

Progetto di ricerca

Studio delle temperature superficiali in opera di tetti piani isolati

Piercarlo Romagnoni - Francesca Cappelletti

Università IUAV di Venezia - Dipartimento di Progettazione e Pianificazione in Ambienti Complessi

Nell'ambito di una convenzione stipulata tra l'Università IUAV di Venezia e le associazioni ANPE ed ASSIMP, sono state condotte indagini volte a definire le possibili temperature superficiali in opera di coperture piane isolate. Data l'importanza che assume oggi la prestazione energetica degli edifici e la necessità di ridurre in modo consistente l'uso di energie non rinnovabili per il riscaldamento, raffreddamento e la produzione di acqua calda, la prestazione termica, sia dell'involucro nel suo insieme che dei singoli componenti, risulta fondamentale.

In tale contesto, il componente di copertura assume una valenza assoluta poiché associato agli scambi radianti e convettivi con l'ambiente esterno, in particolare al flusso radiante solare.

Per soddisfare queste esigenze, nel corso dell'ultimo decennio, si è assistito quindi ad un progressivo innalzamento del livello di isolamento termico delle coperture con l'adozione di strati isolanti di spessore sempre più elevato. Lo studio svolto ha analizzato il comportamento dinamico di diverse tipologie di copertura con una particolare attenzione alle temperature massime e minime ed alle escursioni termiche che si possono riscontrare sulle superfici ed internamente al componente di copertura.

Allo scopo di valutare se la pre-



Piercarlo Romagnoni

Laureato in Ingegneria Meccanica è Professore Ordinario di Fisica Tecnica Ambientale presso il Dipartimento di Progettazione e Pianificazione in Ambienti Complessi dell'Università IUAV di Venezia.

Dal 2013 è responsabile del Sistema Laboratori dell'Università IUAV di Venezia.

Membro ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers), membro del Sottocomitato 1 e del Sottocomitato 5 del CTI, socio AiCARR, socio Associazione Italiana di Acustica, socio IBPSA Italia.

Il principale settore di ricerca scientifica è la termofisica dell'edificio, con ricerche sulle proprietà dei materiali da costruzione, sui componenti opachi e trasparenti, sulle prestazioni energetiche del sistema edificio - impianto.



Francesca Cappelletti

Lavora dal 2010 presso l'Università IUAV di Venezia come Ricercatrice di Fisica Tecnica Ambientale. Laureata nel 2001 in Architettura, presso l'Istituto Universitario di Architettura di Venezia, consegue nel 2005 il titolo di Dottore di Ricerca in Fisica Tecnica presso l'Università degli Studi di Padova.

Nel corso della sua attività scientifica F. Cappelletti utilizza i codici di simulazione del comportamento energetico degli edifici per la valutazione delle prestazioni energetiche e di comfort di componenti di involucro e per studiare la convenienza degli interventi di riqualificazione edilizia. Socio fondatore di IBPSA-Italia, è membro del comitato orga-

nizzatore dei convegni biennali Building Simulation Application 2013 e 2015 e consigliere dal 2015.

Nel corso della sua attività scientifica, ha pubblicato numerosi articoli di rilevanza nazionale e internazionale.



Associazione delle Imprese di Impermeabilizzazione Italiana

Attiva dal 2002 si propone di garantire la qualificazione tecnica e produttiva delle imprese associate anche attraverso la promozione di studi e ricerche finalizzate al miglioramento degli aspetti tecnici e tecnologici dell'attività dell'impermeabilizzazione. Partecipa ai lavori UNI per lo sviluppo di norme sulla corretta posa dei sistemi impermeabili, svolge attività formativa per gli operatori del settore e promuove disegni di legge sul tema della conformità delle opere di impermeabilizzazione.



Associazione Nazionale Poliuretano Espanso rigido

Attiva dal 1989 rappresenta aziende produttrici di materiali in poliuretano espanso rigido utilizzati in edilizia e in altri settori industriali con la preminente funzione di isolamento termico. Tra i suoi scopi istituzionali rientrano lo sviluppo di progetti di ricerca tecnica e applicativa e la promozione del corretto impiego degli isolanti poliuretanic.

senza di strati ad elevata resistenza termica possa incidere sull'entità degli stress termici cui sono sottoposti i manti impermeabili, sono stati ipotizzati tre diversi spessori di strato isolante (5, 10 e 20 cm) costituito da pannelli in poliuretano espanso rigido.

Analisi preliminari: proprietà termofisiche dei materiali

Per poter effettuare delle simulazioni in regime dinamico, ovvero considerando la variabilità del clima esterno, identificato sulla base di alcune località sul territorio nazionale, sono state definite le proprietà termiche dei materiali edilizi costituenti le due tipologie di copertura oggetto dello studio che si differenziano per lo strato strutturale utilizzato: calcestruzzo e laterizio.

Al di sopra del supporto strutturale è previsto uno strato di materiale isolante termico (di spessore variabile, di 5, 10 e 20 cm) e uno strato di impermeabilizzazione con relativo adesivo.

Le caratteristiche termofisiche dei materiali che determinano la risposta dinamica del componente edilizio alla sollecitazione termica esterna sono: densità, calore specifico, conducibilità termica. I valori di tale grandezze, insieme alla resistenza al vapore, sono riportati nelle tabelle 1a e 1b.

Le caratteristiche termofisiche delle strutture di copertura

Per le strutture di copertura in esame, sono state calcolate la trasmittanza termica in regime stazionario, secondo lo standard UNI EN ISO 6946:2008, la trasmittanza termica in regime dinamico e la capacità termica

Tabella 1a: Stratigrafia della copertura in cls

Materiale	Spessore s [m]	Conducibilità termica λ [W/(m K)]	Densità ρ [kg/m ³]	Calore specifico c [kJ/(kg K)]	Resistenza igroscopica μ [-]
Calcestruzzo	0.055	1.26	2000	1	150
Barriera al vapore	0.003	0.2	1030	1.7	54000
Isolante termico Pannelli in poliuretano espanso (PU)	0.05	0.028	30	2.1	148
	0.1	0.026			
	0.2	0.025			
Strato di prima impermeabilizzazione e adesivo	0.001	0.6	1000	1.7	40000
Impermeabilizzazione	0.004	0.2	1030	1.7	40000

Tabella 1b: Stratigrafia della copertura in laterizio

Materiale	Spessore s [m]	Conducibilità termica λ [W/(m K)]	Densità ρ [kg/m ³]	Calore specifico c [kJ/(kg K)]	Resistenza igroscopica μ [-]
Solaio in laterocemento	0.24	0.67*	1800	1	15
Barriera al vapore	0.003	0.2	1030	1.7	54000
Isolante termico Pannelli in poliuretano espanso (PU)	0.05	0.028	30	2.1	148
	0.1	0.026			
	0.2	0.025			
Strato di prima impermeabilizzazione e adesivo	0.001	0.6	1000	1.7	40000
Impermeabilizzazione	0.004	0.2	1030	1.7	40000

* valore equivalente data una resistenza complessiva di 0.35 m²K/W come indicata in UNI 10355

areica secondo lo standard UNI EN ISO 13786:2008.

Per la determinazione delle caratteristiche dinamiche è stato utilizzato un programma di calcolo che implementa la metodologia di quest'ultimo standard normativo. Le tabelle da 3a a 4c riportano le caratteristiche dinamiche calcolate.

Le simulazioni

La simulazione dinamica consente la valutazione del profilo termico dei singoli elementi della stratigrafia evidenziando, in tal modo, gli strati soggetti a maggiore stress termico. Per tale analisi è stato utilizzato il codice di calcolo HEAT2 (Versione 8.0) prodotto dal Lund - Gothenburg

Group for Computational Building Physics in collaborazione con il Department of Building Physics (Lund University) ed il Building Technology Group del M.I.T. (USA).

Il modello geometrico è costruito sulla base delle proprietà termofisiche degli elementi in un numero di celle (mesh) adiacenti, ciascuna con una conduttività termica, densità e calore specifico uniforme.

La simulazione è estesa ad un congruo periodo temporale estivo consistente per le seguenti località: Milano, Roma, Palermo. Nel caso delle simulazioni proposte si è presa come base temporale la settimana.

Tabella 3 a, b, c: Copertura in cls PU 0.05 (a) PU 0.1 (b) PU 0.2 (c)

	Modulus			time [h]		
	a PU 0,05 m	b PU 0,1 m	c PU 0,2 m	a PU 0,05 m	b PU 0,1 m	c PU 0,2 m
internal thermal admittance	5,844	5.961	6.005	2,94	2,98	2,97
external thermal admittance	0,879	0.822	0.887	3,45	4,57	4,86
periodic thermal transmittance [W/(m²K)]	0,36681	0.17391	0.06689	-3,48	-4,44	-7,65
internal areal heat capacity [J/(m² K)]	81067,5	82868.7	83441.2			
external areal heat capacity [J/(m² K)]	14177,3	13111.1	13111.2			
thermal transmittance U [W/(m²K)]	0,4985	0.2459	0.1216			
decrement factor	0,736	0.707	0.550			

Tabella 4 a, b, c: Copertura in laterizio PU 0.05 (a) PU 0.1 (b) PU 0.2 (c)

	Modulus			time [h]		
	a PU 0,05 m	b PU 0,1 m	c PU 0,2 m	a PU 0,05 m	b PU 0,1 m	c PU 0,2 m
internal thermal admittance	5,217	5,215	5,214	1,52	1,52	1,52
external thermal admittance	0,882	0,823	0.887	3,45	4,57	4,86
periodic thermal transmittance [W/(m²K)]	0,05182	0,02450	0.00941	-10,90	-11,87	-15,08
internal areal heat capacity [J/(m² K)]	72450,3	72021,1	71743,1			
external areal heat capacity [J/(m² K)]	12720,1	11448	12135,2			
thermal transmittance U [W/(m²K)]	0,4309	0,2283	0,1172			
decrement factor	0,120	0,107	0,080			

Tabella 5 A, B, C: Valori massimi e minimi di temperatura sole-aria e temperatura superficiale esterna MILANO (A) - ROMA (B) - PALERMO (C)

	MASSIMA			MINIMA			Minima laterizio			Minima cls		
	A MI	B Roma	C PA	A MI	B Roma	C PA	A MI	B Roma	C PA	A MI	B Roma	C PA
θ_{sa} [°C] (con $\epsilon = 0,9$; $\alpha = 0,9$)	68,69	73,81	81,9	-6,18	-5,41	-0,05						
θ_{sa} [°C] (con $\epsilon = 0,9$; $\alpha = 0,7$)	58,85	58,85	70,9	-6,18	-5,41	-0,05						
$\theta_{s,out}$ [°C]							-5,66	-5,02	0,37	-5,57	-5,02	0,44

Definizione delle condizioni al contorno

Per la definizione delle condizioni climatiche si è fatto riferimento al data-base del Comitato Termotecnico Italiano (www.cti2000.it): i dati reperiti sono definiti su base oraria sulla base della proposta della nuova norma nazionale (revisione UNI 10349).

Le località prescelte sono le seguenti: Milano, Roma e Palermo. La disponibilità dei dati ha consentito di definire la condizione al contorno esterna sulla base della quale riferirsi negli scambi termici. Il problema è considerare sia gli

scambi convettivi che radianti sia in ingresso (verso la superficie della copertura) che in uscita (dalla copertura) causati dall'azione del vento, dall'irradiazione solare e dalla riemissione radiante. Sulla base di dati di letteratura e di opportune valutazioni sono stati adottati i seguenti valori:

- Coefficiente di scambio termico per convezione $h_{conv,out} = 14$ [W/m²k]
- Coefficiente di scambio termico per radiazione $h_{rad,out} = 5$ [W/m²k]

- Emissività della superficie nell'IR $\epsilon =$ valori dichiarati/misurati
- Coefficiente di assorbimento radiazione visibile $\alpha =$ valori dichiarati/misurati
- Temperatura della volta celeste $T_{sky} = \theta - 11$ [°C]
- Temperatura aria esterna $\theta =$ valori della località di riferimento [°C]
- Irradiazione solare $I_{sun} =$ valori della località di riferimento [W/m²]

Risultati

Considerazioni e calcoli preliminari

I dati meteo utilizzati consentono di poter ipotizzare, seppure in maniera grossolana, le variazioni della temperatura sole-aria (presa come riferimento per gli scambi termici) durante l'anno. Nella tabella 5 si riportano, pertanto, i valori massimi e minimi annuali della temperatura sole-aria calcolata considerando due valori di assorbimento superficiale (short wave), pari a $\alpha = 0,9$ e $\alpha = 0,7$ e le temperature minime annuali superficiali esterne, calcolate con riferimento alle trasmittanze termiche delle coperture proposte (si riportano i risultati per le coperture con spessore di isolante termico pari a $s = 0,05$ m).

Le temperature superficiali sono ottenute risolvendo un semplice bilancio termico nel caso stazionario e utilizzando, come trasmittanze termiche, i valori minimi previsti nelle tipologie di copertura proposte. I minimi sono calcolati durante la stagione invernale e durante la notte (assenza di radiazione solare).

Le oscillazioni della temperatura superficiale resteranno comprese tra i massimi e minimi della temperatura sol-air determinate; il caso di Milano potrebbe presentare un differenziale pari a $\Delta = 74,87$ K mentre a Roma e Palermo il differenziale potrebbe raggiungere gli 82 K ca.; non necessariamente i differenziali si registrano nello stesso giorno, ma certamente nell'arco dell'anno.

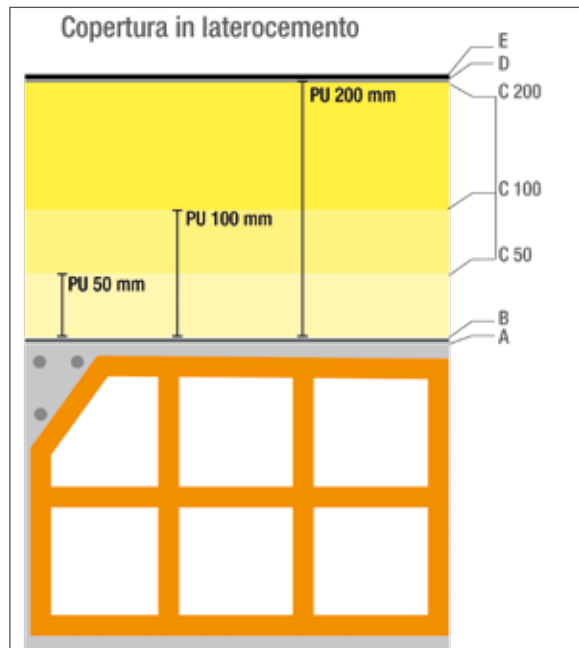
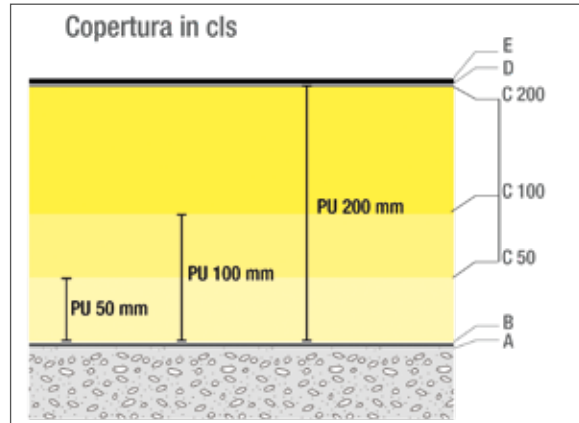
Determinazione delle temperature mediante simulazioni con Heat2.0

Per le coperture proposte sono stati calcolati i valori delle temperature nelle interfaccia di ciascuno strato interno. La temperatura è stata calcolata in corrispondenza all'interfaccia tra calcestruzzo o laterocemento e barriera al vapore (A), tra la barriera al vapore e l'isolante (B), tra l'isolante (dei diversi spessori previsti) e lo strato di prima impermeabilizzazione (C 50, C 100, C 200), tra lo strato di prima impermeabilizzazione e l'impermeabilizzazione (D) ed infine sulla superficie esterna della copertura stessa (E).

Nei punti sopra riportati si è calcolato l'andamento delle temperature durante il mese di Luglio (in cui si verifica l'irraggiamento più elevato) e considerando la condizione più gravosa per la sollecitazione termica ovvero assorbimento solare $\alpha = 0,9$ e emissività $\alpha = 0,9$.

La temperatura interna è stata considerata costante e pari a $\theta_{int} = 20^\circ\text{C}$.

Degli oltre 30 grafici ricavati si riportano solo gli esempi relativi all'esame della copertura in cls per la zona di Milano e di quella in laterocemento per la zona di Palermo valutate considerando i tre diversi spessori previsti per i pannelli in poliuretano.



Tutti i grafici sono disponibili nella versione integrale dello studio.

Dall'analisi dei grafici prodotti si possono ricavare le seguenti considerazioni:

- negli strati superiori al materiale isolante l'andamento delle temperature segue i valori della temperatura sol-air esterna e non è influenzato dai diversi spessori di materiale isolante considerati
- la differenza di spessore dello strato isolante evidenzia solo la particolare stabilità delle temperature degli strati interni delle coperture isolate con 100 e 200 mm di poliuretano
- la variazione di temperatura degli strati al di sopra del materiale isolante, determinata dalla temperatura sole-aria, è molto marcata e può superare, nelle diverse località i seguenti valori:
Milano 50 K
Roma 60 K
Palermo 65 K
- le differenze di temperatura tra le due interfacce della membrana impermeabile si mantengono sempre su valori esigui.

Figura 1 - Milano - Copertura CLS - PU 50 mm

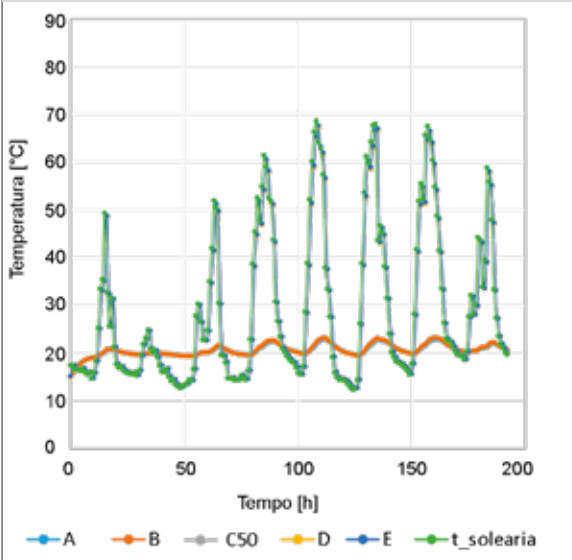


Figura 4 - Palermo - Copertura Laterizio - PU 50 mm

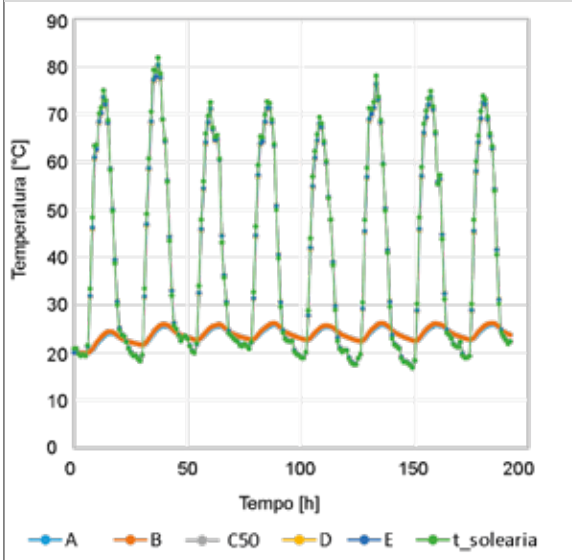


Figura 2 - Milano - Copertura CLS - PU 100 mm

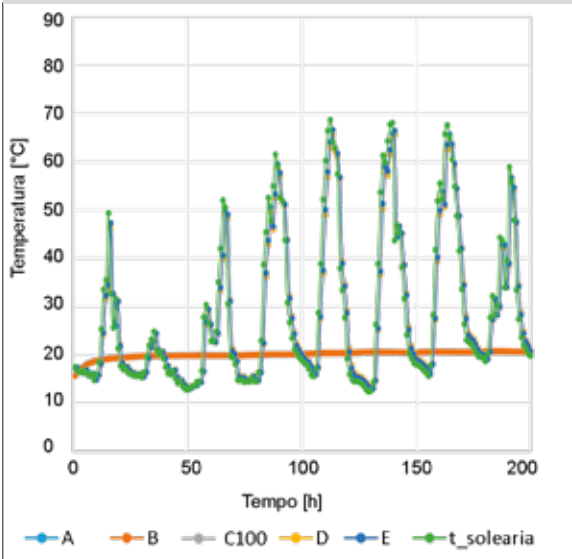


Figura 5 - Palermo - Copertura Laterizio - PU 100 mm

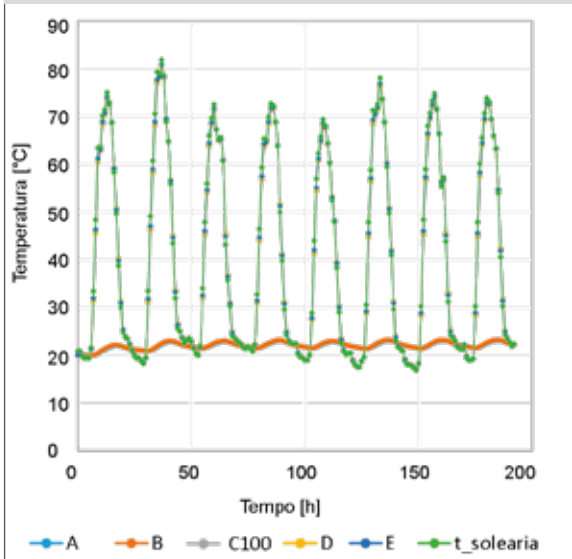


Figura 3 - Milano - Copertura CLS - PU 200 mm

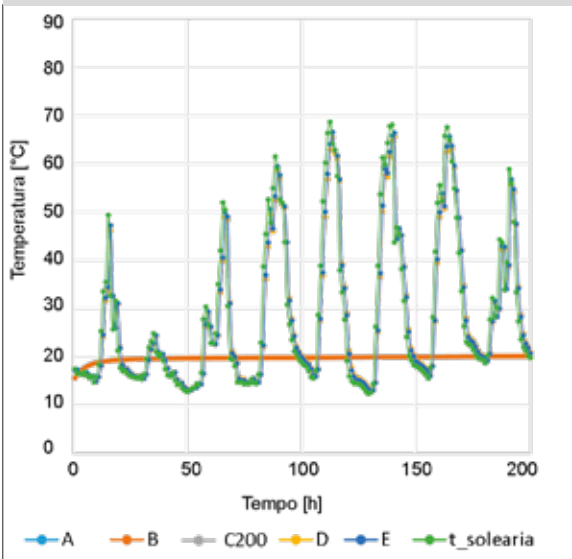


Figura 6 - Palermo - Copertura Laterizio - PU 200 mm

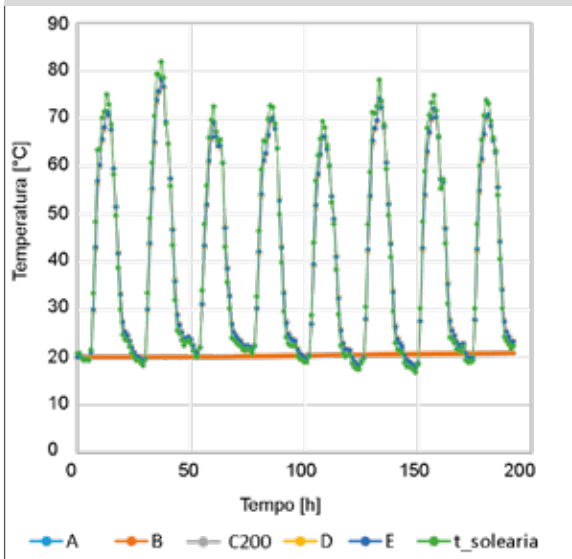


Tabella 6: Temperature massime e minime superficiali ($\alpha = 0,9$)

	Spessore strato isolante	Milano		Roma		Palermo	
		T massima	T minima	T massima	T minima	T massima	T minima
Copertura cls	PU 50 mm	67,7	12,5	72,7	11,1	80,3	17,0
	PU 100 mm	66,6	12,9	73,2	11,0	80,9	16,9
	PU 200 mm	66,6	12,9	70,4	11,7	77,4	18,0
Copertura laterizio	PU 50 mm	67,7	12,5	72,7	11,2	80,3	17,0
	PU 100 mm	68,2	12,4	73,2	11,0	81,0	17,0
	PU 200 mm	65,9	13,1	70,6	11,7	78,3	17,8

Conclusioni

I risultati ottenuti evidenziano come la membrana possa essere sottoposta a stress termici giornalieri minimo - massimo da circa 20 °C a circa 60°C – 80°C, secondo le condizioni climatiche che si verificano.

È quindi proprio la variabile clima, l'intensità del soleggiamento in particolare, che costituisce il riferimento per ciò che riguarda i possibili scambi termici superficiali e le variazioni di temperatura in particolare.

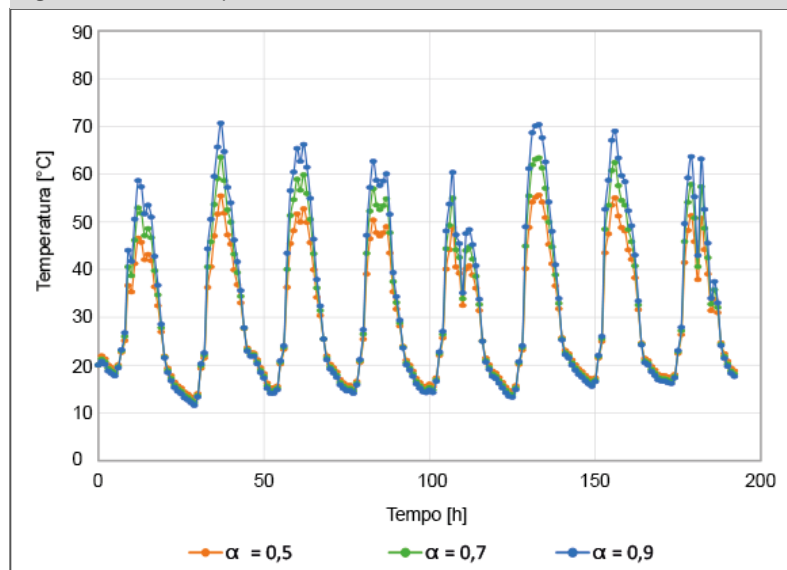
La Tabella 6 riassume i valori massimi e minimi delle temperature superficiali nel mese di Luglio.

L'effetto dell'intensità del soleggiamento e degli scambi termici per irraggiamento (in particolare) e per convezione (con minore intensità) comporta per gli strati di membrana superficiale il raggiungimento di valori poco al di sotto dei valori della temperatura solare (valori ottenuti con emissività e assorbimento pari a 0,9).

La criticità persiste durante l'intera stagione e le simulazioni evidenziano un andamento ciclico che segue l'andamento delle condizioni esterne in modo pressoché identico.

Tale situazione è assai evidente nei grafici sopra riportati: l'unico caso in cui potrebbe non verificarsi sarebbe quello di una diminuzione degli scambi radianti per esempio a causa dell'effetto di turbidità notturna tipico per

Figura 7 - Roma - Copertura Laterizio - PU 200 mm



esempio del clima della pianura Padana.

Un'interessante osservazione deriva dal fatto che i materiali utilizzati come strato strutturale delle coperture analizzate (calcestruzzo o laterizio) fanno sì che le capacità termiche areiche interne risultino assai maggiori rispetto a quelle esterne (anche di 5 – 6 volte inferiori). Una conseguenza di questo fatto è che la parte interna della copertura sia maggiormente soggetta a fenomeni di accumulo termico mentre quella esterna tende a seguire con maggiore prontezza le variazioni imposte dagli scambi termici.

Appare a questo punto evidente la necessità di fornire una protezione "passiva" agli scambi termici superficiali esterni. In tal senso si può configurare l'adozione di materiale con minore assorbimento nel visibile che riduce

in modo sensibile la risposta degli strati della copertura superficiale. La Figura 7 permette un semplice e diretto confronto tra i valori delle temperature superficiali delle membrane nel caso di 3 possibili valori del coefficiente di assorbimento e di emissività superficiale (0,5, 0,7 e 0,9 rispettivamente) per le condizioni climatiche considerate e per il tetto in laterizio.

Si può pertanto concludere che l'utilizzo di membrane con valori di emissività e assorbimento, sia nel visibile che nel infrarosso, più contenuti consentirebbe di svincolare la dipendenza delle temperature superficiali dall'oscillazione climatica e quindi di contenere la forte escursione termica a cui il materiale viene altrimenti sottoposto con cicli giornalieri.

A conclusione del presente lavoro di indagine, appare opportuno ri-

assumere alcune considerazioni. È possibile fare una prima valutazione relativa alle sollecitazioni cui la membrana superficiale in copertura è sottoposta. Come menzionato in precedenza, tali oscillazioni risultano seguire gli andamenti della temperatura sole-aria; l'ampiezza di tale oscillazione è governata dal clima (Palermo più di Milano), dall'eventuale trattamento superficiale e l'entità è variabile a seconda della stagione. I risultati evidenziano che le escursioni giornaliere invernali ed estive variano da un valore minimo di qualche grado. I risultati evidenziano che le escursioni giornaliere invernali ed estive variano da un valore minimo di qualche grado a valori massimi di qualche decina di gradi in funzione del clima e delle proprietà di scambio termico superficiale dello strato di finitura.

La membrana viene quindi sottoposta a diversi cicli di sollecitazione termica, variabili in ampiezza, durante l'intero anno. I risultati ottenuti non evidenziano la dipendenza della variazione di temperatura da lato a lato della membrana dallo spessore dell'isolante posto in opera; vi è bensì una forte dipendenza dalle condizioni di scambio termico innesco, in particolare lo scambio radiante (emissività superficiale, re-irraggiamento volta celeste,...). I risultati ottenuti sono comunque da considerare come esito di simulazioni numeriche e quindi soggetti alle condizioni al contorno definite: è evidente come una serie di indagini atte a misurare l'effetto degli scambi termici su una copertura in opera possa incrementare il grado di credibilità dei risultati ottenuti.

Dalle oscillazioni termiche ricavate sarebbe possibile, note le proprietà della/e membrana/e definirne le variazioni dimensionali minime e massime annuali. Da un punto di vista numerico,

l'indagine potrebbe essere estesa in 3D e, in modo particolare, all'esame di dettagli costruttivi là dove l'interfaccia superficie membrana – isolante viene particolarmente sollecitata termicamente o comunque richiede accorgimenti tecnici e di posa particolari.

Infine, la ricerca di soluzioni alternative può essere sviluppata per via numerica sia per i materiali usati che per tipologie strutturali: a quanto è dato vedere dai risultati numerici un trattamento superficiale di basso assorbimento sembra condurre con relativa

semplicità all'abbattimento delle oscillazioni superficiali.

L'uso di tetti piantumati (verdi) è da praticarsi con molta cautela riferibile, in particolare, alla necessità di continuità nella posa del materiale impermeabilizzante, che comunque verrebbe meno sollecitato; in proposito esiste comunque un'ampia letteratura. In conclusione è possibile inoltre affermare che l'uso di sistemi solari attivi (termici e/o fotovoltaici) è sicuramente da promuovere anche come elemento di protezione dello strato superficiale.



Considerazioni Applicative

ANPE e ASSIMP hanno sostenuto il progetto di ricerca, di cui si riporta una sintesi, con la finalità di approfondire il tema delle temperature di esercizio delle coperture con manto impermeabile a vista e degli stress termici a cui sono sottoposti i materiali impiegati.

Le coperture continue con manto impermeabile si sono largamente diffuse, sia nell'edilizia industriale e commerciale e sia in quella resi-

denziale, grazie ai loro numerosi vantaggi:

- la leggerezza dell'intero pacchetto di copertura che consente il loro utilizzo anche su strutture leggere
- la rapidità di esecuzione
- la possibilità di interventi di manutenzione e ripristino agevoli
- l'economicità dell'intero sistema.

Affinché tutti questi aspetti positivi vengano valorizzati e mantenuti nel tempo (con i previsti interventi manutentivi) è necessario che le scelte progettuali ed applicative tengano in considerazione le condizioni di esercizio particolarmente gravose a cui sono sottoposti i materiali impiegati.

Sarà quindi importante che, in fase di definizione dei capitolati, la progettazione verifichi:

- la resistenza dei componenti alle temperature di esercizio elevate (70-80 °C) che possono essere determinate dall'irraggiamento estivo
- la resistenza dei componenti agli stress termici a cui ciclicamente vengono sottoposti
- la possibile adozione di materiali o pacchetti applicativi che limitino la sollecitazione termica dei materiali.

ANPE e ASSIMP si propongono di approfondire questa prima analisi, sia con lo scopo di contribuire alla conoscenza delle reali condizioni di esercizio dei pacchetti di copertura, sia con quello di sensibilizzare l'intero settore alla necessità di un'attenta progettazione e selezione dei materiali e di una loro corretta messa in opera.