

Simulazioni con modello di calcolo e verifica sperimentale

Temperature di esercizio degli isolanti termici in copertura

Prof. Ing. Piercarlo Romagnoni - Prof. Ing. Fabio Peron

Premessa

Le applicazioni di isolanti termici in copertura, specialmente quelle piane, sotto manti impermeabili a vista, comportano condizioni di esercizio particolarmente severe che prevedono:

- temperatura di esercizio elevata a causa dell'irraggiamento solare
- forti sbalzi termici

L'esperienza applicativa ha evidenziato, soprattutto nei Paesi dell'Europa Meridionale a clima più caldo, che queste condizioni di esercizio possono essere tali da compromettere la stabilità dimensionale di alcuni tipi di isolanti termici.

La ricerca svolta in collaborazione con l'Università IUAV di Venezia è stata finalizzata a verificare i valori massimi di temperatura che possono essere raggiunti all'interno dei pacchetti di copertura in corrispondenza dello strato isolante.

La ricerca ha previsto due fasi:

- **simulazione, mediante un modello matematico, dell'andamento della temperatura all'interno del pacchetto di copertura al variare delle condizioni climatiche**
- **verifica sperimentale delle temperature di esercizio in copertura in due diverse soluzioni applicative**

Il prof. Piercarlo Romagnoni è docente di Fisica Tecnica Ambientale all'Università IUAV di Venezia, è autore di testi specialistici dedicati a temi energetici e normativi. Partecipa attivamente ai lavori AICARR e ASHRAE.

Il Prof. Fabio Peron è Professore Associato di Tecnica del Controllo Ambientale all'Università IUAV di Venezia. Dottore di Ricerca in Ingegneria Chimica. Fa parte del comitato scientifico sia del Centro Interdipartimentale di Rilievo Cartografia e Elaborazione (CIRCE) che dell'Archivio Interdipartimentale delle Tecniche per la Progettazione e il Design (ARTEC) dell'Università IUAV. È il responsabile della gestione della strumentazione per misure termiche, igrometriche, acustiche, illuminotecniche per la sezione di Fisica Tecnica Ambientale del Laboratorio DCALab.

Fase teorica

L'analisi è stata realizzata utilizzando il modello di calcolo HEAT2 messo a punto dal Lund (Gothenburg Group for Computational Building Physics in collaborazione con il Department of Building Physics - Lund University) e dal Building Technology Group del M.I.T. (USA).

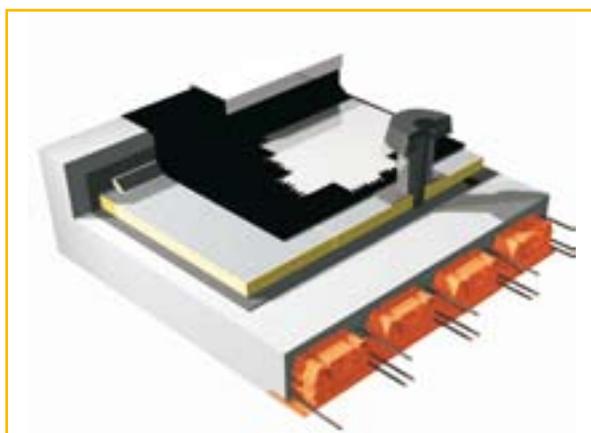
Il modello di calcolo utilizzato consente di simulare l'andamento del flusso termico che attraversa la copertura e di determinarne i valori puntuali in corrispondenza dei singoli strati.

Per quanto riguarda le condizioni al contorno sono stati ipotizzati gli scambi radianti e convettivi sia verso l'esterno che verso l'interno. Queste due ipotesi di calcolo possono determinare una notevole variabilità tra dati calcolati e dati reali.

Le condizioni climatiche analizzate sono quelle

Tabella 1.

Stratigrafia	Descrizione	Spessore m	Densità kg/m ³	Conducibilità termica λ W/(mK)	Calore specifico kJ/(kg K)
Supporto di base	laterocemento o elementi prefabbricati precompressi giustapposti	0,25	1800	0,9	0,90
Primer	emulsione bituminosa	0,001	600	0,17	1,8
Barriera al vapore	membrana bituminosa armata in alluminio	0,003	1300	0,26	0,88
spalmatura bitume ossidato fuso o collante a freddo o PUR monocomponente		0,004	1300	0,26	0,88
Isolamento termico	Pannelli PUR/PIR rivestiti con fibra di vetro saturata	0,060	35	0,028	1,40
Membrana bituminosa	membrana bituminosa armata poliestere	0,004	1125	0,17	1,47
Membrana bituminosa ardesiata	membrana bituminosa armata poliestere con finitura in graniglia di ardesia	0,004	1000	0,15	1,2



medie per il mese di massima insolazione (Luglio) per le località di Trapani (I - 38° 01'), Roma (I - 41° 53'), Venezia (I - 45° 26'N) e Londra (UK- 52°N). Sono state inoltre considerate le condizioni climatiche storiche disponibili e relative a Luglio 2003 per Venezia e a Luglio 1984 per Zurigo (CH - 47° 48' N).

L'analisi del flusso termico ha considerato un periodo di 7 giorni allo scopo di valutare anche l'effetto di un progressivo riscaldamento della copertura.

Nelle simulazioni sono stati ipotizzati diversi tipi di materiale isolante. A parità di trasmittanza delle strutture non sono state rilevate differenze significative.

La ricerca ha preso in esame diverse tipologie di copertura. Tra queste la situazione più critica, per il livello di temperature raggiunte, si è riscontrata

nelle coperture piane con manto bituminoso a vista.

L'analisi è stata condotta considerando la stratigrafia della tabella 1.

Fase teorica: prime indicazioni

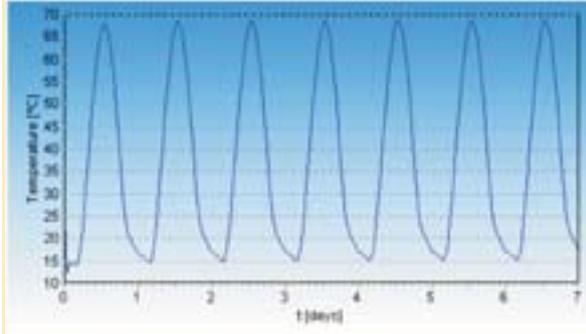
La copertura piana con manto impermeabile a vista è soggetta a notevoli surriscaldamenti; lo strato isolante può raggiungere temperature molto elevate (superiori ai 70°C) anche in condizioni climatiche caratterizzate da un irraggiamento moderato.

Lo strato esterno, costituito dalle guaine impermeabili, ha spessore e massa ridotti ed è caratterizzato da un coefficiente di assorbimento elevato ($a = 0,95$); questo può determinare il surriscaldamento dello strato isolante fino a temperature vicine ai 90°C in zone climatiche molto calde (Trapani). I dati forniti dal modello matematico per le temperature all'interno del pacchetto di copertura (lato estradosso, circa 3 mm all'interno dello strato isolante) sono riportati nei grafici relative alle diverse località.

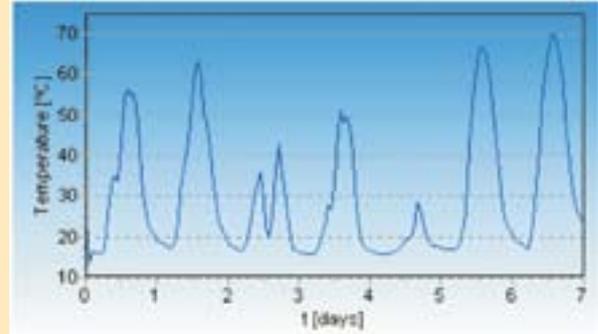
Le temperature calcolate, soprattutto per i climi più caldi, superano, nelle ore di massimo irraggiamento, le temperature massime di esercizio di molti materiali e rappresentano quindi un importante fattore di rischio per l'integrità e la stabilità dimensionale dell'intero pacchetto di copertura.

Temperature calcolate all'interno dello strato isolante (3 mm al sotto la faccia superiore)

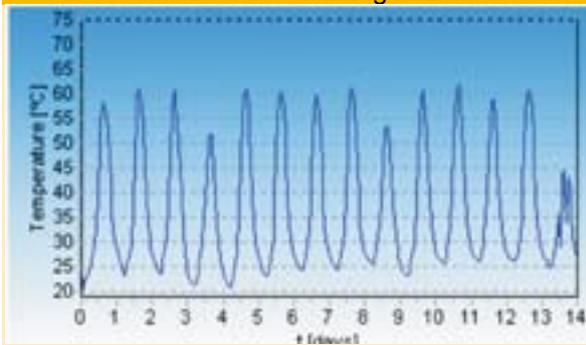
Londra: dati climatici medi



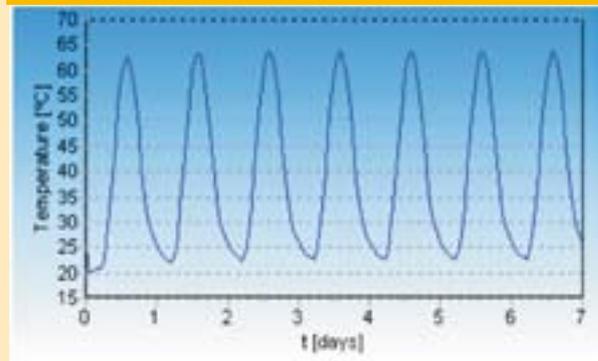
Zurigo: dati climatici storici (Luglio 1984)



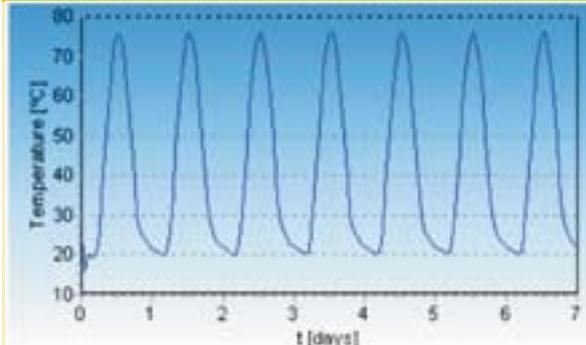
Venezia: dati climatici storici Luglio 2003



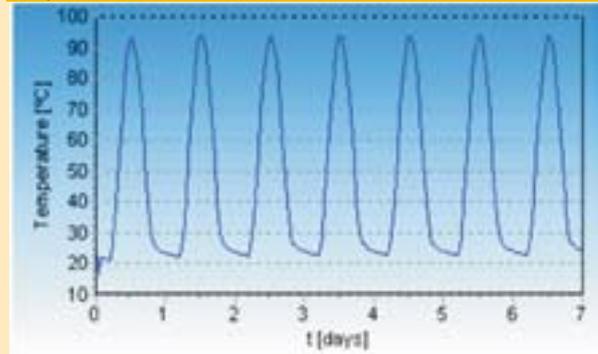
Venezia: dati climatici medi



Roma: dati climatici medi



Trapani: dati climatici medi



Fase sperimentale

Alla luce dei risultati ottenuti mediante la simulazione del programma di calcolo Heat2 si è ritenuto opportuno procedere ad una verifica sperimentale delle temperature di esercizio dei materiali allo scopo di verificare:

- l'incidenza delle particolari condizioni ambientali che caratterizzano ogni sito (es. ventilazione della copertura, fattori di ombreggiamento, ecc.)

- l'incidenza, in condizioni reali di esercizio, dei parametri prefissati nelle ipotesi di calcolo (capacità di assorbimento e di emissione della copertura)

Sito e mezzi utilizzati per la sperimentazione

Le misure sperimentali sono state effettuate sulla copertura di una palazzina uffici sita in Zona Industriale a Padova (45° 19').

I pacchetti monitorati sono:

- Tetto piano (1) copertura piana con manto bituminoso ardesiato a vista (analogo, per composizione a quella utilizzata per la fase teorica)
- Tetto curvo (2) pannello sandwich curvo (esterno: lamiera di alluminio preverniciato, colore rosso tegola, spessore 7/10 mm, strato isolante: poliuretano espanso rigido 40 mm fuori greca, interno: lamiera zincata gofrata, preverniciata, colore grigio-azzurro, spessore 4/10 mm)

Strumenti di misura

Sono state poste in opera 9 termocoppie (4 per il tetto piano e 5 per il tetto curvo) per la misura di temperature superficiali e interne allo strato di materiale. Le temperature registrate sono raccolte da due acquisitori multicanali mentre i valori forniti dalla sonda meteo sono inviati direttamente in un PC portatile.

Una stazione meteo ha consentito di registrare i dati di temperatura, umidità, velocità dell'aria oltre che la radiazione solare globale incidente misurata con un piranometro.

Periodo di rilevazione

Le misure si sono protratte per alcuni mesi del 2005 e per l'intero anno 2006.



I dati raccolti

Si riportano nei grafici e nelle tabelle i valori medi registrati dalle sonde (v. legenda) nel mese di Luglio e, in tabella, quelli della singola giornata del 21 luglio 2006 (valori massimi).



Legenda:

Tetto piano

- Sonda 1: temperatura superficiale (lato destro)
- Sonda 2: temperatura interna dello strato isolante (3 cm. Profondità – lato destro)
- Sonda 3: temperatura superficiale (lato sinistro)
- Sonda 4: temperatura interna dello strato isolante (3,5 cm. Profondità – lato sinistro)

Tetto curvo:

- Sonda 5: temperatura superficiale (lato basso della convessità del pannello)
- Sonda 6: temperatura interna dello strato isolante (3 cm di profondità - lato basso della convessità del pannello)
- Sonda 7: temperatura interna dello strato isolante (3 cm di profondità – colmo)
- Sonda 8: temperatura superficiale (colmo)
- Sonda 9: temperatura interna dello strato isolante (3 cm di profondità - lato basso destro della convessità del pannello)



Tetto piano - Luglio 2006				
	Sonda 2	Sonda 3	Sonda 1	Sonda 4
Massimo	54,27	70,87	69,91	46,31
Minimo	20,07	12,86	12,64	24,88
Media	34,23	35,54	35,49	34,87
Δ	34,20	58,01	57,27	21,43

Tetto CURVO - Luglio 2006					
	Sonda 7	Sonda 8	Sonda 5	Sonda 6	Sonda 9
Massimo	55,55	67,93	65,53	57,82	52,90
Minimo	17,64	12,09	11,92	15,29	18,91
Media	33,21	33,58	33,94	33,16	33,22
Δ	37,90	55,84	53,61	42,54	33,99



Tetto piano - 21 Luglio 2006				
	Sonda 2	Sonda 3	Sonda 1	Sonda 4
Massimo	54,27	70,87	69,91	45,78
Minimo	23,27	16,41	16,24	23,25
Media	30,91	54,46	53,67	16,41
Δ	36,92	39,17	38,74	36,76

Tetto CURVO - 21 Luglio 2006					
	Sonda 7	Sonda 8	Sonda 5	Sonda 6	Sonda 9
Massimo	55,55	67,93	65,53	57,82	52,90
Minimo	17,64	12,09	11,92	15,29	18,91
Media	33,21	33,58	33,94	33,16	33,22
Δ	37,90	55,84	53,61	42,54	33,99

Considerazioni sui dati raccolti

L'estate del 2006 è stata caratterizzata da un'ampia variabilità climatica e le ondate di calore registrate, pur avendo raggiunto punte massime intorno alla media, hanno avuto una durata più breve rispetto all'estate del 2003 (v. grafico di confronto delle temperature massime estive sulla città campione di Venezia, 45°26').

I dati raccolti evidenziano una forte escursione termica non solo nei mesi estivi, ma costante per tutto il periodo di rilevazione: all'interno dell'isolante si registrano differenze di temperatura di circa 40 °C mentre quelle superficiali superano i 50 °C.

Il tetto piano ha raggiunto la temperatura limite di 71°C che si è mantenuta costante per un periodo superiore alle 3 ore

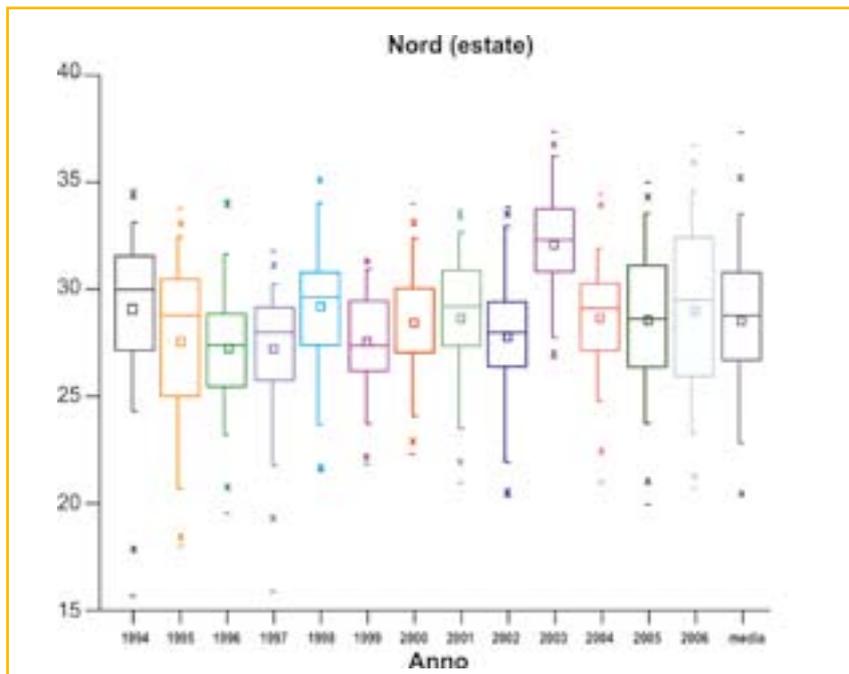
Il tetto curvo, colpito da una diversa inclinazione dei raggi solari raggiunge invece la temperatura di circa 68 °C mantenendola per circa 3 ore.

Revisione delle simulazioni alla luce dei dati storici acquisiti

Utilizzando i dati acquisiti si è proceduto a modificare le condizioni al contorno imposte al programma di calcolo HEAT2 (assorbimento ed emissione della copertura e scambio termico superficiale) fino ad ottenere una buona corrispondenza tra dati calcolati e dati rilevati.

Utilizzando le nuove condizioni al contorno la simulazione di tetto piano in condizione climatiche medie per la località di Trapani risulta essere quella riportata nel grafico.

I valori massimi risultano essere inferiori di circa 8-10 °C rispetto a quelli calcolati con le precedenti condizioni al contorno collocandosi comunque ben oltre la soglia di attenzione



(temperature di circa 80°C).

Va ribadito che le nuove condizioni al contorno imposte al calcolo sono quelle verificate per la copertura di Padova (particolarmente favorita per la possibilità di attivare scambi radianti con una porzione notevole della volta celeste) e utilizzate al solo scopo di verificare la congruità del modello matematico con una applicazione pratica.

Note conclusive

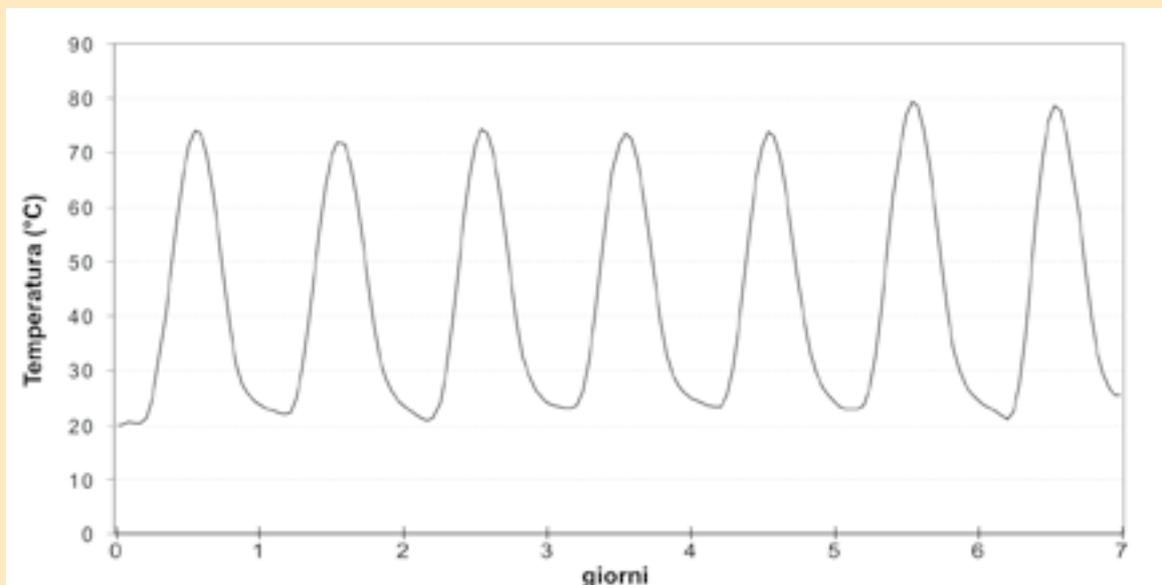
Si sono verificati i seguenti aspetti critici che dovrebbero essere attentamente valutati dalla progettazione in fase di scelta dei materiali isolanti applicati in copertura:

1) la possibilità, nelle zone a clima caldo, di raggiungere temperature di esercizio superiori agli 80 °C all'interno di isolanti termici applicati sotto manti impermeabili a vista.

Va sottolineato che sia la simulazione di calcolo che i valori riscontrati nella fase sperimentale si riferiscono sempre a manti bituminosi con finitura ardesiata di colore grigio chiaro.

E' ipotizzabile il raggiungimento di temperature ancora superiori con manti impermeabili di colore più scuro.

Valutazione con programma di calcolo HEAT2, condizioni al contorno della sperimentazione, località Trapani, dati climatici medi



Risulta quindi evidente la necessità di selezionare opportunamente i materiali isolanti in funzione della loro resistenza a temperature di esercizio superiori a quelle raggiungibili in applicazione.

2) in tutte le applicazioni e in tutte le condizioni climatiche si sono registrate forti escursioni termiche in periodi temporali molto brevi.

In funzione di questo stress termico i materiali isolanti dovranno essere selezionati in base alla loro stabilità dimensionale verificata in condizioni variabili di temperatura.

Dovranno inoltre essere attentamente valutate le caratteristiche di stabilità e coesione dell'intero pacchetto onde evitare che i forti sbalzi termici determinino distorsioni o fessurazioni soprattutto nei punti critici di giunzione.

3) le caratteristiche fisiche e meccaniche degli isolanti termici in poliuretano espanso (resistenza a temperature di esercizio superiori a 100 –110 °C) e le condizioni di prova di stabilità dimensionale (48 h a – 20 °C e 48h, +70 °C, 90% U-R.), fissate dalla norma di prodotto UNI EN

13165, sono idonee a verificare l'applicabilità dei prodotti isolanti in poliuretano anche nelle condizioni climatiche più severe.

Pannelli isolanti in poliuretano espanso rigido

Resistenza alle temperature di esercizio:	100 °C - 110 °C
UNI EN 13165	-20°C, 48 h
Stabilità dimensionale verificata alle seguenti condizioni:	+ 70 °C, 90% UR, 48 h

Lo studio presentato in queste pagine è stato svolto con il contributo della Federazione Europea delle Associazioni tra produttori e trasformatori di poliuretano espanso rigido, BING.

La relazione conclusiva è disponibile, in lingua inglese, nella sezione "Library" del sito <http://www.bing.org>.