

## CRITERIOS UTILIZADOS PARA MODELAR LA DISPERSION ATMOSFERICA EN TUNELES DE VIENTO

Adrián R. Wittwer<sup>1</sup>, Edith B. Camano Schettini<sup>2</sup>, Acir M. Loredo-Souza<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup>Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS, Brasil

<sup>3</sup>Laboratorio de Aerodinámica de las Construcciones, UFRGS, Brasil

**RESUMEN:** La dispersión atmosférica de gases se puede estudiar en túneles de viento a partir de la reproducción a escala de las características del flujo de capa límite atmosférica y de la fuente de emisión de gases. Este trabajo está referido a la simulación de las características de la fuente de emisión una vez que ya ha sido implementada la primera etapa, es decir, la reproducción del escurrimiento atmosférico en la cámara de ensayos del túnel de viento. El objetivo es analizar los requerimientos de semejanza, criterios de modelado y la forma de realizar estudios experimentales de dispersión atmosférica, lo cual constituye la primera etapa en la implementación de un programa destinado a estudios ambientales a desarrollarse en el túnel de viento de la UNNE. Se presentan, además, algunos resultados experimentales preliminares obtenidos de ensayos de visualización en el túnel de viento de la UFRGS.

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

### INTRODUCCION

El transporte, la dilución y la dispersión de contaminantes atmosféricos están afectados por las características de la fuente de emisión, las condiciones meteorológicas, los efectos del terreno y construcciones adyacentes. En el caso particular de chimeneas de descarga de emisiones industriales, la elevación de la pluma de emisión depende de la cantidad de movimiento del gas emitido y de su empuje. Generalmente, aumentando la velocidad de salida o la temperatura del gas a la salida, aumentará la elevación de la pluma, que junto con la altura física de la chimenea determinan la altura efectiva de la chimenea.

En la región cercana a la chimenea es importante conseguir una velocidad de emisión que permita sacar los gases fuera de la estela de la chimenea o edificio. En la región más alejada importa la altura efectiva de la chimenea, que debe ser la necesaria para que los gases alcancen el suelo con una concentración adecuada a partir de la dilución y mezcla. Los niveles máximos de concentración de gases emitidos pueden ocurrir, a veces, en condiciones de atmósfera muy estable, y otras veces, con vientos de alta velocidad (Lawson, 1980).

En zonas urbanas, las edificaciones y configuraciones grupales de edificios, los árboles y obstáculos, determinan una geometría compleja que influye fuertemente en las características de la dispersión. A esto se suma el efecto de isla caliente que modifica la estabilidad atmosférica y, generalmente, se combinan emisiones en línea, por el tráfico en las calles, áreas de emisión, producto de parques de automotores abiertos, y puntos de emisión (Cermak & Takeda, 1985). Las irregularidades topográficas también ejercen influencias importantes. En el caso de fuentes de emisión próximas a lagos o playas, aparece la influencia de las brisas marítimas. En las ciudades localizadas en valles, las circulaciones del viento son complejas con flujos gravitacionales ascendentes o descendentes, que originan problemas de polución particulares.

Las teorías de difusión permiten estudiar algunos problemas, pero las soluciones analíticas son muy complicadas o imposibles. Por otro lado, existen modelos empíricos relativamente simples, como el modelo de dispersión Gaussiano, que permiten estimaciones razonables en condiciones ideales. En el caso de topografías más complejas o cuando existen efectos de vecindad, los estudios en túnel de viento permiten realizar mejores estimaciones de la dispersión y de la concentración de los gases emitidos por una fuente de polución.

La simulación de problemas de dispersión de contaminantes en túneles de viento implica reproducir el escurrimiento del aire atmosférico y, posteriormente, simular la fuente y el proceso de emisión. Un trabajo complementario (Wittwer et al., 2002) trata lo referente a la simulación física de la capa límite atmosférica. En este trabajo se muestra como debe implementarse un ensayo de dispersión de gases en un túnel de viento una vez realizada la simulación de la capa límite atmosférica, los distintos tipos de

estudios que pueden llevarse a cabo utilizando modelos a escala reducida y, finalmente, algunos resultados obtenidos de ensayos de visualización de flujos y procesos de dispersión de gases. Básicamente, esta es la primera etapa de un proyecto de investigación a partir del cual se plantea el estudio experimental de problemas de dispersión atmosférica utilizando el túnel de viento "Jacek P. Gorecki" de la Facultad de Ingeniería de la UNNE.

## MODELOS DE DISPERSION ATMOSFERICA EN TUNEL DE VIENTO

Los métodos analíticos basados en la evaluación de la elevación de la pluma de emisión debido al empuje y la cantidad de movimiento, y el posterior tratamiento de la pluma como una fuente puntual elevada de gases contaminantes sin empuje, pueden producir estimaciones razonables en condiciones ideales. Esto es, fuentes ubicadas lejos de la influencia aerodinámica de otras edificaciones y situadas en superficies abiertas, planas y homogéneas. En el caso de topografías más complejas o cuando existen efectos de vecindad, el uso de métodos analíticos no es confiable y los estudios en túnel de viento permiten realizar mejores estimaciones de la dispersión y de la concentración de los gases emitidos por una fuente contaminante.

### Criterios de modelado

Además de los requerimientos de semejanza para modelar el viento natural, en el caso de una pluma producida por una fuente de emisión elevada, se debe conseguir la semejanza de las emisiones. Cermak & Takeda (1985) proponen la igualdad de los siguientes parámetros en modelo y prototipo:

- Relación entre la velocidad de emisión y la velocidad local de viento  $w_0 / u_{(h_0)}$
- Relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas de empuje  $\rho_a u_{(h_0)}^2 / [(\rho_a - \rho_0)gd_0]$

El segundo parámetro se conoce como número de Froude densimétrico. Los mismos autores citan otros parámetros adimensionales en discusión que permiten mayor flexibilidad de modelado:

- Parámetro de cantidad de movimiento del efluente  $\rho_0 w_0^2 / \rho_a u_{(h_0)}^2$
- Parámetro de empuje  $\rho_a u_{(h_0)}^3 / [(\rho_a - \rho_0)gw_0 d_0]$

Con estos adimensionales es posible aumentar el tamaño de la fuente de emisión y la velocidad del flujo sin alterar la semejanza de las características de la pluma. La figura 1 muestra una fuente emisión representada por una chimenea donde se indican los valores que definen los parámetros adimensionales;  $h_0$  es la altura de la chimenea,  $u$  es la velocidad del flujo atmosférico,  $w_0$  es la velocidad de salida de la emisión,  $d_0$  es el diámetro de la chimenea,  $\rho_a$  y  $\rho_0$  las densidades del aire y la emisión respectivamente.

En la figura se indica la región próxima a la fuente en que la propia estructura de la chimenea y la descarga provocan modificaciones en el campo de flujo. En la zona más alejada, estos efectos únicamente se perciben a través de la altura efectiva de la fuente  $h_0 + \Delta h$ , y el origen virtual del campo de difusión  $x_0$  (Plate, 1982).

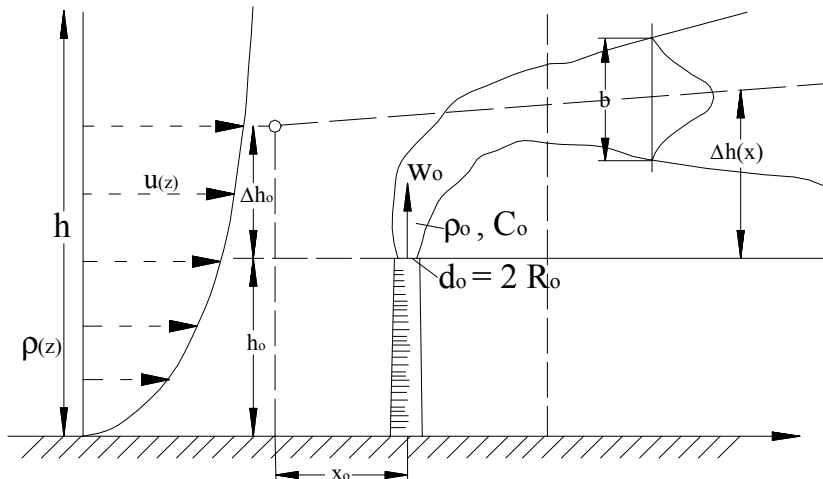


Fig. 1: Parámetros característicos de una fuente de emisión

### Modelado del campo cercano

Como la geometría local afecta considerablemente al flujo, además de los parámetros adimensionales anteriores, es necesario que la chimenea tenga la misma configuración y valores semejantes del coeficiente de arrastre en modelo y prototipo. En fuentes

cilíndricas, puede ser necesario considerar el efecto del número de Reynolds y agregar rugosidad a la superficie curva (De Bortoli et al., 2000). El perfil de velocidad de salida en la emisión debe ser el mismo en modelo y prototipo, lo que en el caso de torres de enfriamiento, en que la apertura es amplia y la velocidad de salida muy baja, puede conducir al agregado de rugosidad en el interior de la torre.

### ***Modelado de la región alejada***

En esta zona predomina el efecto de la turbulencia atmosférica. El empuje y la cantidad de movimiento inicial son importantes únicamente para conseguir las condiciones iniciales. Esto hace posible realizar experimentos que contemplen la región alejada sobre un modelo de escala diferente a la del modelo en la región cercana. Para implementar esto, en el modelo más pequeño en que se analiza el campo lejano, la fuente de emisión se reemplaza por una fuente puntual equivalente con la descarga ubicada en el punto determinado por  $x = x_0$  y  $z = h_0 + \Delta h_0$  (Figura 1). El modelo más grande, para el análisis de la región cercana, permite determinar  $x_0$  y  $\Delta h_0$ .

Los remolinos de la turbulencia provocan intermitencia y sinuosidad de la línea de movimiento de la pluma diferentes en modelo y prototipo que afectan los datos obtenidos en la región lejana. La concentración debe asociarse a la escala de tiempo con que es medida. En el modelo, generalmente, es difícil utilizar los tiempos de promediado que se obtienen usando la escala de tiempo que resulta del experimento, y es muy común utilizar tiempos mayores que dejan afuera parte de la variabilidad de los datos. No obstante esto, en los ensayos en túnel de viento se emplean valores de concentración pico que para ser convertidos a concentraciones medias deberían ser afectados por un factor que establezca la relación pico-media, incluyendo los efectos de intermitencia y sinuosidad. Este factor, evidentemente, debe obtenerse de ensayos de campo.

## **TIPOS DE ESTUDIOS DE DISPERSION**

En los estudios de dispersión que se realizan en túneles de viento, complementariamente se realizan ensayos de visualización y ensayos cuantitativos en los que se mide la concentración en las zonas de interés. Para las visualizaciones, comúnmente se genera humo utilizando aceites minerales que previamente son calentados. La iluminación y la toma de imágenes fotográficas y de vídeo son parte importante de los ensayos. Los primeros estudios de visualización de fenómenos de dispersión en túnel de viento fueron realizados en 1970 con el fin de determinar alturas mínimas de chimeneas previniendo el descenso de las emisiones al nivel del suelo. Trabajos más recientes (Chatzipanagiotidis & Olivari, 1996, Gerdes & Olivari, 1999) muestran que con el uso de técnicas que incluyen láser, una video-cámara y un sistema de procesamiento digital de imágenes se puede obtener información cuantitativa a partir de ensayos de visualización con humo.

La medición de concentración en experimentos de dispersión turbulenta realizados en túneles de viento depende del gas trazador que se utiliza para simular la emisión y se puede realizar con diversos dispositivos llamados detectores. Generalmente se dividen en dos grupos; los de contacto directo y los aspirados. Cuando el gas que simula la emisión es un hidrocarburo, es muy común utilizar un detector de ionización de llama que ha sido aplicado en diversos estudios (Meroney et al., 1996, Delaunay et al., 1997, Donat & Schatzmann, 1999).

El uso de un anemómetro de hilo caliente con una sonda aspirante permite medir las fluctuaciones de densidad o concentración (Wilson & Netterville, 1981, Meroney & Neff, 1980). Para calibrar la sonda se puede utilizar el mezclador de gases que permite proveer mezclas binarias conocidas (Camano Schettini, 1996). Las fluctuaciones de concentración pueden analizarse hasta frecuencias de 3 kHz aunque las escalas características en los túneles de viento no requieren el análisis de frecuencias superiores a 1 kHz.

### ***Problemas locales de dispersión***

Existen estudios dirigidos al análisis de las concentraciones a través de una pluma que no se realizan sobre la base de un problema real (Poreh & Cermak, 1992). Estos estudios, de carácter general, permiten determinar comportamientos que son comunes en muchos casos de dispersión y analizar que variables producen mayor influencia en el fenómeno. Es muy común también el análisis de la polución en la estela y en zonas próximas a construcciones de diversas formas mediante estudios experimentales en túnel de viento (Li & Meroney, 1983, Delaunay et al., 1997, Meroney et al., 1999). La influencia de la posición y la altura de una chimenea respecto a una edificación en el proceso de dispersión permite evaluar comportamientos comunes a diversas formas estructurales (Meroney, 1982). Existen además varios estudios en túnel de viento con modelos físicos en dos dimensiones relacionados con la dispersión en cañones urbanos, producto de las emisiones de automóviles.

### ***Problemas de dispersión a nivel de mesoescala***

En esta escala están incluidos los fenómenos que se desarrollan en terrenos complejos y los que se refieren al análisis de áreas urbanas. El análisis de problemas de este tipo en modelos a escala reducida requiere reproducir las características del terreno y de la geometría del área urbana. La diferencia fundamental con relación al estudio de problemas locales es que en estos casos se

deben modelar espacios mayores y por lo tanto utilizar escalas más reducidas, con lo que hay que considerar el efecto de escala y la escala de tiempo con que se mide la concentración.

## RESULTADOS EN ENSAYOS DE VISUALIZACION

Las fotografías de las figuras 2 y 3 son parte de los resultados obtenidos durante una serie de ensayos de visualización realizados en el túnel de viento del Laboratorio de Aerodinámica de las Construcciones, UFRGS, Brasil, sobre el modelo a escala reducida de un grupo de cuatro edificios. El viento incidente responde a las características de la capa límite turbulenta neutral que se desarrolla en un terreno de abierto a suburbano, con un exponente  $\alpha = 0.23$  de la ley potencial de velocidades medias. El humo se generó mediante una máquina para fiestas a partir del calentamiento de un líquido hecho a base de glicerina.

Para la fotografía de la figura 2, se utilizó una velocidad media del viento incidente superior a 20 m/s y un tiempo de exposición relativamente grande, con el fin de apreciar las regiones del flujo sobre el modelo de los edificios. Esta velocidad permite obtener valores elevados del número de Reynolds de manera tal que la configuración del escurrimiento en torno al modelo reproduzca lo que ocurre a escala real. Esto permite apreciar la zona de desprendimiento de vórtices y distinguir la región en que la turbulencia es similar a la del flujo incidente de aquellas en la que predomina la turbulencia generada por el modelo.

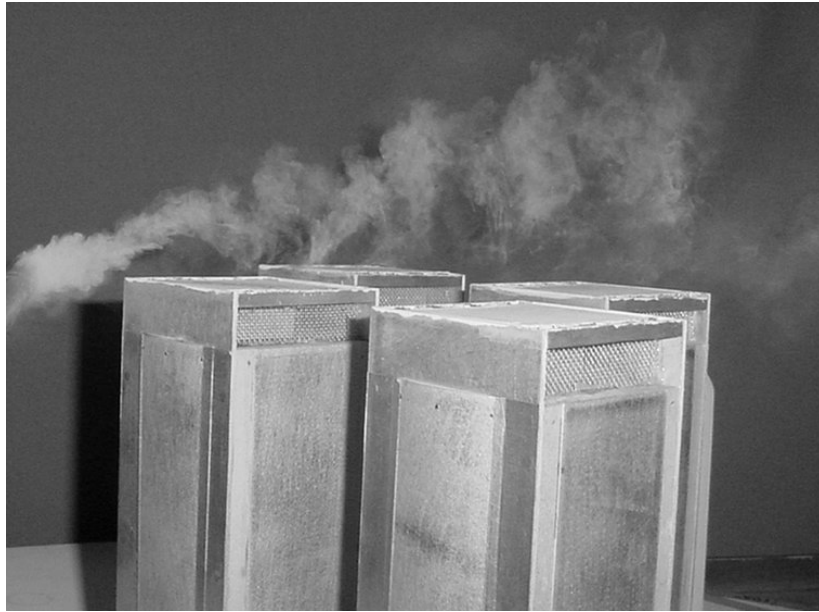
En la figura 3 es posible visualizar el proceso de dispersión de una fuente de altura similar a la de los edificios. Las velocidades medias del viento incidente son inferiores a 3 m/s y el tiempo de exposición al tomar la fotografía es muy pequeño. Esto permite analizar cualitativamente la dispersión de gases en zonas próximas a edificios donde la turbulencia generada por ellos es preponderante en el fenómeno.



*Fig. 2: Visualización de las regiones del escurrimiento*

## CONCLUSIONES

El estudio de problemas de dispersión atmosférica en túneles de viento requiere la simulación física de las características del flujo de capa límite atmosférica y la construcción de un modelo de la fuente de emisión de gases. En este trabajo, partiendo del conocimiento de la forma en que se implementa la simulación de la capa límite, se describen los requerimientos necesarios para modelar físicamente fenómenos de dispersión de gases en el túnel de viento con el objetivo de comenzar a desarrollar estudios de este tipo en el túnel de la UNNE. Se indican los requerimientos particulares para modelar la fuente de emisión y los aspectos a tener en cuenta en modelos de la región próxima a la emisión o de la zona más alejada, y se presentan algunas de las formas de medir las concentraciones a nivel de escala de modelo. A partir de la revisión bibliográfica fue posible realizar una clasificación de los estudios de dispersión que se pueden desarrollar en un túnel de viento y establecer la importancia del túnel de viento como herramienta experimental para el análisis de problemas ambientales. Finalmente, se puede establecer que mediante el túnel de viento de la UNNE y con el instrumental con que cuenta actualmente será posible desarrollar estudios relacionados con la dispersión atmosférica de gases.



*Fig. 3: Visualización del proceso de dispersión*

## REFERENCIAS

- Camano Schettini, Edith B. (1996), "Etude Expérimentale des Jets Coaxiaux avec Différences de Densité", Thèse pour obtenir le diplôme de Docteur de l'Institut National Polytechnique de Grenoble.
- Cermak, J. E., Takeda, K. (1985), "Physical modeling of urban air-pollutant transport", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 21, 51-67.
- Chatzipanagiotidis, A., Olivari, D. (1996), "Pollutant dispersal downstream of a hill in different wind conditions", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 64, pp. 233-248.
- De Bortoli, M., Wittwer, A., Natalini, M., Agosti, C. (2000), "Estudio experimental de la acción del viento sobre el techo curvo de un hangar considerando la influencia de las características del flujo incidente y el efecto del número de Reynolds", *Congreso de Ingeniería Estructural, AIE*, Buenos Aires.
- Delaunay, D., Lakehal, D., Barré, C., Sacré, C. (1997), "Numerical and wind tunnel simulation of gas dispersion around a rectangular building", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 67&68, pp. 721-732.
- Donat, J., Schatzmann, M. (1999), "Wind tunnel experiments of single-phase heavy gas jet released under various angles into turbulent cross flows", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 83, pp. 361-370.
- Gerdes, F., Olivari, D. (1999), "Analysis of pollutant dispersion in an urban street canyon", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 82, pp. 105-124.
- Lawson, T. V. (1980), *Wind effects on building (Vol.1)*, Applied Science Publishers LTD, London.
- Li, W., Meroney, R. N. (1983), "Gas dispersion near a cubical model Building. Part I: Mean concentration measurements", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 12, 15-33.
- Li, W., Meroney, R. N. (1983), "Gas dispersion near a cubical model Building. Part II: Concentration fluctuation measurements", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 12, 35-47.
- Meroney, R., Pavageau, M., Rafailidis, S., Schatzmann, M. (1996), "Study of line source characteristics for 2-D physical modelling of pollutant dispersion in street canyons", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 62, pp. 37-56.
- Meroney, R. N. (1982), "Turbulent diffusion near buildings", *Engineering Meteorology*, Ed. by E. J. Plate, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam,.

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, pp. 1139-1149, Ed. by J. Cermak, Pergamon Press Ltd.

Meroney, R., Leidl, B., Rafailidis, S., Schatzmann, M. (1999), "Wind-tunnel and numerical modeling of and dispersion about several building shapes", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 81, pp. 333-345.

Plate, E. J. (1982), "Wind tunnel modelling of wind effects in engineering", Engineering Meteorology, Ed. by E. J. Plate, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.

Poreh, M., Cermak, J. E., (1992), "Fluctuations of line integrated concentrations across a CO<sub>2</sub> plume", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 41-44, pp. 2745-2755.

Wilson, D., Netterville, D. (1981), "A fast response, heated element concentration detector for wind tunnel application", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 7, pp. 56-64.

Wittwer, A. R., Loredó Souza, A. M., Camano Schettini, E. B. (2002), "Simulación de la capa límite atmosférica para estudios de dispersión atmosférica en túnel de viento", Trabajo enviado al Congreso ASADES 2002- Buenos Aires, Argentina.

## **ABSTRACT**

Wind tunnel studies of atmospheric dispersion require simulating the atmospheric flow and reproducing the emission source. This work discusses the simulation of the emission source when the atmospheric boundary layer has already been reproduced. The aim of the study is to analyse the similarity requirements, modelling criteria and wind tunnel tests methodology regarding atmospheric dispersion. This is the first step in the implementation of an experimental program for environmental studies in the UNNE boundary layer wind tunnel. Experimental results of visualisation tests obtained in the boundary layer wind tunnel of the UFRGS are shown.

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