

Análise experimental no túnel de vento dos processos de difusão de gases poluentes na atmosfera

Diffusion processes experimental analysis of atmospheric gaseous pollutants in a wind tunnel

Gisela Marina Alvarez y Alvarez¹
Universidad Nacional del Nordeste
giselaalvarezyalvarez@yahoo.com.ar

Adrián R. Wittwer¹
Universidad Nacional del Nordeste
a_wittwer@yahoo.es

Acir M. Loredou-Souza
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
lac@ufrgs.br

Resumo. O objetivo deste trabalho é o estudo de problemas de dispersão de poluentes na atmosfera em túneis de vento. A utilização de um modelo em escala reduzida fornece a capacidade de analisar o processo de dispersão em situações complexas. Também permite a avaliação de diferentes alternativas para o projeto da fonte de emissão. A simulação do processo de dispersão de poluentes no túnel de vento requer dois conjuntos de critérios de similaridade, o primeiro estabelece que o escoamento no interior do túnel de vento deve ser semelhante ao vento natural na camada limite atmosférica, e o segundo que as características da fonte no modelo devem ser semelhantes às do protótipo. Neste trabalho, são estudados os critérios de semelhança do escoamento atmosférico e a fonte de emissão para reproduzir o processo de dispersão, e fazer uma primeira abordagem ao estudo experimental deste fenômeno. Na primeira parte, são apresentados os resultados de um estudo de visualização de um processo de dispersão realizado no túnel de vento da Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Nordeste, utilizando fumaça e considerando três velocidades de operação. O estudo da evolução da pluma simulada foi realizado a partir do processamento digital de imagens obtidas durante o teste. Analisa-se também a elevação da pluma comparando as medições com valores teóricos. Finalmente, são apresentados resultados de medições preliminares de experimentos para avaliar o campo de concentração de uma emissão de gás muito leve, utilizando um modelo em escala reduzida.

Palavras-chave: dispersão atmosférica, semelhança, túnel de vento.

Abstract. The objective of this work is the study of atmospheric pollutants dispersion problems in wind tunnels. The use of a reduced scale model provides the ability to analyze the process of dispersion in complex models. It also allows the study of different situations and alternatives in the source design. The wind tunnel pollutants dispersion simulation requires two sets of similarity criteria; the first established that the wind tunnel flow must be similar to natural wind in the atmospheric boundary layer, and the second, that the model source characteristics must be similar to prototype. In this work, the similarity criteria of the atmospheric flow and the emission source are studied to reproduce dispersion processes and develop a first approach to the experimental study of this phenomenon. Firstly, the results of a visualization dispersion process test performed at the wind tunnel of the Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Nordeste, using smoke as a tracer and considering three operation velocities are presented. The study of the plume evolution was made by image digital processing and the plume rise is also discussed by comparison of measurements with theoretical values. Finally, preliminary experiments results are presented to evaluate concentration field from an isolated point emission source using a light gas and reduced scale model.

Keywords: atmospheric dispersion, similarity, wind tunnel.

¹ Universidad Nacional del Nordeste. Av. Las Heras, 727, CP 3500, Resistencia, Provincia del Chaco, República Argentina.

² Universidade Federal do Rio Grande do Sul. C.P. 15085, Porto Alegre, 91501-970, Porto Alegre, RS, Brasil.

Introdução

Os poluentes atmosféricos são substâncias que, quando estão presentes na atmosfera, afetam negativamente a saúde dos seres humanos, animais e plantas ou geram desconforto na vida cotidiana. Nos últimos anos, tem crescido o interesse nesse tópico, devido aos numerosos efeitos que causam sobre a vida no planeta. Remover essas ações causaria alterações no atual padrão de vida, pelo que se opta por um maior estudo do fenômeno e pela proposta de soluções que tendem a controlar as emissões que ocorrem na atmosfera (Noel de Nevers, 2000).

Os efeitos que os poluentes têm sobre a saúde humana dependerão do tempo de exposição, da concentração do poluente e da idade e estado de saúde da pessoa. Animais, vegetação e alguns materiais também são suscetíveis aos efeitos dos poluentes atmosféricos. O Controle de emissões muitas vezes é feito sem ter ferramentas que permitem avaliar os processos de dispersão de gases e determinar a concentração dos contaminantes.

Neste contexto, o desenvolvimento de experiências e modelos que permitem avaliar os processos de dispersão de poluentes emitidos na atmosfera torna-se importante. A simulação numérica ou física de um fenômeno tão complexo como a dispersão atmosférica é uma ferramenta útil no planejamento ou para adotar medidas corretivas em determinadas instalações.

O transporte e a difusão turbulenta de poluentes, os efeitos do vento em edifícios e estruturas e a modificação do vento em áreas urbanas, pela presença de edifícios, podem ser considerados problemas da engenharia do vento. Para a análise desses problemas, utilizam-se medições *in situ*, ensaios em túneis de vento de camada limite e simulações numéricas.

Em particular, o processo de difusão e transporte de contaminantes depende das condições meteorológicas na camada limite atmosférica e é controlado pelas flutuações da velocidade e a direção do vento. A estabilidade atmosférica, a topografia da área e a rugosidade da superfície do terreno têm grande influência sobre a diluição das emissões devidas ao vento.

O túnel de vento de camada limite permite estudos experimentais em modelos em escala reduzida que reproduzem as características da turbulência na camada limite atmosférica e também permite a modelagem de fontes de

emissão. Os estudos de campo para a determinação da dispersão atmosférica são difíceis de controlar e muito custosos. As teorias de difusão permitem estudar alguns problemas, mas as soluções analíticas são difíceis de realizar. Por essa razão, o desenvolvimento de métodos de estudo desse problema em túneis de vento é uma ferramenta útil, que pode ter uma variedade de aplicações para a análise de problemas de difusão turbulenta.

Para realizar estudos de dispersão em túneis de vento, é necessária a aplicação de uma técnica adequada de simulação do vento na camada limite atmosférica e, posteriormente, simular a fonte e o processo de emissão.

Simular a camada limite atmosférica em um túnel de vento consiste em desenvolver um modelo físico do escoamento turbulento atmosférico, reproduzindo, dentro do túnel, os parâmetros que o caracterizam. Uma simulação adequada da camada limite atmosférica exige a reprodução dos ventos naturais, conseguindo uma adequada distribuição da velocidade meia com a altura e dos parâmetros turbulentos.

Neste trabalho, são analisados os critérios da semelhança necessários para desenvolver estudos de dispersão de gases em um túnel de vento. Em uma primeira abordagem da avaliação experimental desse tipo de fenômeno, são apresentados testes de visualização realizados no túnel de vento TV2 do Laboratório de Aerodinâmica da Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Nordeste (UNNE). Finalmente, são apresentados alguns resultados preliminares de medições de concentração em processos de dispersão de gases para uma fonte de emissão isolada no túnel de vento "Joaquim Blessmann" do laboratório de aerodinâmica das construções da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

Modelagem da camada limite atmosférica

De acordo com Isyumov e Tanaka (1980), a simulação de uma pluma de dispersão em um túnel de vento requer a modelagem das características da camada limite atmosférica e das propriedades térmicas e dinâmicas da pluma. A modelagem exata da camada limite atmosférica requer a semelhança geométrica, a semelhança do escoamento e a igualdade dos números de Reynolds (Re), Richardson (Ri), Rossby (Ro), Prandtl (Pr) e de Eckert (Ec). A semelhança geométrica implica a modelagem

do entorno, incluindo a rugosidade do terreno, da topografia e da temperatura na superfície; a modelagem do escoamento inclui a semelhança das velocidades médias e flutuantes e a estratificação da temperatura. Não é possível obter a semelhança exata para escalas pequenas, portanto, algumas hipóteses são utilizadas para se obter a semelhança aproximada do fenômeno.

O número de Richardson está relacionado com a semelhança da estabilidade atmosférica – na simulação da atmosfera neutramente estável, como a utilizada neste trabalho, a igualdade do número de Richardson pode não ser levada em conta. A igualdade do número de Prandtl é satisfeita, sendo que o fluido é sempre o ar, e a igualdade do número de Eckert não tem importância no escoamento incompressível. O número de Rossby não é considerado, sendo que as forças de Coriolis podem ser desprezadas. A semelhança do número de Reynolds é obtida a partir dos valores que garantem as condições de turbulência do escoamento simulado. A simulação aproximada do escoamento permite reproduzir o vento natural nas condições atmosféricas neutramente estáveis e ligeiramente instáveis. Essas condições são adequadas para avaliar o processo de dispersão no caso de chaminés altas (Isyumov e Tanaka, 1980).

Modelagem da pluma

Uma vez obtida a simulação da camada limite atmosférica no túnel de vento, para a modelagem da dispersão da pluma, é necessária a semelhança de parâmetros adimensionais relacionados com as características da chaminé e da emissão. Para a modelagem exata do comportamento da pluma de emissão, deve-se verificar a semelhança geométrica da fonte e a igualdade dos seguintes parâmetros adimensionais; número de Froude, a razão entre massas específicas da emissão e do ar, a relação entre velocidade de saída da emissão e velocidade do escoamento atmosférico; e, finalmente, a igualdade do número de Reynolds (Isyumov e Tanaka, 1980). A semelhança completa não pode ser conseguida, e, como acontece com a simulação da camada limite atmosférica, é aplicado o critério de semelhança aproximada (Poreh e Kacherginsky, 1981). As simplificações propostas são variadas e dependem do tipo de estudo. Para simular a elevação da pluma de dispersão, é importante que o número de Reynolds da chaminé seja grande

o suficiente como para desprezar o seu efeito. Além disso, a maioria dos autores concorda que o efeito da densidade na simulação não é crítico e pode provocar como máximo um deslocamento da origem virtual da pluma de alguns diâmetros da chaminé (Poreh e Kacherginsky, 1981). Melbourne (1968) e Isyumov *et al.* (1976) propuseram a semelhança da elevação mantendo a igualdade de um parâmetro de empuxo, um parâmetro relacionado com a quantidade de movimento da emissão e da escala geométrica da chaminé (Equação 1).

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

onde d é o diâmetro de saída da chaminé, W_s a velocidade de saída da emissão, U a velocidade do vento na saída da chaminé, ρ_s a densidade da emissão, ρ_a a densidade do ar atmosférico, $\Delta \rho = \rho_a - \rho_s$ a diferença das densidades da emissão e do ar atmosférico, L é uma largura característica como a altura, H , da chaminé.

Outros autores (Poreh e Kacherginsky, 1981) também usam o parâmetro adimensional de quantidade de movimento da Equação (1), mas modificam o parâmetro de empuxo. Consideram que a pluma é dominada pelo empuxo, e sugerem que o parâmetro de semelhança apropriado para descrevê-lo é a relação entre a quantidade de movimento do vento incidente e a quantidade de movimento do empuxo da emissão no pequeno volume Δv . O parâmetro de empuxo é,

$$\frac{(1 - C_s) \rho_a U^2}{C_s (\rho_a - \rho_s) L'} \quad (2)$$

onde C_s é a concentração do gás emitido pela chaminé. Além disso, supondo que, ao longe da fonte, $C_s \ll 1$, e que C_s é diretamente proporcional à velocidade da emissão W_s , e inversamente proporcional à velocidade do vento U , o parâmetro de empuxo pode aproximar-se com, Além disso, assumindo que num ponto afastado da fonte $C_s \ll 1$, e assumindo também que C_s é diretamente proporcional à velocidade da emissão W_s , e inversamente proporcional à velocidade do vento U , o parâmetro de empuxo pode aproximar-se com,

$$\frac{\rho_a U^3}{\Delta \rho g L W_s} \quad (3)$$

Finalmente, os parâmetros necessários para obter uma semelhança aproximada do processo de dispersão seriam os mencionados na Equação (4).

$$\lambda \left(\frac{\rho_a U^2}{\Delta \rho g L W_s} \right) = 1 ; \lambda \left(\frac{\rho_s W_s^2}{\rho_a U^2} \right) = 1 ; \lambda \left(\frac{d}{L} \right) = 1 \quad (4)$$

Ensaio de visualização

O estudo da pluma simulada pode ser realizado capturando uma série de fotografias do processo e fazendo um processamento digital das imagens obtidas. Estudos desse tipo têm sido realizados em diferentes partes do mundo com sucesso, como, por exemplo, os desenvolvidos por White e Stein (1990), que determinaram a dispersão do vento produzida por uma chaminé de altura variável utilizando fumaça e gravando com uma câmera de vídeo, para logo processar as imagens adquiridas. Gerdes e Olivari (1999) também empregaram a técnica de visualização do escoamento, medindo ponto a ponto a intensidade das imagens capturadas com uma câmera na análise dos fenômenos de dispersão em cânions urbanos.

Neste trabalho, aplicou-se, no túnel de vento, TV2, da UNNE, uma técnica de visualização para a análise das concentrações em uma pluma, determinando as modificações que são necessárias para melhorar os resultados obtidos, estudando o comportamento e a configuração das plumas medidas para diferentes números de Reynolds. A concentração do contaminante foi obtida utilizando fumaça, capturando fotografias do processo, e, finalmente, as imagens foram processadas digitalmente.

Os experimentos foram conduzidos no túnel de vento TV2 da UNNE, Argentina (Alvarez y

Alvarez e Wittwer, 2004). É um túnel de circuito aberto, cujo comprimento total é de 7,50 m, sua câmara de testes consiste em um duto de seção quadrada de 0,48 m de lado e 4,45 m de comprimento (Figura 1). A máxima velocidade do escoamento é de 18 m/s e emprega um ventilador centrífugo com um motor trifásico de 1.450 RPM e 10 CV.

A simulação da camada limite atmosférica foi realizada utilizando elementos de rugosidade e dispositivos de mistura adequados para reproduzir uma camada limite neutramente estável de espessura parcial. Na Figura 2, são mostrados os elementos de rugosidade e as agulhas que permitiram simular uma camada limite correspondente a um terreno da categoria IV da norma NBR-6123/1988. A análise da camada limite simulada foi apresentada em trabalhos anteriores (Alvarez y Alvarez e Wittwer, 2006).

Para os testes, foi empregado um gerador de fumaça a base de glicerina, e a velocidade do escoamento foi aproximadamente 14,3 m/s. A fonte do contaminante foi simulada com uma tubulação metálica de diâmetro interno de 1 cm e 10 cm de altura, localizada no centro da câmara. As imagens da pluma foram obtidas a partir de um feixe de luz e uma câmera digital.

Resultados dos ensaios de visualização

Foi realizado um teste com a máxima velocidade do canal, 18 m/s, sendo o número de Reynolds relativo à altura do canal $Re = 5,7 \times 10^5$. A seguir, a velocidade foi reduzida até 9,82 m/s, e o número de Reynolds, de $3,1 \times 10^5$. Finalmente, realizou-se um teste com velocidade de 1,83 m/s e número de Reynolds de $5,8 \times 10^4$. A Figura 3 mostra a configuração da pluma para os três casos citados.

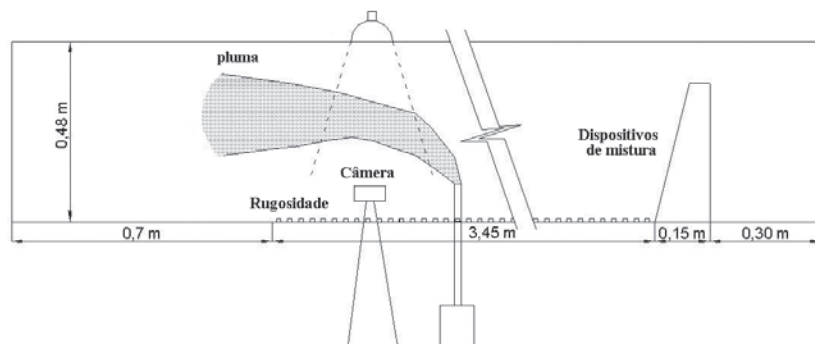


Figura 1. Túnel TV2 de la Facultad de Ingeniería, UNNE.

Figure 1. Facultad de Ingeniería (UNNE) wind tunnel.

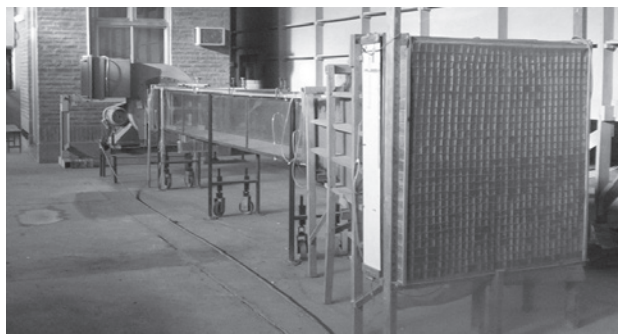


Figura 2. Detalhamento da instrumentação utilizada para o ensaio de visualização.
Figure 2. Instrumental employed in the visualization test.

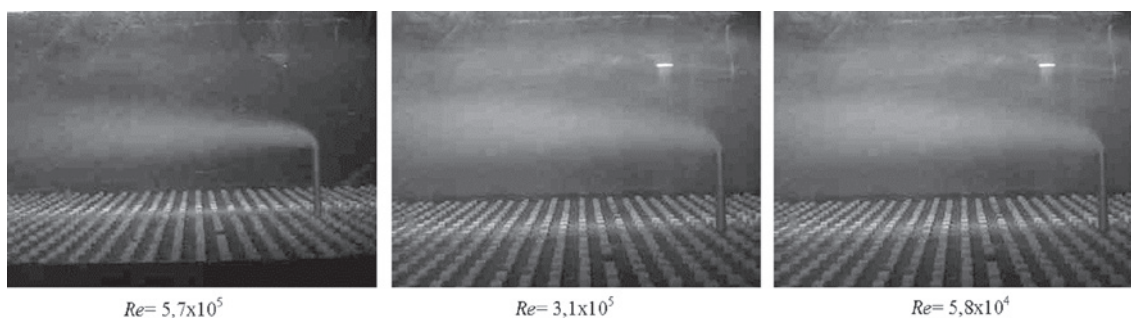


Figura 3. Pluma de dispersão na câmara do túnel de vento.
Figure 3. Dispersion plume in wind tunnel test section.

As imagens capturadas com a câmera de alta resolução permitiram o processamento digital. O mesmo consistiu na sobreposição de uma malha a cada fotografia e na realização de uma avaliação de acordo com a intensidade da cor comparando com um padrão. O padrão usado na comparação foi determinado atribuindo o valor mais baixo e mais alto à intensidade mais baixa e mais alta encontrada na imagem, respectivamente. Com base nesta valoração, as intensidades da cor indicarão o nível de concentração. A seguir, foram obtidos os perfis longitudinais de concentração a cada 0,1 m. A Figura 4 mostra o resultado do processamento correspondente ao ensaio a uma velocidade de 1,83 m/s.

Seguidamente, se procederam a realizar cada 0,1 m os perfis longitudinais de concentração, a partir dos resultados obtidos na valoração da intensidade. A Figura 4 mostra o resultado do processamento correspondente ao ensaio a uma velocidade de 1,83 m/s.

Na análise qualitativa do comportamento da pluma e sua dependência da estabilidade atmosférica, muitas vezes referem-se a três modelos básicos: ondulado, que ocorre quando a temperatura diminui rapidamente com a altura (gradiente instável); cônica, se diminui

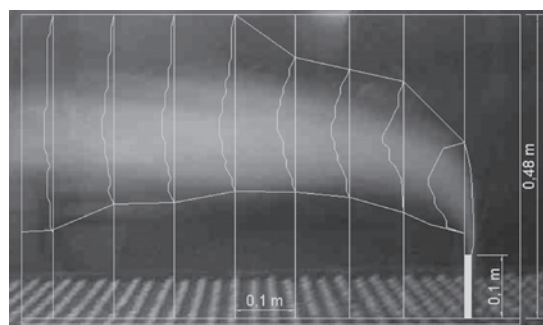


Figura 4. Configuração da pluma no túnel de vento, correspondente a uma velocidade de 1,83 m/s.
Figure 4. Plume configuration at the wind tunnel, mean velocity of 1,83 m/s.

pouco ou é constante com a altura (em condições aproximadamente neutras); e fumigação, se aumenta com a altura (inversão).

Também se mencionam três modelos intermédios: o de elevação que ocorre quando a chaminé se estende através da inversão da superfície com uma camada instável acima; fumigação e confinamento que ocorrem quando uma camada instável ou neutra é limitada por uma inversão acima da altura da chaminé.

A elevação da pluma acima da altura da chaminé depende de fatores meteorológicos

e da emissão. Entre os meteorológicos estão a velocidade do vento U , a temperatura do ar T_a , o gradiente vertical da velocidade, a pressão atmosférica p e a estabilidade atmosférica. E os fatores relacionados com a emissão são a velocidade do efluente ao sair da chaminé W_s , sua temperatura T_s e o diâmetro interior da chaminé d . A maioria das equações para determinar a elevação da pluma Δh , são empíricas, devido à complexidade das relações entre variáveis, como, por exemplo, a equação de Holland (Equação 5), que foi desenvolvida a partir de dados experimentais, onde a pressão deve ser expressa em hPa , as velocidades em m/s , os comprimentos em m , e as temperaturas em $^{\circ}K$, para obter a elevação da pluma em m .

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

Na Tabela 1, são expressos os valores de elevação das plumas obtidos nos ensaios em comparação com os calculados utilizando a equação de Holland.

A determinação da elevação da pluma é necessária para o cálculo da altura efetiva da chaminé, a qual é obtida a partir da soma da altura real da chaminé mais a altura de elevação Δh . Essa altura é empregada em expressões de modelos matemáticos de difusão, como é o caso do modelo de Gauss.

Medições do campo de concentração

As medições de concentrações foram efetuadas no túnel de vento “Prof. Joaquim Blessmann” do Laboratório de Aerodinâmica das Construções, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Figura 5). Para esse ensaio, foi

Tabela 1. Comparação dos valores de elevação das plumas.

Table 1. Plume rise comparison.

U (m/seg)	U/ Ws	Δh teórica equação de 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

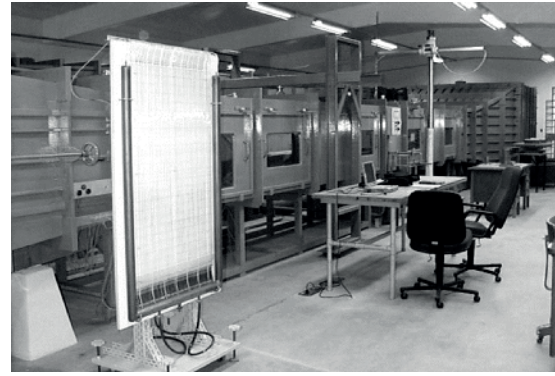


Figura 5. Túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann, UFRGS, Brasil.

Figure 5. Prof. Joaquim Blessmann wind tunnel, UFRGS, Brazil.

empregada uma simulação de camada limite neutralmente estável, correspondente a um terreno suburbano com um expoente da lei potencial $\alpha = 0,23$ e uma escala geométrica de 1: 300. Para a modelagem da camada limite, foram utilizados elementos de rugosidade e dispositivos de mistura (Wittwer *et al.*, 2003).

A fonte de emissão modelada tem uma altura de 250 mm e 17 mm de diâmetro, representando, na escala natural, uma chaminé de aproximadamente 75 m de altura e 5 m de diâmetro (Figura 6). O gás emitido pela fonte foi hélio puro. A emissão foi feita com taxas de escoamento constantes, e foram analisados dois casos diferentes; o caso 1, com uma velocidade de escoamento na altura da chaminé $U = 2,3$ m/s e uma velocidade de emissão $W_s = 1,26$ m/s, e o caso 2, com $U = 0,7$ m/s e $W_s = 0,56$ m/s. A Tabela 2 resume as velocidades e os parâmetros adimensionais que caracterizam cada caso (relação de velocidade, quantidade de movimento e número de Froude densimétrico).

Para a medição das concentrações, foi utilizado um anemômetro de fio quente conectado a uma sonda de sucção que permite a medição de valores médios e flutuantes. Em cada ponto de medição, obteve-se um registro com uma frequência de aquisição de 1.024 Hz e 60 segundos de duração.

Resultados das medições do campo de concentração

Na Figura 7, são mostrados os perfis verticais de concentração em massa_{Hélio}/massa_{total} nas posições a sotavento da chaminé. As distâncias x_1 e x_2 indicam a posição em que foram obtidos os perfis para os casos 1 e 2,

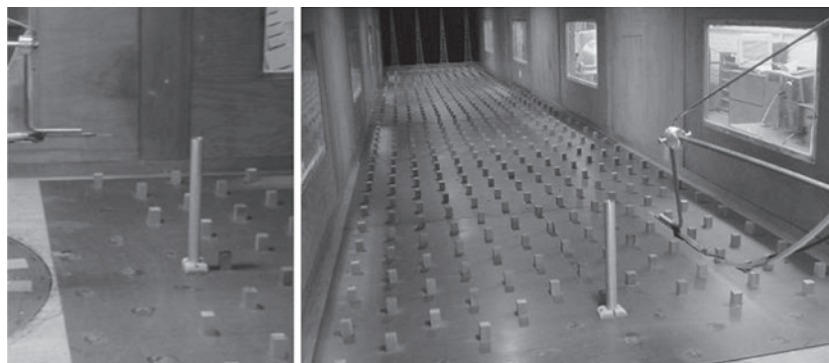


Figura 6. Fonte de emissão e elementos de simulação da camada limite.
Figure 6. Emission source and hardware of boundary layer simulation.

Tabela 2. Parâmetros característicos dos experimentos.
Table 2. Experiment characteristic parameters.

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

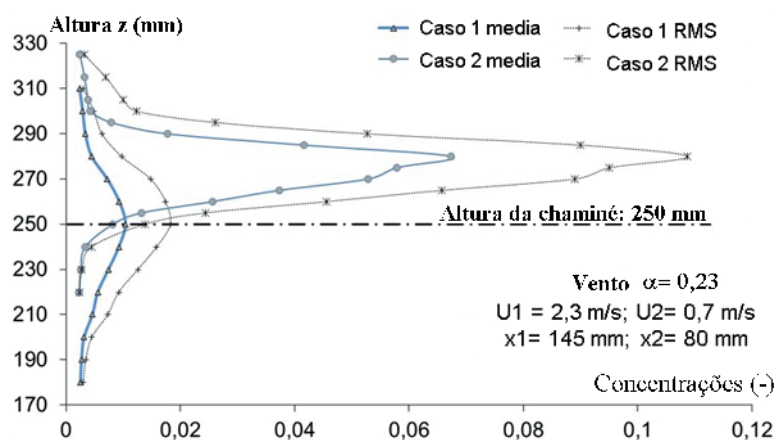


Figura 7. Perfis de concentração média.
Figure 7. Mean concentration profiles.

respectivamente, em relação à chaminé. Existem diferenças consideráveis nos perfis obtidos em cada caso, para o valor médio e o valor RMS.

Para o caso 1, são apresentados registros parciais de flutuação de concentrações, em forma parcial (15 segundos) em ppm (partes por milhão) para dois pontos de medição, na posição central da pluma e na borda superior. Os picos de concentração têm a mesma ordem de grandeza, mas o processo é altamente intermitente na borda superior da pluma

e de baixa intermitência no centro da pluma. O comportamento do campo de concentração é semelhante ao obtido por Cheung e Melbourne (2000).

Discussão de resultados e conclusões

Os ensaios de visualização permitiram uma análise qualitativa do processo. Foram observadas as alterações geradas na pluma simulada ao variar o número de Reynolds, e,

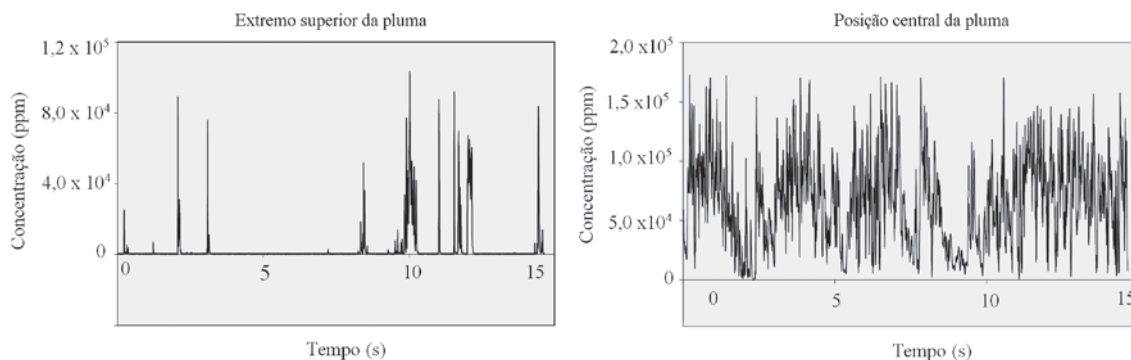


Figura 8. Registros das concentrações flutuantes.

Figure 8. Fluctuating concentrations records.

para valores baixos desse parâmetro, acontece uma significativa elevação da pluma. Como o ensaio foi realizado em condições de estabilidade neutra, a pluma deveria adaptar-se ao modelo cônico, configurações obtidas para os três casos analisados (Figura 3).

Na Tabela 1, pode ser visto que a elevação da pluma gerada é maior para as menores velocidades do vento incidente. Nos dois primeiros casos estudados, a situação simulada é consistente com os valores de elevação da pluma calculados com a expressão de Holland. A diferença entre o valor experimental e o teórico de Δh no terceiro caso, pode ser atribuída às condições do ensaio. É preciso dizer que a técnica tem limitações e que a iluminação e a aquisição das imagens deveriam ser melhoradas.

Nos resultados obtidos a partir da análise dos campos de concentração na região próxima da fonte de emissão, observa-se que os dois casos analisados representam situações quase extremas. No caso 1, os efeitos inerciais do escoamento incidente prevalecem sobre os efeitos do empuxo da emissão; no caso 2, os efeitos do empuxo do gás emitido são evidentes, observando-se uma maior elevação da pluma e menor diluição da concentração. As flutuações das concentrações serão analisadas a seguir, utilizando distribuições de probabilidade. Os resultados preliminares apresentados são apenas exemplos de vários perfis verticais e horizontais que já foram medidos e, a seguir, permitirão uma caracterização mais geral do processo de dispersão.

Os resultados obtidos neste estudo contribuirão para melhorar as técnicas de visualização, que têm a vantagem de ser mais simples e econômicas que os experimentos de campo. Por outro lado, em estudos desse tipo, uma

primeira análise qualitativa significa uma otimização dos ensaios subsequentes de medição pontual das concentrações.

Referências

- ALVAREZ Y ALVAREZ, G.; WITTWER, A. 2004. Estudio de escurrimientos turbulentos de capa límite en un túnel de viento de circuito abierto. *Anais da 4a Escola de Primavera de Transição e Turbulência - EPTT 2004*. Porto Alegre, Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas – ABCM. Disponível em: <http://www.abcm.org.br/app/webroot/anais/eptt/2004/portuguese/docs/p08c.pdf>. Acesso em: 08/06/2016.
- ALVAREZ Y ALVAREZ, G.; WITTWER, A. 2006. Análisis de los parámetros del perfil de viento en la CL simulada en un túnel de viento. *Anais da 5a Escola de Primavera de Transição e Turbulência- EPTT 2006*. Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas – ABCM, Paper ETT-06-0007. Disponível em: <http://www.abcm.org.br/anais/eptt/2006/artigos%20para%20o%20site/ETT06-07.pdf>. Acesso em: 08/06/2016.
- CHEUNG, J.; MELBOURNE, W. 2000. Probability distribution of dispersion from a model plume in turbulent wind. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **87**(2-3):271-285. [http://dx.doi.org/10.1016/S0167-6105\(00\)00043-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-6105(00)00043-X)
- DE NEVERS, N. 1998. *Ingeniería de control de la contaminación del aire*. México, McGraw-Hill, 546 p.
- GERDES, F.; OLIVARI, D. 1999. Analysis of pollutant dispersion in an urban street canyon. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **82**(1-3):105-125. [http://dx.doi.org/10.1016/S0167-6105\(98\)00216-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-6105(98)00216-5)
- ISYUMOV N.; JANDALI T.; DAVENPORT A.G. 1976. Model studies and the prediction of full-scale levels of stack gas concentration. *Journal of the Air Pollution Control Association*, **26**(10):956-964. <http://dx.doi.org/10.1080/00022470.1976.10470344>

- ISYUMOV, N.; TANAKA, H. 1979. Wind tunnel modelling of stack gas dispersion – Difficulties and approximations. *Wind Engineering, Proceedings of the fifth International Conference*. Fort Collins, Pergamon Press Ltd., 2:987-1002.
- MELBOURNE, W.H. 1968. Wind Tunnel Modelling of Buoyant Chimney Plumes. *In: Australian Conference on Hydraulic and Fluid Mechanics*, 3, Sydney, p. 81-85. Disponível em: <http://people.eng.unimelb.edu.au/imarusic/proceedings/3/Melbourne.pdf>. Acesso em: 07/06/2016.
- POREH, M.; KACHERGINSKY, A. 1981. Simulation of Plume Rise in Small Wind-Tunnel Models. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 7(1):1-14. [http://dx.doi.org/10.1016/0167-6105\(81\)90064-7](http://dx.doi.org/10.1016/0167-6105(81)90064-7)
- WHITE, B.; STEIN, W. 1990. Wind tunnel studies of variable stack heights for a low – profile building. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 36(1):675-687. [http://dx.doi.org/10.1016/0167-6105\(90\)90349-H](http://dx.doi.org/10.1016/0167-6105(90)90349-H)
- WITTWER, A.R.; LOREDO-SOUZA, A.M.; CAMAÑO SCHETTINI, E.B. 2003. Modelagem do vento atmosférico para estudos de dispersão em túnel de vento. *Revista Ciência e Natura*, vol. Especial, p. 217-221.

Submetido: 15/01/2015

Aceito: 21/03/2016