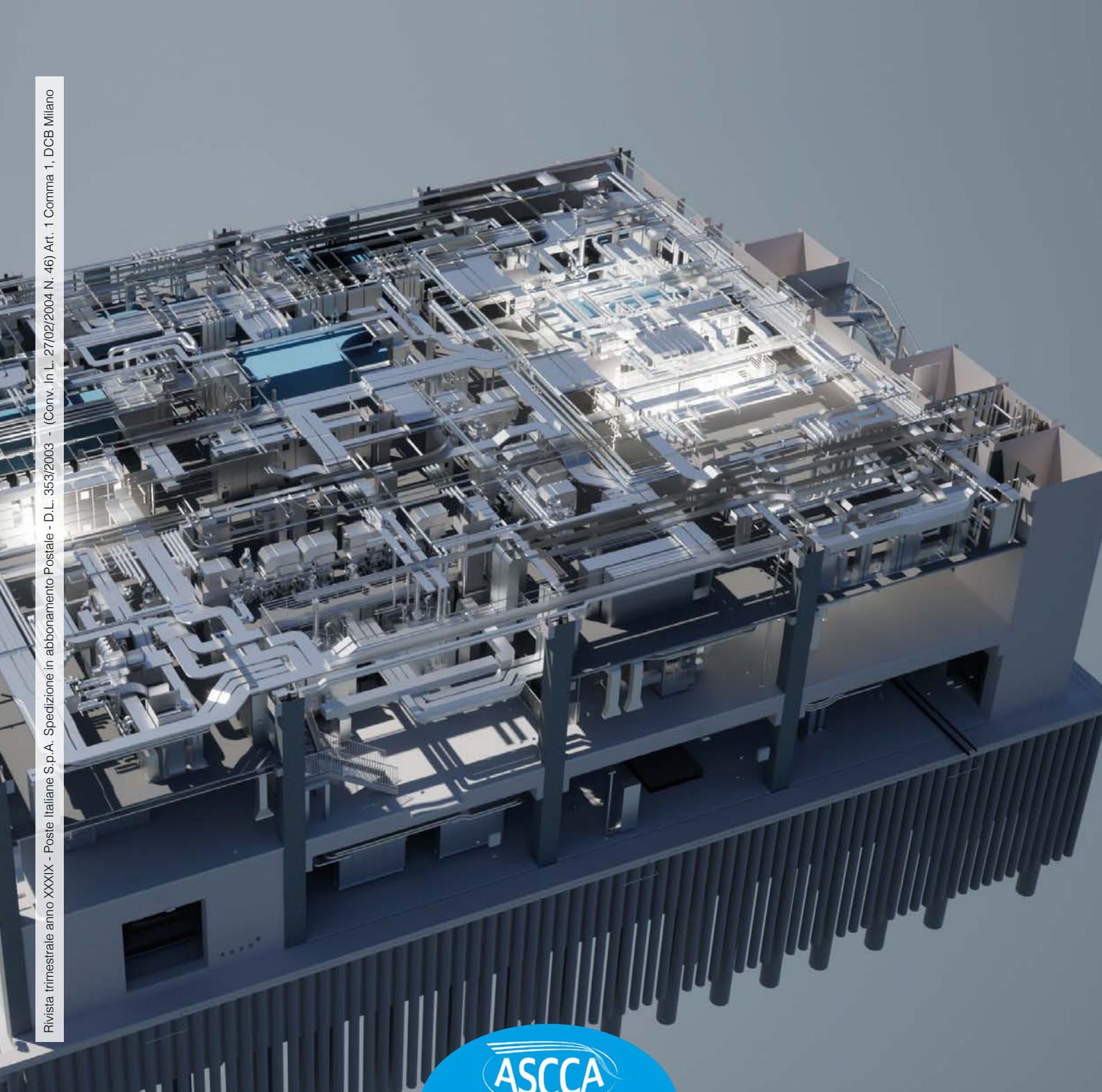


ASCCA *news*

LA RIVISTA PER IL CONTROLLO DELLA CONTAMINAZIONE AMBIENTALE

Rivista trimestrale anno XXXIX - Poste Italiane S.p.A. Spedizione in abbonamento Postale - D.L. 353/2003 - (Conv. In L. 27/02/2004 N. 46) Art. 1 Comma 1, DCB Milano



Utilizzo del tempo di ritardo per la valutazione della portata d'aria in una cleanroom

L. Sabatini (Lesatec Srl)

Parole chiave

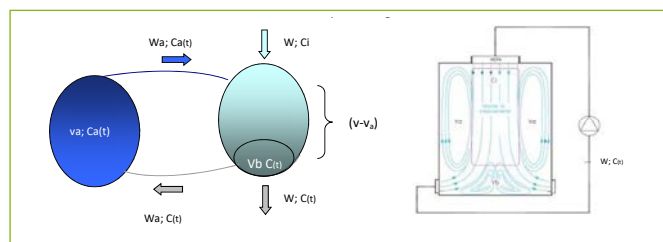
TEMPO DI RITARDO | EFFICIENZA DI VENTILAZIONE | MODELLO A DUE FLUSSI

Lo studio illustra come il modello a due flussi può essere utilizzato per ottenere delle relazioni che consentano di passare dai dati di recovery time misurati in un modello o in una generica camera bianca, ai valori ottenibili nelle condizioni operative in funzione dei carichi e delle condizioni ambientali (estate/inverno) che influenzano le efficienze di ventilazione e i tassi di recupero da cui derivano

Richiami sul modello a due flussi

L'autore dell'articolo, insieme al Prof. Cesare Maria Joppolo del POLIMI di Milano, presentò al 17° simposio ICCCS tenutosi in Bonn, Germania[1], il modello a due flussi per il calcolo della concentrazione di particelle aerotrasportate nelle cleanroom a flusso misto. Queste le ipotesi del modello:

- il volume della cleanroom (V) è suddiviso in due parti, il volume sporco (Va) e il volume pulito (V-Va) dove avviene il mescolamento tra aria immessa e aria autoricircolata. Nell'ultima parte del volume pulito, la Vb, la concentrazione di contaminanti in aria è pari a quella media presente nelle griglie o nei condotti di ripresa (vedi Figura 1);
- le particelle aerotrasportate non si diffondono immediatamente nell'intero volume della cleanroom;
- gli spostamenti dovuti alla diffusione sono trascurabili anche per le particelle submicroniche;
- la deposizione delle particelle submicroniche è trascurabile;
- il trasporto delle particelle all'interno della cleanroom dipende dal flusso d'aria secondario indotto dall'aria in ingresso in quanto per le particelle submicroniche le forze viscoso sono predominanti rispetto a quelle di inerzia. Ciò si traduce in un loro trascurabile scostamento dalle linee di flusso del fluido che le trasporta. Ovvero il loro moto in aria è assimilabile a quello dei gas.



▲ FIGURA 1 - MODELLO PER FLUSSO DIRETTO

Ponendo $b = W/W_a =$ rapporto di auto induzione, si ottengono alcuni risultati notevoli:

- 1) Correlazione tra la concentrazione di particelle nel volume Va, Ca e nel volume Vb, C(t):

$$C_a = (1+b)C(t) - G(v-v_a)/W_a$$

dove G indica l'intensità della sorgente interna di particelle (pt/m3sec). Per $G=0$, si ha:

$$b = \frac{C_a(t)}{C(t)} - 1$$

Relazione utile per calcolare b da misure di concentrazione.

- 2) In condizioni stazionarie la concentrazione nel volume Va, dipende dalla posizione della sorgente di particolato:

G uniformemente distribuita in V:

$$C_{aoo} = G \left(\frac{t'_{(100)} b}{4,6(1+b)} + \frac{1}{R} \right) = \frac{P_s}{V} \left(\frac{v_a}{W} b + \frac{1}{R} \right)$$

G uniformemente distribuita in (V-Va):

$$C_{aoo} = \frac{P_s}{(v-v_a)W} (v-v_a) = \frac{P_s}{W}$$

G uniformemente distribuita in Va:

$$C_{aoo} = \frac{G}{W} v_a (1+b) = \frac{P_s}{W} (1+b)$$

avendo indicato con Ps la sorgente totale di particelle nel relativo volume di riferimento.

- 3) Il recovery time (tempo di recupero) è indipendente dalla posizione della sorgente di particolato:

$$t'_{(100)} = \frac{v_a}{W} (1+b) 4,6$$

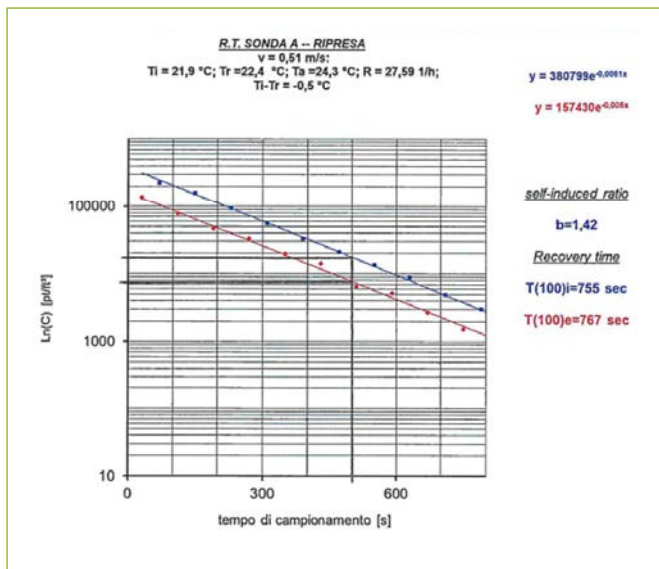
4) Il recovery time ha lo stesso valore sia se misurato rispetto a $C_a(t)$, recovery time interno, o a $C(t)$, recovery time esterno, nei canali di ricircolo per esempio:

$$t'(100)e = t(100)i$$

Riassumendo:

- il tempo di recupero ($t(100)$) in un punto non dipende dalle condizioni di contaminazione;
- le concentrazioni interne, in condizioni stazionarie, dipendono dalle condizioni di contaminazione;
- il tempo di recupero interno è uguale al tempo di recupero esterno;
- la classe di contaminazione dipende dalla massima concentrazione misurata sul piano di lavoro, ovvero dal valore di C_a .

Nella Figura 2 sono mostrate le curve sperimentali di decontaminazione misurate contemporaneamente in un punto interno al volume V_a della cleanroom (linea blu) e sulle griglie di ripresa (linea rossa), in assenza di sorgenti di particolato diverse dalla emissività delle pareti.



▲ FIGURA 2 - CURVE SPERIMENTALI DI DECONTAMINAZIONE

Le pendenze sono pressoché uguali, indice dell'uguaglianza dei tempi di recupero. Inoltre l'esistenza di un ampio intervallo di tempo nel quale ogni curva è descrivibile con un solo esponenziale è indicativa del fatto che in condizioni di decontaminazione con cleanroom adeguatamente pulita l'influenza di G si può ritenere trascurabile a tutto vantaggio della ripetibilità dei dati. Pertanto se a un medesimo istante valutiamo sul diagramma le concentrazioni, possiamo calcolare il valore di "b". Questo valore, insieme al $t(100)$, può essere usato per la stima della concentrazione massima all'interno del volume sporco V_a . Il modello è adattabile anche in caso di gas [2]. Se W_a diventa molto grande, il volume sporco può aumentare fino a comprendere quasi il totale della cleanroom. In questo caso il tempo di recupero diviene:

$$\lim_{W_a \rightarrow \infty} (t'_{(100)i}) = \frac{v}{W} 4,6 = \frac{4,6}{R} = C_{c(100)}$$

Dove $C_{c(100)}$ è il coefficiente di pulizia (cleansing coefficient) introdotto il secolo scorso da Dennis McQuillen con l'ipotesi dell'immediata diffusione delle particelle all'interno della cleanroom [3]. Un buon modo per valutare in un punto interno di una cleanroom a flusso misto l'efficienza di pulizia (E_s), è comparare il coefficiente di pulizia con il tempo di recupero:

$$E_s = C_{c(100)} / t'_{(100)i} = \frac{v}{v_a(1+b)} = \frac{4,6}{R t'_{(100)i}} = \frac{r}{R}$$

dove "r" è il tasso di recupero secondo ISO14644-3. E_s è sempre minore di 1 e può essere considerata un indice di qualità della cleanroom. Spesso, in letteratura tecnica, è indicata con il termine "efficienza di ventilazione", ϵ [4].

In funzione di E_s si ottiene:

$$C_a = C_{ao} e^{-E_s R t} + C_{ax} (1 - e^{-E_s R t})$$

Per G uniformemente diffusa in V :

$$C_{ax} = \frac{P_s}{vW} \left(\frac{v}{E_s} - v_a + v \right) = \frac{P_s}{W} \left(\frac{1}{E_s} - \frac{v_a}{v} + 1 \right)$$

Per V_a tendente a v , flusso altamente turbolento:

$$C_{ax} \approx \frac{P_s}{W E_s}$$

Per G diffusa in $(V-V_a)$,

= non ci sono vantaggi dall'introduzione di E_s .

Per G diffusa in V_a :

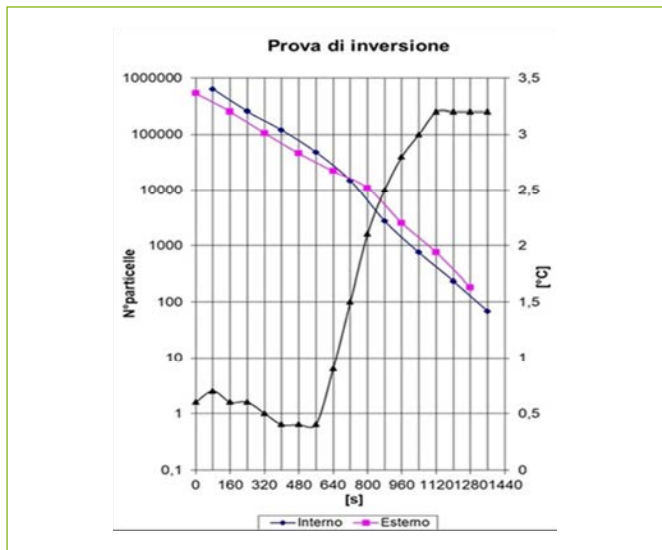
$$C_{ao} = \frac{P_s}{W} (1+b) = \frac{P_s}{R v_a E_s} = \frac{P_s}{r v_a}$$

E per il volume V_a si ha:

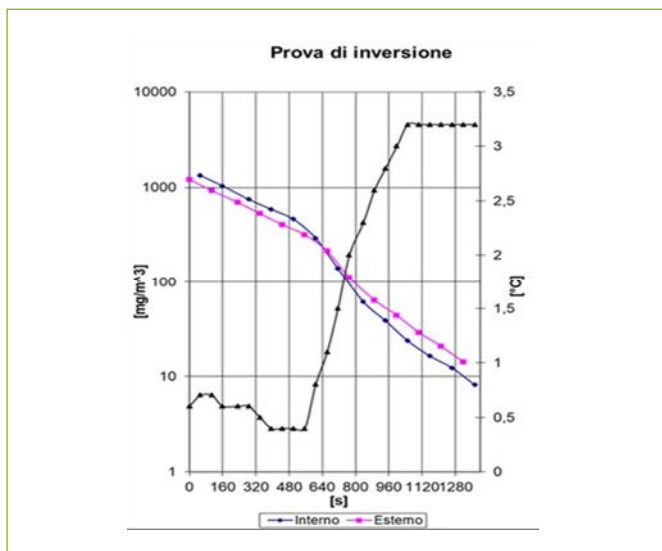
$$v_a = \frac{v}{E_s (1+b)}$$

Le ipotesi del modello furono provate nel laboratorio Lesatec da una squadra composta da laureandi del POLIMI e tecnici Lesatec. I risultati degli esperimenti con le relative conclusioni furono riportati nella loro tesi di laurea [2] alla quale facciamo riferimento per gli approfondimenti.

Le prove furono effettuate utilizzando particelle e gas (SF_6) con differenti velocità e temperature dell'aria in ingresso e varie temperature in uscita (ΔT), per l'influenza che questi parametri hanno sui moti convettivi interni. Esse evidenziano anche il fenomeno dell'inversione termica del flusso dipendente dal ΔT e dalla velocità di immissione. Nelle Figure 3, 4, 5, 6 e 7 è mostrato il fenomeno, con andamento sovrapponibile, per particelle e gas. Con $\Delta T < 1^\circ C$ la concentrazione misurata in V_a è maggiore di quella misurata nelle griglie di ripresa. Il volume V_a (volume sporco) circonda all'esterno il flusso unidirezionale. Aumentando il ΔT le due linee si incrociano. Quando il ΔT ritorna stabile (parte destra dei diagrammi) l'area sporca non è più attorno al filtro ma all'interno del volume $(V-V_a)$.

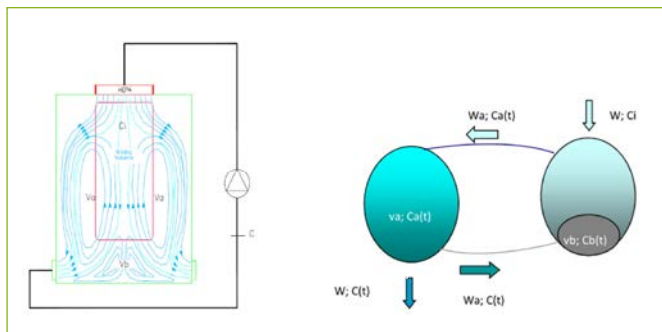


▲ FIGURA 3 - TEST DI INVERSIONE PER PARTICELLE



▲ FIGURA 4 - TEST DI INVERSIONE PER GAS (SF6)

Quindi il volume V_a e il volume $(V - V_a)$ invertono le loro funzioni. L'inversione del flusso può essere schematizzata come segue:



▲ FIGURA 5 - MODELLO PER FLUSSO INVERSO



▲ FIGURA 6 - FLUSSO DIRETTO



▲ FIGURA 7 - FLUSSO INVERSO

Le Figure 6 e 7 mostrano gli effetti del flusso diretto e inverso nel punto di immissione del fumo (punto posto approssimativamente a 1 metro dal pavimento e posizionato al centro del filtro di immissione aria a sua volta posizionato a 2,7 metri dal pavimento). Da quanto sopra derivano alcune precisazioni in merito all'utilizzo di E_s :

- è sufficiente conoscere la E_s della zona critica più svantaggiata in quanto la classe di contaminazione dipende dalla concentrazione massima misurata sul piano di lavoro;
- se le sorgenti di particolato sono in posizioni differenti ma attive contemporaneamente, è necessario valutare il contributo di ogni posizione e quindi sommare le concentrazioni ottenute;
- l'efficienza di ventilazione e il t_{100} cambiano in funzione delle condizioni termiche (raffreddamento/riscaldamento), pertanto è necessario controllare se in condizioni operative (inverno/estate) si rimane in condizioni di flusso diretto oppure no.

Un'analisi adimensionale più approfondita dell'inversione di flusso, basata sul metodo di Buckingham, fu poi rieseguita nel laboratorio Lesatec da un nuovo gruppo di lavoro. I risultati degli esperimenti e le relative conclusioni, utili per la progettazione dei sistemi, sono riportate nelle referenze [5, 6, 7, 8].

Definizione e utilizzo del tempo di ritardo

Talvolta è necessario garantire sia la massima concentrazione che il massimo valore accettabile per il recovery time. Il modello a due flussi può essere convenientemente utilizzato per questo fine introducendo il tempo di ritardo τ tra le curve di decontaminazione interna ed esterna. Se nella Figura 9 consideriamo una definita ordinata, ad esempio quella caratterizzata da una concentrazione di 15000 pt/ft³, essa incontrerà la linea rossa al tempo t_1 e quella blu al tempo t_2 . La differenza tra questi due valori è il tempo di ritardo τ . Essendo le due curve rappresentabili in carta semilog con due rette parallele, il valore di τ è costante e non dipende dalle concentrazioni. Pertanto la concentrazione $C_a(t)$ in un punto del volume sporco V_a può essere espressa in funzione della concentrazione media $C(t)$ e τ .

$$C_a(t) = C_0 e^{-r(t-\tau)} = C(t) e^{r\tau}$$

Nel modello a due flussi, per il principio di conservazione della massa, nello stato stazionario la concentrazione $C(t)$ deve essere pari alla media della concentrazione nella cleanroom. La concentrazione media può essere facilmente calcolabile:

$$C_0 = (\text{generazione totale di particelle per unità di tempo}) / (\text{portata totale nella camera}) = P_t / W$$

Quindi la curva di decontaminazione in un punto interno può essere scritta come:

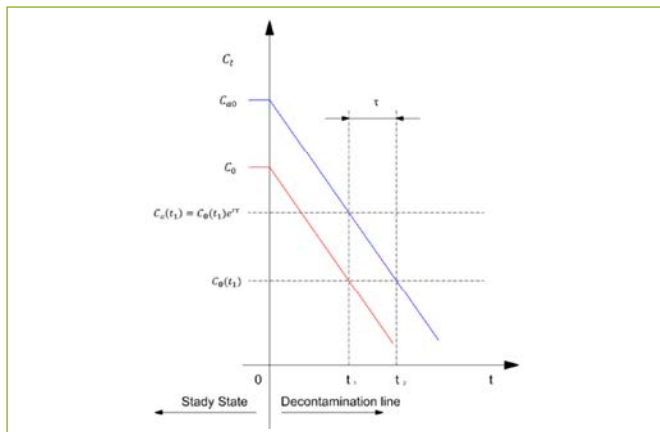
$$C_a = C_0 e^{-rt} e^{r\tau} = \frac{P_t}{W} e^{-rt} e^{r\tau}$$

Conoscendo la sorgente interna di particolato e imponendo sia il valore del tempo di recupero che quello della classe di contaminazione tramite il suo UCL, per $t=0$ abbiamo:

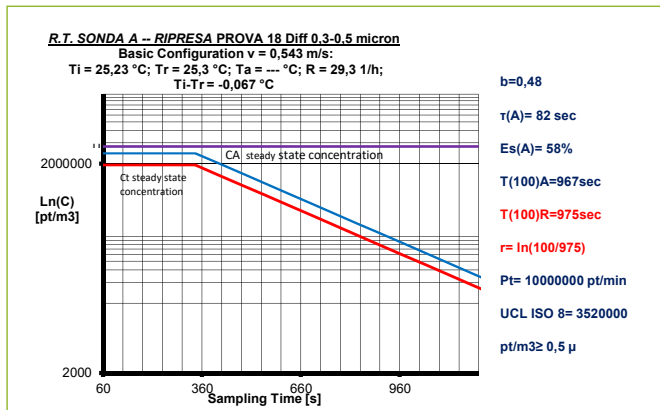
$$C_{a\infty} = \frac{P_t}{W} e^{r\tau} \leq UCL \Rightarrow W \geq \frac{P_t}{UCL} e^{r\tau} \quad W \geq \frac{P_t}{UCL} e^{\frac{4,6}{R\tau} \tau}$$

R_{ti} = recovery time imposto

relazione che ci permette di determinare la portata minima soddisfacente i due requisiti posti. In Figura 9 è mostrato graficamente il processo partendo dai dati della Figura 8 ($t(0) \sim 340$ sec).



▲ FIGURA 8 - TEMPO DI RITARDO



▲ FIGURA 9 - ESEMPIO DI VERIFICA PORTATA DI ARIA

Matematicamente τ può essere determinato con la formula:

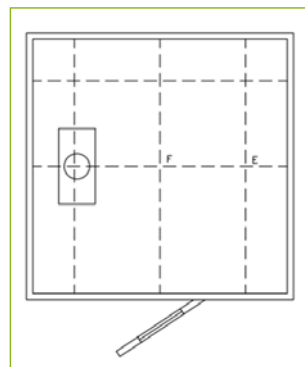
$$\tau = \frac{1}{r} \ln \frac{C_a}{C_0}$$

L'utilizzo di τ , se lo si conosce, semplifica il processo di verifica. In letteratura, però, questi valori non sono disponibili.

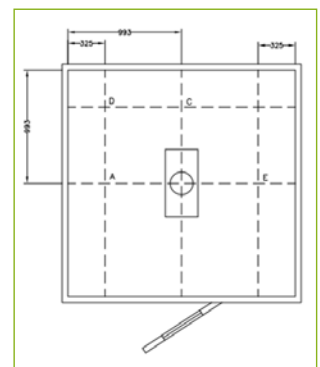
Nuovi dati

Per avere un maggior numero di dati a disposizione e fugare alcune perplessità sorte durante l'aggiornamento della ISO 14644-4 relative alla dipendenza dei risultati sperimentali dalla simmetria del modello fisico utilizzato, è stata intrapresa una nuova serie di misurazioni effettuate sullo stesso modello fisico già utilizzato in passato. [l'analisi completa è stata presentata dall'autore dell'articolo durante l'ultima edizione del Simposio ISCC, tenuto a Milano nel 2024] [9].

Le prove sono state eseguite come descritto in [2] ma con due differenti posizionamenti del filtro HEPA H14 avente dimensioni 610*305 (vedi Figure 10 e 11).



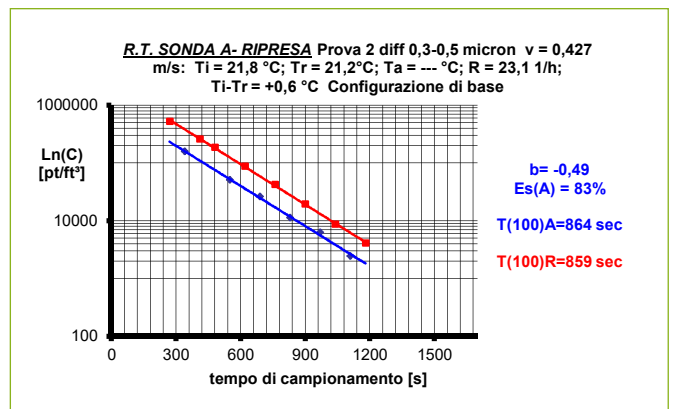
▲ FIGURA 10
CONFIGURAZIONE 1



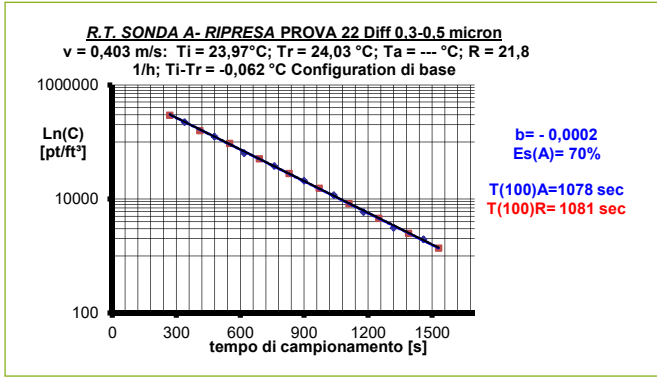
▲ FIGURA 11 -
CONFIGURAZIONE DI BASE

Nella configurazione di base i punti di misura erano gli A-D-C-E mentre per l'altra erano i punti E-F. La sonda di campionamento era posta ad 1,4 metri dal pavimento.

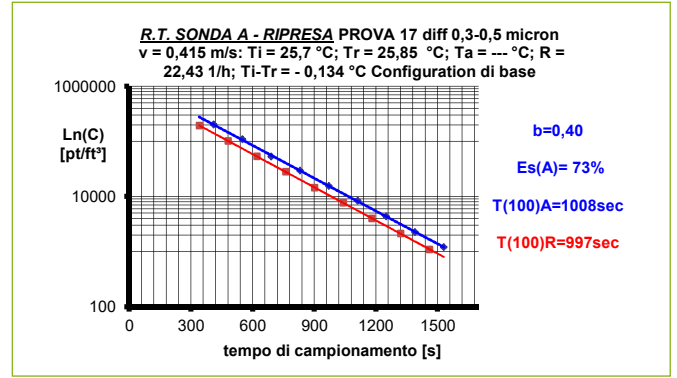
Nelle Figure 12, 13, 14, 15 e 16 sono riportati alcuni risultati estrapolati dalle oltre quaranta prove eseguite. Le linee indicate sono le linee di interpolazione dei dati le cui equazioni ci hanno permesso di ricavare i parametri tecnici riportati nelle figure. Le concentrazioni sono le differenziali tra 0,3 e 0,5 micron. Il tracciante utilizzato era un aerosol di emery oil generato per mezzo di ugelli di Laskin.



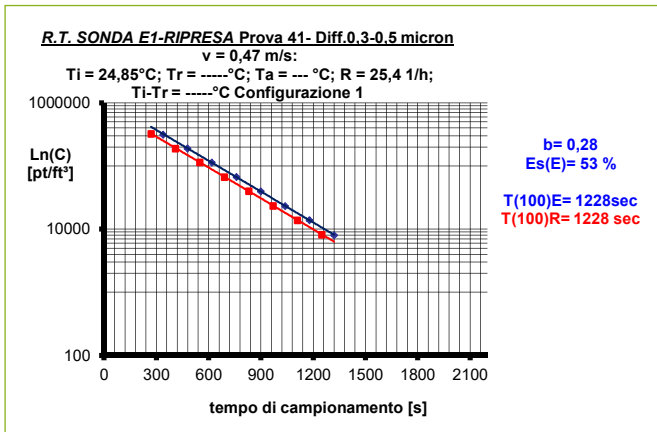
▲ FIGURA 12 - PUNTO A: FLUSSO INVERSO - CONFIGURAZIONE DI BASE



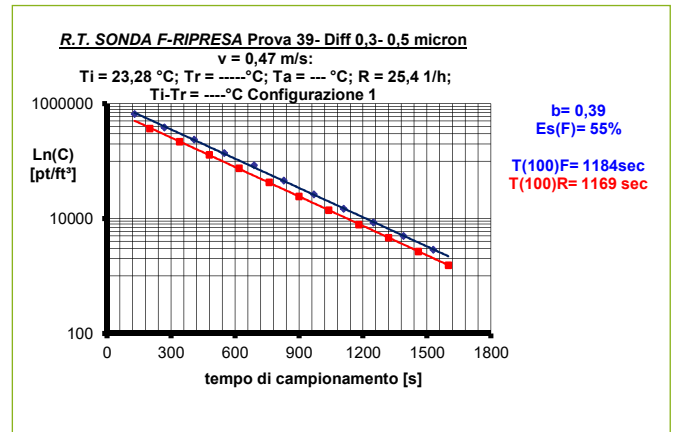
▲ FIGURA 13 - PUNTO A: ZONA DI INSTABILITÀ- CONFIGURAZIONE DI BASE



▲ FIGURA 14 - PUNTO A: FLUSSO DIRETTO- CONFIGURAZIONE DI BASE



▲ FIGURA 15 - PUNTO E: FLUSSO DIRETTO - CONFIGURAZIONE 1



▲ FIGURA 16 - PUNTO F: FLUSSO DIRETTO - CONFIGURAZIONE 1

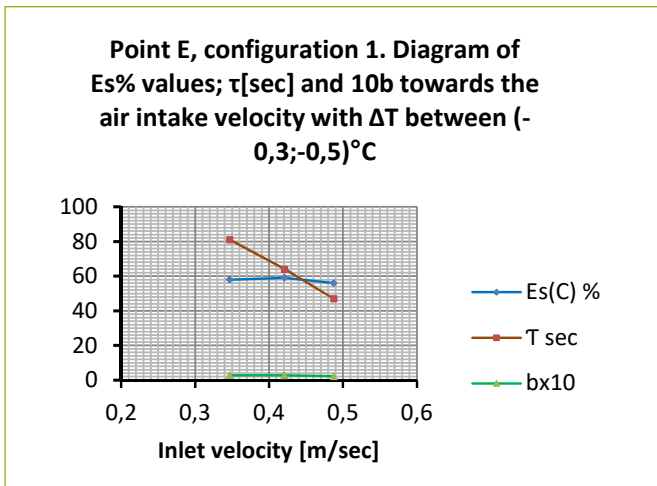
In caso di flusso inverso il valore di b è negativo in quanto il verso della velocità dell'aria è invertito rispetto a quello del modello matematico.

I dati ricavati hanno dimostrato che le ipotesi del modello non dipendono dalle simmetrie geometriche e che pertanto esso è generalmente applicabile. Se si conosce il valore di Es, di Va, di b o di τ con le formule riportate è possibile stimare la concentrazione di contaminante che si può avere nelle zone più critiche dei sistemi.

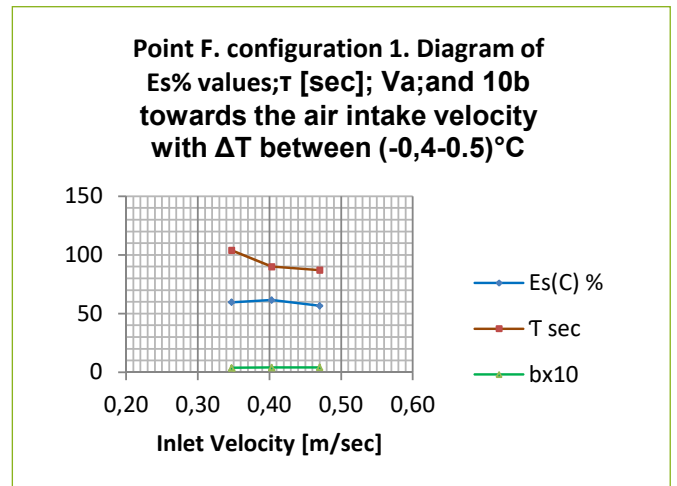
Nelle Figure 17 e 18 sono riportati alcuni dati, relativi ai punti E

e F nella configurazione 1, in funzione della velocità di immisione in condizioni, più o meno, isoterme. Le condizioni isoterme di funzionamento di una cleanroom sono, spesso, assai vicine alle condizioni "At Rest".

Le due figure mostrano andamenti simili tranne che per il tempo di ritardo. Deve essere tenuto presente che il punto E è più vicino alla parete della cleanroom del punto F e che il calore entra nella cleanroom proprio tramite la parete. Questo potrebbe spiegare la differenza evidenziata.



▲ FIGURA 17 - PUNTO E: ES, τ E $10 \cdot b$ VERSUS ΔT



▲ FIGURA 18 - PUNTO F: ES, τ E $10 \cdot b$ VERSUS ΔT

Conclusioni

Il modello a due flussi può essere un valido strumento per analizzare empiricamente il funzionamento delle camere bianche a flusso misto e valutare le portate di aria necessarie tramite l'utilizzo di Es o τ . I dati sperimentali, necessari cominciano a essere disponibili nella letteratura tecnica. In ogni

caso, sono ottenibili tramite le proprie esperienze in campo. Il suo maggior contributo è stato quello di fornire una interpretazione coerente della fenomenologia, cosa che ha permesso un miglior uso dei dati, specie di quelli empirici.

**Per avere ulteriori informazioni sull'articolo
inviare una email a redazione@asccanews.it**



Bibliografia

- 1 L. Sabatini, Cesare Maria Joppolo: "Two flows model and its use for the calculation of recovery time of mixed flow cleanrooms and analysis of results obtained in a trials model with gaseous and particles polluting agents"- Proceeding of 17 th Symposium ICCCS 2004 – Bonn
- 2 Donghi-Monolo "Sviluppo di modelli di calcolo della concentrazione di particelle e gas all'interno di camere bianche a flusso misto e loro verifica sperimentale" Tesi di Laurea – Politecnico di Milano anno accademico 2002-2003
- 3 Dennis F. Mc Quillen "Design and testing of pharmaceutical sterile Room" Pharmaceutical Technology - November 1981
- 4 ISO 14644 Cleanrooms and associated controlled environments Part 4: Design, construction and start-up. International Organization for Standards, Geneva, CH
- 5 F. Vaccaro: "Verifica sperimentale degli effetti della temperatura e della velocità dell'aria sui meccanismi di diffusione dei contaminanti in una clean room" Tesi di Laurea – Politecnico di Milano anno accademico 2003-2004
- 6 L. Sabatini: "Impianti per il controllo della contaminazione aerotrasportata" Biblioteca tecnica HOEPLI -2021
- 7 L. Sabatini: "Analysis of airborne contamination distribution in mixed flow cleanroom and consequences in the control technique – Technology of Cleanliness- N°1-2007
- 8 L. Sabatini: "Gli impianti per il controllo della contaminazione aerotrasportata - Parte 3: Modelli di calcolo della concentrazione di contaminanti aerotrasportati nelle camere a flusso misto, Ascca News 3/2019
- 9 L. Sabatini" Ventilation efficiency: the impact of temperature, inlet air velocity and internal heat loads on its use in system design." Atti del 26° Simposio ISCC 2024- Milano