

Sull'utilizzazione dell'aria di espulsione di intercapedini ventilate

L. Fantini, E. Nannei

1. PREMESSA

Negli ultimi anni si è rinnovato l'interesse per lo studio di quell'elemento edilizio, denominato intercapedine d'aria, al quale sono tradizionalmente affidati compiti igienici e termici. Da alcuni A.A. [1 ÷ 4 infatti è stata studiata la possibilità di utilizzare tale elemento costruttivo come sistema idoneo a favorire il drenaggio di umidità dalle murature e, in particolare, dagli elementi isolanti, spesso igroscopici, in esso inseriti.

È stata evidenziata anche l'attitudine dell'intercapedine a contribuire ad un efficace isolamento termico nelle condizioni sia invernali sia estive.

In alcune soluzioni edilizie prospettate negli ultimi decenni si è inoltre posto l'accento sull'attitudine dell'intercapedine a realizzare il cosiddetto "isolamento a cappotto" di un perimetro opaco. Tale soluzione, utilizzata spesso congiuntamente a spessori più o meno elevati di materiale isolante, consente di unire i benefici del drenaggio igrometrico a quello dell'isolamento termico. Ovviamente ciò comporta, per una piena efficacia del sistema, una ventilazione più o meno intensa la quale, in tali applicazioni, è quella risultante dai moti che si stabiliscono a causa delle differenze di pressione dovute essenzialmente a differenze di temperatura.

Tra le analisi termiche sviluppate su tale sistema è stato messo in evidenza il miglioramento degli effetti di inerzia termica delle strutture perimetrali in relazione alla portata d'aria che si instaura essenzialmente in funzione delle differenze di temperatura in atto [5 ÷ 9].

Per meglio controllare gli effetti di questa grandezza (portata d'aria) una possibile soluzione consiste nell'interporre una portata d'aria costante, svincolata quindi dai parametri meteorologici esterni. Spesso, nel caso di un impianto di climatizzazione estiva, una frazione della portata d'aria totale prelevata dall'ambiente condizionato viene espulsa, per essere sostituita dall'aria di rinnovo. L'entità di tale portata dipende, com'è noto, dalla tipologia delle attività che si svolgono nell'ambiente condizionato. In questo lavoro ci si è proposti di analizzare il comportamento di una struttura con intercapedine in regime transitorio la cui ventilazione è realizzata utilizzando l'aria espulsa dal locale condizionato.

Gli aspetti presi in esame riguardano esclusivamente il comportamento termico della struttura considerata in relazione anche alla potenzialità nominale dell'impianto di climatizzazione nell'ipotesi di regime estivo.

2. ANALISI DEL PROBLEMA

Nel presente studio si è fatto riferimento ad un solaio di copertura piano, costituito da più strati con interposta intercapedine d'aria che può essere o meno ventilata con portata imposta costante. Nell'ipotesi di regime estivo, 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 [10].

In figura 1 si riporta la schematizzazione della struttura considerata. L'aria in ingresso nell'intercapedine proveniente dal locale condizionato (aria di espulsione) si trova alla temperatura di 24°C e

Prof. ing. Luigi Fantini, prof. ing. Enrico Nannei, Dipartimento di Ingegneria Energetica, Facoltà di Ingegneria, Università degli Studi di Genova

SIMBOLOGIA

a (a'):	coefficiente di diffusività termica dello strato superiore (inferiore) [m ² /s]	t (t'):	temperatura generica dello strato superiore (inferiore) [°C]
c (c'):	calore specifico del materiale costituente lo strato superiore (inferiore) della parete [kJ/kg°C]	t _e :	temperatura aria-sole [°C]
c _a :	calore specifico dell'aria [kJ/kg°C]	t _{i,s} :	temperatura della faccia prospiciente l'intercapedine dello strato superiore (fig. 1) [°C]
dq (dq'):	flusso termico infinitesimo scambiato tra lo strato superiore (inferiore) e l'aria dell'intercapedine [W]	t' _{i,i} :	temperatura della faccia prospiciente l'intercapedine dello strato inferiore (fig. 1) [°C]
dq _{int} :	variazione infinitesima nel tratto dy dell'energia interna dell'aria dell'intercapedine nell'unità di tempo [W]	t _{int} :	temperatura dell'intercapedine [°C]
Dt _{eq} :	differenza di temperatura equivalente [°C]	t _{int,i} (t _{int,u}):	temperatura dell'aria in ingresso (uscita) nell'intercapedine (fig. 1) [°C]
G:	portata massima dell'aria [kg/s]	t _i :	valore della temperatura dell'aria all'interno dell'ambiente [°C]
h _e :	coefficiente di adduzione della faccia esterna dello strato superiore (fig. 1) [W/m ² °C]	t _{pe} :	temperatura della faccia esterna dello strato superiore [°C]
h _i :	coefficiente di adduzione della faccia prospiciente l'ambiente (fig. 1) [W/m ² °C]	t' _{pi} :	temperatura della faccia interna dello strato inferiore [°C]
h _{int} (h' _{int}):	coefficiente di adduzione della faccia prospiciente l'intercapedine dello strato superiore (inferiore) [W/m ² °C]	w:	velocità dell'aria nell'intercapedine [m/s]
H:	lunghezza dell'intercapedine [m]	x (x'):	ascissa dello strato superiore (inferiore) (fig. 1) [m]
K:	trasmissanza termica della parete [W/m ² °C]	y:	ascissa corrente nell'intercapedine (fig. 1) [m]
L:	larghezza dell'intercapedine [m]	δ (δ'):	densità del materiale costituente lo strato superiore (inferiore) della parete [kg/m ³]
s (s'):	spessore dello strato superiore (inferiore) [m]	ε:	rapporto tra Dt _{eq} alla velocità w e il corrispondente valore a w = 0
		λ (λ'):	coefficiente di conducibilità termica dello strato superiore (inferiore) [W/m°C]
		τ:	tempo

durante il suo deflusso subisce un riscaldamento che dipende dall'entità degli scambi termici con le facce interne dell'intercapedine stessa.

In questa prima fase della ricerca si è supposto unidirezionale il flusso termico nel solaio e costanti, nel campo delle temperature e velocità qui esaminato, i coefficienti liminari.

La distribuzione di temperatura nei due strati che delimitano l'intercapedine è stata determinata applicando l'equazione della conduzione con le appropriate condizioni al contorno (fig. 1):

strato superiore:

$$a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = \frac{\partial t}{\partial \tau}$$

con:

$$h_e (t_e - t_{pe}) = \lambda \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=0}$$

$$h_{int} (t_{i,s} - \bar{t}_{int}) = \lambda \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=s}$$

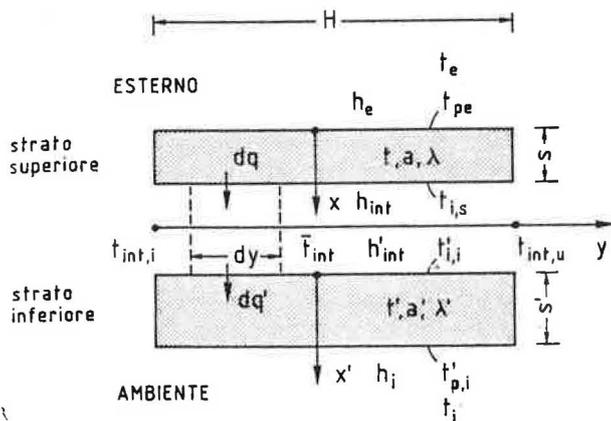


FIGURA 1
Schematizzazione del sistema considerato

strato inferiore:

$$a' \frac{\partial^2 t'}{\partial x'^2} = \frac{\partial t'}{\partial \tau}$$

con:

$$h'_{int} (\bar{t}_{int} - t'_{i,i}) = \lambda' \left. \frac{\partial t'}{\partial x'} \right|_{x=0}$$

$$h_i (t_{p,i} - t_i) = \lambda' \left. \frac{\partial t'}{\partial x'} \right|_{x=s'}$$

ove \bar{t}_{int} rappresenta il valor medio spaziale della temperatura dell'aria defluente nell'intercapedine. Tale valore è stato valutato mediante la seguente relazione:

$$dq + dq' + dq_{int} = 0$$

ove:

$$dq = h_{int} (t_{i,s} - \bar{t}_{int}) L dy$$

$$dq' = h'_{int} (t'_{i,i} - \bar{t}_{int}) L dy$$

$$dq_{int} = c_a G d \bar{t}_{int}$$

e ciò poiché la capacità termica dell'aria risulta trascurabile rispetto alle altre capacità in gioco.

Integrando tra la sezione d'ingresso e la generica sezione d'uscita di coordinata y , si ottiene:

$$\text{ove: } \bar{t}_{int} = B - (B - t_{int,i}) e^{-\gamma y}$$

$$B = \frac{h_{int} t_{i,s} + h'_{int} t'_{i,i}}{h_{int} + h'_{int}}$$

$$\gamma = (h_{int} + h'_{int}) \frac{L}{c G}$$

Al fine di mantenere monodimensionale la schematizzazione analitica si è assunta la temperatura dell'intercapedine uniforme lungo l'asse y e di valore \bar{t}_{int} uguale a quello medio lungo tale asse; cioè:

$$\begin{aligned} \bar{t}_{int} &= \frac{1}{H} \int_0^H [B - (B - t_{int,i}) e^{-\gamma y}] dy = \\ &= B - \frac{B - t_{int,i}}{\gamma H} (1 - e^{-\gamma H}) \end{aligned}$$

ove H rappresenta la lunghezza dell'intercapedine.

La temperatura all'uscita dell'intercapedine risulta:

$$t_{int,u} = B - (B - t_{int,i}) e^{-\gamma H}$$

La risoluzione del problema è stata effettuata per via numerica con la classica metodologia del sistema implicito realizzando un programma di calcolo in FORTRAN 77.

Pur essendo la metodologia sviluppata applicabile ad un vasto campo di tipologie di locali e di strutture, nel presente lavoro è stato fatto riferimento a dimensioni geometriche ed a strutture tipiche di locali ad uso industriale.

La velocità dell'aria è stata fatta variare da un valore minimo di 0,5 m/s ad uno massimo di 2 m/s, essendo tali valori corrispondenti a portate di espulsione che possono rendersi disponibili in ambienti industriali dotati di condizionamento estivo con fattori di rinnovo pari a 3-10 ricambi all'ora.

3. RISULTATI E DISCUSSIONE

Il criterio di scelta delle differenti tipologie esaminate è stato quello di indagare l'influenza dei parametri che qui appaiono più significativi e cioè: la posizione della lama d'aria rispetto ad uno strato ad elevata capacità termica e l'influenza delle caratteristiche termofisiche dei due strati che la confinano. A tale scopo l'analisi è stata sviluppata considerando nove strutture, così come schematizzato in figura 2, che differiscono tra loro per la posizione dell'intercapedine, la presenza o meno del materiale isolante e la capacità termica. In particolare sono stati esaminati due differenti spessori di solaio in calcestruzzo armato ($s = 0,14$ m, $s = 0,22$ m) muniti di intercapedine posizionata alternativamente sulla faccia prospiciente l'esterno ovvero l'interno dell'ambiente.

Il secondo strato si è supposto costituito da un pan-

Sull'utilizzazione dell'aria di espulsione di intercapedini ventilate

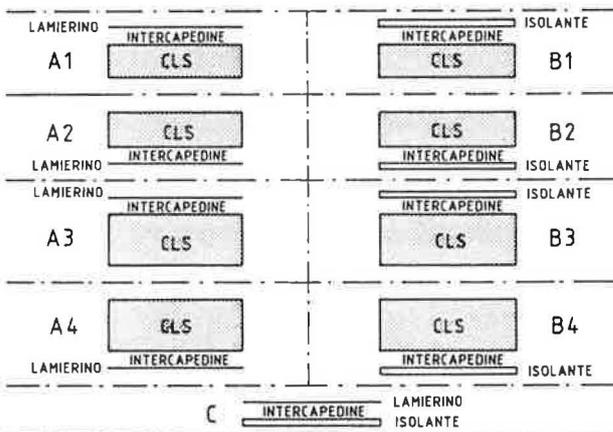


FIGURA 2 Schematizzazione delle strutture esaminate

nello in lamierino ($s = 0,003$ m) ovvero in lana minerale ($s = 0,03$ m).

Sono state considerate due tipologie, indicate in figura 2 con A e B, che differiscono tra loro per l'assenza o la presenza di materiale isolante. La tipologia C è caratterizzata dall'assenza di calcestruzzo armato.

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

I calcoli sono stati sviluppati valutando la differenza di temperatura equivalente Dt_{eq} , definita dalla relazione:

$$Dt_{eq} = \frac{h_i}{K} (t'_{pi} - t_i)$$

al variare del tempo, per differenti valori di velocità

dell'aria nell'intercapedine: in particolare si è assunto $w = 0 - 0,5 - 1,0 - 2,0$ m/s. A titolo d'esempio, nella figura 3 è riportato - per la struttura B1 - l'andamento della differenza di temperatura equivalente in funzione del tempo. Si osserva che il valore massimo della differenza di temperatura equivalente diminuisce all'aumentare della portata d'aria con conseguente diminuzione del carico termico di picco. Si può ottenere così al tempo stesso sia un risparmio energetico conseguente all'utilizzazione di aria destinata all'espulsione per diminuire il carico termico del locale, sia il vantaggio connesso alla minore potenzialità nominale necessaria per il condizionamento del locale. Si può inoltre osservare che a maggiori velocità corrispondono, in lieve misura, minori ritardi nel valore massimo del-

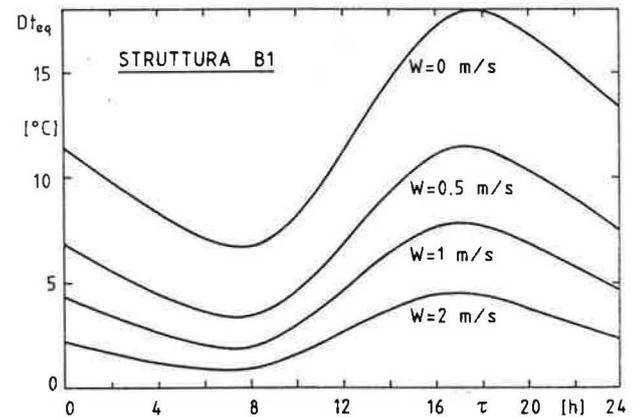


FIGURA 3 Variazione della differenza di temperatura equivalente in funzione del tempo, per diversi valori della velocità dell'aria

tabella I

Struttura	Strato superiore				Strato inferiore			
	s [m]	λ [W/mK]	δ [kg/m ³]	c [kJ/kgK]	s' [m]	λ' [W/mK]	δ' [kg/m ³]	c' [kJ/kgK]
A1	0.003	50	7680	750	0.14	1.9	2200	1000
A2	0.14	1.9	2200	1000	0.003	50	7680	750
A3	0.003	50	7680	750	0.22	1.9	2200	1000
A4	0.22	1.9	2200	1000	0.003	50	7680	750
B1	0.03	0.04	50	1000	0.14	1.9	2200	1000
B2	0.14	1.9	2200	1000	0.03	0.04	50	1000
B3	0.03	0.04	50	1000	0.22	1.9	2200	1000
B4	0.22	1.9	2200	1000	0.03	0.04	50	1000
C	0.003	50	7680	750	0.03	0.04	50	1000

la differenza di temperatura equivalente.

Ai fini dell'indagine che qui ci si è proposti di sviluppare, si è ritenuto interessante analizzare il rapporto $\epsilon(\tau)$ i valori assunti dalla differenza di temperatura equivalente Dt_{eq} al variare del tempo per un determinato valore di w ed i corrispondenti valori ottenuti in assenza di ventilazione ($Dt_{eq}|_{w=0}$) e cioè:

$$\epsilon(\tau) = (Dt_{eq}) / (Dt_{eq})_{w=0}$$

Tale grandezza, si noti, fornisce un parametro di valutazione dei vantaggi insiti nell'utilizzazione della ventilazione.

In riferimento alle strutture di tipo A e B i risultati dei calcoli sono riportati in figura 4.

Per tutti i casi esaminati l'aumento della velocità

provoca sempre una diminuzione del valore di ϵ . In particolare, osservando che il valore massimo assunto da tale grandezza è in relazione con il massimo flusso che la struttura esaminata immette nel locale, risulta interessante porre in evidenza che la ventilazione consente di ottenere cospicue riduzioni di tale flusso. I valori delle riduzioni, ricavabili dalla figura 4, ammontano già al 20-30% per $w = 0,5$ m/s e raggiungono valori del 70-90% per il più elevato valore di velocità qui considerato ($w = 2$ m/s).

La sostituzione del lamierino (struttura di tipo A) con uno strato di materiale coibente (struttura di tipo B) provoca un'ulteriore diminuzione dei valori assunti da ϵ . La posizione ottimale dello strato isolante risulta essere quella rivolta verso l'esterno; tuttavia, per le strutture che presentano i più elevati valori della capacità termica (strutture B3 e B4), tale effetto assume scarsa rilevanza.

In figura 5 si riportano le variazioni della temperatura equivalente in funzione del tempo per le strutture A1 - B1 - C e per i due valori estremi del campo di velocità qui esaminato: $w = 0$ e $w = 2$ m/s.

Dall'esame della figura si osserva che per la struttura più leggera (C) ed in assenza di ventilazione, si stabiliscono valori della differenza di temperatura equivalente particolarmente elevati, cui corrispondono carichi termici di notevole entità.

L'utilizzazione di una lama d'aria alla velocità di 2 m/s consente di abbattere di circa il 70% il carico termico massimo che, tuttavia, rimane sostanzial-

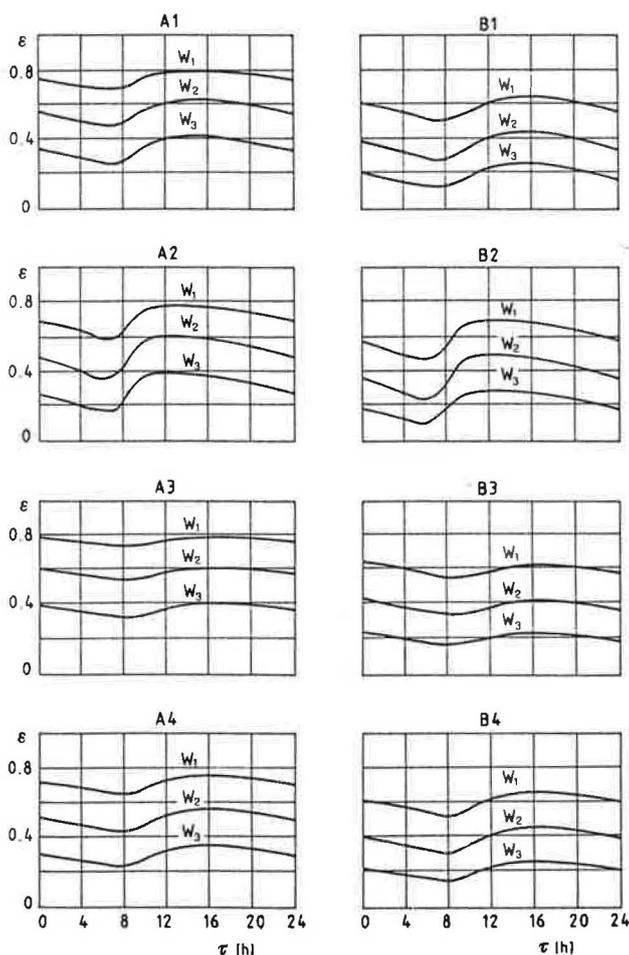


FIGURA 4
Variazione del parametro ϵ in funzione del tempo e in corrispondenza a tre diverse velocità dell'aria ($w_1 = 0,5$ m/s, $w_2 = 1$ m/s e $w_3 = 2$ m/s)

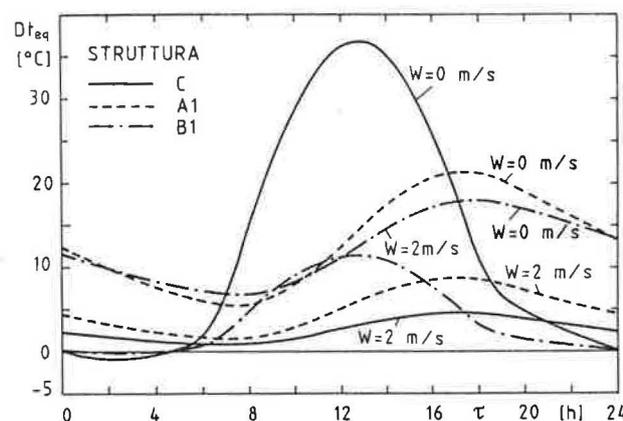


FIGURA 5
Variazione della differenza di temperatura equivalente in funzione del tempo per tre differenti strutture e in corrispondenza a due differenti valori di velocità dell'aria

mente in fase con l'andamento delle temperatura aria-sole.

A parità di tutte le altre condizioni, l'aumento della capacità termica comporta, come già noto, diminuzioni nei valori massimi della differenza di temperatura equivalente ed aumento nel ritardo con il quale Dt_{eq} raggiunge il valor massimo.

È infine interessante osservare che gli effetti della portata d'aria in riferimento alle strutture A1 e B1 si manifestano positivamente anche quando si è in presenza di uno strato isolante.

4. CONCLUSIONI

È stato messo a punto un programma di calcolo

per lo studio di intercapedini ventilate con portata d'aria imposta costante, applicato al recupero energetico di aria d'espulsione da impianti di climatizzazione estiva.

I risultati dei calcoli hanno messo in evidenza quanto segue:

- per tutte le strutture esaminate sono state osservate diminuzioni della differenza di temperatura equivalente, fino al 90% in corrispondenza a velocità dell'aria $w = 2$ m/s;
- le diminuzioni osservate dipendono dalla posizione della lama d'aria rispetto allo strato capacitivo e dalla costituzione termofisica degli strati che la confinano.

Bibliografia

- [1] L. Malugani, La parete ventilata, aspetti di calcolo e applicativi, *Isolare CTA*, vol. 4 (1982) 56-59.
- [2] L. Malugani, Un sistema tecnologico di isolamento dall'esterno, *Modulo*, vol. 7/8 (1982) 93-95.
- [3] S. Gatti, R. Malinverni, Parliamo di facciata ventilata, *Isolare CTA*, vol. 6 (1981) 25-30.
- [4] P. Bleuler, P. Renault, *Isolation Thermique*. Ed. H. Vial. (1975).
- [5] E. Nannei, Alcune considerazioni sulle pareti ventilate e il benessere abitativo, *Condizionamento dell'aria - Refrigerazione* 5-83.
- [6] E. Fornasieri, Analisi termodinamica di sistemi d'isolamento dinamico, *Atti 43° Congresso Nazionale ATI* 1988.
- [7] E. Arquis, C. Langlais, S. Klarsfeld, J.P. Caltagirone, Quelques aspects fondamentaux sur l'isolation dynamique, *Revue général de thermique*, n. 256, 4/1983, pp. 321-331.
- [8] E. Arquis, C. Langlais, Etude d'un système d'isolation dynamique, *Proc. XVI Int. Congr. Refr.*, vol II, pp. 669-676, Paris 1983.
- [9] C. Aghemo, M.G. Dutto, M. Filippi, Isolamento termico dinamico: comportamento termico di sistemi permeodinamici, *Atti del 41° Congresso ATI*, Vol. III, Sez. VII, pp. 1-13, Napoli 1986.
- [10] C.N.R. Dati climatici per la progettazione edile e impiantistica, Roma 1982.