STUDIO CON LA TECNICA DEI GAS TRACCIANTI DELLE INFILTRAZIONI D'ARIA IN UNA CAMERA A VENTILAZIONE CONTROLLATA

M. CALI' – G.V. FRACASTORO – P. VACCHELLI Dipartimento di Energetica - Politecnico di Torino - Torino

SOMMARIO

E' stata allestita una camera a ventilazione controllata per determinare l'accuratezza del metodo dei gas traccianti per la misura delle infiltrazioni d'aria in edifici ed autovetture. I risultati ottenuti impiegando N $_2^0$ mostrano che l'accuratezza del metodo del decadimento è del 5% circa in condizioni di buon miscelamento. Meno precise appaiono le misure con l'impiego di vapor d'acqua come tracciante.

ABSTRACT

A controlled ventilation from has been realized in order to determine the accuracy of the tracer gas method for measuring the air infiltration rate in buildings and cars. The results obtained using N_2^0 show that the accuracy of the decay method is around 5% whether a good mixing is realized. Measurements using water vapor as a tracer gas appear to be less precise.

SIMBOLOGIA

Simbolo	Definizione Unit	à di misura
с	concentrazione molare, o molarità	mol/m ³
C	concentrazione di tracciante	ppm
c	concentrazione di tracciante nell'aria esterna	ppm
ເຼັ	concentrazione di tracciante allo scarico	ppm
ີ	coefficiente ii diffusione	m ² s
n	frequenza di Ventilazione	1/h
p	pressione atmosferica	Pa
P	pressione parziale di saturazione dell'acqua	Pa
t	tempo di permanenza di un elemento di fluido	S
£	tempo medio di permanenza	S
Tha	temperatura di bulbo asciutto	°C
Tbu	temperatura di bulbo umido	°C
u	vettore velocità dell'aria	m/s
v	volume intern: dell'ambiente	m ^E

Memoria presentata al 41^a Congresso Nazionale dell'Associazione Termotecnica Italiana - ATI Napoli 24-26 settembre 1986 e stampata nel mese di agosto a cura della CLEUP di Padova

v	portata volumica di aria	m ³ /s
v	portata volumica di tracciante immesso	m ³ /s
x	titolo dell'aria umida	kg/kg
3	età di un elemento di fluido	s
ð	età media dell'aria in un punto	S
<∛>	età media dell'aria nel volume	s
λ	vita residua di un elemento di fluido	s
τ	tempo	S
τ_n	costante di tempo del decadimento	h

INTRODUZIONE

Senza dubbio le infiltrazioni d'aria rappresentano ancora il termine meno noto nel bilancio energetico degli edifici, quello per cui i modelli di calcolo appaiono più carenti, e le tecniche sperimentali meno collaudate.

I modelli di calcolo sono in genere basati sulla considerazione che la portata d'aria di ricambio è funzione della permeabilità all'aria dei componenti e della differenza di pressione fra interno ed esterno. La caratteristica di permeabilità dell'involucro può essere ricavata per mezzo della tecnica della pressurizzazione; ma il problema risiede nella conoscenza del campo interno ed esterno di pressione, con una precisione ed una generalità che né i modelli di calcolo né le tecniche sperimentali possono garantire.

La tecnica dei gas traccianti fornisce invece direttamente la portata di aria di ricambio; essa è stata di recente applicata anche in Italia nel settore edilizio (De Bortoli et al., 1985), ma richiede una intensa attività di ricerca sperimentale in laboratorio affinché le si possa attribuire un errore probabile nelle applicazioni in campo. Tale attività è da tempo in corso in altri paesi e soprattutto in Svezia (Sandberg, 1981. Sandberg e Sjoberg, 1983, Sandberg e Fracastoro, 1984). In questo articolo si riportano i risultati di una serie di campagne sperimentali effettuate nel laboratorio del Dipartimento di Energetica del Politecnico di Torino nel corso degli ultimi 12 mesi.

La camera a ventilazione controllata ivi realizzata dovrebbe consentire di raggiungere un duplice obiettivo: da un lato la validazione del metodo dei gas traccianti, impiegato con varie tecniche di immissione e con traccianti di diversa natura, per il rilievo della frequenza di ventilazione; dall'altro l'introduzione di una tecnica di indagine sull'efficienza della ventilazione, ovvero sulla distribuzione dell'aria in ambienti ventilati. Il primo obiettivo può dirsi in parte raggiunto, mentre la ricerca sul secondo è ancora in corso di svolgimento.

Le prospettive di impiego delle tecniche dei gas traccianti appaiono interessanti non soltanto nel settore edilizio, ma anche in quello automobilistico, un settore quest'ultimo in cui si sono recentemente intensificate le ricerche per un miglioramento delle prestazioni dal punto di vista della ventilazione interna.

EQUAZIONI FONDAMENTALI E PRINCIPI

1.

L'equazione di conservazione della massa in forma differenziale, tenendo conto dei fenomeni di trasporto diffusivi e convettivi, assume il seguente aspetto:

(1)

$$\delta c / \delta \tau = \operatorname{div}(D \cdot \operatorname{grad} c) - \operatorname{div}(c \cdot u)$$

In Appendice sono sviluppati in dettaglio i passaggi attraverso i quali è possibile derivare dalla (1) la classica equazione di conservazione della massa integrata sul volume considerato, avendo assunto l'ipotesi di concentrazione costante in ogni punto dell'ambiente considerato e di coefficiente di diffusione D nullo sulle pareti dell'ambiente:

$$V dC/d\tau = V (C_e - C(\tau)) + V_q$$
⁽²⁾

Tra le tecniche di misura utilizzabili, che differiscono tra loro per le modalità di immissione del tracciante, è stata scelta la tecnica "del decadimento", che comporta la misura della concentrazione di un tracciante nel tempo, dopo che se ne è arrestata l'immissione in ambiente. In questo caso, integrando la (2) si ottiene:

$$C(\tau) = C(0) e^{-\tau/\tau_n}$$
(3)

 $\tau_n \hat{e}$ la costante di tempo del decadimento, avendo posto $\tau_n = V/\hat{V}$. Il suo inverso è una frequenza, denominata ricambio nominale d'aria (n), ed è la grandezza fondamentale nella misura delle infiltrazioni. In un diagramma semilogaritmico la pendenza (costante) della curva di decadimento rappresenta dunque il valore di τ_n . Se il miscelamento non è perfetto il metodo non è utilizzabile; infatti si è osservato (Sandberg, 1981) ed è stato anche verificato in questo studio che, dopo un certo periodo di tempo, il decadimento diviene esponenziale (vedi Figura 1), ma in questo caso la sua costante di tempo non ha alcuna interpretazione fisica.

Per un sistema con una sola uscita e regime di moto permanente si può inoltre giungere (vedi Appendice) alla seguente espressione, indipendentemente dalle condizioni di miscelamento interno:

 $\tau_{n} = \int_{\tau_{-0}}^{\tau_{-0}} \sigma_{s}(\tau) d\tau / C_{s}(0)$ (4) Le equazioni (1)-(4) sono derivate da una impostazione fluidodinamica del problema,

Le equazioni (1)-(4) sono derivate da una impostazione fluidodinamica del problema, ma è possibile partire da una base completamente diversa. legata a considerazioni di carattere statistico (Zwietering, 1959), abitualmente impiegate nella teoria dei reattori chimici. Si consideri un elemento infinitesimo di fluido (per comodità si pensi ad una "particella" d'aria) che entra nel volume V ad un certo istante e ne esce dopo un certo tempo. Si definiscono per un punto P interno al volume le seguenti grandezze :

- età di un elemento di fluido (3), cioè il tempo intercorso tra l'istante di ingresso della particella nel volume e l'istante di arrivo in P
- vita residua di un elemento di fluido (λ) ; cioè il tempo intercorso tra l'istante di ingresso della particella nel volume e l'istante di arrivo nel punto P.

Il tempo di permanenza (t) di un elemento di fluido in ambiente è dato da $\vartheta + \lambda$. Si possono introdurre numerose popolazioni statistiche rappresentabili con distribuzioni di frequenza legate a queste tre grandezze, ma ai fini di questa trattazione solo tre sono importanti:

- $\varphi(\vartheta)$, distribuzione di frequenza delle età delle particelle nel volume, fra l'istante $\tau=0$ e $\tau=\infty$

- $\mathcal{P}_{p}(\vartheta)$, distribuzione di frequenza delle età delle particelle che passano per il punto 2 tra $\tau=0$ e $\tau=\infty$
- f(t), distribuzione di frequenza del tempo di permanenza delle particelle che escono dal volume tra $\tau=0$ e $\tau=\infty$

Tali distribuzioni ammettono media e varianza: $\langle \overline{\vartheta} \rangle$ è la media di $\varphi(\vartheta)$, detta età media dell'aria nel volume; $\overline{\vartheta}$ è la media di $\varphi_{\mu}(\vartheta)$, detta età media dell'aria in un punto; $\langle \overline{t} \rangle$ è la media di f(t), detto tempo di permanenza medio.

In condizioni di miscelamento perfetto vale $\langle \overline{\vartheta} \rangle = \overline{\vartheta} = \overline{\vartheta}_s = \tau_n$, verificabile con le (7)(8). E' possibile dimostrare che la relazione t = $\vartheta + \lambda$ è inapplicabile quando si considerano le distribuzioni di frequenza, mentre invece valgono le seguenti:

$$\langle \overline{t} \rangle = V/V = \tau_n$$
 (5)

$$\langle \overline{\vartheta} \rangle = (\langle \overline{t} \rangle + \operatorname{var}(t))/2 \langle \overline{t} \rangle$$
(6)

Poiché var(t) ≥ 0 si ha che $\langle \overline{\vartheta} \rangle \geq t_n/2$. Per determinare $\overline{\vartheta} \in \langle \overline{\vartheta} \rangle$ a partire dai valori di concentrazione misurati si possono impiegare le seguenti espressioni:

$$\overline{\vartheta} = \int_{0}^{\infty} C_{\mathbf{p}}(\tau) d\tau / C_{\mathbf{p}}(0)$$
(7)

$$<\overline{\partial}> = \int_{0}^{\infty} C_{s}(\tau) \tau \, \mathrm{d}\tau / \int_{0}^{\infty} C_{s}(\tau) \, \mathrm{d}\tau$$
(8)

Il punto cruciale è anche qui l'ipotesi di miscelamento perfetto. Infatti solo se essa è verificata è possibile usare $\langle \bar{\vartheta} \rangle = \bar{\vartheta} = \tau_n$ per il calcolo del numero di ricambi orari.

Si osservi che entrambe le trattazioni, quella fluidodinamica e quella statistica, permettono il calcolo di $\tau_{\rm N}$. Tuttavia, la misura della concentrazione consente di ricavare grandezze aventi significato fisico soltanto nell'ambito della trattazione statistica ($\bar{\vartheta} \, {\rm e} < \bar{\vartheta} >$), mentre la costante di tempo del decadimento della concentrazione ha il significato di inverso della frequenza di ventilazione soltanto se il miscelamento può considerarsi perfetto.

APPARATO SPERIMENTALE

L'apparato sperimentale, realizzato nei laboratori del Dipartimento di Energetica del Politecnico, è illustrato in Figura 2. Esso è costituito da una camera di prova di dimensioni interne 2*2*2m, con struttura portante in tubi di acciaio saldati e pareti in legno compensato impermeabilizzate con l'applicazione di vernice marina. L'accesso è assicurato da una porta a battente con guarnizioni di tenuta in neoprene. All'interno della camera una rastrelliera mobile permette il posizionamento dei tubi di prelievo dell'aria in qualsiasi punto voluto. L'ingresso dell'aria è situato al centro di una parete e le due uscite, controllabili con valvole del tipo a sfera, sono poste sulla parete opposta. Sono state realizzate tre diverse modalità di ingresso dell'aria esterna : con efflusso a bocca libera, con diffusore (tipo anemostato), con plenum forato (analogo ai "soffitti forati" utilizzati nel condizionamento edilizio). All'interno della camera sono stati posti due ventilatori (del tipo ad elica, oscillanti) per il miscelamento.

Il circuito idraulico per l'immissione controllata di aria esterna comprende un ventilatore centrifugo (ad elevata prevalenza, date le forti cadute di pressione nel flussimetro), valvole di regolazione ed un misuratore di portata. A monte del misuratore una termoresistenza Pt100 permette la misura della temperatura dell'aria in ingresso per eventuali correzioni della portata volumica, funzione della temperatura. Sono stati impiegati due diversi tipi di misuratori di portata volumica : in una prima fase un flussimetro a galleggiante (due modelli diversi con f.s. 30 nm3/h e 6 nm3/h ed errore massimo 2% f.s.); in una seconda fase un flussimetro basato sul principio del bilancio energetico con uscita elettrica (f.s 30 nm3/h ed errore massimo 1% del f.s).

Il tracciante utilizzato è protossido di azoto (N₂O). Esso viene iniettato in ambiente senza particolari accorgimenti, poiché non è previsto per ora l'impiego di tecniche ad immissione controllata (portata costante o concentrazione costante). La concentrazione del tracciante viene omogeneizzata con opportuni sistemi di ventilazione; dopo qualche minuto si iniziano i campionamenti e la registrazione della concentrazione del tracciante.

Il prelievo dell'aria da campionare è stato effettuato con modalità diverse, che vengono illustrate nel paragrafo seguente. L'analizzatore di N_2O , collegato in linea, è del tipo a raggi infrarossi con f.s. 500 ppm ed errore massimo 2% f.s. Esso invia un segnale analogico allo scanner HP-3497 che effettua una conversione A/D ed invia i dati ad un computer PET/CBN, che provvede all'elaborazione, alla stampa ed alla registrazione su floppy-disk dei risultati.

CAMPAGNE DI MISURA E RISULTATI

Sono state realizzate due campagne di misura caratterizzate da diverse modalità di campionamento dell'aria. Nella prima (fase A) è stato impiegato un metodo che prevede il campionamento in più punti dell'ambiente ed il miscelamento a monte dell'analizzatore (metodo del condotto comune, vedi fig.3). In questa fase si sono utilizzati i flussimetri a galleggiante e il campionamento è stato effettuato in quattro punti, situati ai vertici di un quadrato di 80 cm di lato situato nel piano di mezzeria tra le pareti di introduzione ed uscita dell'aria. Nelle varie prove sono stati fatti variare i seguenti parametri :

- numero di ricambi orari (0.5/1/2/3 volumi/ora)
- miscelazione interna (0/1/2 ventilatori di miscelamento)
- modalità di ingresso aria (efflusso a bocca libera, con diffusore, con plenum forato)

La durata "netta" di ogni prova è stata di un'ora con intervallo di campionamento di 1 minuto. I risultati ottenuti, riassunti in Tabella I, appaiono, almeno per questa camera di prova, indipendenti dalle modalità di immissione dell'aria esterna e dal numero di ventilatori presenti (ma almeno uno deve essere presente per assicurare il miscelamento). L'errore si è mantenuto sotto il 5% in valore assoluto, ma solo per n \geq 1. Nel caso di n<1 si nota una sovrastima sistematica del numero di ricambi d'aria.

I risultati ottenuti con questa procedura sperimentale sono soddisfacenti, pur essendosi impiegata una apparecchiatura tutto sommato semplice (si ricordi che il gruppo scanner/computer può essere sostituito la un comune registratore a penna). Va notato, tuttavia, che il metodo non fornisce nessuna indicazione sulle condizioni di miscelamento, se non indirettamente attraverso il confronto con i valori nominali del ricambio d'aria. Risulta pertanto difficile definire a priori l'errore probabile del metodo, qualora esso genga applicato in campo.

Nella seconda campagna (fase B) si è fatto ricorso al metodo del campionamento multiplo in sei punti diversi del volume (v. Figura 4), con 20 secondi di intervallo tra un campionamento e l'altro, necessari per il lavaggio dei condotti. La scansione di apertura delle elettrovalvole è controllata automaticamente dal calcolatore.

Questa seconda metodologia comporta maggiori complicazioni impiantistiche, ma permette un rapido controllo delle condizioni di miscelamento, e dunque consente di valutare l'errore probabile dovuto all'imperfetto miscelamento. In presenza di un adeguato numero di punti di campionamento l'età media dell'aria nel volume è calcolabile come ponderata dell'età media misurata nei vari punti.

Le prove, della durata di un'ora, sono state effettuate variando :

- numero di ricambi orari (0.5/1/2)

- ubicazione delle prese di campionamento (A/B/C, vedi fig.5)

- ostacoli interni (no/si)

Quest'ultima variante è stata introdotta in previsione di una applicazione del metodo agli autoveicoli, per simulare la presenza dei sedili nell'abitacolo.

Una presa di campionamento (la n.6) è stata posta nel condotto di scarico dell'aria, per una verifica sperimentale dell'equazione (4). L'elaborazione dei dati sperimentali è stata effettuata con la metodologia proposta da Sandberg (1986), che permette di passare dalle formule integrali alla formulazione con sommatorie utilizzata quando il campionamento è discreto.

I risultati, espressi in tabella II, evidenziano una certa asimmetria nel campo fluidodinamico interno, dovuto probabilmente alla presenza della porta. Poiché i risultati ottenuti con la rastrelliera in posizione A, B o C sono stati ricavati a parità di ogni altra condizione, è possibile considerare i valori dell'età media dell'aria nei punti 1-5/A, 1-5/B e 1-5/C come se fossero stati ottenuti nel corso di una stessa prova, e ricavarne il valore dell'età media dell'aria nel volume, ponderata rispetto al volume di influenza.

Un commento a parte merita il metodo di misura di n tramite il rilevamento della concentrazione nel condotto di scarico dell'aria : nonostante il suo impiego si sia mostrato semplice, l'errore non è mai stato inferiore all'8%, probabilmente perchè l'uscita dell'aria non era limitata alla bocchetta di scarico.

MISURE CON IL VAPOR D'ACQUA

Un certo numero di misure è stato effettuato impiegando come tracciante il vapor d'acqua, per valutare in laboratorio l'accuratezza di tale procedura sperimentale, impiegata in precedenza (Fracastoro,1985) per delle valutazioni di massima in campo. L'equazione (2) è valida anche nel caso in cui C rappresenti il contenuto igrometrico dell'aria umida, normalmente indicato col simbolo x.

$$V^* dx/d\tau = \dot{V}^* (x_p - x(\tau)) + \dot{V}_{r}$$
⁽⁹⁾

Nel caso in cui $\dot{V}_g = 0$ e x_e è costante la (9) diviene

$$\mathbf{x} - \mathbf{x}_{\mathbf{e}} = (\mathbf{x}_{\mathbf{o}} - \mathbf{x}_{\mathbf{e}})^* \exp(-\tau/\tau_{\mathbf{o}})$$
(10)

Ciò che differenzia la (10) dalla (3) è la presenza del titolo igrometrico dell'aria

introdotta in ambiente (nella quale, invece, la concentrazione del tracciante è normalmente nulla).

L'utilizzazione della (10) richiede pertanto la misura del titolo dell'aria interna e dell'aria immessa. Il titolo può venire a sua volta ricavato a partire dai valori misurati della temperatura di bulbo asciutto ed umido per mezzo delle relazioni (11) (Zecchin e Borsoi, 1984) e (12), essendo p_ noto in funzione di T:

$$x = (1.006*(T_{ba} - T_{bu}) + x_s*(2501 - 2.364*T_{bu}))/(2501 + 1.83*T_{ba} - 4.194*T_{bu}) \quad (11)$$

$$x_s = 0.62198*p_s/(p - p_s) \quad (12)$$

Per la misura delle temperature di bulbo asciutto e umido si sono impiegati due psicrometri Ultrakust G1461.

I risultati delle prove effettuate utilizzando il vapor d'acqua come tracciante sono sintetizzati in Tabella III. Si nota una notevole sovrastima per n = 0.5 h^{-1} (+64%) che si riduce al crescere di n, fino a divenire una sottostima per i valori più elevati (n>1.5 h^{-1}).

L'errore riscontrato sembra essere dovuto alla tendenza del vapor d'acqua alla condensazione, più che all'accuratezza della misura del titolo igrometrico.

Nella prospettiva di um impiego del vapor d'acqua quale tracciante per le misure in campo di infiltrazioni d'aria si possono sottolineare i seguenti vantaggi e svantaggi rispetto ai traccianti comunemente impiegati:

Vantaggi

- minor costo delle apparecchiature per il rilievo del titolo igrometrico

- minori difficoltà ad ottenere dagli occupanti il consenso ad effettuare le misure Svantaggi
- tendenza del vapor d'acqua alla condensazione (soprattutto in presenza di pareti fredde)
- presenza del vapor d'acqua (con titolo, a rigore, variabile) nell'aria esterna
- difficoltà di controllo dell'emissione interna di vapore
- possibilità di diffusione del vapore attraverso le pareti perimetrali (a questo fenomeno peraltro sembrano essere associate portate assai inferiori rispetto a quelle associate al fenomeno delle infiltrazioni d'aria).

CONCLUSIONI

La tecnica di misura delle infiltrazioni per mezzo dei gas traccianti (metodo del decadimento con protossido d'azoto) si è confermata relativamente semplice ed attendibile. Anche con la procedura meno complessa, impiegata nella fase A, l'errore si è sempre mantenuto al di sotto del 5% in valore assoluto, almeno per n≥1. Va tuttavia sottolineato che tale metodologia non consente di valutare le effettive condizioni di miscelamento, e di prevedere dunque l'errore probabile di una misura in campo.

La procedura impiegata nella fase B, che ha implicato una maggiore complessità impiantistica, ha permesso di verificare che la possibilità di controllo del grado di miscelamento è determinante per stimare l'errore probabile. La metodologia messa a punto si è dimostrata affidabile, ma non sono emerse precise indicazioni operative sulle modalità per realizzare una buona miscelazione, tranne quella, per altro scon-

VI–110

tata, sulla opportunità di disporre di almeno un ventilatore interno. Per quel che riguarda la tecnica che fa uso del vapor d'acqua, il principale vantaggio appare il minor costo dell'apparecchiatura sperimentale, mentre lo svantaggio più evidente è la scarsa precisione.

Lo sviluppo futuro della ricerca andrà nella direzione di un approfondimento della risoluzione dell'equazione di campo con infittimento e diversa ubicazione dei punti di campionamento, uniti alla misura del vettore velocità in diversi punti del volume.

APPENDICE

L'equazione di continuità per un sistema continuo a due componenti, scritta mettendo in evidenza la portata specifica di diffusione rispetto alla componente convettiva ed 'approssimando i fenomeni diffusivi con la legge lineare detta di Fick, fornisce (Haase, 1969):

$$\delta c / \delta \tau = \operatorname{div}(D \cdot \operatorname{grad} c) - \operatorname{div} (c \cdot u)$$
 (A.1)

La (A1) viene applicata ai cue casi particolari che danno luogo alle equazioni (2) e (4), in cui è possibile sostituire alla molarità c la concentrazione volumica C.

Nel primo caso si opera un bilancio istantaneo di massa sul sistema. Nell'ipotesi che la concentrazione sia indipendente dallo spazio (sistema omogeneo) integrando la (A1) rispetto al volume e trasformando l'integrale di volume in integrale sul contorno S per mezzo del teorema della divergenza, si ottiene:

$$V \cdot dC/d\tau = -\int \vec{u} \cdot C \cdot \vec{dS} \qquad (A.2)$$

Se la concentrazione in tutti gli ingressi è uguale e pari a C_e ed è pari a $C(\tau)$ nelle uscite la (A2) diviene:

$$V.dC/d\tau = C_{\Theta} \sum_{j} \dot{V}_{in,j} - C(\tau) \sum_{i} \dot{V}_{u,i}$$
(A.3)

Essendo $\sum_{i} \dot{V}_{in,j} = \sum_{i} \dot{V}_{u,i} = \dot{V}$ si ottiene infine

$$V \cdot dC/d\tau = V \cdot (C_e - C(\tau))$$
(A.4)

Nel secondo caso si effettua un bilancio globale di massa integrando la (A1) rispetto al volume (supposto indeforzabile) del sistema ed al tempo:

$$\int_{\mathbf{V}} \int_{\mathbf{0}} \tilde{\delta} c / \delta \tau \, d\tau dV = \int_{\mathbf{V}} \left[\int_{\mathbf{0}} \tilde{d} i v (D \cdot g r a d c) \, d\tau \right] dV - \int_{\mathbf{V}} \left[\int_{\mathbf{0}} \tilde{d} i v (\overline{u} \cdot c) \, d\tau \right] \, dV$$

Trasformando ancora una volta gli integrali di volume in integrali di superficie (teorema della divergenza) ed introducendo inoltre le seguenti ipotesi:

- che sul contorno S del sistema non vi sia diffusione (D=O)

- che la concentrazione iniziale sia costante nel volume: C(x,y,z,0)=C(0)

- che la concentrazione finale sia nulla: $C(x,y,z,\infty)=0$

- che la velocità convettiva u sia costante nel tempo

si ottiene:

$$- C(0) \cdot V = \int \left[\int_{0}^{\infty} C d\tau \right] \vec{u} \cdot \vec{dS}$$
 (A.6)

Il prodotto scalare u.dS è diverso da zero soltanto in corrispondenza di ingressi ed uscite; per un sistema con una sola uscita e con concentrazione nulla in tutti gli ingressi si ha:

$$-C(0) \cdot V = -V \int_{0}^{\infty} C \cdot d\tau \qquad (A.7)$$

da cui si può ricavare la frequenza di ventilazione:

 $n = C(0) / \int_{0}^{\infty} C \cdot d\tau \qquad (A.8)$

BIBLIOGRAFIA

De Bortoli, M., et al., Measurements of indoor air quality and comparison with ambient air. A study on 15 homes in N. Italy. Commission of European Communities, EUR 9656 EN, Brussels, 1985.

Fracastoro, G.V., Experimental and Theoretical Analysis of Energy Use and Thermal Dynamics of an Existing Building, ASHRAE/DOE/BTECC Conference, Clearwater, Fla., Dic., 1985.

Haase R., Thermodynamics of irreversible processes. Addison-Wesley Publ. Co., Londra, 1969.

Sandberg, M., What is ventilation efficiency?, Building & Environment Vol. 16 No.2, 1981.

Sandberg, M., Local mean age of air, National Swedish Institute for Building Research, Projekt 561-85, 1986.

Sandberg, M. e Fracastoro, G.V., Misure di portata d'arıa di ricambio e di efficienza della ventilazione negli edifici. Il Condizionamento dell'Aria, Febbraio 1984.

Sandberg, M. and Sjoberg, M., The use of moments for assessing air quality in ventilated rooms. Building and Environment, Vol. 18 No. 4, 1983.

Zecchin, R. e Borsoi, L., "Psycros": sottoprogrammi per la valutazione mediante elaboratore delle proprietà termodinamiche dell'aria umida. Il Condizionamento dell'Aria, Febbraio 1984.

Zwietering, Th.N., The degree of mixing in continuous flow systems. Chem. Eng. Sci. Vol. 11, 1959.

RICONOSCIMENTI

Questa ricerca è stata svolta con il contributo del Progetto Finalizzato Energetica II - Contratti N. CNR 83.01979.59 e CNR 84.02677.59.

	Tabella I				
Ricambi d'aria misurati	in diverse	condizioni	sperimentali	(fase	Α).

			Т	ipo di	i efflus:	50			
	A bocca libera		Con diffusore			Con plenum forato			
Valore nomin.	a	b	с	a	b	с	a	b	c
0.5	0.59	0.61	-		0.59	0.60	0.68	0,62	0.65
1.0	0.94	1.05	-		1.05	1.03	1.04	1.04	0.94
2.0	1.93	1.98	1.99	-	-	-	-	2.07	1.99
3.0	2.80	2.99	3.02	-	-	-	-	3.18	3.18

×

a - assenza di ventilazione

b - 1 ventilatore

c - 2 ventilatori

.

		Senza c	stacoli	interni		Con ost	cacoli i	nterni	
		A	B	C		A	B	C	
	Punto		*** *** *** *** *** *** *** ***				1 (11 (11 (11 (11 (11 (11 (11 (11 (11 (
	1	0.63	0.66	0.65		0.62	-	0.60	
	2	0.61	0.57	0.59		0.62	-	0.59	
n=0.5	з	0.62	0.65	0.64		0.61	-	0,59	
	4	0.62	0.65	0.63		0.62	-	0.59	
	5	0.64	0.65	0.65		0.62	-	0.59	
	6	0.63	0.66	0.63	0.64	0.61	-	0.60	0.61
Valore	medio	pesato		******	0.63				0.61
	1	1,15	1.16	1.13		1.18		1.06	
	2	0.99	0.98	1.13		0.92	-	1.05	
n=1.0	з	1.12	1.15	1.13		1.13	-	1.06	
	4	1.12	1.13	1.11		1.14	-	1.06	
	5	1.13	1.15	1.12		1.15	-	1.06	
	6	1.12	1.14	1.13	1.13	1.14	÷ _ ,	1.06	1.10
Valor medio pesato			1.11				1.07		
	1	2.19	2.15	2.13		1.99	_	2.00	
	2	1.88	2.04	2.00		2.03	-	1.97	
n=2.0	з	2.17	2.15	2.13		2.00	-	1.98	
	4	2.20	2.12	2.16		2.00	-	1.97	
	5	2.16	2.14	2.15		2.01	-	1.98	
	6	2.16	2.15	2.16	2.16	2.01	-	1.99	2.00
Valor medio pesato			2.11				1.99		

Tabella II Ricambi d'aria misurati in diverse condizioni sperimentali (fase B).

Tabella III Ricambi d'aria misurati con il vapor d'acqua come tracciante.

						-		
Valore nominale	0.53	1.06	1.59	2.38	3.18			
Valore misurato	0,87	1.30	1.54	1.82	2.83			
Scarto percentuale	+64%	+23%	- 3%	-24%	-11%			



Fig. 1 - Andamento nel tempo di ln(C) (linea continua). A tratto discontinuo è indicata la pendenza dopo il transitorio iniziale.

- 2

16



Fig. 2 - Veduta di insieme dell'apparato sperimentale.

100



Fig.3. Schema dell'apparato sperimentale (fase A)





Fig.5. Disposizione delle prese di campionamento

4