

Correnti d'aria attorno e all'interno degli edifici

1. Fenomeni in gioco
2. Tasso di ricambio dell'aria
3. L'azione congiunta di più finestre e porte
4. Le cause del ricambio d'aria naturale
 - 4.1 L'azione del vento
 - 4.2 L'azione termica (effetto camino)
5. Scambio di aria e trasporto di sostanze dannose
 - 5.1 Ventilazione e qualità dell'aria interna
6. Consumo energetico, fabbisogno e ricambio di aria
7. Ermeticità: norme e metodi di misurazione (BlowerDoor)

1. Fenomeni in gioco

Sia il clima interno sia il bilancio energetico di un edificio sono influenzati in maniera determinante dal ricambio d'aria. Tale rinnovamento permette l'evacuazione all'esterno di gas, molecole o particelle che possono – per accumulazione – se non mettere in pericolo la vita dell'uomo per certe sostanze, compromettere tuttavia il suo benessere:

- anidride carbonica (CO₂) dovuta alla respirazione;
- vapor acqueo dovuto alle attività umane (v. tabella 6) o alla cessione d'acqua dall'involucro dell'edificio;
- radon, gas radioattivo dovuto alla catena naturale di disintegrazione dell'uranio, che penetra negli edifici attraverso il sottosuolo;
- odori sgradevoli, fumo da tabacco.

Occorre fare distinzione fra ricambio d'aria per infiltrazione naturale, scambio d'aria che avviene in maniera non controllata attraverso punti dove l'involucro dell'edificio non è stagno (ad es. attraverso gli interstizi attorno a finestre e porte o attraverso la cappa del camino) e ricambio d'aria per ventilazione artificiale (per mezzo di appositi meccanismi come ad es. estrattori d'aria, ventilatori e finestre).

Soprattutto nel caso di costruzioni con un buon isolamento termico, le perdite energetiche per la ventilazione risultano essere una quota importante del consumo energetico globale.

Oggi giorno si ha la tendenza a costruire degli edifici il cui involucro risulta essere particolarmente ermetico all'aria, per cui il ricambio d'aria dato dalla differenza di pressione interna/esterna è fortemente ridotto.

Per poter garantire la presenza d'aria fresca e specialmente per evitare di avere tassi d'umidità relativa dell'aria elevati (condensa sui vetri, muffa nei punti termicamente deboli) in genere l'utente deve svolgere un arieggiamento dei locali. Il ricambio, breve ma completo, permette di evacuare l'aria viziata (ricca di vapore e di diossido di carbonio) senza disperdere, nello stesso tempo, quantitativi notevoli di calore.

La tabella 6 mostra la quantità di vapore normalmente fornita da diversi agenti.

La descrizione dello scambio d'aria nell'edificio e attorno l'edificio e i fenomeni ad esso correlati (trasporti di calore, d'umidità e sostanze inquinanti), rappresentano un problema complesso, nel quale occorre considerare le *forze motrici* (pressione del vento, differenze di temperatura, ...), *la permeabilità all'aria*, il *comportamento* dei materiali di costruzione (che possono assorbire dell'aria) e dell'utente.

Persone	Attività leggera	30-60 g/h
	Attività media	120-200 g/h
	Attività pesante	200-300 g/h
Bagno	Vasca da bagno	ca. 700 g/h
	Doccia	ca 2600 g/h
Cucina	Cucinare, preparativi	600-1500 g/h
	Media giornaliera	100 g/h
	Forno a gas	160 g/h per kW
Fiori (normali per interno)		5-10 g/h
Pianta da vaso		7-15 g/h
Piccolo albero		10-20 g/h
Alberello (altezza 2-3 m)		2000-4000 g/h
Superficie libera d'acqua		ca. 40 g/(m ² ·h)
Centrifuga macchina da lavare		50-200 g/h
Asciugatrice		100-500 g/h

Tabella 6: vapore acqueo prodotto da diversi agenti.

2. Tasso di ricambio dell'aria

Per casi non troppo complessi è sufficiente calcolare l'apporto d'aria in rapporto alle dimensioni dell'edificio. La corrente d'aria (fresca), o portata volumetrica può esser calcolata nel seguente modo:

$$\dot{V} = \frac{\Delta V}{\Delta t} \left[\frac{m^3}{h} \right] \quad (83)$$

dove ΔV è il volume d'aria sostituito nell'intervallo di tempo Δt . Dividendo i m³ che in un'ora entrano, e che risp. lasciano l'edificio, per il volume netto dell'edificio V_R [m³] si ottiene il tasso di scambio dell'aria n_L .

$$n_L = \frac{\dot{V}}{V_R} \left[h^{-1} \right] \quad (84)$$

n_L fornisce anche un valore medio di quanto spesso (all'ora) l'aria viene ricambiata, ipotizzando che l'aria fresca apportata sostituisca completamente quella viziata (effetto pistone).

La corrente d'aria si sviluppa a causa di una differenza di pressione tra due regioni che possono ad esempio coincidere con l'interno e l'esterno dell'edificio.

Questa differenza di pressione può essere ad esempio indotta dal vento. Un altro fattore che può causare una corrente d'aria è costituito dalla temperatura. Infatti, scaldando un gas, esso tenderà ad espandersi, provocando una diminuzione della sua densità. Quando gli interstizi e le aperture nell'edificio sono presenti ad altezze differenti, questo fenomeno si traduce in un tiraggio d'aria dal basso verso l'alto, denominato "effetto camino". Nel caso di edifici di grande altezza, l'effetto camino è ulteriormente aumentato a causa della diminuzione non trascurabile della pressione statica dell'atmosfera con l'altitudine. In fine occorre citare anche l'effetto del vento. In questo caso, la differenza di pressione è dovuta allo scorrimento dell'aria intorno all'edificio, questa comporta una ripartizione più o meno complessa delle pressioni intorno alla costruzione, con zone in condizioni di sovrappressione (facciata esposta al vento) e altre in depressione rispetto alla pressione statica del luogo.

Data una certa differenza di pressione fra due regioni, possono venir distinti due tipi di moti dell'aria che dipendono dalle grandezze e dalla forma delle singole aperture.

- Moto laminare: si tratta di una corrente d'aria attraverso percorsi lunghi, fessure, crepe o giunti molto stretti (ad es. nel calcestruzzo). In questo caso la portata d'aria \dot{V} è direttamente proporzionale alla differenza di pressione Δp che produce il moto (andamento lineare):

$$\dot{V} \propto \Delta p \quad (85)$$

- Moto turbolento: si tratta di una corrente d'aria relativamente grande, passante attraverso giunti molto larghi. In tale moto, la portata d'aria non è più una funzione lineare e \dot{V} è proporzionale a $\sqrt{\Delta p}$:

$$\dot{V} \propto \sqrt{\Delta p} \quad (86)$$

In generale, il moto attraverso i giunti di porte e finestre, sotto l'effetto di una differenza di pressione Δp fra l'esterno e l'interno dell'edificio, è classificabile in un regime intermedio, fra il moto laminare e quello turbolento con \dot{V} proporzionale a $(\Delta p)^m$:

$$\dot{V} \propto (\Delta p)^m \left[\frac{m^3}{h} \right] \quad (87)$$

Nel caso di finestre o porte dove il passaggio d'aria avviene su una determinata lunghezza l , si separa dalla costante di proporzionalità la lunghezza e si scrive:

$$\dot{V} = a_F \cdot l \cdot (\Delta p)^m \left[\frac{m^3}{h} \right] \quad (88)$$

dove m [-] è l'esponente della differenza di pressione e a_F il coefficiente di permeabilità all'aria di un giunto "lineare" [$m^3/(h \cdot m \cdot Pa^m)$], il quale fornisce un'indicazione sulla quantità d'aria che passa in un'ora attraverso un giunto lungo 1 metro in presenza di una differenza di pressione di 1 Pa.

Nel caso in cui la corrente d'aria interessi una superficie A di un elemento della costruzione, si scrive:

$$\dot{V} = a_A \cdot A \cdot (\Delta p)^m \left[\frac{m^3}{h} \right] \quad (89)$$

dove a_A è il coefficiente di permeabilità all'aria di un giunto "superficiale" [$m^3/(h \cdot m^2 \cdot Pa^m)$], il quale fornisce un'indicazione sulla quantità d'aria che passa in un'ora attraverso un giunto di superficie di $1 m^2$ in presenza di una differenza di pressione di 1 Pa.

Il coefficiente di permeabilità dei giunti e l'esponente m sono determinati sperimentalmente. Come prima approssimazione per l'esponente m è possibile utilizzare una media:

$$m = \frac{2}{3} \quad (90)$$

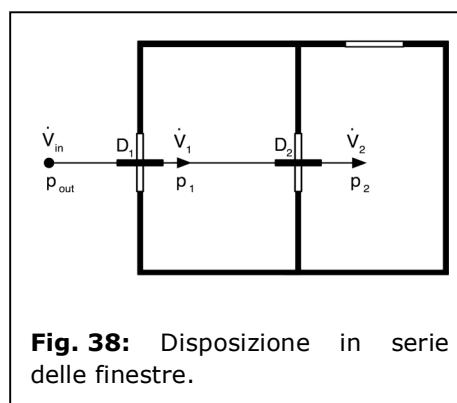
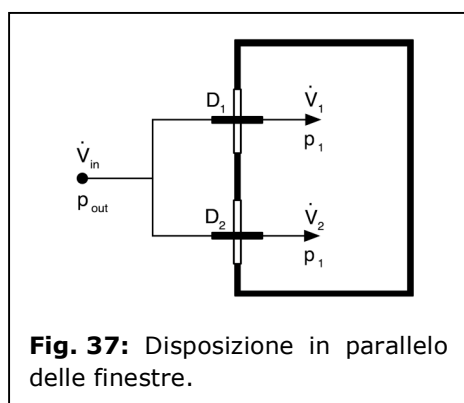
Si può quindi anche scrivere:

$$\dot{V} = D \cdot (\Delta p)^{\frac{2}{3}} \left[\frac{m^3}{h} \right] \quad (91)$$

dove D ($= a_F \cdot l$ rispettivamente $a_A \cdot l$) è il coefficiente di trasmissione dell'elemento.

3. L'azione congiunta di più finestre e porte

Una costruzione è caratterizzata da più finestre e porte. Per modellizzare lo scambio d'aria con l'esterno occorre tenere conto della loro disposizione che può essere in parallelo, quando lasciano passare l'aria tra le "stesse" zone (per es. finestre poste su una stessa facciata; vedi figura 37), oppure in serie (per es. locali disposti in fila; vedi figura 38).



Nel caso di due elementi in parallelo (D_1 e D_2 nella figura 37), la corrente totale è data dalla somma delle correnti \dot{V}_1 e \dot{V}_2 che attraversano i 2 elementi:

$$\dot{V}_{in} = \dot{V}_1 + \dot{V}_2 \quad (92)$$

La differenza di pressione sui 2 elementi è uguale e coincide con la differenza tra la pressione esterna (p_{out}) e quella interna del primo locale (p_1), ossia

$$\Delta p_1 = \Delta p_2 = p_{out} - p_1 \quad (93)$$

Introducendo un fattore di trasmissione totale D_{tot} per i 2 elementi si può anche scrivere (v. eq (91)).

$$\dot{V}_{in} = \dot{V}_1 + \dot{V}_2 = D_{tot} \cdot \Delta p_1^{\frac{2}{3}} \quad (94)$$

Applicando di nuovo l'eq. (91) per \dot{V}_1 e \dot{V}_2 si ottiene:

$$D_1 \cdot \Delta p_1^{\frac{2}{3}} + D_2 \cdot \Delta p_1^{\frac{2}{3}} = D_{tot} \cdot \Delta p_1^{\frac{2}{3}} \quad (95)$$

Da qui si ricava quindi per 2 elementi in parallelo:

$$D_{tot} = D_1 + D_2 \quad (96)$$

Nel caso di 2 elementi in serie (D_1 e D_2 nella figura 38) le correnti \dot{V}_1 e \dot{V}_2 che li attraversano sono le stesse:

$$\dot{V}_{in} = \dot{V}_1 = \dot{V}_2 \quad (97)$$

La differenza di pressione esistente tra le 2 estremità è data dalla somma delle pressioni sui due elementi:

$$\Delta p = p_2 - p_{out} = \Delta p_1 + \Delta p_2 \quad (98)$$

Introducendo una trasmissione totale si può scrivere (v. eq (97)):

$$D_{tot} \cdot (\Delta p_1 + \Delta p_2)^{\frac{2}{3}} = D_1 \cdot \Delta p_1^{\frac{2}{3}} \quad (99)$$

che può essere anche scritto come

$$\left(\frac{D_{tot}}{D_1} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot (\Delta p_1 + \Delta p_2) = \Delta p_1 \quad (100)$$

In maniera analoga vale:

$$\left(\frac{D_{tot}}{D_2} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot (\Delta p_1 + \Delta p_2) = \Delta p_2 \quad (101)$$

Sommando le ultime due espressioni si ottiene:

$$\left(\frac{D_{tot}}{D_1} \right)^{\frac{3}{2}} + \left(\frac{D_{tot}}{D_2} \right)^{\frac{3}{2}} = 1 \quad (102)$$

Ossia per elementi in serie la trasmissione totale si calcola nel modo seguente:

$$\frac{1}{(D_{tot})^{\frac{3}{2}}} = \frac{1}{(D_1)^{\frac{3}{2}}} + \frac{1}{(D_2)^{\frac{3}{2}}} \quad (103)$$

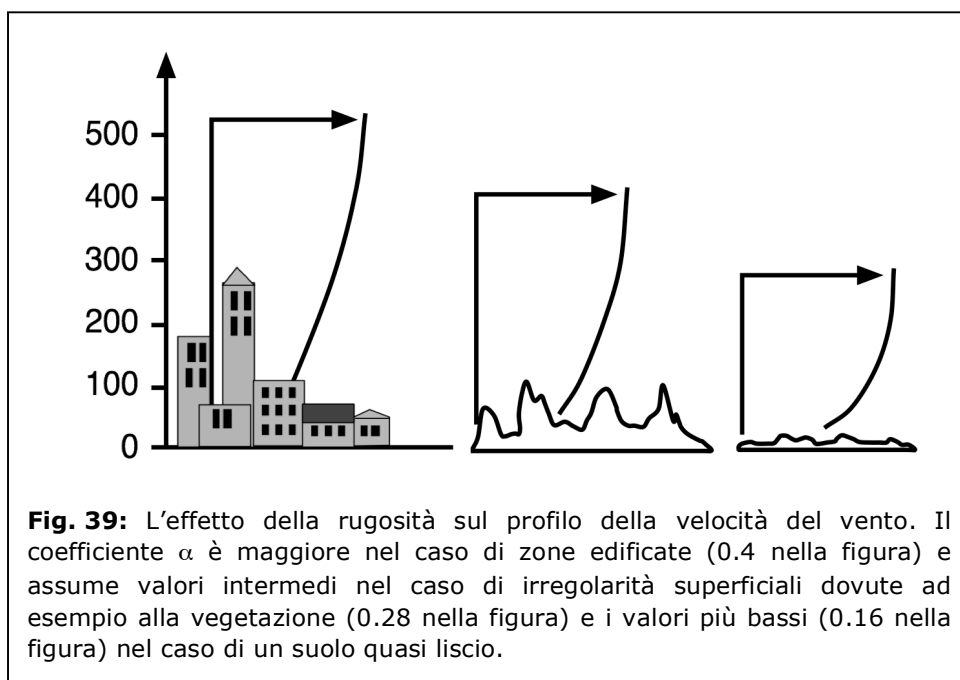
4. Le cause del ricambio d'aria naturale

4.1 L'azione del vento

Nello strato limite dell'atmosfera, che si estende fino ad un'altezza di 500-1000 m, il vento presente negli strati superiori viene progressivamente frenato a causa dell'attrito con il suolo. In tal modo si forma un profilo, nel quale la velocità del vento v (in m/s o km/h) cresce con la quota z secondo la seguente legge:

$$\frac{v(z)}{v(z_{ref})} = \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^\alpha \quad (104)$$

dove z_{ref} è un'altezza di riferimento alla quale la velocità del vento è nota, ad es. attraverso la misura con una stazione meteorologica¹, e l'esponente α dipende dalla rugosità del suolo. Alcuni esempi di profili di velocità sono illustrati nella figura 39, dove si può osservare come nel caso di suoli lisci i valori di α sono più bassi e la velocità del vento raggiunge più in fretta il valore degli strati superiori.

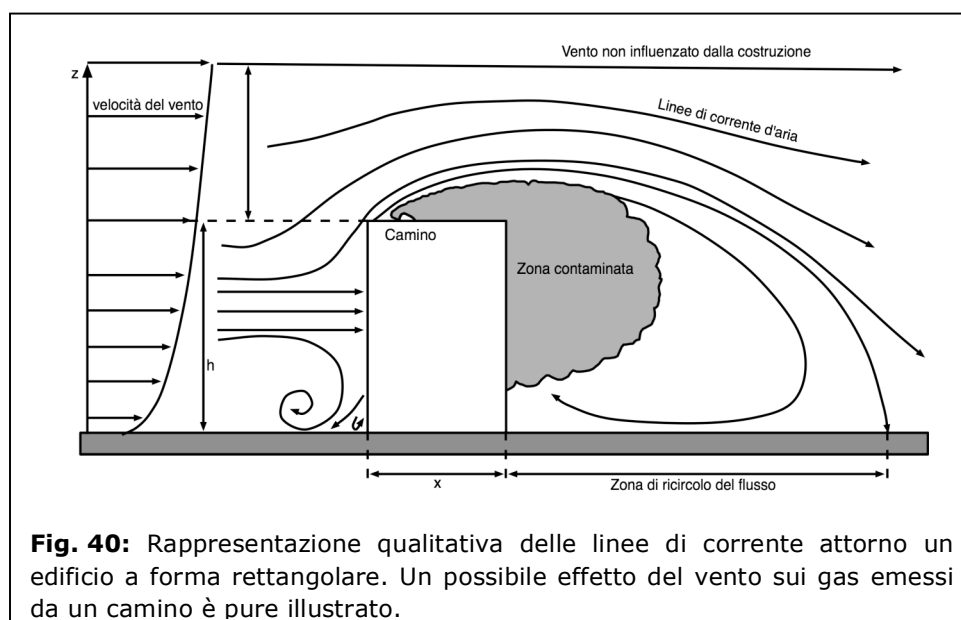


Un ostacolo devia il vento dal suo scorrimento rettilineo (v. figura 40) e lo costringe a seguire delle linee curve – sia verticalmente, sia orizzontalmente – attorno all'ostacolo. L'analisi esatta del comportamento del vento attorno ad un edificio e delle sovrappressioni e depressioni da esso causate dipende dalla forma dell'edificio e dalla configurazione del suo ambiente circostante (presenza di altri edifici, zona più o meno libera, ecc.). Costruzioni possedenti forme complesse (a "L" o "U") possono generare delle correnti d'aria troppo complesse per essere generalizzate. Per determinare le correnti d'aria influenzate da costruzioni adiacenti o dalla morfologia del terreno, sono normalmente utilizzate le gallerie

¹ In genere una stazione meteorologica viene posta in "campo libero" lontano da ostacoli e il vento viene misurato a 10 m dal suolo.

del vento mediante piccoli modelli (maquettes) oppure dei modelli numerici al computer.

Nella figura 40 la velocità del vento è analizzata graficamente nel caso di una costruzione rettangolare orientata perpendicolarmente al vento. La figura mostra che nell'analisi della velocità del vento si deve tener conto del profilo verticale dovuto all'attrito con il suolo.



La figura illustra – da un punto di vista qualitativo – come localmente gli ostacoli possano provocare un addensamento delle linee di corrente e di conseguenza un'accelerazione dell'aria trasportata sopra i tetti e attorno agli spigoli laterali. Per effetto di questa accelerazione nella parete non esposta al vento si può formare una zona d'aria stagnante (zona di **depressione**). Nel caso di camini troppo bassi in rapporto alla geometria dell'edificio, in questa zona si possono accumulare i gas inquinanti espulsi dal camino, che possono influenzare negativamente la qualità dell'aria all'interno degli edifici.

La parete esposta al vento si comporta in parte come uno sbarramento generando una **sovrappressione** che si lascia calcolare nel seguente modo:

$$\Delta p = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \quad (105)$$

dove v [m/s] è la velocità del vento in una zona non perturbata dalla presenza dell'edificio e ρ [kg/m³] la densità dell'aria.

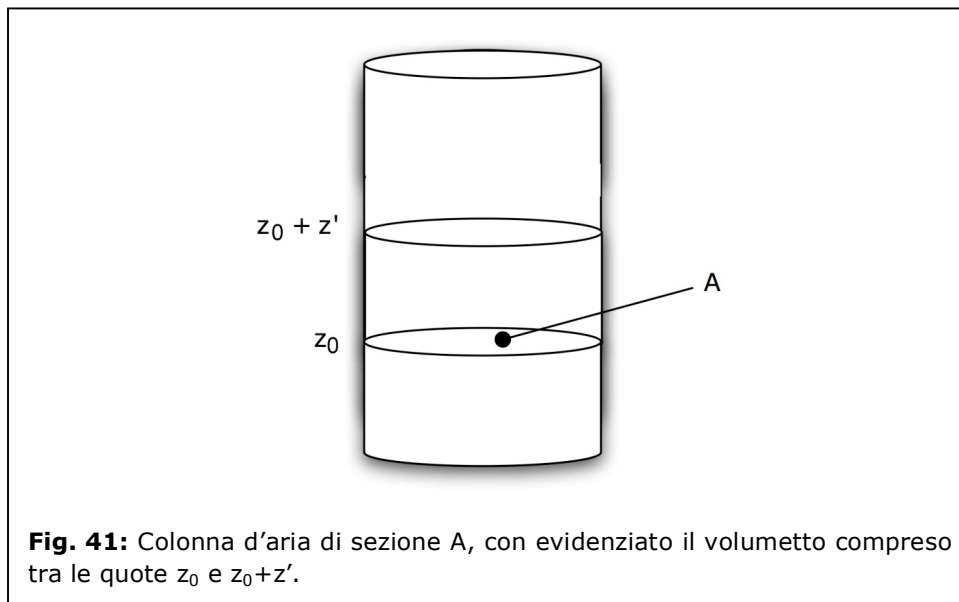
Questa formula vale soltanto nel caso di uno sbarramento perfetto, che – nel caso in analisi – si verifica solo nella zona centrale della parete. Ai bordi il vento trova sfogo attorno agli spigoli, ma anche nella parte inferiore della parete esposta al vento si possono formare dei mulinelli che modificano la sovrappressione. In generale l'equazione (105) si corregge introducendo un coefficiente adimensionale C_p , simile al coefficiente di trascinamento in aerodinamica:

$$\Delta p = \frac{1}{2} \cdot C_p(x,y,z) \cdot \rho \cdot v^2 \quad (106)$$

Il coefficiente C_p dipende dalla posizione (coordinate: x,y,z) e può essere misurato con l'aiuto di modelli nella galleria del vento per diverse forme di edificio e di ambienti costruiti.

4.2 L'azione termica (effetto camino)

La pressione della nostra atmosfera è determinata dalla forza peso della massa dell'aria che ci sovrasta. La pressione diminuisce con l'altezza in quanto la parte d'aria che si trova al di sotto di una determinata quota non contribuisce al peso della colonna d'aria che si trova sopra gli oggetti posti alla quota prestabilita. Un'analisi precisa della pressione in funzione dell'altezza deve tener conto anche della rarefazione dell'atmosfera. Tuttavia se ci si limita a piccole differenze di quote, come si incontrano di solito nell'analisi degli edifici, la variazione della pressione è descritta da una semplice funzione lineare.



Per capire come si può considerare una colonna d'aria come nella figura 41 e richiamare la definizione di pressione (p) come il rapporto tra la forza F (in Newton) premente e la superficie A sulla quale agisce:

$$p = \frac{F}{A} \left[\frac{N}{m^2} = Pa \right] \quad (107)$$

La pressione di una colonna d'aria all'altezza z_0+z' può essere calcolata sottraendo dal valore di $p(z_0)$ la pressione esercitata dal volumetto:

$$p = p(z_0) - \frac{\rho \cdot A \cdot z' \cdot g}{A}$$

ossia

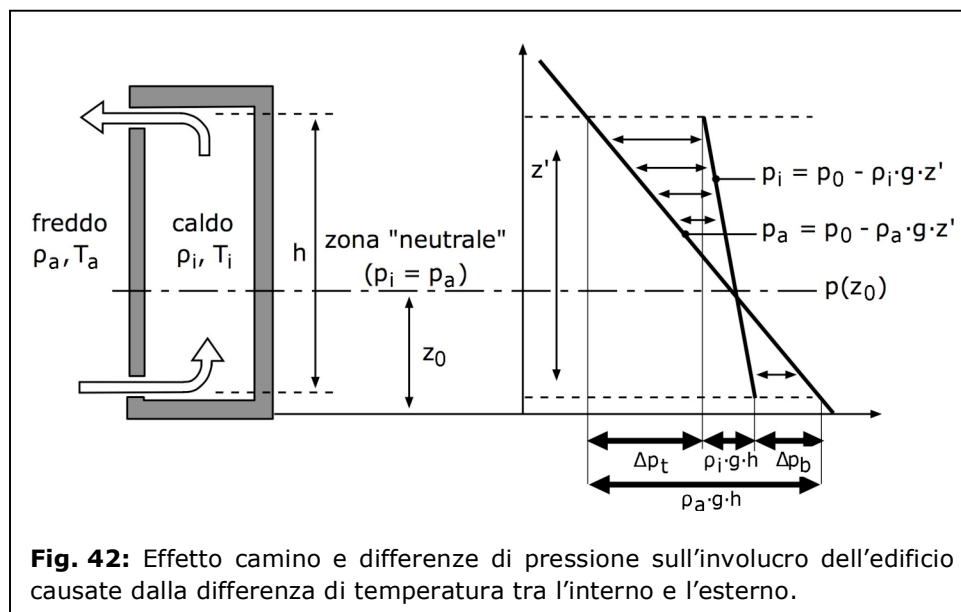
$$p = p(z_0) - \rho \cdot g \cdot z' \quad (108)$$

dove è stata utilizzata la legge di Newton per calcolare la forza peso del volumetto d'aria (g è la costante di gravità e vale 9.81 m/s^2). Dato che l'aria calda ha una densità inferiore a quella dell'aria fredda, la variazione di pressione con la quota per l'aria calda è quindi inferiore a quella che si riscontra per l'aria fredda. Nel caso di spazi riscaldati alti o ancora maggiormente nel caso di camini (temperature dei fumi molto elevate) ciò può causare grandi differenze di pressione tra l'interno e l'esterno e quindi un elevato ricambio d'aria (v. figura 42).

Ponendo l'altezza di riferimento z_0 nel punto neutro, dove la pressione interna eguaglia quella esterna, l'andamento delle pressioni interne ed esterne in funzione dell'altezza z' (misurata rispetto a z_0) può essere scritto nel seguente modo:

$$p_i(z') = p(z_0) - \rho_i \cdot g \cdot z' \quad (109a)$$

$$p_a(z') = p(z_0) - \rho_a \cdot g \cdot z' \quad (109b)$$



Considerando l'aria come un gas ideale, in analogia a quanto visto per il vapore acqueo (v. equazione (55)) si può mettere in relazione la pressione p dell'aria alla sua temperatura T in Kelvin K):

$$p \cdot V = m \cdot R_s \cdot T \quad (110)$$

dove R_s è la costante dei gas per l'aria secca

$$R_s = 287.1 \frac{J}{kg \cdot K} \quad (111)$$

Dall'equazione (110) si può dedurre una relazione tra la densità ρ dell'aria e la sua temperatura:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{p}{R_s \cdot T} \quad (112)$$

Utilizzando la pressione media del luogo – nel quale è situata la costruzione – le densità dell'aria interna ed esterna si possono esprimere nel modo seguente:

$$\rho_i = \frac{P_m}{R_s \cdot T_i} \quad (113a)$$

$$\rho_a = \frac{P_m}{R_s \cdot T_a} \quad (113b)$$

Inserendo questi valori nelle equazioni (109a) e (109b) e sottraendole si ottiene:

$$\Delta p(z') = p_i(z') - p_a(z') = \frac{P_m \cdot g \cdot z'}{R_s} \left(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_i} \right) \quad (114)$$

Da notare che nell'equazione (114) le temperature devono essere espresse in K.

Come illustrato nella figura 42, in prossimità del suolo ($z' < 0$) si ha $\Delta p < 0$ (dato che $1/T_a - 1/T_i > 0$) e quindi l'aria esterna tende a penetrare nell'edificio spingendo l'aria calda verso i piani alti ($z' > 0$), dove la pressione interna sull'involucro supera quella esterna ($\Delta p > 0$) provocando la fuoriuscita di aria calda. Per temperature interne attorno a 20°C, temperature esterne di 0°C e per condizioni di pressione media ($p_m = 98'400$ Pa, valore tipico dei mesi invernali per il Ticino [www.meteosvizzera.ch, valori medi periodo 1961-1990]), l'equazione (114) può essere semplificata come segue:

$$\Delta p(z') = 0.042 \cdot z' \cdot (T_i - T_a) \quad (115)$$

Dalla figura 42 si osserva inoltre che la differenza totale di pressione Δp_{tot} è data dalla somma della differenza di pressione presente in basso (Δp_b) e di quella in alto (Δp_t)

$$\Delta p_{tot} = \Delta p_t + \Delta p_b \quad (116)$$

Questa differenza di pressione totale è responsabile della spinta dell'aria dal basso verso l'alto ed è data da (confronta figura 42):

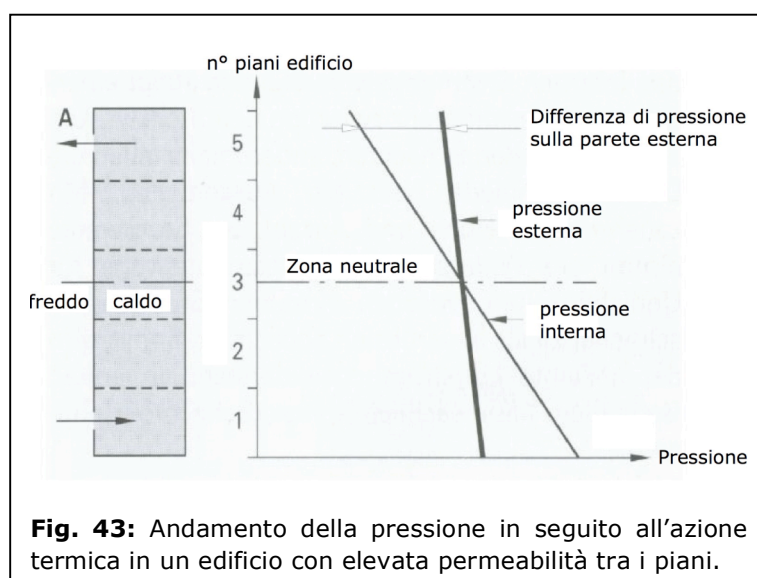
$$\Delta p_{tot} = \rho_a \cdot g \cdot h - \rho_i \cdot g \cdot h \quad (117)$$

dove h è l'altezza dell'edificio. Ossia con l'equazione dei gas ideali applicata all'aria si ottiene:

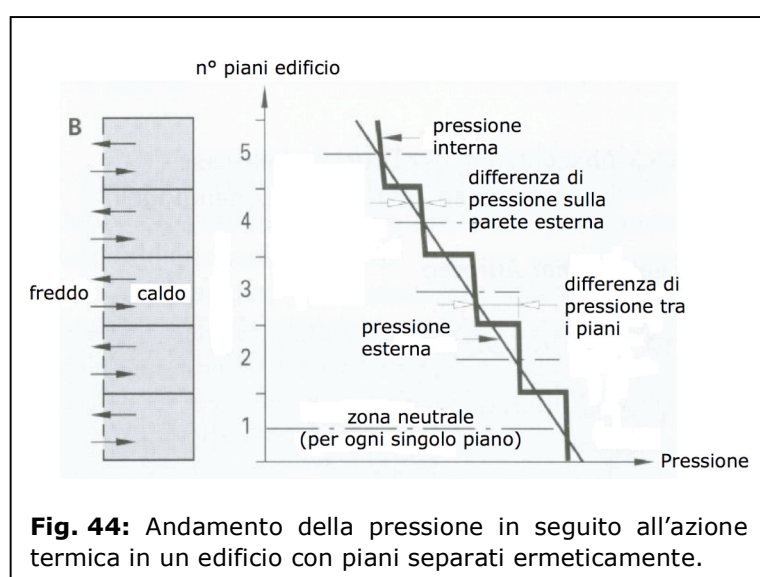
$$\Delta p_{tot} = \frac{P_m \cdot g}{R_s} \cdot h \cdot \left(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_i} \right) \quad (118)$$

dove p_m è la pressione atmosferica media del luogo. Di conseguenza si ha in Ticino, per condizioni meteorologiche invernali tipiche ($T_i = 20^\circ\text{C}$, $T_a = 3^\circ\text{C}$, $p_m = 98'400$ Pa) e per uno stabile di 5 piani ($\approx 15\text{m}$), una differenza totale di pressione $\Delta p_{tot} \approx 10$ Pa, anche in assenza di vento. Ciò significa che per una distribuzione uniforme dei punti di non-ermeticità, su una finestra del quinto

piano si possono formare delle pressioni fino a 5 Pa, il che corrisponde alla pressione esercitata da 5 kg su 1 m². La dipendenza dall'altezza di questa differenza di pressione (Δp) indotta dall'azione termica (spinta termica) è determinata dalle caratteristiche dall'involucro ed in particolare dalla distribuzione dei punti di "non-ermeticità" sulla facciata dell'edificio. Se questi punti sono distribuiti in maniera uniforme, la cosiddetta zona neutra (dove pressione interna ed esterna si eguagliano) si situa in corrispondenza della metà dell'altezza dell'edificio. Nel caso di edifici a più piani e con un'elevata permeabilità tra i piani (per es. scala interna), la differenza di pressione dovuta all'azione termica si forma sull'altezza dell'intera facciata (vedi figura 43).



Se per contro tra i singoli piani non avviene nessuno scambio di aria (modello a scatola), ogni piano può essere considerato separatamente (come un edificio a sé) e l'altezza efficace per l'azione termica diventa quella del singolo piano (vedi figura 44).



5. Scambio di aria e trasporto di sostanze dannose

In questo capitolo viene analizzato il legame tra il ricambio di aria in un locale e la concentrazione di sostanze dannose o moleste, che determinano la qualità dell'aria interna.

Per valutare la concentrazione interna di una determinata sostanza, è importante conoscere le seguenti grandezze (vedi anche figura 45, riferita al caso del vapore acqueo):

- La quantità di sostanza prodotta all'interno del locale, come ad esempio il vapore acqueo rilasciato da persone, piante o attività particolari in determinati locali (cucina, bagni e lavanderia):

$$\dot{m}_{\text{int}} = \frac{\Delta m_{\text{int}}}{\Delta t} \quad \left[\frac{\text{g}}{\text{h}} \right] \quad (119)$$

- Il rilascio e l'assorbimento della sostanza da parte dei materiali presenti nel locale:

$$\dot{m}_{\text{ass}} = \frac{\Delta m_{\text{ass}}}{\Delta t} \quad \left[\frac{\text{g}}{\text{h}} \right] \quad (120)$$

dove il termine \dot{m}_{ass} è positivo se si verifica un assorbimento della sostanza, mentre è negativo se la sostanza viene rilasciata nel locale.

- La quantità di sostanza \dot{m}_{\uparrow} importata dall'ambiente esterno:

$$\dot{m}_{\uparrow} = \frac{\Delta m_a}{\Delta t} = \rho_a \cdot n_L \cdot V_R \quad \left[\frac{\text{g}}{\text{h}} \right] \quad (121)$$

dove ρ_a è la densità della sostanza nell'aria esterna, mentre n_L e V_R indicano l'indice di ricambio di aria e rispettivamente il volume dello spazio interno (cfr. anche equazione (84)).

- La quantità di sostanza espulsa dal locale:

$$\dot{m}_{\downarrow} = \frac{\Delta m_i}{\Delta t} = \rho_i \cdot n_L \cdot V_R \quad \left[\frac{\text{g}}{\text{h}} \right] \quad (122)$$

dove ρ_i è la densità della sostanza presente nell'aria interna.

Di conseguenza la variazione nel tempo della quantità di sostanza presente all'interno di un locale è descritta dalla seguente equazione:

$$\dot{m}_i = \dot{m}_{\uparrow} + \dot{m}_{\text{int}} - \dot{m}_{\text{ass}} - \dot{m}_{\downarrow} \quad \left[\frac{\text{g}}{\text{h}} \right] \quad (123)$$

Esprimendo i termini \dot{m}_{\uparrow} e \dot{m}_{\downarrow} con le espressioni indicate nelle equazioni (121) e (122) si ottiene quanto segue:

$$\frac{\Delta(\rho_i \cdot V_R)}{\Delta t} = \rho_a \cdot n_L \cdot V_R + \dot{m}_{\text{int}} - \dot{m}_{\text{ass}} - \rho_i \cdot n_L \cdot V_R \quad \left[\frac{\text{g}}{\text{h}} \right] \quad (124)$$

Considerando che V_R (il volume interno) è costante, l'equazione può essere semplificata nel seguente modo:

$$\frac{\Delta \rho_i}{\Delta t} = (\rho_a - \rho_i) \cdot n_L + \frac{1}{V_R} \cdot (\dot{m}_{\text{int}} - \dot{m}_{\text{ass}}) \quad \left[\frac{\text{g}}{\text{m}^3 \cdot \text{h}} \right] \quad (125)$$

dove $\Delta \rho_i / \Delta t$ indica la variazione di concentrazione di una sostanza per unità di tempo.

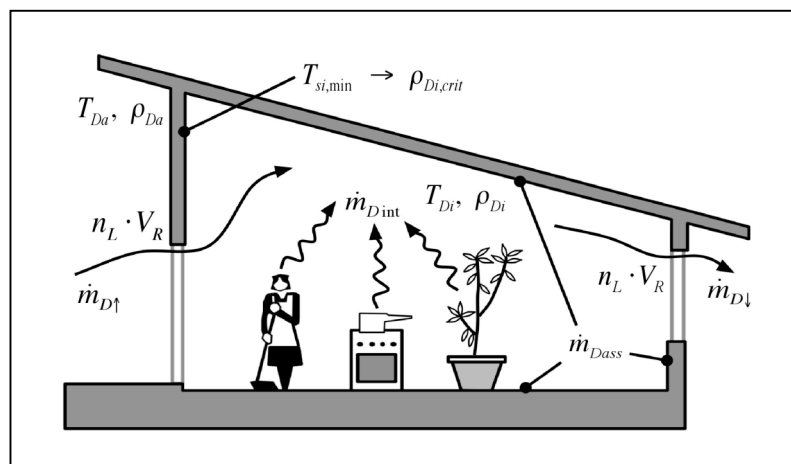
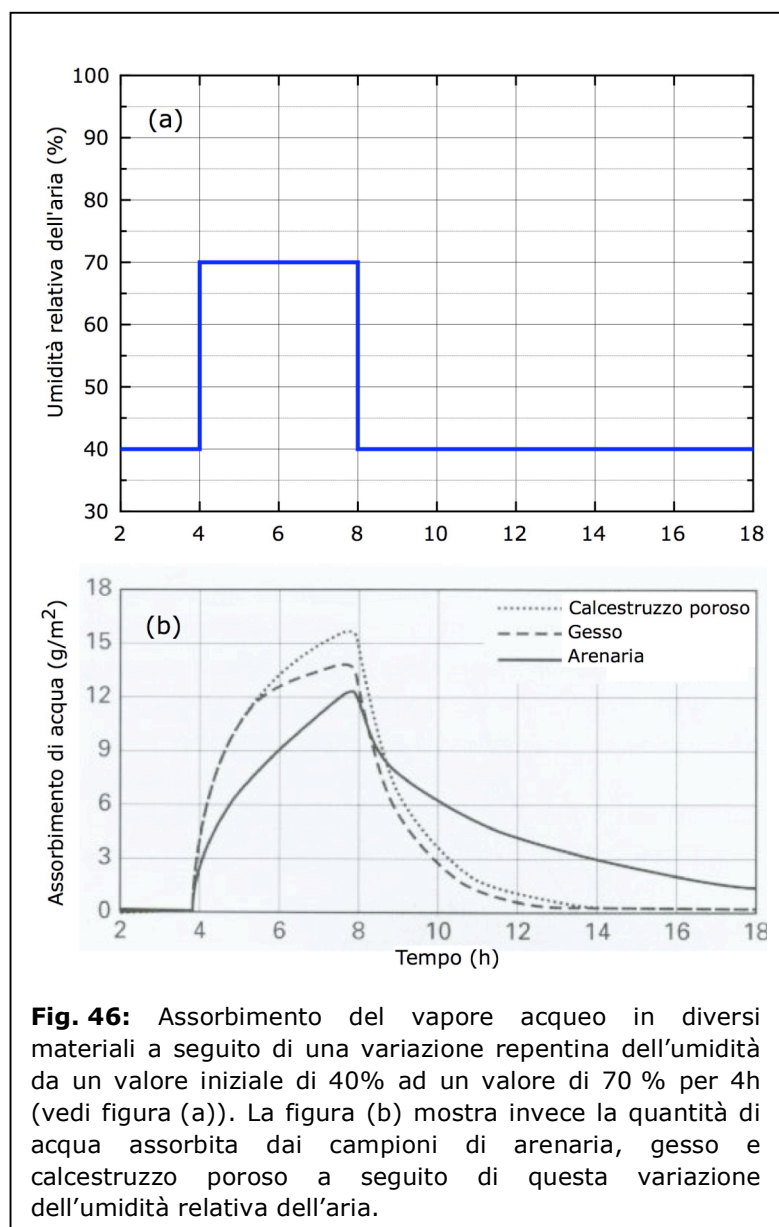


Fig. 45: Rappresentazione schematica dei processi e dei flussi che influiscono sulla concentrazione di vapore acqueo (D=Dampf) all'interno di un locale (cfr. anche eq. (123)). Il termine $T_{si,\text{min}}$ rappresenta il valore minimo della temperatura delle superfici interne, corrispondente ad una concentrazione critica di vapore $\rho_{Di,\text{crit}}$ a partire dalla quale inizia la formazione di condensa.

I processi di assorbimento e desorbimento relativi ai materiali presenti in un locale sono complessi e difficili da quantificare. In merito sono stati sviluppati dei modelli. Essi considerano l'influsso dei materiali, ad esempio, come una capacità supplementare di assorbimento dell'aria. Una descrizione esatta di questi fenomeni deve anche tener conto della diffusione delle sostanze in analisi nei diversi materiali. In generale essi si lasciano studiare sperimentalmente ad esempio nelle camere climatiche, dove i campioni di materiali vengono sottoposti a dei pulsii di umidità. In questi esperimenti si constata che sottoponendo un campione ad una variazione dell'umidità a forma di gradino (vedi figura 46(a)), il contenuto di acqua nel materiale aumenta esponenzialmente con un tempo caratteristico τ che dipende dalle proprietà del materiale. L'arenaria mostra ad esempio una maggiore inerzia a cambiamenti di umidità rispetto a calcestruzzo poroso e gesso, che già dopo 2h giungono quasi a saturazione (vedi figura 46(b)). I materiali che assorbono lentamente il vapore acqueo (come l'arenaria nella figura 46(b)), lo rilasciano anche più lentamente. Essenzialmente si può affermare che la capacità delle sostanze di assorbire le sostanze presenti nell'aria funge da elemento di ritardo (effetto capacitativo).

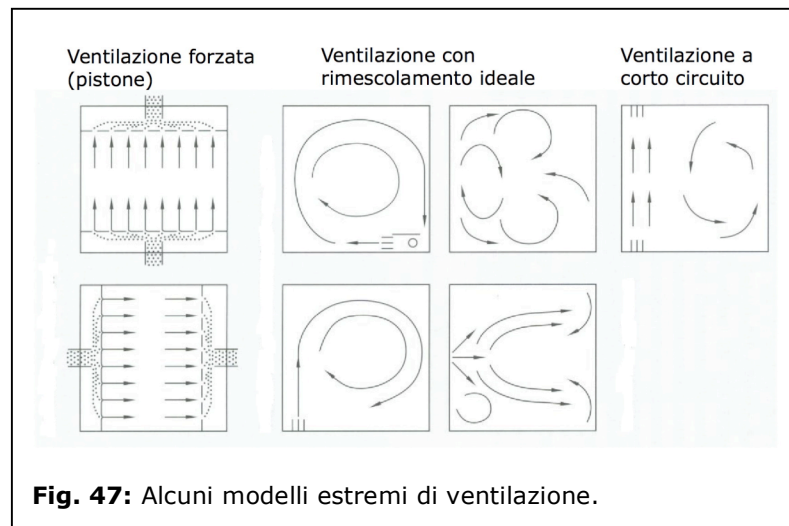


5.1 Ventilazione e qualità dell'aria interna

Per garantire la salubrità dell'aria negli ambienti interni è necessario provvedere ad un'adeguata aerazione. Uno degli obiettivi principali della ventilazione consiste nel sostituire l'aria vecchia, viziata e le sostanze dannose in essa contenute con aria fresca e pulita. Questo processo deve avvenire in maniera efficiente e con un consumo minimo di energia. Una descrizione semplice del processo di aerazione viene effettuata con il tasso di ricambio d'aria (n_L [h^{-1}]). Questa grandezza è particolarmente adatta per valutare lo scambio incontrollato (naturale) di aria che avviene attraverso i punti di non ermeticità dell'involucro dell'edificio. D'altro canto il tasso di ricambio di aria, in quanto valore medio, non è adatto alla valutazione di aspetti legati alla sicurezza e alla qualità della ventilazione in relazione al ricambio di aria e all'esposizione alle sostanze dannose.

Per rilevare l'efficienza effettiva della ventilazione sono da considerare sia il movimento di aria, sia il mescolamento dell'aria in un locale. Secondo il modello di flusso di aria si possono distinguere tre casi estremi (vedi figura 48):

- *Ventilazione forzata (pistone)*
- *Ventilazione con rimescolamento ideale*
- *Ventilazione a corto circuito*



Approfondimento: differenza tra un rimescolamento ideale (perfetto) e uno parziale

Per evidenziare l'importanza del metodo di ventilazione sulla concentrazione di sostanze moleste, si ipotizzi di avere inizialmente all'interno di un locale di volume V_R una concentrazione $\rho_i(0)$ di una determinata sostanza, che è invece assente nell'ambiente esterno ($\rho_a=0$) e per la quale non siano presenti fonti interne ($\dot{m}_{int}=0$). Trascurando l'assorbimento da parte di materiali ($\dot{m}_{ass}=0$), l'equazione (125) diventa:

$$\frac{\Delta\rho_i}{\Delta t} = -n_L \cdot \rho_i \quad (126)$$

che in forma differenziale può essere scritta:

$$\frac{d\rho_i}{dt} = -n_L \cdot \rho_i \quad (127)$$

La soluzione generale di questa equazione è una funzione esponenziale:

$$\rho_i(t) = \rho_i(0) \cdot e^{-n_L t} \quad (128)$$

Essa descrive l'evoluzione temporale della concentrazione della sostanza per una ventilazione con rimescolamento ideale (perfetto). Nella figura 47 (a) la funzione (128) è rappresentata per $n_L = 1 \text{ h}^{-1}$, che corrisponde alla situazione in cui nel corso di 1 ora l'aria del locale è stata rimescolata progressivamente con un volume d'aria pari al suo volume.

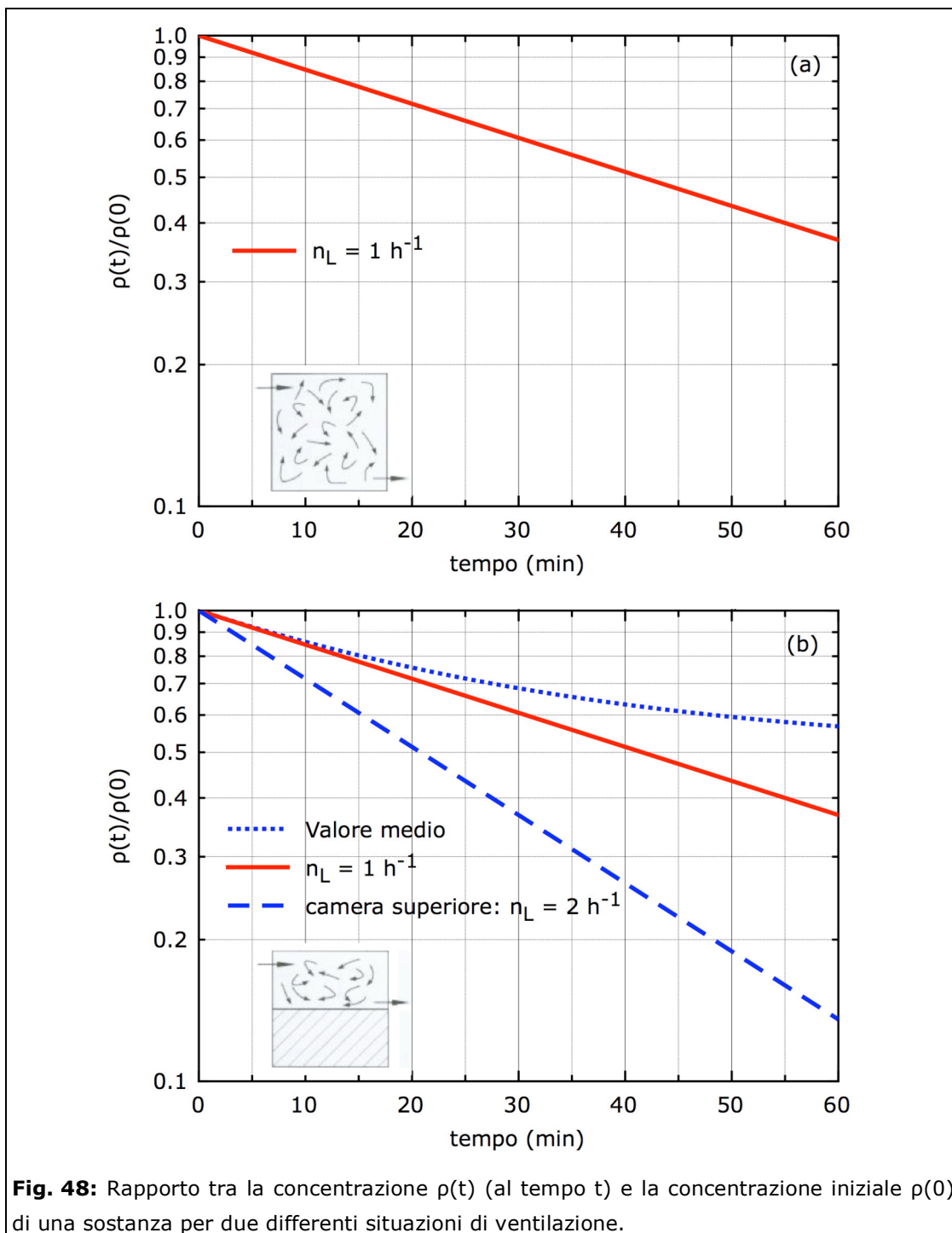
Nel caso in cui solo mezzo volume sia interessato dalla ventilazione, si immagini ad esempio una situazione dove nella parte inferiore del locale l'aria rimanga ferma, a parità di flusso l'indice di ricambio d'aria per la parte superiore sarà $n_L = 2 \text{ h}^{-1}$. Nella figura 47 (b) la curva che si ottiene per la concentrazione applicando l'equazione (128) è rappresentata dalla linea tratteggiata, che in un grafico semi-logaritmico è una retta, di pendenza doppia rispetto a quella di un rimescolamento ideale dell'intero locale con lo stesso flusso volumetrico (vedi linea continua). Per ottenere la concentrazione media dell'ipotetica sostanza (sull'intero locale), si deve fare una media delle concentrazioni presenti nella parte superiore e in quella inferiore, ossia:

$$\rho_i(t) = \frac{\rho_i(0) \cdot e^{-n_L t} + \rho_i(0)}{2}$$

Con $n_L = 2 \text{ h}^{-1}$ si ottiene:

$$\rho_i(t) = \frac{\rho_i(0)}{2} \cdot (e^{-2t} + 1) \quad (129)$$

A causa del termine costante, il grafico corrispondente (v. curva punteggiata) non è più una retta (in una rappresentazione semilogaritmica). Si osservi, come la media tra le due parti sia superiore alla concentrazione che si otterrebbe nel caso di un rimescolamento ideale dell'intero locale.



6. Consumo energetico, fabbisogno e ricambio di aria

Come conseguenza del ricambio di aria si verifica una perdita di calore, la quale può essere calcolata come differenza tra la corrente di calore che esce \dot{Q}_d e quella che entra \dot{Q}_f :

$$\dot{Q} = \dot{Q}_d - \dot{Q}_f = c \cdot \dot{m}_d \cdot T_i - c \cdot \dot{m}_f \cdot T_a \quad (130)$$

dove è stata applicata la definizione di calore specifico (vedi equazione (1)). Considerato che \dot{m}_d e \dot{m}_f dipendono esclusivamente dal ricambio di aria:

$$\dot{m}_f = \dot{m}_d = n_L \cdot V_R \cdot \rho \quad (131)$$

dove ρ è la densità dell'aria, per la corrente di calore persa per ventilazione si ottiene:

$$\dot{Q} = n_L \cdot V_R \cdot \rho \cdot c \cdot (T_i - T_a) \quad (132)$$

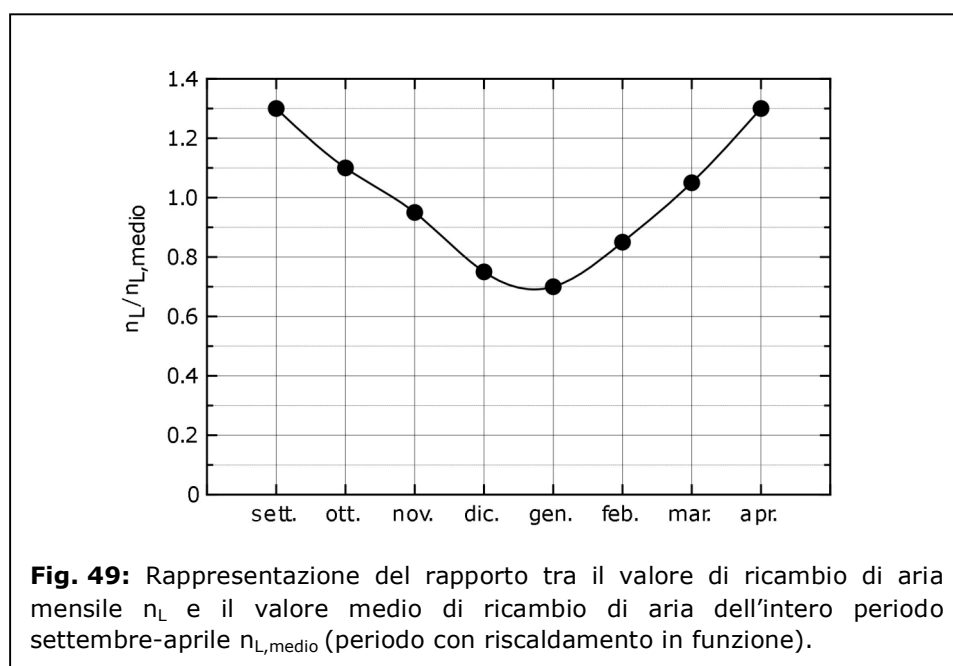
Si osservi che in questa formula il calore specifico (c) corrisponde al valore ottenuto in condizioni di pressione costante (solitamente indicato come c_p).

Edificio/locale	Vento (classe di velocità)	Esposizione	Ricambio di aria n_L (h^{-1})	
			Ermeticità dell'involucro dell'edificio	
			Più ermetico	Meno ermetico
Abitazione plurifamiliare, casa a schiera media, parte centrale	I o II	protetta	0.5	0.65
		esposta	0.65	0.8
	III o IV	protetta	0.65	0.8
		esposta	0.8	1.0
Casa singola, attico	I o II	protetta	0.6	0.8
		esposta	0.8	1
	III o IV	protetta	0.8	1
		esposta	1	1.4
Aumento del ricambio di aria n_L del locale o di parte dell'edificio in - presenza di pozzi, camini: $1.1 \dots 1.4 \cdot n_L$ (valori bassi per edifici con involucro poco ermetico, valori alti per edifici con involucro ermetico) - locali alti, aperti o gruppi di locali con soffitto poco ermetico: $\sim 1.3 \cdot n_L$				
Se nei locali interni umidi o nelle cucine sono installati impianti di ventilazione non è necessario un aumento significativo del valore medio del tasso di ricambio di aria.				
Classi di velocità del vento (misurate ad un'altezza di riferimento di 10 m)				
I vento debole (velocità attorno a 1 m/s)				
II vento medio (velocità attorno a 4 m/s)				
III vento debole (velocità attorno a 6 m/s)				
IV vento debole (velocità attorno a 8 m/s)				

Tabella 7: Ricambio di aria medio n_L durante la stagione invernale (riscaldamento in funzione) in considerazione di un comportamento medio dell'utente.

Considerato come il ricambio di aria sia influenzato da numerosi parametri (come il tipo di fessura, la permeabilità del cassonetto delle tapparelle, la non-ermeticità dell'involucro dell'edificio, il comportamento dell'utente, l'impianto di aerazione, ecc.) è utile fare riferimento a valori indicativi ottenuti da misurazioni. Nella tabella 7 si osserva l'influsso dell'ermeticità, che da sola può generare un maggior ricambio di aria di ca. il 30 %, dell'intensità dei venti e dell'esposizione agli stessi, che – a parità di ermeticità – possono portare ad un aumento del ricambio di aria del 40 %.

In genere nei periodi con temperature esterne basse viene effettuato un ricambio di aria più limitato rispetto ai mesi più caldi. Di conseguenza per bilanci energetici mensili si deve tener conto dell'andamento stagionale dell'aerazione dei locali (vedi figura 49).



La tendenza attuale di evitare le fessure e di meglio impermeabilizzare le zone più critiche ai fini dell'ermeticità, allo scopo di minimizzare le perdite di energia e migliorare l'insonorizzazione, può portare ad una scarsa qualità dell'aria interna in seguito ad un'insufficiente aerazione. In particolare si impedisce l'evacuazione di sostanze dannose o sgradevoli prodotte o introdotte all'interno del locale, come il CO_2 , il radon, cattivi odori, ecc.

Secondo parametri attuali, in locali adibiti al soggiorno prolungato di persone deve essere prevista una quantità minima di ricambio di aria pari a 12-15 $m^3/(h \cdot persona)$, ossia 12-15 m^3 di aria fresca all'ora per persona. In presenza di fumatori in questi locali i valori di ricambio di aria devono essere raddoppiati.

Per edifici abitativi, le cui caratteristiche soddisfano le prescrizioni attuali relative all'isolamento termico, un ricambio di aria completo ogni 2 ore circa appare sufficiente per garantire un'adeguata qualità dell'aria. Per evitare un'eventuale formazione di condensa nelle vicinanze delle zone che fungono da ponti termici, possono essere tuttavia necessari valori di ricambio di aria più elevati.

In relazione agli aspetti energetici è importante rilevare che attraverso una "ventilazione forzata" eseguita in un breve lasso di tempo compreso tra 3 e 5 min. circa, si ottiene un ricambio completo dell'aria di un locale con una ridotta perdita di calore. In questo modo il raffreddamento degli elementi interni che accumulano il calore è nullo o limitato (vedi capitolo "stoccaggio del calore", p. 31).