per via della finitura metallica), producendo di conseguenza moti convettivi più elevati, che consentono quindi all'intercapedine di asportare più calore, nonostante

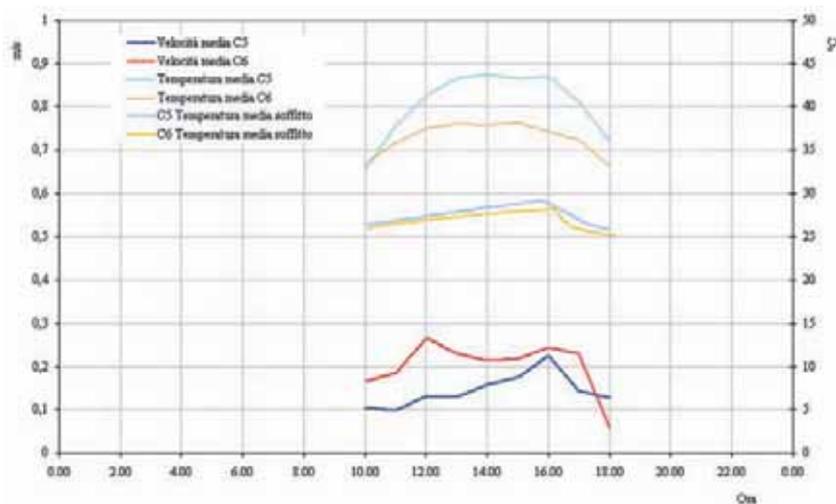


Fig. 8 - Confronto tra le temperature e velocità in intercapedine

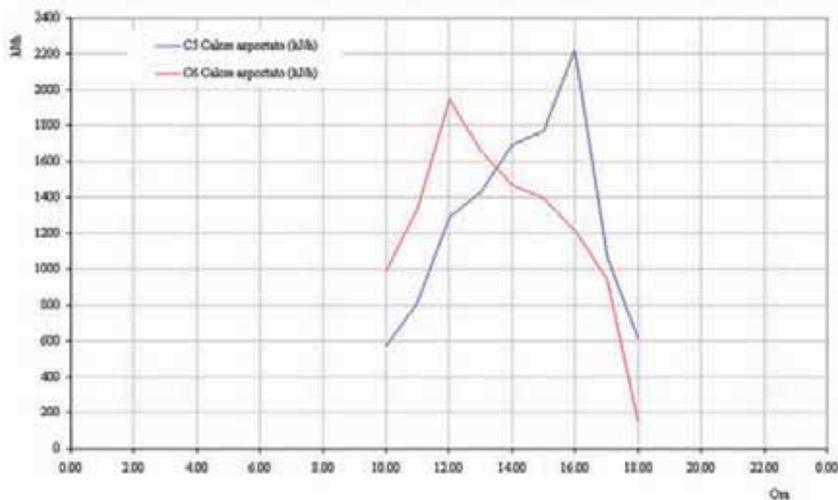


Fig. 9 - Andamento del calore asportato dalle intercapedini

un coefficiente di assorbimento della finitura esterna più ridotto.

**c) analisi termo-igrometriche**

I grafici seguenti sono un'esemplificazione dell'intero periodo sperimentale.

Essi riportano le misure rilevate nelle ore di massima insolazione (dalle 8.00 alle 20.00) e nei giorni più rappresentativi e significativi, che descrivono al meglio le prestazioni del componente di copertura dinamico. Dall'analisi parametrica sulle variabili che influenzano il calcolo del comfort termo-igrometrico, si evince che all'aumentare della temperatura operativa dell'ambiente interno, il PPD aumenta più che proporzionalmente (grafico di fig. 10). Sarà quindi questa variabile che differen-

zierà maggiormente il comfort indotto nelle due celle.

Il grafico riportato in fig. 11 è relativo al confronto tra le due soluzioni e definisce il comfort termo-igrometrico delle due celle in condizioni stazionarie, ovvero in condizioni di regime costante dei flussi energetici tra interno ed esterno, riferite ad un giorno tipo (nello specifico il 6 agosto).

All'aumentare dell'irraggiamento e soprattutto della temperatura esterna, si ha un peggioramento più evidente del comfort della cella su cui è montata la copertura di riferimento rispetto alla cella su cui è montato il sistema in prova con finitura in alluminio. Tale discrepanza è nulla intorno alle 8.00 e aumenta durante l'arco della

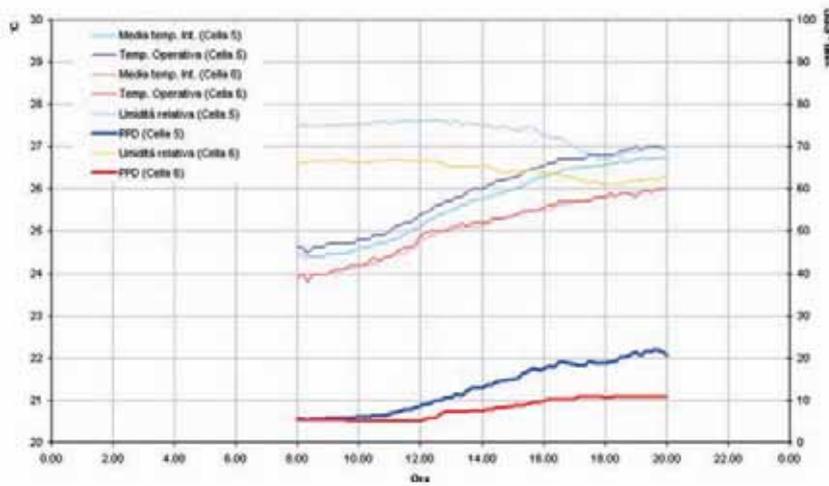


Fig. 10 - Relazione tra le variabili caratteristiche del comfort termo-igrometrico

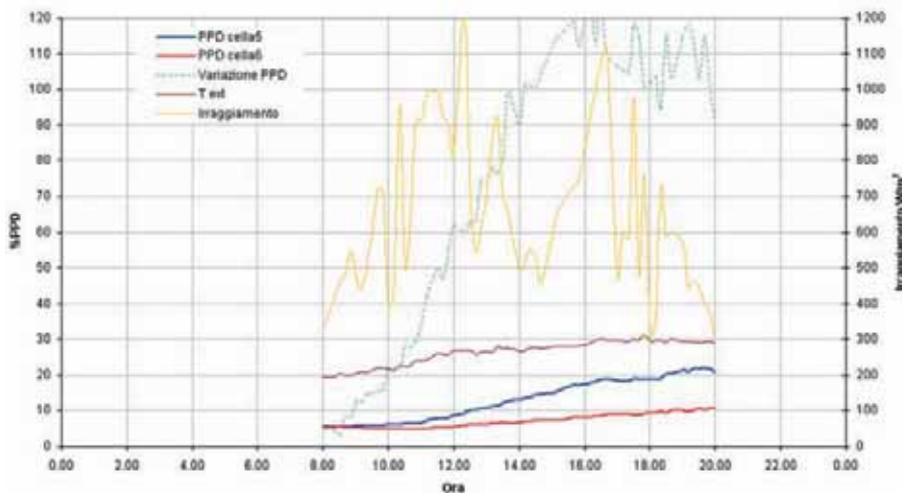


Fig. 11 - Confronto fra le due soluzioni

giornata fino ad un valore massimo intorno al 120%.

Nel grafico di fig. 12 invece si può notare la dipendenza pressoché lineare tra la variazione dei PPD delle due celle e la temperatura esterna.

La pendenza della retta di regressione determina un aumento dell'11% dell'indice PPD per ogni grado di incremento della temperatura esterna.

Il confronto di vari giorni, in condizioni di cielo completamente sereno, mostra un comportamento termico del sistema con finitura in alluminio in linea con quanto espresso precedentemente, dimostrando che l'inclinazione della retta, e quindi il significato fisico associato, è una caratteristica propria del componente campione rispetto ad un tetto ventilato con finitura in tegole.

#### 4) Considerazioni generali sulla sperimentazione

##### a) valutazioni termo-fluidodinamiche

Al di sotto di una velocità del vento limite la velocità nelle intercapedini è indipendente dalle condizioni esterne. Il grafico in fig. 13 sintetizza l'analisi di sensibilità della variazione della velocità dell'intercapedine in funzione della velocità del vento riferita ad un giorno tipo (nello specifico il 30 agosto), rappresentativo del comportamento fluidodinamico di intercapedini ventilate esposte ad un vento con velocità elevate con direzione prevalente nord-sud.

Al di sopra di una velocità del vento limite (tra 0,5 e 0,7 m/s) la velocità nelle intercapedini dipende dalle condizioni esterne, come si nota in maniera evidente dalle misure sperimentali condotte.

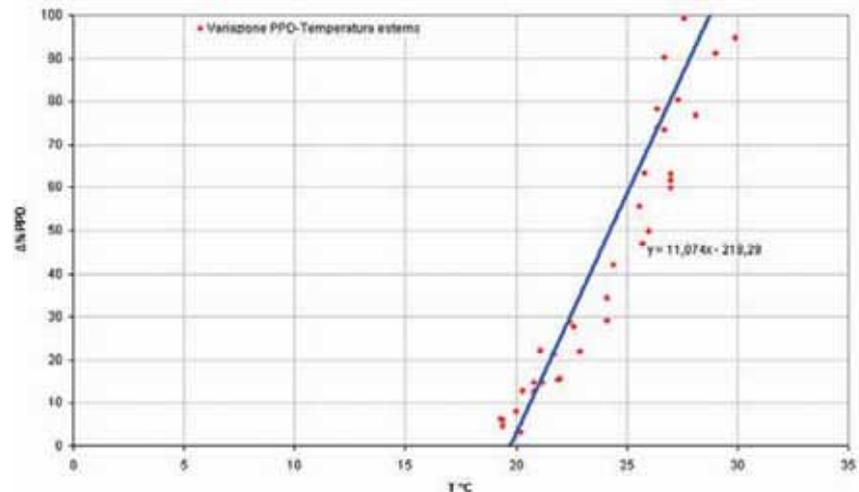


Fig. 12 - Interpolazione lineare della variazione PPD rispetto alla temperatura esterna del 6 agosto

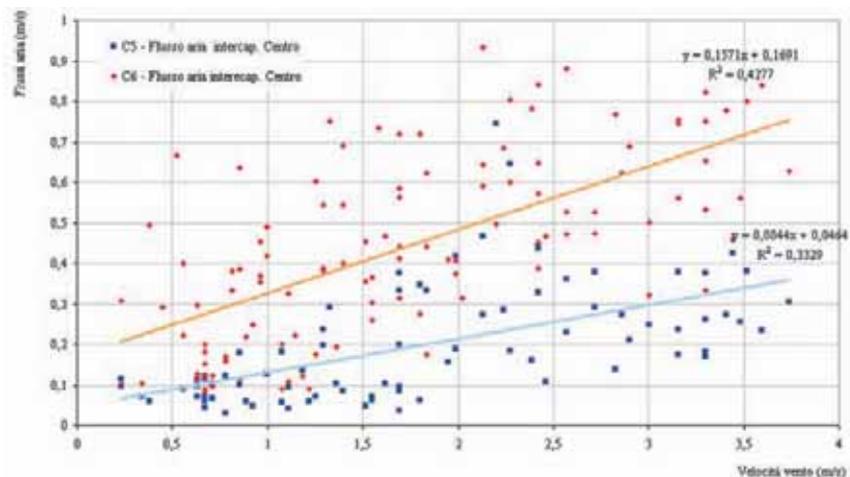


Fig. 13 - Andamento della velocità in intercapedine in funzione della velocità del vento

## b) valutazioni termo-igrometriche

Nel grafico di fig. 14 state messe a confronto le curve caratteristiche della variazione percentuale dei PPD (della copertura metallica rispetto alla copertura di riferimento) in funzione della temperatura esterna per la seconda e la terza configurazione.

Come si può notare le curve appartenenti alla medesima configurazione hanno lo stesso coefficiente angolare, proprio del comportamento fisico di una copertura rispetto ad una tradizionale, ma sono traslate di una quantità che varia a seconda delle condizioni climatiche specifiche (temperatura esterna, irraggiamento, ecc.).

Analizzando le differenze tra la configurazione 2 e la configurazione 3 è possibile identificare nel coefficiente di assorbimento della radiazione solare la causa principale di tale variazione prestazionale (l'unica differenza tra le coperture analizzate è la finitura esterna del sistema, in alluminio per la 2 e in rame per la 3).

Partendo quindi da una copertura con finitura in alluminio ( $\alpha = 0,07$ ) all'aumentare della temperatura esterna di un grado si ha un miglioramento pari a 11% del PPD rispetto ad una copertura ventilata con finitura in tegole. Considerando invece una copertura con finitura in rame ( $\alpha = 0,75$ ) all'aumentare della temperatura esterna si ha un peggioramento del PPD, verosimilmente a causa del maggiore guadagno solare nelle prime ore della giornata, non compensato completamente dal minore guadagno nelle ore pomeridiane rispetto alla copertura di riferimento.

## c) considerazioni conclusive

A conclusione della sperimentazione è stato possibile definire una scala di qualità tra i diversi sistemi di copertura testati.

In particolare, sulla base dei consumi energetici e del comfort termo-igrometrico indotto, il sistema in prova con finitura in alluminio presenterebbe un'efficacia significativamente superiore rispetto agli altri due sistemi, che hanno un comportamento molto simile, con solo alcuni indicatori lievemente a favore del sistema con finitura in rame rispetto alla copertura ventilata di riferimento con finitura in tegole. In termini di efficienza relativamente agli aspetti fluidodinamici i due sistemi valutati hanno un rendimento superiore rispetto alla copertura di riferimento.

È infine prevista la conduzione di una sperimentazione in condizioni invernali per completare il quadro prestazionale delle coperture ventilate analizzate.

Ludovico Danza (\*)

[ ludovico.danza@itc.cnr.it ]

Roberto Lollini (\*)

[ roberto.lollini@itc.cnr.it ]

Italo Meroni (\*)

[ italo.meroni@itc.cnr.it ]

Maria Cristina Pollastro (\*)

[ cristina.pollastro@itc.cnr.it ]

(\*) ricercatori presso l'Istituto per le Tecnologie della Costruzione del Consiglio Nazionale delle Ricerche - San Giuliano Milanese (MI)

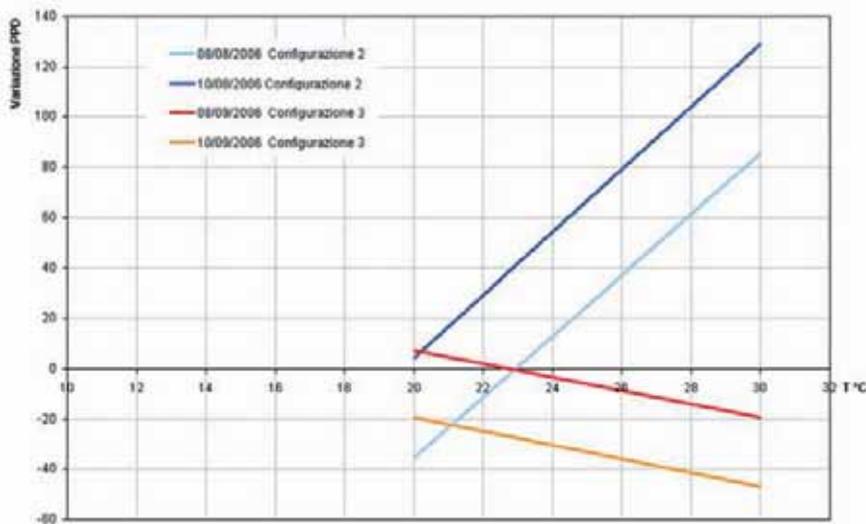


Fig. 14 - Confronto tra le variazioni dei PPD delle due celle nelle diverse configurazioni