



LE COPERTURE VENTILATE: DA UNA SPERIMENTAZIONE CRITERI PER IL DIMENSIONAMENTO

A. STAZI, M. D'ORAZIO, C. DI PERNA, A. CARBONARI

INTRODUZIONE

Da qualche anno, i sistemi per la ventilazione dei tetti sono entrati a far parte della nostra tradizione costruttiva, per il fatto che possono risolvere efficacemente i problemi di surriscaldamento dei sottotetti utilizzati ad abitazione. Si tratta di sistemi che permettono la realizzazione, tra gli strati funzionali di un solaio, di un'intercapedine aerata, in modo da consentire lo smaltimento del calore altrimenti accumulato dal tetto in estate per effetto dell'irraggiamento.

Per le caratteristiche del nostro patrimonio edilizio, molte ditte si rivolgono oggi alla produzione di sistemi per la ventilazione dei tetti realizzati con solai in latero-cemento. Si tratta perlopiù di sandwich, ottenuti accoppiando uno strato isolante ed una barriera impermeabile, sagomati in modo da consentire l'alloggiamento del manto di copertura realizzando un'intercapedine dove l'aria può circolare.

Sebbene questi sistemi si stiano diffondendo ampiamente, quasi nulle sono le informazioni tecniche disponibili per il loro uso e dimensionamento. Non esistono dati che permettano di dimensionare il tetto ventilato rispetto alle necessità climatiche, ad esempio come rapporto tra altezza e lunghezza della camera di ventilazione, né di prevedere la sua efficacia in relazione alle condizioni di esposizione. I progettisti che utilizzano questi sistemi lo fanno più perché hanno la "speranza" che funzionino piuttosto che per una reale consapevolezza e quantificazione del loro funzionamento.

Sulla scorta di queste considerazioni, si è condotta una sperimentazione¹ che ha avuto lo scopo di fornire alcuni elementi per il dimensionamento delle camere di ventilazione per coperture realizzate su solai in latero-cemento. In particolare si sono determinati:

- gli spessori ottimali della camera di ventilazione in relazione alle condizioni di flusso di irraggiamento;
- la variazione di efficienza delle coperture al variare della lunghezza del canale di ventilazione.

Si è fatto riferimento a camere di ventilazione realizzate variando la disposizione dei correnti di legno sopra l'isolante in modo da ottenere dati utilizzabili al di là dei singoli prodotti commerciali.

LE MODALITA' DELLA SPERIMENTAZIONE

Al fine di individuare altezza e lunghezza ottimale della falda in relazione alle condizioni ambientali in cui si può trovare ad operare un tetto ventilato, si è condotta una sperimentazione in tre fasi:

- una fase sperimentale di confronto di modelli fisici in laboratorio (tranches di falde di copertura), utile a valutare l'incidenza dello spessore della camera di ventilazione;
- una fase di confronto di sistemi mediante simulazioni fluidodinamiche, utile a valutare l'incidenza della lunghezza della falda;
- una fase di analisi in opera di un tetto ventilato, utile come elemento di raffronto rispetto all'analisi in laboratorio ed alle simulazioni fluidodinamiche.

¹ I materiali per la sperimentazione sono stati gentilmente offerti dalla ditta **Serrani** di Ancona.



La prima fase è consistita nella realizzazione e nel monitoraggio in laboratorio di tre sistemi di ventilazione su una trancina di solaio in latero-cemento, con isolante da 4 cm. **Fig.1**. In particolare, sullo stesso solaio, si sono messi a confronto tre sistemi diversi tra di loro per spessore della camera ventilante, e cioè:

- una copertura “ventilata” con intercapedine libera (escluso cioè il canale discontinuo presente in ogni copertura) alta 6 cm., ottenuta con una doppia orditura di listelli sovrapposti ortogonalmente; **Fig.2a**
- una copertura “ventilata” con intercapedine libera alta 3 cm., ottenuta con una orditura di listelli sovrapposti ortogonalmente; **Fig.2b**
- una copertura "microventilata", con intercapedine, dovuta al semplice spazio tra coppo e listello. **Fig.2c**

Gli effetti dell'irraggiamento sono stati simulati imponendo tre diversi flussi entranti mediante resistenze termiche. Si sono scelte tre condizioni di flusso passante imposto: 10 – 50 – 100 W/m².² Questi valori possono essere fatti corrispondere ai dati di irraggiamento del giorno tipo (dati CNR)³ per il mese di agosto nelle località di Bolzano, Ancona e Messina. La corrispondenza è stata ricavata mediante un bilancio termico tra il flusso entrante per irraggiamento, il calore ceduto per convezione all'esterno (ipotizzando un range di velocità dell'aria ed una temperatura esterna fissa), ed il flusso passante imposto. **Fig.3**

Il monitoraggio è stato condotto effettuando la misura in continuo di grandezze termiche e di velocità dell'aria grazie a un totale di 50 sonde, tra termocoppie, flussimetri ed anemometri a filo caldo⁴,

La seconda fase, una volta ottenuti gli ordini di grandezza del comportamento dei sistemi in laboratorio, è consistita nella simulazione del funzionamento di queste coperture al variare della lunghezza della falda, mantenendo invariato il flusso termico imposto. Si è utilizzato il codice FEM Star 3D, imponendo condizioni termiche e di flusso analoghe a quelle in cui è stata effettuata l'analisi sperimentale.

La terza fase è consistita nel monitoraggio per una settimana in estate di una copertura realizzata nei pressi di Ancona. In particolare si sono poste, su di una copertura realizzata con il sistema ISOSCOTCH, sonde per il rilievo di grandezze termiche, di umidità relativa e di velocità dell'aria, collegate ad un acquirente analogico. Questa fase ha permesso di ottenere dati di raffronto rispetto alle simulazioni di laboratorio e con l'elaboratore.

QUANTO INCIDE L'ALTEZZA DELL'INTERCAPEDINE ? IL CONFRONTO TRA LE TRE COPERTURE IN LABORATORIO

Il confronto effettuato in laboratorio tra le tre coperture, a pari condizioni di flusso imposto, ha evidenziato grosse differenze di comportamento, e quindi possibilità di utilizzo delle diverse coperture al variare del flusso imposto.

² Sono state eseguite due schemi di prove per ognuna tipologia di copertura; una prima serie di test è stata effettuata imponendo le tre condizioni di flusso per un ciclo di 8 ore ciascuna; la seconda serie, invece, è stata condotta nell'arco di 10 ore imponendo una serie di flussi a cominciare da 10 W/m² per arrivare a 100 W/m² con uno step di 10 ad ogni ora. Ciò ha permesso di ottenere la caratterizzazione sia statica che dinamica delle coperture.

³ CNR, “Dati per la progettazione edile ed impiantistica”, Progetto Finalizzato Energetica, Roma, 1982.

⁴ Le sonde sono state disposte sulla base di una precedente simulazione fluidodinamica del funzionamento del sistema.



Per condizioni di irraggiamento molto modeste, ottenute imponendo 10 W/m^2 passanti, come ad esempio per località del nord Italia tipo Bolzano, la copertura microventilata (tipo 3), realizzata cioè con dei semplici listelli di supporto sui quali poggia il manto di copertura, si è dimostrata già sufficiente a garantire un certo smaltimento dell'irraggiamento solare.

Sebbene questa copertura⁵, nelle prove effettuate, abbia consentito una attenuazione del flusso pari al 50% ($\approx 5 \text{ w/m}^2$ passanti) contro il 70-80% ($\approx 2-3 \text{ w/m}^2$ passanti) delle due coperture con camera di ventilazione libera da 3 e 6 cm., i bassi valori di flusso passante rendono, ai fini termici, le differenze ottenute tra i vari sistemi molto modeste, tanto da rendere inutile la maggiore complicazione costruttiva di una copertura con più ampia camera di ventilazione.

Nel caso, invece, di irraggiamento medio e soprattutto elevato, ottenuto imponendo 50 e 100 W/m^2 , la copertura microventilata è diventata assolutamente insufficiente, allontanandosi sensibilmente dal comportamento delle coperture ventilate (tipo 2 da 3 cm. e tipo 3 da 6 cm.)⁶. **Fig.4**

La temperatura dell'aria in uscita dal condotto, nella copertura microventilata, è risultata elevatissima, a differenza delle coperture ventilate, nelle quali la temperatura di uscita dell'aria è risultata molto più bassa di quella del manto. Queste ultime conseguentemente hanno permesso una sostanziale attenuazione del flusso passante all'intradosso della falda. **Fig.5**

Inoltre le prove, eseguite a 50 e 100 W/m^2 , hanno dimostrato che esistono solo piccole differenze di comportamento tra i due sistemi ventilati (camere alte 3-6 cm.). Entrambi lasciano passare simili quantità di flusso termico, e le temperature dell'aria e del manto di copertura differiscono solo di pochi gradi.

Se per condizioni medie di flusso imposto (50 W/m^2) può essere utile aumentare la dimensione della camera di ventilazione arrivando ad una altezza di 6 cm., per flussi molto elevati (100 W/m^2), le differenze si attenuano al punto che non risulta più conveniente realizzare una camera ventilante superiore a 3 cm perché la complessità di realizzo e, in particolare, l'aspetto economico, non giustificano il modesto miglioramento. **Fig. 6**

CONTA LA LUNGHEZZA DELLE FALDA ?

⁵ Questa tipologia è stata esaminata solo per le due condizioni di flusso imposto (10 e 50 W/m^2) in quanto già per queste grandezze la temperatura del manto di copertura ha raggiunto valori molto alti ($60\div 70 \text{ }^\circ\text{C}$) che corrispondono a quelli di una falda soleggiata a sud in nel periodo estivo. Da queste due serie di prove è emerso che in una copertura tradizionale, dove il campo di moto dell'aria è essenzialmente limitato ed influenzato fortemente dalle resistenze passive (listelli di supporto delle manto, restringimenti, scabrosità, ecc.) le velocità medie che si sono osservate sono risultate modeste: $0,25$ e $0,35 \text{ m/s}$ rispettivamente nella condizione di 10 e 50 W/m^2 . In questo caso si parla di microventilazione, ovvero di un leggero movimento d'aria sottotegola conseguente ai piccoli gradienti di temperatura che si vengono a creare nei vari livelli dello strato d'aria. Lo strato d'aria, muovendosi lentamente, raggiunge, in tutto il suo spessore, la temperatura del manto di copertura già a ad 1.5 m dalla sezione di imbocco determinando, così, la prevalenza del tratto inefficiente: L_{ril} . In questo caso si è osservata una portata d'aria sicuramente al di sotto dei valori realmente utili per un proficuo beneficio dal punto di vista dello smaltimento dell'apporto solare assorbito dal tetto.

⁶ Nella tipologia con $H=3 \text{ cm}$ si è osservato che per bassi flussi l'aria in uscita dal condotto raggiunge la temperatura del manto di copertura, mentre per flussi maggiori l'aria si mantiene intorno a valori molto più bassi. Ciò è dovuto al fatto che per irraggiamenti solari modesti la velocità dell'aria risulta alquanto bassa ($0,35 \text{ m/s}$) e quindi, permanendo di più nel condotto riesce a raggiungere con facilità il valore di temperatura superficiale. All'interno della camera di ventilazione di spessore pari ad $H=6 \text{ cm}$, invece, si instaura un campo di moto caratterizzato da una velocità che può raggiungere e anche superare gli $0,7 \text{ m/s}$. In questa configurazione si è osservato che la temperatura dell'aria nel condotto, a seguito delle elevate velocità, rimane abbastanza costante; si hanno leggerissimi incrementi solo nel tratto finale e in particolare per la condizione di 100 W/m^2 .



I RISULTATI DELLE SIMULAZIONI FLUIDODINAMICHE

In base ai risultati rilevati durante le prove di laboratorio, e confermati dall'analisi fluidodinamica⁷ è emerso che la risposta dei tetti, in termini di flusso passante all'intradosso del solaio, non è costante lungo il condotto, ma peggiora con la lunghezza. **Fig. 7**

Nonostante l'allungamento della falda migliori l'effetto camino, si verifica un cambiamento sostanziale nella possibilità di smaltimento del calore.

Nel tratto iniziale (20-30 cm.), l'aria, passando nel condotto, riesce ad accumulare calore senza rilasciarlo agli ambienti sottostanti (perché grande la differenza di temperatura tra l'aria entrante e la superficie dei coppi). Quando invece percorre il condotto l'aria, accumula progressivamente calore, aumenta la sua temperatura, e quindi passa progressivamente ad una condizione nella quale comincia a rilasciare più calore di quello che è ulteriormente in grado di accumulare.

Mentre nella prima delle due configurazioni esaminate, con falda lunga 3m., il tetto rimane efficiente per quasi tutta la sua lunghezza, nella configurazione di 6m. (una falda normale), il tetto perde di efficienza poco dopo la metà della falda. Questo scarto è più sensibile tanto più è bassa l'altezza della camera di ventilazione.

Si verifica cioè che l'aria, passando in un condotto lungo e basso, raggiunge presto una condizione nella quale è maggiore il delta termico tra l'aria ed il solaio sottostante rispetto al delta termico tra l'aria ed i coppi.

Conseguentemente l'aria smette di accumulare calore, e, pur continuando a ventilare il condotto, cede il calore fin lì accumulato agli ambienti sottostanti.

Quindi falde lunghe (6÷8 m.) determinano, nei vani sottotetto, condizioni ambientali più critiche rispetto a falde di dimensioni più ridotte (3÷4 m).

IL COMPORTAMENTO IN OPERA DI UN TETTO VENTILATO

Al fine di avere un confronto dei dati della sperimentazione con il comportamento di una copertura reale in opera, si è monitorato il comportamento in continuo, per quattro giorni, in agosto, di una copertura ventilata, realizzata con sistema ISO-SCOTCH, posta su edifici a schiera in località Varano di Ancona.

Sebbene i dati raccolti vadano trattati con molta cautela, in quanto riferibili ad una molteplicità di condizioni che possono aver influenzato i dati di misura, è emerso come le camere ventilanti riescano a garantire un certo smaltimento del calore portato per irraggiamento, anche se di minore portata rispetto a quanto emerso nella sperimentazione in laboratorio. Ciò è probabilmente dovuto alla disposizione della falda e delle caratteristiche degli elementi di ingresso e di uscita dell'aria.

In particolare, facendo riferimento ad uno dei tre condotti monitorati, per uno dei giorni considerati, il sistema di ventilazione riesce ad attenuare i picchi riducendo la quantità di calore entrante al di sotto della camera di ventilazione.

In maniera analoga a quanto emerso dalle sperimentazioni di laboratorio, l'efficienza del sistema ventilato appare significativa per le condizioni più elevate di irraggiamento, mentre, nel momento in cui diminuiscono i valori dell'irraggiamento, perde di significato la sua presenza.

E' interessante notare che la presenza del sistema ventilante annulla l'inerzia del tetto, che tende a disporsi quasi subito in linea con le temperature esterne.

⁷ Si è utilizzato il modulo Flotran del programma Ansys 5.3.



CONCLUSIONI

La sperimentazione ha evidenziato come non sia indifferente la scelta del sistema di ventilazione rispetto alle condizioni ambientali in cui ci si troverà ad operare.

Per climi caratterizzati da un basso irraggiamento una copertura microventilata risulta già pienamente efficiente. Il canale, pur se piccolo, in quanto realizzato con dei semplici listelli di supporto su i quali poggia il manto di copertura, riesce a già dissipare una quantità sufficiente di calore, rendendo sostanzialmente inutile, ai fini termici in periodo estivo, l'uso di una più ampia camera di ventilazione.

Per climi caratterizzati invece da un irraggiamento medio, è necessario passare a sistemi con camere ventilate più elevate. Qui l'efficienza maggiore è fornita dal sistema alto 6 cm., anche se le differenze rispetto ad un sistema con camera alta 3 cm. non sono elevate.

Per climi caratterizzati invece da un forte irraggiamento, pur continuando ad essere indispensabile una camera ventilata, si registra un fatto particolare. La differenza di comportamento tra i sistemi a 3 e 6 cm. di altezza, diventa talmente modesta, da risultare di fatto inutile superare i 3 cm. di altezza della camera ventilante.

Vi è da rilevare comunque come tale comportamento può variare in relazione alla lunghezza prevista della falda, e sarà tanto migliore quanto sarà minore la lunghezza della falda stessa.

E' sempre utile cercare di ridurre il più possibile la lunghezza della falda, in modo da evitare che l'aria raggiunga nel condotto temperature che la costringono di fatto a cedere più calore di quello che accumula.

BIBLIOGRAFIA

- [1] P. BRUNELLO, F. PERON, *“Modelli per l'analisi del comportamento fluidodinamico delle facciate ventilate”*, Atti del 51° congresso ATI, Udine 1996, pp. 313-324.
- [2] A. SILBERSTAIN, H. HENS, *“Effects of air and moisture flows on the thermal performance of insulation in ventilated roofs and walls”*.
- [3] C. BONACINA, A. CAVALLINI, F. MATTAROLO, *“Trasmissione del calore”*, capp. 6-7, Cleup Ed., Padova, 1992.
- [4] ASHRAE handbook-1989 Fundamentals, cap. 3 *“Air infiltration and natural ventilation”*, pp. 60-69,;cap 14 *“Airflows around buildings”*, pp.1-10; cap. 23 *“Infiltration and ventilation”*, pp. 1-8.

Figure

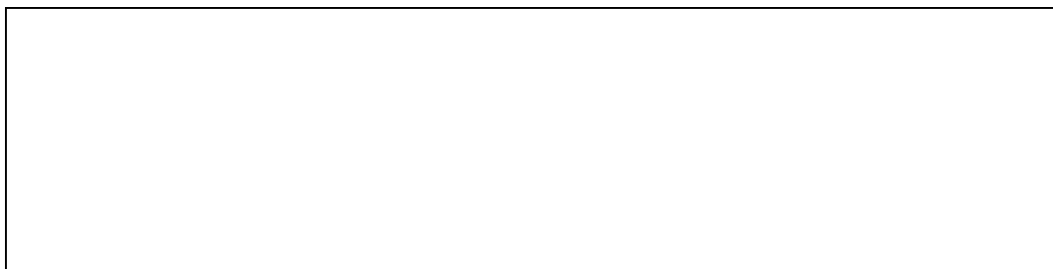


Fig. 2 Caratteristiche delle coperture realizzate per la sperimentazione.

Flusso imposto Φ_{in}	10 W/m ²		50 W/m ²		100 W/m ²	
Irraggiamento solare corrispondente [W/m ²]	<i>Irr.min</i>	<i>Irrag.max</i>	<i>Irrag.min</i>	<i>Irrag.max</i>	<i>Irrag.min</i>	<i>Irrag.max</i>
BOLZANO	22.7	94.7	99.3	286	192	494
ANCONA	74.7	127.2	235	374	412	636
MESSINA	50.7	118.7	179	351	172	599

Fig. 3 Corrispondenza tra le condizioni di irraggiamento per tre località italiane ed i flussi imposti nella sperimentazione. Questa corrispondenza è stata ricavata con un bilancio termico tra i flussi entranti per irraggiamento, quelli ceduti per convezione con differenti velocità dell'aria sul tetto e quelli passanti all'intradosso.

	H = 0 cm			H= 3 cm			H = 6 cm		
	10 W/m ²	50 W/m ²	100 W/m ²	10	50	100	10	50	100
Flusso uscente	4.733	18		1.895	2.74	4.37	1.81	1.7	4.225

Fig.4 Flussi passanti all'intradosso del solaio per le tre configurazioni di tetto esaminate in relazione alle tre diverse condizioni di flusso imposto. Con H=0 si è indicata la copertura microventilata, cioè senza un canale libero di circolazione.

Flusso imposto Φ_{in} [W/m ²]	10	50	100
	RENDIMENTO η		
H = 0 cm	0,372	0,728	////
H = 3 cm	0,76	0,95	0,997
H = 6 cm	0,873	0,94	0,97

Fig. 5 Il diverso comportamento delle falde, al variare delle condizioni di flusso imposto, è rilevabile dal parametro η , il quale rappresenta il rendimento del "sistema copertura" definito come il rapporto tra la differenza flusso entrante e flusso uscente all'intradosso della falda e quello entrante imposto. ($0 \leq \eta \leq 1$); valori alti del rendimento indicano che il flusso imposto viene per la maggior parte asportato fuori dall'aria in movimento nella camera ventilante, viceversa, valori modesti di η significano che la copertura lascia passare nell'ambiente sottostante grosse quantità di flusso termico risultando, quindi, poco efficiente, espresso come differenza tra il flusso imposto, e quello effettivamente passante nel solaio.

	<i>u. di m.</i>	<i>H=0 cm</i>			<i>H=3 cm</i>			<i>H=6 cm</i>		
Flusso imposto	W/m ²	10	50	100	10	50	100	10	50	100
T. ambiente	°C	23.7	24.2	////	23.2	22.2	23.2	21.9	21.4	22.3
T. aria in ingresso	°C	28.5	35.93	////	25.8	24.65	26.30	23.25	23.48	26.85
T. aria in uscita	°C	41.99	66.9	////	28.61	30.70	35.70	25	27.05	31.93
T. manto di copertura	°C	41.99	67	////	28.64	36.49	46.25	26.83	35.57	45.7
Vel. sez. di ingresso	m/s	0.28	0.32	////	0.34	0.42	0.38	0.43	0.43	0.57
Vel. sez. di uscita	m/s	0.26	0.37	////	0.40	0.54	0.55	0.53	0.56	0.66
Vel. media	m/s	0.27	0.35	////	0.37	0.48	0.47	0.48	0.48	0.63

Fig. 6 Dati riassuntivi dei risultati ottenuti nella sperimentazione. Sono riportati i valori di temperatura e le velocità dell'aria nel condotto. Come si può osservare le velocità dell'aria risultano sempre abbastanza modeste, segno che piccoli gradienti di pressione tra ingresso ed uscita potrebbero già essere sufficienti ad annullare la circolazione dell'aria.

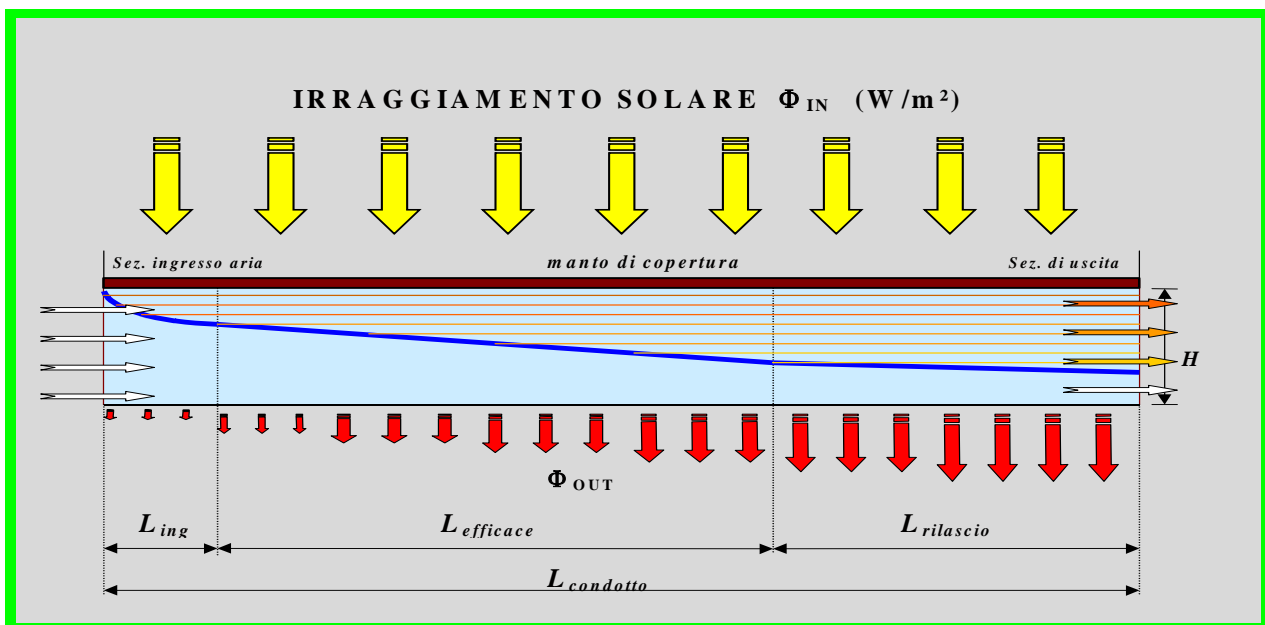


Fig. 7 E' rappresentata la sezione longitudinale del condotto ventilante di spessore H in cui viene messo in evidenza il meccanismo di scambio termico tra l'aria in movimento e l'ambiente sottotetto. Come si può osservare dopo il primo tratto di ca. 30 cm (indicato come " L_{ing} "), l'aria si riscalda progressivamente accumulando molto calore e cedendone poco al solaio sottostante. In questo tratto, definito " $L_{efficace}$ ", il sistema di ventilazione riesce a garantire confortevolezza agli ambienti interni. Arrivati ad un certo punto (" $L_{rilascio}$ ") l'aria raggiunge temperature elevate, smettendo di accumulare ulteriormente calore, per cedere quello accumulato verso l'interno. La possibilità che si formi in un tetto ventilato un tratto di rilascio ampio è proporzionale alla lunghezza della falda ed inversamente proporzionale allo spessore. Per le configurazioni di falda esaminate con lunghezza 3 m. questo tratto è lungo ca. 0.5-1 m.. Mentre per falde con lunghezza 6m. questo tratto raggiunge i 2m. Va ricordato inoltre che ogni strozzatura, variazione di sezione del condotto tende ad allungare il tratto inefficace.