ESTUDO DO PROCESSO DE DISPERSÃO TURBULENTA DE GÁSES NO CENTRO DE LANÇAMENTO DE ALCÂNTARA

Adrián Roberto Wittwer, a wittwer@yahoo.es

Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Nordeste, Argentina.

Acir Mércio Loredo-Souza

Laboratório de Aerodinâmica das Construções, Universidade Federal de Rio Grande do Sul, Brasil.

Mario Gustavo Klaus Oliveira

Laboratório de Aerodinâmica das Construçoes, Universidade Federal de Rio Grande do Sul, Brasil.

Gilberto Fisch

Instituto de Aeronáutica e Espaço, Brasil.

Bianca Hulle de Souza, biancahulle@gmail.com Instituto Federal do Espírito Santo, IFES, Brasil.

Elisa Valentim Goulart, elisavalentim@gmail.com Universidade Federal do Espírito Santo, UFES, Brasil.

Abstract. Este artigo analisa o processo de dispersao atmosférica na região do Centro de Lançamento de Alcântara, através de ensaios realizados no túnel de vento "Joaquim Blessmann" da UFRGS. Foram medidos perfis de concentraçao média e da intensidade das flutuaçoes da concentraçao. Finalmente, foram realizadas comparações das diferentes condiçoes de emissao avaliadas O trabalho é complementado com outro trabalho referente à análise das características do escoamento atmosférico nesta mesma região.

1. INTRODUÇÃO

O estudo experimental dos processos de dispersão atmosférica de poluentes permite a análise de problemas específicos e a avaliação dos modelos teórico-numéricos. Os custos da experimentação de campo conduzem à realização de estudos de laboratório em modelos reduzidos. Diversas aplicações que analisam a estrutura turbulenta da atmosfera e os processos de dispersão de poluentes imersos em obstáculos usando túneis de vento podem ser encontradas na literatura (Mavroidis e Griffiths, 2003, Coceal et al., 2014, Branford et al., 2011).

As características da região mais próxima a uma emissão não estão determinadas unicamente pela sua própria configuração, mas também pela turbulência do vento atmosférico. É importante indicar a relevância de analisar não somente as concentrações médias, mas também as flutuações de concentração. As técnicas experimentais de amostragem condicionada são usadas, há bastante tempo, para a análise dos processos intermitentes, nos quais existem grandes rajadas e muito mais valores próximos a zero que aqueles esperados nos processos Gaussianos (Jenssen e Busch, 1982). No caso de intermitência, os valores extremos podem ser mais críticos que os valores médios e para caracterizá-la é necessário medir as flutuações e analisar as distribuições de probabilidade (Wittwer et al., 2007).

Para estudar dispersão em túneis de vento, complementarmente são realizados ensaios de visualização e ensaios quantitativos nos quais se mede a concentração nas zonas de interesse (Kastner-Klein e Plate, 1999). A medição de concentração em experimentos de dispersão turbulenta depende do gás traçador que se utiliza para simular a emissão. O anemômetro de fio quente, por meio da incorporação de uma sonda aspirante, permite medir as flutuações de concentração (Harion et al., 1995). Wittwer et al. (2011) tem utilizado estas técnicas visando este tipo de análise.

Este trabalho tem por objetivo principal a reprodução e análise dos processos de dispersão em túnel de vento utilizando um modelo que simula as condições topográficas e de escoamento da região do Centro de Lançamento de Alcântara (CLA). A análise foi realizada mediante a determinação de perfís de concentração, a partir de um modelo em escala reduzida 1/400. De forma complementar, foi desenvolvido outro trabalho referente à análise das características do escoamento atmosférico nesta mesma região (Wittwer et al., 2016).

2. INSTALAÇÕES EXPERIMENTAIS E INSTRUMENTAÇÃO

O estudo de processos de dispersão, a partir da modelagem em túnel de vento, requer medir a concentração de um gás determinado. O sistema de medição depende do tipo de gás que seja utilizado como traçador e, neste trabalho, foi usado o anemômetro de fio quente em combinação com uma sonda aspirante. A partir do processo de calibração, a sonda aspirante permite determinar, de forma direta, valores de concentração instantânea para uma mistura binária. As vazões de gases conhecidos e misturas binárias de proporções determinadas são necessárias não somente para poder

simular corretamente os problemas e fenômenos de dispersão no túnel de vento, mas também para poder calibrar o instrumental de medição das concentrações.

Para obter misturas binárias de gases de velocidade e vazão fixos, foi utilizando o dispositivo da Figura 1 (esquerda). Este aparelho foi construído no Laboratório de Aerodinâmica das Construções da UFRGS. A mistura obtém-se mediante duas séries de orifícios de distintos diâmetros que funcionam como tubos sônicos. Cada uma das séries permite obter uma vazão exata de hélio e ar respectivamente, e com a interconexão no final do circuito é obtida a mistura exata. O grau de exatidão do dispositivo de mistura depende do número de tubos sônicos e a precisão com que os orifícios são calibrados. Os erros relativos são maiores nos orifícios de menor diâmetro, neste caso 0,50 mm. A concentração mássica C correspondente a uma mistura de vazões de hélio (He) e ar, e é calculada com a expressão:

$$C = \frac{Q_m(He)}{Q_m(He) + Q_m(Ar)} \tag{1}$$

Para utilizar o anemômetro de fio quente na medição de concentrações de gás é necessário construir uma sonda na qual o fio quente seja sensível às variações de densidade do gás e insensível às variações de velocidade do escoamento exterior. Foi utilizada uma sonda aspirante constituída pelo fio quente do anemômetro e um tubo externo (Figura 1, direita) que, conectado a uma bomba de vácuo, permite medir as flutuações instantâneas de densidade ou concentração. O tubo capilar, conjuntamente com a aspiração, provoca o bloqueio sônico. O fio quente torna-se assim, um sensor que percebe as variações das propriedades térmicas do fluido no processo de transferência de calor, ou seja, que mede as variações de concentração do gás.

A resposta dinâmica da sonda aspirante pode-se analisar construindo espectros de concentração. Resultados obtidos para um jato coaxial hélio-ar, utilizando diferentes freqüências de aquisição entre 5 e 10 kHz garantem a resposta dinâmica deste tipo de sonda até freqüências superiores a 1 kHz. As escalas características nos túneis de vento normalmente não requerem a análise das freqüências maiores do que 1 kHz (Loredo-Souza et al., 2010).





Figura 1. Dispositivo de calibração (esquerda) e sonda aspirante (direita).

Os experimentos foram desenvolvidos no túnel de vento "Prof. Joaquim Blessmann" da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Blessmann, 1982). O vento incidente corresponde a uma simulação de camada limite sobre terreno aberto. Basicamente, o modelo topográfico estudado é representativo do Centro Lançamento de Alcantara (CLA), com um ângulo de incidência do vento 0°; no entanto, foi feita uma medição complementar com o modelo correspondente ao vento incidindo na direção 330°, ou seja, com uma rotação do vento de 30° (Figura 2).

3. RESULTADOS

A seguir são apresentados os resultados preliminares do estudo de dispersão em túnel de vento com reprodução dos ventos atmosféricos, a partir dos modelos em escala reduzida que reproduzem as condições topográficas e simulam o escoamento atmosférico da região do CLA. O processo de dispersão foi avaliado utilizando um anemômetro de fio quente com uma sonda aspirante. O coeficiente de concentração adimensional *K* está definido como:

$$K = \frac{CU_{ref}H^2}{Q_0}$$
(2)

onde C é a concentração medida, U_{ref} a velocidade de referência, H a altura de referência de 160 m e Q_0 a vazão de emissão. A intensidade das flutuações de concentração I_c está definida pela relação do desvio padrão das flutuações c' com a concentração C.

$$I_c = \frac{c'}{C} \tag{3}$$

Os testes correspondentes foram realizados com velocidades médias do vento incidente de 2,60 m/s, ainda que, em casos específicos, foram usadas velocidades de 1,65 e 4,50 m/s. Na fonte de emissão, localizada na zona de lançamento, foi utilizado gás Hélio. As condições de emissão foram variadas para avaliar o efeito de empuxo da emissão no processo de dispersão. Nesta fase, o estudo foi dividido em duas partes. Na primeira etapa foi avaliado o processo de dispersão correspondente a uma emissão vertical de baixo para cima, com saída ao nível do solo, no ponto do lançamento dos foguetes (Figura 3, esquerda). A seguir, foi invertido o sentido da emissão (de cima para baixo), tentando a simular a emissão provocada por um foguete (Figura 3, direita).



Figura 2. Modelos topográficos construídos para as duas direções de incidência do vento (0º e 330º).





Figura 3. Dispositivos de emissão no nível do solo (esquerda) e de cima para baixo (direita).

3.1. Resultados com a emissão vertical no nível do solo – modelo 0°

Na Tabela 1 são indicadas as características que definem as condições de dispersão da pluma para a emissão no nível do solo (*A*, *B*, *C* e *D*). As posições dos pontos de medição são indicadas nos gráficos mediante as coordenadas adimensionalizadas (x/H, y/H). Na Figura 4, são apresentados os perfis verticais de concentração média adimensional K/Kmáx e da intensidade das flutuações de concentração Ic, obtidos com a emissão no nível do solo nas posições a sotavento da emissão, com afastamentos y/H de 0,25, 0,50, 1,00, 1,50 e 2,25, respectivamente, para a altura de referência H = 400 mm. A vazão de hélio emitido é 0,176 dm³/s e a velocidade de referência do ar é 2,60 m/s que definem a condição A para a pluma de emissão (Tabela 1).

Condição	$Q_0 [\mathrm{dm}^3/\mathrm{s}]$	<i>w</i> ₀ [m/s]	U_{ref} [m/s]	w_0/U_{ref}
A	0,176	0,560	2,60	0,215
В	0,703	2,238	2,60	0,861
C	1,582	5,036	2,60	1,937
D	1,582	5,036	1,65	3,052

A Figura 5 mostra os perfis verticais de concentração K e da intensidade Ic obtidos com uma vazão de hélio de 0,703 dm³/s e a mesma velocidade de referência do ar (2,60 m/s), que determinam à condição B para a pluma de emissão. As posições a sotavento da emissão são y/H de 0,25, 0,50, 1,00, 1,50 e 2,25, respectivamente.



Figura 4. Perfís verticais de concentração K/Kmáx e Ic na condição A.



Figura 5. Perfis verticais de concentração K/Kmáx e Ic na condição B.

Os perfis verticais de concentração K e da intensidade das flutuações de concentração Ic correspondentes à condição C para a pluma de emissão obtida com uma vazão de hélio de 1,582 dm³/s e velocidade do ar de 2,60 m/s, são apresentados na Figura 6. As posições avaliadas são y/H = 0,50, 1,00, 1,50 e 2,25, respectivamente. A condição D, definida a partir de uma emissão de 1,582 dm³/s de hélio e uma velocidade de referência do ar de 1,65 m/s, é analisada na Figura 7, onde são mostrados os perfis verticais nas posições a sotavento da emissão y/H = 1,00 e 2,25.

Na Figura 8 são apresentados perfís horizontais que permitem avaliar a simetria lateral da pluma de emissão, sendo avaliados apenas três perfís de concentração. Para a condição B da pluma de emissão, foram avaliadas as posições a sotavento da emissão y/H = 0,50 e 2,25. Na posição mais a sotavento, é observado um deslocamento do centro da pluma. Para a condição D, o perfil horizontal na posição y/H = 1,00, mostra um deslocamento lateral do centro da pluma similar ao obtido para a condição B.

Os resultados se complementam com os valores de Kmáx indicados na Tabela 2. Estes valores permitem avaliar a evolução do processo de dispersão em termos da posição a sotavento da emissão. Em geral, os resultados mostram coerência com relação à diluição dos valores de concentração para as diferentes condições analisadas, assim como na relação das distribuições dos valores medidos nas posições a sotavento da emissão e lateralmente. As medições foram realizadas considerando só a direção de vento incidente correspondente a 0º (perpendicular à costa litorânea).



Figura 6. Perfis verticais de concentração K/Kmáx e Ic na condição C.



Figura 7. Perfis verticais de concentração K/Kmáx e Ic na condição D.



Figura 8. Perfis horizontais de concentração K/Kmáx e Ic nas condições B e D.

É interessante observar o comportamento semelhante nas diferentes condições com relação à configuração dos perfis verticais de concentração média. Com relação as flutuações de concentração, os perfis de intensidade Ic também mostram um comportamento similar nas diferentes condições com exceção da condição D. O comportamento geral indica uma configuração com variações bastante suaves definindo um pico das flutuações na posição apenas acima do ponto que define o valor máximo no perfil de concentração média.

Os perfis horizontais de concentração média mostram uma configuração gaussiana e simétrica, produto da inexistência de uma limitação lateral. No caso das intensidades de flutuação, os perfis definem dois picos, aproximadamente nos pontos localizados a uma distancia x/H = 0,1 à esquerda e direita do ponto correspondente ao valor máximo no perfil de concentração média.

Posição (y/H)	0,25	0,50	1,00	1,50	2,25
CondiçãoA	140,67	57,94	29,10	16,21	8,61
CondiçãoB	55,71	26,83	12,42	7,43	3,91
Condição C		13,80	6,75	4,18	2,41
Condição D			4,30		1,71
CondiçãoB (h)		27,32			4,04
CondiçãoD (h)			4,57		

Tabela 2. Valores de Kmáx - emissão no nível do solo – modelo 0°.

3.2. Resultados com a emissão de cima para abaixo - modelo 0°

A seguir, são mostrados os resultados obtidos na simulação do foguete. O relevamento foi realizado considerando a direção de vento incidente correspondente a 0°. Na Tabela 3 são indicadas as características que definem as condições de dispersão da pluma para a emissão de cima para abaixo (E, F, G, H e I).

Condição	$Q_0 [\mathrm{dm}^3/\mathrm{s}]$	<i>w</i> ₀ [m/s]	U_{ref} [m/s]	w_0/U_{ref}
Ε	0,176	2,241	2,60	0,862
F	0,703	8,951	2,60	3,443
G	1,582	2,143	2,60	7,747
Н	0,176	2,241	1,65	1,358
Ι	0,703	8,951	4,55	1,967

Tabela 3. Condições de emissão de cima para abaixo.

Na Figura 9 são apresentados os perfis verticais de concentração média adimensional K e os valores da intensidade das flutuações de concentração Ic obtidos nas posições a sotavento da emissão, com afastamentos y/H de 0,25, 0,75 e 2,25, respectivamente. A vazão de hélio é 0,176 dm³/s e a velocidade de referência do ar é 2,60 m/s que definem a condição E para a emissão.

A Figura 10 mostra os perfis verticais de concentração K e da intensidade Ic obtidos com uma vazão de hélio emitida de $0,703 \text{ dm}^3$ /s que determina à condição F para a emissão. As posições a sotavento da emissão são y/H de 0,25, 0,50, 0,75, 1,50 e 2,25, respectivamente.

Os perfis correspondentes à condição G, obtida com uma vazão de hélio de 1,582 dm³/s e velocidade do ar de 2,60 m/s, são apresentados na Figura 11. As posições avaliadas são y/H = 0,50, 0,75 e 2,25, respectivamente. A condição H, definida a partir de uma emissão de 0,176 dm³/s de hélio e uma velocidade de referência do ar de 1,65 m/s, é avaliada na Figura 12 para a posição y/H = 2,25. Nesta mesma figura, a condição I, correspondente à emissão de 0,703 dm³/s de hélio e uma velocidade de referência do ar de 4,55 m/s, é avaliada para a posição y/H = 0,25.

Na Figura 13 são apresentados dois perfis horizontais correspondentes à condição F da pluma de emissão, obtidos nas posições a sotavento da emissão são y/H = 0.25 e 0.75, para avaliar a simetria lateral da pluma de emissão.

Também neste caso, os resultados são complementados com os valores de Kmáx (Tabela 4) que permitem avaliar a evolução do processo de dispersão em termos da posição do perfil. Da mesma forma, os resultados mostram coerência com relação às condições analisadas, e à distribuição dos valores medidos nas diferentes posições.

Com relação à configuração dos perfis verticais de concentração média, as diferentes condições mostram maiores diferencias que no caso anterior. Os perfis de intensidade de concentração Ic também não mostram um comportamento semelhante nas diferentes condições. O comportamento geral indica uma configuração com variações bastante suaves, mas sem a clara definição de um pico como acontece no caso da emissão no nível do solo.



Figura 9. Perfis verticais de concentração K/Kmáx e Ic na condição E.



Figura 10. Perfís verticais de concentração K/Kmáx e Ic na condição F.



Figura 11. Perfis verticais de concentração K/Kmáx e Ic na condição G.



Figura 12. Perfis verticais de concentração K/Kmáx e Ic nas condições I e H.

Posição (y/H)	0,25	0,50	0,75	1,00	1,50	2,25
Condição E	69,78		16,19			7,32
Condição F	51,68	24,51		16,68	8,45	5,34
Condição G		9,86	7,99		3,11	2,96
Condição H						5,05
Condição I	110,15					
Condição F (h)	52,71		18,22			5,42

Tabela 4. Valores de Kmáx - emissão de cima para abaixo - modelo 0º.

Os perfis horizontais de concentração média também não mostram uma configuração tão gaussiana e simétrica como no caso da emissão no nível do solo. Da mesma forma, os perfis das intensidades de flutuação Ic mostram dois picos, só que não são bem definidos como acontece no caso anterior.



Figura 13. Perfis horizontais de concentração K/Kmáx e Ic na condição F.

3.3. Resultados com a emissão de cima para abaixo - modelo 330°

Complementarmente, foram obtidos alguns resultados na direção correspondente ao vento incidente a 330°. Na Figura 14 são apresentados os perfis verticais de concentração K e da intensidade das flutuações Ic obtidos nas posições y/H de 0,25, 0,75 e 1,50, respectivamente, para a condição F da emissão. A Tabela 5 indica os valores de Kmáx para avaliar a evolução dos perfis de concentração.



Figura 14. Perfis verticais de concentração K/Kmáx e Ic na condição F.

	Tabela 5.	Valores	de Kmáx	 emissão 	de cima	para	abaixo -	 model 	o 330°.
--	-----------	---------	---------	-----------------------------	---------	------	----------	---------------------------	---------

Posição (y/H)	0,25	0,75	1,50
Condição F	58,11	19,42	10,02

4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Com relação aos resultados obtidos com a emissão no nível do solo, apresentados nas Figuras 4 a 8, é possível verificar o comportamento gaussiano da parte superior da pluma, que se mantém desde a posição mais próxima até a posição mais afastada da emissão. Na parte inferior, é possível perceber a modificação produzida pela interferência do solo no processo de dispersão, pela maior turbulência atmosférica e o efeito de reflexão da pluma. A Tabela 2 indica a diminuição gradual dos valores máximos de concentração média a partir da posição mais próxima da fonte de emissão, até a posição mais afastada. A comparação da configuração dos perfis com relação à vazão emitida indica que na posição mais próxima da emissão, com menor vazão emitida (condição A), o valor de concentração máxima acontece ao nível do solo, enquanto na posição y/H = 0,50, com maior vazão emitida (condição C), o máximo se produz em z/H = 0,10 acima do solo.

No caso da emissão de cima para abaixo, as Figuras 9 a 13 permitem observar maiores diferenças no comportamento de acordo à condição de emissão avaliada. O afastamento do comportamento gaussiano é também mais visível em alguns casos. A condição F de emissão mostra os resultados mais próximos aos obtidos com a emissão ao nível do solo, não obstante, a amplitude vertical que alcança a dispersão é sempre maior no caso da emissão de cima para abaixo. Do mesmo modo, neste último caso, a intensidade das flutuações de concentração apresenta sempre valores menores do que 0,25, entanto que para a emissão vertical no nível do solo, os valores superam claramente esses níveis de flutuação de concentração.

A comparação geral entre o comportamento da pluma para o vento incidente nas direções de 0° (Figura 10) e 330° (Figura 14) indica que os valores máximos de concentração são da mesma ordem em ambos os casos, ainda que sejam levemente maiores para a direção de 330°. O mesmo acontece com os valores apresentados das concentrações flutuantes. Observando a configuração topográfica do terreno para estas duas direções de vento incidente, é possível explicar este comportamento. No caso de vento na direção de 0°, a barlavento da emissão, o desnível é mais brusco. A turbulência gerada a sotavento da emissão é um pouco maior que no caso de vento na direção de 330°, como foi observado nas medições das características do escoamento. Então, o processo de mistura é mais rápido e a dispersão é maior, diminuindo também as flutuações de concentração.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo é a continuação de um estudo das características do escoamento atmosférico na região do Centro de Lançamento de Alcântara. São apresentados os resultados da avaliação dos processos de dispersão de gases nas proximidades do Centro. Foi realizada uma análise quantitativa dos perfis verticais e horizontais de concentração média e intensidade das flutuações de concentração e comparações dos resultados obtidos com modelos topográficos reduzidos para duas direções de vento incidente no túnel de vento da UFRGS foram realizadas.

A comparação geral dos valores obtidos com a emissão no nível do solo com relação aos valores no caso da emissão de cima para abaixo indica maior diluição dos valores máximos no primeiro caso. Levando em conta que, no caso da emissão no nível do solo, a difusão turbulenta se desenvolve para cima, para abaixo e lateralmente, os resultados obtidos são previsíveis. A primeira parte do estudo foi apresentada em outro artigo, e está centrada especificamente na avaliação das características de vento atmosférico na região do CLA.

7. REFERENCES

- Blessmann, J., 1982, The Boundary Layer Wind Tunnel of UFRGS, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 10. pp. 231-248.
- Branford, S., Coceal, O., Thomas, T., Belcher, S.E., 2011, Dispersion of a point source release of a passive scalar through an urban-like array for different wind directions. Boundary-Layer Meteorol. 139:367–394.
- Coceal, O., Goulart, E.V., Branford, S., Thomas, T.G., Belcher, S.E., 2014, Flow structure and near-field dispersion in arrays of building-like obstacles. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 125:52–68.
- Harion, J., Camano, E., Favre-Marinet, M., 1995, "Mesures de vitesse et de concentration par thermo-anémométrie dans des mélanges air/hélium", C. R. Acad. Sci. Paris, t. 320, Série IIb, p. 77-84.
- Jensen, N. O., Busch, N. E., 1982, "Atmospheric turbulence", Engineering Meteorology, Ed. by E. J. Plate, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.
- Kastner-Klein, P., Plate, E. J., 1999, "Wind tunnel study of concentration fields in street canyons", Atmospheric Environment, 33, 3973-3979.
- Loredo-Souza, A. M., Wittwer, A. R., 2010, "Estudo em Túnel de Vento do Processo de Dispersão de Gases no Centro de Lançamento de Alcântara", Relatório Técnico, Laboratório de Aerodinâmica das Construções, LAC, UFRGS, Brasil.
- Mavroidis, I. and Griffiths, D.J.H., 2003. Field and wind tunnel investigations of plume dispersion around single surface obstacles. Atmospheric Environment 37, 2903-2918.
- Wittwer, A. R., Loredo-Souza, A. M., Camaño S., E. B., 2007, "Avaliação das flutuações de concentração em uma pluma de dispersão de poluentes", Ciência & Natura, Edição especial, 141-144.
- Wittwer, A. R., Loredo-Souza, A. M., Camaño S., E. B., 2011, Laboratory evaluation of the urban effects on the dispersion process using a small-scale model. In: 13th International Conference on Wind Engineering, 2011, Amsterdam. Proceedings of the ICWE13.
- Wittwer, A., Loredo-Souza, A., Oliveira, M., Hulle de Souza, B., Fisch, G., Goulart, E., Ferrari de Carvalho, G., Simulação das características do vento atmosférico no Centro de Lançamento de Alcântara, Artigo apresentado na 10a. Escola de Turbulência e Transiçao, EPTT 2016, São José dos Campos, SP, Brasil.

RESPONSIBILITY NOTICE

Os autores são os únicos responsáveis pelo material impresso incluído neste artigo.