



## RENOVACION DE AIRE



Por Alberto Castellvi

### 1) VENTILACION NATURAL

La renovación natural del aire se debe al viento y a la diferencia de las densidades del aire interior y exterior, cuando las entradas y salidas se proyectan de forma que se pueda mantener el aire interior en condiciones específicas, entonces se dice con propiedad y vigor que hay ventilación.

Las diferencias de temperatura y la velocidad del viento pueden transportar grandes masas de aire, cantidades tales que en muchas ocasiones de moverlas mecánicamente significarían un enorme consumo de energía. Ya es vieja la comparación entre las ventilaciones natural y mecánica, con la manifiesta ventaja de la natural pero la tecnología soviética confirma la efectividad de una ventilación mecánica que abre a modo de activación a la ventilación natural, mediante el empleo de cortinas de aire, inyectores o extractores.

En verano se puede generalizar la ventilación natural, excepto en locales donde la actividad requiera de un aire previamente tratado. En locales de una sola nave el aire exterior entra por unas bocas al efecto, situadas en la parte inferior de las paredes (en fachadas donde no se prevean depresiones) y el aire interior cargado de impurezas sale al exterior por bocas de salida situadas en el techo. Ahora bien si el local comprende varias naves, entonces el principio anterior no es suficiente pues hay que ventilar las zonas alejadas de las bocas de entrada, situadas en los bajos de paredes y ello se logra con tomas de aire cenitales a través de lucernarios, en cuyo caso es preciso alternar en cubierta las tomas y las salidas, lo que creará en la planta las respectivas zonas "FRIAS" y "CALIENTES", respectivamente.

En invierno la ventilación natural, supone que el exceso de calor generado en el interior del edificio, es bastante para elevar la temperatura del aire entrante que al perder densidad se eleva hacia las bocas de salida, en tanto por otras

bocas también cenitales a altura  $h \geq 6$  m para que el aire entrante pueda calentarse al descender, penetra aire fresco que permite cerrar ocasionalmente las tomas en bajo de fachadas, evitando esas zonas molestas y tan frías que son inaceptables para situar en ellas puestos de trabajo.

La eficacia de la ventilación natural depende de muchos factores, entre los que destacan: Situación de las fuentes de calor, el diseño del edificio y situación de aberturas de ventilación en paredes y techo.

Dada la gran complejidad del análisis teórico de los fenómenos, las investigaciones se llevan a efecto, a través de ensayos sobre "modelos" empleando aire o agua como flujo circulante.

### 2) CONFIGURACION DEL FLUJO DENTRO DEL EDIFICIO QUE CONTIENE FUENTES CALORIFICAS

Si la temperatura en el interior supera a la del medio ambiente exterior, se producen por las aberturas de modo espontáneo la ventilación, entrando por las bajas y saliendo por las situadas en lo alto.

La fuerza motriz por diferencia de peso entre las columnas de aire externo e interno vale:

$$\Delta P = M (\delta_e - \delta_i) \text{ Kg/m}^2$$

y supone la resistencia que debe vencer el aire, desde la boca de entrada a la de salida.

Las partículas de aire calentadas en las fuentes de calor, se elevan y son sustituidas por nuevas partículas. Por lo que en un recinto confinado se establece un circuito cerrado en tanto que en el recinto no confinado se crea un flujo continuo de partículas nuevas hacia la fuente calórica. El aire caliente al llegar al techo y no escapar al exterior se expande y enfría, tras lo cual desciende para volver al foco caliente e iniciar un nuevo ciclo.

El profesor Kudryavtsev, descubrió que si se

## Ventilación

coloca una fuente de calor por encima del nivel del suelo, la circulación se produce solamente en el espacio situado más arriba que el foco caliente y que por debajo el aire permanece quieto.

Con ventanas abiertas u otras aberturas se escapa parte del aire al exterior y el resto regresa al foco caliente, donde se mezcla con el aire entrante del exterior y con la corriente convectiva ascendente.

Todo foco de calor constituye un poderoso motor que hace mover el aire aspirándolo hacia sí para después repelerlo en un flujo ascendente.

En un modelo a escala 1:10 construido en madera contrachapada y vidrio, con empleo de fuentes calóricas a base de estufas eléctricas, se consiguieron obtener las temperaturas, velocidad y caudales. El modelo con planta de 0,70 : 1,00 m y altura variable por módulos (piezas adicionales) que la hacen tome los valores 0,60 ÷ 1,86 m. Las velocidades se miden en m/s, el caudal en Kg/h y el incremento de calor en Kcal/h, así como las temperaturas en °C.

La *figura 1*, muestra los flujos de aire originados en el edificio de una sola nave, con un solo foco calórico situado en el centro de la planta del edificio. Parte del chorro de aire sale al exterior por las aberturas de cubierta y el restante desciende al fondo, donde se mezcla con el que penetra por las bocas de toma, en los bajos de fachada y nuevamente se inicia otro ciclo. Las cifras de la figura corresponden al modelo y no a la realidad del edificio, para las que hay que aplicar los oportunos factores de conversión siguientes, obtenidos de la "teoría de Modelos" de los profesores Tateravnikov, Sannikov, Fialkovskii y otros técnicos de los Institutos para la Protección del Trabajo de Moscú, Kazan, Leningrado, etc...

para las velocidades del aire tanto de entrada como de salida:

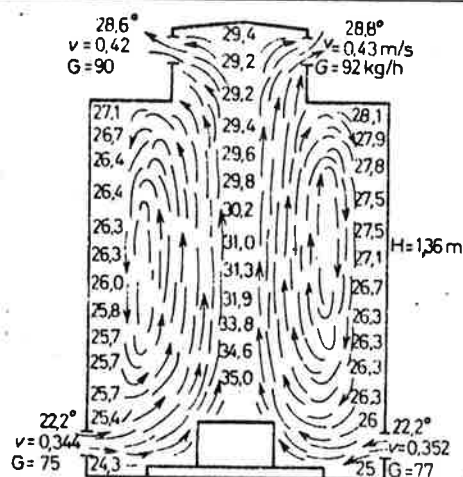
$$v_f = v_m m^{1/2} \left( \frac{\Delta T_f}{\Delta T_m} \right)^{1/2} = \sqrt{20} \times \sqrt{\frac{11,2}{11,3}} \times v_m = 4,45 v_m,$$

para el caudal de aire:

$$\dot{V}_f = \dot{V}_m m^{5/2} \left( \frac{\Delta T_f}{\Delta T_m} \right)^{1/2} = (20)^{5/2} \sqrt{\frac{11.2}{11.3}} \dot{V}_m = 1782 \dot{V}_m,$$

para el calor producido:

$$Q_f = \dot{Q}_m n^{1/2} \left( \frac{\Delta T_f}{\Delta T_m} \right)^{3/2} = (20)^{5/2} \left( \frac{11.2}{11.3} \right)^{3/2} \dot{Q}_m = 1767 \dot{Q}_m.$$



**Figura 1.**—  
Circulación  
de aire  
en el modelo  
de una nave  
industrial con  
fuente de calor.

Las normas de la URSS para ventilación natural de "talleres calientes" (con fuentes calóricas) establecen que en la época estival, la temperatura del aire en las zonas de trabajo, no supere en unos 5 °C la del medio ambiente exterior, por lo que debe considerarse como resultado más importante de los ensayos, a la relación entre la diferencia de temperaturas en la zona de trabajo  $\Delta t_{wa} = t_{wa} - t_a$  y la diferencia total de temperaturas  $\Delta t_{sal}$  entre el aire saliente  $t_{sal}$  y el aire externo  $t_a$

$$\Delta t_{sal} = t_{sal} - t_a$$

Los ensayos demuestran que en ventilación natural  $\Delta t_{wa}$  y  $\Delta t_{sal}$  son interdependientes y consecuentemente sufren cambios similares (figura 2). Los datos de la figura para la confección de sus diagramas se lograron en un modelo de altura 1,26 m en el que se varió el área de los orificios de ventilación desde 0,04 m<sup>2</sup> hasta 0,16 m<sup>2</sup> usando dos cargas térmicas q y 2q.

Los ensayos demuestran que la carga térmica específica  $q$  ó sea la cantidad de calor producida  $Q_{xs}$  Kcal/h dividida por el volumen interno del local  $V$  m<sup>3</sup>

$$q = \frac{Q \times s}{V} \quad \text{Kcal/h m}^3$$

es una cifra vital, pues las diferencias  $\Delta t_{wa}$  y  $\Delta t_{sal}$  son idénticas para edificios con iguales cargas térmicas específicas. Ello lo confirma la *tabla n.º 1* cuyos datos se lograron con una carga térmica específica

$$q = 55 \frac{\text{Kcal}}{\text{h m}^3}$$

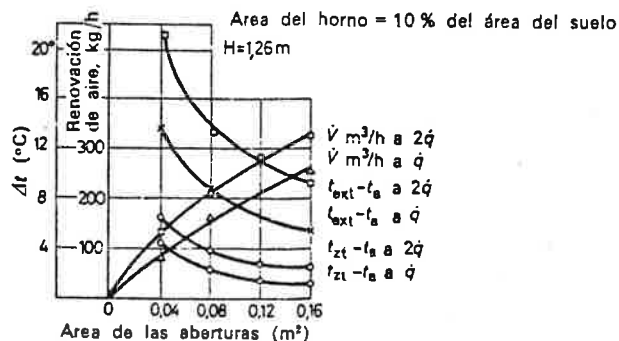


Figura 2.—Diferencia de temperatura y renovación de aire (ensayos sobre modelo).

$H, \text{ m}$	$\dot{q}, \text{ kcal/m}^2 \text{ h}$	$t_{\text{sal}} - t_a$	$\dot{q}/\dot{q}_0$	$(\dot{q}/\dot{q}_0)^{1/3}$	$(t_{\text{sal}} - t_a)$ convertido, $^{\circ}\text{C}$	$\dot{q}_0,$ $\text{kcal/m}^2 \text{ h}$
0,6	192	10,6	3,5	2,31	4,65	55
0,86	256	14,0	4,65	2,8	5,00	55
1,11	203	12,4	3,70	2,4	5,05	55
1,36	177	10,2	3,23	2,2	4,65	55
1,86	55	5,5	1	1	5,50	55

Tabla 1.—Resultados de los ensayos sobre modelos y su conversión a cargas térmicas equivalentes.

En la *figura 3* se muestra la corriente de aire en un modelo provisto de dos calentadores, vistos en planta y en sección. El intercambio de aire

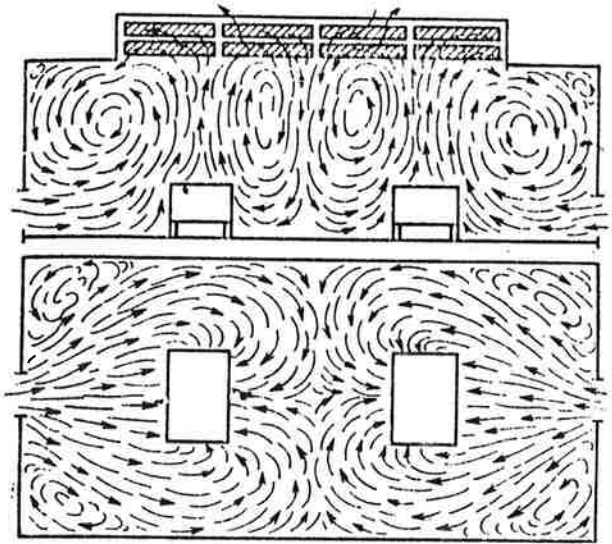


Figura 3.—Circulación en un modelo con dos fuentes de calor.

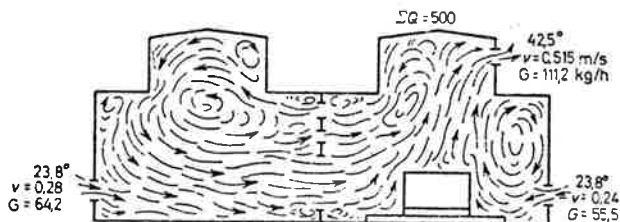


Figura 4.—Circulación en un modelo de una fábrica de dos naves (entrada por la parte inferior de las paredes laterales).

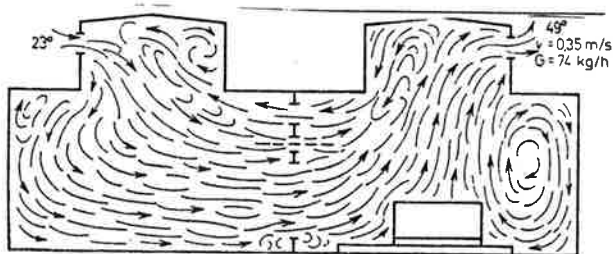


Figura 5.—Circulación en una fábrica de dos naves (entrada por arriba).

entre las zonas superior e inferior está intensificado por la presencia de corrientes circulatorias adicionales, entre los calentadores.

La figura 4 presenta la corriente de aire en un edificio de dos naves, observándose una parte del chorro térmico por encima del calentador induce un aumento de la corriente de aire que viene de la zona fría situada a la izquierda del dibujo y en segundo lugar que entra más aire por el orificio lejano de la izquierda que por el orificio más cercano del lado derecho y ello probablemente a que queda obstruido por las corrientes de aire descendentes (los orificios de entrada tienen en el ensayo doble superficie que los de salida).

Si en las paredes hubiera orificios de entrada con la misma área que los orificios del techo, situados en ambas naves, por los respiraderos de la nave izquierda no entraría aire sino que saldría.

Si solo hay aberturas en el techo y situadas a la misma altura en ambas naves, se efectúa la

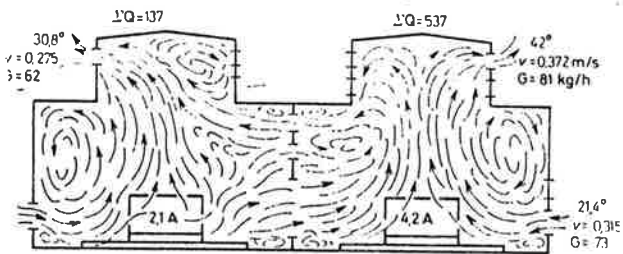


Figura 6.—Modelo con fuentes de calor de potencia distinta.

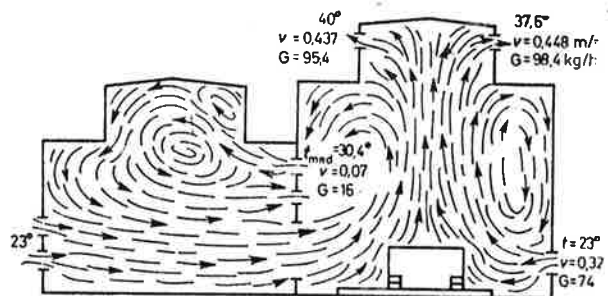


Figura 7.—Dos naves de altura y temperatura distintas.

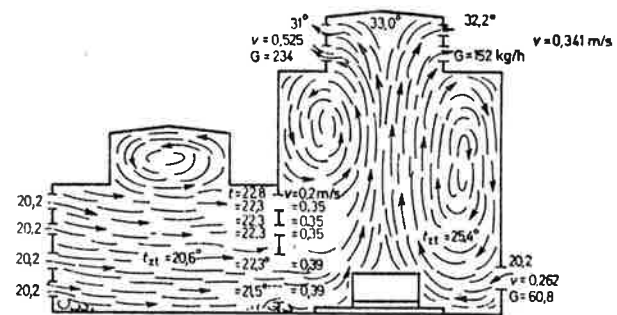


Figura 8.—Efecto de la situación de las entradas de aire en la circulación.

renovación del aire pero su caudal es un tercio del ocasionado por las mismas fuentes de calor cuando las aberturas de entrada de igual área están en la parte inferior de las paredes. Si solamente hay aberturas en el techo, sigue habiendo ventilación debido a que el aire de la nave izquierda está más frío que el de la derecha (figura 5).

En el caso de que en ambas naves haya fuentes de calor y éstas sean de igual potencia y con respiraderos igualmente abiertos, las configuraciones de las corrientes de ambas naves son iguales y simétricas, no habiendo corrientes de aire que pasen de una a otra nave.

Si las fuentes calóricas fueran diferentes, la más potente atraerá aire y calor de la nave con fuente calórica inferior (figura 6).

Por la figura 7 se observa la configuración de la corriente para un edificio de dos naves siendo una más alta que dispone de mayor fuente calórica que la otra, en cuyo caso puede ser preferible el paso a la corriente que se dirige a la nave fría y especialmente en verano. En la figura la nave izquierda (modelo) tiene una altura de 0,8 m y la otra de 1,08 m (hasta la linterna de cubierta). A pesar de la diferencia de alturas se observa una corriente de aire caliente que va de derecha a izquierda.

# Ventilación

En la figura 8 la altura de la nave caliente se ha aumentado hasta 1,36 m (en modelo) y se ha provisto a la pared de la nave fría de dos nuevos respiraderos y de otra abertura en el techo, observándose en este caso que no hay paso de aire caliente hacia la nave fría o de la izquierda.

La configuración de la corriente en un edificio de tres naves, según indica la figura 9 con corrientes penetrando por la abertura más lejana y la más cercana a la fuente de calor, tienen igual caudal y los chorros térmicos se mezclan con el aire entrante al que transmiten calor e impurezas.

En la figura 10 las fuentes de calor están situadas en las naves externas, penetrando el aire por los respiraderos del techo de la nave central así como a través de las aberturas de las naves laterales. Aunque el calor desprendido en la nave derecha es ligeramente superior al generado en la nave izquierda, esta diferencia no es suficiente para trastornar la simetría de la configuración de la corriente.

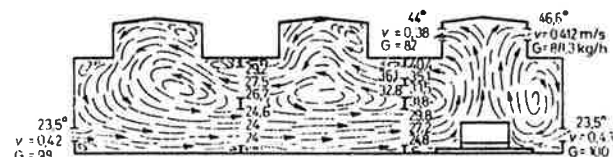


Figura 9. —Circulación en un modelo de tres naves con una fuente de calor.

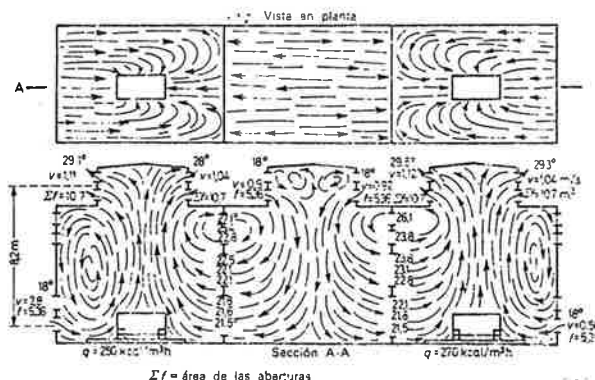


Figura 10. —Configuración del flujo en un taller de tres naves sin particiones entre naves.

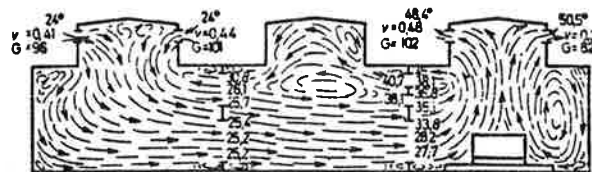


Figura 11. —Circulación en modelos sin particiones: ventilación por los lucernarios exclusivamente.

En la figura 11 el calor generado es ligeramente inferior que el de la figura 9, indica la circulación de aire y los incrementos de temperatura, cuando las paredes laterales carecen de respiraderos en la admisión de aire, en cuyo caso las temperaturas más altas se observan en las proximidades de tales paredes.

En la figura 12 se ve la configuración de la corriente de aire cuando hay fuentes de calor en las tres naves, pero el calor generado por la

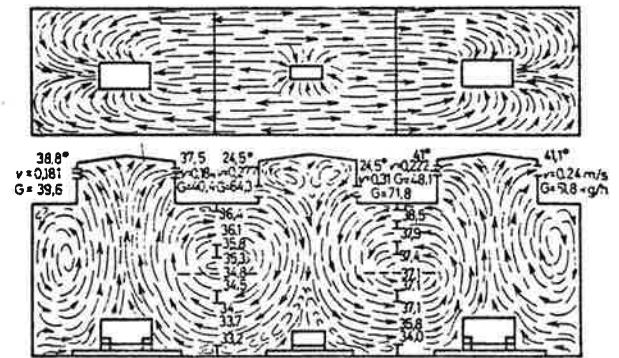


Figura 12. —Configuración del flujo en un taller de tres naves: toda la ventilación por los lucernarios; varias fuentes de calor.

fuentes de la nave central es muy inferior al de las naves extremas. Los chorros convectivos que ascienden del calentador central son desviados hacia las naves laterales por el frío que entra por las aberturas del techo de la nave central.

Si todas las naves tienen igual altura y el área total de las aberturas de entrada inferiores, es inferior que el área total de los respiraderos de salida del techo de las naves laterales, por el techo de la nave central entrará aire frío. Si se aumenta el número de entradas de aire en la parte inferior de las paredes, la corriente que pasa por las aberturas del techo de la nave central se dirigirá hacia el exterior en lugar de penetrar en el edificio.

## 3) LA INFLUENCIA DEL VIENTO

El viento es una manifestación cinético-dinámica del aire, sobre la superficie de la Tierra moviéndose en periódicos oleajes alcanzando zonas de gran anchura y ello debido principalmente a que el sol no calienta uniformemente la superficie terrestre, sino que difiere en función de la latitud y por tanto se originan capas atmosféricas de diferente densidad que rompen el equilibrio, ocupando el aire menos caliente el lugar que ocupa el más caliente que se eleva por la atmósfera.

Las masas de aire se mueven a velocidades que varían según la altura sobre la superficie terrestre, siendo casi nula a ras de suelo y aumentando con la altura, al principio muy rápidamente y después de formas más gradual. Ahora bien los instrumentos demuestran que por lo general, la velocidad y dirección del viento ofrecen cambios continuos dentro de ciertos límites. La figura 13 indica la variabilidad de un viento a 2 m del suelo (donde la amplitud de las ráfagas normalmente es menor que en las capas superiores). Las velocidades máxima y mínima oscilan de 10 % ÷ 20 % por debajo de la media del viento y en los casos extremos la máxima es  $\approx 90\%$  mayor que la media y la mínima puede ser aun  $\approx 20\%$  menor que la media.

La figura 14 muestra los cambios de dirección del vector de la velocidad del viento en un plano horizontal durante un periodo de un minuto y que respecto al valor medio alcanzan variaciones  $\approx 50^\circ \div 70^\circ$ . En el plano vertical la variación en ocasiones va desde la horizontal hasta la vertical cual es el caso de los remolinos. Lilien-

thal comprobó tras numerosos experimentos hechos a 10 m del suelo que las masas de aire se mueven con un ángulo generalmente de  $3^{\circ} 30'$  sobre la horizontal (figura 15).

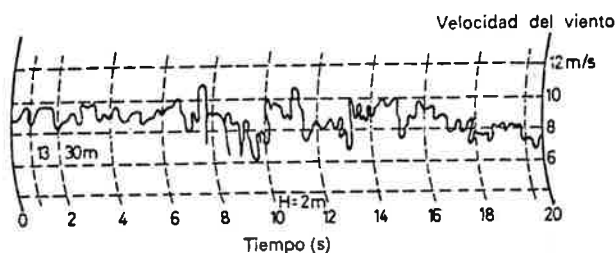


Figura 13. — Variación de la velocidad del viento a 2 m sobre el nivel del suelo.

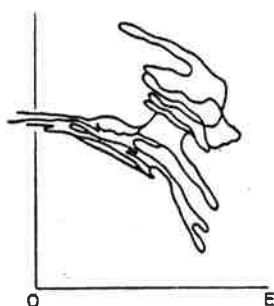


Figura 14. — Cambio momentáneo de la dirección del vector velocidad del viento en un plano horizontal.

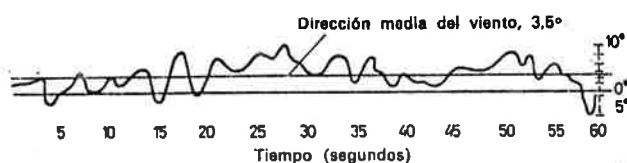


Figura 15. — Dirección del viento en un plano vertical.

El viento ante un obstáculo y antes de llegar a él reduce notablemente su velocidad en las capas bajas, tanto a barlovento como a sotavento, ofreciendo un incremento de la velocidad por encima del obstáculo. Los efectos sobre un edificio es un manifiesto incremento de la presión a barlovento y una depresión a sotavento, o sea presiones positivas y negativas respectivamente. Sobre las superficies frontales del edificio y a causa del retardo experimentado por la corriente del aire, la energía cinética del movimiento se transforma en energía potencial de presión pero la perturbación de la corriente a causa del edificio se pone de manifiesto solamente en una parte relativamente pequeña de la sección transversal de la corriente de aire y fuera de dicha zona perturbada no se observa ninguna distorsión y la corriente sigue su curso normal.

Las presiones se distribuyen sobre el edificio según la dirección del viento respecto al mismo y la presión sobre un punto determinado está asimismo en razón de la velocidad del viento.

Presión que normalmente se expresa en función de la presión dinámica de la corriente no perturbada, antes de llegar al edificio. Tal presión, por encima o por debajo de la estática de la corriente no perturbada y cuya relación con la dinámica citada, origina el "coeficiente de pre-

sión". Los ensayos demuestran que en los edificios semejantemente geométricos tal coeficiente es constante e independiente del número de Reynolds o sea no influyen la velocidad ni la variación de la misma y se determina sobre un modelo geoméricamente semejante colocado en un tunel aerodinámico.

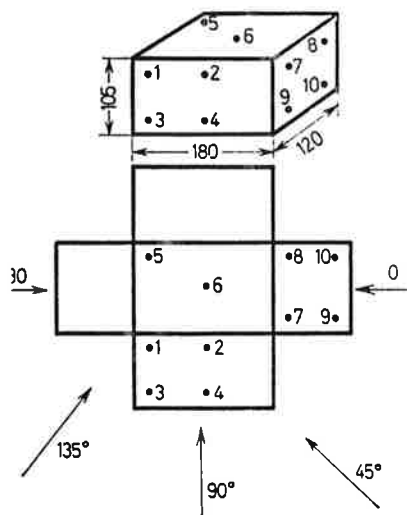


Figura 16. — Investigación de las presiones del viento en un edificio.

Dirección del viento	Posición									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0°	-0,26	-0,68	-0,34	-0,75	-0,17	-0,60	+0,96	+0,95	+0,93	+0,90
15	-0,15	-0,09	-0,16	-0,09	-0,30	-0,37	+1,00	+0,70	+1,00	+0,78
30	+0,04	+0,16	+0,04	+0,25	-0,39	-0,27	+0,87	+0,46	+1,00	+0,45
45	+0,17	+0,41	+0,10	+0,52	-0,32	-0,29	+0,66	+0,14	+0,70	+0,09
60	+0,49	+0,70	+0,37	+0,82	-0,57	-0,69	± 0	-0,06	± 0	-0,11
75	+0,70	+0,93	+0,57	+0,93	-0,61	-0,93	-1,00	-0,15	-1,10	-0,36
90	+0,85	+0,98	+0,72	+0,96	-0,64	-0,90	-0,84	-0,64	-0,86	-0,64
105	+1,00	+0,92	+1,00	+0,98	-0,30	-0,95	-0,54	-0,62	-0,55	-0,59
120	+0,94	+0,64	+1,10	+0,79	-0,38	-0,62	-0,51	-0,54	-0,47	-0,64
135	+0,71	+0,41	+0,81	+0,50	-1,02	-0,32	-0,44	-0,49	-0,42	-0,48
150	+0,32	+0,15	+0,39	+0,21	-0,97	-0,31	-0,41	-0,54	-0,38	-0,50
165	-0,84	-0,04	-0,85	-0,08	-0,90	-0,34	-0,33	-0,45	-0,30	-0,41
180	-0,96	-0,88	-0,92	-0,73	-1,07	-0,73	-0,23	-0,23	-0,21	-0,23

Tabla 2. Coeficientes de presión de las superficies de los edificios (véase la figura 16).

En las superficies cilíndricas, esféricas o curvilíneas sin ángulos la posición del punto de separación y por tanto la presión en un punto cualquiera de su superficie depende de  $Re$ .

Considerando la influencia de la dirección del viento en la distribución de presiones en la superficie de un paralelepípedo expuesto (figura 16). En la tabla n.º 2 se indican las variaciones que experimentan los coeficientes de presión con la dirección del viento. Se observa que las direcciones del viento ocasionan una depresión sobre un techo plano. Lo mismo ocurre en los techos de dos aguas siempre que la pendiente del faldón sea inferior a  $45^{\circ}$  pues para ángulos mayores aparecen presiones positivas por barlovento. Cuando el viento incide con una dirección de  $0^{\circ}$  sólo se observan presiones positivas en la pared que lo recibe de frente, en las demás (laterales y trasera), se observan depresiones (figura 16). Ocurre análogamente cuando el ángulo es de  $15^{\circ}$ . Para  $30^{\circ}$  las presiones positivas aparecen en parte de los laterales que reciben

# Ventilación

directamente el flujo. Para  $45^\circ$  las dos paredes opuestas a la corriente tienen coeficientes positivos y ya para los  $60^\circ$  ó más, los coeficientes positivos se observan solamente en la pared que se opone más directamente a la acción del viento. O sea la presión cambia de positiva a negativa cuando el ángulo que forma el plano de la pared y la dirección del viento es menor de  $30^\circ$ .

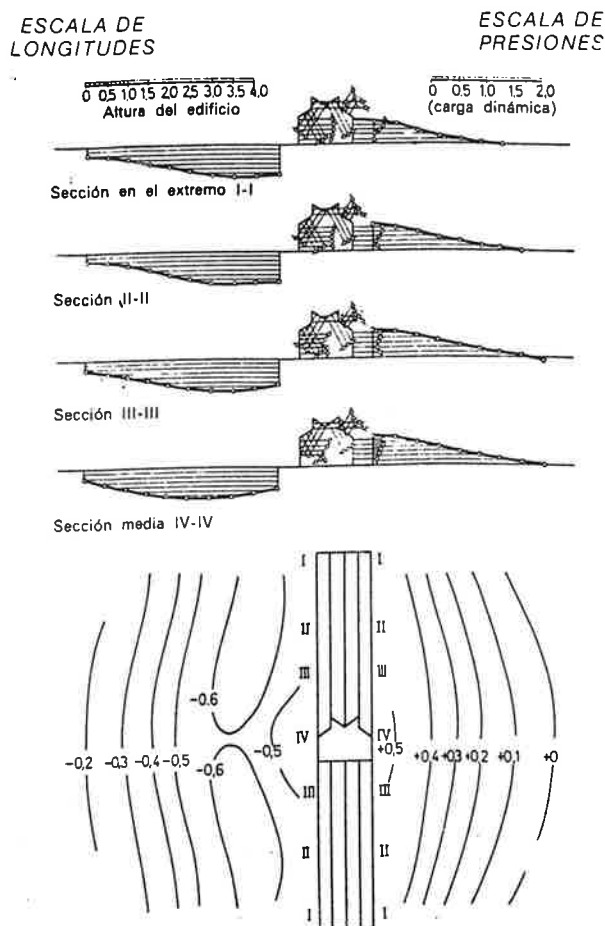


Figura 17.—Presiones del viento por delante y detrás de un edificio.

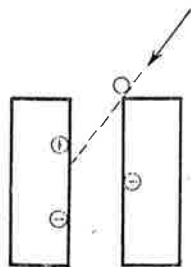


Figura 18.—Distribución de las presiones del viento en dos edificios paralelos.

En la figura 17 se representan las zonas de presión con varias longitudes de la altura del edificio  $\approx 5 H$ , así como la de depresiones o "sombra de viento" en la parte trasera de longitud  $\approx 6 H$ . Si el edificio está resguardado, por ejemplo, por otra edificación paralela contra el viento, entonces las presiones dependen de la distancia entre los edificios, excepto para cuando el edificio resguardado está a más de  $15 H$  en cuyo caso ya se considera totalmente libre, y si

tal distancia es  $\leq 6 H$  está en la sombra de viento o depresiones del edificio protector. Todo lo anotado aquí es para cuando el viento es paralelo al eje longitudinal de los edificios ya que cuando por el contrario es normal a dicho eje, entonces se prescinde de la protección al edificio cuestiñado.

Para edificios paralelos, las presiones sobre las paredes del edificio protegido se hacen positivas cuando el ángulo de incidencia del viento es  $\geq 25^\circ \div 30^\circ$  y la parte de la pared sometida a presiones positivas está limitada por una línea que se traza (figura 18) desde el punto 0 siguiendo la dirección con que sopla el viento. Para ángulos incidentes  $< 25^\circ \div 30^\circ$  los ensayos dan depresiones.

Como cuando el viento incide, siempre se separa la corriente en los bordes en ángulo, resulta, que más allá del punto de separación se forma una región de depresiones y que la figura 19 muestra como en un edificio cuya fachada trasera es más alta que la delantera, las depresiones de detrás del punto de separación situado en la esquina delantera del techo, se combinan con la región de altas presiones formada antes del obstáculo hacia el que se dirige el viento. Ha de existir pues una línea divisoria entre ambas zonas en la que el coeficiente de presión sea nulo, o sea que la presión será la misma que si el flujo no estuviera perturbado. El trazado de dicha línea depende de los valores relativos de las dimensiones  $H_0$ ,  $H_1$  y  $l$ . Sea por ejemplo el típico caso de un lucernario situado en la zona de separación, con depresión a barlovento, lo que para la ventilación natural es de suma importancia. Se indica por la figura 20 los valores medios de los coeficientes de presión al lado de barlovento de un techo de lucernario para las distintas razones ( $H_r/H_e$ ) de la altura  $H_r$  del lucernario a la altura  $H_e$  del edificio (desde 0 para un techo plano, hasta 0,4) cuando el viento sopla en dirección horizontal y los techos son muy inclinados, la altura del edificio debe tomarse desde la rasante de fachada hasta los aleros y la altura de cubierta, desde estos hasta la cumbrera o caballete de cubierta.

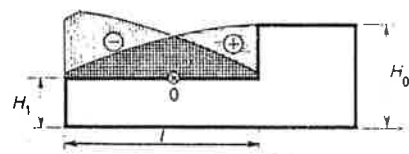


Figura 19.—Efecto de un saliente en el techo.

La tabla n.º 3 indica como los coeficientes de presión del lucernario en el lado que recibe el viento se ven afectados por la presencia de otro edificio, situado delante de él figura 21.

Cifras que variarían para otro valor relativo de  $H_0$  o de la dimensión del edificio protector. Es importante anotar que en naves con lucernarios paralelos de la misma altura, las zonas de depresión se observan en todos los tramos, excepto en el primero siempre que la anchura de las naves sea inferior a cinco alturas de lucernario.

El aire puede entrar por barlovento de los

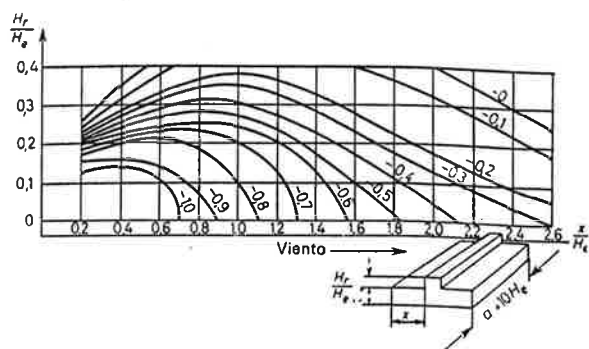


Figura 20.—Coeficientes de presión en el lado de barlovento.

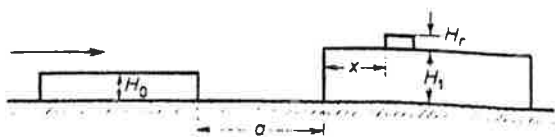


Figura 21.—

$H_r/H_0$	$x/H_1$				$a/H_0$
	0,2	0,6	1,0	2,0	
0	-0,2	+	+	+	4
	< -0,5	+ 0,15	+	+	6
	< -0,7	-0,33	0	+	8
	-	+	+	+	10
0,1	-0,2	+	+	+	4
	-0,5	-0,1	+	+	6
	-0,7	-0,30	0	+	8
	-	-	-	-	10
0,2	+	+	+	+	4
	+	+	+	+	6
	+	-0,13	0	+	8
	< 1,0	-0,85	-0,5	0	10
0,3	+	+	+	+	4
	+	+	+	+	6
	+	+	+	+	8
	+	-0,1	-0,05	+	10

Tabla 3.—Influencia de un edificio que obstruye el paso del viento en los coeficientes de presión del lado de barlovento de un lucernario (figura 21).

lucernarios si el viento sopla oblicuamente y la presión en el lucernario será positiva o negativa según la posición relativa del punto de separación del flujo del borde delantero del edificio. En la figura 22 se representa un edificio de altura escalonada lo que puede estudiarse en la forma siguiente:

a) Si el frontis más bajo del edificio es relativamente largo  $\geq 12 H_0$ , la corriente de aire más alla del punto de separación vuelve a tomar la altura normal y consecuentemente afecta a la pared de la parte más alta, como si estuviera totalmente expuesta. En la esquina superior del edificio más alto se produce otra separación por lo que el coeficiente de presión en barlovento del saliente del techo, depende de la situación relativa del segundo punto de separación.

b) Si el edificio más bajo tiene longitud  $< 12 H_0$ , en la dirección del viento, en barlovento del lucernario se puede tener una presión positiva,

en cuyo caso el coeficiente de presión al lado de barlovento, se determina por el gráfico de la figura 20 suponiendo que la altura del edificio es pues  $(H_1 - H_0)$ .

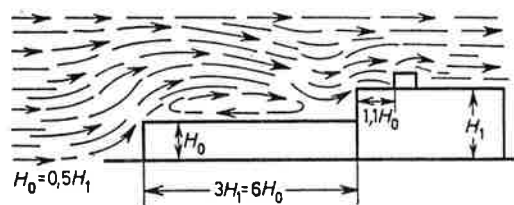


Figura 22.—Flujo sobre un techo escalonado.

c) En la hipótesis que el lucernario está situado en la parte más baja del edificio, en cuyo caso la distribución de presiones depende de la posición del punto de separación del borde de la parte baja del edificio (figura 23) y de la región de altas presiones que se forman antes de la parte más alta del edificio.

El diagrama indica la línea de presión nula, la región de depresiones está situada a su izquierda, en la cual, cualquier lucernario de altura  $H_r = 0 \div 0,3 H$  estará sometido a depresión, e inversamente si está colocado en la región de altas presiones (de la derecha) estará sometido a presiones positivas.

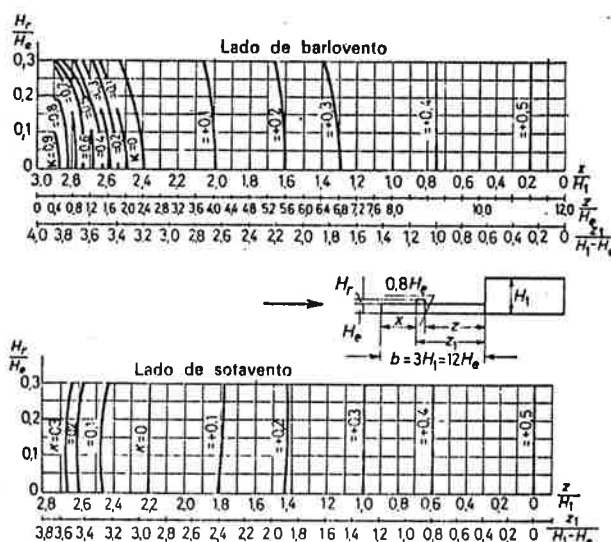


Figura 23.—Distribución de presiones en un lucernario situado en la parte baja de un techo escalonado.

O sea que en un edificio, el efecto del viento consiste en producir presiones diferentes en sus superficies externas y por tanto ocasionar el paso de aire por las "adecuadas" aberturas de ventilación, lo que constituye un problema básico para el técnico en ventilación y tratamiento de aire. Como ya se sabe y es intuitivo el aire fluye de las zonas de mayor presión hacia las zonas que la tienen más baja y ello puede motivar incremento de la presión en el interior del edificio.

Si  $P_1$  es la presión exterior del aire en el paramento de entrada a una abertura de entrada y  $P_2$  es la presión exterior del aire en el paramento de salida de una abertura de salida, la diferen-

# Ventilación

cia de ambas presiones  $P$ , es la que ocasiona la renovación del aire.

$$\Delta P = P_1 - P_2$$

Todo lo hasta ahora considerado en la renovación del aire y configuración de la corriente, ocasionadas por fuentes calóricas y el viento separadamente, induce a la lógica consideración de un efecto combinado de ambas, lo que constituye un primordial aspecto para el técnico de ventilación, cuyos proyectos requieren un análisis técnico económico y actualmente la consecución de un importante ahorro energético que, no solo depende de grados de aislamiento, establecimiento de temperaturas ambientales, etc..., sino también del aprovechamiento de una adecuada tecnología que capte las energías naturales (gradientes térmicos, dinámica de masas de fluidos, incrementos de presiones, etc...).

## 4) CALCULOS DE RENOVACION DE AIRE

En el presente apartado son de distinguir los casos de edificios de una sola nave o las multinaves y en ambos considerar, si son centros dedicados a determinada actividad.

- 4.1. **Renovación de una sola nave:** Se calcula por el siguiente método simplificado:
  - 4.1.1. Considerando el aire en estado estacionario.
  - 4.1.2. Suponer que la temperatura es igual en toda la nave, así como que en todo plano horizontal la presión permanece constante y que las variaciones al cambiar de plano horizontal son hidrostáticas.
  - 4.1.3. Se prescinde de los obstáculos de la nave (como si no estuvieran) y de las corrientes convectivas.
  - 4.1.4. Se admiten las corrientes que entran por las aberturas de ventilación y las convectivas internas se desvanecen antes de llegar a las paredes.
  - 4.1.5. Se desprecia la infiltración de aire infiltrado por rendijas o porosidad de los materiales (comparado con los volúmenes a mover por vía natural).
  - 4.1.6. Se supone que el viento ofrece las presiones (sus coeficientes de presión) sobre el edificio, tomadas sobre modelo aunque se presentan aberturas de aire que permiten la corriente de aire en el interior.

El gasto de aire que pasa por una abertura de área  $F$ , para una diferencia de presión entre interior y exterior  $P$ , se calcula por la fórmula:

$$G = \mu F \sqrt{2g \gamma \Delta P} \text{ Kg/s}$$

$G$  = Gasto masico

$\mu$  = Coeficiente descarga dependiente del tipo de corriente

$g$  = Aceleración de la gravedad

DONDE  $\gamma$  = Densidad del aire en estado inicial ( $\text{Kg/m}^3$ )

$\Delta P$  = Diferencia presión del interior y exterior en un orificio dado ( $\text{Kg/m}^2$ )

Se admite que el gasto masico de entrada es el mismo de salida, luego:

$$\sum G_{\text{ent}} = \sum G_{\text{sal}}$$

que es el balance de masas.

Además de la ecuación del balance de masas, deberá también ser válida la ecuación del balance calórico, al igualar la cantidad de calor introducido en la nave con el que sale de la misma.

La sobrepresión o presión por encima de la atmosférica a una altura cualquiera en la nave sometida a determinadas condiciones, está determinada por la razón de los cuadrados de las áreas de los orificios de entrada y salida. En efecto supóngase en principio que carece de fuentes internas de calor y que posee dos aberturas de ventilación, una a barlovento y otra a sotavento (figura 24). En la que  $P_1$  es la presión en la abertura (1) a barlovento y  $P_2$  la presión en la abertura (2) a sotavento.

Las presiones del viento se obtienen multiplicando la presión dinámica del viento por los coeficientes de presión de los puntos correspondientes:

$$P = \frac{KV^2\gamma}{2g}$$

DONDE  $K$  = coeficiente de presión  
 $V$  = velocidad del viento  $\text{m/s}$   
 $\gamma$  = densidad del aire  $\text{Kg/m}^3$   
 $g$  = gravedad  $\text{m/s}^2$

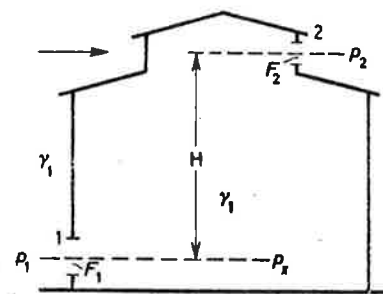


Figura 24.—Presiones en un edificio con dos aberturas.

A las presiones no se les pone signo pues será el dado por el correspondiente coeficiente de presión.

Para verano  $\gamma \simeq 1,2 \text{ Kg/m}^3$  por lo que se podrá escribir:

$$\frac{\gamma V^2}{2g} \simeq \left( \frac{V}{4} \right)^2$$

Tomando el plano horizontal que pasa por el centro de la abertura (1) y suponiendo en él la

presión estática exterior es cero (la presión de referencia se elige arbitrariamente). Por lo que la presión externa total valdrá pues

$$[ (0 + P_1) \text{ Kg/m}^2 ]$$

Llamando  $P_x$  a la sobrepresión interna en este nivel, la diferencia de presiones  $\Delta P$  entre el interior y el exterior en la abertura (1) será

$$0 + P_1 - P_x = P_1 - P_x$$

En la abertura (2) se tiene

$$\text{Presión interior} = P_x - H\gamma_1$$

$$\text{Presión exterior} = 0 - H\gamma_1 + P_2$$

$$\text{Diferencia de presión} = P_x - P_2$$

La ecuación del balance de masas será:

$$M_1 F_1 \sqrt{2g \gamma_1 (P_1 - P_x)} = M_1 F_2 \sqrt{2g \gamma_1 (P_x - P_2)}$$

eliminando  $M_1 \sqrt{2g \gamma_1}$ , en ambos miembros y despejando  $P_x$ , se tiene

$$P_x = \frac{F_1^2 P_1 + F_2^2 P_2}{F_1^2 + F_2^2}$$

Si la abertura (2) está cerrada entonces  $F_2 = 0$  por tanto  $P_x = P_1$

Si se deja abierta (2) y se cierra (1), o sea que  $P_x = P_2$

Si  $F_1 F_2$  se tiene que

$$P_x = \frac{1}{2} (P_1 + P_2)$$

En el caso más frecuente de que el edificio tenga tres aberturas (figura 25) puede verse sin necesidad de las fórmulas, que la sobrepresión interna  $P_x$  también estará determinada por la relación entre las áreas de los orificios abiertos.

En efecto, si las aberturas

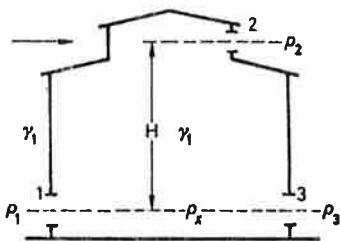


Figura 25.—Presiones en un edificio con tres aberturas.

$$\left. \begin{array}{ll} 2 \text{ y } 3 & \text{están cerradas: } P_x = P_1 \\ 1 \text{ y } 3 & \text{" " " : } P_x = P_2 \\ 1 \text{ y } 2 & \text{" " " : } P_x = P_3 \end{array} \right\} \text{ la presión}$$

interna  $P_x$  puede tomar cualquier valor com-

prendido entre  $P_1$  y  $P_2$  si se varía la relación entre las superficies de aberturas (suponiendo que  $-P_2 > -P_3$ ).

Todo lo anterior es cierto para sobrepresión interna  $P_x$  en el caso general de nave con fuentes de calor ( $\gamma_1 > \gamma_2$ ) y de que el edificio esté expuesto al viento (figura 26).

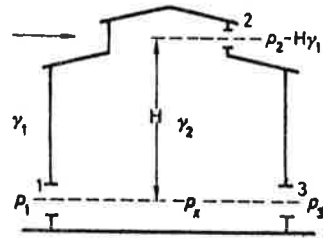


Figura 26.—Presiones en un edificio calentado provisto de tres aberturas de ventilación.

Si nuevamente se toma el nivel del centro de las aberturas más bajas como plano de referencia y considerando la abertura (2)

$$\text{Presión interna} = P_x - H\gamma_2$$

$$\text{Presión externa} = P_2 - H\gamma_1$$

$$\text{Diferencia} = P = P_x - [-H(\gamma_1 - \gamma_2) + P_2]$$

El término  $P_x$  puede considerarse como la presión interna a la altura de la abertura (2) y los términos colocados entre paréntesis como la presión externa al mismo nivel y la expresión entre corchetes supone la presión del viento en la abertura (2) que en ausencia de fuentes calóricas, producirá el mismo caudal que origina la combinación de las diferencias térmicas y de presión del viento en la realidad, por lo que  $[P_2 - H(\gamma_1 - \gamma_2)]$  se denomina "presión ficticia del viento ( $P'_2$ )". Concepto que simplifica el análisis de la renovación del aire y en especial en los casos de multinaves, pues permite considerar el evitar la presencia de fuentes calóricas, reduciendo el problema al simple y sencillo caso isotérmico. El problema se representa en la figura 27 que es la figura 26 con la suposición de que la presión interna podría tener cualquier valor comprendido entre  $P_1$  y  $P'_2$  según la proporción entre áreas de las bocas de ventilación abiertas, donde

$$P'_2 = P_2 - H(\gamma_1 - \gamma_2) \text{ Kg/m}^2$$

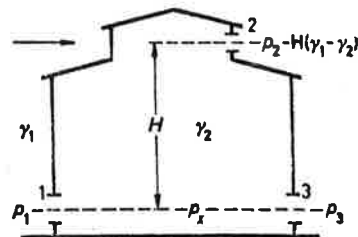


Figura 27.—Presiones equivalentes en un edificio calentado y ventilado.

Transformación que permite calcular la sobrepresión interna que asegure el flujo de aire en la dirección deseada. Regulando el área de las bocas de ventilación se puede conseguir una  $P_x$

# Ventilación

tal que las aberturas (1) y (3) admiten aire lo que es preferible al admitirse aire por ambos lados, con un reglaje diferente, saldrá aire por la abertura (3) lo cual es indeseable ante la presencia de fuentes de contaminación en el camino del aire entre las aberturas (1) y (3). Si  $P_x = P_3$ , la abertura (3) es prácticamente nula (como si no existiera).

La renovación natural del aire en una sola nave, como en el caso de multinaves (materia que será cuestión de un próximo trabajo), plantea dos problemas fundamentales:

a) Conociendo la cantidad de contaminante producido en unidad de tiempo, se puede calcular la cantidad de aire a renovar, sobre la base de conocer las concentraciones inicial y final con lo que se determinan las áreas de las aberturas en paredes y techos (para el exceso de calor en lugar de concentraciones se toman temperaturas del aire a la entrada y salida de la nave o naves).

b) Conocidas las condiciones externas, el área de aberturas y su posición se pueden calcular la renovación de aire que se puede producir y la concentración media de impurezas (cuando es calor, entonces la temperatura de la zona de trabajo). Este problema es pues el inverso del anterior (a).

El primer problema es a nivel de proyecto inicial y el segundo de proyecto de ventilación mecánica.

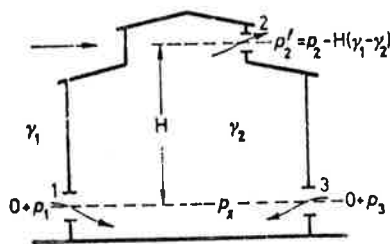


Figura 28. --Representación esquemática del flujo de aire.

Para el primer problema o sea para tener las áreas de aberturas (figura 28) y sobre el conocimiento previo de la temperatura ambiente por datos meteorológicos (a la una de la tarde del mes más cálido), la velocidad del aire de proyecto  $V_{dis}$  m/s y los coeficientes de presión  $K_1$ ,  $K_2$  y  $K_3$ . El exceso de calor  $Q_{xs}$  se calcula en la forma usual y que en la mayoría de las veces se considera bidimensional, o sea, se supone que las condiciones exteriores e interiores son idénticas en todas las secciones de las naves. Según la ecuación de balance de calor o de materia en los demás contaminantes, la cantidad de aire teóricamente renovado es:

$$G = \frac{Q_{xs}}{C(t_{sal} - t_a)} \text{ Kg/s}$$

El sistema tendrá la máxima eficacia cuando el aire entre por ambos lados, o sea las aberturas (1) y (3) (figura 28) y salga por la (2).

En la hipótesis de que (1) y (3) contribuyan por igual en la renovación de aire, entonces  $G_1 = G_3$

por lo que  $G_1 + G_3 = G_2$ . Tomando como nivel de referencia el centro de las aberturas más bajas y llamando  $P_x$  a la sobrepresión interna a dicho nivel, las diferencias de presión están representadas por las expresiones:

$$\begin{aligned} \Delta P \text{ en abertura (1)} &= P_1 - P_x \\ \Delta P \text{ en abertura (3)} &= P_3 - P_x \\ \Delta P \text{ en abertura (2)} &= P_x - P_2 = \\ &= P_x + H(\gamma_1 - \gamma_2) - P_2 \end{aligned}$$

La elección de un  $P_x$  no ofrece dificultad al conocer las presiones reales y ficticias correspondientes a las aberturas en la sección considerada de la nave:  $P_x$  debe ser menor que  $P_3$  (para que entre aire por (3) y mayor que  $P_2 - H(\gamma_1 - \gamma_2)$ ). Una vez elegida  $P_x$  se calcula las áreas de aberturas a partir de los caudales y diferencias de presión:

$$F_1 = \frac{G}{\mu_1 \sqrt{2g \gamma_1 (P_1 - P_x)}} \text{ m}^2$$

$$F_2 = \frac{G_2}{\mu_2 \sqrt{2g \gamma_2 (P_x - P_2')}} \text{ m}^2$$

$$F_3 = \frac{G_3}{\mu_3 \sqrt{2g \gamma_1 (P_3 - P_x)}} \text{ m}^2$$

## 5) CALCULO DE VENTILACION

En resumen el cálculo para la ventilación de una nave es el siguiente:

5.1. Se determina el caudal de aire, conociendo la cantidad de impurezas o calor producido por unidad de tiempo y la temperatura del aire que sale por los registros colocados en lo alto.

La temperatura  $t_{sal}$  del aire saliente ha de ser tal que la temperatura en la zona de trabajo (para proyecto verano) no debe superar a la temperatura exterior  $t_a$  en más de 5° C.

Experimentalmente en modelos, los análisis efectuados demuestran que para el cumplimiento con esta norma debe ser

$$\Delta t_{sal} = t_{sal} - t_a \quad 10^\circ \text{C} \div 12^\circ \text{C}$$

5.2. Se da la proporción entre  $G_1$  y  $G_3$  como por ejemplo (frecuente)

$$\frac{G_3}{G_1} = 1'' \quad G_1 = G_3 = \frac{1}{2} G_2$$

5.3. Se calcula la presión ficticia para la abertura (2) a través de la fórmula:

$$P_2 = P_3 - H (\gamma_1 - \gamma_2)$$

En el cálculo del caudal que pasa por (3) se supone que  $P_x \simeq P_2 \div P_3$  que son los valores límites y a medida que  $P_x$  se aproxima a ellos, la diferencia de presión correspondiente disminuye y se precisa un aumento en el área de la abertura para  $G_2/G_3 = \alpha$ .

$$y F_2/F_3 = \beta, \text{ como } G_2 = \mu_2 F_2 \sqrt{2g \gamma_2 (P_x - P'_2)}$$

$$G_3 = \mu_3 F_3 \sqrt{2g \gamma_1 (P_3 - P_x)}$$

que elevadas al cuadrado y divididas miembro a miembro y suprimiendo los factores  $2g\gamma_1$  y  $2g\gamma_2$  se tiene

$$\left(\frac{G_2}{G_3}\right)^2 = \left(\frac{\mu_2}{\mu_3}\right)^2 \left(\frac{F_2}{F_3}\right)^2 \left(\frac{P_x - P'_2}{P_3 - P_x}\right)^2$$

haciendo  $\mu_2/\mu_3 = \eta$  se obtiene, despejando, que:

$$P_x = \frac{\alpha^2 P_3 + \eta^2 \beta^2 P'_2}{\alpha^2 + \eta^2 \beta^2} \text{ y si } \eta = \frac{\mu_2}{\mu_3} = 1$$

$$\text{entonces } P_x = \frac{\alpha^2 P_3 + \beta^2 P'_2}{\alpha^2 + \beta^2}$$

Las características aerodinámicas de los lucernarios modifican en algo el análisis. En el ensayo se coloca la maqueta en el tunel aerodinámico que, por precisión sólo introduce la parte alta de la maqueta. La presión interna de la cámara se regula reproduciendo las condiciones en que se encontrará el edificio real. Se trata de determinar la relación entre el incremento de presión  $\Delta P$ , al nivel del techo y el caudal de aire  $G$  a través del lucernario cuando el aire tiene una dirección y velocidad dadas. El equipo de ensayo se esquematiza en la figura 29. En la sección abierta del tunel, se produce la corriente de aire que pasa por el modelo y por medio de la cámara de carga se produce el incremento de presión  $\Delta P$  requerido en la "garganta" del lucernario, en la que  $\Delta P_r = P_x + H (\gamma_{sal} - \gamma_a)$ , donde  $P_x$  es la presión interior al nivel de  $H$  debajo de la "garganta" del lucernario. En el ensayo son conocidos la velocidad del viento  $V$  y el incremento de presión  $\Delta P_r$ , tratándose de determinar la velocidad del aire a través de un área característica que acostumbra a ser la garganta del techo de lucernario (abertura en el techo) o el área de la sección transversal total de las aberturas en forma de rejilla de ventilación.

Las características se representan en gráficos en los cuales la diferencia de presión  $\Delta P_r$  Kg/m<sup>2</sup> en la "garganta" del lucernario, se indica en el eje de abscisas y la velocidad del aire correspondiente  $V_r$  en el de ordenadas para velocidades  $\approx 0,4 \div 6,0$  m/s figura 30.

Obtenidas las propiedades aerodinámicas en la forma descrita el cálculo del caudal de aire de

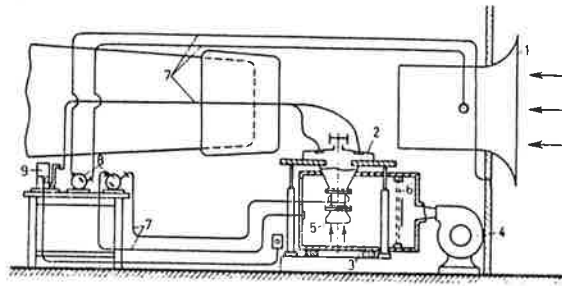


Figura 29.—Maqueta de un techo en un tunel aerodinámico.

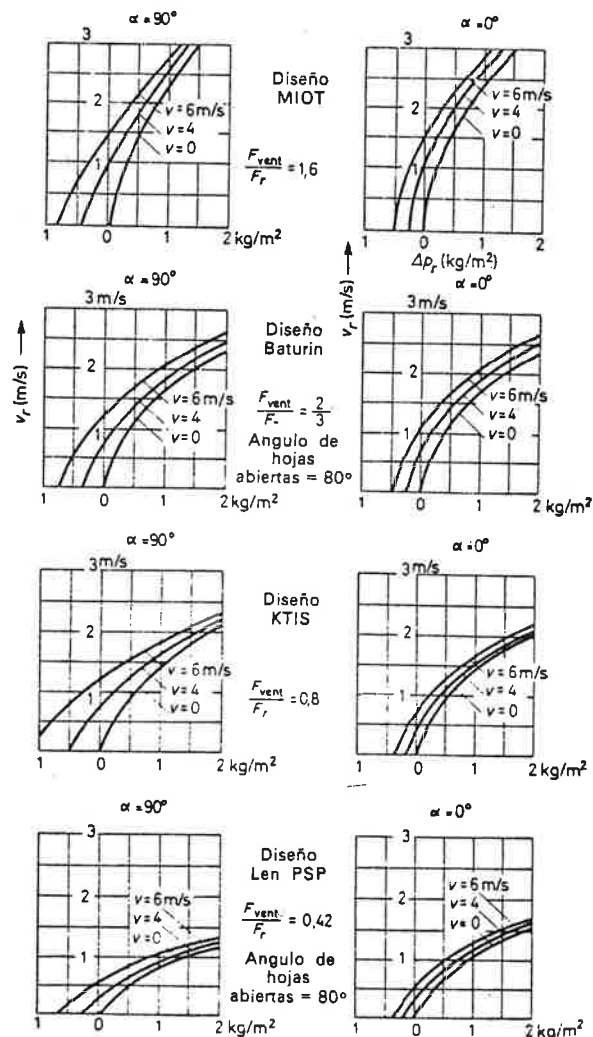


Figura 30.—

ventilación para aberturas protegidas por pantallas contra el viento es el siguiente:

Se determina el valor aproximado de  $\Delta P_r$  a fin de calcular  $V_r$ , a partir de las características de los lucernarios. El ensayo se produce en condiciones isotérmicas y la presión en el vano del techo se mide en relación a un flujo no perturbado por lo que  $\Delta P_r = P_x = H (\gamma_{sal} - \gamma_a)$  en donde  $P_x$  es la sobrepresión interna en el nivel del centro de las bocas de entrada.  $P_x$  está dado (entre los límites de la diferencia de presión) o el área ( $\Sigma F$  entrada) de las aberturas de entrada en cuyo caso

$$P_x = P_1 - \frac{G_1^2}{\mu_1 F_1^2 2g \gamma_1}$$

# Ventilación

expresión en la que  $P_1$  es la presión del viento en  $\text{Kg/m}^2$  determinada a partir de la presión dinámica del viento ( $P_w$ ) y el coeficiente de presión  $K_1$

$$P_1 = K_1 P_w$$

Hallado pues un  $\Delta P$  apropiado al lucernario y a la velocidad del diseño del viento se obtiene la velocidad  $V_r$  en la garganta del lucernario por medio de gráficos, tras lo cual el área de la garganta y el área total correspondiente a las aberturas de salida se calcula por el cociente

$$F_r = \frac{G_r}{V_r} \text{ m}^2$$

El flujo másico que pasa por las aberturas de un área total dada se calcula conociendo la densidad  $\gamma_2$  del aire interior, según la fórmula:

$$\gamma_i = \frac{353}{273 + \frac{Q_{xs}}{2^{\mu} F_1 C \sqrt{2g \gamma_1 (P_1 - P_x)}}} \text{ Kg/m}^3$$

## 6) EJEMPLOS DE APLICACION

### 6.1. (Ejemplo 1)

**EJEMPLO 1.** Calcular la ventilación natural de un taller de una sola nave y un techo de lucernario protegido por pantallas contra el viento.

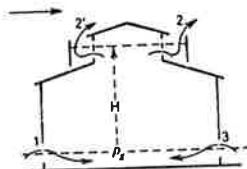
Sabiendo que  $Q_{xs} = 500 \text{ kcal/s}$ ,  $H = 10 \text{ m}$ ,  $t_a = +22^\circ\text{C}$ ; que los coeficientes de presión son  $k_1 = 0,6$ ,  $k'_1 = -0,5$ ,  $k_2 = -0,4$  y  $k_3 = 0,3$  y que la velocidad del viento es de  $4 \text{ m/s}$ , determinar las áreas de las aberturas (1), (2), (2') y (3).

1. El caudal total de aire suponiendo que  $t_{\text{int}} = 32^\circ\text{C}$ , es el siguiente:

$$G = \frac{Q_{xs}}{0,24(t_{\text{int}} - t_a)} = \frac{500}{0,24(32 - 22)} = 208 \text{ kg/s.}$$

2. Se postula que la repartición del caudal por las aberturas es la siguiente:

$$G_1 = G_1; \quad G'_1 = G_2; \quad G_1 + G_2 = G_1 + G'_1 = 208 \text{ kg/s.}$$



Ventilación de una nave con lucernario protegido.

3. La presión del viento y las presiones totales en las aberturas se calculan para  $v = 4 \text{ m/s}$ , es decir  $P_w = \frac{\gamma v^2}{2g} \approx 1 \text{ kg/m}^2$ :

$$P_1 = k_1 P_w = 0,6 \text{ kg/m}^2,$$

$$P_2 = k_2 P_w = -0,40,$$

$$P'_1 = k'_1 P_w = -0,50,$$

$$P_3 = k_3 P_w = -0,30,$$

$$P'_1 = P_1 - H(\gamma_1 - \gamma_2) = -0,5 - 10(1,197 - 1,177) = -0,7,$$

$$P'_2 = -0,4 - 0,2 = -0,6.$$

4. Se elige la presión interna teniendo en cuenta que por la abertura (3) situada a sotavento, debe entrar aire y que  $\Sigma F_i/F_3 = 0,5$ :

$$\alpha = \frac{G_1}{G_3} = 1; \quad \beta = \frac{\Sigma F_i}{F_3} = 0,5,$$

$$P_2 = \frac{\alpha^2 P_1 + \beta^2 P'_1}{\alpha^2 + \beta^2} = \frac{1(-0,3) + 0,25(-0,6)}{1 + 0,25} = -0,36 \text{ kg/m}^2.$$

5. Las diferencias de presión en las aberturas son

$$P_1 - P_2 = 0,6(-0,36) = 0,96 \text{ kg/m}^2,$$

$$P_2 - P'_1 = -0,36 - (-0,7) = 0,34,$$

$$P_2 - P'_2 = -0,36 - (-0,6) = 0,24,$$

$$P_3 - P_2 = -0,3 - (-0,36) = 0,06.$$

6. Determinamos las áreas de las aberturas. Primero, para simplificar, calculamos

$$\mu \sqrt{2g \gamma_1} \approx \mu \sqrt{2g \gamma_2} \approx 0,6 \sqrt{19,6 \times 1,2} = 2,85$$

y luego

$$F'_1 = \frac{G_1}{\mu \sqrt{2g \gamma_1} \sqrt{P_1 - P_2}} = \frac{104}{2,85 \sqrt{0,96}} = 37,3 \text{ m}^2,$$

$$F'_2 = \frac{104}{2,85 \sqrt{0,34}} = 62,7 \text{ m}^2,$$

$$F_3 = \frac{104}{2,85 \sqrt{0,24}} = 74,4 \text{ m}^2,$$

$$F_2 = \frac{104}{2,85 \sqrt{0,06}} = 149 \text{ m}^2,$$

$$\Sigma F = 323 \text{ m}^2.$$

### 6.2. (Ejemplo 2)

**EJEMPLO 2.** En el ejemplo anterior, hallar el área requerida en las aberturas cuando la velocidad del viento es cero.

Se postula que la presión interna estará comprendida entre los límites de la diferencia de presión disponible  $H(\gamma_1 - \gamma_2) = 10 \times (1,197 - 1,177) = 0,2 \text{ kg}$  tomar  $P_2 = 0,1 \text{ kg/m}^2$ . En consecuencia, las diferencias de presión en las aberturas ( $P_1 = P_2 = P'_1 = P_3 = 0$ ) son

$$\text{en la abertura 1} \quad P_2 = -(-0,1) = 0,1 \text{ kg/m}^2,$$

$$\text{en la abertura 2'} \quad P_2 - P'_1 = -0,1 - (-0,2) = 0,1,$$

$$\text{en la abertura 2} \quad P_2 - P'_2 = -0,1 + 0,2 = 0,1,$$

$$\text{en la abertura 3} \quad P_2 = 0,1.$$

Si  $G_1 = G_2$  y  $G_3 = G'_1$ , el área de las aberturas será

$$F_1 = F'_1 = F_2 = F_3 = \frac{104}{2,85 \sqrt{0,1}} = 115 \text{ m}^2,$$

$$\Sigma F = 460 \text{ m}^2.$$

6.3. En algunos otros casos lo que es preciso calcular es el caudal de aire y la temperatura  $t_{\text{sal}}$  del aire saliente conocido el calor producido, el área de aberturas y las condiciones exteriores o sea la temperatura del aire externo  $t_a$ , la velocidad del viento  $V$  y los coeficientes de presión.

Como la presión interna depende de la relación de los cuadrados de las áreas de las aberturas, si se dan tales áreas, hay que calcular la citada presión y como el caudal de aire es función de la misma resulta que tanto la renovación de aire como la temperatura del aire saliente  $t_{\text{sal}}$ , son desconocidas. Tampoco se sabe si por la abertura de sotavento entra o sale aire (3). Es decir el problema se resuelve hallando los valores  $P_x$  y  $t_{\text{sal}}$  que satisfagan a las ecuaciones del balance de masa y del balance de calor.

En el planteamiento del balance de masa se parte de una hipótesis como que la abertura (3) admite aire y que el subsiguiente cálculo confirmará si en efecto la hipótesis fue cierta.

Así en la expresión del caudal que pasa por la abertura (3) la diferencia de presión que está bajo la raíz cuadrada es negativa (imaginaria) por lo que la suposición en tal supuesto es equivocada y por tanto por dicha abertura sale aire.

### 6.4. (Ejemplo 3)

**EJEMPLO 3.** Vamos a aclarar las anteriores observaciones con un ejemplo numérico. Están dados  $Q_{xs} = 500 \text{ kcal/s}$ ,  $H = 10 \text{ m}$ ,  $t_a = +22^\circ\text{C}$ ,  $v_a = 4 \text{ m/s}$  y los coeficientes de presión:  $k_1 = 0,6$ ,  $k'_1 = -0,45$  y  $k_2 = -0,3$ . Las áreas de las aberturas también están dadas:  $F_1 = 38 \text{ m}^2$ ,  $F_2 = 128 \text{ m}^2$  y  $F_3 = 260 \text{ m}^2$ . Se quiere determinar la sobrepresión interna  $P_x$ , el flujo másico de aire  $G$ , la temperatura  $t_{\text{int}}$  y la temperatura media  $\bar{t}$ .

Si suponemos que por la abertura (3) está entrando aire, podremos escribir la ecuación de continuidad en su forma general:

$$G_1 + G_2 = G_3.$$

Llamando  $P_x$  a la presión interna requerida y escribiendo la ecuación en su forma desarrollada, tenemos

$$\mu F_1 \sqrt{2g \gamma_1 (P_1 - P_x)} + \mu F_2 \sqrt{2g \gamma_2 (P_2 - P_x)} = \mu F_3 \sqrt{2g \gamma_3 (P_x - (P_x - H(\gamma_1 - \gamma_2)))}.$$

Esta ecuación tiene dos incógnitas que son  $p_x$  y  $\gamma_x$ . Sin que ello implique introducir un gran error podemos suponer que

$$\mu \sqrt{2g\gamma_1} \approx \mu \sqrt{2g\gamma_2}$$

Luego,

$$F_1 \sqrt{p_1 - p_x} + F_2 \sqrt{p_2 - p_x} = F_3 \sqrt{p_x - p_0} + H(\gamma_1 - \gamma_2)$$

Para hacer un tanteo supongamos que  $t_{ext.} = 32^\circ\text{C}$ ,  $t_i = 27^\circ\text{C}$  y  $p_x = -0,31 \text{ kg/m}^2$ . Sustituyendo estos valores en la última expresión obtendremos

$$38 \sqrt{0,6 + 0,31} + 260 \sqrt{-0,3 - (-0,31)} \approx 128 \sqrt{-0,31 + 0,45} + 10(1,197 - 1,177),$$

o sea,  $69,2 \approx 68,8$ .

Por aproximaciones sucesivas se obtiene que  $p_x = -0,32$  y por lo tanto,

$$G_1 = 104 \text{ kg/s}; G_2 = 104 \text{ kg/s}; G_3 = 208 \text{ kg/s}.$$

Comprobando mediante el balance de calor, tendremos,

## 7) VENTILACION MIXTA

Es cuando además de la ventilación natural hay ventilación mecánica incluyéndose el caudal  $G_m$  que suministra o extrae el sistema mecánico y que hay que introducir en la ecuación de balance bien en el lado de entradas o de las salidas, respectivamente.

La entrada mecánica de aire de ventilación al aumentar la sobrepresión intensifica el caudal que sale por la abertura (2) y reduce el que entra por la abertura (3) si es que ésta es de admisión. La extracción mecánica tiene efecto opuesto pues al disminuir la presión interna, aumenta la entrada de aire por las aberturas (1) y (3) a la vez que disminuye el caudal de salida de aire por la abertura (2).

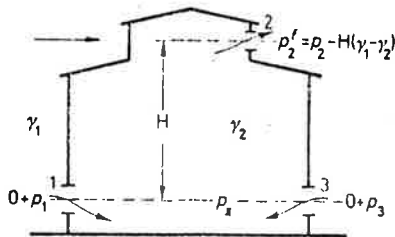


Figura 31.—Representación esquemática del flujo de aire.

## 8) ABERTURAS DE DOBLE FUNCION SIMULTANEA

Se trata cuando se diseña la ventilación natural de una nave con aberturas altas, cual es el caso de puertas, en las que puede acontecer que parte de la misma abre en la admisión de aire y parte en la extracción del mismo. El caso es típico en ventilación por gravedad y viento.

Llamando  $t_a$  y  $\gamma_a$  a la temperatura y densidad de aire exterior y  $t_i$  y  $\gamma_i$  a la temperatura y densidad del aire interior de la nave. En la hipótesis de una presión de viento  $P_1$  constante para cualquier altura de la pared y siendo  $P_2$  la presión reinante en los registros de persiana del lucernario del techo.

Si la puerta sirve parcialmente para entrada y el resto para salida de aire se supone que a una distancia  $Z$  del suelo (en el plano de la abertura) hay una línea que separa ambos flujos opuestos (entrada y salida). Al nivel  $Z$  la presión interna es igual a la externa, o sea  $P_i = P_a$  (figura 32).

En la determinación de la renovación de aire es necesario conocer la distribución de presiones en el interior de la nave. Sea  $P_0$  la presión interna al nivel del suelo, si las velocidades del aire en el interior de la nave son bajas se admite que para un primer tanteo, la variación de la presión es función de la altura, siguiendo la ley hidrostática.

Por lo que se tiene dos incógnitas, el nivel neutro  $Z$  y la presión al nivel del suelo  $P_0$ . Se dispone asimismo de dos ecuaciones para determinarlas, que son:

$P_i = P_a$  y la ecuación de continuidad.

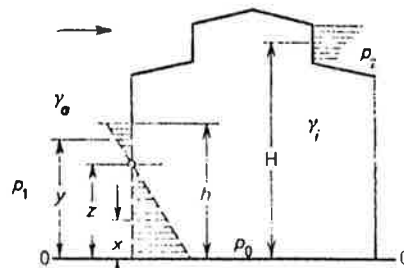


Figura 32.—Zona neutral.

Llamando  $G_1$  a la masa de aire entrante por la parte inferior de la abertura (hasta el nivel  $Z$ ),  $G'_2$  a la masa que sale por la parte superior de la abertura y  $G_2$  a la que sale por la abertura del techo, entonces la ecuación del balance de masas para el estado estacionario es:

$$G_1 = G'_2 + G_2.$$

Para el desarrollo de las ecuaciones anteriores, se supone que la presión barométrica exterior a nivel del suelo es nula, por lo que la presión total a este nivel será  $0 + P_1$ .

Para un nivel  $x = Z$ , la presión exterior es:  $P_{ax} = 0 - x \gamma_a + P_1 \text{ Kg/m}^2$  y la presión interna al mismo nivel es  $P_{ix} = P_0 + x \gamma_i$

Por tanto la diferencia de presión en el nivel  $x$  será  $\Delta P_x = P_{ax} - P_{ix} = P_1 - P_0 - x(\gamma_a - \gamma_i)$  cuando  $x = Z$  debe ocurrir  $\Delta P_x = 0$ , es decir:

$$P_1 - P_0 - (\gamma_a - \gamma_i) x = 0$$

así pues haciendo  $x = Z$  se tiene que  $Z$

$$Z = \frac{P_1 - P_0}{\gamma_a - \gamma_i} \text{ m.}$$

El caudal másico por unidad de superficie a causa de la diferencia de presión  $\Delta P_x$  a nivel  $x$ , es:

$$W \simeq \sqrt{2g \gamma_a [P_1 - P_0 - x(\gamma_a - \gamma_i)]} \text{ Kg/m}^2 \text{ s}$$

$$\text{pero } W = \frac{dG}{dF} \quad \text{donde}$$

$dG$  = diferencial de caudal

# Ventilación

$dF$  = diferencial de área abertura, o sea que

$$dF = adx$$

por lo que se tiene

$$G_1 = a \int_{x=0}^{x=Z} \sqrt{2g \gamma_a [P_1 - P_o - x(\gamma_a - \gamma_i)]} dx$$

$x = Z = \frac{P_1 - P_o}{\gamma_a - \gamma_i}$

$x = 0$

que integrada es

$$G_1 = \frac{2a \sqrt{2g \gamma_a} (P_1 - P_o)^{3/2}}{3(\gamma_a - \gamma_i)} \text{ Kg/s}$$

que da el flujo másico entrante por la parte inferior.

Para hallar el flujo másico  $G'_2$  del aire saliente por la parte superior de la abertura, se escribe la ecuación de la diferencia de presión a una altura  $Y > Z$ , referida también al plano a nivel del suelo

$$\begin{aligned} \Delta P_y &= P_o - y\gamma_i - (0 - y\gamma_a + P_1) = \\ &= P_o - P_1 + y(\gamma_a - \gamma_i) \end{aligned}$$

que como anteriormente se tiene

$$G'_2 = M'_2 a \int_{Y=Z}^{Y=h} \sqrt{2g \gamma_i [P_o - P_1 + y(\gamma_a - \gamma_i)]} dy$$

$Y = Z = \frac{P_1 - P_o}{\gamma_a - \gamma_i}$

$Y = h$

donde  $h$  es la altura total de la abertura y  $\mu'_2$  el coeficiente de descarga. Integrada se tiene:

$$G'_2 = \frac{2a M'_2 \sqrt{2g \gamma_i}}{3(\gamma_a - \gamma_i)} [P_o - P_1 + h(\gamma_a - \gamma_i)]^{3/2} \text{ Kg/s}$$

El caudal de salida por la abertura del lucernario, se calcula a partir de la diferencia de presión en su punto medio

$$P_o - H\gamma_i - (0 - H\gamma_a - P_2) = P_o + P_2 + H(\gamma_a - \gamma_i)$$

$$G_2 = \mu_2 F_2 \sqrt{2g \gamma_i [P_o + P_2 + H(\gamma_a - \gamma_i)]} \text{ Kg/s}$$

38

Así pues la ecuación del balance de masas de aire es

$$\begin{aligned} \frac{2a \sqrt{2g \gamma_a} (P_1 - P_o)^{3/2}}{3(\gamma_a - \gamma_i)} &= \frac{2a M'_2 \sqrt{2g \gamma_i}}{3(\gamma_a - \gamma_i)} \\ [P_o - P_1 + h(\gamma_a - \gamma_i)]^{3/2} &+ \\ + M_2 F_2 \sqrt{2g \gamma_i [P_o + P_2 + H(\gamma_a - \gamma_i)]} & \end{aligned}$$

Resolviendo esta ecuación se tienen determinados  $P_o$  y  $Z$  así como la renovación de aire.

Para determinar el área de la abertura, teniendo la diferencia de temperaturas, cuando las aberturas de paredes y techo tienen la misma área, se emplea la fórmula simplificada

$$\frac{\dot{V}}{F} = 420 \sqrt{H \cdot \Delta t} \frac{\text{m}^3}{\text{h} \cdot \text{m}^2}$$

donde:

$$\frac{\dot{V}}{F} = \text{Volumen de aire que pasa a través de } 1 \text{ m}^2 \text{ de abertura durante } 1 \text{ h}$$

$\frac{\text{m}^3}{\text{h} \cdot \text{m}^2}$

$H$  = Distancia vertical entre los puntos medios de las aberturas inferiores y las superiores (m)

$\Delta t$  = Diferencia de temperaturas (media) en el interior de la nave y la ambiental exterior ( $^{\circ}\text{C}$ )

Si el caudal de renovación calculado es  $\dot{V} \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$  el área necesaria en las aberturas superiores o inferiores es:

$$F = \frac{\dot{V}}{420 \sqrt{H \cdot \Delta t}} \text{ m}^2$$

Fórmula válida para  $\mu = 0,6$  y para un valor diferente es necesario dividir la ecuación por 0,6 y multiplicarla por el nuevo valor de  $\mu$

$$\frac{\dot{V}}{F} = \frac{\mu}{0,6} 420 \sqrt{H \cdot \Delta t} \frac{\text{m}^3}{\text{h} \cdot \text{m}^2}$$

A continuación se dan los coeficientes de resistencia al flujo de varios diseños de lucernarios de techo. En la *tabla n.º 4* se da  $\xi_o$  o sea la velocidad en la garganta del lucernario y  $\xi_1$  a la velocidad en el área libre de la persiana del lucernario.

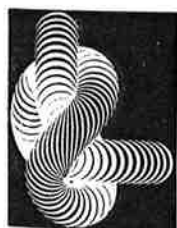
## 9) NOTA

Vista la ventilación natural o mixta, al caso de edificios de una sola nave, queda pues para concluir esta faceta de "renovación de aire" ver el caso de las multinaves, tan frecuentes y que ofrecen un importante campo de aplicación a la renovación de aire natural o mixta, con grandes ventajas técnico-económicas y sanitarias. Pero dada la amplitud precisa para su compleja exposición, será materia de un próximo futuro trabajo, ante la lógica limitación del espacio, con que cuenta toda colaboración en una revista.

Modelo de lucernario *	$\zeta_0$	$\frac{F_{persianas}}{F_{garganta}}$	Angulo de inclinación de las chapaletas de la rejilla o persiana, $\alpha^\circ$	$\zeta_1$
Instituto de Protección Laboral de Moscú (MIOT-2)	2,75	1,6	—	—
Baturin, n.º 1	7,3	1,49	45	16,2
Baturin, n.º II	22	0,63	45	8,8
Baturin, n.º II	5,9	0,63	80	2,4
Len PSP	15,0	0,45	80	3,1
KTIS	7,8	0,8	70	—

Tabla 4. — Características aerodinámicas de los lucernarios de techos.

Comercial  s. a.  
DISTRIBUIDOR DEL TUBO DE  
ALUMINIO SUPERFLEXIBLE



flexal

IDEAL PARA

para instalaciones

de

 Aire Acondicionado

 Ventilación

 Calefacción



representando además:

CLIMATIZADORES

 CIDASA

REJILLAS

 Euroclima

RECUPERADORES

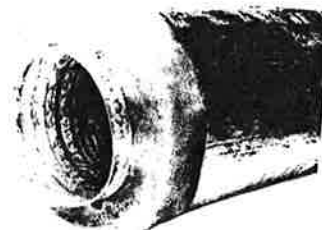
 GER

ANTIVIBRADORES

 KROON

FALSOS SUELOS

 kurko



CALORIFUGADO 40 C

DIAMETROS DISPONIBLES  
DE 82 HASTA 305 mm

comercial  s. a.

Oficinas: Pallars, 147, 1.º  
08018-BARCELONA  
Tel.: (93) 300 68 00