

SIMULAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DO VENTO ATMOSFÉRICO 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 Construções, Universidade Federal de Rio Grande do Sul, Brasil.

Bianca Hulle de Souza, biancahulle@gmail.com

Universidade Federal do Espírito Santo, UFES, Brasil.

Gilberto Fisch, fisch.gilberto@gmail.com

Instituto de Aeronáutica e Espaço, Brasil.

Elisa Valentim Goulart, elisavalentim@gmail.com

Universidade Federal do Espírito Santo, UFES, Brasil.

Guilherme Ferrari de Carvalho, guilhermefc2208@gmail.com

Instituto Federal do Espírito Santo, IFES, Brasil.

***Abstract.** Este artigo analisa o escoamento atmosférico na região do Centro de Lançamento de Alcântara, através de ensaios realizados no túnel de vento “Joaquim Blessmann” da UFRGS. Foi simulada a influência de uma falésia local (de 40 m), representada nos ensaios por uma maquete topográfica do local. Foram avaliadas as características do escoamento atmosférico para três casos distintos na direção do vento predominante: vento perpendicular a costa (representado por 0°) e com rotações de 30 graus para a direita (vento 30°) e para a esquerda (vento 330°). A eleição destas direções foi baseada no regime de vento local, medido com uma torre anemométrica. Foram medidos perfis da velocidade média e da intensidade da turbulência. Finalmente, foram realizadas comparações das diferentes situações avaliadas e das características do vento no caso de um modelo simplificado (modelo “degrau”). O trabalho será complementado com uma avaliação da dispersão turbulenta de gases nesta mesma região utilizando os mesmos modelos topográficos.*

1. INTRODUÇÃO

A caracterização dos ventos é muito importante para compreender a física do escoamento justaposto ao sistema que o cerca. Neste contexto, essa caracterização se torna indispensável em diversas áreas. Na área aeroespacial esse conhecimento é significativo para uma correta e segura operação de lançamento de foguetes (Fisch, 1999). Para essa caracterização, além de medidas *in situ* obtidas por torres anemométricas, os túneis de vento também são usados nos estudos de micro-meteorologia devido a sua vantagem de controle do escoamento, que aperfeiçoa a coleta de dados e a sensibilidade da análise. Entre as aplicações encontradas na literatura usando túneis de vento, podem ser citadas simulações físicas considerando o acoplamento da floresta e atmosfera (Novak et al., 2000) que analisam a estrutura turbulenta da atmosfera, processos de dispersão de poluentes imersos em obstáculos (Mavroidis e Griffiths, 2003; Coceal et al., 2014, Branford et al., 2011), assim como simulações do escoamento para topografias complexas (Cao e Tamura, 2006, Philips et al., 2013).

O Centro Lançamento de Alcântara (CLA) é a principal porta de acesso do Brasil ao espaço. Satélites e foguetes de sondagem têm sido lançados nos últimos 20 anos. O CLA está situado em Alcântara, no litoral norte do estado de Maranhão, nas coordenadas geográficas 2°19' S, 44°22' W, 50 m sobre o nível do mar e a uma distância de 30 km da cidade de São Luiz - MA. A localização desta instalação nas proximidades da costa marítima faz que o escoamento atmosférico tenha características particulares produto da topografia local e da influência do próprio mar (Figura 1).

O objetivo geral do trabalho é estudar o escoamento atmosférico e, logo depois, avaliar o processo de dispersão na região do CLA através de experimentos em túnel de vento. A análise foi realizada mediante a determinação de perfis de velocidade e flutuações de velocidade do vento em diferentes pontos na região de interesse, usando dados obtidos com o anemômetro de fio quente. Neste trabalho são apresentados os resultados referentes a análise do escoamento atmosférico, a partir de um modelo em escala reduzida 1/400 que reproduz as condições topográficas e simula as características de vento incidente na região do Centro de Lançamento. De forma complementar, simultaneamente foi

desenvolvido outro trabalho referente à avaliação do processo de difusão turbulenta de gases na atmosfera nesta mesma região (Wittwer et al., 2016).



Figura 1. Localização e características topográficas do Centro Lançamento de Alcântara (CLA).

2. CARACTERÍSTICAS DO TÚNEL DE VENTO “PROF. JOAQUIM BLESSMANN”

Os ensaios foram realizados no túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann. Trata-se de um túnel de vento de camada limite de retorno fechado, projetado especificamente para ensaios estáticos e dinâmicos de modelos de construções civis. A simulação correta das principais características do vento natural em túneis de vento é requisito básico para aplicações em Engenharia Civil, sem a qual os resultados obtidos podem se afastar consideravelmente da realidade.

Pioneiro na América Latina, o Túnel de Vento de retorno fechado Prof. Joaquim Blessmann, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil (Blessmann, 1982) é mostrado na Figura 2. Tem relação “comprimento / altura” da câmara de ensaios superior a 10. A velocidade do escoamento de ar nesta câmara, com vento uniforme e sem modelos, supera 46 m/s. O equipamento permite a simulação das principais características de ventos naturais na camada limite atmosférica e propicia a correta determinação das pressões atuantes sobre as fachadas e estrutura das edificações.

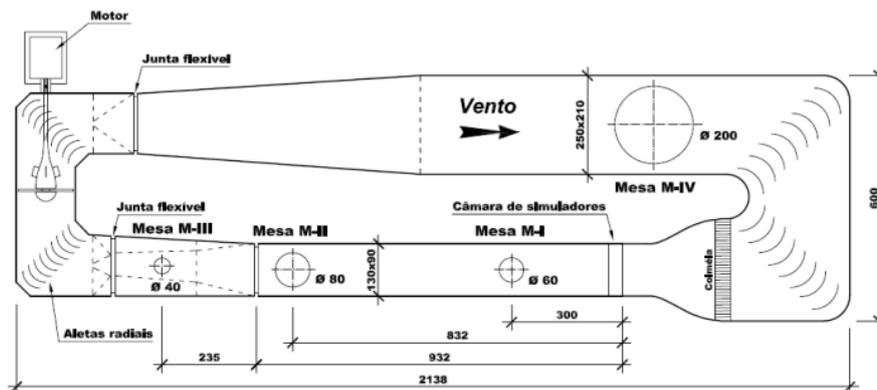


Figura 2. Túnel de vento Prof. Joaquim Blessmann da UFRGS.

3. SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO INCIDENTE

Em condições próximas à neutralidade, a turbulência atmosférica é quase puramente de origem mecânica e depende da fricção superficial e do cisalhamento vertical do vento. Devido aos fortes ventos, independentemente do horário do dia para ambos os períodos do ano (seco e úmido), observa-se a ocorrência da estabilidade neutra no CLA. (Magnago et al., 2008). Em Engenharia do Vento, a variação vertical da velocidade média U normalmente é expressa a partir da lei potencial, com validade praticamente em toda a altura da camada limite. Essa lei é definida pela Eq. (1), onde U_{ref} e a velocidade de referência obtida na altura de referência z_{ref} . O expoente α varia de 0,09 até 0,45, em função da rugosidade superficial do terreno. A turbulência atmosférica do vento é caracterizada pela intensidade de turbulência I_u , definida pela razão entre o desvio padrão das flutuações u' e a velocidade média U . De forma complementar, o espectro de turbulência permite avaliar a distribuição de energia em função da frequência. Medições feitas na atmosfera

permitem definir os espectros atmosféricos, que depois são usados para comparar e validar os resultados obtidos em túneis de vento.

$$U/U_{ref} = (z/z_{ref})^\alpha \quad (1)$$

3.1. Dispositivos de modelagem da camada limite atmosférica

Para realizar o estudo dos fenômenos aerodinâmicos que se produzem na camada limite atmosférica, é necessário simular o vento atmosférico no túnel de vento. O processo de simulação consiste em desenvolver um modelo físico do escoamento atmosférico tal que os parâmetros característicos sejam reproduzidos da melhor forma possível dentro do túnel. Na maioria dos Laboratórios é mais comum simular a camada limite neutralmente estratificada. Isto implica na modelagem da distribuição de velocidades médias, das escalas da turbulência e do espectro de potência atmosférico (Surry, 1982). Counihan (1969) e Standen (1972), empregando os métodos de rugosidade, barreira e dispositivos de mescla desenvolveram técnicas de simulação particularmente apropriadas para reproduzir camadas limites em condições de estabilidade neutra. As técnicas permitem obter representações das camadas limites que se produzem sobre terrenos rurais e urbanos. Em um trabalho anterior, Loredou-Souza et al. (2004), realizaram uma detalhada descrição dos sistemas, metodologias e formas de avaliação dos modelos físicos do vento atmosférico neutralmente estável em túneis de vento de camada limite.

De acordo com as características da rugosidade do terreno em torno do CLA, foi simulado um vento com perfil potencial de velocidades médias de expoente $\alpha = 0,11$ (rugosidade representativa da Categoria I), de acordo com a NBR 6123 (Blessmann, 1995). As características da rugosidade dos terrenos simulados correspondem a uma superfície lisa de grandes dimensões, com mais de 5 km de extensão, medida na direção do vento incidente. Os simuladores utilizados são mostrados na Figura 3.



Figura 3. Dispositivos de simulação do vento atmosférico.

3.2. Características principais do vento incidente

Considerando-se as características do local em estudo e dos terrenos próximos ao CLA, optou-se por testar o modelo para ventos incidentes com estas características. Em torno do modelo foram reproduzidas as edificações mais próximas, na escala do modelo, para que as condições de escoamento correspondessem o mais fielmente possível às condições reais. As principais características dos ventos simulados podem ser vistas na Figura 4, onde são indicados o perfil vertical das velocidades médias adimensional $U(z)/U(450)$, sendo $U(450)$ a velocidade média no eixo longitudinal do túnel, a intensidade de turbulência u'/U e a macro-escala Lu da componente longitudinal da turbulência.

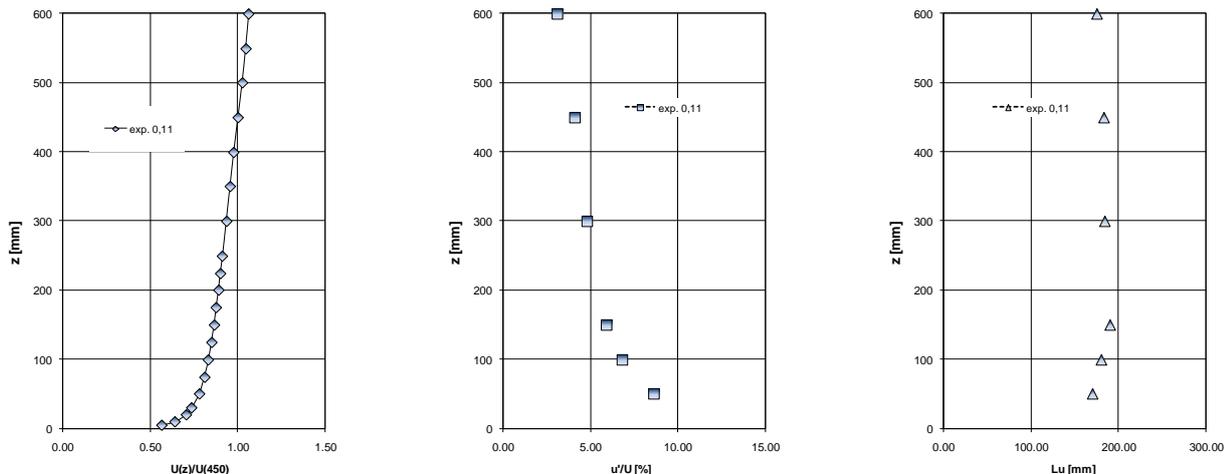


Figura 4. Principais características do vento incidente (expoente $\alpha = 0,11$).

4. AVALIAÇÃO DO ESCOAMENTO ATMOSFÉRICO

A análise do escoamento atmosférico baseou-se em duas importantes características físicas: perfis de velocidade e flutuações do vento em diferentes pontos de interesse na região. Foram estudados modelos representativos de três ângulos de incidência do vento, nominalmente 0° , 30° e 330° , como indicado na Figura 5. A escolha dos ângulos de incidência fundamentou-se em relação a ventos com variabilidade de $\pm 30^\circ$ oriundos predominantemente da costa marinha. Um modelo, em particular, denominado *modelo Degrau*, Figura 5, foi construído a mérito de comparação simulando uma falésia de 40m de altura, Figura 1. Para avaliar a evolução longitudinal e vertical do escoamento atmosférico utilizaram-se os pontos destacados na Figura 5. Nas avaliações a velocidade de referência (U_{ref}) utilizada foi de 25m/s e a altura de referência (H) de 0,4m.

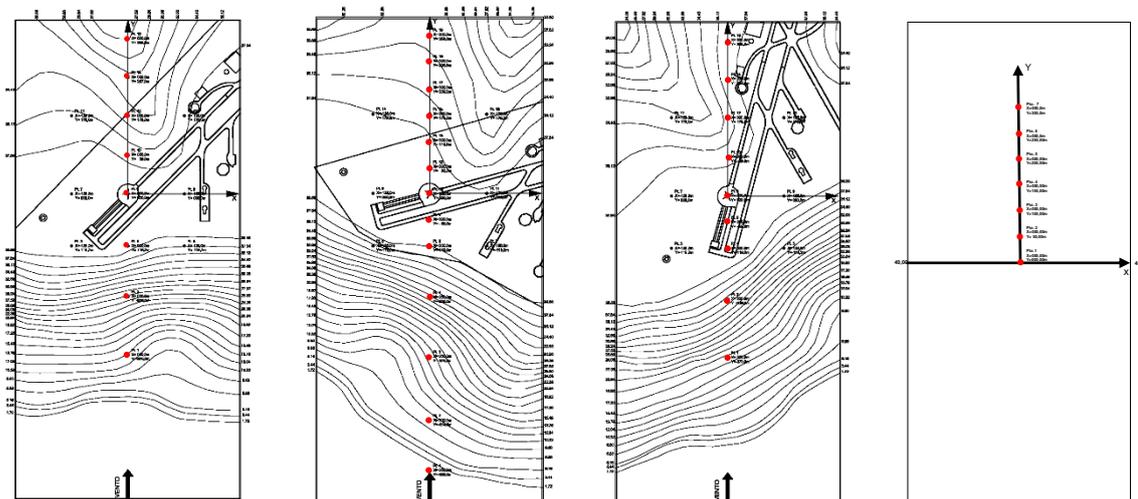


Figura 5. Em escala reduzida, modelos construídos para as três direções de incidência do vento (0° , 30° e 330° , *Degrau*).

Na Figura 6 está retratada, sob o eixo central do túnel de vento, a evolução longitudinal do perfil de velocidade do vento para ângulo de incidência de 0° . Vale observar uma acentuação do Perfil 4 no que tange aos valores U/U_{ref} abaixo de 0.5 z/H em comparação ao Perfil 1. Para uma análise mais completa, realizou-se a dispersão dos perfis em relação ao perfil de entrada (Perfil 1). Na Tabela 1, 2, 3 e 4 apresenta-se a dispersão da velocidade e da intensidade da turbulência para os respectivos ângulos de incidência de 0° , 30° , 330° e configuração *Degrau*. DF , MDV , HDV significam, respectivamente, diferença entre perfis, máxima diferença entre as velocidades, altura no túnel de vento referente à máxima diferença entre as velocidades. Já $MDIT$ e $HDIT$, máxima diferença entre a intensidade da turbulência e altura no túnel de vento referente à máxima diferença entre a intensidade de turbulência. Essa dispersão é descrita pela subtração entre os valores discretos dos Perfis, a cada altura, pelo Perfil 1.

Obteve-se para o ângulo de incidência de 0° que a velocidade do escoamento foi mais intensificada entre o Perfil 4 e o Perfil 1 em valores que chegaram a 2,756m/s na altura de 0,025m no túnel de vento o que corresponde à 10m na atmosfera. Já a dispersão da intensidade da turbulência indicou que a maior diferença em relação ao Perfil 1 ocorreu com o Perfil 14. Isto resultou em um aumento da intensidade da turbulência de 1,27% na altura de 0,04m no túnel de vento, correspondendo a 16m na atmosfera.

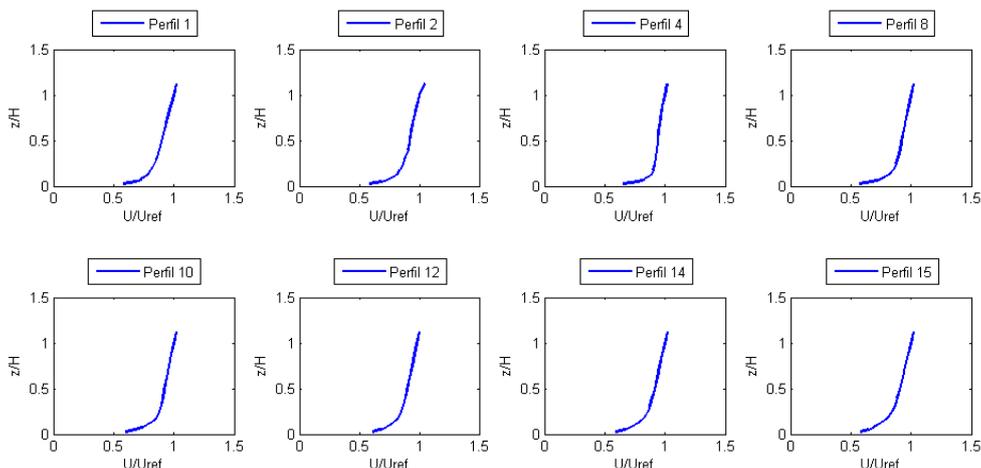


Figura 6. Evolução longitudinal dos perfis de velocidade do vento para o ângulo de incidência 0°.

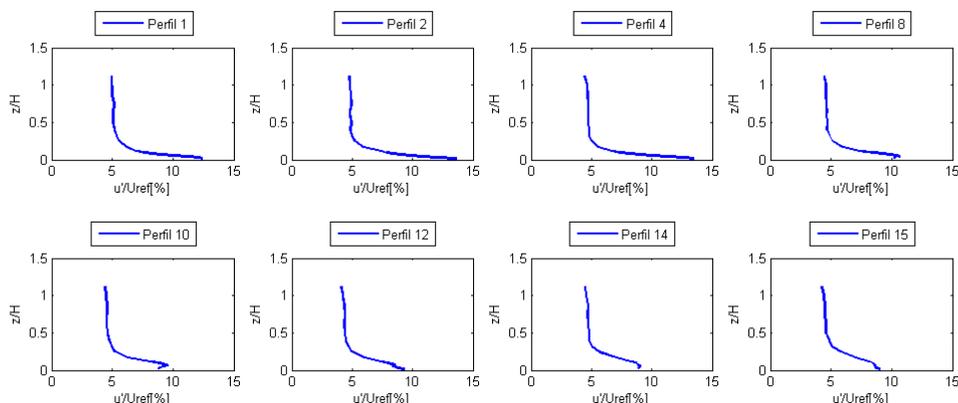


Figura 7. Evolução longitudinal dos perfis da intensidade do vento para o ângulo de incidência de 0°.

Tabela 1. Dispersão máxima da diferença entre velocidades e intensidade da turbulência para o ângulo de incidência do vento de 0°.

<i>DF</i>	<i>MDV(m/s)</i>	<i>HDV(m)</i>	<i>MDIT(%)</i>	<i>HDIT(m)</i>
P2-P1	0,767	0,050	1,182	0,010
P4-P1	2,756	0,025	1,057	0,010
P8-P1	1,055	0,070	0,890	0,040
P10-P1	1,095	0,070	1,266	0,040
P12-P1	0,712	0,010	0,390	0,050
P14-P1	0,453	0,200	1,275	0,050
P15-P1	0,257	0,200	1,173	0,050

Mantendo o mesmo padrão de análise, a Figura 8 indica a evolução longitudinal dos perfis de velocidade para um ângulo de incidência de 30°. Já a evolução da intensidade da turbulência esta retratada na Figura 9. Vale atentar-se ao maior número de pontos de coleta de dados longitudinalmente afastados abrangendo assim um campo maior de amostragem. Para esta configuração, tanto o campo de velocidade quanto o campo da intensidade da turbulência não foram fortemente modificados. Diferentemente da configuração de 0°, a maior diferença entre os perfis de velocidade

ocorreu a uma altura no túnel de vento de 0,01m que corresponde a 4m na atmosfera. A maior diferença foi de 4,069m/s. Nesta mesma altura, a intensidade da turbulência foi incrementada em 3,325%. Entretanto, o maior aumento na velocidade em ambos os ângulos de incidência apresentaram localização no eixo das ordenadas muito próximo, para 0° (-119,2m) e para 30° (-119,6m). Esse fenômeno indica que a mudança para 30° não variou significativamente a localização no plano XY do túnel de vento do ponto de máxima velocidade, mas variou seu módulo e sua localização na altura. Na intensidade da turbulência não se encontrou relação aparente na variação do ângulo de incidência

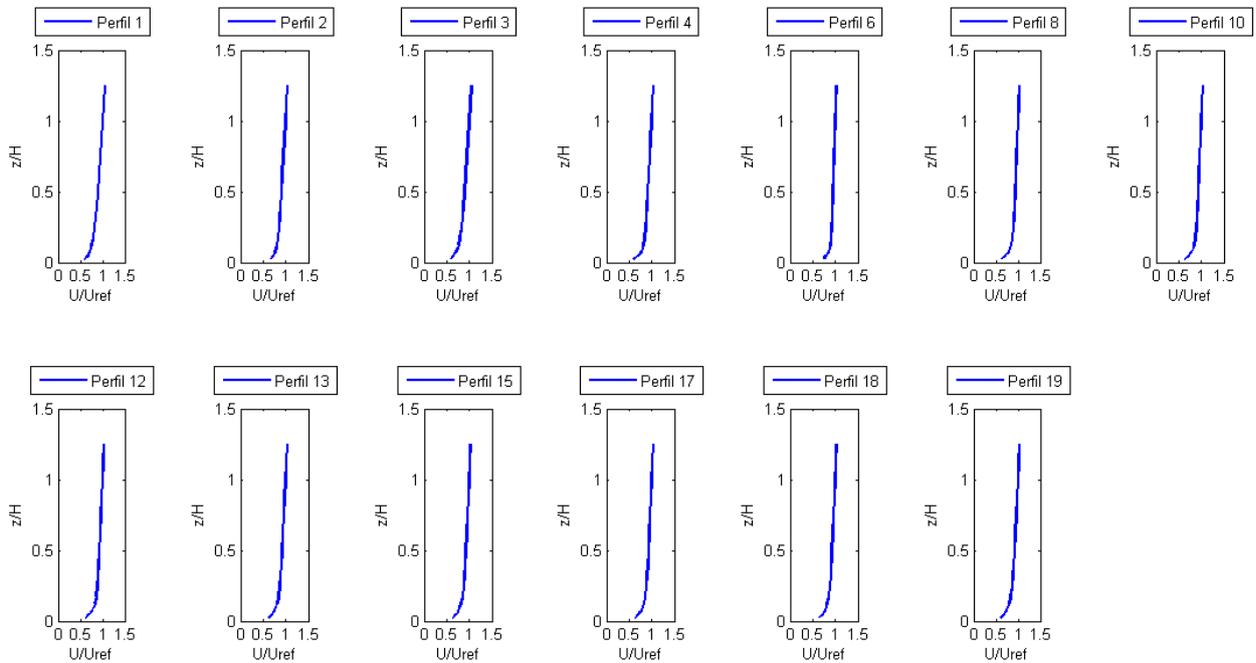


Figura 8. Evolução longitudinal dos perfis de velocidade do vento para o ângulo de incidência 30°.

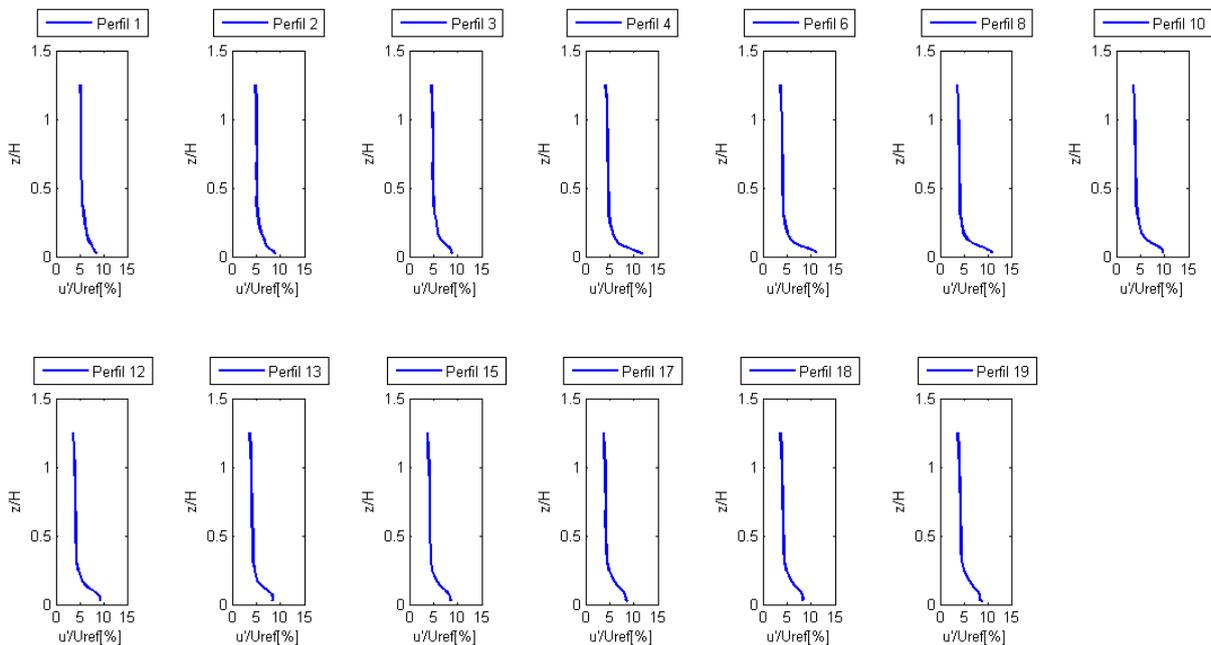


Figura 9. Evolução longitudinal dos perfis da intensidade do vento para o ângulo de incidência de 30°.

Tabela 2. Dispersão máxima da diferença entre velocidades e intensidade da turbulência para o ângulo de incidência do vento de 30°.

<i>DF</i>	<i>MDV(m/s)</i>	<i>HDV(m)</i>	<i>MDIT(%)</i>	<i>HDIT(m)</i>
P2-P1	1,560	0,01	0,532	0,015
P3-P1	0,224	0,05	0,677	0,025
P4-P1	1,571	0,04	3,325	0,01
P6-P1	4,069	0,01	2,845	0,015
P8-P1	2,259	0,05	2,629	0,015
P10-P1	2,300	0,04	1,484	0,02
P12-P1	1,860	0,05	1,324	0,025
P13-P1	1,351	0,05	0,742	0,03
P15-P1	1,561	0,05	0,596	0,03
P17-P1	1,751	0,07	0,518	0,03
P18-P1	1,615	0,05	0,554	0,03
P19-P1	1,161	0,1	0,663	0,04

Mais uma vez analisaram-se separadamente as duas últimas configurações Variando para as outras duas configurações: 330° e *Degrau..* O resultado da evolução longitudinal da velocidade e da intensidade da turbulência para o ângulo de incidência de 330° está mostrado, respectivamente, na Figura 10 e na Figura 11.

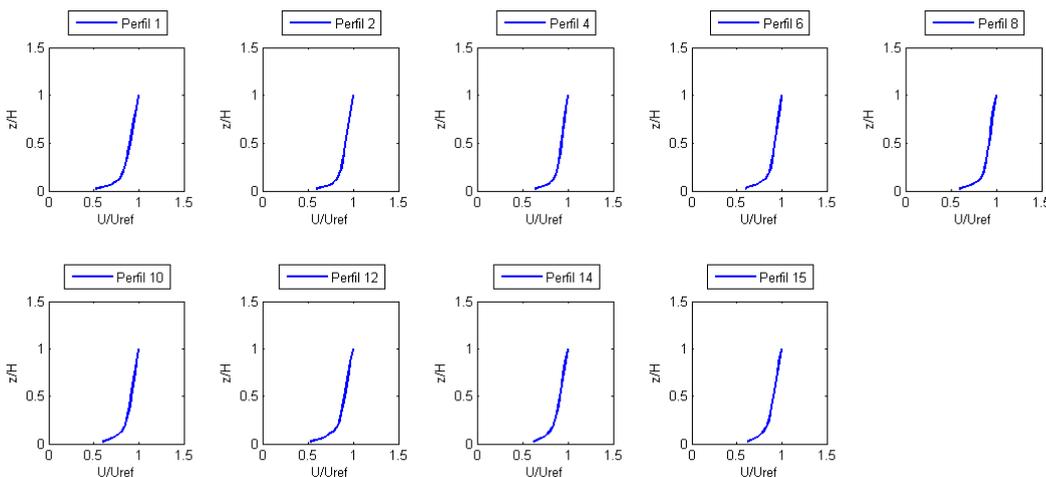


Figura 10. Evolução longitudinal dos perfis de velocidade do vento para o ângulo de incidência 330°.

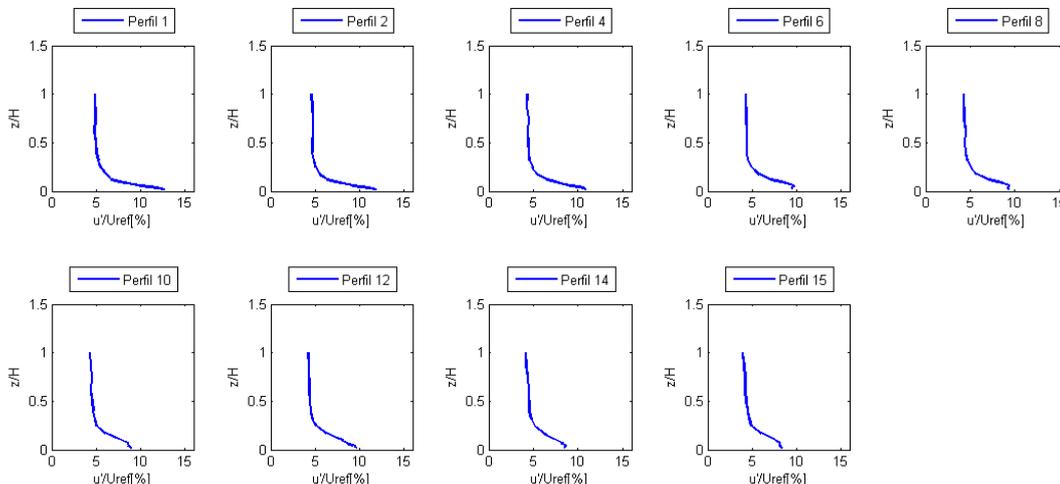


Figura 11. Evolução longitudinal dos perfis da intensidade do vento para o ângulo de incidência de 330°.

Por inspeção, pode-se depreender que a intensidade da turbulência varia mais longitudinalmente e ortogonalmente ao plano XY do túnel de vento do que a velocidade. Basta observar que os perfis da velocidade do vento para esta configuração ao longo do eixo Y pouco variou. Outro indicio esta na Tabela 3 da dispersão máxima da velocidade e da intensidade da turbulência para 330°. A máxima diferença na velocidade ficou destoada das demais máximas, este aumento na velocidade foi de 2,820m/s a uma altura de 0,01m no túnel de vento correspondente a 4m na atmosfera. Vale atentar-se a localização no plano XY desta máxima diferença: X=0,0m e Y= -119,2m. Observa-se que é a mesma localização das configurações de 0° e 30°. Caracterizando, mais uma vez, uma alteração no módulo e na altura, mas não no plano XY. Além disso, pela primeira vez observou-se que a desaceleração superou o aumento da intensidade da turbulência. Este fenômeno pode estar associado a variações de forma não homogênea nos três primeiros pontos de medição. Em que maiores diferenças entre as velocidades dos pontos medidos correspondem a menores valores da intensidade da turbulência associada.

Tabela 3. Dispersão máxima da diferença entre velocidades e intensidade da turbulência para o ângulo de incidência do vento de 330°.

<i>DF</i>	<i>MDV(m/s)</i>	<i>HDV(m)</i>	<i>MDIT(%)</i>	<i>HDIT(m)</i>
P2-P1	1,623	0,01	-0,057	0,25
P4-P1	2,820	0,01	-0,209	0,04
P6-P1	1,886	0,01	0,654	0,04
P8-P1	1,813	0,01	0,481	0,04
P10-P1	1,778	0,01	0,617	0,05
P12-P1	0,276	0,1	0,710	0,05
P14-P1	2,460	0,01	0,291	0,05
P15-P1	2,389	0,01	0,486	0,05

Para a configuração *Degrau* a evolução longitudinal perfil de velocidade é característico de escoamento com mudanças abruptas nas condições da superfície. Na Figura 12 é mostrada a variação longitudinal da velocidade para a configuração *Degrau*. Observa-se uma grande variação entre o perfil de entrada (Perfil 1) e os demais perfis, isto se deve a descontinuidade causada pela topografia. Como era de se esperar, a maior variação tanto da velocidade quanto da intensidade da turbulência deu-se entre o Perfil 2 e o Perfil 1 com incremento de 1,491m/s na velocidade a uma altura de 0,1m no túnel de vento correspondendo a 40m em escala real e aumento em 26,77% na intensidade da turbulência à metade da altura da velocidade, ou seja, 20m em escala real.

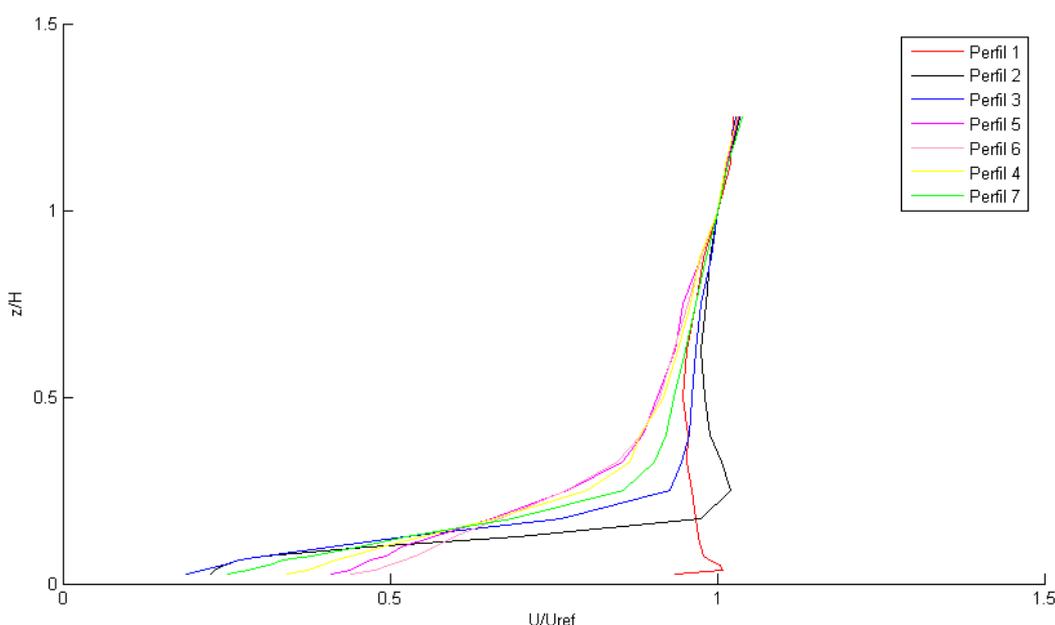


Figura 12. Evolução longitudinal dos perfis de velocidade do vento para configuração *Degrau*.

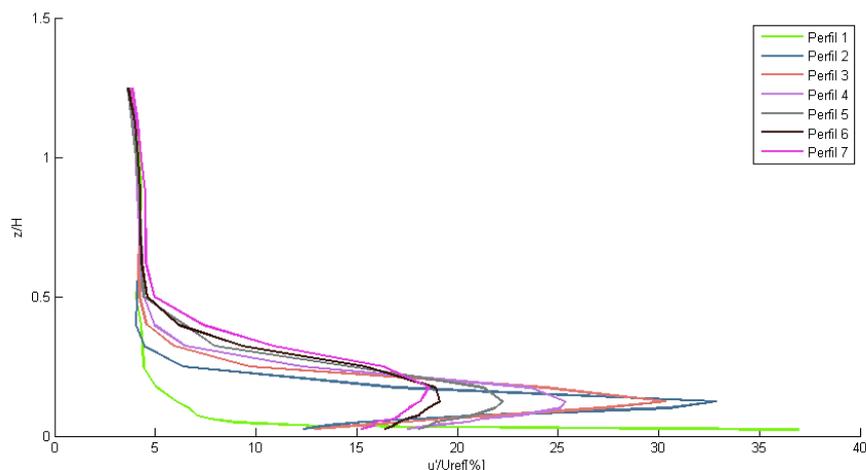


Figura 13. Evolução longitudinal dos perfis da intensidade do vento para configuração *Degrau*.

Tabela 4. Dispersão máxima da diferença entre velocidades e intensidade da turbulência para configuração *Degrau*.

<i>DF</i>	<i>MDV(m/s)</i>	<i>HDV(m)</i>	<i>MDIT(%)</i>	<i>HDIT(m)</i>
P2-P1	1,491	0,1	26,777	0,05
P3-P1	0,360	0,2	24,264	0,05
P4-P1	0,348	0,5	19,298	0,05
P5-P1	0,143	0,5	16,236	0,07
P6-P1	0,198	0,5	13,822	0,07
P7-P1	0,344	0,5	13,506	0,07

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho constitui a primeira parte de um estudo das características do escoamento atmosférico e dos processos de dispersão de gases na região do Centro de Lançamento de Alcântara. São apresentados os resultados da avaliação do escoamento nas proximidades do Centro. Foi realizada uma análise quantitativa dos perfis verticais de velocidade média e intensidade de turbulência e comparações dos resultados obtidos com modelos topográficos reduzidos para três direções de vento incidente no túnel de vento da UFRGS foram realizadas. Assim, foram obtidos os valores máximos da diferença entre velocidades e intensidades da turbulência correspondentes aos diferentes perfis verticais e as diferentes direções de vento avaliadas.

De forma complementar, são apresentados os resultados obtidos com um modelo simplificado tipo “degrau”. Uma conclusão interessante obtida desta avaliação é o fato de que as simplificações podem conduzir a resultados que não refletem a situação real. Consequentemente, deve-se salientar a importância da utilização dos modelos topográficos que reproduzem o entorno próximo com uma escala geométrica definida e acorde com o fator de escala do vento incidente, para obter resultados confiáveis nos estudos em túnel de vento.

A segunda parte do estudo será apresentada em outro artigo, e está centrada especificamente na avaliação da difusão turbulenta de gases. Foram desenvolvidos testes no túnel de vento com diferentes situações de emissão, utilizado a simulação de vento incidente descrita neste trabalho e os mesmos modelos topográficos. Neste estudo, o processo de dispersão é analisado a partir das medições de concentração de gás nas diferentes condições de emissão.

7. REFERENCES

- Blessmann, J., 1982, The Boundary Layer Wind Tunnel of UFRGS, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 10. pp. 231-248.
- Blessmann, J., 1995, *O vento na engenharia estrutural*. Porto Alegre. Ed. Universidade. UFRGS.
- 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.

- Cao, S. and Tamura, T., 2006. Experimental study on roughness effects on turbulent boundary layer flow over a two-dimensional steep hill. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 94, 1-19.
- 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.
- Counihan, J., 1969, “An improved method of simulating an atmospheric boundary layer in a wind tunnel”, *Atmospheric Environment*, 3, 197-214.
- Fisch, G., 1999, “Características do perfil vertical do vento no Centro de Lançamento de Foguetes de Alcântara (CLA)”. *Revista Brasileira de Meteorologia*, Vol. 14, No 1, pp. 11-21.
- Loredo-Souza, A.M, Schettini, E.B.C, Paluch, M.J., 2004. Simulação da camada limite atmosférica em túnel de vento, in: *Anais da IV Escola de Primavera Transição e Turbulência-4*, 137-163. Porto Alegre, Brazil.
- Magnago, R., Fisch, G., Moraes, O, 2008. Análise Espectral do Vento no Centro de Lançamento de Alcântara (CLA). *Revista Brasileira de Meteorologia*, 19 p.
- 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.
- Novak, M.D., Warland, J.S., Orchansky, A.L., Ketler, R., Green, S., 2000. Wind tunnel and field measurements of turbulent flow in forests. Part I: Uniformly thinned stands. *Boundary Layer Meteorology* 95, 457-495.
- Philips, D.A., Rossi, R., Iacarino, G., 2013, Large-eddy simulation of passive scalar dispersion in an urban-like canopy. *J. Fluid Mechanics*, 723:404-428.
- Standen, N. M., 1972, “A Spire Array for Generating Thick Turbulent Shear Layers for Natural Wind Simulation in Wind Tunnels”, National Research Council of Canada, NAE, Report LTR-LA-94.
- Surry, D., 1982, "Consequences of distortions in the flow including mismatching scales and intensities of turbulence", *Proceedings of the International Workshop on Wind Tunnel Modeling Criteria and Techniques in Civil Engineering Applications*, pp. 137-185, Gaithersburg, Maryland, U.S.A.
- Wittwer, A., Loredo-Souza, A., Oliveira, M., Hulle de Souza, B., Fisch, G., Goulart, E., Ferrari de Carvalho, G., Avaliação do processo de dispersão turbulenta de gases no Centro de Lançamento de Alcântara., Artigo apresentado na 10a. Escola de Turbulência e Transição, EPTT 2016, São José dos Campos, SP, Brasil.

RESPONSIBILITY NOTICE

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