

# Sull'impiego delle pareti ventilate per la riduzione dei carichi termici estivi

**Il risparmio energetico conseguibile con l'impiego di strutture ventilate viene discusso mediante una funzione semplice di cinque parametri adimensionali che ben si presta per verifiche progettuali. Come esempio di applicazione vengono esaminate varie tipologie di facciate e coperture ventilate**

**N**egli ultimi anni le pareti ventilate sono state oggetto di numerosi studi, sia dal punto di vista architettonico, per i contenuti estetico formali che questa particolare scelta può comportare, sia dal punto di vista fisico-tecnico, per i possibili risparmi energetici conseguibili con l'impiego di tali strutture [1-11].

Nel nostro Paese la crescente domanda di impianti di condizionamento e sistemi split ha comportato un sensibile aumento dei consumi di energia elettrica nella stagione estiva e si prevede, a breve scadenza, che la potenza necessaria possa superare nettamente quella richiesta nel periodo invernale. Di qui la necessità di un'accurata progettazione dell'involucro degli edifici tesa a ridurre i carichi termici estivi: le pareti ventilate, se ben progettate, possono contribuire al raggiungimento di questo obiettivo [8-10].

Le pareti ventilate possono trovare utile applicazione anche negli interventi di restauro e risanamento conservativo e di ristrutturazione edilizia. A questo proposito risultano significativi i recenti provvedimenti legislativi<sup>[11]</sup> atti a favorire aumenti di volume quando questi producano un miglioramento del comportamento energetico dell'edificio<sup>(1)</sup>.

Nel presente lavoro si propone un metodo, utilizzabile per applicazioni progettuali, in grado di fornire tutte le indicazioni utili per la scelta della più opportuna tipologia di struttura ventilata da utilizzare [9]. Si osservi, a questo proposito, che nella maggior parte dei casi non interessa tanto il valore preciso del risparmio energetico conseguibile con una data soluzione, quanto piuttosto le indicazioni, anche qualitative, sul posizionamento dell'isolante, sulle dimensioni dell'intercapedine e sul tipo di materiale da utilizzare per la realizzazione dei due paramenti. Come esempio di applicazione di tale metodo

viene riportata un'analisi del comportamento termico di alcune facciate e coperture ventilate, scelte tra quelle di più comune realizzazione.

**Il risparmio percentuale** La struttura ventilata (copertura o facciata) viene schematizzata mediante due paramenti,  $A$  esterno e  $B$  interno, delimitanti una intercapedine di sezione rettangolare nella quale viene fatta fluire dell'aria. L'intercapedine ha lunghezza  $L$  (nella direzione del moto dell'aria), larghezza  $l$ , spessore  $d$ ; sia  $\vartheta$  l'angolo di inclinazione rispetto all'orizzontale che nel caso di facciata è ovviamente  $\vartheta = 90^\circ$  (fig. 1). Si assumono condizioni stazionarie e la trasmissione del calore viene schematizzata unidimensionale, trascurando con ciò ogni effetto dovuto ai ponti termici; tutte le resistenze termiche devono intendersi riferite all'unità di superficie.

Nonostante la complessità del problema e il gran numero di grandezze fisiche che influenzano il comportamento termico di una parete ventilata, è possibile riassumerne le prestazioni energetiche in un'unica formula, avente come grandezze di ingresso solo 5 parametri adimensionali<sup>[9]</sup>. Più precisamente, si può introdurre il risparmio percentuale  $S$ , dovuto alla ventilazione della struttura, nella forma:

$$S = (Q_0 - Q) / Q_0$$

ove  $Q$  è il flusso termico medio entrante nel locale quando la struttura è ventilata, mentre  $Q_0$  è quello entrante quando l'intercapedine di ventilazione è chiusa. Il significato di  $S$  è fortemente intuitivo, soprattutto quando assume valori compresi tra 0 ed 1; valori negativi di  $S$  indicano chiaramente che la ventilazione non è conveniente. Si noti che  $S$  può, in taluni casi (assai particolari), presentare dei valori superiori ad 1: ciò significa che  $Q$  è negativo e cioè che la ventilazione è in grado



# 1 Descrizione delle facciate e delle coperture esaminate

## Influenza dei vari parametri sul risparmio energetico

Nel seguito si riporta un'analisi qualitativa della (1). Innanzi tutto si può notare che valori di  $S$  maggiori di 1 possono essere raggiunti solo se il parametro ambientale  $\varphi$  assume valori maggiori di 1, ciò che conferma l'eccezionalità di tale situazione; inoltre, al fine di ottenere valori di  $S$  positivi, è sempre necessario che sia  $\varphi > z$ . La discussione seguente sarà pertanto limitata a quelle situazioni, le sole praticamente significative, in cui  $S$  risulta compreso tra zero ed uno. In tal caso, in pieno accordo con quanto suggerisce l'intuizione,  $\varphi$  e  $\gamma$  influenzano positivamente il risparmio (al loro crescere,  $S$  aumenta), mentre  $\chi$  e  $H$  lo influenzano negativamente ( $S$  diminuisce).

Più complessa è l'influenza del parametro  $z$ ; in effetti  $z$  non può essere troppo elevato perché il risparmio è negativo se  $z > \varphi$ , ma non può essere troppo piccolo perché anche in tal caso  $S$  diviene negativo. Appare quindi chiaro che, una volta fissati i valori degli altri parametri, si ha solo un intervallo di valori di  $z$  ( $0 < z < \varphi$ ) in cui  $S$  è positivo e ove presenta un massimo. Una completa discussione della (1) è riportata in [9].

Ai fini della determinazione quantitativa del risparmio  $S$  è necessaria una precisa valutazione dei parametri che intervengono nella (1); ciò richiede, tra l'altro, la conoscenza delle resistenze liminari interna ed esterna e delle resistenze liminari all'interno del condotto, nonché degli scambi termici radiativi tra i paramenti delimitanti l'intercapedine. Tali quantità sono tutte affette da inevitabili incertezze e sono, in molti casi, di difficile valutazione. D'altro canto l'utilizzazione più efficace della (1) consiste nel ricavarne indicazioni progettuali per la scelta della tipologia della struttura ventilata da utilizzare. In tale ottica la (1) può essere impiegata in senso "qualitativo", adottando dei valori largamente approssimati, ma significativi, per i parametri in gioco. A questo scopo, considerando che le incertezze maggiori si presentano per la caratterizzazione degli scambi termici nel canale di ventilazione, si suggerisce qui di assumere, in prima approssimazione,  $H=0$  e di utilizzare per le resistenze termiche gli stessi valori per la cavità sia chiusa che aperta e cioè di considerare,  $\chi=1$  e  $z \approx z_0 = R_{e0}/R_{i0}$ , con  $R_{e0}$  resistenza termica vista tra l'aria di ventilazione e l'esterno a cavità chiusa. La semplicità di tali assunzioni riposa soprattutto sul fatto che esse vengono a non dipendere dal moto dell'aria nel canale (qualche cautela è necessaria quando  $z$  è molto piccola o molto prossima ad 1).

L'efficacia di un tale utilizzo qualitativo della (1) può essere apprezzato nell'esame dei seguenti problemi, peraltro trattati in modo quantitativo nel paragrafo successivo:

(a) *influenza dell'intensità di insolazione.* L'intensità  $I$  compare in (1) solo attraverso il parametro ambientale  $\varphi$  che, nei casi di interesse, cresce con  $I$ . Si è già notato come  $S$  risulti negativo per  $\varphi < z$  per cui si ha un risparmio energetico solo al

	Strato	Descrizione e tipologia degli strati	Spessore [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\kappa$ [W/mK]
FACCIATA F <sub>1</sub> $R_{i0} = 1.89$ $z_0 = 0.069$	1 (ext)	Pannelli in lamiera di alluminio	0.003	2700	220
	2	Aria (strato di ventilazione)	(0.10)	-	-
	3	Pannelli rigidi in lana di vetro	0.04	100	0.038
	4	Malta di cemento	0.015	2000	1.40
	5	Calcestruzzo alleggerito in blocchi	0.141	1000	0.31
	6 (int)	Intonaco in malta di calce e cemento	0.015	1800	0.90
FACCIATA F <sub>2</sub> $R_{i0} = 1.89$ $z_0 = 0.149$	1 (ext)	Pannelli in laterizio	0.045	800	0.30
	2	Aria (strato di ventilazione)	(0.10)	-	-
	3	Pannelli rigidi in lana di vetro	0.04	100	0.038
	4	Malta di cemento	0.015	2000	1.40
	5	Laterizio in blocchi forati	0.18	1600	0.59
	6 (int)	Intonaco in malta di calce e cemento	0.015	1800	0.90
FACCIATA F <sub>3</sub> $R_{i0} = 1.89$ $z_0 = 0.098$	1 (ext)	Fibrocemento	0.05	315	0.92
	2	Aria (strato di ventilazione)	(0.10)	-	-
	3	Pannelli rigidi in lana di vetro	0.04	100	0.038
	4	Malta di cemento	0.015	2000	1.40
	5	Calcestruzzo alleggerito in blocchi	0.14	1100	0.35
	6 (int)	Intonaco in malta di calce e cemento	0.015	1800	0.90
FACCIATA F <sub>4</sub> $R_{i0} = 1.89$ $z_0 = 0.076$	1 (ext)	Ceramica	0.013	2300	1.00
	2	Aria (strato di ventilazione)	(0.10)	-	-
	3	Pannelli rigidi in lana di vetro	0.04	100	0.038
	4	Malta di cemento	0.015	2000	1.40
	5	Laterizio in blocchi forati	0.19	1200	0.43
	6 (int)	Intonaco in malta di calce e cemento	0.015	1800	0.90
COPERTURA C <sub>1</sub> $R_{i0} = 1.87$ $z_0 = 0.078$	1 (ext)	Scandole in rame	0.006	8900	380
	2	Aria (strato di ventilazione)	(0.10)	-	-
	3	Pannelli rigidi in lana di vetro	0.04	100	0.038
	4	Malta di cemento	0.015	2000	1.40
	5	Solaio in latero-cemento (*)	0.30	r = 0.37	
	6 (int)	Intonaco in malta di calce e cemento	0.015	1800	0.90
COPERTURA C <sub>2</sub> $R_{i0} = 1.87$ $z_0 = 0.096$	1 (ext)	Tegole in laterizio	0.035	1800	0.72
	2	Aria (strato di ventilazione)	(0.10)	-	-
	3	Pannelli rigidi in lana di vetro	0.04	100	0.038
	4	Malta di cemento	0.015	2000	1.40
	5	Solaio in latero-cemento (*)	0.26	r = 0.35	
	6 (int)	Intonaco in malta di calce e cemento	0.015	1800	0.90
COPERTURA C <sub>3</sub> $R_{i0} = 1.87$ $z_0 = 0.078$	1 (ext)	Lastre in ardesia	0.030	2700	2.00
	2	Aria (strato di ventilazione)	(0.10)	-	-
	3	Pannelli rigidi in lana di vetro	0.04	100	0.038
	4	Malta di cemento	0.015	2000	1.40
	5	Solaio di calcestruzzo alleggerito (*)	0.16	r = 0.38	
	6 (int)	Intonaco in malta di calce e cemento	0.015	1800	0.90

(\*) È riportato il valore della resistenza termica conduttiva  $r$  (m<sup>2</sup>K/W) secondo la UNI 10355/1994.

## 2 Dati di calcolo

Proprietà dell'aria a 300 K, 101320 Pa:

Calore specifico a pressione costante	1004 J/kgK
Viscosità dinamica	1.85 10 <sup>-5</sup> kg/ms
Conducibilità termica	0.026 W/mK
Rapporto tra calori specifici	1.4

Condizioni climatiche:

Temperatura dell'aria esterna $T_o$	28°C
Temperatura nel locale $T_i$	24°C
Intensità radiazione solare $I$	400 W/m <sup>2</sup> (variabile)

Faccia del rivestimento esterno affacciata sull'esterno:

Resistenza liminare $r_e$	0.04 m <sup>2</sup> K/W
Coef. assorbimento per la radiazione solare $a$	0.70

Faccia del supporto murario affacciata sul locale:

Resistenza liminare	0.13 m <sup>2</sup> K/W per le facciate 0.17 m <sup>2</sup> K/W per le coperture
---------------------	---

Canale di ventilazione:

Inclinazione $\vartheta$	90° per le facciate 19° per le coperture (variabile)
Larghezza $l$	10 m
Lunghezza $L$	15 m (variabile)
Spessore $d$	0.10 m (variabile)
Resistenza termica di parete chiusa	0.18 m <sup>2</sup> K/W per le facciate 0.21 m <sup>2</sup> K/W per le coperture
Emissività delle facce del canale	0.9
Fattore di perdita di carico all'imbocco $\lambda_i'$	0.5
Fattore di perdita di carico allo sbocco $\lambda_u'$	1
Rugosità	0.02 m

Per il fattore di attrito  $\lambda$  è usata la formula di Haaland [9] - Per le resistenze convettive è usata la formula di Gnielinski [9]

di sopra di una certa soglia di insolazione; peraltro  $S$  cresce rapidamente con  $\varphi$  per cui le pareti ventilate risultano, dal punto di vista energetico, tanto più convenienti quanto maggiore è l'irraggiamento solare;

(b) *influenza dello spessore dell'intercapedine del canale di ventilazione.* Per pareti ventilate in modo naturale, lo spessore dell'intercapedine  $d$  influisce, attraverso il diametro idraulico, sulle perdite di carico distribuite nel canale e quindi, attraverso la velocità  $W_0$ , sulla portata termica specifica  $\gamma$ ; come è intuitivo, al crescere di  $d$  cresce  $\gamma$  e, nei casi significativi, anche il risparmio  $S$ ;

(c) *influenza dell'angolo di inclinazione per le coperture.* Anche l'incremento dell'angolo  $\vartheta$  dà luogo ad un aumento della velocità  $W_0$  della ventilazione naturale e quindi conduce ad un incremento del risparmio percentuale;

(d) *influenza della lunghezza del canale di ventilazione.* In condizioni di ventilazione naturale, l'incremento della lunghezza  $L$  pur causando un incremento nella velocità  $W_0$  del moto di ventilazione naturale, provoca una diminuzione di  $W_0/L$  e quindi del parametro  $\gamma$ . L'incremento di  $L$  determina dunque una diminuzione del risparmio energetico: conviene pertanto separare la ventilazione di una facciata alta in vari tronchi;

(e) *influenza della disposizione dello strato di isolante nell'intercapedine.* Generalmente lo strato di isolante termico viene posto in aderenza al paramento interno; è lecito domandarsi se non sia più conveniente distribuire in modo diverso l'isolante tra i due paramenti. E' chiaro che una diversa distribuzione dell'isolante influisce sul parametro  $z$ ; come si è rilevato sopra, al variare di  $z$  il risparmio energetico può presentare un valore ottimale, fortemente influenzato dal valore degli altri parametri. In questa sede si può concludere che, per alcune pareti e per alcune condizioni di impiego, esiste una scelta ottimale nella distribuzione dell'isolante.

### **Analisi di alcuni casi di rilevante importanza pratica**

Al fine di precisare in modo quantitativo le problematiche del precedente paragrafo, si devono determinare i valori dei 5 parametri di ingresso della (1); pertanto occorre precisare in dettaglio sia le caratteristiche delle pareti ventilate, sia le condizioni termofisiche dell'aria.

A questo scopo sono state studiate quattro tipologie di facciate indicate con  $F_i$  ( $i = 1, \dots, 4$ ) e tre di coperture, indicate con  $C_j$  ( $j = 1, \dots, 3$ ); fra queste la facciata  $F_2$  e la copertura  $C_2$  sono completamente in laterizio.

Le facciate  $F_i$  e le coperture  $C_j$  presentano uno stesso valore della resistenza termica ( $R_{t0}=1,89$  per le facciate e  $R_{t0}=1,87$  m<sup>2</sup>K/W per le coperture) ed hanno uno stesso comportamento energetico a intercapedine chiusa.

La facciata  $F_1$  ha un paramento esterno metallico (alluminio) ancorato ad una muratura in calcestruzzo alleggerito;

la facciata  $F_2$  presenta un rivestimento esterno in laterizio (elementi in cotto preassemblati in pannelli) ancorato ad una muratura in laterizio; la facciata  $F_3$  ha uno strato di rivestimento in fibrocemento ancorato ad una muratura in calcestruzzo alleggerito; la facciata  $F_4$  è realizzata con un paramento esterno in ceramica (grès fine porcellanato in lastre) fissato ad una muratura in laterizio.

La copertura  $C_1$  ha un manto metallico realizzato in scandole di rame ancorate ad un solaio in laterocemento; la copertura  $C_2$  presenta un rivestimento esterno in tegole di laterizio fissate ad un solaio in laterocemento; la copertura  $C_3$  ha un manto in lastre di ardesia su un solaio in calcestruzzo alleggerito.

Tutte le facciate e le coperture esaminate presentano uno strato di isolante termico (lana di vetro in pannelli rigidi) con spessore 4 cm, posizionato all'interno del condotto di ventilazione in aderenza al supporto murario.

Le caratteristiche termofisiche e geometriche degli strati componenti le pareti descritte sono riportate in tabella 1 e si riferiscono ai valori indicati nella normativa sui materiali da costruzione (UNI 10351/1994).

Nella tabella 1 sono anche riportati, per ciascuna parete, i valori della resistenza termica totale  $R_{t0}$  (m<sup>2</sup>K/W) e del parametro adimensionale  $z_0$ .

In tabella 2 sono precisati i valori di riferimento assunti per le grandezze necessarie per il calcolo; nei grafici riportati nel seguito le quantità  $d$ ,  $I$ ,  $L$  e  $\vartheta$  sono state fatte variare attorno ai valori di riferimento.

L'elevato valore della rugosità  $\lambda$  delle superfici interne all'intercapedine è giustificato per la presenza delle strutture di sostegno del paramento esterno. I valori assunti per  $\lambda'_i$  e  $\lambda'_u$  devono intendersi come valori indicativi; la presenza di strozzature, sagomature varie, prolungamenti di gronde, griglie di protezione, accumulo di sporco, possono determinare un notevole incremento di tali valori [8].

Per le resistenze liminari sulla faccia esterna ( $r_e$ ) e interna ( $r_i$ ) della struttura si sono assunti i valori consigliati dalla normativa (UNI EN ISO 6946/1999). Si noti che l'incertezza nella valutazione di  $r_e$  è notevole, sia per la variabilità delle condizioni climatiche, sia per la difficoltà di disporre di correlazioni valide per superfici molto ampie; un'analisi degli effetti della variazione di  $r_e$  sul risparmio energetico  $S$  è riportata in [8].

I calcoli sono stati effettuati in ambiente di programmazione MAPLE, con la metodologia indicata in [9].

I risultati ottenuti in condizioni di ventilazione naturale per il risparmio percentuale  $S$  possono essere così riassunti: (a) *influenza dell'intensità di insolazione.* I risultati per le facciate e le coperture ventilate sono riportati nelle figg. 2a e 2b, rispettivamente, al variare dell'intensità dell'irraggiamento solare per  $100 < I < 600$  W/m<sup>2</sup>.

Per le coperture si è considerata una pendenza di falda del

35% (inclinazione  $\vartheta \approx 19^\circ$ ) usuale in Italia. Risulta evidente che il risparmio percentuale aumenta notevolmente al crescere di  $L$ . La parete migliore risulta essere la  $F_2$ , la copertura migliore è la  $C_2$ , entrambe realizzate in laterizio;

(b) *influenza dello spessore dell'intercapedine di ventilazione.*

I risultati, al variare dello spessore per  $0,06 < d < 0,2$  m, sono riportati in fig. 3a per le facciate e in fig. 3b per le coperture; risulta evidente come il risparmio cresca con  $d$ ;

(c) *influenza dell'angolo di inclinazione per le coperture.*

I risultati sono riportati in fig. 4 al variare dell'angolo di inclinazione per  $0 < \theta < 60^\circ$ ; risulta evidente la crescita di  $S$  con  $\vartheta$ ;

(d) *influenza della lunghezza del condotto di ventilazione.*

I risultati, al variare della lunghezza per  $4 < L < 30$  m, sono riportati in fig. 5a per le facciate e in fig. 5b per le coperture. Al crescere di  $L$  il risparmio diminuisce; si deve osservare che valori più bassi per  $L$  sono poco significativi, in quanto le correlazioni usate per il calcolo cadono in difetto nei pressi dell'imbocco;

(e) *influenza della disposizione dello strato di isolante nell'intercapedine.* È interessante studiare come varia  $S$  spostando il materiale isolante dal paramento interno a quello esterno; a questo scopo si introduce la frazione  $\varepsilon$  ( $0 < \varepsilon < 1$ ) di materiale isolante disposta sul paramento esterno. Per  $\varepsilon = 0$  tutto l'isolante è aderente alla paramento interno e si ha la disposizione riportata in tabella 1, mentre per  $\varepsilon = 1$  tutto l'isolante è aderente alla paramento esterno. In fig. 6 è riportato l'andamento di  $S$  in funzione di  $\varepsilon$ ; dal grafico appare evidente che il risparmio percentuale presenta un massimo per  $\varepsilon \approx 0,15$  per la  $F_2$  e per  $\varepsilon \approx 0,30$  per le facciate  $F_1$ ,  $F_3$  e  $F_4$ . In ogni caso il posizionamento usuale dell'isolante in aderenza al paramento interno è più conveniente del posizionamento in aderenza al paramento esterno. In alcuni casi può risultare utile forzare il flusso dell'aria nell'intercapedine mediante l'azione di un propulsore (uno o più ventilatori di piccola potenza); in queste condizioni, la velocità dell'aria (ovvero la portata specifica  $\gamma$ ) è imposta e può essere considerata una variabile indipendente.

Questa situazione è illustrata in fig. 7 dove si riporta, per le facciate  $F_i$ , l'andamento del risparmio percentuale  $S$  in funzione della velocità  $W_0$  dell'aria nell'intercapedine ( $0,1 < W_0 < 5$  m/s); nella stessa figura sono indicati i punti corrispondenti ai valori raggiungibili per ventilazione naturale nelle condizioni di tabella. Dal grafico di fig. 7 risulta evidente l'esistenza, per ciascuna delle curve riportate, di un valore asintotico  $S_\infty$  facilmente calcolabile come limite della (1) per grandi valori di  $\gamma$  <sup>(2)</sup>.

**Considerazioni conclusive** I risultati ottenuti possono essere riassunti nel modo seguente:

- il risparmio percentuale aumenta al crescere dello spessore  $d$  dell'intercapedine e tale aumento risulta particolarmente marcato per  $d < 15$  cm;

- la usuale disposizione dello strato isolante nell'intercapedine, in aderenza al paramento interno, può non risultare la più conveniente dal punto di vista energetico; esiste infatti una distribuzione ottimale del materiale isolante tra il paramento interno e quello esterno per cui il risparmio percentuale risulta massimo. In ogni caso il posizionamento dell'isolante in aderenza al paramento interno è più conveniente del posizionamento in aderenza al paramento esterno;

- il risparmio percentuale  $S$  aumenta notevolmente al crescere dell'intensità dell'irraggiamento solare; le pareti ventilate risultano, dal punto di vista del risparmio energetico, tanto più convenienti quanto maggiore è l'irraggiamento solare. Le strutture in cui il paramento esterno è realizzato con materiali riflettenti (acciai speciali, leghe al titanio, ecc.) attenuano nettamente l'influenza della radiazione solare e devono considerarsi, in buona parte, come alternative alle pareti ventilate;

- per le coperture il risparmio percentuale aumenta al crescere dell'angolo di inclinazione  $\vartheta$  e per un dato valore di  $\vartheta$  aumenta nettamente all'aumentare di  $d$ ;

- all'aumentare della lunghezza del condotto di ventilazione il risparmio percentuale diminuisce, sia nel caso di facciate che di coperture; conviene pertanto separare la ventilazione di una intercapedine lunga in vari tronchi;

- l'impiego di strutture ventilate, accuratamente progettate, consente di ottenere, nella climatizzazione estiva, risparmi energetici anche superiori al 40%. ¶

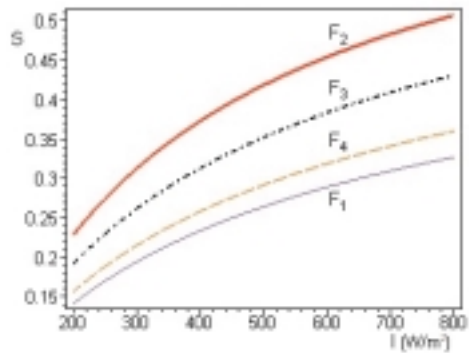
#### Note

1. Particolarmente significativa è la Legge n. 30: "Agevolazioni nel calcolo dei parametri urbanistici per il miglioramento del comfort ambientale e del risparmio energetico degli edifici" (B.U.R. Umbria n. 67 del 27 dicembre 2000) che la Regione Umbria ha emanato nel dicembre 2000. In essa sono permessi extra spessori murari che includano intercapedine d'aria di 5 cm (caso di intercapedine chiusa) o di 20 cm (caso di intercapedine ventilata), purché le finalità e le funzionalità della soluzione ventilata vengano dimostrate con una specifica relazione tecnica [12].

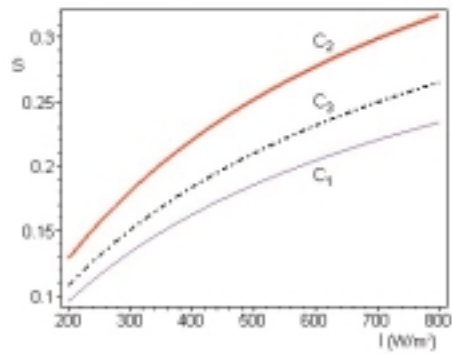
2. Per grandi valori della portata d'aria (e quindi di  $\gamma$ ) la temperatura all'interno dell'intercapedine si può considerare costante e pari a quella di ingresso  $T_0$ ; in queste condizioni, trascurando l'influenza della correzione radiativa  $H$ , risulta:  $Q = (T_0 - T_i)/R_i$  e  $Q_0 = (T_e - T_i)/R_{t0}$  per cui  $S_\infty = 1 - (1 - \phi)R_{t0}/R_i$  che rappresenta il massimo valore del risparmio percentuale ottenibile mediante ventilazione forzata.

#### Riferimenti bibliografici

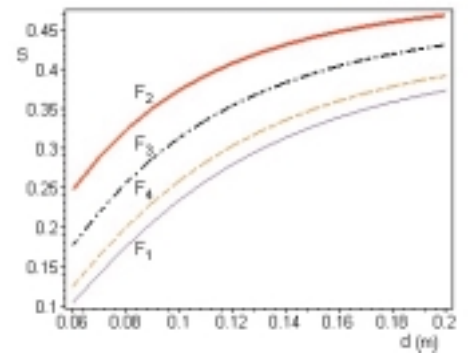
1. Balocco C., Mazzocchi F., Nistri P., *Facciata ventilata in laterizio: tecnologia e prestazioni*, Costruire in Laterizio, 2001, 83, 63-75.
2. Torricelli M.C., *Caldo d'inverno e fresco d'estate*, Costruire in Laterizio, 2000, 77, 56-67.
3. Torricelli M.C., Marzi L., *Le facciate ventilate in cotto di Renzo Piano*, Costruire in Laterizio, 1999, 71, 36-47.
4. Ciampi M., Tuoni G., *Sul comportamento delle pareti ventilate in regime termico periodico*, La Termotecnica, 1998, 11, 79-87.
5. Bartoli C., Ciampi M., Tuoni G., *Ventilated walls: air-space positioning and energy performance*. 3<sup>rd</sup> International Thermal Energy & Environment Congress, ITEEC '97, Marrakesh (Marocco), 1997, Vol. II, 528-533.
6. Bartoli C., Ciampi M., Tuoni G., *Periodic heat flow through ventilated*



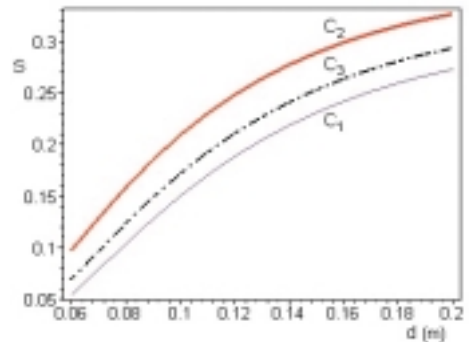
2a. Facciate ( $d=10$  cm,  $L=15$  m). Andamento del risparmio percentuale  $S$  in funzione dell'intensità della radiazione solare  $I$ .



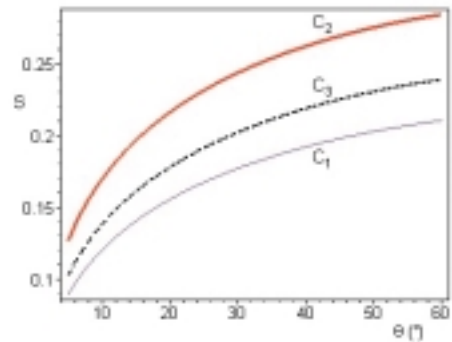
2b. Coperture ( $d=10$  cm,  $L=15$  m,  $\theta=19^\circ$ ). Andamento del risparmio percentuale  $S$  in funzione dell'intensità della radiazione solare  $I$ .



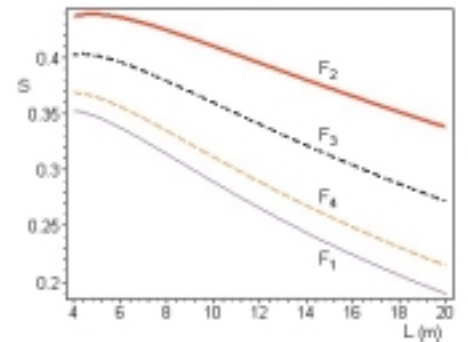
3a. Facciate ( $L=15$  m,  $I=400$  W/m<sup>2</sup>). Andamento del risparmio percentuale  $S$  in funzione dello spessore dell'intercapedine  $d$ .



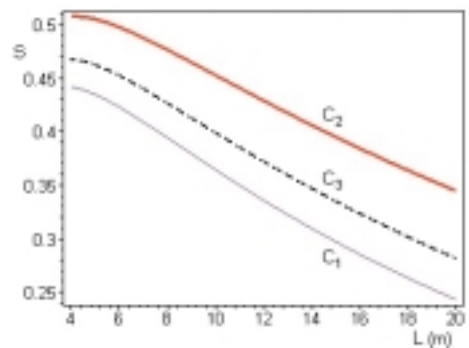
3b. Coperture ( $L=15$  m,  $\theta=19^\circ$ ,  $I=400$  W/m<sup>2</sup>). Andamento del risparmio percentuale  $S$  in funzione dello spessore dell'intercapedine  $d$ .



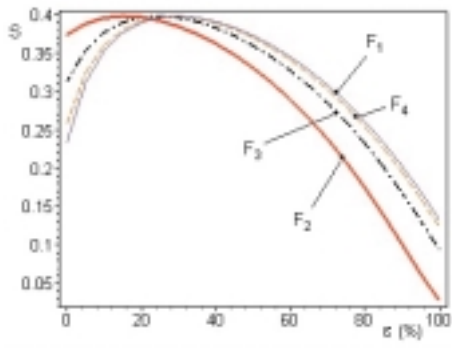
4. Coperture ( $d=10$  cm,  $L=15$  m,  $I=400$  W/m<sup>2</sup>). Andamento del risparmio percentuale  $S$  in funzione dell'angolo di inclinazione della falda  $\theta$  (gradi).



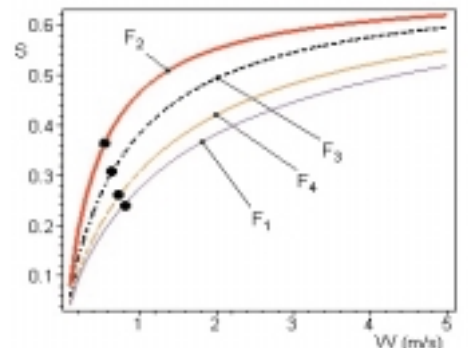
5a. Facciate ( $d=10$  cm,  $I=400$  W/m<sup>2</sup>). Andamento del risparmio percentuale  $S$  in funzione della lunghezza del condotto di ventilazione  $L$ .



5b. Coperture ( $d=10$  cm,  $\theta=19^\circ$ ,  $I=400$  W/m<sup>2</sup>). Andamento del risparmio percentuale  $S$  in funzione della lunghezza del condotto di ventilazione  $L$ .



6. Facciate ( $d=10$  cm,  $L=15$  m,  $I=400$  W/m<sup>2</sup>). Andamento del risparmio percentuale  $S$  in funzione della frazione  $\epsilon$  di isolante disposta sul paramento esterno.



7. Facciate ( $d=10$  cm,  $L=15$  m,  $I=400$  W/m<sup>2</sup>), ventilazione forzata. Andamento del risparmio percentuale  $S$  in funzione della velocità dell'aria  $W_0$  nell'intercapedine.

walls: the influence of air-space position upon room temperature, 3<sup>rd</sup> International Thermal Energy & Environment Congress, ITEEC '97, Marrakesh (Marocco), 1997, Vol. II, 522-527.

7. Ciampi M., Tuoni G., *Ventilated walls and energy saving in summer cooling of buildings*. 4th ISES Europe Solar Congress, EuroSun 2002, Bologna (Italy), 2002, CD-Rom (Book of Abstracts pag. 38).

8. Ciampi M., Leccese F., Tuoni G., *Influenza di alcuni parametri termici sulle prestazioni energetiche delle pareti ventilate*, XX<sup>o</sup> Congresso Nazionale sulla Trasmissione del Calore, UIT, Maratea, 2002, pp. 357-362.

9. Ciampi M., Leccese F., Tuoni G., *Sul comportamento termico di facciate e coperture ventilate*, La Termotecnica 2002, I, pp. 87-97.

10. Leccese F., *Sull'ottimizzazione energetica dell'involucro opaco degli edifici: pareti multistrato e pareti ventilate*, Tesi di Dottorato, Facoltà di Ingegneria,

Pisa, febbraio 2002.

11. Ciampi M., Leccese F., Tuoni G., *Pareti ventilate e normativa tecnica*, 56<sup>o</sup> Congresso Nazionale, ATI, Napoli, 2001, vol. 2, 95-106.

12. Leccese F., *Le pareti ventilate. Una recente legge regionale per il comfort e il risparmio energetico degli edifici*, Ingenium, 2001, 49, 25-26.

*Il presente lavoro è stato sviluppato dall'Unità di Ricerca di Pisa "Interazione edificio-impianto: ottimizzazione delle pareti esterne" nell'ambito del Programma di Ricerca scientifica di rilevante interesse nazionale: "Sviluppo di algoritmi di base per modelli dinamici di sistemi edificio-impianto per tipologie edilizie mediterranee" cofinanziato dal MIUR nell'anno 2000.*