

Giovanni Zannoni *
 Marco Bortoloni **
 Michele Bottarelli ***

Prestazioni termiche estive: confronto tra tetti a falda e coperture piane

Si indaga il comportamento termico estivo di un edificio con tetto a falde a confronto con uno a tetto piano, mediante un modello ad elementi finiti. A parità di condizioni, rispetto alla copertura piana quella a falde ventilata necessita di una potenza inferiore del 60% per la climatizzazione indoor con conseguente risparmio energetico

KEYWORDS Tetto, Ventilazione, Raffrescamento, Comfort indoor, Risparmio energetico

Numerose ricerche hanno avuto come oggetto la verifica delle prestazioni della circolazione d'aria nell'intercapedine all'interno degli strati che compongono le coperture a falde inclinate, con manto discontinuo, per riuscire a quantificare le reali prestazioni di questo particolare elemento "immateriale", tanto difficile da controllare e valutare date le molteplici configurazioni possibili e variabili in gioco. Il tetto ed in particolare il manto di copertura, svolge un ruolo di grande rilievo nel controllo termico indoor, sia per la sua estensione, sia per disposizione ed esposizione rispetto agli altri elementi dell'involucro edilizio, il cui beneficio si esplica attraverso la valorizzazione del fenomeno convettivo per il controllo dell'umidità e del comportamento termoigrometrico dell'intero pacchetto: nel periodo estivo costituisce la principale barriera al flusso termico entrante per irraggiamento. Lo studio effettuato dall'Università di Ferrara aggiunge un interessante contributo alle conoscenze di-

sponibili indagando il comportamento termico in regime estivo di un edificio con copertura a falde con struttura leggera (legno, metallo) e manto impermeabile discontinuo (tegole) al variare della permeabilità all'aria del manto, dello spessore della camera di ventilazione e della sezione aperta in linea di gronda, in confronto con una soluzione con tetto piano con struttura in calcestruzzo assunta a riferimento.

Metodologia

L'indagine è condotta avvalendosi di un modello numerico agli elementi finiti (COMSOLV4.3a) in cui il problema fluidodinamico e quello termico sono stati trattati contemporaneamente, attraverso la concatenazione opportuna dei rispettivi moduli di calcolo (CFD e Heat Transfer), sono poi stati risolti in regime transitorio per la condizione estiva configurata. Il problema fluidodinamico è risolto adottando il metodo k-ε,¹ mentre per

Thermal behaviour of vented roofs in summer conditions

KEYWORDS Roof, Ventilation, Cooling, Indoor comfort, Energy savings

The traditional forms of building insulation and their role in energy savings are well recognized in cold climates, while energy performance optimization of the building envelope in hot climates is often misunderstood, such as the opportunity to have a ventilation layer in pitched roofs. This feature is commonly referred as: Above Sheathing Ventilation (ASV), an eaves-ridge open cavity present under the waterproof layer thank to the laying of the tiles over a batten and/or counter-batten support system. Air enters both at eaves section and through the air-permeability of the overlapping tiles, and flows to the ridge, sinking the heat transfer generated by the solar radiation. This study surveys the thermal behaviour during the summer season of a building in which

varies the air-permeability between tiles, compared to a concrete flat roof building. Several studies have demonstrated the performance of a pitched roof, but it is not well yet investigated the impact of air-permeability of the external waterproof surface over the chimney effect, because several factors contribute to the complexity of the problem, such as the increasing mass flow rate and the Buoyancy-driven forces. The analysis has been approached by means of a numerical model, solving the fluid-dynamic and the heat transfer problems in unsteady state. Time series for wind, solar radiation and indoor space cooling were introduced to simulate realistic boundary conditions, taking into account different air-permeability of the waterproof surface and ASV thickness of the pitched roof

Materiale	A falde ventilata	Piana	Densità [Kg/m ³]	Conducibilità termica [W/mK]	Calore specifico [J/kgK]	Emissività [-]
	Spessore copertura [cm]					
Solaio latero-cementizio	20	30	1400	0,800	850	0,90
Clis alleggerito	-	8	1400	1,400	840	-
Tavolato						
Isolante polistirene	-	4	20	0,040	1340	-
Isolante lana di roccia	8	-	140	0,045	2100	-
Pareti	X	20	1000	0,800	850	0,90
Tegole	2	-	1700	0,700	840	0,85
Membrana termoriflettente	X	X	-	-	-	0,05
Membrana autoprotetta	-	X	-	-	-	0,60
Layer isolante in pavimentazione	X	X	-	0,010	-	-
Terreno	100	100	1600	0,800	1600	0,92

Tabella 1. Caratteristiche dei materiali che compongono le stratigrafie delle coperture analizzate.

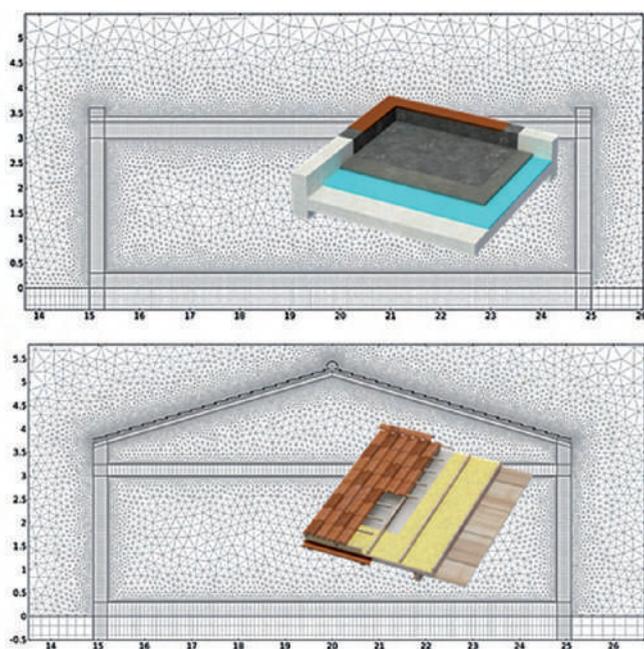
quello termocinetico l'approccio è stato esteso non solo all'irraggiamento solare e alla conduzione degli elementi edilizi, ma necessariamente ai fenomeni convettivi legati alle forze di volume e all'effetto del vento esterno, con lo scopo di valutare l'incidenza della convezione naturale rispetto a quella forzata.

Domini di calcolo. Il dominio di calcolo scelto è del tipo 2D, dimensionato per analizzare l'intero fenomeno fluidodinamico legato alle turbolenze generate dall'edificio in relazione al campo di moto generato dal vento. Per confrontare la soluzione a falde con quella piana sono stati sviluppati due macrodomini di riferimento e quindi, apportando minime variazioni, specifici sottodomini per rappresentare configurazioni differenti per l'altezza della camera di ventilazione, per la permeabilità all'aria fra le tegole e per la sezione di ingresso in linea di gronda. Con riferimento alla tabella 1, il macrodominio del tetto piano di confronto è costituito da

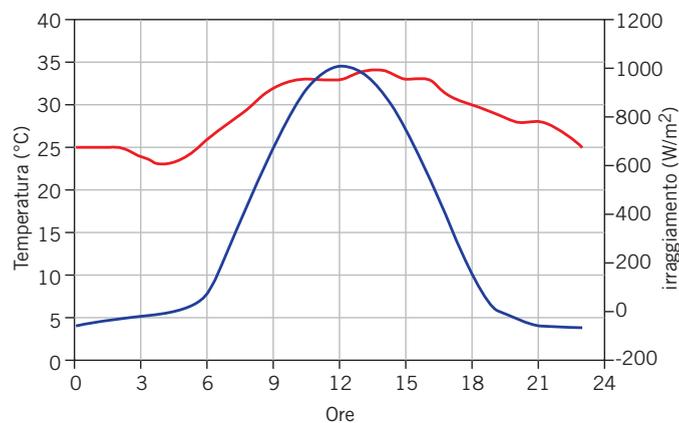
una soletta portante latero-cementizio di 30 cm di spessore, uno strato isolante di 4 cm in polistirene, uno strato di completamento e pendenza in calcestruzzo alleggerito di 8 cm, uno strato fittizio simulante la riflettanza di una membrana autoprotetta con scaglie di ardesia di colore analogo ad un manto in laterizio.

Quello del tetto a falde è composto da un manto impermeabile discontinuo ottenuto per parziale sovrapposizione di elementi piani (tegole), un volume funzionale conseguente alla listellatura di supporto dei precedenti elementi piani, una camera di ventilazione di altezza variabile e ottenuta con una seconda orditura sottostante e perpendicolare a quelle di supporto, uno strato di isolamento in lana di roccia di 8 cm posato sopra a un tavolato di legno di 2 cm. Era presente una membrana termoriflettente al di sotto dei listelli di supporto delle tegole. Ogni dominio è stato esteso anche ad un metro di suolo sottostante il piano di calpestio, al fine di considerare il possibile beneficio del terreno.

In figura 1 sono presentati i dettagli delle "mesh" dei due macrodomini dell'edificio, assieme ai rispettivi "sketch" assometrici della tipologia costruttiva, l'estensione completa del dominio è di 150 x 25 m. L'approccio bidimensionale non costituisce una semplificazione rilevante del problema, poiché nella camera di ventilazione sottostante la superficie calda è



1. Dettaglio della mesh di calcolo per il tetto piano e per il tetto a falde.



2. Andamento orario della temperatura e dell'irraggiamento.

Codice Caso	Note
P	Tetto piano
V	Tetto a falde ventilato
V_cr	Camera di ventilazione ridotta a 4 mm
V_pr	Permeabilità del manto ridotta a 2,5 mm
V_pn	Permeabilità del manto nulla (pn)
V_nvf	Assenza forze di volume (nvf)
V_cc	Camera di ventilazione chiusa / nvf / pn
V_ic	Imbocco in gronda chiuso, velocità del vento a 2,5 m/s

Tabella 2. Codifica dei casi risolti.

costituita dall'estradosso della copertura (tegole). Tale condizione sfavorisce lo sviluppo di moti convettivi naturali agenti in direzione ortogonale alla sezione considerata, supportando la semplificazione introdotta. Ulteriormente, la presenza della permeabilità all'aria del manto di copertura rappresenta un elemento forzante nella circolazione in camera, poiché ne modifica sostanzialmente il campo di moto.

Condizioni iniziali e al contorno. Il comportamento dell'involucro edilizio è stato legato alle seguenti condizioni: irraggiamento solare, velocità e temperatura del vento e potenza di climatizzazione interna.

Per considerare lo strato limite a terra è stato assegnato un profilo altimetrico della velocità del vento come elevazione alla potenza 0,3 del rapporto tra quota della copertura e quella del vento di riferimento, moltiplicato per l'intensità di quest'ultimo. Alla velocità del vento di riferimento sono stati attribuiti tre diversi valori: 1,25/2,50/5,00 m/s, assunti alla quota di 10 m.

Poiché la linea di gronda di una copertura a falde di un edificio unifamiliare si trova mediamente a 5 m di quota, l'intensità risultante dal suddetto profilo è approssimativamente pari a 1, 2 e 4 m/s, valore mediamente cautelativo scelto per non favorire questa tipologia di copertura.

La direzione del vento è assunta orizzontale in ingresso al dominio, mentre l'irraggiamento solare è considerato per semplicità nella sola direzione verticale, ovvero in copertura. Ad un metro di profondità nel terreno è stata attribuita una temperatura fissa pari a 20 °C.

L'andamento della temperatura del vento e dell'irraggiamento solare sono riportati in figura 2.

Infine, nell'ambiente posto al piano terreno, è stata supposta una potenza termica di raffrescamento pari a 150 W/m, ovvero, per ogni metro di profondità del modello 2D ipotizzato. A ciò corrisponde una potenza specifica pari a circa 6 W/m³ (fig. 3). Tale potenza è quella che consente di mantenere una temperatura interna attorno a 26°C nel caso dell'edificio con tetto piano e considera anche i fenomeni di scambio termico che avvengono lungo i muri perimetrali e sulla pavimentazione in termini conduttivi e convettivi.

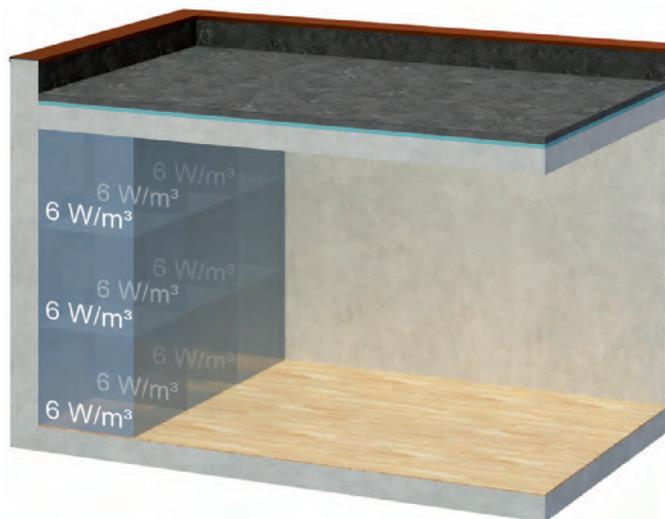
Risultati

L'indagine è stata condotta in regime transitorio, estendendo le simulazioni sino a quattro giorni solari in funzione delle serie storiche delle condizioni al contorno espresse a scala oraria.

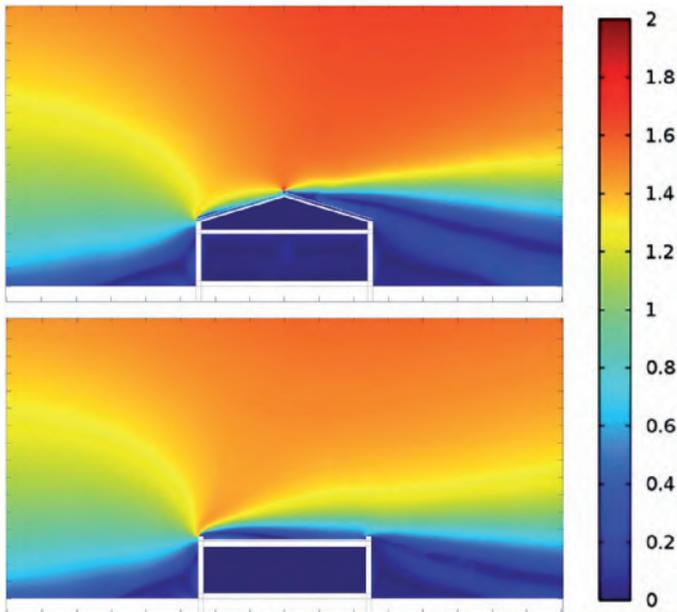
Una selezione dei diversi casi studiati è elencata nella tabella 2: questi corrispondono al caso di tetto piano (P) e a falde ventilato (V) come precedentemente descritti, nonché a ulteriori sei casi mediante i quali si è voluto approfondire l'incidenza dell'altezza della camera di ventilazione (V_cr), della riduzione della permeabilità all'aria del manto (V_pr) fino al suo totale annullamento (V_pn), delle forze di volume² attraverso la loro esclusione (V_nvf), dell'annullamento di ogni tipo di movimento dell'aria entro la camera di ventilazione (V_cc) e infine della chiusura dell'imbocco in linea di gronda della camera di ventilazione stessa (V_ic).

Fluidodinamica. Nella figura 4 sono presentati i dettagli delle soluzioni del campo di moto dell'aria nei due casi di riferimento (P,V) in vicinanza dell'edificio. In entrambi i casi la copertura presenta una zona non soggetta all'effetto del vento. Per il tetto a falde, il settore meno ventilato è la falda sottovento, mentre per il tetto piano è la parte occidentale, protetta dal cordolo perimetrale. In figura 5, invece, è riportato il dettaglio del campo di moto dell'aria nella camera di ventilazione per il caso del tetto a falde ventilato (V) e per il caso con permeabilità all'aria del manto nulla (V_pn). Nel primo caso l'andamento della velocità è crescente verso l'alto, in relazione all'apporto legato alla permeabilità del manto; è, infatti, evidente il passaggio dell'aria fra le sovrapposizioni delle tegole mentre tale fenomeno non avviene per il caso con permeabilità all'aria del manto nulla (V_pn). In quest'ultima situazione la velocità media dell'aria in camera rimane ridotta a 0,30 m/s e non aumenta lungo il suo sviluppo.

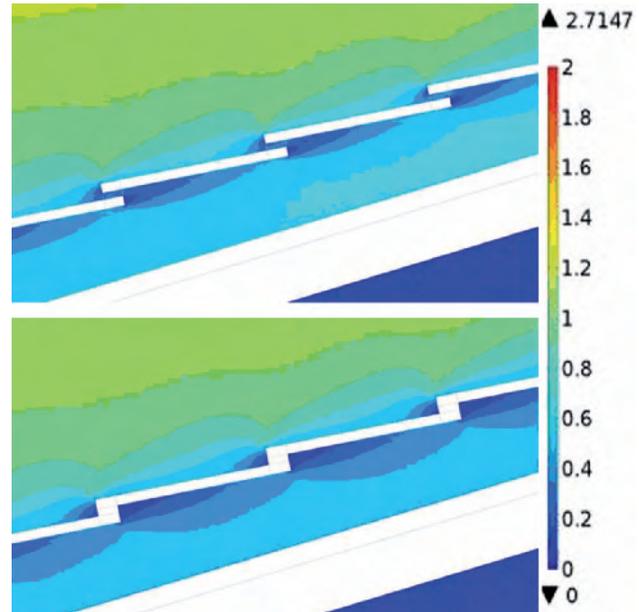
Scambio termico. I risultati dello scambio termico sono riportati in termini di temperature minime e massime (tab. 3) in determinati punti della struttura (fig.6). Tali prestazioni sono raggiunte con un sistema di climatizzazione supposto all'interno dell'ambiente abitato e di potenza pari a 150 W/m.



3. Potenza di climatizzazione interna per mantenere una temperatura indoor di 26°C.



4. Campo di moto in m/s per il tetto piano e per il tetto a falde.



5. Campo di moto in m/s per il tetto a falde (caso V) e per il tetto a falde (caso V_pn).

La massima temperatura nell'ambiente (dp1) con tetto piano (P) risulta pari a 26,3°C, mentre la minima a 25,4°C, con una differenza termica pari 0,9°C. Nel tetto a falde con camera di ventilazione nella configurazione base (V), le temperature scendono a un valore massimo di 22,0°C e minimo di 21,6°C. In presenza di una camera di ventilazione dimezzata (V_cr), la massima temperatura aumenta sia nell'ambiente (22,5°C), sia nella mansarda (26,0°C).

Confrontando le temperature del caso ventilato iniziale (V) con quelle dell'analoga configurazione, ma in assenza delle forze di volume (V_nvf), le temperature si differenziano sostanzialmente solo in mansarda (dp2), aumentando la massima da 25,1 a 25,5°C. A parità, quindi, di ogni altra condizione il fenomeno convettivo legato alle sole forze naturali risulta modesto se rapportato a quello dovuto al vento.

L'incidenza del grado di permeabilità all'aria del manto discontinuo è desumibile dal confronto del caso con tetto ventilato standard (V), con l'analoga configurazione a permeabilità all'a-

ria ridotta (V_pr) e con quello non permeabile all'aria (V_pn). La progressiva riduzione della apertura tra tegole da 9,0 mm a 2,5 mm e quindi a 0,0 mm determina un aumento della temperatura massima e minima non solo in mansarda, ma anche nell'ambiente sottostante. La temperatura nel sottotetto abitabile aumenta da 25,1°C a 25,5°C e quindi a 25,7°C. In particolare si nota che il primo aumento 0,4°C dovuto al passaggio della permeabilità all'aria fra le tegole da 9,0 mm a 2,5 mm, risulta poi dimezzato (0,2°C) nella successiva riduzione, a indicare che già i 2,5 mm rappresentano una permeabilità piuttosto modesta che riduce in modo significativo l'ingresso di aria in camera di ventilazione.

Per il caso ventilato a permeabilità all'aria nulla (V_pn) la ventilazione in camera rimane garantita solamente dal libero ingresso dell'aria dalla sezione di gronda. Sebbene con permeabilità all'aria nulla, il solo ingresso dell'aria in linea di gronda consente di limitare l'aumento della massima temperatura nell'ambiente di 0,4°C rispetto al caso ventilato di partenza (V). Si ritiene, quindi, che

Temperatura rilevata nei punti di misura (°C)								
CASO	dp1		dp2		bp3	bp5	bp4	bp6
	min	max	min	max	max	max	max	max
P	25,4	26,3	-	-	26,9	67,7	-	-
V	21,6	22,0	23,7	25,1	25,4	41,7	25,5	44,1
V_cr	22,0	22,5	24,2	26,0	26,4	47,1	26,6	49,7
V_nvf	21,6	21,9	23,8	25,5	25,7	42,4	26,1	51,3
V_cc	23,4	23,8	26,4	28,6	28,8	51,4	29,4	62,3
V_pr	21,8	22,2	23,9	25,5	25,8	42,4	26,0	47,6
V_pn	22,0	22,4	24,1	25,7	26,1	42,9	26,4	50,4
V_ic	22,0	22,4	24,0	25,7	26,0	44,6	26,0	45,2

Legenda

dp1 = temperatura ambiente interno

dp2 = temperatura mansarda

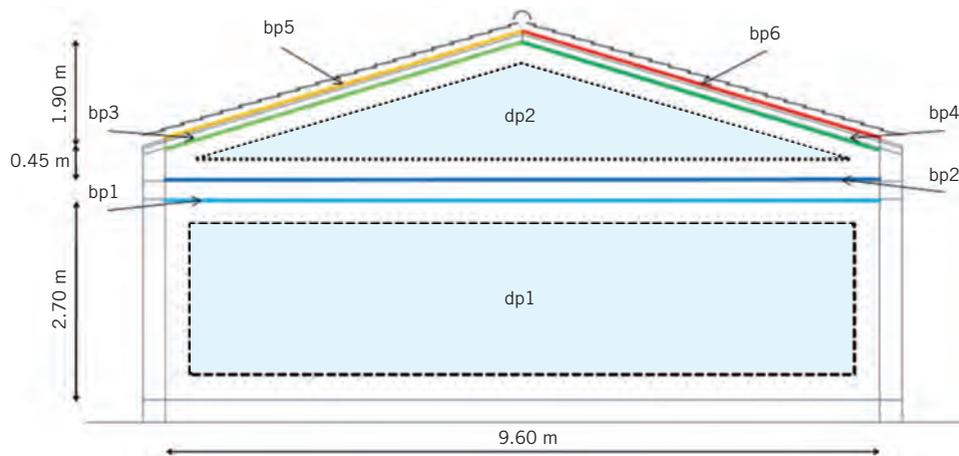
bp3 = temperatura all'intradosso della falda sopravento

bp4 = temperatura all'intradosso della falda sottovento

bp5 = temperatura all'estradosso della falda sopravento

bp6 = temperatura all'estradosso della falda sopravento

Tabella 3. Risultati dello scambio termico in termini di temperature minime e massime risultanti nei diversi punti dell'edificio campione.



6. Codifica dei punti di rilievo della temperatura.

l'incidenza della chiusura totale dell'ingresso dell'aria alla sezione di gronda sia equivalente all'azzeramento della permeabilità all'aria del manto discontinuo. L'unica differenza, ma sostanziale, è legata alla direzione del vento. Mentre per quanto riguarda la permeabilità all'aria, l'angolo di incidenza del vento sulla copertura dovrebbe avere un effetto limitato, la non ortogonalità del vento rispetto all'angolo di imbocco in gronda riduce notevolmente l'effetto della ventilazione. E', quindi, la permeabilità del manto di copertura che sembra giocare un ruolo più attivo e meno influenzato dalla direzione del vento.

In funzione delle condizioni al contorno imposte si osserva, in figura 7, che il flusso termico risultante all'intradosso della coperture standard nel caso di tetto piano (P) è mediamente pari a 12 W/m^2 e in quello a falde ventilato (V) a circa 4 W/m^2 . Per il caso della copertura piana, l'oscillazione è piuttosto ridotta per la maggiore massa in gioco, mentre, per quello del tetto a falde ventilato questa risulta piuttosto accentuata. Inoltre, la diversa posizione del massimo indica il differente sfasamento dell'onda termica entrante.

In figura 8 sono riportate inoltre le trasmittanze termiche equivalenti valutate secondo le modalità di calcolo sono differenti per i due casi.

Nel caso piano, il valore U_{m_p} è il rapporto tra il flusso termico istantaneo entrante e la differenza di temperatura tra quella dell'ambiente ($dp1$) e quella all'estradosso della copertura ($bp6$). In quello a falde ventilato, i valori riportati sono due. Il primo (U_{m_V}) è ottenuto considerando i flussi sopravvento e sottovento, le rispettive temperature sul manto esterno in copertura e quella in mansarda ($dp2$); il secondo ($U_{m_V^*}$) è analogo al precedente ma considera la temperatura ambiente ($dp1$) al posto di quella in mansarda ($dp2$).

Nel caso piano, il valore finale risulta pari a $4 \text{ W/m}^2\text{K}$, mentre per quello a falde il valore varia tra 1,2 e $1,6 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Come già visto, per mantenere una temperatura di comfort ($\sim 26^\circ\text{C}$) nel caso di tetto piano (P) è stata supposta una potenza di raffrescamento pari a 150 W a metro di sviluppo di edificio. Tale potenza copre il fabbisogno non solo conseguente alle prestazioni della copertura, ma anche di tutto il resto dell'involucro dell'ambiente ipotizzato ($9,6 \text{ m} \times 2,7 \text{ m}$); la precedente potenza specifica diviene quindi pari a circa $5,8 \text{ W/m}^3$ ($\sim 150/9,6/2,7$).

Per valutare le potenze che consentono di mantenere la medesima temperatura anche nel caso di tetto a falde ventilato (V) sono state condotte numerose analisi regolando la potenza imposta sino a ottenere una temperatura massima confrontabile.

Questa è risultata pari a circa 60 W , cui corrisponde una potenza specifica pari a $2,3 \text{ W/m}^3$. Conseguentemente, a parità di temperatura interna e condizioni al contorno, la climatizzazione

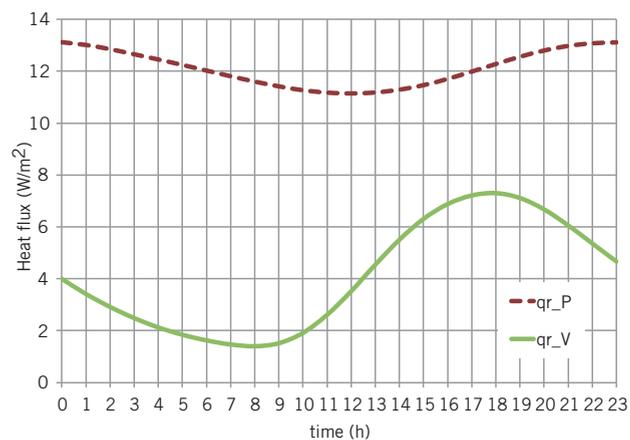
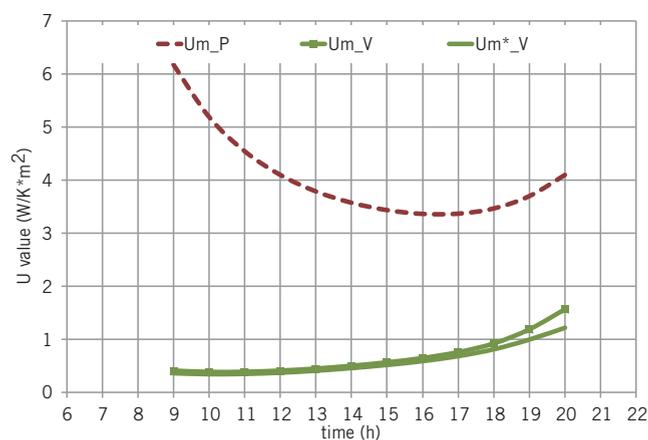
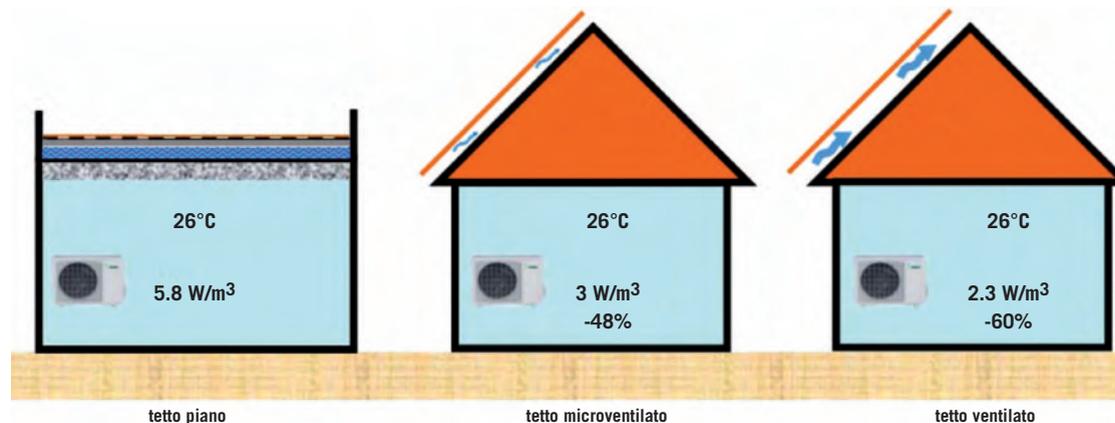


Figura 7. Confronto tra i flussi termici risultanti in copertura nei casi del tetto piano (P) ed a falde ventilate (V).



Legenda
 U_{m_P} nel caso del piano tetto è il rapporto tra il flusso termico entrante e la differenza di temperatura tra l'ambiente piano terra ($dp1$) e la superficie inferiore della camera di ventilazione ($bp6$);
 U_{m_V} nel caso del tetto a falde ventilato è il valore medio ottenuto dal rapporto tra i flussi sopravvento e sottovento e le rispettive temperature dello strato impermeabile esterno e della mansarda ($dp2$);
 $U_{m_V^*}$ analogo al valore medio precedente, ma considerando la temperatura ambiente al piano terra ($dp1$) invece della temperatura della mansarda ($dp2$).

Figura 8. Trasmittanze termiche medie equivalenti in copertura.



9. Potenze necessarie a mantenere la medesima temperatura nei tre casi evidenziati.

dell'ambiente al di sotto di una copertura a falde ventilata necessiterebbe di un quantitativo di energia pari al 40% rispetto a quella necessaria per climatizzare il medesimo volume al di sotto di un tetto piano (fig. 9).

Assunto un costo energetico omnicomprendente del kilowattora elettrico ad uso residenziale pari a 0,3 €/kWh_e e un COP (coefficient of performance) del sistema di raffrescamento pari a 3,0, il costo del kilowattora termico risulterebbe pari a circa 0,10 €/kWh. Supposta la volumetria di una proprietà monofamiliare pari a circa 500 m³, per la completa climatizzazione risulterebbero necessari circa 35 kWh/giorno per il caso con tetto piano e 14 kWh/giorno per quello con tetto a falde ventilato, assunto un funzionamento di 12h/giorno. A ciò corrisponderebbe un costo giornaliero pari a rispettivamente 3,5 e 1,4 €/giorno. Il caso ventilato sembrerebbe quindi esprimere, nelle condizioni assunte, un risparmio pari a circa 2 €/giorno.

Tali considerazioni, sebbene di tipo esplorativo e di prima approssimazione, dovrebbero comunque rappresentare un valore minimo, in relazione alle cautele assunte.

Conclusioni

A parità di ogni altra condizione, nell'ipotesi semplificativa introdotta, la copertura a falde con camera di ventilazione ha evidenziato temperature negli ambienti sottostanti notevolmente inferiori a quelle della tipologia con tetto piano, anche grazie all'effetto isolante della volumetria aggiuntiva. Tale volumetria attua peraltro una moderazione dell'onda termica conseguente all'irraggiamento e un diverso sfasamento rispetto al caso tetto piano. Ciò si riflette sul comfort indoor in termini di temperature radianti e di stabilità termica. Analizzando il comportamento all'interno della camera di ventilazione della copertura a falde ventilata, l'effetto convettivo, nelle sue componenti naturali e forzate, determina complessivamente una riduzione delle temperature nell'ambiente al piano terreno pari a circa 4°C. Il contributo legato alla forze di volume è risultato modesto anche in presenza di vento particolarmente debole. Ciò induce a ritenere che la caratterizzazione della copertura ventilata sia strettamente legata al fenomeno convettivo collegato al vento piuttosto che a forze di galleggiamento³, laddove il vento sia presente. La riduzione della permeabilità del manto determina un significativo calo delle prestazioni. Analogamente

portamento è conseguente alla chiusura della sezione di ingresso dell'aria della camera di ventilazione in gronda.

Il beneficio della convezione agente nella camera di ventilazione è generato dal vento entrante sia attraverso la permeabilità all'aria del manto discontinuo, sia alla sezione di imbocco in gronda. Tuttavia, poiché il vento è stato supposto in direzione favorevole all'imbocco (ortogonalmente all'edificio) è da ritenere che i due rispettivi contributi possano risultare anche notevolmente diversi al variare di tale direzione.

Per mantenere quindi la medesima temperatura interna degli ambienti a piano terra di una costruzione con copertura piana (~26°C), una costruzione con tetto a falde ventilato necessiterebbe di una potenza inferiore del 60% a parità di condizioni al contorno con un conseguente risparmio sui costi di funzionamento dell'impianto per il mantenimento delle condizioni di comfort interno per gli utenti. ¶

* Giovanni Zannoni

Professore associato Dipartimento di Architettura, Università di Ferrara

** Marco Bortoloni

Ph.D. student, Dipartimento di Ingegneria, Università di Ferrara

*** Michele Bottarelli

Ricercatore, Dipartimento di Architettura, Università di Ferrara

Note

1. Modello a due equazioni per la valutazione della turbolenza.
2. In un campo gravitazionale un fluido più leggero circondato da un fluido più pesante è soggetto ad una forza netta che lo spinge verso l'alto. Nel nostro caso è il fenomeno per cui l'aria calda, fluido più leggero, viene spinta verso l'alto dall'aria fredda, fluido più pesante (vedi anche nota 3).
3. In un campo gravitazionale un fluido più leggero circondato da un fluido più pesante è soggetto ad una forza netta che lo spinge verso l'alto. Per un corpo immerso in un fluido tale forza è nota come forza di galleggiamento (o forza di volume), la cui entità è pari al peso del fluido spostato dal corpo (spinta di Archimede).

Bibliografia

- [1] A. Dimoudi, A. Androustopoulos, S. Lykoudis, Summer performance of a ventilated roof component, *Energy and Buildings*, vol. 38, pp. 610–617, 2006.
- [2] M. Sandberg, B. Moshfegh, Ventilated-solar roof air flow and heat transfer investigation, *Renewable Energy*, vol. 15, pp. 287–292, 1998.
- [3] W. Miller, M. Keyhani, T. Stovall, A. Youngquist, Natural Convection Heat Transfer in Roofs with Above-Sheathing Ventilation, *ASHRAE*, 2007.
- [4] G. De With, N. Cherry, J. Haig, Thermal Benefits of Tiled Roofs with Above-sheathing Ventilation, *Int. J. of Building Physics*, vol. 33, 2009.
- [5] M. D'Orazio, C. Di Perna, P. Principi, A. Stazi, Effects of roof tile permeability on the thermal performance of ventilated roofs: Analysis of annual performance, *Energy and Buildings*, vol. 40, pp. 911–916, 2008.
- [6] C. Pellanda, Raffrescamento passivo in coperture a falde ventilate, thesis, IUAV, Venezia, Italy, 1993.