



# Sulle prestazioni energetiche di una parete ventilata: ottimizzazione del valore della velocità dell'aria

L. Fantini, E. Nannei

## 1. INTRODUZIONE

Lo studio della parete ventilata ha spesso riguardato gli aspetti inerenti il drenaggio dell'umidità dagli strati di muratura che la confinano ed il benessere ambientale.

Il primo aspetto, già considerato da tempo, è stato oggetto di un rinnovato interesse in dipendenza dell'utilizzazione delle tecniche d'isolamento concentrato sistemato sulla faccia esterna delle pareti perimetrali [1].

Il secondo aspetto è stato analizzato in numerose memorie [2 ÷ 7] nelle quali si dimostra come l'utilizzazione di tale componente edilizio consenta una riduzione della sollecitazione termica sulla faccia interna della parete prospiciente l'ambiente. A ciò è associata, durante il periodo estivo, una riduzione del flusso termico scambiato tra l'ambiente e l'esterno e quindi una diminuzione dell'energia connessa alle esigenze della climatizzazione.

Al riguardo [8] è stato osservato che, in particolari condizioni operative e per intercapedine con ventilazione forzata, tali diminuzioni possono anche raggiungere valori del 70%. L'entità di tali riduzioni risulta connessa al valore della velocità dell'aria nell'intercapedine ed è generalmente crescente con esso.

Poiché, naturalmente, anche la ventilazione forzata richiede un dispendio d'energia, risulta interessante prendere contemporaneamente in considerazione sia il contributo, in termini di risparmio energetico,

fornito dalla ventilazione forzata, sia l'energia necessaria a promuovere tale ventilazione che, ovviamente, risulta crescente con la velocità.

Scopo del presente lavoro è quello di mettere a punto un metodo che consenta di valutare se esistono condizioni di ventilazione tali da rendere minimo il valore dell'energia complessivamente necessaria per la climatizzazione del locale e per la circolazione dell'aria nell'intercapedine.

## 2. ANALISI DEL PROBLEMA

È noto che le intercapedini ventilate vengono utilizzate, tra l'altro, nella climatizzazione estiva, per schermare l'ambiente confinato dall'irraggiamento solare. Questa azione si esplica tanto più efficacemente quanto maggiore è la velocità dell'aria che affluisce nell'intercapedine e tanto minore è la sua temperatura. Questa può essere quella corrispondente alle condizioni termiche del locale qualora si pensi di utilizzare l'aria d'espulsione [8], ovvero ancora quella corrispondente alla miscelazione delle due portate.

Per tenere presente le possibilità offerte dalla miscelazione, nel presente lavoro è stato introdotto un parametro:

$$r = G_e/G_t \quad (1)$$

definito come rapporto tra l'aria di espulsione  $G_e$  e quella totale  $G_t$ , composta dalla somma della portata d'espulsione e quella di aria esterna. Conseguentemente, il minor carico termico sensibile del locale si

## SIMBOLOGIA

- $c$  ( $c'$ ) : calore specifico del materiale costituente lo strato superiore (inferiore) della parete [kJ/kg°C]  
 $E_i$  : energia di prima specie che occorre fornire all'impianto di climatizzazione per mantenere all'interno del locale una temperatura prefissata, nelle condizioni attuali di velocità  $w$  dell'aria nell'intercapedine [kJ]  
 $E_v$  : energia di prima specie fornita al ventilatore per mantenere una prefissata velocità costante  $w$  dell'aria nell'intercapedine stessa [kJ]  
 $E$  :  $E_i + E_v$   
 $E_{w=0}$  : valore di  $E$  per velocità nulla dell'aria di ventilazione [kJ]  
 $G_o$  : portata massica dell'aria di espulsione [kg/s]  
 $G_t$  : portata massica totale di aria nell'intercapedine [kg/s]  
 $l$  ( $l'$ ) : spessore dello strato superiore (inferiore) [m]  
 $r$  : rapporto tra  $G_o$  e  $G_t$   
 $s$  : spessore dell'intercapedine [m]  
 $w$  : velocità dell'aria nell'intercapedine [m/s]  
 $\delta$  ( $\delta'$ ) : densità del materiale costituente lo strato superiore (inferiore) della parete [kg/m<sup>3</sup>]  
 $\varepsilon$  : rapporto tra  $E$  ed  $E_{w=0}$   
 $\lambda$  ( $\lambda'$ ) : coefficiente di conducibilità termica dello strato superiore (inferiore) [W/m°C]

riflette su un più contenuto dimensionamento dell'impianto di climatizzazione e su un minor consumo energetico dello stesso.

Naturalmente, però, la ventilazione comporta l'impegno d'una potenza meccanica (assorbita dal ventilatore) che risulta proporzionale al cubo della velocità dell'aria.

Per le considerazioni che verranno di seguito sviluppate risulta interessante costruire una funzione  $E$ , qui denominata "energia totale di prima specie", costituita dalla sommatoria dei seguenti due termini:

$E_i$ : energia di prima specie che occorre fornire all'impianto di climatizzazione per mantenere all'interno del locale una temperatura prefissata, nelle condizioni attuali di velocità  $w$  dell'aria nell'intercapedine;

$E_v$ : energia di prima specie fornita al ventilatore per mantenere una prefissata velocità costante  $w$  dell'aria nell'intercapedine stessa.

Poiché ciascuno dei termini suddetti è funzione di  $w$ , si può scrivere:

$$E(w) = E_i(w) + E_v(w) \quad (2)$$

Per analizzare le variazioni dei singoli termini che compaiono nella precedente relazione in funzione della velocità dell'aria  $w$  è stato impiegato un programma di calcolo - dettagliatamente descritto in [8] - in linguaggio Fortran 77, il quale consente di valutare tutte le grandezze qui d'interesse per una generica parete. In particolare può essere calcolato il flusso termico entrante in periodi di tempo prefissati e quindi l'energia meccanica assorbita dal gruppo frigorifero dell'impianto. Il programma di calcolo permette inoltre di valutare l'energia (elettrica)  $E_v(w)$  assorbita dal ventilatore.

Nel presente studio s'è fatto riferimento, a scopo esemplificativo della metodologia applicata, ad un solaio piano di copertura costituito da più strati con interposta intercapedine d'aria che può essere o meno ventilata con portata costante.

Nell'ipotesi di regime periodico stabilizzato ed in condizioni estive, la temperatura dell'aria interna è stata posta costante e pari a 24°C mentre per la temperatura dell'aria esterna all'ombra, e così anche per l'irraggiamento solare, ci si è riferiti alla climatologia tipica del mese di luglio delle regioni dell'Italia centrale [9].

Le dimensioni prese in considerazione per il solaio sono 10 metri di lunghezza e 1 metro di larghezza, ottenendo in tal modo un elemento che può costituire un modulo di una generica superficie. In conseguenza di ciò le perdite di carico dell'intercapedine sono state valutate ipotizzando che il deflusso avvenga in un canale di sezione  $1 \times s$  m<sup>2</sup> ( $s$  è lo spessore dell'intercapedine) e lunghezza pari a 10 m, con scabrezza assoluta 2 mm (muratura grezza).

In una prima serie di calcoli si è voluto analizzare l'andamento delle grandezze  $E(w)$ ,  $E_i(w)$  e  $E_v(w)$  al variare della velocità, per una concreta tipologia edilizia costituita da uno strato esterno capacitivo in calcestruzzo armato dello spessore di 0,14 m e da uno strato resistivo in lana minerale dello spessore

di 0,03 m, separati da un'intercapedine di spessore 0,10 m.

La struttura è stata considerata disposta orizzontalmente (solaio piano di copertura) e la temperatura dell'aria in ingresso nell'intercapedine è stata posta uguale alla temperatura - nell'istante considerato - dell'aria all'ombra ( $r = 0$ ).

I risultati dei calcoli, rappresentati in figura 1, mettono in evidenza che  $E_r(w)$  decresce rapidamente all'aumentare della velocità da 0 a 2-3 [m/s] per poi rimanere praticamente costante. Il valore di  $E_v(w)$ , invece, aumenta con  $w$  con la già ricordata legge cubica. La somma  $E(w)$  delle due funzioni mostra quindi un minimo che rappresenta il valore ottimale della velocità di ventilazione.

### 3. METODOLOGIA UTILIZZATA

Da quanto precedentemente esposto risulta evidente che la ricerca delle condizioni ottimali di ventilazione è riportata alla valutazione del valore minimo assunto da una grandezza -  $E(w)$  - la quale però non è esprimibile per mezzo di una funzione analitica bensì può essere ottenuta solamente quale risultato di uno o più programmi di calcolo.

Per problemi di questo tipo risulta particolarmente utile applicare le metodologie dell'ottimizzazione e in particolare quelle che consentono di valutare, in un dominio prefissato, l'estremo di una funzione (denominata funzione obiettivo) il cui valore non è esprimibile con continuità in funzione della variabile indipendente ma della quale è possibile conoscere il valore assunto in corrispondenza a prefissati valori della variabile indipendente.

Nel caso in esame, trattandosi di un problema a una sola variabile (la velocità  $w$ ), si è fatto riferimento ad una tecnica di ricerca sequenziale basata sulla serie aritmetica di Fibonacci e ciò poiché la funzione obiettivo non è nota analiticamente e pertanto è impossibile applicare metodi che richiedono la cono-

scenza delle derivate [10]. In tali casi si utilizzano metodi numerici in grado di individuare il valore della variabile indipendente che ottimizza la funzione oggetto con un margine di incertezza prefissato. Questo è definito come un intervallo "e" in cui esiste l'ottimo cercato. Ciò dipende dal fatto che tale metodo di ricerca valuta l'obiettivo solamente in corrispondenza a valori discreti della variabile indipendente. Pertanto, nell'ipotesi che nell'intervallo in studio di detta variabile la funzione obiettivo sia unimodale, si procede con la tecnica qui di seguito descritta.

Partendo dagli estremi del dominio si riduce, passo dopo passo, l'intervallo d'indagine di un'entità che è funzione dell'approssimazione imposta. I punti del dominio nei quali viene valutata la funzione obiettivo, si ottengono utilizzando la serie di Fibonacci la quale, com'è noto, è così definita:

$$F_0 = F_1 = 1 \quad F_n = F_{n-1} + F_{n-2} \quad \text{con } n \geq 2 \quad (3)$$

Il numero di Fibonacci prescelto è quello immediatamente superiore, nella serie (3) al valore  $K$  dato dal seguente rapporto:

$$\frac{b-a}{e} = K \quad (4)$$

ove  $a$  e  $b$  rappresentano gli estremi dell'intervallo della variabile indipendente ed "e" l'incertezza imposta.

Al riguardo è interessante osservare che con tale metodo, per ottenere un'incertezza:

$$e = (b-a) 10^{-4}$$

occorrono solamente 20 valutazioni cui corrisponde  $F_{20} = 10946$ .

Il programma di calcolo (OTTIBI) è stato sviluppato mettendo a punto un algoritmo in grado di valutare, con la tecnica sopra descritta, l'ottimo della funzione obiettivo: questa costituisce una subroutine del programma principale.

### 4. RISULTATI E DISCUSSIONE

Nel presente lavoro sono state esaminate due strutture differenti tra loro essenzialmente nello strato capacitivo e rappresentato in figura 2. La prima struttura, denominata A, è costituita da uno strato esterno di calcestruzzo dello spessore di 0,14 m e da uno interno di lana di vetro di spessore 0,03 m, separati da una intercapedine il cui spessore è fatto variare da 0,01 a 0,2 m. La struttura B si differenzia dalla precedente unicamente per l'assenza dello

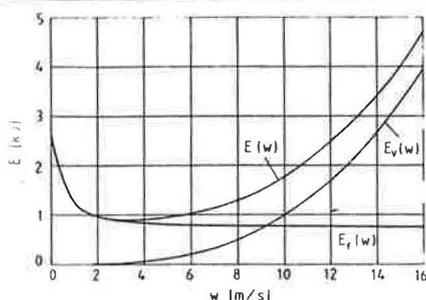
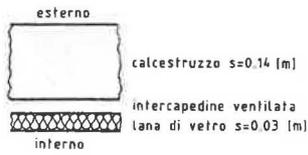


FIGURA 1  
Variazione di  $E_r(w)$ ,  $E_v(w)$  e  $E(w)$  in funzione della velocità di ventilazione  $w$

**Sulle prestazioni energetiche di una parete ventilata: ottimizzazione del valore della velocità dell'aria**

STRUTTURA A



STRUTTURA B



**FIGURA 2**  
*Strutture esaminate*

strato capacitivo esterno che è ora sostituito da una lastra metallica di spessore 0,003 m.

Nella tabella I si riportano le caratteristiche termofisiche e geometriche dei materiali impiegati.

Utilizzando il citato programma OTTIBI è stato possibile valutare i valori ottimi di velocità in funzione dello spessore dell'intercapedine e ciò per le due strutture esaminate.

I risultati dei calcoli sono riportati nelle figure 3 (struttura A) e 4 (struttura B), ponendo a parametro la grandezza  $r$  precedentemente definita.

Dall'esame delle figure si può osservare che i valori ottimali della velocità decrescono all'aumentare dello spessore dell'intercapedine stessa, più marcatamente sino a spessori dell'ordine di 0,15 m ed in maniera minore per valori maggiori dello spessore. Inoltre l'influenza di  $r$  risulta essere sempre piuttosto contenuta e comunque tende a diminuire con l'aumentare dello spessore dell'intercapedine.

**tabella I**

Struttura	Strato superiore				Strato inferiore			
	$l$ [m]	$\lambda$ [W/mK]	$\delta$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$c$ [kJ/kgK]	$l'$ [m]	$\lambda'$ [W/mK]	$\delta'$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$c'$ [kJ/kgK]
A	0,14	1,9	2200	1000	0,03	0,04	80	1000
B	0,003	50	7680	750	0,03	0,04	80	1000

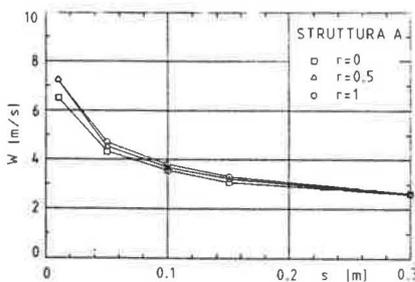
Dal confronto delle figure 3 e 4 si può osservare come la velocità ottimale di ventilazione sia scarsamente influenzata dalla capacità termica della parete, a parità di spessore dell'intercapedine.

Una ulteriore serie di calcoli è stata sviluppata allo scopo di valutare in termini quantitativi il vantaggio energetico connesso, nelle ipotesi qui assunte, con la ventilazione dell'intercapedine. A tal fine si è posto in relazione lo spessore ottimale  $s$  con il rapporto:

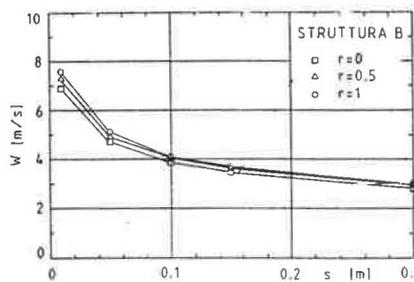
$$\varepsilon = \frac{E}{E_{w=0}} \quad (5)$$

ove  $E$  ed  $E_{w=0}$  rappresentano l'energia di prima specie necessaria a compensare il carico termico dovuto alla trasmissione rispettivamente alla velocità di ventilazione  $w$  attuale ed a  $w = 0$  (assenza di ventilazione).

Tale rapporto è stato calcolato – per le due strutture in esame – in corrispondenza ai valori del parame-



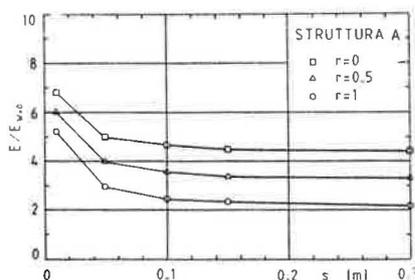
**FIGURA 3**



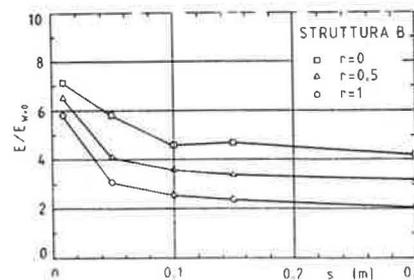
**FIGURA 4**

**FIGURA 3**  
*Variazione della velocità ottimale in funzione dello spessore dell'intercapedine per differenti valori di  $r$  (struttura A)*

**FIGURA 4**  
*Variazione della velocità ottimale in funzione dello spessore dell'intercapedine per differenti valori di  $r$  (struttura B)*



**FIGURA 5**



**FIGURA 6**

**FIGURA 5**  
*Variazione di  $\varepsilon$  in funzione dello spessore dell'intercapedine per differenti valori di  $r$  (struttura A)*

**FIGURA 6**  
*Variazione di  $\varepsilon$  in funzione dello spessore dell'intercapedine per differenti valori di  $r$  (struttura B)*

tro  $r$  precedentemente definito pari a  $0 - 0,5 - 1$ . I risultati dei calcoli sono riportati nelle figure 5 e 6.

Anche in tal caso si osserva una consistente diminuzione di  $\epsilon$  all'aumentare di  $s$  sino a valori prossimi a circa 0,10 m, oltre i quali tale effetto si attenua sensibilmente. Si osserva inoltre che il parametro  $r$  esercita una notevole influenza sull'entità di  $\epsilon$  che può decrescere sino a valori di circa 0,25. In questo caso si nota una, pur modesta, influenza della capacità termica della parete limitatamente ai più piccoli valori dello spessore dell'intercapedine.

## 5. CONCLUSIONI

È stato esaminato teoricamente il comportamento di una parete ventilata nell'ipotesi di ottimizzazione della velocità di ventilazione.

Limitatamente alle due strutture ed alla climatologia qui esaminate, i risultati hanno posto in evidenza quanto segue:

- il valore ottimale di velocità di ventilazione dell'intercapedine decresce all'aumentare dello spessore della stessa (passando da valori di circa 7 m/s a 3 m/s per spessori varianti da 0,01 a 0,15 m);
  - il vantaggio energetico connesso alla ventilazione aumenta con lo spessore dell'intercapedine sino
- a un valore massimo di questo pari a circa 0,10 m, per poi rimanere praticamente costante;
- una notevole influenza sul vantaggio energetico connessa alla ventilazione è esercitata dall'entità del ricircolo d'aria dal locale condizionato all'intercapedine.

## Bibliografia

- [1] P. Bieuler, P. Renault, Isolation Thermique, Ed. H. Vial, (1975).
- [2] L. Malugani, La parete ventilata, aspetti di calcolo e applicativi, Isolare CTA, vol. 4 (1982) 56-59.
- [3] L. Malugani, Un sistema tecnologico di isolamento dall'esterno, Modulo, vol. 7/8 (1982) 93-95.
- [4] R. Lamberts, D. Fitzgerald, W. Houghton-Evans, The importance of attic ventilation - vol. 2, Clima 2000, Copenhagen (1985).
- [5] J. Bekker, The ventilated facade - vol. 2, Clima 2000, Copenhagen (1985).
- [6] P.C. Philippi, V.P. Nicolau, P.F. Abreu, J.A.B. da Cunha Neto, Buried ducts and ventilated roofs as passive devices in a composite climate - vol. 2, Clima 2000, Copenhagen (1985).
- [7] E. Nannei, Alcune considerazioni sulle pareti ventilate e il benessere abitativo, Condizionamento dell'aria, 5-83.
- [8] L. Fantini, E. Nannei, Sull'utilizzazione dell'aria d'espulsione nelle intercapedini ventilate, Condizionamento dell'aria, 9-89.
- [9] C.N.R. Dati climatici per la progettazione edile e impiantistica, Roma 82.
- [10] W.F. Stoecker, Design of thermal systems - McGraw-Hill, 89.



### Luigi Fantini

Nato a Genova il 14.09.1936. Laureato in Ingegneria elettrotecnica presso la Facoltà d'Ingegneria dell'Università degli Studi di Genova nel 1962. Dal 1964 al 1969 impiegato presso una raffineria petrolifera del gruppo Esso con compiti di progettazione e manutenzione d'impianti elettrici. Assistente volontario alla Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi di Genova. Dal 1970 al 1982 assistente ordinario e professore incaricato di Fisica Tecnica (per Ingegneria Elettronica) presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi di Genova. Esegue ricerche nel campo dello scambio termico in fluidi bifase e nel campo dello sfruttamento dell'energia solare. Nello stesso periodo svolge attività professionale nel campo della progettazione d'impianti di climatizzazione e di impianti elettrici. Dal 1982 professore associato di Fisica Tecnica presso la Facoltà d'Ingegneria dell'Università degli Studi di Genova. Dal 1985 ha inoltre l'incarico - per supplenza - dell'insegnamento di Impianti Tecnici per Ingegneria Meccanica e Civile. Svolge attività di ricerca nei campi del comfort ambientale, nella termodinamica dei cicli inversi ad aria e nell'applicazione delle tecniche di ottimizzazione alla soluzione dei problemi di climatizzazione.



### Enrico Nannei

Laureato in Ingegneria Chimica è attualmente professore straordinario di Termotecnica presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Genova. Negli ultimi anni l'attività di ricerca ha principalmente riguardato studi sul comfort termico e sul risparmio energetico.