

Semejanza en la simulación de un proceso de dispersión para una fuente puntual en un túnel de viento

Gisela M. Alvarez y Alvarez y Adrián R. Wittwer

Resumen

La contaminación atmosférica constituye uno de los principales problemas mundiales. Los contaminantes presentes en la atmósfera afectan de manera adversa la salud de la población, la flora, la fauna y hasta provocan alteraciones en ciertos materiales. Los procesos de dispersión se ven ampliamente influenciado por la dinámica de la atmósfera y el entorno en que se encuentre la fuente de emisión, factores que hacen que el análisis del fenómeno sea más complejo. La realización de mediciones de concentraciones in situ implica un alto costo, por lo cual resulta conveniente el empleo de un modelo a escala reducida, que brindará además la posibilidad de analizar varias situaciones y alternativas para el diseño de la fuente emisora. Actualmente se emplean dos métodos para la simulación del proceso de dispersión de contaminantes la simulación numérica y la simulación física. Este trabajo se concentra en este último método, empleando para ello el túnel de viento de capa límite TV2 de la Facultad de ingeniería de la UNNE. La simulación del proceso de dispersión de contaminantes en el túnel de viento requiere de dos conjuntos de criterios de semejanza, el primero establece que el escurrimiento dentro del túnel de viento sea semejante al viento natural en la capa límite atmosférica y el segundo que las características de la fuente entre el modelo y prototipo sean semejantes [1]. El objetivo de este trabajo es el estudio estos criterios de semejanza del escurrimiento atmosférico y de la fuente de emisión para conseguir reproducir el proceso de dispersión [2]. Se presentan los resultados parciales de la simulación del viento

Departamento de Mecánica Aplicada, Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional del Comahue
german.keil@fain.uncoma.edu.ar
americo.jurasics@fain.uncoma.edu.ar
damian.campos@fain.uncoma.edu.ar

de capa límite y visualizaciones preliminares del proceso de dispersión. Finalmente, se puede establecer que en el túnel de viento de la UNNE será posible desarrollar estudio relacionados con la dispersión atmosférica de gases.

Palabras Claves: Semejanza, dispersión, túnel de viento.

Referencias

- [1] Cermak J,y Takeda K., Physical Modelling of Urban air-Pollutant Transport, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Elsevier scientific Publishing Company, v 21, p. 51-67,1985.
- [2] Poreh M, Kacherginsky A. Simulation of Plume rise Using Small Wind- tunnel Models. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Elsevier scientific Publishing Company, v 7, p. 1 -14,1981.

1. Introducción

La evacuación de residuos gaseosos provenientes de procesos industriales ha traído en los últimos años un deterioro progresivo del medio ambiente. Para obtener una adecuada dispersión de los mismos que nos conduzca a valores de concentraciones a nivel de suelo por debajo



de los admisibles por la legislación y tolerables por las personas, animales y plantas, es necesario el estudio las fuentes de emisión y del proceso de dispersión [1].

El túnel de viento posibilita el desarrollo de experimentos y modelos que permitan evaluar los procesos de dispersión de contaminantes descargados en la atmósfera. Para ello se requiere de la implementación de una adecuada técnica de simulación del escurrimiento del aire de la capa límite atmosférica y, posteriormente, simular la fuente y el proceso de emisión.

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. Esta técnica permite representar las condiciones que se darían en la realidad empleando modelos a escala reducida.

Este trabajo se centra en el análisis de los criterios de semejanza necesarios para el estudio de procesos de dispersión de gases en un túnel de viento. Con el objeto de realizar una primera aproximación al estudio experimental de este fenómeno se presentan; resultados obtenidos de ensayos de visualización de flujos realizados en el túnel de viento TV2 del Laboratorio de Aerodinámica de la Facultad de ingeniería de la Universidad Nacional; y algunos resultados preliminares de medición del campo de concentración en procesos de dispersión de gases para una fuente de emisión puntual realizados en el túnel de viento del Laboratorio de Aerodinámica de las Construcciones, de la Universidad Federal do Rio Grande do Sul.

2. Modelado de la capa límite atmosférica

La simulación de una pluma de dispersión en un túnel de viento requiere de un modelado representativo de las características de la capa límite atmosférica y de las propiedades dinámicas y térmicas de la pluma. Un modelado riguroso de la capa límite atmosférica requiere de la semejanza geométrica, la semejanza del campo de flujo, y la igualdad de los números adimensionales de Reynolds (Re), Richardson (Ri), Rossby (Ro), Prandtl (Pr) y Eckert (Ec) [4].

La semejanza geométrica implica el mode-

lado del entorno, incluyendo la rugosidad del terreno, relieve topográfico y temperatura de la superficie. El modelado del campo de flujo, contempla la semejanza de las velocidades medias y turbulentas y la temperatura de estratificación. La semejanza exacta es imposible de lograr en escalas reducidas, por lo que se plantean hipótesis con el objeto de lograr una semejanza aproximada.

La semejanza del número de Richardson está ligada a la semejanza de la estabilidad atmosférica; para una simulación de atmósfera neutra como la realizada en este trabajo el número de Richardson puede ser ignorado. La semejanza en el número de Prandtl se satisface siempre que el fluido con que se trabaje sea aire; y la igualdad del número de Eckert es de pequeña importancia en flujo compresible. El número de Rossby no es considerado debido a que la fuerza de Coriolis no puede ser simulada en túneles de viento. La semejanza del número de Reynolds se logra manteniendo las condiciones turbulentas en el flujo simulado.

La simulación aproximada del flujo, es representativa del viento natural para condiciones atmosférica neutralmente estable y levemente inestable. Esta condición resulta adecuada para el estudio de dispersión de plumas desde chimeneas altas [4].

3. Modelado de la pluma

Una vez establecida la simulación de la capa límite atmosférica en el túnel de viento, los requerimientos de semejanza para el modelado del levantamiento de la pluma y su dispersión demanda de la igualdad de parámetros adimensionales referidos a las características de la chimenea y de la pluma entre el modelo y prototipo. Para el modelado exacto del comportamiento de la pluma de emisión se debe verificar: la semejanza geométrica de la fuente, y la igualdad de los siguientes parámetros adimensionales; el número de Froude, la relación de densidad de la emisión y la del aire, la relación entre la velocidad de salida de la emisión y la velocidad del flujo atmosférico, y finalmente la igualdad del número de Reynolds [4]. Esta semejanza completa tampoco puede realizarse, y al igual que sucede con la simulación de la capa

límite atmosférica se debe aplicar el criterio de semejanza a algunos parámetros, buscando una semejanza aproximada [2]. Las simplificaciones propuestas son variadas y dependerán del caso a estudiar. Para simular la elevación de la pluma y la dispersión es importante que el número de Reynolds del flujo que sale de la chimenea se lo suficientemente grande, como para despreciar su efecto como así también el del número de Prandtl y el número de Schmidt. Además, la mayoría de los autores concuerdan que el efecto de la densidad en la simulación no es crítico y podría ocasionar como máximo el desplazamiento del origen virtual de la pluma en unos pocos diámetros de la chimenea. Melbourne y también Isumov et al propusieron que la semejanza de la elevación de una pluma se logra manteniendo la igualdad de un parámetro de flotación, un parámetro relacionado a la cantidad de movimiento del efluente, y la escala geométrica de la chimenea, que se observa en la Ecuación (1) [2].

$$\lambda \left(\frac{\rho_a U^2}{\Delta \rho g L} \right) = 1 ; \lambda \left(\frac{\rho_s W_s^2}{\rho_a U^2} \right) = 1 ; \lambda \left(\frac{d}{L} \right) = 1 \quad (1)$$

Skinner y Ludwig también emplean el parámetro adimensional de cantidad de movimiento, que aparece en la Ecuación 1, pero modificaron el parámetro de flotabilidad. Plantean que la pluma a sotavento es dominada por la flotabilidad, y sugieren que el parámetro de semejanza adecuado para describirla es la relación entre la cantidad de movimiento de la corriente y la cantidad de movimiento de flotabilidad en un pequeño volumen Δv , que asumen que es igual a $(1-C_s)\rho_a U^2 / C_s(\rho_a - \rho_s) L$, donde C_s es la concentración del gas emitido por la chimenea. Además, asumiendo que a una distancia alejada de la fuente a sotavento $C_s \ll 1$ y que C_s es directamente proporcional a la velocidad del efluente al salir de la chimenea W_s e inversamente proporcional a la velocidad del viento U , el parámetro de flotabilidad puede aproximarse con $\rho_a U^3 / (\Delta \rho g L W_s)$.

Finalmente, los parámetros para realizar una semejanza aproximada del proceso de dispersión serían los citados en la Ecuación (2).

$$\lambda \left(\frac{\rho_a U^3}{\Delta \rho g L W_s} \right) = 1 ; \lambda \left(\frac{\rho_s W_s^2}{\rho_a U^2} \right) = 1 ; \lambda \left(\frac{d}{L} \right) = 1 \quad (2)$$

El comportamiento de los efluentes a la salida de la chimenea depende del diámetro de salida de la chimenea D , de la velocidad de salida, V_s , de la velocidad del viento a la salida de la chimenea U , de la diferencia de la densidad existente entre el efluente expulsado y el aire atmosférico $\Delta \rho = \rho_a - \rho_s$. Mediante el análisis dimensional de estos parámetros se obtiene la sobre elevación DH de una pluma emitida desde una chimenea de altura H_0 .

$$\Delta H = f \left(\frac{V_s}{U}, \frac{g D_s \Delta \rho / \rho_a}{U^2}, \frac{D_s}{H_0} \right) \quad (3)$$

3. Ensayos de visualización

El estudio de la pluma simulada se puede realizar captando una serie de fotografías del proceso y realizando posteriormente un procesamiento digital de las imágenes obtenidas. Estudios de este tipo se han realizado en distintas partes del mundo con resultados satisfactorios como por los obtenidos por White y Stein [5] que determinaron la dispersión a sotavento producida por una chimenea de altura variable en un edificio, empleando humo con trazador y grabando con una video cámara el ensayo, para luego procesar las imágenes adquiridas. Gerdes y Olivari [6] también emplearon la técnica de visualización del flujo, midiendo la intensidad píxel a píxel de imágenes captadas con una cámara en el análisis de fenómenos de dispersión en cañones urbanos.

En este trabajo se buscó aplicar en el túnel de viento, TV2, de la UNNE, una técnica de visualización para el análisis de las concentraciones en una pluma, determinando las modificaciones que se necesitan implementar para mejorar los resultados obtenidos, para ello se examinó el comportamiento y la configuración de la pluma obtenida para diferentes números de Reynolds. La concentración del contaminante fue medida empleando humo como trazador y obteniendo fotografías del proceso; seguidamente estas imágenes fueron procesadas digitalmente.

Los experimentos se realizaron túnel de

viento (TV2) de la Universidad Nacional del Nordeste, Argentina. Es un túnel de circuito abierto cuya longitud total es de 7,50 m, su cámara de ensayos consiste en un conducto de sección cuadrada de 0,48 m de lado y de 4,45 m de longitud. La máxima velocidad del flujo en el canal vacío es aproximadamente 18 m/seg y emplea un ventilador centrífugo accionado por un motor trifásico de 1450 rpm y 10 CV de potencia.

La simulación de la capa límite atmosférica se efectuó empleando elementos de rugosidad y dispositivos de mezcla apropiados para reproducir una capa límite neutramente estable de espesor parcial. En la Figura 1 se pueden ver los elementos de rugosidad y las agujas que permitieron simular la capa límite superficial correspondiente a una categoría de exposición B del reglamento argentino CIRSOC 102. El análisis de la capa límite simulada fue presentada en trabajos previos [7].

Para la realización del ensayo se empleó humo producido por un generador que utiliza un líquido a base de glicerina, la velocidad de salida del humo fue aproximadamente 14,3 m/seg. La fuente del contaminante fue representada mediante un conducto metálico de 1,02 cm de diámetro interno y 10 cm de alto, ubicado en el centro de la cámara. Se prestó especial cuidado a la iluminación de la pluma, tratando que solo un haz lineal de luz la intercepte. Las imágenes fueron captadas por una cámara digital y luego transferidas a un ordenador.

3. 1. Resultados en ensayos de visualización

En una primera instancia se efectuó el ensayo a la máxima velocidad posible en el canal, 18 m/seg, en esta ocasión el número de Reynolds con respecto a la altura del canal fue de $Re = 5,7 \times 10^5$ y con respecto al diámetro de la chimenea $1,2 \times 10^4$. A continuación, se redujo la velocidad alcanzando el valor de 9,82 m/seg en la mitad de la altura de la cámara de ensayo y alcanzándose un número de Reynolds de $3,1 \times 10^5$ y $6,7 \times 10^3$ con respecto a la altura del canal y al diámetro de la pluma, respectivamente. Finalmente, se obtuvo la configuración de la pluma para una velocidad de 1,83 m/seg determinada en la mitad de la altura de la cámara de ensayo con un consiguiente

número de Reynolds de $5,8 \times 10^4$ con respecto a la altura del canal y de $1,2 \times 10^3$ con respecto al diámetro de la chimenea. En la Figura 2 se aprecia la configuración de la pluma para los tres casos citados.

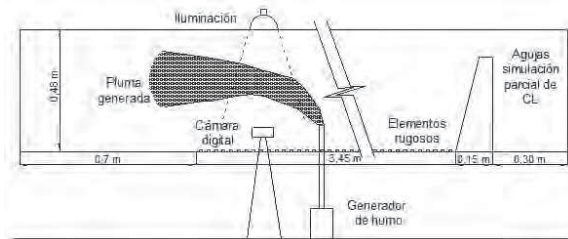


Figura 1. Disposición del instrumental durante el ensayo.

Las imágenes captadas con la cámara fueron de alta resolución, para que permitieran su posterior procesamiento. El mismo consistió en superponer a la fotografía una malla, y realizar una valoración en función de la intensidad del color que tuviese cada cuadro, comparando con un patrón realizado. El patrón empleado en la comparación, se determinó asignando el menor y mayor valor, a la menor y mayor intensidad encontrada en la imagen, respectivamente.

A continuación, se procedió al trazado, cada 0,1 m, de los perfiles longitudinales de concentración, en función de los valores asignados a cada cuadro de la malla. En la Figura 3 se aprecia el resultado del procesamiento correspondiente al ensayo realizado a una velocidad de 1,83 m/seg. Únicamente fueron procesados los resultados correspondientes a la menor velocidad y número de Reynolds, porque es la situación en que mejor se puede visualizar el proceso de difusión.

El levantamiento de la pluma por encima de la altura de la chimenea depende de factores meteorológicos y de la emisión. La mayoría de las fórmulas para determinar el levantamiento de la pluma ΔH_f , son empíricas debido a la complejidad de las relaciones entre las variables, como la Ecuación (4), denominada ecuación de Holland, la cual fue desarrollada a partir de datos experimentales.

$$\Delta H_f = \frac{W_s d}{U} \left(1,5 + 2,68 \cdot 10^{-3} p d \frac{T_s - T_a}{T_s} \right) \quad (4)$$

En esta expresión U (m/s) y W_s (m/s) son la

velocidad del viento y del efluente al salir de la chimenea, $T_a(^{\circ}K)$ y $T_s(^{\circ}K)$ la temperatura del aire y de la emisión, p (hPa) es la presión atmosférica y d (m) el diámetro interior de la chimenea.



Figura 2. Pluma de dispersión en la cámara del túnel de viento, correspondiente a $Re= 5,7 \times 10^5$, $Re= 3,1 \times 10^5$, $Re= 5,8 \times 10^4$.

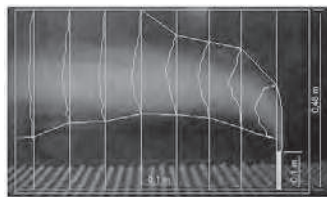


Figura 3. Desarrollo de la pluma en túnel, correspondiente una velocidad de 1,83 m/seg.

En la Tabla 1, se expresan los valores de levantamiento de pluma hallados en los ensayos, en función de las distintas velocidades, junto con los determinados empleando la expresión de Holland.

La determinación del levantamiento de la pluma es necesario para el cálculo de la altura efectiva de la chimenea, ésta se obtiene de la suma de la altura real de la chimenea más el levantamiento de la pluma. Esta altura interviene en las expresiones de los modelos matemáticos de difusión, como es el caso del modelo de Gauss.

Tabla1. Comparación de valores de la elevación de la pluma calculadas con la expresión de Holland y determinadas experimentalmente.

U (m/seg)	U/ W_s	Δh Holland (m)	Δh experimental (m)
18,00	1,26	0,012	0,012
9,57	0,67	0,023	0,021
1,83	0,13	0,121	0,188

4. Mediciones del campo de concentración

Las mediciones de concentraciones fueron realizadas en el túnel de viento “Prof. Joaquim Blessmann” del Laboratorio de Aerodinámica de las Construcciones, de la Universidad Federal do Rio Grande do Sul. Para este ensayo se empleó una simulación de capa límite neutralmente es-

table correspondiente a un terreno suburbanos con un exponente de la ley potencial $\alpha = 0,23$ y una escala geométrica de 1:300. Para el modelado de la capa límite se emplearon en forma conjunta elementos de rugosidad dispuestos en el piso del túnel, barrera y dispositivos de mezcla [8].

La altura de la fuente de emisión modelada tiene una altura de 250 mm y 17 mm de diámetro, representando en la escala natural a una chimenea de aproximadamente 75 m de altura y 5 m de diámetro (Figura 4). El gas trazador emitido desde la fuente fue emitido helio puro. La emisión se realizó con caudales y fueron analizados dos casos diferentes; el caso 1 con una velocidad del escurrimiento a la altura de la chimenea $U = 2,3$ m/s y una velocidad de la emisión $W_s = 1,26$ m/s, y el caso 2 con $U = 0,7$ m/s y $W_s = 0,56$ m/s. En la tabla 2 se resumen las velocidades y los parámetros adimensionales que permiten caracterizar cada caso (relación de velocidades, cantidad de movimiento y número de Froude densimétrico).

Para la medición de las concentraciones, se utilizó un anemómetro de hilo caliente con una sonda aspirante que permite medir valores medios y flotantes. En cada punto de medición fue obtenido un registro con una frecuencia de adquisición de 1024 Hz y 60 segundos de duración.

4. 1. Resultados

En la Figura 5, se muestran los perfiles verticales de concentración másica de helio determinados a sotavento de la chimenea. Las distancias x_1 y x_2 indican la posición en que fueron obtenidos los perfiles para los casos 1 y 2, respectivamente, con relación a la chimenea. La concentración es calculada como la relación en la masa de helio respecto de la masa total. Son considerables las diferencias de los perfiles obtenidos en cada caso para el valor medio y para el valor RMS.



Figura 4. Fuente de emisión y elementos de simulación de la capa límite.

Tabla 2. Parámetros característicos de los experimentos.

Casos	U (m/s)	W _s (m/s)	$\frac{W_s}{U}$	$\frac{\rho_s W_s^2}{\rho_a U^2}$	$\frac{\rho_a U^3}{(\rho_s - \rho_a) d g W_s}$
1	2.3	1.26	0.56	0.043	52.632
2	0.7	0.80	0.80	0.089	3.559

Para el caso 1, se presentan los registros de las concentraciones fluctuantes, en forma parcial (5 segundos) en dos puntos de medición; en la posición central de la pluma y en el extremo superior (en los bordes de la pluma). Los valores pico tienen el mismo orden de magnitud, tanto que el proceso es altamente intermitente en el extremo de la pluma y de baja intermitencia en el centro de la pluma. Este comportamiento del campo de concentraciones es semejante al obtenido por Cheung & Melbourne [9].

5. Discusión de resultados y conclusiones

En este trabajo se analizaron los requerimientos de semejanza necesarios para poder realizar la simulación de un proceso de dispersión de contaminantes en un túnel de viento. Se estudió la necesidad de realizar simplificaciones en estos criterios, con el objeto de que sea factible su implementación en el túnel de viento, para el caso de dispersión de contaminantes provenientes de una fuente puntual aislada.

El ensayo de visualización de la dispersión de la pluma permitió hacer un análisis cualitativo y cuantitativo con las imágenes fotográficas captadas en el proceso. En la Figura 2, se aprecian las modificaciones generadas en la pluma simulada al variar el número de Reynolds. Se ve que únicamente para números de Reynolds bajos se produce un levantamiento significativo de la pluma.

En la comparación efectuada en la Tabla 1 se aprecia claramente que el levantamiento de las plumas generadas a distintas velocidades será mayor cuanto menor sea la velocidad y que en los dos primeros casos la situación simulada concuerda con los valores calculados con la ecuación de Holland. La disparidad que se presenta en el tercer caso entre el valor teórico y el experimental de Dh puede atribuirse a las con-

diciones de realización del ensayo. Es necesario señalar que la técnica empleada tiene sus limitaciones, ya que la iluminación y adquisición de imágenes, en principio, deben mejorarse. Debe apuntarse a generar un haz de luz uniforme que intercepte a la pluma linealmente, y esta no debe provenir de una fuente de luz puntual como la empleada en el ensayo que puede verse en la Figura 1. También se puede mejorar la toma de las fotografías si estas se hacen de acuerdo a una secuencia y siempre desde la misma posición, cuidando que sombras o luces exteriores alteren la imagen, como sucede en el tercer caso de la Figura 2.

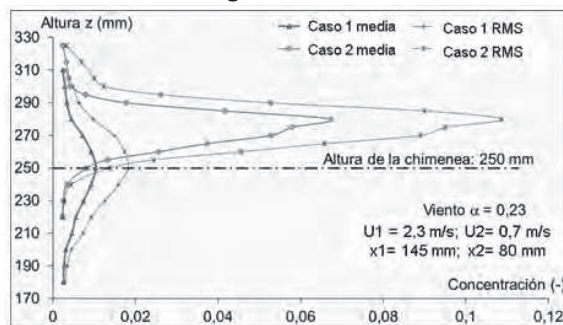


Figura 5. Perfiles de concentración de las plumas de emisión.

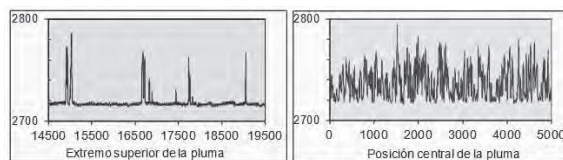


Figura 6. Registros de las concentraciones fluctuantes.

Con respecto a los resultados obtenidos del análisis de los campos de concentración en la región próxima a una fuente de emisión de un gas muy liviano, se observa que los dos casos analizados representan situaciones casi extremas. En el caso 1, se tiene una situación en la cual los efectos inerciales del escurrimiento incidente prevalecen sobre los efectos de empuje de la propia emisión; y en el segundo caso, son evidentes los efectos del empuje del gas emitido, en la elevación de la pluma, y la menor dilución en la concentración del gas. La intermitencia en las concentraciones será analizada a continuación utilizando distribuciones de probabilidad. Los resultados preliminares presentados son ejemplos de los múltiples perfiles verticales y horizontales que ya fueron medidos, y que per-



mitirán una caracterización más general del proceso de dispersión.

Los resultados obtenidos en este trabajo contribuirán al perfeccionamiento de técnicas de visualización, que como se describió tienen la ventaja de ser más sencillas económicas de realizar que los estudios de campo. Por otro lado, en estudios de este tipo, un primer análisis cualitativo significa una optimización de los posteriores ensayos de medición puntual de concentraciones.

6. Referencias

[1] Cermak J,y Takeda K., Physical Modelling of Urban air-Pollutant Transport, J.Wind Eng. Ind. Aerodyn., v 21, p. 51-67,1985.

[2] Poreh M, Kacherginsky A. Simulation of Plume rise Using Small Wind- tunnel Models. J.Wind Eng. Ind. Aerodyn., v 7, p. 1 -14, 1981.

[3] Espert Alemany, Vincent; Lopez Jiménez P. Amparo, Dispersión de Contaminantes en la atmósfera, Alfaomega grupo editor, Mexico, 2004

[4] Isymov, N., Tanaka, H. , “Wind tunnel modelling of stack gas dispersion – Difficulties and approximations”, Wind Engineering, Proceedings of the fifth International Conference, Fort Collins, Colorado, USA, Ed. by J. E. Cermak, Pergamon Press Ltd., 1980.

[5] White, B. y Stein, W., “Wind tunnel studies of variable stack heights for a low – profile building”, J.Wind Eng. Ind. Aerodyn., vol. 36, pp. 675-687, 1990.

[6] Gerdes, F, Olivari, D, “Analysis of pollutant dispersion in an urban street canyon”, J.Wind Eng. Ind. Aerodyn., vol. 82, pp. 105-125, 1999.

[7] Alvarez y Alvarez, Gisela M., Wittwer, Adrián R., Anais da 5a Escola de Primavera de Transição e Turbulência, “Análisis de los parámetros del perfil de viento en la CL simulada en un túnel de viento”, Paper ETT-06-0007, Rio de Janeiro, Brasil, 2006.

[8] Wittwer, A. R., Loredou-Souza, A. M., Camacho Schettini, E. B., “Modelagem do vento atmosférico para estudos de dispersão em túnel de vento”, Ciência & Natura–III Workshop Brasileiro de Micrometeorologia, 217-220, 2003.

[9] Cheung, J., Melbourne, W., “Probability distribution of dispersion from a model plume in turbulent wind”, J.Wind Eng. Ind. Aerodyn. 87, 271-285, 2000.