

ESTUDO DO ESCOAMENTO TURBULENTO EM CAVIDADE RASA VIA TÚNEL DE VENTO E SIMULAÇÃO LES

Daniel SCHUCH^{1,2}, Edson R. MARCIOTTO^{1,2}, Otavio ACEVEDO³, Gilberto FISCH^{1,2}, Ana Cristina AVELAR⁴

¹INTC – São José dos Campos – SP underschuch@gmail.com;

²Divisão de ciências Atmosféricas, Instituto de Aeronáutica e Espaço – São José dos Campos – SP;

³UFSM – Santa Maria – RS;

⁴ Divisão de Aerodinâmica, Instituto de Aeronáutica e Espaço – São José dos Campos – SP.

RESUMO: A estrutura do campo de vento e da turbulência atmosférica gerada no interior de uma cavidade é analisada com o uso de ensaios realizados em túnel de vento e simulação computacional em um modelo de simulação de grandes turbilhões (LES). A partir de um perfil de velocidade instantânea no centro da cavidade são determinadas as escalas de vento e turbulência, assim como os termos do balanço de Energia Cinética Turbulenta (TKE). Os resultados sugerem que, apesar das diferenças de escalas, a organização da turbulência é similar e bem determinada nos dois experimentos.

ABSTRACT: The structure of the wind field and atmospheric turbulence generated inside a cavity is analyzed by means of wind tunnel essays and a Large-Eddy Simulation (LES) model. Wind and turbulence scales, and Turbulent Kinetic Energy are determined by using a profile of instantaneous velocity in the center of cavity. The results suggest that, despite of scales differences, the turbulence organization is similar and well determined in both experiments.

1 – INTRODUÇÃO

Uma cavidade aberta sobre a qual o escoamento atmosférico passa é uma geometria básica constantemente encontrada, por exemplo, em cânions urbanos compostos de prédios e ruas ou, no caso específico da Amazônia, em clareiras em extensas áreas de floresta tropical. A interação entre o vento externo e a geometria da cavidade produz um regime de circulação do ar controlado por regiões de auto-oscilações neste regime inerentemente instável. Cavidades com a razão da largura (L) e a profundidade ou altura (h) maiores que 1 são chamadas de cavidades rasas, sendo que neste trabalho será estudada uma cavidade rasa com a razão de $L/h=6$. O escoamento atmosférico em áreas de florestas e clareiras foi simulado no interior de túnel de vento, por meio de um modelo de cavidade. Adicionalmente, foram realizadas simulações com uso de técnicas de Simulação de Grandes Turbilhões (*Large-Eddy Simulation*, LES). Estes experimentos físicos e numéricos podem ser especialmente importantes para estudos de troca vertical da massa, calor e *momentum* em regiões de clareiras, principalmente para estudos de ciclos biogeoquímicos e de dispersão de gases.

2 – MATERIAL E MÉTODOS

Foram comparados dados obtidos em ensaios de túnel de vento e simulação numérica em um modelo LES. O túnel de vento utilizado está localizado na Divisão de Aerodinâmica (ALA) no Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), São José dos Campos, Brasil. A simulação do modelo LES, baseado no código descrito por Smolarkiewics e Magolin (1997), foi realizada em um computador portátil Sony Vaio VGN-NW240F (processador Intel® Core™ Duo, CPU T6600 2x 2.2GHz, sistema Linux distribuição Xubuntu 64-bit) totalizando 11 minutos de processamento para um período de 20 minutos de simulação bidimensional.

2.1 - CONJUNTO DE DADOS DE TÚNEL DE VENTO

O túnel de vento utilizado possui uma sessão de teste aberta de aproximadamente 1,0 m entre a saída e reentrada do túnel, com aproximadamente 0,65 m de diâmetro. A intensidade da turbulência presente no túnel sem modelo da cavidade é em torno de 0,3% quando operado em velocidade de 30 m/s. O modelo físico de cavidade usado é construído de madeira polida de altura fixa ($h=43$ mm) e largura 6h. Nesse conjunto de experimentos foi obtido um perfil vertical de velocidade nas alturas $z/h = 0,1; 0,3; 0,5; 0,7; 0,9; 1,0; 1,1; 1,5; 2,0$ e $2,5$ em relação à depressão do modelo, sendo que o eixo x está alinhado com a velocidade do vento médio e a origem está no início da cavidade.

As medidas de velocidade do vento foram realizadas com um sistema de anemômetro de fio quente da Dantec Dynamics System com uma taxa de amostragem de 1000 Hz por um intervalo de aproximadamente 1 minuto (65536 ms). Cabe salientar que estas medidas não representam a velocidade longitudinal do fluxo, mas sim uma velocidade efetiva, que a relação $U_{eff}^2 = u^2 + \gamma^2 v^2 + \lambda^2 w^2$, onde $u_i = (u, v, w)$ é a velocidade do vento na direção $x_i = (x, y, z)$, $\gamma = \gamma(\alpha)$ e $\lambda = \lambda(\theta)$ são funções dos ângulos de incidência e elevação, respectivamente. Uma vez que a componente v ao longo do fio é praticamente zero, e testes de sensibilidade realizados por Jorgensen (1971) onde foram determinados λ entre 1.02 e 1.04 para o intervalo de 20 a 90 graus, a velocidade efetiva pode ser escrita na seguinte forma aproximada:

$$U_{eff} \approx \sqrt{u^2 + w^2} \quad (1)$$

2.2 - SIMULAÇÃO EM LES

Um procedimento bem estabelecido para o estudo da camada limite é o emprego de modelos *Large-Eddy Simulation*, que resolvem explicitamente a estrutura dos grandes turbilhões e parametrizam os processos de pequena escala. O modelo LES usado neste estudo (SMOLARKIEWICZ; MARGOLIN, 1997) é baseado em um sistema de equações diferenciais que representam a conservação do *momentum* médio (2), da massa (3) e primeira lei da termodinâmica (4), descritos a seguir:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \delta_{i3} g \frac{\theta'}{\bar{\theta}} + D_{u_j} + F_i, \quad \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0, \quad \frac{d\bar{\theta}}{dt} = D_\theta \quad (2)-(4)$$

onde t é o tempo, ρ a densidade do ar, p a pressão, δ_{i3} o delta de Kronecker, θ é θ' são a média e o desvio da temperatura potencial (θ) respectivamente, D_{u_j} e D_θ são parametrizações da subgrade do LES (SORBJAN, 1996).

O efeito da cavidade é incluído explicitamente na equação do *momentum* médio, como um termo sumidouro de momento (F_i) isotrópico oposto ao vetor instantâneo local do vento exceto acima da altura da cavidade e na região interna da cavidade, onde é nulo, descrito por:

$$F_i = H\left((x - x_c)^2 - (L/2)^2, h - z\right) C_d a U \bar{u}_i \quad (5)$$

onde H é uma função degrau de Heaviside, x_c é a posição da cavidade de largura $L=120m$ e profundidade $h=20m$, A_i um termo de arrasto, C_d o coeficiente de arrasto, U o módulo da velocidade do vento e a é a densidade do meio onde a cavidade está.

O domínio espacial de simulação é um corte bidimensional de 360 m de comprimento e 70 m de altura, dividido na horizontal em 90 pontos em intervalos de 4 m (coordenada x) e em 36 níveis com espaçamento regular de 2 m na vertical (coordenada z). As condições de contorno são fixas no

sentido do vento médio (eixo x) e são barreiras sólidas nos limites inferior e superior. Para a condição inicial foi escolhido um perfil vertical de temperatura potencial constante igual a 290 K, fluxo de calor nulo, valor zero de umidade específica, além de um vento com perfil logaritmo, exceto no interior da cavidade, onde este é inicialmente nulo. Representando a condição de neutralidade similar aos ensaios realizados no túnel de vento. Foi escolhido um passo de tempo de integração de 0,1 segundo e simulado um total de 12000 passos de tempo (20 minutos). Os primeiros 10 minutos foram considerados *spin-up* do modelo (período para a simulação atingir o equilíbrio) e o restante para análise.

2.3 – COMPARAÇÃO DAS ESCALAS DE VELOCIDADE E TURBULÊNCIA

Nessa sessão será abordada a metodologia usada para comparar os resultados dos ensaios de túnel de vento com as simulações em LES. Essa comparação apresenta dificuldades que vão além das diferenças contidas nas séries de dados. Os principais aspectos considerados são as limitações particulares presentes tanto nos ensaios no túnel de vento assim como os da simulação numérica e a geometria essencialmente não homogênea.

Primeiramente é necessário colocar a velocidade obtida pelas simulações em LES na mesma forma que a velocidade medida no interior do túnel de vento, usando a equação (1). Estas velocidades são extraídas de pontos correspondentes aos pontos onde foi instalado o sensor de fio quente nos ensaios do túnel de vento da grade resolvida a cada passo de tempo.

Para uma medida da influência do escoamento atmosférico acima da cavidade na produção de uma circulação no interior da mesma, adota-se um parâmetro de acoplamento R_c definido como a razão entre a velocidade do vento acima da cavidade ($z/h=1,5$) e no seu inferior ($z/h=0,3$), usado classicamente para medir o acoplamento do vento acima da copa e no interior de florestas (CIONCO, 1979).

Os termos da equação de balanço de energia cinética turbulenta (*Turbulent Kinetic Energy*, TKE) sob condições estacionárias e não homogêneas, pode ser descritas como:

$$\overline{u_i} \frac{\partial \overline{e}}{\partial x_i} = \delta_{i3} \frac{g}{\theta} (\overline{u_i' \theta'}) - \overline{u_i' u_j'} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} - \frac{\partial (\overline{u_i' e'})}{\partial x_i} - \varepsilon \quad (6)$$

onde o termo do lado esquerdo é a advecção de TKE, os termos do lado direito são: termo de empuxo que é nulo para condição de neutralidade, termo de produção/perda de TKE por fluxo de momento/cisalhamento do vento, termo de mistura turbulenta e um termo de dissipação. O modelo LES resolve explicitamente uma forma mais completa desta equação, mas esses termos serão determinados diretamente dos campos de vento, permitindo avaliar melhor a influência tanto dos grandes vórtices (escala resolvida) como das condições físicas impostas (iniciais e de contorno) ao modelo na geração e dissipação de energia cinética turbulenta (FOKEN, 2006).

Outra quantidade importante é o espectro de energia turbulenta, dividido em 3 regiões: uma região de dissipação, inercial e de produção de turbulência. Na região de dissipação é onde a energia cinética é convertida em energia térmica. No intervalo inercial a produção e dissipação da turbulência estão em equilíbrio e o termo de dissipação presente em (6) pode ser calculado com o uso do espectro $E_{u_i}(k)$ e a lei dos $-5/3$ de Komogorov. A região de produção de turbulência está ao redor do pico de energia turbulenta k_i . Com esta frequência pode-se estimar a escala de

comprimento integral $\sim 1/k_i$ associado aos a entrada de energia turbulenta. A escala de comprimento integral euleriano $\Lambda_{u_i} = \pi / k_i$ é definida para cada componente do vento como:

$$\Lambda_{u_i} = U_i T_a = U_i \int_0^{\infty} \rho_{u_i}(\xi) d\xi = U_i \int_0^{\infty} \frac{\overline{u_i(t)u_i(t+\xi)}}{\sigma_{u_i}^2} dt = U_i \int_0^{\infty} \frac{\overline{u_i(f)u_i(f+\xi)}}{\sigma_{u_i}^2} df \quad (7)$$

onde T_a é a escala integral de tempo, U_i , $\sigma_{u_i}^2$ e $\rho_{u_i}(\xi)$ são a média, a variância e a função de autocorrelação de cada componente de u_i para uma determinada altura (FOKEN, 2008).

No caso do conjunto de dados do túnel de vento, o espectro pode ser extraído diretamente da série de dados fazendo uma transformada de Fourier. Porém, para os resultados da simulação em LES, não é esperado que a menor escala resolvida representa efetivamente o espectro, pois os valores de velocidade representam médias em ponto de grade em um intervalo Δx_i . Para essa comparação é necessário o uso de uma função de filtro (SCHMIDT E SCHUMANN, 1988):

$$F_i(k_i) = \sin^2(k_i \cdot \Delta x_i / 2) / (k_i \cdot \Delta x_i / 2)^2 \quad (8)$$

onde k_i é o número de onda na direção x_i .

3 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

A *Figura 2a* mostra o perfil vertical da velocidade média do vento. O perfil do vento do túnel (em vermelho) apresentou características diferentes do simulado em LES (em preto), apesar disso eles possuem parâmetros de acoplamento muito semelhantes ($R_c = 0,235$ para o LES e $R_c = 0,2$ para o túnel de vento). Na *figura 2b* é mostrado o perfil vertical da intensidade da turbulência, que nos ensaios de túnel é superior às encontradas por LES para quase todo perfil, exceto na parte inferior ($z/h < 0,4$), o máximo de turbulência dos ensaios de túnel ocorreu no ponto de inflexão do vento médio em $z/h = 0,3$ e para o experimento em LES próximo a superfície. E na *Figura 2c* é apresentado um perfil dos comprimentos associados aos turbilhões mais energéticos. O experimento em LES mostrou um máximo em $z/h = 0,9$ (região de interface entre escoamento no interior e externo à cavidade), que pode ser interpretado como o indicio de uma estrutura organizada na simulação em LES, associada a uma estrutura de recirculação, enquanto que a escala obtida para os ensaios de túnel de vento foi regular com a altura.

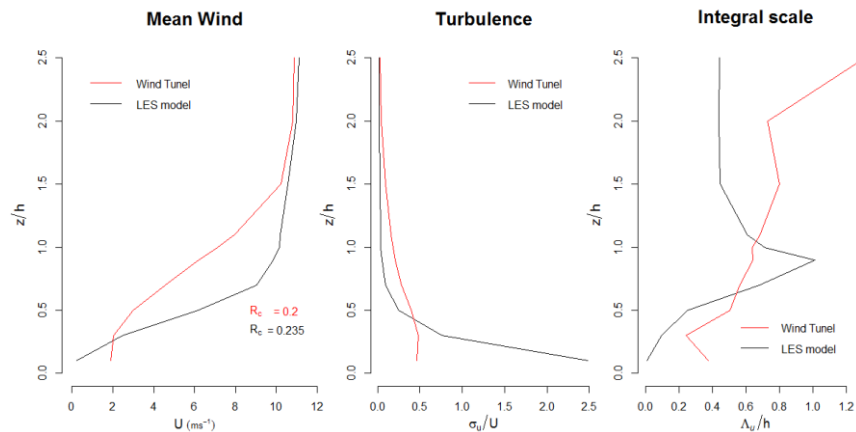


Figura 2 – Perfil vertical do vento médio (a), Intensidade da turbulência (b) e Escala integral Euleriana (c).

Na *Figura 3* são mostrados os termos do balanço de TKE adimensionalizados. O termo de cisalhamento, *Figura 3a*, acompanha o gradiente vertical do vento, e é semelhante para o LES e túnel; O termo de mistura turbulenta, *Figura 3b*, tende a acompanhar a intensidade da turbulência, porém é mais significativo para o túnel de vento. O termo de dissipação calculado com base no espectro (sem a aplicação do filtro) é mostrado na *Figura 3c*, sendo o termo com a maior ordem de grandeza para o LES e menos significativo para o túnel de vento. Finalizando na *Figura 3d* é apresentado o termo de advecção calculado com base do equilíbrio (resíduo) entre os demais termos, que é maior para o simulado em modelo LES. Para os termos de cisalhamento e mistura foram adotadas as hipóteses de similaridade e similaridade de fluxo-variância (FOKEN, 2008).

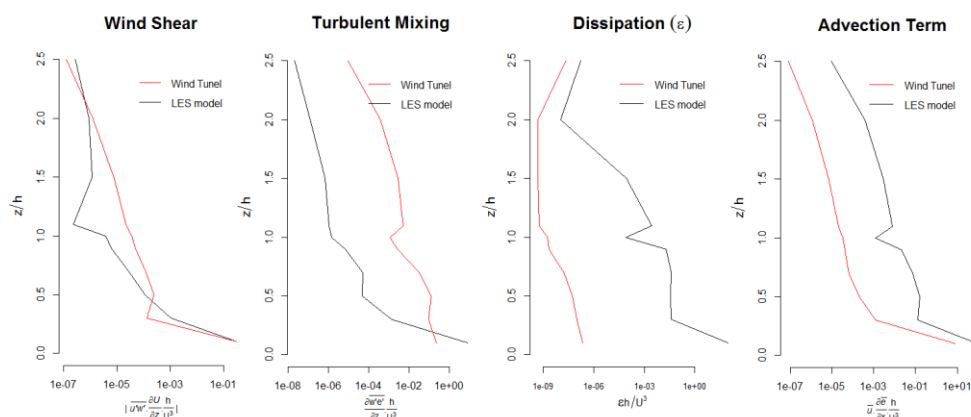


Figura 3 – Termos do balanço de energia cinética turbulentas: cisalhamento mecânico (a), mistura turbulenta (b), dissipação (c) e termo de transporte (d).

4 - CONCLUSÕES

A estrutura do perfil do vento e da turbulência gerada nos ensaios de túnel de vento e LES são diferentes devido, principalmente, à diferença de escala de comprimento. Ainda assim, a estrutura cinemática da turbulência é semelhante, ou seja, a produção e dissipação da turbulência no interior da cavidade podem ser analisadas de acordo com os termos da equação do balanço de energia cinética turbulenta, uma vez que os dois experimentos estão na mesma geometria e sujeitos as mesmas forçantes mecânicas.

5 – AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio financeiro do CNPq, da FAPESP (Processo 16510-0/2010) e a Divisão de Aerodinâmica do IAE, pela cessão do uso do túnel de vento.

6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CIONCO, R. M., 1979, A Summary of an Analysis of Canopy Flow Coupling for a Variety of Canopy Types, preprint volume, In: 14th Conference of the **Am. Meteorol. S.** on Agriculture and Forest Meteorology, Minneapolis, Minnesota, p. 105-106.
- FOKEN, T. **Micrometeorology**. Springer, 2008, 320 p
- Schmidt, H.; Schumann, U., 1989. Coherent structure of the convective boundary layer from large-eddy simulations. **J. Fluid Mech.**, v. 200, p. 511-562.
- JORGENSEN, F.E., 1971. Directional sensitivity of wire and fibre-film probes. **DISA Information**, 11, 31-37.
- SMOLARKIEWICZ, P.K., MARGOLIN, L. G., 1997. On forward in-time differencing for fluids: an Eulerian/semi-Lagrangian non-hydrostatic model for stratified flows. **ATMOS OCEAN**, v. 35, p. 127-152.
- SORBJAN, Z., 1996. Numerical study of penetrative and “Solid Lid” nonpenetrative convective boundary layers. **ATMOS SCI LETT**, v. 53, p. 101-112.