

VENTILACIÓN NATURAL EN HANGARES CON CERRAMIENTO PERMEABLE

E. Canela¹, S. Udrizar Lezcano¹, M. Adotti^{1,2}, J. Marighetti¹ y M. De Bortoli¹

1. Laboratorio de Aerodinámica-Facultad de Ingeniería- UNNE. Av. Las Heras 727- Resistencia – Chaco
Teléfono: (+54) 362 4439039 -e-mail: sudrizar@ing.unne.edu.ar
2. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Instituto de Modelado e Innovación Tecnológica (IMIT). Corrientes, Argentina.

Recibido: 11-03-19; Aceptado:03-06-19.

RESUMEN.- La ventilación industrial permite controlar factores como presencia de compuestos tóxicos, temperatura o humedad excesiva, presencia de polvo o impurezas, existencia de agentes explosivos o inflamables, entre otros, manteniendo el confort térmico y la prevención de fuego o explosiones, siendo la ventilación natural la alternativa que optimiza la economía en equipos y consumo de energía. Se analizó el proceso de ventilación natural de un hangar de grandes dimensiones, mediante estudio experimental en túnel de viento y modelado numérico de un modelo reducido, escala 1:50, de baja permeabilidad y aislación térmica. Se examinaron movimientos de masas de aire por convección natural, para distintos niveles de permeabilidad, sin intervención del viento atmosférico exterior; y posteriormente sometido a viento de capa límite atmosférico en túnel de viento. El modelado numérico se realizó con flujo laminar y estacionario, utilizando software de código libre y abierto OpenFOAM aplicando el procedimiento del método de volúmenes finitos, evaluándose distintas geometrías de mallas para representar adecuadamente las configuraciones de las permeabilidades adoptadas. La utilización de coeficientes de presión según normas para determinar caudales evidenció importantes limitaciones; la disposición con ambas filas de aberturas abiertas exteriorizó líneas de corriente con mínima recirculación y caudales superiores. Los resultados numéricos fueron consistentes con los experimentales.

Palabras claves: ventilación industrial, ventilación natural, ensayo experimental, modelado numérico, túnel de viento.

NATURAL VENTILATION IN HANGARS WITH PERMEABLE ENCLOSURE

ABSTRACT.- Industrial ventilation allows control factors such as presence of toxic compounds, excessive temperature or moisture, dust or impurities or even explosive or flammable agents, thus maintaining thermal comfort or preventing fire or explosion, being natural ventilation the very first choice for its evident resource economy and least energy consumption when implementing it. The ventilation process of a large size hangar was analyzed by means an experimental numerical research in a reduced prototype having a 1:50 scale and low permeability on their walls and a very low thermal insulation. Air mass motion by natural convection was researched for different permeability levels with no external atmospheric wind involvement at first and later subjected to external wind simulated into boundary wind tunnel. Numerical test made on hypothesis of laminar steady flow with open free code OpenFoam by means finite volume method, assessing different mesh settings in order to depict different openings adopted. By Using pressure coefficients according standard at determining flow showed strong limitations; opening arrangements having both rows opened threw more intense ventilation but ordered. Numerical results were consistent with the tested ones.

Keywords: Industrial ventilation, natural ventilation, experimental research, numerical test, wind tunnel.

1. INTRODUCCIÓN

En la industria se dan condiciones laborales en las que es preciso renovar el aire debido a diversos factores como son la presencia de compuestos tóxicos, temperatura o humedad excesiva, la presencia de polvo o impurezas, la existencia de agentes explosivos o inflamables, entre otros. El uso de la ventilación industrial permite controlar estos factores manteniendo el confort térmico y la prevención de fuego o explosiones. El parámetro más importante para el proyecto de ventilación es el caudal volumétrico de aire, determinado por las dimensiones de la instalación. El ingreso o salida de dicho fluido del edificio es afectado por la acción del viento sobre la estructura y por el denominado efecto chimenea generado por diferencia de presiones; sin la presencia de viento externo,

la ventilación se produce exclusivamente por la diferencia de temperaturas alcanzadas entre el aire externo y el interno del pabellón.

Considerando un edificio de base regular y alto (rectángulo esbelto), el efecto chimenea, sin considerar las aberturas, se genera por dos efectos simultáneos. Respecto al primero, por ser la temperatura interna mayor que la externa la densidad del aire interior es menor; generándose un estado de depresión en la base. En consideración al segundo fenómeno la presión estática del aire externo en la base de la pared exterior es mayor que en la parte superior. Estos dos efectos combinados generan fuerzas de flotación que producen el movimiento ascendente de las masas de aire en el interior de la chimenea. Al agregar aberturas, manteniendo las masas de aire externas sin movimiento la tasa de renovación de aire (caudal

volumétrico) resulta directamente proporcional al área de estas, al coeficiente de descarga, que involucra la geometría de la abertura, y la diferencia de presión manométrica dependiente de la variación de las densidades del aire.

Al incorporar el movimiento de masas de aire externas provocado por viento atmosférico la distribución de las presiones externas sobre la estructura es regida por la geometría de esta. Mientras que las presiones internas dependen de la ubicación de las permeabilidades respecto a la dirección media del flujo medio incidente. La interacción del desplazamiento de masas de aire con cuerpos sólidos da origen al área de estudio denominada aerodinámica de las construcciones. En la misma las diferencias de presiones son obtenidas por diferencias de coeficientes de presiones medios adimensionales externos e internos, resultando en este caso el caudal volumétrico proporcional a la diferencia de estos coeficientes. Usualmente los mismos son reportados en normas y reglamentos para formas geométricas regulares, de pequeñas dimensiones en planta y distribución de aberturas perimetrales de forma regular.

Sin embargo, estos coeficientes dependen de la velocidad del viento, que determina la configuración del flujo, los puntos de desprendimiento, el ancho de estela, las dimensiones de los vórtices en la cubierta y en bordes angulosos de las estructuras, perturbaciones provocadas por el entorno superficial, nivel de turbulencia de las masas de aire, entre otras. Surge entonces, la necesidad de definir con más precisión la distribución de los coeficientes de presión en las regiones del edificio donde se proyectarán las aberturas, así como definir la mejor ubicación para incrementar el rendimiento de la ventilación natural en los pabellones industriales. Un posible procedimiento, aún muy poco investigado, es el uso de modelos reducidos en túnel de viento para la determinación directa de tasas de ventilación, en lugar de la utilización de coeficientes de presión aplicados en modelos matemáticos. La ventaja potencial de esta aproximación directa es que la valoración de los efectos de viento es más precisa y permite complejizar la disposición interna de los espacios interconectados, considerar la influencia de entornos superficiales inmediatos al edificio principal, modificar el ángulo de incidencia del escurrimiento medio respecto al edificio, ubicación y dimensiones de las permeabilidades perimetrales, entre otras.

Otra herramienta utilizada para determinar el caudal volumétrico en este tipo de fenómeno es el modelado numérico. En este sentido para analizar problemas de fluidodinámica el método de los volúmenes finitos es ampliamente utilizado para discretizar algebraicamente las ecuaciones en derivadas parciales del tipo hiperbólico LeVeque, Randall (2002). Este consiste en calcular el balance del transporte de las propiedades provocado por el flujo de masa sobre cada cara de la celda utilizando las ecuaciones de conservación relacionadas al fenómeno analizado con las condiciones de borde adoptadas e hipótesis utilizadas (Moukalled, Mangani y Darwish, 2016). Para ello se realiza una discretización del campo analizado en celdas evitando la superposición de los volúmenes, y densificando la malla en las regiones donde se obtengan los máximos gradientes de las variables analizadas, por ejemplo, en cercanía de superficies curvas y cambios de forma con aristas angulosas, que favorecen el desprendimiento de capa límite y formación de vórtices.

Esta área del conocimiento, muy poco desarrollada en nuestro país, es necesaria principalmente en esta región, donde las temperaturas medias anuales son muy altas. Así para obtener un diseño optimizado desde el punto de vista energético es relevante que estos estudios se realicen en etapas de proyecto, ubicando los elementos que favorezcan la ventilación natural en los lugares más apropiados.

En la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Nordeste (UNNE), el Laboratorio de Aerodinámica ha acumulado experiencia en el análisis en condiciones controladas del efecto del viento mediante ensayos en túnel de viento con modelos reducidos, como así también en análisis numérico.

En este trabajo se presentan resultados del análisis de ventilación natural efectuados en el Laboratorio de Aerodinámica obtenidos utilizando técnica experimental y modelado numérico. Respecto al primero se realizaron ensayos en túnel de viento de capa límite con modelos a escala reducida del hangar considerando la masa de aire externa en estado estático y desplazada por un viento de capa límite de fondo. Para generar el efecto de variación de densidad del aire se empleó una fuente de inyección de calor en el piso del modelo.

El método numérico utilizó las ecuaciones de convección natural definido en base a las expresiones de continuidad, cantidad de movimiento lineal, ecuación cinética de estado y transferencia de calor en condiciones estacionarias. Se observa la existencia de convergencia en la configuración de las líneas de corriente del flujo de aire provocado únicamente por efecto de flotación (sin movimiento de masas de aire) y masas de aire externo en movimiento.

2. MARCO TEORICO

2.1.- Proceso físico.

La capacidad de renovación del aire y el factor de confort, de higiene y de salud en recintos de grandes dimensiones depende de la presencia de fuentes generadoras de calor interno y externo, de alteradores de la calidad del aire como ser gases, vapores, humedad, entre otros. La temperatura es la principal variable en el problema de la renovación del aire, por ello los análisis de los sistemas de ventilación deben considerar una etapa de evaluación de la ganancia de calor del ambiente interno, pérdidas de calor a través de las paredes, determinación del caudal de ventilación para alcanzar el confort térmico y, por último, el dimensionamiento del sistema de ventilación natural que proporcione el caudal requerido. De esta manera, la magnitud de la carga térmica total, factor crítico en el diseño del sistema de ventilación natural, que define el caudal de aire o tasa de renovación del aire, es el resultado de considerar la carga térmica generada internamente y la transferencia de calor con el exterior (Frota Schiffer, 2001). Para el cálculo de la tasa de renovación del aire en un edificio con aberturas, se adicionan los efectos chimenea y efectos de la acción del viento exterior.

Definida la carga térmica total del edificio, se puede especificar el caudal volumétrico del aire disponible para ventilación natural; la primera consideración es el caudal de aire intercambiado por las aberturas del edificio, que depende del área de estas, la diferencia de presión (efecto chimenea) en esas aberturas, un coeficiente de descarga y de la densidad del aire (Norma BS5925, Awbi, 1991).

Algunos modelos teóricos aproximados utilizados para la determinación del caudal de ventilación por efectos del viento, tales como, el de Toledo (1967), Van Straaten (1967), Fan Engineering (1970), Baturin (1976), Barros Frota (1989), entre otros, requieren para su implementación el conocimiento de la distribución de los coeficientes de presión media en los lugares donde se ubicarán las aberturas en los edificios. Los resultados muestran alto grado de disparidad, que tiene su origen en el tipo de hipótesis empleada para su cálculo.

Barros Frota (1989) señala que la disparidad se debe a dos factores principales, el primero refiere a las diversas expresiones analíticas utilizadas para el cálculo de los sistemas de ventilación de pabellones industriales, descritos en la literatura técnica específica, y el segundo a los valores de los coeficientes de presión media utilizados, los cuales son comúnmente obtenidos de normas de viento de origen estructural vigentes. En nuestro caso, la norma CIRSOC 102 (2001), en la valoración del coeficiente de presión local, no se ajusta apropiadamente al análisis del proceso de ventilación debido a que suministra coeficientes medios espaciales calculados para grandes superficies tributarias, denominados coeficientes de forma; en consecuencia, surgen fuertes controversias respecto a su uso en el cálculo de los sistemas de ventilación.

A continuación, se presenta en primer término la forma de cálculo de desplazamiento de masas de aire provocados por diferencia de temperaturas, es decir únicamente por fuerzas de flotación cuando las permeabilidades externas están cerradas (condición externa estática) y únicamente se genera volumen de extracción de aire.

En segundo lugar, se presentan los métodos teóricos de cálculo para el caso de interactuar la fuerza de flotación con ingreso y egreso de flujos externo mediante las permeabilidades de las paredes laterales (caso de condiciones externas dinámicas).

El Método de las Renovaciones de volúmenes de aire de CIBSE (Chartered Institution of Building Services Engineers); es un método simple y empírico que aporta valores medios de cambios de volúmenes de aire para distintos usos de ambientes en estudio, en función de la cantidad de personas, actividades que se desarrollen y producción de calor generadas. Tabula los valores medios de cambios de volúmenes de aire en recintos por el tipo de ambiente. Así, este procedimiento será utilizado para analizar los desplazamientos de masas de aire provocados únicamente por fuerzas de flotación, definiendo las áreas necesarias para ubicar extractores de aire en la cubierta del hangar (modelo con permeabilidades laterales herméticas).

Las expresiones analíticas frecuentemente utilizadas para determinar el caudal de las masas de aire cuando existen permeabilidades en las paredes laterales y conociendo la velocidad de ingreso del aire son:

- ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2001), emplea la expresión:

$$Q = E \cdot \bar{A} \cdot \bar{v} \quad (1)$$

donde

Q = Caudal de aire por efecto del viento (ft³/min), A = Área libre de la abertura de entrada de aire (ft²), v = Velocidad

media del viento (ft/min), E = Efectividad de la abertura (0,5 a 0,6 – para viento perpendicular a la abertura y 0,25 a 0,35 para viento en diagonal a la abertura).

- FROTA (Frota, 1989–Frota y Schiffer, 2000) sugieren:

$$Q = K \cdot \bar{A}_{eq} \cdot \bar{v} (C_e - C_s) \quad (2)$$

donde:

Q = Caudal de aire por acción del viento (m³/seg), K = Coeficiente de pérdida de carga (0,6), A_{eq} = Área equivalente de las aberturas (m²), v = Velocidad del viento externo resultante en la abertura (m/seg), C_e = Coeficiente de presión en la abertura de entrada del aire, C_s = Coeficiente de presión en la abertura de salida del aire. En lo que se refiere a A_{eq} será función de las áreas de entrada y salida de las aberturas, siendo obtenida por la ecuación:

$$1/\bar{A}_{eq}^2 = 1/\bar{A}_1^2 + 1/\bar{A}_2^2 \quad (3)$$

con:

A₁ = Área de la abertura de entrada (m²), A₂ = Área de la abertura de salida (m²).

- SILVANI (2005) propone, para la determinación del caudal de aire en las aberturas de entrada, por efecto del viento, la siguiente ecuación:

$$Q_{ev} = 0,61(Cpe_e - Cpe_s)^{1/2} \left(\frac{A_e^2 \cdot A_s^2}{A_e^2 + A_s^2} \right)^{1/2} v \quad (4)$$

donde:

v = Velocidad del viento no perturbado en la cota de referencia (m/seg), A_e = Área de las aberturas de entrada de aire, considerando aisladamente el efecto del viento (m²),

A_s = Área de las aberturas de salida de aire, considerando aisladamente el efecto del viento (m²), C_{pe_e} = Coeficiente de presión ponderado en las aberturas de entrada de aire, considerando aisladamente el efecto del viento, C_{pe_s} = Coeficiente de presión ponderado en las aberturas de salida de aire, considerando aisladamente el efecto del viento.

2.2.-Formulación matemática del problema.

Las ecuaciones que modelan el fenómeno físico de convección natural son cuatro, a saber: ecuación de continuidad, cantidad de movimiento lineal, cinética de estado y la ecuación de la energía térmica. Los fenómenos usualmente estudiados permiten la simplificación del número de incógnitas al considerar el proceso como estacionario anulando los términos relacionados a las variaciones temporales y suponiendo como condición de borde temperaturas fijas en las paredes y como generadora de calor interno placas calientes a temperatura constante, reduciendo los términos de la ecuación de transferencia de calor al no incluir como variable de análisis flujo calórico. A continuación se exponen las ecuaciones utilizadas en este trabajo:

Continuidad

$$\vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (5)$$

Cantidad de movimiento Lineal

$$d\vec{V}/dt = -\vec{\nabla} P/\rho + \vec{g} + 1/3 v \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{V}) + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (6)$$

Cinética de estado (Gas ideal)

$$P = \rho RT \quad (7)$$

Energía térmica

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \vec{\nabla} \cdot (k \vec{\nabla} T) - \vec{\nabla} \cdot (\vec{v} T) + \mu \phi + \frac{\dot{Q}}{k} \quad (8)$$

En su forma más simple (donde el coeficiente de difusión y la velocidad de convección son constantes y no hay fuentes o sumideros), proceso estacionario, la ecuación (8) es nula, simplificándose a la ecuación denominada "ecuación de advección-difusión":

$$\alpha \nabla^2 T - \vec{\nabla} \cdot (\vec{v} T) + \mu \phi + \frac{\dot{Q}}{k} = 0 \quad (9)$$

Siendo:

ρ densidad del aire, \vec{v} velocidad del aire, \vec{g} fuerzas másicas, \vec{P} fuerzas superficiales de presión, μ viscosidad cinemática del aire, R constante universal de los gases ideales, T temperatura del aire en K y \dot{Q} Generación de calor interna.

En la ecuación (9), el coeficiente α es la difusividad térmica del aire y representa la velocidad con que se propaga el calor a través del mismo. Su expresión es:

$$\alpha = k / \rho C_p$$

Siendo

C_p coeficiente de calor a presión constante y k la Conductividad térmica del aire.

El término ϕ (ecuación 8 y 9) es la función "disipación viscosa" que representa el calor generado por el roce interno del fluido, cuyo valor es despreciable en fenómenos de flotación debido a la baja velocidad y por ser la viscosidad del aire pequeña.

En general, la conductividad térmica k depende de la temperatura T. No obstante, se puede suponer que permanece constante en algún valor promedio.

Con estas simplificaciones y considerando el fenómeno de flotación con el modelo hermético, sin producción de calor interno y en proceso estacionario:

$$\alpha \nabla^2 T - \vec{\nabla} \cdot (\vec{v} T) = 0 \quad (10)$$

Respecto al término de transferencia de calor por advección ($\vec{v} \cdot \vec{\nabla} T$) en materiales sólidos no se incorpora pero por tratarse con fluidos (aire) es incorporado en los modelos matemático y físico implementado.

2.3.- Método experimental

Para realizar los ensayos en condiciones controladas se aplicaron las leyes de semejanza geométrica, cinemática y dinámica entre modelo y prototipo, y para reproducir la semejanza cinemática entre el viento de capa límite atmosférica con las velocidades en el túnel de viento se utilizó la capa límite turbulenta generada en la cámara de ensayo. En este sentido se implementaron técnicas para modelar a escala reducida los movimientos de masas de aire superficiales en túnel de viento, para el tipo de terreno correspondiente al lugar de emplazamiento del pabellón a evaluar. Las técnicas de simulación utilizadas son las mismas reportadas en trabajos anteriores (De Bortoli y otros, 2002).

Para modelar las fuerzas de flotación provocada por fuentes de temperatura se deben verificar los números adimensionales de Reynolds, Arquímedes, Grashof y Prandtl.

La semejanza de los mecanismos de convección se obtiene para un rango de variación del producto entre el Número de Grashof y el Número de Prandtl. en el rango de: $2 \times 10^7 < \text{GrPr} < 2 \times 10^{13}$.

En el presente estudio, considerando los efectos de bloqueo en la cámara de ensayos en el túnel de viento, la escala del modelo se definió 1/50, alcanzando un valor del producto del Número de Grashof y el Número de Prandtl de 3.44×10^7 .

Para los estudios en túnel de viento el modelo no debe presentar una superficie mayor al 8 % de la sección transversal de la cámara de ensayo de manera de no provocar estrangulamientos de flujo de aire, modificando velocidades correspondientes por leyes de semejanza. En este caso el porcentaje de ocupación fue del 6.77%. Además, varios estudios en modelos en escalas de 1/20 y 1/50 confirman la validez de condiciones para la reproducción de la renovación del aire por diferencias de temperaturas (Baturin, 1976).

Para contrastar los resultados obtenidos en condiciones controladas con los medidos en escala natural se adimensionalizan los resultados (Linden, 1999). Esto implicó una evaluación crítica de los parámetros de adimensionalización para este tipo de fenómenos, que se realizara con base en trabajos anteriores (Silvani, 2005).

3.-DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS

3.1.- Estudio Experimental

El prototipo es el hangar aeronáutico del Laboratorio de Aerodinámica de la Facultad de Ingeniería de la UNNE (figura 1), ubicado en Resistencia, Chaco. La elección responde a la posibilidad de, en un futuro cercano realizar mediciones en escala natural del movimiento del aire interior, para calibrar y comparar las técnicas de medición de movimientos y velocidades de las masas de aire en condiciones controladas y en prototipo. Las dimensiones del modelo se indican en figura 2.

Los ensayos se dividen en dos etapas, en una primera se analiza el comportamiento del flujo convectivo en el interior del modelo, sin intervención de viento, producto de las fuentes de calor que simulan maquinarias y personas desarrollando distintas actividades. Esta aproximación se utiliza para calibrar el modelo adoptado, comparando con la bibliografía clásica donde las condiciones externas son estáticas, y las variables usualmente medidas son la velocidad y temperatura del aire que atraviesa las aberturas del modelo. En la segunda etapa se adiciona el efecto del viento atmosférico incidente sobre el hangar generando condiciones externas dinámicas. De todas las direcciones posibles del viento medio incidente se analizaron únicamente dos direcciones; perpendicular a la cumbre y formando un ángulo de 30°.

La primera dirección analizada refiere a la condición de mayor incidencia del viento externo en el movimiento de las masas de aire en el interior del hangar por quedar expuestas las aberturas en forma perpendicular a la dirección del escurrimiento externo medio, que presenta un comportamiento aerodinámico directo con presiones positivas en una cara y presiones negativas en la otra cara lateral. Sin embargo, el segundo caso representa una condición de dirección oblicua de viento con respecto al área de las permeabilidades y representa una configuración

aerodinámica más compleja generando presiones positivas y negativas en las caras laterales adicionando los efectos de remolinos de reataque provocados por desprendimiento en los bordes angulosos del hangar en las secciones laterales.

En cada etapa se consideran tres configuraciones de las aberturas: a) las superiores abiertas y las inferiores cerradas, b) las inferiores abiertas y las superiores cerradas y c) tanto superiores como inferiores abiertas.

Se utiliza un modelo a escala realizado en policarbonato compacto transparente (figura 3) y ocho placas calentadoras de 10 cm por 40 cm con una potencia de 300 Watts cada una para simular las fuentes de calor ubicadas en el piso del modelo. Una máquina generadora de humo a base de glicerina junto con un gabinete estanco colocado bajo del modelo, de modo de concentrar el humo bajo el mismo antes de dejarlo entrar por rendijas existentes entre las placas para permitir el paso del humo que será utilizado como elemento trazador.



Fig. 1: Planta, corte y vista del laboratorio de aerodinámica de la UNNE.

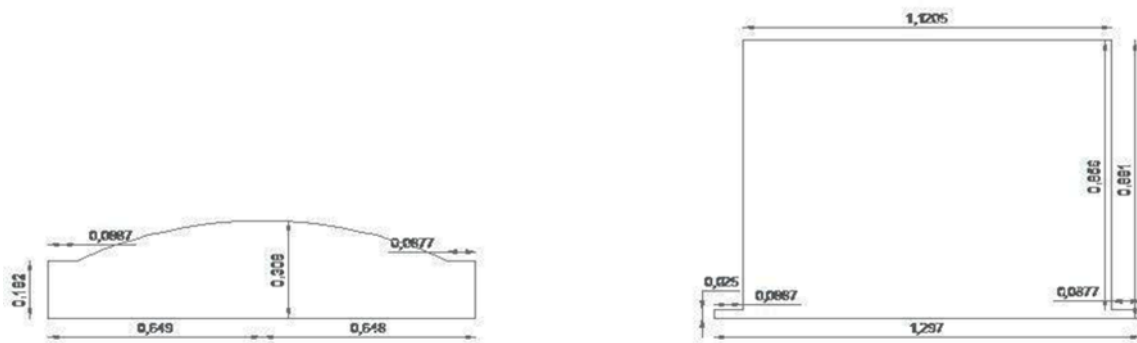


Fig. 2: Dimensiones del modelo a ensayar

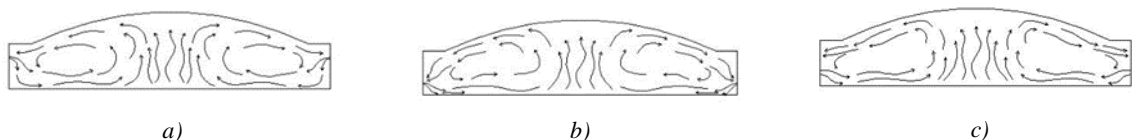


Fig. 4: Modelo de hangar, sin viento exterior, a) con aberturas superiores abiertas, b) con aberturas inferiores abiertas y c) con aberturas superiores e inferiores abiertas.

Para la realización del ensayo se coloca el modelo en un ambiente cerrado donde no exista ninguna fuente de movimiento del aire. Dentro del modelo a 4 cm por encima de las placas calentadoras se coloca un termómetro. Esta

altura se deja por considerarla suficiente para que el flujo calórico se mezcle en la masa de aire que se eleva.

La temperatura de las placas se reguló mediante un termostato conectado a ellas. Mientras que las temperaturas de las masas de aire quedan definidas por el termómetro.

Para reproducir el fenómeno de flotación y mantener vigente las leyes de semejanza se encienden las placas calentadoras hasta alcanzar una diferencia de 10°C respecto a la temperatura ambiente.

La imposibilidad de registrar velocidades de las masas de aire con los instrumentos utilizados habitualmente en los ensayos en túnel de viento condujo al empleo de métodos de análisis de imágenes para la medición de velocidades mediante el uso de láser desarrollado por Hoyos y De Paul (2014).

Para la visualización del flujo de aire se utilizó un láser color verde de 60 mW, modelo K600 con controlador de consola DMX, generando un plano láser a partir de espejos batientes que excita las partículas de glicerina haciéndolas brillar dentro de dicho plano, lo que posibilita la visualización y grabación (Figura 3). La grabación de videos, formato .mov, se realiza con cámara fotográfica Nikon Coolpix P520; adicionalmente, se emplea una cámara térmica Fluke T9 para; la obtención de imágenes térmicas de la distribución de temperaturas al momento de las mediciones.

Finalmente se utiliza el programa SCIPRO desarrollado con software SCILAB para cargar los videos junto con los datos que el mismo necesita para la ejecución de sus rutinas para obtener los valores de velocidad.

Al utilizar humo obtenido a base de glicerina como elemento trazador, no existen puntos discretos a seguir, tal y como lo hacía el programa SCIPRO en su concepción original, por ello se lo modificó para identificar fronteras o patrones de líneas. Así, para definir las trayectorias el programa utiliza como referencia el punto baricentro de cada línea de frontera.

El método de ensayo consiste en saturar el aire interno del modelo cerrado herméticamente con humo, para posteriormente desobstruir las aberturas a estudiar analizando el flujo de aire más frío y denso que ingresa desde el exterior. Esto genera una diferencia de coloración entre el aire exterior y el interior lo que se traduce en líneas de borde analizadas por el programa. Una vez estabilizado el flujo de masas, la velocidad resultante es el promedio de todas las velocidades registradas entre cada par de imágenes (Vilte y De Paul, 2004; Hoyos y De Paul, 2014).

La bibliografía de referencia menciona que el error del método proveniente de la medida del tiempo de captura y la medida de la longitud de la traza en la imagen capturada que es la que finalmente discretiza el programa oscila en un 22% (Hoyos y De Paul, 2002).

Se registran también las temperaturas aproximadas del aire de entrada y salida del modelo mediante la utilización de una cámara termográfica que detecta la energía infrarroja irradiada. Por ello se colocó un alambre metálico fino en una de las aberturas tanto superiores como inferiores. El que, por su elevado coeficiente de transmisión de calor iguala la temperatura del aire en poco tiempo permitiendo a la cámara registrar las temperaturas de interés en forma indirecta.

3.1.1 Ensayos sin viento exterior

En el ensayo en condiciones externas estáticas, con permeabilidades superiores abiertas, el movimiento del aire

coincide con el indicado en la bibliografía consultada; donde la masa fluida ingresante desciende, avanza en niveles próximos al piso, elevándose luego a medida que ingresa al sector de las placas calentadoras hasta que el movimiento es netamente ascendente, como se observa en Figura 4a. Al alcanzar el techo del hangar el flujo se redirecciona y escurre a través de las mismas aberturas por donde ingresara. En los ensayos se observa, que al no existir perturbaciones externas los escurrimientos presentan una configuración simétrica. La abertura superior permite tanto el ingreso como el egreso del aire en forma simultánea y continua ya que el aire caliente en la parte superior produce mayor presión para salir, disminuyendo las secciones disponibles para entrada y salida en un proceso continuo.

Con las permeabilidades inferiores abiertas (caso b), la entrada y salida de aire es intermitente; el flujo en un momento escurre hacia el exterior por la sección total de la abertura y, al siguiente ingresa.

En el caso c) con ambas filas de permeabilidades despejadas los escurrimientos son más ordenados y uniformes; observándose que el ingreso y egreso de las masas de aire se producen por las aberturas inferiores y superiores respectivamente.

3.1.2 Ensayos en condiciones externas dinámicas

Las velocidades de las masas de aire se miden, en forma similar al caso anterior, con el modelo situado en la cámara de ensayos del túnel de viento, con una velocidad de escurrimiento del aire exterior de 1 m/seg. Se procedió en este caso al análisis del comportamiento de la ventilación y simultáneamente a la obtención de coeficientes de presión medios sobre las paredes del modelo. Como ya se explicara esto se realizó para dos ángulos de incidencia del viento. Para determinar la velocidad del viento medio en condiciones no perturbadas dentro del túnel de viento se utilizó un tubo de Pitot-Prandtl conectado a un micro manómetro.

Los coeficientes de presión media sobre el modelo se determinaron instrumentando el mismo con múltiples orificios ejecutados en distintos puntos, conectados a un multimanómetro de alcohol. Para la dirección con viento perpendicular a la cumbre, el comportamiento de la ventilación cambió sensiblemente.

Con las permeabilidades superiores abiertas, el flujo de aire externo que ingresa al modelo prevalece, modificando el flujo simétrico provocado por las fuerzas de flotación expuestas anteriormente en Figura 4 a; a este efecto debe adicionarse la zona de presión negativa que se genera sobre el lateral opuesto al ingreso por la interacción del flujo externo con la geometría del hangar, originando zonas de presiones negativas externas al modelo. (Figura 5a).

Con las aberturas inferiores abiertas, se produce el efecto opuesto de la circulación de flujos internos; se observa un remolino de grandes dimensiones en contacto con la permeabilidad de ingreso y desplazando uno de menor dimensiones hacia la permeabilidad de egreso (Figura 5b) Así la velocidad de salida del aire disminuye al interactuar con el remolino generado por el flujo externo a sotavento.

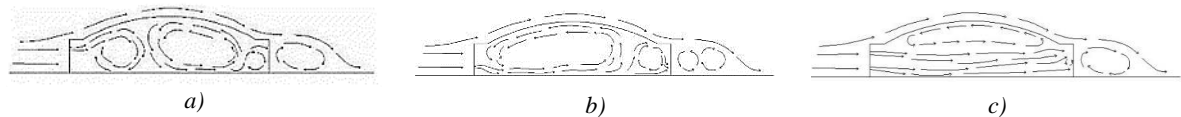


Fig. 5: Modelo con viento incidiendo a 90°, a) aberturas superiores abiertas, inferiores cerradas b) aberturas inferiores abiertas, superiores cerradas y c) ambas aberturas abiertas

Con aberturas superiores e inferiores abiertas, la velocidad de salida no mantiene relación con los casos anteriormente analizados. Limitaciones del programa de cálculo de velocidades, a causa de la rápida disipación del humo por turbulencia, no permiten registrar un frente de aire reconocible para el programa. Sin embargo, por el movimiento del aire mediante inspección visual, se estima la velocidad de salida del aire en valores similares al caso de la abertura superior abierta previamente analizado, en tanto que el aire que sale por la abertura inferior lo hace a una velocidad notablemente menor.

4.-ANÁLISIS NUMÉRICO

El problema matemático de transferencia de calor por convección natural de masas de aire puede ser analizado analíticamente en casos simples donde las geometrías y condiciones de borde son sencillas, muchas veces en dimensiones reducidas respecto a las del fenómeno real, por ello y debido a complejidad de la geometría y disposición de las condiciones de borde se opta para la resolución el uso del software OpenFOAM utilizando una geometría tridimensional representada en la figura 6. La hipótesis de estacionariedad temporal permite reducir el costo computacional sin perder información sensible para contrastar con el ensayo experimental que ha utilizado valores promediados de velocidad. Además, se han definido condiciones de borde fijas asociadas a valores de temperatura en las paredes internas del modelo y placas calientes. En las ventanas se impusieron condiciones de borde de presión de salida.

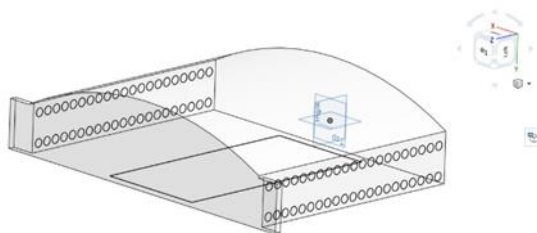


Fig. 6: Geometría tridimensional empleada

Se han realizado dos mallas para distintas configuraciones de apertura de ventanas, completamente cerradas y completamente abiertas. Ambas fueron realizadas con elementos hexaédricos los cuales poseen ventajas de estabilidad durante el proceso iterativo de resolución del sistema de ecuaciones definido en el proceso de discretización del dominio físico y matemático. Se han optado estrategias de mallado aumentando la densificación de elementos en las cercanías a las ventanas y se ha realizado el

mallado de la capa límite en el suelo del modelo con un espesor de cinco elementos. No se ha reportado durante el proceso de mallado ningún elemento anómalo o de mala calidad. La malla completamente cerrada posee un total de 348735 celdas y la completamente abierta 1600000 celdas, la diferencia en cantidad de elementos es debido a la densificación en las ventanas (figura 7).

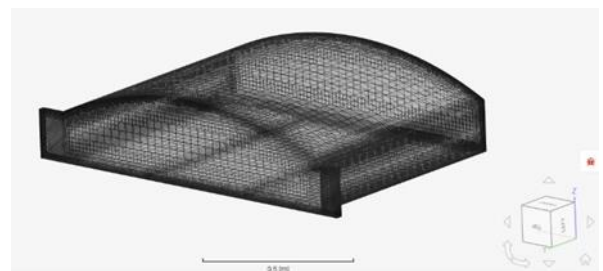


Fig. 7: Mallado efectuado para análisis computacional

Para esta etapa de desarrollo del método numérico aplicado, el análisis comparativo entre los resultados obtenidos en condiciones controladas en el área y los provenientes aplicando las herramientas de modelado numérico se limitarán al caso de desplazamiento de masas de aire provocados únicamente por efecto de flotación en condiciones estáticas externas.

5.- DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1 Ensayo Experimental.

Se comparan los requerimientos de volúmenes de aire para ventilación, obtenidos en este trabajo respecto a los obtenidos aplicando cálculos analíticos.

Se exponen en Tabla 1 las velocidades del aire obtenidas utilizando las expresiones analíticas presentadas en la sección 2.1 a efectos de permitir el contraste de los resultados. Obtenidas las velocidades del aire y temperatura de este podemos calcular el volumen de aire caliente saliente del interior del modelo.

La Tabla 2 muestra las velocidades y temperatura obtenidas para cada situación ensayada. Donde la velocidad está descompuesta en sus dos componentes V_x y V_y dentro del plano de estudio. Para la obtención de los valores de velocidad se introdujeron en el programa las coordenadas de puntos de referencia, dentro del plano en estudio dado por el láser, de este modo el programa transforma los píxeles en unidades de longitud y toma un promedio de los desplazamientos de las imágenes en el tiempo indicado al cargar los datos.

Tabla 2: Velocidades y temperaturas en las aberturas en diferentes configuraciones de los ensayos.

Abertura	V _x promedio (m/seg)	V _y promedio (m/seg)	Temperatura en abertura (°C)
Superior	0.0001611	0.0001878	32.59
Inferior	0.0046126	0.0034226	29.09
Ambas	0.0004474	0.0001772	28.44 – 26.28

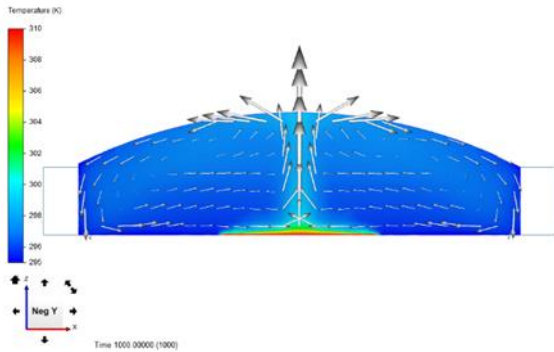


Fig. 8: contornos de temperatura y líneas de corriente en plano central del modelo.

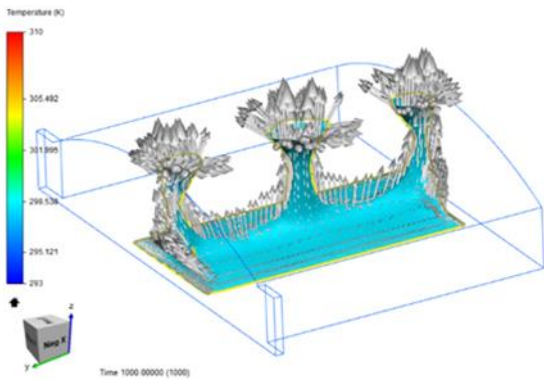


Fig. 9: Superficies de iso-temperatura equivalentes a 298 K y vectores de velocidad más representativos

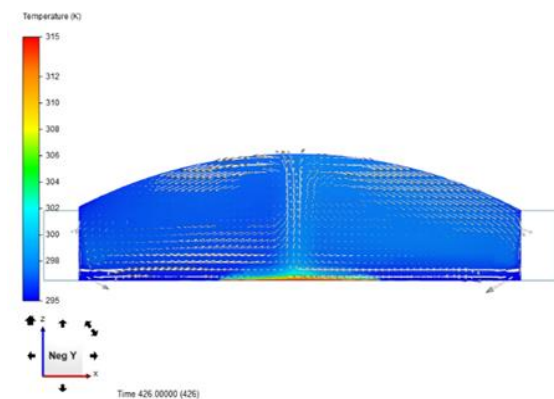


Fig. 10: distribución de temperatura y patrón de velocidades coincidente con el expuesto en Fig. 4c.

5.2 Resultados Numéricos.

En Figura 8 se presentan los contornos de temperatura y líneas de corriente en un plano xz, ubicado en la parte central del modelo herméticamente cerrado; indicándose asimismo la distribución de temperatura, la columna central de masa de aire ascendente y los núcleos simétricos laterales debidos a la recirculación. De forma complementaria se presentan en la Figura 9 las superficies de iso-temperatura equivalentes a 298 K y los vectores de velocidad más representativos, revelando las columnas ascendentes de aire dentro del modelo hermético, producidos por la recirculación interna en las 2 dimensiones más representativas de la placa caliente.

En la Figura 10 se observa la distribución de temperatura y el patrón de velocidades coincidente con el expuesto para la

misma configuración de ventanas del análisis experimental de la Figura 4c, donde el aire ingresa por las aberturas inferiores y egresa por las superiores.

En Figura 11 se distinguen dos columnas de masas de aire por el efecto de recirculación y caudales de entrada producido a través de la línea de ventanas inferiores y salida por las aberturas superiores.

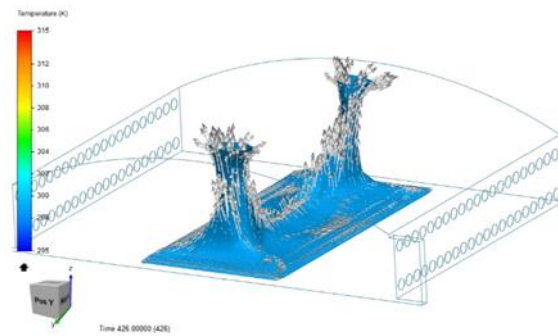


Fig. 11: Superficies de iso-temperatura equivalentes a 299 K y vectores de velocidad más representativos

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se analizaron tres procedimientos para estudiar el fenómeno de ventilación natural en estructuras bajas con grandes superficies en planta; a saber: modelos teóricos, aplicando técnicas experimentales y utilizando herramientas de modelado numérico.

Parte estática: Respecto al análisis del fenómeno de flotación con aberturas herméticas denominado sistema extractor de aire las visualizaciones del movimiento del fluido por diferencia de temperatura aplicando técnicas experimentales y numéricas son similares. Las velocidades medidas en el modelo del hangar comparadas con las reportadas en las tablas de CIBSE están en el mismo orden. Sin embargo, cabe destacar que la mayor dificultad en este trabajo fue la medición de la velocidad del movimiento de masas de aire. El procedimiento utilizado para medir bajas velocidades y temperaturas que genera el movimiento convectivo de las masas de aire no permite disponer de una sensibilidad y precisión acordes a los instrumentos específicos del laboratorio, introduciendo grandes incertezas. Por ello, resulta relevante en estos estudios enfocar el análisis en la

contrastación de las similitudes de las líneas de corriente en los modelos numérico y experimental.

Este análisis que no considera flujo externo se denomina en condiciones estáticas externas. Bajo este mismo sistema podría ampliarse considerando la ubicación de aberturas laterales reconociendo que el flujo externo es nulo.

Los estudios numéricos realizados solamente refieren a este sistema. Para el caso de flotación pura (modelo extractor de aire) las líneas de corriente se distribuyen de manera similar a lo observado en túnel de viento. Al adicionar las ventanas laterales los resultados en el modelado numérico evidencian una disminución en la intensidad de los movimientos de masas de aire verticales dado la facilidad de disponer otras vías de salida, demostrando la debilidad del fenómeno de fuerzas de flotación.

Al adicionar el desplazamiento externo de masas de aire el efecto de flotación se combina con el escurrimiento horizontal externo, dando origen al sistema externo dinámico. En este sistema los métodos teóricos de determinación de caudales o velocidades de aire dependen de coeficientes de presión media usualmente obtenidos de normas o reglamentos siendo estos constantes para aberturas dispuestas en cualquier ubicación sobre esa pared.

Mediciones efectuadas en el túnel de viento, con reproducción de la interacción fluido-estructura manteniendo la validez de las leyes de semejanza geométrica, cinemática y dinámica demuestran que los valores de los coeficientes de presiones difieren en función de su ubicación en la pared correspondiente. Esto se debe a las complejidades de los fenómenos aerodinámicos provocados por la geometría y tamaño del cuerpo, tales como desprendimientos de capa límite, estelas, estrangulamiento de líneas de corriente, vórtices de base, entre otros que distorsionan al flujo incidente no perturbado.

Así, el método experimental permite definir con mayor precisión la distribución de los coeficientes de presión en regiones del edificio donde se proyectan las aberturas para incrementar el rendimiento de la ventilación natural en los pabellones industriales.

Otra utilidad del ensayo en túnel de viento es que permite efectuar análisis para diversas direcciones de viento, modificación de superficies y ubicación de aberturas, confiabilidad de los resultados, lo que habilita obtener los caudales de ventilación para un amplio espectro de situaciones controladas.

En el presente trabajo se concluye que el cálculo de caudales de aire para ventilación natural de una nave industrial, hangar o edificación de amplio volumen interior con mínimas divisiones internas a través de formulaciones matemáticas muestra fuertes limitaciones. Las que se deben principalmente a la utilización de los coeficientes de presión obtenidos de normas de viento para edificación civiles y fórmulas que en principio no ajustan a la realidad del fenómeno en estudio. Por lo tanto, resulta recomendable la realización de ensayos experimentales en túnel de viento. Ello permite obtener dichos valores en situaciones controladas de ensayos con modelos reducidos y profundizar la comprensión de los procesos de ventilación natural, generando conocimientos aplicables a una norma como complemento de las existentes.

En futuros ensayos es importante repetir los procesos de medición para distintas velocidades del viento, para obtener patrones de comportamiento de la ventilación. En general, las naves industriales abovedadas, conocidas como tinglados, presentan geometrías similares. En estos, las permeabilidades se disponen en las paredes laterales paralelas a la cumbre, o mediante extractores o lucernarios en los techos. De este modo, se podría sistematizar los resultados de manera de desarrollar un reglamento de configuraciones mínimas de coeficientes de presiones medidos en condiciones controladas de manera similar a los reportados por los reglamentos para determinar las cargas provocadas por el viento.

Las ventajas en la aplicación de los métodos numéricos radica en la posibilidad de aportar información completa de las variables del modelo matemático que representa el campo físico estudiado, complementando los datos obtenidos en el ensayo experimental, al procesar la información con mayor detalle y presentarlos de forma gráfica, muchas veces imposibles de evaluar experimentalmente.

Así, mediante la simulación numérica es posible definir superficies de iso-temperaturas que permiten identificar columnas ascendentes de aire observadas en las configuraciones estudiadas. En este sentido una aplicación del post-proceso de los datos numéricos en particular de las iso-superficies de temperatura presentadas sería determinar la posible ubicación óptima de extractores de aire para lograr una instalación superior acorde parámetros establecidos de confort higrotérmico.

REFERENCIAS

- ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers): <https://www.ashrae.org/technical-resources/ashrae-handbook>
- Awbi H. B. (1991). Ventilation of buildings, 2° edition, Spon. London
- Baturin V. V. (1976). Fundamentos de ventilación industrial, 1° edición, Editorial labor S.A. España.
- Barros Frota A. (1989). Ventilação de edifícios industriais, Teses de Doutorado, Universidade do São Paulo, Faculta de Arquitetura e Urbanismo.
- British Standards Institution. Code of practice for ventilation principles and designing for natural ventilation: BS 5925. London, 1991.
- CIBSE (Chartered Institution of Building Services Engineers) <https://www.cibse.org/knowledge/knowledge-items/detail?id=a0q20000006oamlAAA>
- CIRSOC 102 (2001), Acción del Viento sobre las Construcciones, CIRSOC-INTI
- De Bortoli M., Natalini B., Paluch M, Natalini M (2002) Part-depth wind tunnel simulations of the atmospheric boundary layer, *JWEIA*, Volume 90, Issues 4-5. Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0167-6105\(01\)00204-5](https://doi.org/10.1016/S0167-6105(01)00204-5)
- De Paul I.; Hoyos D. (2014). Sistema de medición de flujos de aire. Proyecto del CIUNSA Consejo de Investigación Universidad Nacional de Salta.
- Fan Engineering Handbok an engineer's handbook on air, its movement and distribution in air conditioning, combustion, conveying and other applications employing fans (1970) edited by Richard D. Madison. University of Wisconsin
- Hoyos D. y De Paul I. (2002). Error en la medida de velocidad en fluidos aplicando técnicas PIV. *Avances en energías renovables y medio ambiente*, 6,2, 08.121-08.126

- LeVeque, R. (2002). *Finite Volume Methods for Hyperbolic Problems*. Cambridge University Press.
- Linden P. (1999). The fluid mechanics of natural ventilation, *Annual Review of Fluid Mechanics*. **31**:201-238. http://maeresearch.ucsd.edu/linden/pdf_files/75199.pdf
- Moukalled, F. (2016.). *The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics. An Advanced Introduction with OpenFOAM® and Matlab*. Springer.
- Silvani M. (2005). *Subsídios para o projeto da ventilação natural em pavilhões industriais, teses de maestria, Universidade de Passo Fundo. Brasil.*
- Schiffer, S.; Frota, A. (2001). *Manual de Conforto Térmico*. 5ª ed. São Paulo: Studio Nobel. São Paulo. Brasil.
- Toledo E. (1967). *Ventilação Natural dos Edifícios*. LNEC-Lisboa. Portugal
- Van Straaten J. (1967). *Thermal performance of buildings*. Amsterdam, New York: Elsevier Pub. Co.
- Vilte M. y De Paul I. (2004). Convección natural en aire, medidas de temperatura y visualización del flujo. *Avances en energías renovables y medio ambiente*, **8**, 2, 08.25-08.30.
- Wittwer A.; De Bortoli M.; Natalini M. B. (1999), Variación de los parámetros característicos en una simulación de la capa límite atmosférica en el túnel de viento. *Avances en Energías Renovables y Ambiente*. **3**, 2, 61-64.