

Proposta di metodo per il calcolo delle infiltrazioni d'aria in un edificio multipiano (*)

Air infiltration calculation in a multistorey building

Michele Cali, Giovanni V. Fracastoro (**)



Riassunto - In questo lavoro si espone una metodologia, scaturita da una ricerca bibliografica, per il calcolo delle infiltrazioni d'aria in un edificio multipiano. Il metodo elaborato può essere utilizzato sia per il calcolo automatico mediante elaboratore, al fine di determinare il bilancio termico ora per ora di un edificio, sia per calcoli manuali, ad esempio in regime stazionario. Sono state esaminate relazioni analitiche e sperimentali per la determinazione della portata d'aria originata sia dall'azione del vento, sia dai moti convettivi per differenza di temperatura (effetto camino). La valutazione della portata in funzione della differenza di pressione è stata fatta tenendo conto della distribuzione dinamica della pressione intorno all'edificio e, per quanto riguarda la resistenza al passaggio dell'aria dei serramenti, della classificazione secondo la norma UNI EN42. È stato inoltre riportato un esempio completo di calcolo.

Abstract - In this paper a method is described, arisen from a bibliographical research, for air infiltration calculation in a multistorey building. The method which has been developed may be used both for computer calculations, in order to determine the building thermal balance hour by hour, and for steady-state hand calculations. Analytical and experimental relations have been examined for the determination of the air flow-rate due to the wind and to the temperature-induced convection (stack effect). The air flow-rate has been evaluated as a function of the pressure difference taking into account the dynamic pressure distribution around the building and, as for the window air tightness, the classification following the UNI EN42 normative. An example showing all calculations has also been included.

1. L'effetto del vento

1.1. Riduzione del vento meteorologico a vento locale

Per vento meteorologico si intendono i valori di direzione e velocità del vento misurati in una stazione meteorologica a un'altezza da terra z_s (in genere $z_s = 10$ m).

Per vento locale si intendono i valori di direzione e velocità del vento nel luogo in cui è posto l'edificio a un'altezza da terra z .

Nel metodo di calcolo descritto la direzione del vento non viene modificata; è vero, infatti, che essa può essere alterata dalla presenza di ostacoli naturali o artificiali (ad esempio da altri edifici in zona urbana), ma la modifica non arbitraria di tale valore richiederebbe la conoscenza dettagliata

della topografia dell'ambiente in cui l'edificio è posto, facendo così carico al metodo di calcolo di una mole eccessiva di informazioni.

La formula adottata per la riduzione della velocità del vento dalla stazione meteorologica al sito in cui l'edificio è posto (e all'altezza z da terra) è la seguente [5, 30]:

$$v_z = v_s (d_s/z_s)^{\beta_s} (z/d_e)^{\beta_e} \quad (1)$$

il pedice s si riferisce alla stazione meteo, il pedice e all'edificio.

I valori di β e di d sono riportati in tab. I, in funzione di alcune tipiche conformazioni del terreno.

1.2. Calcolo della differenza di pressione attraverso una parete comunque orientata rispetto alla direzione del vento

Quando il vento incontra un ostacolo la sua

(*) Lavoro eseguito nell'ambito del Progetto Finalizzato Energetica de CNR. Sottoprogetto RERE, Tema D, Contratto 78.01196.92.

(**) Istituto di Fisica Tecnica, Politecnico di Torino.

	d (m)	$1/\beta$
campagna	280	7
periferia o campagna movimentata	400	3,5
centro urbano	520	2,5

Tab. 1

velocità si modifica intorno ad esso. Se l'energia cinetica dell'aria si riduce si avrà un aumento dell'energia di pressione e viceversa.

Se tutta l'energia cinetica si convertisse in energia di pressione l'aumento di quest'ultima rispetto alla pressione esistente nella corrente d'aria non disturbata dall'ostacolo varrebbe [14]:

$$\Delta p_w = 1/2 \rho v_z^2 = 0,647 v_z^2 \quad (2)$$

Il valore della densità dell'aria introdotto nella (2) è quello corrispondente a 0°C. Per temperature comprese tra -10°C e +10°C il valore della densità dell'aria può essere fornito dalla seguente relazione lineare:

$$\rho = -0,00475 t_e + 1,294 \quad (3)$$

In generale, su una parete comunque orientata rispetto alla direzione del vento si avrà un aumento (o una diminuzione) della pressione statica pari a [5, 14]:

$$p_w - p = \Delta p_w = C_p \cdot 0,647 v_z^2 \quad (4)$$

Con C_p compreso tra -1,0 e +1,0.

Il coefficiente di pressione C_p assume valori positivi e prossimi all'unità in corrispondenza della parete sopra vento dell'edificio, mentre assume generalmente valori negativi sulle pareti laterali e sotto vento.

A un valore positivo di C_p corrisponde uno stato di sovrappressione della parete con conseguente immissione d'aria dall'esterno; viceversa, se C_p è negativo la parete è in depressione e il flusso dell'aria avviene dall'interno all'esterno.

La determinazione del coefficiente di pressione è uno degli argomenti più complessi e controversi. Esso dipende sia dalla direzione del vento sia dalle caratteristiche geometriche dell'edificio [17].

In tab. 2 sono riportati i valori di C_p su ogni parete in funzione dell'angolo d'incidenza α tra la parete e il vento e dei rapporti l/w e h/w tra le dimensioni dell'edificio [20].

Convenzionalmente le pareti dell'edificio vengono denominate col seguente criterio (fig. 1): A è la parete sopra vento sulla quale il vento proviene da destra, C è la parete sopra vento sulla quale il vento proviene da sinistra, B sta di fronte ad A, D sta di fronte a C.

In tal modo l'angolo α varia fra 0° e 90°.

Il valore di Δp_w ricavato dalla (4) rappresenta, come si è detto, la variazione, rispetto al flusso

$h/w < 1/2$	$1 < l/w < 3/2$	$C_p =$ A) $-1,2\alpha/90 + 0,7$ B) $-0,3\alpha/90 - 0,2$ C) $1,2\alpha/90 - 0,5$ D) $0,3\alpha/90 - 0,5$
	$3/2 < l/w < 4$	$C_p =$ A) $-1,2 \alpha/90 + 0,7$ B) $-0,25\alpha/90 - 0,25$ C) $1,3 \alpha/90 - 0,6$ D) $0,5 \alpha/90 - 0,6$
$1/2 < h/w < 3/2$	$1 < l/w < 3/2$	$C_p =$ A) $-1,3 \alpha/90 + 0,7$ B) $-0,35\alpha/90 - 0,25$ C) $1,3 \alpha/90 - 0,6$ D) $0,35\alpha/90 - 0,6$
	$3/2 < l/w < 4$	$C_p =$ A) $-1,2\alpha/90 + 0,7$ B) $-0,2\alpha/90 - 0,3$ C) $1,4\alpha/90 - 0,7$ D) $0,6\alpha/90 - 0,7$
$3/2 < h/w < 6$	$1 < l/w < 3/2$	$C_p =$ A) $-1,6 \alpha/90 + 0,8$ B) $-0,55\alpha/90 - 0,25$ C) $1,6 \alpha/90 - 0,8$ D) $0,55\alpha/90 - 0,8$
	$3/2 < l/w < 4$	$C_p =$ A) $-1,2\alpha/90 + 0,7$ B) $-0,1\alpha/90 - 0,4$ C) $1,5\alpha/90 - 0,7$ D) $0,6\alpha/90 - 0,7$

Tab. 2

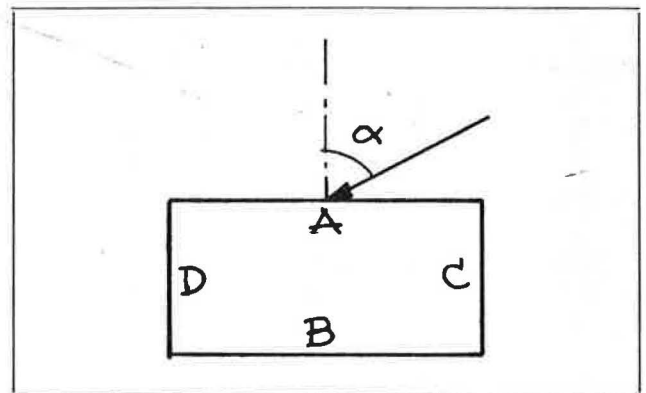


Fig. 1

non disturbato da ostacoli, della pressione sulla parete.

Viceversa, la grandezza fisica che determina il passaggio dell'aria attraverso i componenti di parete è la differenza di pressione tra interno ed esterno, funzione della pressione che si stabilisce all'interno dell'edificio p_i . Ora, poiché la pressione interna è in genere diversa da quella atmosferica bisognerebbe introdurre nella (4) un coefficiente C_p al posto di C_p tale che:

$$p_w - p_i = \Delta p'_w = C'_p \cdot 0,647 v_z^2 \quad (5)$$

Tuttavia, per conoscere C_p' si dovrebbe calcolare istante per istante la pressione interna: essa dipende dalla resistenza e dalla disposizione delle aperture e delle fessure attraverso cui avviene il passaggio dell'aria. Se esse sono distribuite uniformemente attorno alle pareti le sovra-pressioni (o depressioni) interne non superano il 20% del valore massimo fornito dalla (2). In caso contrario, con, ad esempio, la maggior parte delle aperture situate sulla parete sopra vento, si possono raggiungere delle sovra-pressioni interne quasi uguali alla sovra-pressione sulla superficie sopra vento [14].

Comunque, poiché le variazioni di pressione interna non comportano — su uno stesso piano — alcuna variazione della somma dei valori assoluti delle differenze di pressione tra interno ed esterno, si può notevolmente semplificare il problema considerando i coefficienti di pressione C_p uguali ai coefficienti di differenza di pressione C_p' . Questo equivale a considerare la pressione all'interno dell'edificio uguale a quella atmosferica.

2. L'effetto-camino

Quando la temperatura interna è maggiore di quella esterna l'effetto-camino, dovuto alla differente densità dell'aria, produce una depressione interna nei piani bassi e una sovra-pressione interna in quelli più alti.

Esiste dunque un piano orizzontale, detto piano neutro, sul quale, in assenza di altri fenomeni, pressione interna ed esterna si equivalgono.

In generale la differenza di pressione tra interno ed esterno per effetto-camino è data da [14, 5]:

$$\Delta p_c = 0,0342 p y (1/(273+t_e) - 1/(273+t_i)) \quad (6)$$

Per congruenza con la scelta dei segni effettuata nella (4) la distanza dal piano neutro deve essere misurata positivamente verso il basso e negativamente verso l'alto.

La determinazione di y richiede la conoscenza dell'altezza da terra del piano neutro (z_{pn}), che a sua volta, dipende dalla distribuzione dei passaggi verticali e delle partizioni interne.

In generale l'effetto-camino viene accentuato dalla presenza di intercapedini verticali interne, e se queste sono uniformemente distribuite in verticale il piano neutro si trova a circa metà dell'altezza dell'edificio.

Nel caso opposto in cui la separazione tra un piano e l'altro fosse del tutto stagna si avrebbero tanti piani neutri quanti sono i piani dell'edificio, situati a metà tra pavimento e soffitto.

Negli edifici a 1-2 piani (villette residenziali, ecc.) il piano neutro è in genere più alto della mezzera, essendo situato a metà dell'altezza del ca-

mino, qualora esso sia presente:

$$z_{pn} = 0,6 h \div 0,7 h$$

Per gli edifici più alti si è riscontrato [27, 28] che z_{pn} varia tra 0,3 h e 0,7 h . Tali valori sono stati ricavati sperimentalmente e per pochi casi, e poiché tali risultati non hanno finora consentito di ottenere relazioni semplici e generali tra le caratteristiche morfologiche dell'edificio e la posizione del piano neutro, si suggerisce di assumere:

$$z_{pn} = 0,5 h \quad (7)$$

3. Calcolo della portata di infiltrazioni per l'azione combinata del vento e dell'effetto-camino

L'equazione generale che definisce la portata di infiltrazioni attraverso un componente di parete è la seguente [13, 14]:

$$Q' = C (\Delta p)^n \quad (8)$$

Il coefficiente di flusso C è definito come la portata volumica per unità di lunghezza della fessura o per unità di superficie del componente in corrispondenza di una differenza di pressione di 1 Pa.

Q' rappresenta la portata volumica per unità di lunghezza della fessura o per unità di superficie del componente di parete e viene misurata rispettivamente in ($m^3/h \cdot m$) e ($m^3/h \cdot m^2$).

Nella (8) Δp è la somma algebrica delle differenze di pressione dovute all'effetto del vento e all'effetto-camino:

$$\Delta p = \Delta p_w + \Delta p_c \quad (9)$$

Si noti che la portata di infiltrazioni dovuta all'azione combinata del vento e dell'effetto-camino non è la somma delle portate dovute ai singoli effetti, poiché la relazione tra Q' e Δp non è di tipo lineare.

Il valore dell'esponente del flusso n comunemente adottato sia per fessure e aperture sottili, sia per pareti, è 0,65 [13, 14, 26, 28].

Il valore di C è strettamente legato alla qualità della parete o del serramento adottato, e in particolare alle sue prestazioni in fatto di permeabilità all'aria [29].

In base a tali prestazioni i serramenti vengono classificati in 3 classi UNI denominate A1, A2, A3 alle quali corrispondono i valori massimi di C elencati in tab. 3 [18, 19]:

Tab. 3

	A1	A2	A3
$C [m^3/hPa^n \cdot m]$	0,60	0,30	0 10

Per ottenere la portata di infiltrazioni attraverso l'intero serramento bisognerà poi moltiplicare il risultato della (8) per la lunghezza del giunto apribile:

$$Q = Q' \cdot L \quad (10)$$

In modo analogo si possono calcolare le perdite attraverso un componente di parete permeabile all'aria (ad esempio un muro) introducendo i coefficienti di flusso e l'area del componente di parete nella relazione (8) e nella seguente:

$$Q = Q' \cdot A \quad (11)$$

Riportiamo qui di seguito in tab. 4 i valori dei coefficienti di flusso C desunti dalla letteratura (disponibile) per alcune pareti:

Tipo della parete o de l'elemento costruttivo	Spessore [m]	C [m ³ /h·Pa·m ²]
muro in mattoni intonacati [31]	0,40	0,063
laterizio comune [31]	0,065	0 001
parete doppia in legno [31] rivestita in cartone catramato e legno	0,124	0,077
par. in mattoni e intonaco [16]		0,22

Tab. 4

Esempio completo di calcolo

Si abbia un edificio di 4 piani a pianta rettangolare ($h = 14$ m, $l = 20$ m, $w = 10$ m) sito, ad esempio, a Torino, in zona periferica ($d = 400$ m, $\beta = 1/3,5$) con la parete lunga in direzione SW-NE (ruotata quindi di 315° rispetto al Nord). La temperatura interna è mantenuta a 20°C.

Siano inoltre noti, tra gli altri, i valori orari di temperatura, direzione e velocità del vento ed eventualmente pressione (si ponga altrimenti $p = 10^5$ pa) rilevati presso la Stazione Meteorologica della Aeronautica di Caselle (campagna: $d_s = 280$ m, $\beta_s = 1/7$).

Si trascurino gli effetti della permeabilità all'aria delle pareti esterne. Ad un'ora generica si ha:

ora	t_e	d	v_s	p
τ	0°C	30°	3,5 m/s	10 ⁵ pa
.
.

Si voglia calcolare la portata di infiltrazioni per azione combinata del vento e dell'effetto-camino attraverso un serramento tipo UNI A1 a 2 ante (1,20 × 2,00 m) posto in un locale (4 × 4 × 3 m)

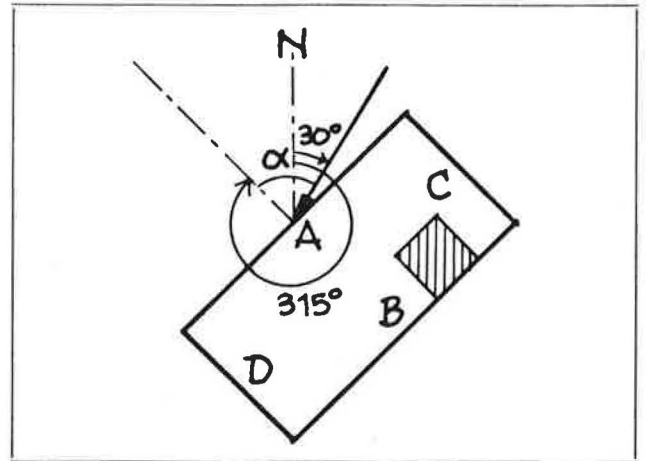


Fig. 2

al quarto piano e affacciato sulla parete lunga rivolta a SE (ruotata quindi di 135° rispetto al Nord, sempre in senso orario).

L'altezza media del piano è dunque $z = 14/4 \times 3 + 1,5 = 12$ m.

1) Calcolo di v_z :

$$\text{Dalla (1): } v_z = 3,5 (280/10)^{1/7} (12/400)^{1/3,5} = 0,591 \times 3,5 = 2,1 \text{ m/s.}$$

2) Calcolo di Δp_w :

$$\text{Dalla (4): } \Delta p_w = C_p \cdot 0,647 v_z^2.$$

Dalla tab. 2, essendo $1/2 < h/w < 3/2$, $3/2 < l/w < 4$ e α (ved. fig. 2) pari a 75°, si ottiene il valore di C_p attraverso la parete B:

$$C_p = -0,2\alpha/90 - 0,3 = -0,2 \cdot 75/90 - 0,3 = -0,47$$

Introducendo tale valore nella (4) si ottiene:

$$\Delta p_w = -0,47 \cdot 0,647 \cdot 2,1^2 = -1,3 \text{ pa}$$

3) Calcolo di Δp_c :

Dalla (6):

$$\Delta p_c = 0,0342 py (1/(273+t_e) - 1/(273+t_i)) = -4,3 \text{ pa}$$

essendo:

$$p = 10^5 \text{ pa} \quad y = 7 - 12 = -5 \text{ m}$$

$$t_e = 0^\circ\text{C} \quad t_i = 20^\circ\text{C}$$

4) Calcolo della portata di infiltrazioni:

$$\Delta p = \Delta p_w + \Delta p_c = -5,6 \text{ pa} \quad \text{dalla (9)}$$

$$Q' = C |\Delta p|^n$$

essendo C , per finestre UNI-A1, uguale a 0,6 ed $n = 0,65$ si trova:

$$Q' = 0,6 (5,6)^{0,65} = 1,84 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{m}$$

Per la finestra esaminata:

$$L = 2,00 \times 2 + 1,20 \times 2 + 2,00 = 8,40 \text{ m}$$

E infine, per la (10):

$$Q = Q' \cdot L = 1,84 \cdot 8,4 = 15,44 \text{ m}^3/\text{h}$$

Volendo valutare le perdite per infiltrazioni in (volumi ambiente)/ora si ha:

$$V = 4 \times 4 \times 3 \times 48 \text{ m}^3$$

$$Q = 15,44/48 = 0,32 \text{ V/h.}$$

Simbologia

d	spessore dello strato limite, (m);
z	altezza da terra dell'ambiente considerato (m);
z_s	altezza da terra dell'anemometro, (m);
β	esponente caratteristico dello strato limite;
v_z	velocità locale del vento alla quota z , (m/s);
v_s	velocità meteorologica del vento, (m/s);
h	altezza dell'edificio, (m);
w	larghezza dell'edificio, (m);
l	lunghezza dell'edificio, (m);
y	distanza dal piano considerato al piano neutro, (m);
z_{pn}	altezza da terra del piano neutro, (m);
ρ	massa volumica, (kg/m ³);
C_p	coefficiente di pressione;
C'_p	coefficiente di differenza di pressione;
p	pressione atmosferica, (pa);
p_i	pressione interna, (pa);
p_w	pressione del vento sulla parete, (pa);
Δp_c	differenza di pressione tra interno ed esterno dovuta all'effetto-camino, (pa);
Δp	differenza di pressione tra interno ed esterno dovuta all'effetto del vento e all'effetto-camino, (pa);
t_e	temperatura esterna, (°C);
t_i	temperatura interna, (°C);
n	esponente di flusso;
C	coefficiente di flusso (definito nel testo), (m ³ /h · pa ⁿ m) o (m ³ /h · pa ⁿ m ²);
Q'	portata d'aria unitaria, (m ³ /h · m) o (m ³ /h · m ²);
Q	portata d'aria, (m ³ /h);
L	lunghezza della fessura equivalente, (m);
A	area del componente di parete, (m ²);
α	angolo di incidenza del vento sulla parete, (gradi);
ϕ	angolo di provenienza del vento (in senso orario a partire dal Nord), (gradi);

Bibliografia

[1] Wilson A.G., Sasaki J.R. - *Evaluation of window performance* - DBR Technical Paper, n. 414.

- [2] Tamura G.T. - *Predicting air leakage for building design* - DBR Technical Paper, n. 437.
- [3] Sasaki J.R. - *Air leakage testing* - DBR Technical Paper n. 407.
- [4] Sander D.M., Tamura G.T. - *A FORTRAN IV Program to simulate air movement in multi-storey buildings* - DBR C.P. n. 35.
- [5] Shaw C.Y., Tamura G.T. - *The calculation of air infiltration rates by wind and stack action for tall buildings* - ASHRAE Transactions 1977, Part 2.
- [6] Duchene P., Marullaz - *Echelle de turbo'ence et spectre de la vitesse du vent en zone urbaine* - Cahiers du CSTB, n. 1496, avril 1978
- [7] AA.VV. - *Aerodynamique des structures, Climatologie, Ven'. mec.* - Cahiers du CSTB, n. 1496, avril 1978.
- [8] Givoni B. - *Man, climate and architecture* - Applied Science Publishers, Londra, 1976
- [9] Arens E.A., Williams P.B. - *The effect of wind on energy consumption in buildings* - Energy and Buildings, vol. I, n. 1.
- [10] Hutchinson F.W. - *Energy saving due to change in design of ventilation and air flow systems* - Ibidem.
- [11] Milbank N.O. - *Energy savings and peak power reduction through the utilisation of natural ventilation* - Ibidem.
- [12] Latta J.K. - *Walls, windows and roofs for the Canadian climate* - Pag. 37-43, NRCC - 13487.
- [13] IHVE Guide 1970 - Section A4: *Air infiltration*.
- [14] ASHRAE Handbook of Fundamentals 1977 - Cap. 21: *Infiltration and natural ventilation*.
- [15] West D.L. - *Contaminant dispersion and dilution in a ventilated space* - ASHRAE Transactions 1977, part I.
- [16] Tamura G.T. - *Measurement of air leakage characteristics of house enclosures* - DBR R.P. 653.
- [17] Gandemer J. - *Champ de pression moyenne sur les constructions usuelles* - Cahiers du CSTB, n. 1492.
- [18] Matteoli L., Peretti G. - *Valutazione delle implicazioni energetiche delle infiltrazioni d'aria nei serramenti esterni* - Comunicazione privata in corso di stampa.
- [19] *Metodi di prova delle finestre. Prova di permeabilità all'aria* - Norma UNI EN42.
- [20] Wise A.F.E. - *Ventilation of buildings* - Atti del Convegno « Heat Transfer in Buildings », Dubrovnik 1977.
- [21] Nevrala D.J., Etheridge D.W. - *Natural ventilation in well insulated houses* - Ibidem.
- [22] Warren P.R. - *Ventilation through openings on one-wall only* - Ibidem.
- [23] Tamura G.T., Shaw C.Y. - *Studies on exterior air tightness and air infiltration in tall buildings* - ASHRAE Paper n. 2388.
- [24] Ross H.D., Grimsrud D.T. - *Air infiltration in buildings: literature survey and proposed agenda* - LBL - 7822 Lawrence Berkeley Laboratory.
- [25] ASHRAE Standard 62 - 73 ANSI B 194.1: 1977 - *Standards for natural and mechanical ventilation*.
- [26] Gruppo Energia So'are dell'Università di Napoli - *Il clima come elemento di progetto nell'edilizia*.
- [27] Emswiler - *Neutral zone in ventilation* - ASHRAE Transactions 1926.
- [28] Tamura G.T., Wilson A.G. - *Pressure difference caused by chimney effect in three high buildings* - ASHRAE Transactions, 1967.
- [29] Matteoli L., Peretti G., Picco M. - *Ottimizzazione energetica dei serramenti esterni* - Documentazione Tecnica 9 UNCSAAL.
- [30] Larsen B.T. - *Energy consumption of residential buildings* - Norwegian Building Research Institute, 1977.
- [31] Brunelli P., Codegone C. - *Fisica Tecnica* - vol. II, parte 2, Edizioni Giorgio, Torino 1969.