



SIMULACION DE LA CAPA LIMITE PARA ESTUDIOS DE DISPERSION ATMOSFERICA EN TUNEL DE VIENTO

Adrián R. Wittwer¹, Acir M. Loredou Souza², Edith B. Camano Schettini³

¹Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Nordeste
Av. Las Heras 727, CP 3500, Resistencia, Argentina
e-mail: tunel@ing.unne.edu.ar - Tel.: (03722) 439039

²Laboratorio de Aerodinámica de las Construcciones, UFRGS, Brasil

³Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS, Brasil

RESUMEN: Para el estudio de problemas de dispersión atmosférica en túneles de viento es necesario simular físicamente las características del flujo de capa límite atmosférica y modelar la fuente de emisión de gases. Este trabajo se restringe a la primera etapa, es decir, la reproducción del escurrimiento atmosférico en la cámara de ensayos del túnel de viento y, básicamente, el objetivo es el análisis de una capa límite simulada. Se muestran resultados de mediciones realizadas en el túnel de viento de la UNNE en una simulación de capa límite neutral y, a partir de esas mediciones, se describe el proceso de evaluación de las características de la capa límite. El análisis de los resultados obtenidos hasta el momento permite concluir que es factible realizar estudios de dispersión atmosférica en este túnel de viento.

Palabras clave: capa límite atmosférica, dispersión atmosférica, túnel de viento.

INTRODUCCION

La polución del aire incluye problemas a nivel de micro-escala como la contaminación de ambientes interiores, la polución del aire ambiente a nivel de meso-escala provocada por fuentes industriales y emisiones de automóviles, y los problemas de macro-escala que incluyen transporte de contaminantes a distancias muy grandes e impacto global. La dispersión de los contaminantes atmosféricos depende de las condiciones meteorológicas de la capa límite atmosférica y, en el sentido más amplio, es controlada por las fluctuaciones de velocidad y dirección del viento. La estabilidad atmosférica, la topografía de la zona, y la rugosidad superficial del terreno tienen gran influencia sobre la extensión necesaria para que las emisiones sean diluidas por el viento.

Son enormes los tipos y la cantidad de problemas relacionados a la polución del aire. Estos incluyen humos de origen industrial, gases emitidos desde procesos químicos, emisiones de fábricas e usinas, dispersión de olores indeseables, etc. El estudio de estos fenómenos, generalmente, no puede realizarse a partir de la formulación convencional de la difusión y el túnel de viento de capa límite atmosférica se torna una herramienta muy importante para este tipo de análisis, ya que la experimentación a escala natural es muy costosa. Los resultados experimentales son también fundamentales para la validación de los modelos numéricos de simulación de dispersión de contaminantes.

La simulación física de problemas de dispersión de contaminantes en túneles de viento comprende dos etapas; la reproducción del escurrimiento de aire en la capa límite atmosférica y, posteriormente, la simulación de la fuente y del proceso de emisión. Para simular el viento atmosférico, el túnel de viento debe tener una longitud de cámara de ensayos apropiada. En los túneles llamados de capa límite, la longitud de la cámara de ensayos es lo suficientemente larga como para poder incluir en su interior el equipamiento de simulación necesario para poder reproducir, en una escala apropiada, las características del escurrimiento atmosférico en la sección de ensayos. La aplicación del túnel de viento a problemas ambientales no se restringe a los estudios de difusión. Actualmente, en el planeamiento de una ciudad se realizan estudios de confort de peatones que, mediante ensayos en túnel de viento, analizan modificaciones en el campo de vientos y posibilidad de ráfagas.

SIMULACION DE LA CAPA LIMITE ATMOSFERICA EN UN TUNEL DE VIENTO

Simular la capa límite atmosférica en un túnel de viento consiste en desarrollar un modelo físico del flujo turbulento atmosférico de manera tal que los parámetros que lo caracterizan se reproduzcan lo más fielmente posible dentro del túnel. Es necesario, como en cualquier estudio de modelo y prototipo, utilizar el análisis dimensional. Esto es, definir cantidades de referencia que permitan adimensionalizar las ecuaciones representativas del fenómeno, y que conducen a un conjunto de parámetros o números adimensionales que deben mantenerse iguales en modelo y prototipo.

En resumen, los requerimientos generales de semejanza para modelar la capa límite atmosférica de acuerdo a Cermak & Takeda (1985) son:

- Semejanza geométrica
- Igualdad del Número de Reynolds $U_0 L_0 / \nu_0$
- Igualdad del Número de Prandtl $\nu_0 \rho_0 C_{p0} / k_0$
- Igualdad del Número de Rossby $U_0 / (L_0 \Omega_0)$
- Igualdad del Número de Richardson $\Delta T_0 L_0 g_0 / (T_0 U_0^2)$
- Semejanza de las condiciones de borde (que incluyen flujo incidente, temperatura de superficie, flujo de calor y gradiente de presión longitudinal)

En las expresiones de los números adimensionales, U es la velocidad, L es longitud, ν viscosidad cinemática, ρ densidad, C_p calor específico a presión constante, k conductividad térmica, Ω velocidad angular, g aceleración gravitacional y el subíndice θ indica que son cantidades de referencia.

Algunos autores indican además, como requerimientos de semejanza, al número de Strouhal, que puede no ser considerado si se aproxima el campo del escurrimiento mediante flujo estacionario, y al número de Eckert, que relaciona la energía cinética con el exceso de energía interna y tampoco es dinámicamente significativo. Para modelar flujo atmosférico térmicamente estratificado se emplea, además del número de Richardson, el número de Froude densimétrico.

Desde que las escalas geométricas entre la capa límite simulada en el laboratorio y la capa límite atmosférica son, en general, mayores a 1:200, siendo la viscosidad coincidente, y las velocidades en modelo y prototipo del mismo orden, surge la imposibilidad de reproducir el número de Reynolds en túneles de baja velocidad. No obstante esto, se pueden obtener flujos semejantes sin respetar esta condición a partir de que las características del escurrimiento se vuelven independientes del número de Reynolds en ciertos rangos de variación. La igualdad del número de Prandtl se consigue simplemente usando el mismo fluido en modelo y prototipo como ocurre en este caso de simulación de capa límite en túnel de viento. Finalmente, el requerimiento de igualdad del número de Rossby se puede relajar ya que, en general, la influencia de los gradientes de presión local y fuerzas de corte son grandes con relación a las fuerzas causadas por la aceleración de Coriolis. En función de esto, la semejanza puede conseguirse considerando solamente tres criterios; semejanza geométrica, igualdad del número de Richardson y semejanza de las condiciones de borde.

Capa límite atmosférica neutral

En la mayoría de los Laboratorios es más común la simulación de la capa límite neutralmente estratificada, lo que implica modelar la distribución de velocidades medias, las escalas de turbulencia y el espectro atmosférico (Surry, 1982). La capa límite atmosférica es semejante a la capa límite que se desarrolla sobre una superficie plana con cierta rugosidad bajo la condición de gradiente de presión nulo. La rugosidad tiene el mismo rol que los obstáculos del terreno en la atmósfera, es decir, establece el perfil de velocidades medias y las características turbulentas del escurrimiento. Sin embargo, simular la capa límite atmosférica en un túnel de viento utilizando solamente elementos de rugosidad requiere cámaras de ensayo extremadamente largas, porque el crecimiento de la capa límite hasta llegar a las escalas usuales para los ensayos es muy lento. Para evitar este problema, se colocan otros dispositivos a la entrada de la cámara de ensayos del túnel, denominados simuladores, que fuerzan a un crecimiento más rápido de la capa límite. Estas técnicas se conocen como métodos de rugosidad, barrera y dispositivos de mezcla.

Counihan (1969) y Standen (1972), empleando elementos de rugosidad, barrera y dispositivos de mezcla desarrollaron técnicas de simulación particularmente apropiadas para reproducir una capa límite neutralmente estable. Las técnicas permiten obtener representaciones de las capas límites desarrolladas sobre terrenos rural y urbano. En particular, la técnica de Standen permite la simulación del espesor total de la capa límite atmosférica y también de espesores parciales, lo que permite variar las escalas de ensayo. Ambas técnicas fueron utilizadas en el Túnel "Jacek P. Gorecki" de la Facultad de Ingeniería de la UNNE para implementar simulaciones de capa límite neutral. En la figura 1 se pueden ver los generadores de vorticidad elípticos tipo Counihan para una simulación de espesor total y escala 1:250, mientras que en las fotografías de la figura 2 se puede ver los elementos de rugosidad y las agujas truncadas de Standen que permiten simular una capa límite de espesor parcial con una escala de 1: 150.

Capa límite estratificada

Si bien la mayoría de los estudios en túneles de viento se realizan con simulaciones de capa límite atmosférica neutral, en ciertos casos debe considerarse la estratificación atmosférica. Básicamente, se puede decir que en una capa límite estratificada los efectos de la variación de la temperatura con la altura son importantes, y por lo tanto la turbulencia de origen térmico es tan o más importante que la de origen mecánico. El inconveniente del modelado de la estratificación es que requiere una gran inversión de tiempo y equipamiento para su desarrollo. El Laboratorio de Dinámica de Fluidos y Difusión de la Universidad del Estado de Colorado tiene un túnel de viento de circuito cerrado que permite reproducir flujos de capa límite con estratificación térmica (Cermak & Takeda, 1985). La temperatura del aire ambiente puede variarse desde 5° a 95°C, de forma tal que el número de

Richardson en la parte más baja (10% de la capa límite térmicamente estratificada) con velocidad de viento de 0.5 m/s, puede ajustarse en el rango de +1 (estable) a -1 (inestable).

Hertig (1985) diseñó un dispositivo especial para generar una capa límite térmicamente estratificada. No es un túnel de viento propiamente dicho ya que las velocidades del flujo son muy bajas y no se pueden simular otros tipos de escurrimiento. No obstante, permite realizar estudios de difusión aún bajo condiciones de inversión térmica, es decir, aquellos en los que la variación de la temperatura con la altura se invierte en un punto determinado.

En algunos casos, sin utilizar dispositivos de calentamiento se simulan flujos isotérmicos de características distintas a los de capa límite neutral (Janssen, 1979). Usando bloques irregulares en lugar de elementos uniformes de rugosidad se generan escurrimientos con características propias de condiciones de inestabilidad atmosférica. Por el contrario, mediante una grilla de barras horizontales distanciadas logarítmicamente, las características del flujo se aproximan a las de una condición más estable.



Fig. 1: Simuladores de Couinhan utilizados en el Túnel "Jacek P. Gorecki"

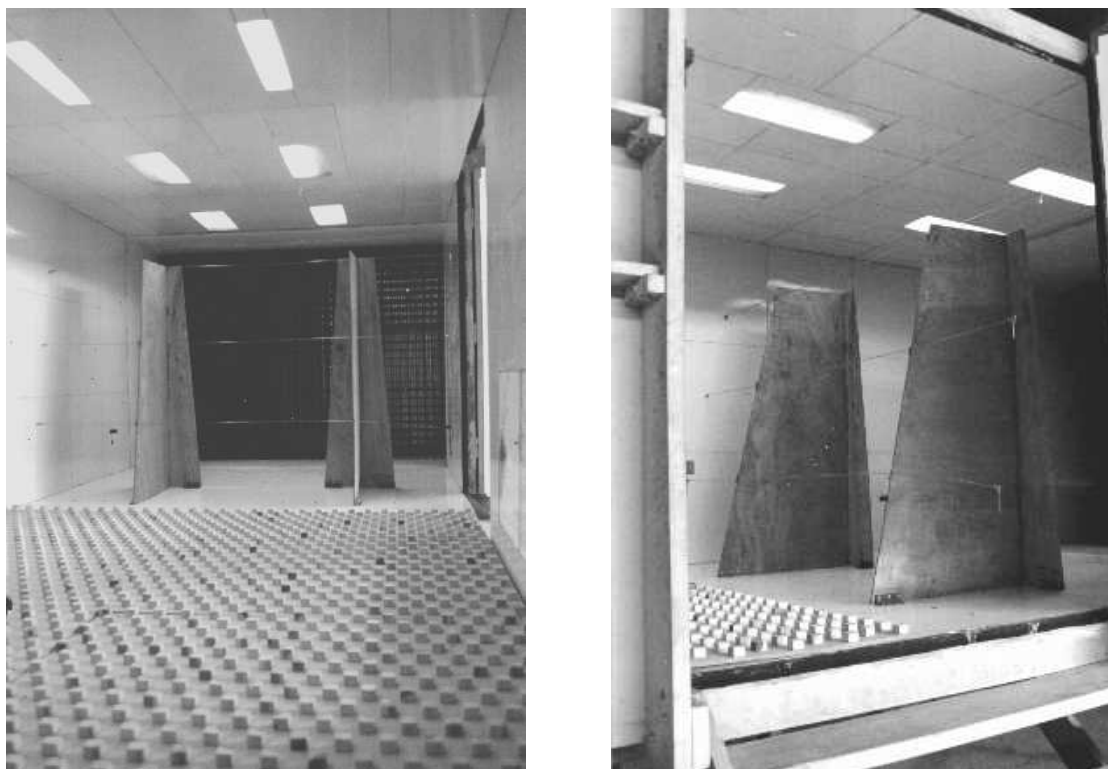


Fig. 2: Elementos de rugosidad y simuladores de Standen utilizados en el Túnel "Jacek P. Gorecki"

EVALUACION DE LAS CARACTERISTICAS DE UNA SIMULACION

En un trabajo anterior (Wittwer et al., 1999) se describen los parámetros que permiten caracterizar una simulación de la capa límite atmosférica neutral. La medición de la distribución de velocidades medias y de las fluctuaciones de velocidad permite obtener estos parámetros característicos. Las figuras 2 y 3 muestran las características del flujo medio y de los parámetros que describen el comportamiento de la componente fluctuante longitudinal obtenidas a partir de la implementación de una simulación de espesor parcial de capa límite atmosférica neutral en el túnel de viento de la UNNE, usando el método de Standen. En el gráfico de la figura 3 se muestran las velocidades medias adimensionales u_g^+ en función de la altura adimensional z_g^+ en el centro de la sección transversal. Los parámetros para obtener las variables adimensionales son la altura de la capa límite simulada $z_g=121.4$ cm y la velocidad medida a esa altura U_g . En la figura 4 se observa la variación en altura de las intensidades locales de turbulencia de la componente longitudinal I_u obtenida en el centro de la sección transversal.

El espesor de la capa límite generada a partir de los dispositivos de simulación es de 121.4 cm. El exponente α obtenido ajustando las velocidades medidas a la ley potencial es 0.25 y corresponde a un terreno suburbano. Las intensidades de turbulencia en la parte más baja de la capa límite simulada, donde se ubica el modelo, varían entre el 12 y 23 %.

En la figura 5 se muestra el espectro de turbulencia adimensional obtenido a la altura de 23.3 cm medida desde el piso del túnel. Se observa una buena definición del mismo en la región inercial caracterizada por la pendiente $-2/3$, y la comparación con el espectro atmosférico determinado con la expresión de von Kármán indica una adecuada distribución espectral de la turbulencia obtenida en la capa límite simulada con relación a los valores atmosféricos. Es necesario aclarar que el espectro atmosférico representa la distribución de energía de la turbulencia del viento en función de la frecuencia, en el rango que se conoce como zona de micro-meteorología. Diversos autores establecieron expresiones empíricas obtenidas a partir de mediciones realizadas en la atmósfera a distintas alturas, velocidades medias y tipos de terreno.

El parámetro macroescala se obtiene ajustando el espectro medido al espectro representativo de los valores atmosféricos de ESDU. Este parámetro es una escala de longitud característica de la turbulencia y el valor promedio obtenido en este caso es $L_{xi}=0.65$ m. El factor de escala de esta simulación parcial de la capa límite atmosférica fue determinado siguiendo el procedimiento de Cook (1978) y su valor es $S=150$.

Es necesario señalar que, generalmente, los ensayos de dispersión de gases se hacen a bajas velocidades. Anteriormente (Wittwer et al., 1999) se mostró que los parámetros característicos de una capa límite simulada en el túnel de viento de la UNNE prácticamente no varían dentro del rango de velocidades de 10 a 25 m/s. Actualmente se están realizando ensayos de visualización con humos que indican un buen comportamiento de los flujos de capa límite con velocidades inferiores a 5 m/s, no obstante lo cual es recomendable evaluar mejor el comportamiento a bajas velocidades, determinando el número de Reynolds mínimo y la interferencia lateral (Meroney & Neff, 1980).

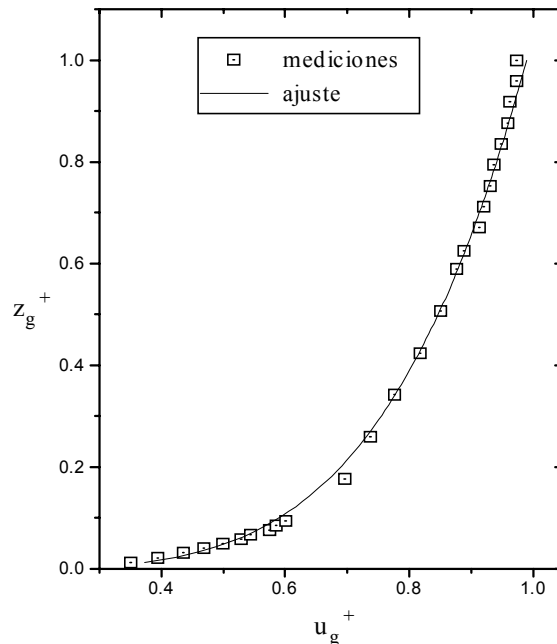


Fig. 3: Perfil de velocidades medias en una simulación de capa límite

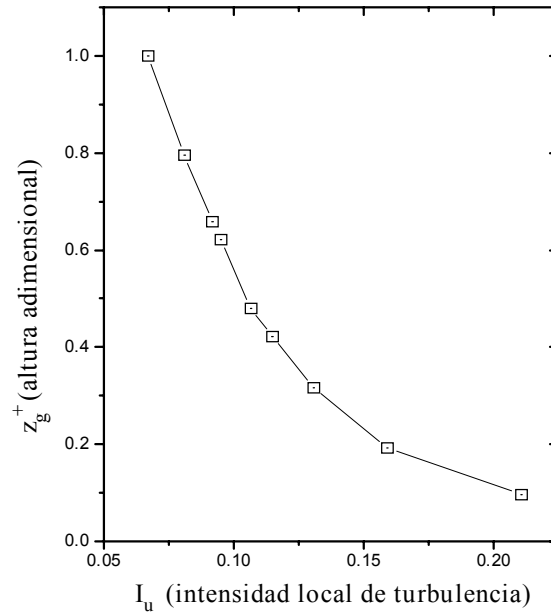


Fig. 4: Perfil de intensidades de turbulencia en una simulación de capa límite

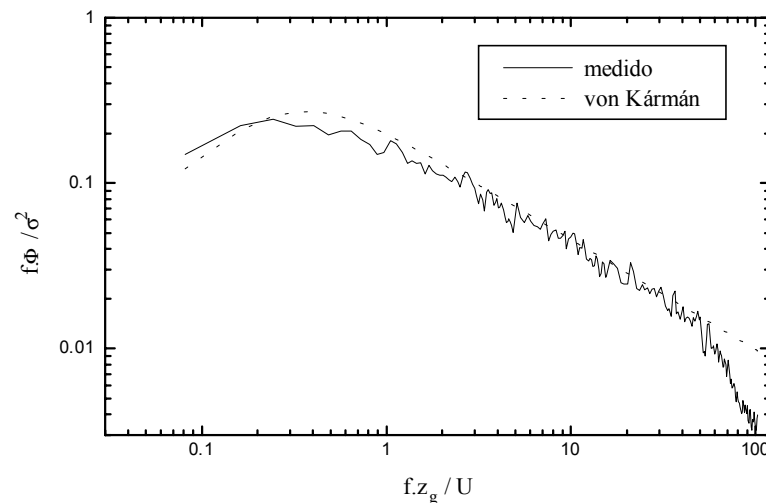


Fig. 5: Espectro de turbulencia adimensional medido a la altura $z = 23.3 \text{ cm}$

CONCLUSIONES

Con este trabajo se intenta un primer acercamiento al fenómeno de dispersión de contaminantes en la capa límite atmosférica y a su análisis experimental en un túnel de viento. Se establecen los criterios de semejanza utilizados para modelar flujos de capa límite en escala reducida y la forma de evaluar las características del escurrimiento medio y la turbulencia generada, como así también las posibilidades y limitaciones del túnel de viento de la UNNE con relación a los tipos de flujos que se pueden simular. A partir de los resultados obtenidos, es posible comenzar a realizar estudios de dispersión de gases, al menos para la condición de estabilidad atmosférica neutral, para lo cual es necesario modelar correctamente la fuente de emisión de gases considerando criterios de semejanza adicionales.

REFERENCIAS

Cermak, J. E., Takeda, K. (1985). "Physical modeling of urban air-pollutant transport", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 21, 51-67.

Cook, N.J. (1978). "Determination of the Model Scale Factor in Wind-Tunnel Simulations of the Adiabatic Atmospheric Boundary Layer", *Journal of Industrial Aerodynamics*, vol. 2, pp. 311-321.

Counihan, J. (1969). "An improved method of simulating an atmospheric boundary layer in a wind tunnel", *Atmospheric Environment*, vol. 3, pp.197-214.

Hertig, J. A. (1985). "A Stratified Boundary Layer Wind Tunnel Designed for Wind Engineering and Diffusion Studies", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 16, 265-278.

Janssen, L. A. M. (1979). "Wind Tunnel Modelling of Dispersion of Odours in the Neighbourhood of Pighouses", *Journal of Industrial Aerodynamics*, vol. 4, pp. 391-398.

Meroney, R., Neff, D. (1980). "Laboratory simulation of liquid natural gas vapor dispersion over land or water", *Wind Engineering, Proceedings of the fifth International Conference, Fort Collins, Colorado, USA, 2*, 1139-1149, Pergamon Press Ltd.

Standen, N.M. (1972). "A Spire Array for Generating Thick Turbulent Shear Layers for Natural Wind Simulation in Wind Tunnels", *National Research Council of Canada, NAE, Report LTR-LA-94*.

Surry, D. (1982). "Consequences of distortions in the flow including mismatching scales and intensities of turbulence", *Proceedings of the International Workshop on Wind Tunnel Modeling Criteria and Techniques in Civil Engineering Applications*, pp. 137-185, Gaithersburg, Maryland, U.S.A.

Wittwer, A. R., De Bortoli, M. E., Natalini, M. B. (1999). "Variación de los parámetros característicos de una simulación de la capa límite atmosférica en un túnel de viento", *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 3, No. 2.

ABSTRACT

The physical simulation of the atmospheric flow and the reproduction of the emission source are necessary in order to carry out wind tunnel studies of dispersion problems. This first work discuss the reproduction of the atmospheric flow in a wind tunnel. The object is the analysis of a boundary layer simulation. Measurement results in a neutral atmospheric boundary layer simulation carried out in the wind tunnel of the UNNE are shown. The evaluation process of the atmospheric boundary layer is described. The conclusion is that atmospheric dispersion studies can be realised in this wind tunnel.

Keywords: atmospheric boundary layer, atmospheric dispersion, wind tunnel.