

SIMULAÇÃO FÍSICA DE PROCESSOS DE DIFUSÃO TURBULENTA DE GASES POLUENTES NA CAMADA ATMOSFÉRICA SUPERFICIAL.

A. R. Wittwer¹, F. De Paoli², E. B. C. Schettini³, A. M. Loredo-Souza².

¹Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Nordeste, Argentina
Av. Las Heras 727, CP 3500, Resistencia, Argentina
e-mail: a_wittwer@yahoo.es - Tel.: 03722 439039

²Laboratorio de Aerodinámica de las Construcciones, UFRGS, Brasil

³Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS, Brasil

RESUMEN: Neste trabalho é analisado experimentalmente o processo de dispersão nas proximidades de uma fonte de emissão gasosa pontual, mediante um modelo a escala reduzida em um túnel de vento de camada limite. O modelo da fonte representa uma emissão de gás pontual leve que se dispersa em uma camada limite turbulenta em estabilidade neutra. São consideradas diferentes condições determinadas pelo grau de empuxo da pluma, a velocidade de saída da emissão e a velocidade do escoamento incidente. Os resultados obtidos permitem verificar uma boa reprodução do processo de difusão turbulenta na atmosfera e analisar, além dos campos médios de concentração, o comportamento das respectivas flutuações.

Palavras chave: pluma de emissão, túnel de vento, sonda aspirante.

INTRODUÇÃO

Na atualidade estão sendo desenvolvidos numerosos trabalhos computacionais relacionados com os fenômenos de dispersão. Geralmente, esses estudos precisam ser validados com resultados experimentais. Os custos da experimentação de campo conduzem à realização de estudos de laboratório em modelos reduzidos. Neste contexto, o túnel de vento de camada limite se torna uma ferramenta importante, porém, torna-se necessária a avaliação da factibilidade da reprodução das características da camada limite atmosférica e dos processos de dispersão. Até hoje, não foram publicados estudos experimentais de dispersão atmosférica realizados na América do Sul utilizando modelos em escala reduzida, não obstante as grandes concentrações urbanas e os problemas de contaminação atmosférica que são registrados. Desenvolver uma ferramenta que permita a avaliação destes problemas seria uma grande contribuição para a realização de estudos visando o melhoramento das condições ambientais em toda a região.

Para reproduzir fenômenos de dispersão em túnel do vento, além dos requerimentos de simulação da CLA, são estabelecidas condições de semelhança para a modelagem do comportamento da pluma de emissão. Estes requerimentos, de acordo com Isyumov & Tanaka [1980], podem ser resumidos da seguinte forma: semelhança geométrica da fonte, igualdade do número de Froude, igualdade da relação de densidade, igualdade da relação entre velocidades e igualdade do número de Reynolds da fonte.

As dificuldades práticas que surgem da simulação exata do processo de emissão têm conduzido à utilização de simulações aproximadas. Cermak & Takeda [1985] propõem, além da semelhança geométrica, a igualdade da relação entre a velocidade de emissão e a velocidade local de vento, e a igualdade do número de Froude densimétrico. Os critérios de semelhança podem ser modificados de acordo com a zona que se pretende modelar, seja esta a região mais próxima à fonte, na qual a própria estrutura da chaminé e a descarga provocam modificações no campo de escoamento, ou a zona mais afastada, onde estes efeitos praticamente não são percebidos.

Neste trabalho estuda-se o processo de dispersão de uma pluma de emissão utilizando um modelo reduzido em um túnel de vento de camada limite. O modelo da fonte representa uma emissão de gás pontual leve que se dispersa em uma camada limite turbulenta em estabilidade neutra. São consideradas diferentes condições determinadas pelo grau de empuxo da pluma, a velocidade de saída da emissão e a velocidade do escoamento incidente.

DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS

O requisito prévio a um estudo de dispersão em túnel de vento é a simulação física do escoamento atmosférico. Os testes correspondentes a este trabalho foram realizados no túnel de vento de camada limite de retorno fechado Prof. Joaquim Blessmann da UFRGS. Este túnel tem uma relação “comprimento / altura” da câmara de ensaios superior a 10, permitindo a simulação das principais características dos ventos naturais.

A seguir, são descritas as principais características do modelo da fonte de emissão, as condições de escoamento incidente e as configurações que definem o processo de dispersão dos testes realizados. O modelo da fonte representa uma emissão de gás pontual leve que se dispersa em uma camada limite turbulenta em estabilidade neutra. São consideradas diferentes condições determinadas pelo grau de empuxo da pluma, a velocidade de saída da emissão e a velocidade do escoamento incidente.

O modelo foi construído com um tubo circular de 20 mm de diâmetro e altura variável que representa uma chaminé com altura variando de 36 a 100 m. A escala do modelo é 1:350, em concordância com o fator de escala da simulação da camada limite atmosférica. As emissões são representadas com hélio puro e misturas hélio-ar, permitindo a variação do empuxo da pluma.

O escoamento incidente representa a camada limite atmosférica neutra com um expoente do perfil de velocidades médias $\alpha = 0.23$. Foram empregados elementos de rugosidade e dispositivos de mistura apropriados para reproduzir um escoamento de camada limite neutralmente estável. Os elementos de rugosidade e as agulhas perfuradas utilizadas para simular a camada limite superficial que se desenvolve em um terreno suburbano são descritos por Blessmann [1982]. A escala de simulação é aproximadamente 1:350. A velocidade do vento, a escala do túnel de vento, foi variada entre 0.96 e 3.44 m/s modificando os parâmetros característicos da pluma. Foi considerado o caso de uma chaminé isolada em um terreno homogêneo.

As condições características da pluma são determinadas pelos parâmetros adimensionais indicados a seguir. Na tabela 1 são apresentados os valores dos parâmetros considerados na caracterização da pluma. As relações e parâmetros adimensionais utilizados são; a razão de velocidades emissão/escoamento, w_0/U_0 , a quantidade de movimento da emissão, $\rho_0 w_0^2 / \rho_a U_0^2$, o empuxo da pluma, $[(\rho_0 - \rho_a)g w_0 D_0] / \rho_a U_0^3$. O empuxo da pluma também é conhecido como número de Froude densimétrico. Na tabela, os valores das velocidades w_0 e U_0 correspondem ao modelo reduzido.

Condição	Emissão	Velocidade da emissão w_0 [m/s]	Velocidade do escoamento U_0 [m/s]	Parâmetros adimensionais		
				$\frac{w_0}{U_0}$	$\frac{\rho_0 w_0^2}{\rho_a U_0^2}$	$\frac{[(\rho_0 - \rho_a)g w_0 D_0]}{\rho_a U_0^3}$
A	He	0,56	0,85	0,66	0,060	-0,154
B	He	1,26	1,91	0,66	0,060	-0,031
C	He	0,95	0,85	1,11	0,171	-0,260
D	He - Ar	0,75	0,85	0,88	0,278	-0,154
E	He	0,56	3,04	0,18	0,005	-0,003
F	He	0,95	3,04	0,31	0,013	-0,006
G	He	0,56	1,91	0,29	0,012	-0,014
H	He - Ar	1,45	1,91	0,76	0,145	-0,031

Tabela 1: Condições e características da pluma.

Na figura 1 se mostra a câmara de testes do túnel de vento com os dispositivos de simulação e o modelo da emissão. No esquema, D é o diâmetro da chaminé e x indica a distância ao ponto de medição. A altura da chaminé, em escala reduzida, é $H = 250$ mm.

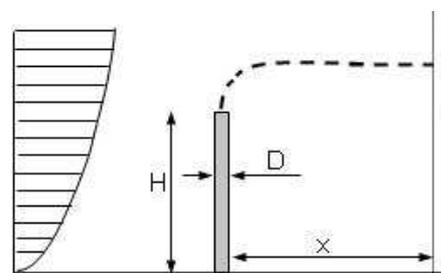


Figura 1: Simulação do vento atmosférico e modelo da emissão.

Para o estudo do processo de dispersão da pluma, foi avaliado o campo de concentrações a sotavento da fonte de emissão. As medições foram realizadas com o anemômetro de fio quente utilizando uma sonda aspirante. Esta sonda é constituída pelo fio quente localizado e um tubo cerâmico de 0,3 mm de diâmetro interno que, conectado a uma bomba de vácuo, permite medir as concentrações instantâneas. O tubo capilar, conjuntamente com a aspiração, provoca o bloqueio sônico e o fio quente torna-se assim, um sensor que percebe as variações das propriedades do fluido, ou seja, que mede as variações de

concentração do gás independente do campo de velocidade externo. Em cada ponto foi tomada uma mostra de um minuto de duração com uma frequência de amostragem de 1024 Hz.

RESULTADOS

A seguir são apresentados os resultados obtidos nos testes como perfis do coeficiente de concentração K e da intensidade das flutuações de concentração I_c , sendo

$$K = \frac{CU_H H^2}{Q_0} \quad (1)$$

$$I_c = \frac{\sigma_c}{C} \quad (2)$$

onde C e σ_c são a concentração média e o desvio padrão das flutuações, respectivamente, Q_0 o vazão da emissão, e z a distancia vertical a partir do piso do túnel.

Nas figuras 2 e 3 são apresentados os perfis verticais correspondentes a 6 posições a sotavento da emissão, considerando a condição A, sendo x/H a distância adimensional desde a fonte de emissão. Na figura 4 se indicam os perfis correspondentes à condição B para três posições a sotavento. Os perfis laterais indicados na figura 5 correspondem à condição A, $x/H = 0.33$ e $z/H = 1.12$, e condição B, $x/H = 0.60$ e $z/H = 1.10$, confirmando a simetria lateral.

A figura 6 mostra os perfis mais próximos à fonte de emissão. As condições A, C, D correspondem a vento mais leve (menor efeito inercial) e diferentes emissões. Para vento mais forte, a condição E (menor w_0) provoca um declividade inicial da pluma, em tanto que na condição F o centro da pluma coincide com a altura da chaminé. Em todos os casos se percebe a assimetria na configuração da pluma (σ_z na região superior menor do que na região inferior).

Na figura 7 são analisados três perfis na região mais a sotavento. No caso $x/H = 2.00$ (a), a condição A implica menor efeito inercial e o perfil é mais irregular. Os casos $x/H = 1.80$ (b) e (c) correspondem às condições B e H respectivamente, o efeito inercial é maior e a conformação da pluma é bem gaussiana. Entre os casos (b) e (c) existem diferenças de empuxo que se manifestam nos valores de Δz e σ_z .

Na figura 8 são comparados perfis na posição $x/H = 0.60$ para as condições B, G e H. A elevação da pluma Δz é uma função do empuxo e se percebe também uma pequena variação do parâmetro σ_z . Nestes casos a variação do empuxo é produto unicamente da variação da emissão, sendo que o escoamento incidente praticamente não varia.

Nos modelos de dispersão é muito difundida a utilização da expressão gaussiana. No caso das distribuições verticais de concentração, o perfil gaussiano tem a forma:

$$C(z)/C_0 = \exp[-(z - z_0)^2 / 2\sigma_z^2] \quad (3)$$

onde C_0 é o valor máximo da concentração (posição central da pluma). A partir do ajuste dos valores experimentais a esta expressão, é possível obter a dispersão vertical σ_z . O modelo de dispersão Gaussiano é, possivelmente, o mais comum dos modelos para o estudo das concentrações na pluma de emissão. O ponto crítico do modelo é a determinação da dispersão lateral σ_y e vertical σ_z .

Na figura 9 são apresentados os valores da dispersão vertical σ_z em função da distância x na forma adimensional para as condições A e B. Os valores levados à escala atmosférica são comparáveis aos que proporciona a curva de Briggs na parte inicial, considerando estabilidade atmosférica entre neutral e suavemente instável. A comparação dos valores experimentais com as expressões de Briggs fornecidas por Zanetti [1990], para a condição de estabilidade atmosférica neutral (D) em terrenos urbano e rural, é indicada na figura. Uma boa concordância é observada entre os valores experimentais e a curva para esta condição de estabilidade. As expressões de Pasquill-Gifford, muito utilizadas nos modelos dos organismos reguladores, também foram consideradas nesta comparação, mas não são apresentadas nas figuras pela similitude com as curvas de Briggs. A extrapolação dos valores experimentais aos resultados obtidos por Robins [2001] em túnel de vento tem boa concordância considerando o caso do menor número de Richardson ($Ri^* = 0.12$) que constitui a condição mais próxima a estes testes.

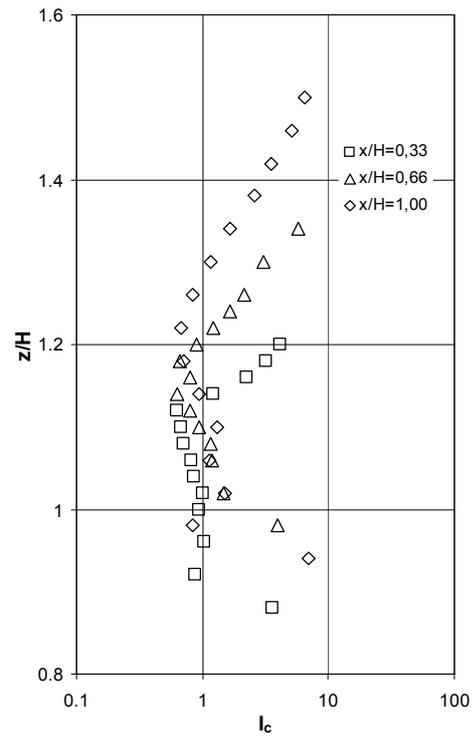
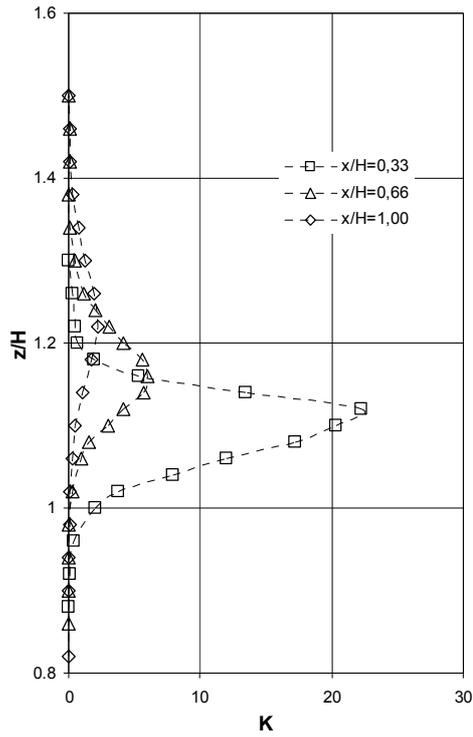


Figura 2: Perfis de concentração média e intensidade de concentração, condição A, para $x/H = 0.33, 0.66, 1.00$.

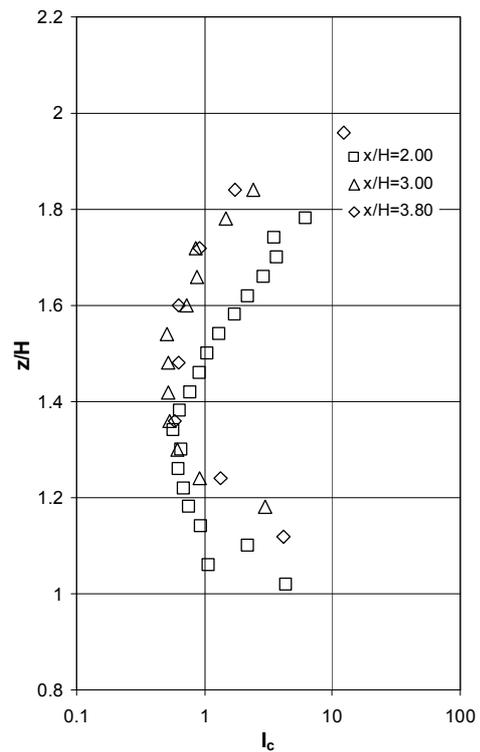
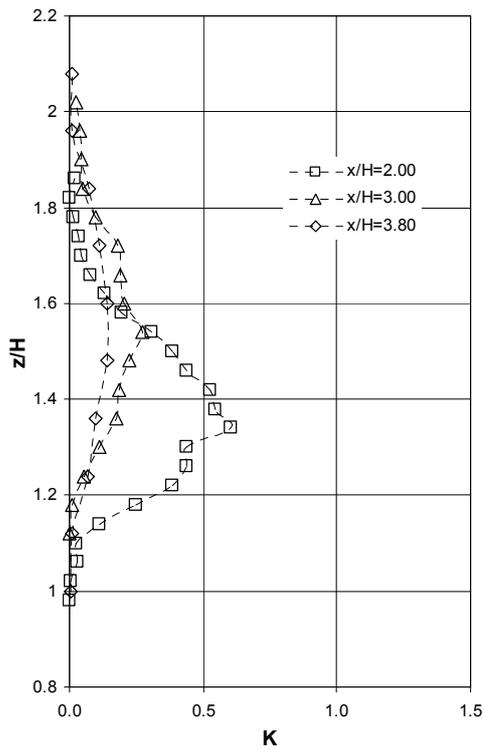


Figura 3: Perfis de concentração média e intensidade de concentração, condição A, para $x/H = 2.00, 3.00, 3.80$.

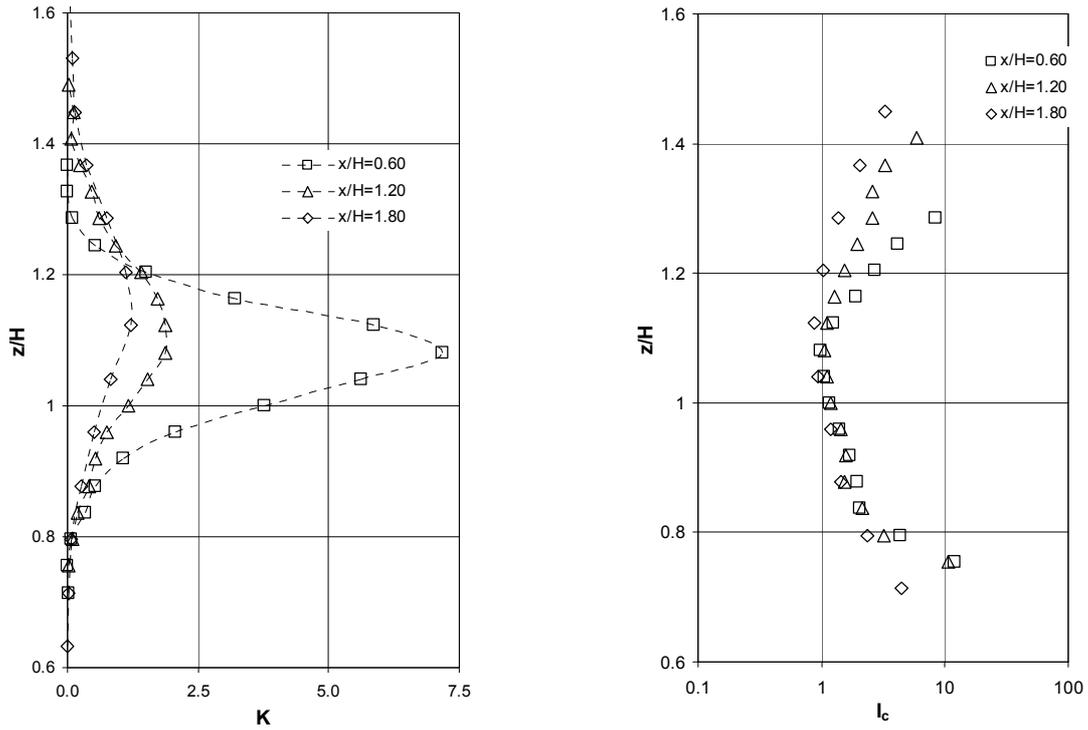


Figura 4: Perfis de concentração média e intensidade de concentração, condição B, para $x/H = 0.60, 1.20, 1.80$.

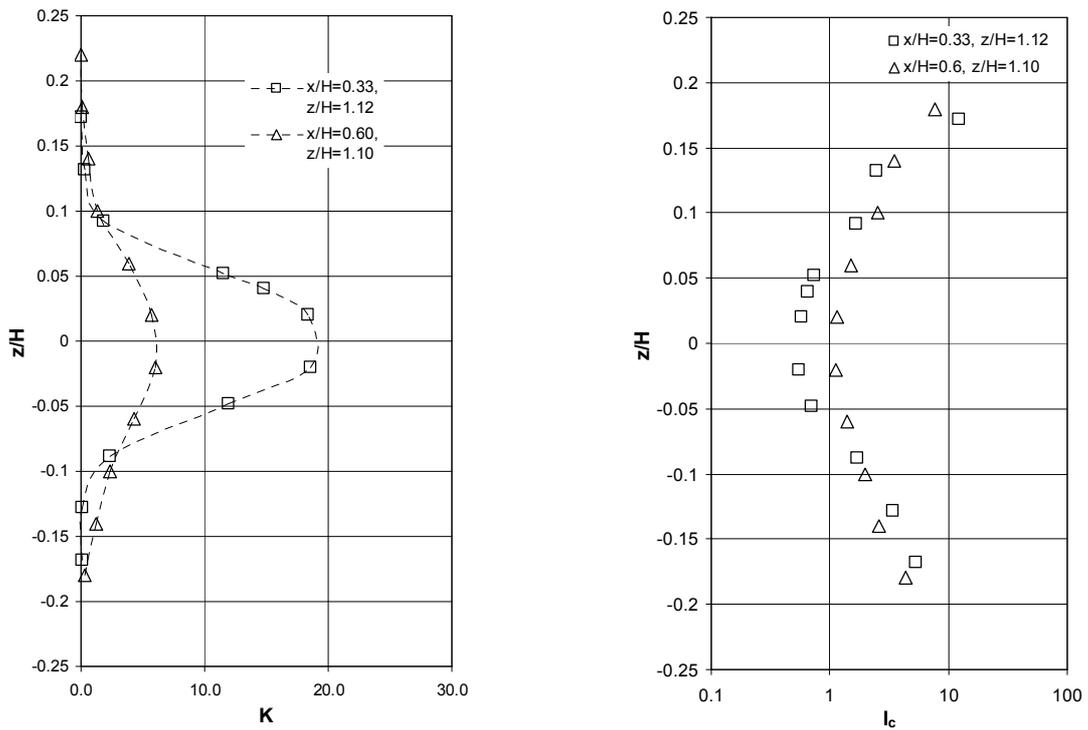


Figura 5: Perfis laterais de concentração média e intensidade de concentração, condição A ($x/H = 0.33$) e B ($x/H = 0.60$).

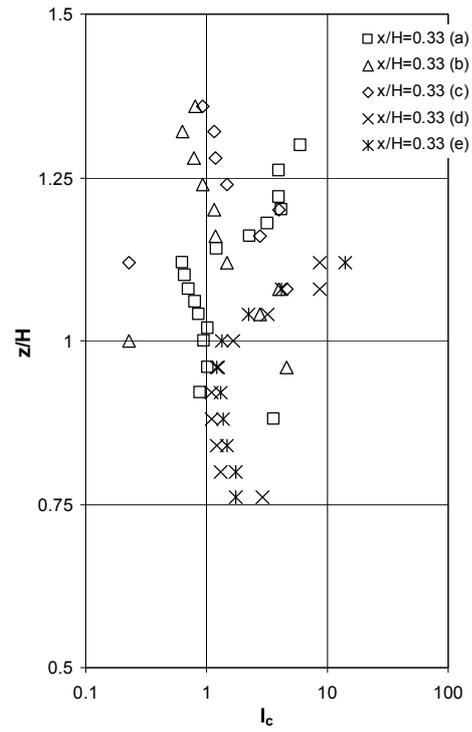
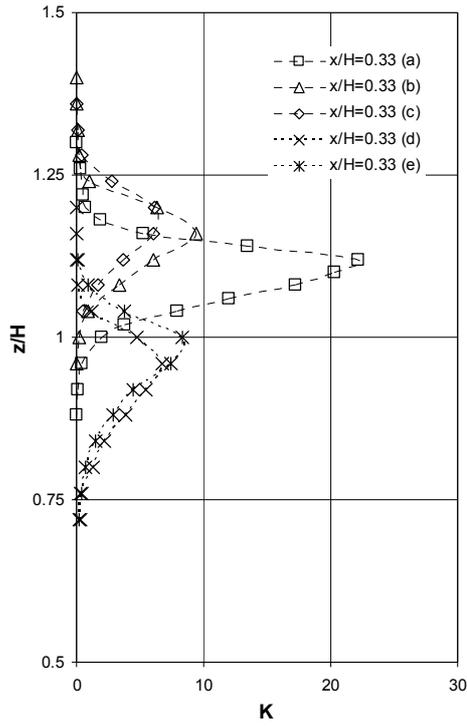


Figura 6: Perfis de concentração média e intensidade de concentração, condições A (a), C (b), D (c), E (d) e F (e).

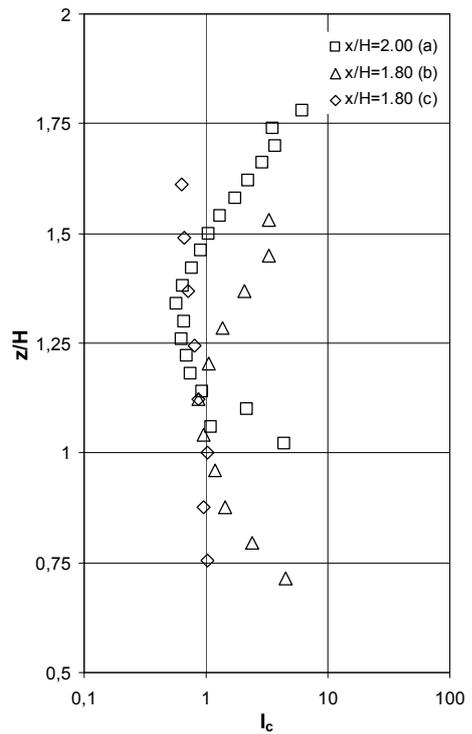
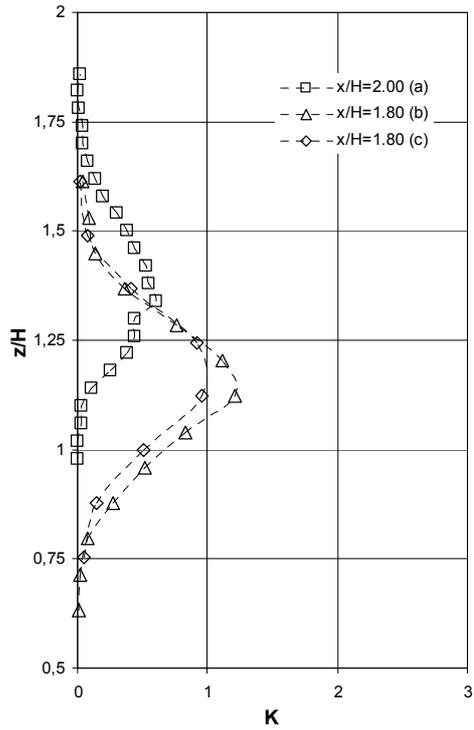


Figura 7: Perfis de concentração média e intensidade de concentração, condições A ($x/H = 2.00a$), B e H ($x/H = 1.80b$ e c)

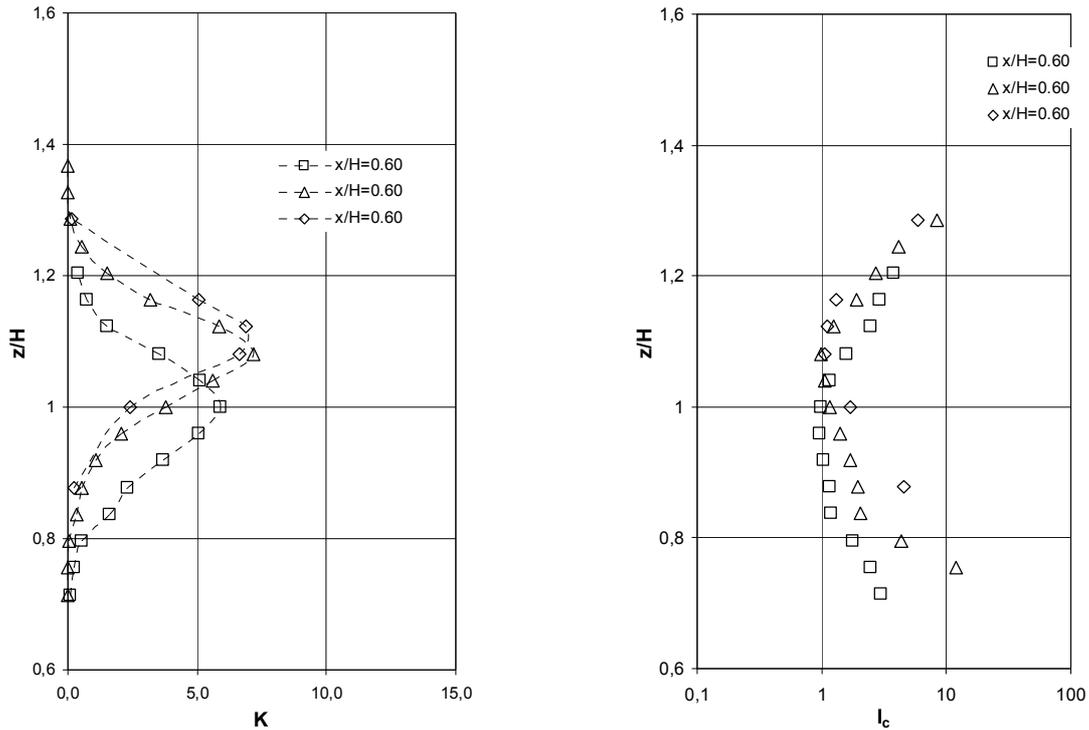


Figura 8: Perfis de concentração média e intensidade de concentração, condições B, G, e H ($x/H = 0.60$)

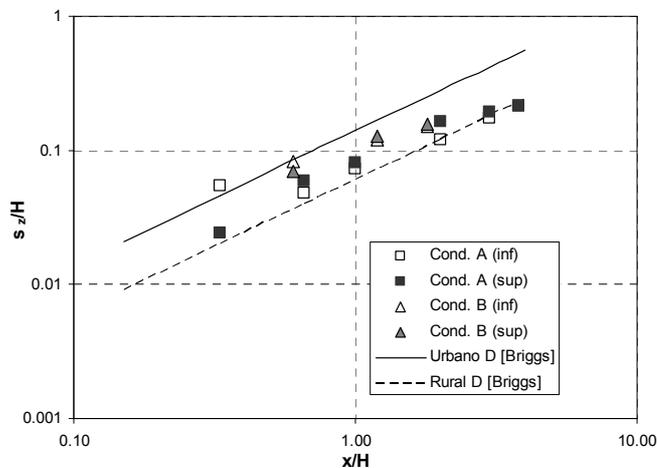


Figura 9: Comparação dos valores experimentais da dispersão vertical da pluma com as expressões de Briggs para estabilidade atmosférica D [Zanetti, 1990].

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES.

Além da análise e as comparações anteriores, realizadas principalmente a partir de modelos semi-empíricos, foram revisados diversos trabalhos experimentais relacionados com este tipo de fenômeno. O estudo de Costa & Borrego [1997], analisando a dispersão sobre modelos 2-D de serras, permite comparar os perfis de concentrações neste trabalho, levando em conta que as mesmas são volumétricas. Também são semelhantes os resultados obtidos por Li & Meroney [1983] considerando os campos de concentração nas proximidades a uma edificação. A análise experimental de Robins [2001], além dos perfis de concentração, permite comparar os parâmetros de dispersão na camada limite neutral.

Com relação às flutuações de concentração a partir da análise dos perfis de intensidades, o comportamento geral é semelhante ao obtido por outros autores [Li & Meroney, 1983, Fackrell & Robins, 1982], observando-se tendências similares ainda que os valores obtidos por Li & Meroney são menores nos extremos da pluma. Por outro lado, é importante assinalar que existe uma assimetria importante entre a região superior e inferior produto do empuxo gerado pela emissão de um gás leve como o hélio. Este comportamento requer uma análise probabilístico mais específico para estabelecer conclusões referidas à intermitência do processo.

Os resultados obtidos permitem dizer que foi realizada uma boa simulação do processo de difusão turbulenta para a condição de estabilidade neutra na atmosfera. Um aporte importante é realizado com relação às flutuações de concentração e à assimetria vertical da pluma de emissão. A seguir será analisado o fenômeno de intermitência da concentração flutuante que foi detectado principalmente nos extremos da pluma.

A conclusão mais relevante é que, a partir deste trabalho, será possível realizar a análise de problemas específicos de difusão na atmosfera utilizando o túnel de vento da UFRGS. Poderão ser realizadas avaliações vinculadas com a dispersão em canhões urbanos, problemas de fontes lineares e emissões distribuídas numa superfície, etc. Assim, o desenvolvimento permitirá avançar numa série de novas atividades vinculadas à problemática ambiental, na área de serviços e de pesquisa, no Laboratório de Aerodinâmica das Construções.

REFERÊNCIAS

- Blessmann, J. The Boundary Layer Wind Tunnel of the UFRGS. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Amsterdam, vol.10, 1982. pp. 231-248.
- Cermak, J. E., Takeda, K. [1985], "Physical modeling of urban air-pollutant transport", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 21, 51-67.
- Costa, M., Borrego, C., [1997], "Wind tunnel study of flow and dispersion over 2-D hills", 2EACWE, Genova, Italy.
- Fackrell, J. E., Robins, A. G. [1982], "Concentration fluctuations and fluxes in plumes from point sources in a turbulent boundary layer", *J. Fluid Mech.*, vol. 17, pp. 1-26.
- Ismov, N., Tanaka, H. [1980], "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.
- 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.
- Robins, A., Castro, I., Hayden, P., Stegell, N., Contini, D., Heist, D. [2001], "A wind tunnel study of dense gas dispersion in a neutral boundary layer over a rough surface", *Atmospheric environment* 35, 2243-2252.
- Zannetti, P. [1990], "Air pollution modeling: Theories, computational methods and available software", *Comp. Mech. Publications*, Van Nostrand Reinhold, New York.

ABSTRACT

In this work the dispersion process of an emission plume is studied through a reduced model in a boundary layer wind tunnel. The source model represents a light punctual gas emission that disperses in a neutrally stable turbulent boundary layer. Distinct conditions are considered which are determined by the degree of the plume buoyancy, the exit emission velocity and the approaching flow velocity. The obtained results allow verifying a good reproduction of the atmospheric turbulent diffusion process. The medium concentration fields and the concentration fluctuations are analysed.

Keywords: plume emission, wind tunnel, aspirating probe.