

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DIRETA DO ESCOAMENTO ESTAVELMENTE ESTRATIFICADO DE EKMAN A PARTIR DO CÓDIGO INCOMPACT3D

DIRECT NUMERICAL SIMULATION OF AN STABLY STRATIFIED EKMAN FLOW FROM THE INCOMPACT3D CODE

Michel B. Stefanello¹, Leandro C. Pinto², Ricardo Frantz⁴, Luca Mortarini³, Otávio Costa Acevedo¹, Jorge Hugo Silvestrini⁴, Gervásio Annes Degrazia¹

¹Departamento de Física, UFSM, Santa Maria, Brasil

²Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFSM, Santa Maria Brasil

³CNR-ISAC, Torino, Itália

⁴Faculdade de Engenharia, PUCRS, Porto Alegre, Brasil

Resumo

Em um ciclo diurno, diferentes manifestações de uma camada limite planetária são geradas por forçantes térmicos e mecânicos. Uma camada limite estável ocorre quando a superfície do solo possui menor temperatura do que o ar acima. Nesta camada, o cisalhamento do vento é o principal mecanismo de geração da turbulência. No presente estudo, uma simulação numérica direta de uma camada de Ekman sobre uma superfície é apresentada para estudar os distintos padrões turbulentos que ocorrem durante a evolução de uma camada limite neutra para uma camada limite fracamente estável. O estudo preliminar, exibe o aparecimento de estruturas turbulentas próximas a superfície, devido a imposição de uma estratificação.

Palavras-chave: Simulação numérica direta¹. Camada de Ekman evoluindo². Camada limite estável³

Abstract

In a diurnal cycle, distinct thermal and mechanical forcing generates different manifestations of a planetary boundary layer. The stable boundary layer occurs when the soil surface has a lower temperature than the air above. In this layer, wind shear is the main mechanism of turbulence generation. In the present study, a direct numerical simulation of an Ekman layer over a smooth wall is presented to investigate the different turbulent patterns that occur during evolution from a neutral boundary layer to a weakly stable boundary layer. The preliminary study shows the appearance of turbulent structures near the surface, due to the imposition of a stratification

Keywords: Direct numerical simulation¹. Ekman layer². Stable layer³

1 Introdução

A camada limite convectiva (CLC) e a turbulência bem desenvolvidas são amplamente discutidas na literatura (KAIMAL et al., 1976; CAUGHEY, 1984). Portanto, estudos fenomenológicos e modelagem tornaram bem conhecidas as suas escalas espaciais e temporais dominantes, bem como as suas velocidades características. Experimentos de campo, que investigaram em detalhe a CLC na sua totalidade vertical, e, modelagem numérica, baseada principalmente na técnica de simulação dos grandes turbilhões (LES), tem fornecido parametrizações turbulentas para diferentes modelos de transporte e difusão. Estes modelos, descrevendo o forte efeito da mistura provocada pelos turbilhões convectivos, na difusão de espécies escalares e vetoriais, reproduzem de um modo satisfatório o campo de concentração de contaminantes liberados na CLC. Diferentemente da CLC, na camada limite estável (CLE, noturna) as características turbulentas são bem mais difíceis de serem claramente identificadas. Para situações fortemente estratificadas, eventos turbulentos intermitentes são presentes e, portanto, os critérios de auto-similaridade e invariância de escala, normalmente presentes em uma turbulência bem desenvolvida, são violados (FRISCH, 1995). Na presença desta estratificação fortemente estável surgem frequentemente fenômenos complexos, como o meandro do vento horizontal (ocorrendo em situações de vento fraco (MORTARINI et al., 2016)) ondas de gravidade (CAVA et al., 2017) e jatos de baixos níveis associados ao colapso da turbulência (SUN et al., 2012). Considerando-se que os modelos LES são fortemente dependentes do tipo de filtro, das parametrizações das escalas de subfiltro e da resolução espacial da grade numérica, o emprego desta técnica para investigar os padrões turbulentos em situações muito estáveis é incerto e pode levar a resultados imprecisos. Esta deficiência do modelo é causada pelo fato dos turbilhões mais energéticos, presentes em situações de forte estabilidade, ocorrerem em números de ondas mais elevados que aqueles associados ao próprio filtro do LES. Os trabalhos realizados por Coleman, Ferziger e Spalart (1990), Spalart, Coleman e Johnstone (2008), Anson e Mellado (2014), Shah e Bou-Zeid (2014), Gohari e Sarkar (2017), cujos os estudos empregaram a técnica de simulação numérica direta (DNS) para descrever uma camada de Ekman, mostram que esta técnica, diferentemente dos modelos LES, pode ser utilizada na investigação da evolução dos padrões turbulentos presentes em uma CLE. Além disso, as manifestações turbulentas ocorrendo na CLE, quando comparadas com aquelas da CLC, são caracterizadas por magnitudes menores do número de Reynolds. Este baixo número de Reynolds associado ao fato de que a técnica DNS resolve todos os graus de liberdade turbulentos representa um incentivo adicional para o emprego da DNS como um método alternativo para investigar os processos físicos da CLE. No presente trabalho, são apresentados os resultados preliminares de uma simulação numérica direta de uma camada de Ekman sobre uma parede lisa, para estudar as propriedades de uma camada limite sobre estratificação estável.

2 Equações governantes

As seguintes equações para a conservação de massa, de quantidade de movimento (na aproximação de Boussinesq) e para o empuxo são expressas como:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \nabla^2 u_i + f \varepsilon_{j3} (u_j - U_\infty \delta_{j1}) + \mathbf{g} \cdot \delta_{i3}$$

$$\frac{\partial b}{\partial t} + \frac{\partial (u_j b)}{\partial x_j} = \kappa \nabla^2 b$$

nestas equações, u_i são as componentes do campo de velocidade, t é o tempo, x são as coordenadas espaciais, P representa o campo pressões, ν é a viscosidade cinemática, κ é a difusividade térmica, δ_{i3} é o delta de Kronecker, ε_{j3} é o símbolo para o tensor alternante, \mathbf{g} é a aceleração gravitacional, f é o parâmetro de Coriolis, U_∞ é a velocidade do vento geostrófico e b é o empuxo. Para realização das simulações foi usado o código fonte Incompact3d, capaz de simular escoamentos turbulentos tridimensionais. Este código baseia-se no uso de um esquema de diferenças finitas compactas de sexta ordem para solução das derivadas espaciais (LELE, 1992) em conjunto com um esquema de Adams-Bashforth de terceira ordem para o avanço temporal. Para garantir a condição de incompressibilidade, uma equação de Poisson para o campo de pressão é resolvida no passo de tempo intermediário (LAIZET; LAMBALLAIS, 2009). O código Incompact3d usa como estratégia de paralelização o protocolo de linguagem independente de comunicação Message Passing Interface (MPI). Mais detalhes sobre tal estratégia podem ser encontrados em Laizet, Lamballais e Vassilicos (2010).

2.1 Condições de Contorno e iniciais

Como condição inicial para o perfil de velocidade foi empregado o caso neutro N500, cujas características estão descritas

na tabela 1 de (ANSORGE; MELLADO, 2014).

As condições de contorno são periódicas no plano horizontal, condição prescrita de não escorregamento ($u = 0$ e $v = 0$) e impermeável ($w = 0$) na superfície. No topo do domínio, as condições são de deslizamento livre, impermeável ($\partial u/\partial z = \partial v/\partial z = w = 0$) e adiabático ($\partial b/\partial z = 0$). Impondo-se um resfriamento repentino na superfície consideram-se casos, nos quais a estratificação inteira concentra-se inicialmente no interior da subcamada viscosa do escoamento. Do ponto de vista matemático esta situação é representada pela seguinte equação (ANSORGE; MELLADO, 2014):

$$b(x, y, z, t_0) = 1 - \operatorname{erf}\left[\frac{z/D}{2a}\right]$$

no qual $a = 0.15$ é uma espessura adimensional, $D = \sqrt{2\nu f^{-1}}$ é a profundidade da camada laminar de Ekman e z é a coordenada vertical do domínio de simulação. Por causa da escolha de uma condição de contorno de Dirichlet,

$$b(x, y, z = 0, t > 0) = 0$$

e

$$b(x, y, z = z_{\text{topo}}, t > 0) = B_0$$

a diferença de empuxo entre a superfície e o topo do domínio é definida como B_0 ; Este parâmetro está presente na relação definindo o número de Froude:

$$F_r = \frac{U_\infty}{B_0 D}$$

Pelo fato da escala laminar D não ter relevância em um escoamento turbulento, a estratificação pode ser representada mais apropriadamente em termo de um número de Richardson global:

$$R_B = \frac{B_0 \delta_N}{U_\infty^2}$$

no qual δ_N é a escala da profundidade da camada limite neutra.

3 Resultados preliminares

A mudança de comportamento de uma camada de Ekman, (primitivamente caracterizada por um número de Reynolds igual a 500), provocada por um resfriamento na sua superfície antes de atingir o estado estacionário, é observado na Figura 1. A Figura 1 representa perfis verticais das componentes u e v do vento em distintos tempos de evolução da Camada de Ekman. Neste caso particular, o sistema está evoluindo de um escoamento de Ekman neutramente estratificado e estatisticamente estacionário que apresenta uma turbulência completamente desenvolvida. Após a introdução de um forçante de empuxo, caracterizando uma camada limite fracamente estável ($Ri = 0.015$), que está linearmente relacionado com a temperatura, pequenas flutuações turbulentas começam a se manifestar na componente vertical da velocidade w (Figura 2).

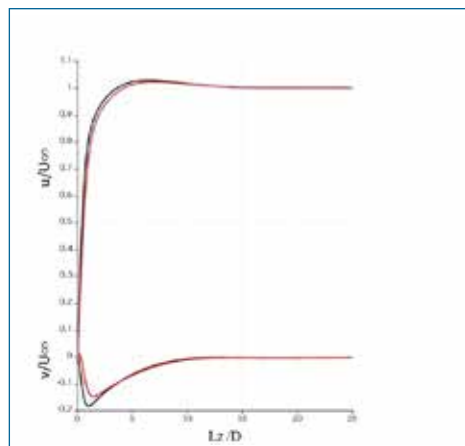


Figura 1 – Perfis de velocidade do vento durante a evolução do sistema.



Figura 2 – Componente w do vento durante a evolução do sistema

4 Conclusão

No presente estudo, são apresentados os resultados preliminares da simulação numérica direta de uma camada de Ekman estavelmente estratificada. Algumas características tais como, pequenas flutuações verticais de velocidade são simuladas pelo modelo DNS. Adicionalmente, os resultados mostram a evolução do escoamento do fluido para um estado quase estacionário. Essa configuração permitirá estudos realísticos de escoamentos estratificados estavelmente presentes na camada limite planetária. No futuro, pretende-se estabelecer uma comparação entre os nossos resultados simulados no DNS, com aquelas observações medidas em uma camada limite planetária estável.

Referências

- ANSORGE, C.; MELLADO, J. P. Global intermittency and collapsing turbulence in the stratified planetary boundary layer. *Boundary-layer meteorology*, Springer, v. 153, n. 1, p. 89–116, 2014.
- CAUGHEY, S. J. Observed characteristics of the atmospheric boundary layer. In: *Atmospheric turbulence and air pollution modelling*. [S.l.]: Springer, 1984. p. 107–158.
- CAVA, D.; MORTARINI, L.; GIOSTRA, U.; RICHIARDONE, R.; ANFOSSI, D. A wavelet analysis of low-wind-speed submeso motions in a nocturnal boundary layer. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Wiley Online Library, v. 143, n. 703, p. 661–669, 2017.
- COLEMAN, G. N.; FERZIGER, J.; SPALART, P. A numerical study of the turbulent ekman layer. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge University Press, v. 213, p. 313–348, 1990.
- FRISCH, U. *Turbulence: the legacy of AN Kolmogorov*. [S.l.]: Cambridge university press, 1995.
- GOHARI, S. I.; SARKAR, S. Direct numerical simulation of turbulence collapse and rebirth in stably stratified ekman flow. *Boundary-Layer Meteorology*, Springer, v. 162, n. 3, p. 401–426, 2017.
- KAIMAL, J.; WYNGAARD, J.; HAUGEN, D.; COTÉ, O.; IZUMI, Y.; CAUGHEY, S.; READINGS, C. Turbulence structure in the convective boundary layer. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 33, n. 11, p. 2152–2169, 1976.
- LAISET, S.; LAMBALLAIS, E. High-order compact schemes for incompressible flows: A simple and efficient method with quasi-spectral accuracy. *Journal of Computational Physics*, Elsevier, v. 228, n. 16, p. 5989–6015, 2009.
- LAISET, S.; LAMBALLAIS, E.; VASSILICOS, J. A numerical strategy to combine high-order schemes, complex geometry and parallel computing for high resolution dns of fractal generated turbulence. *Computers & Fluids*, Elsevier, v. 39, n. 3, p. 471–484, 2010.

LELE, S. K. Compact finite difference schemes with spectral-like resolution. *Journal of computational physics*, Elsevier, v. 103, n. 1, p. 16–42, 1992.

MORTARINI, L.; STEFANELLO, M.; DEGRAZIA, G.; ROBERTI, D.; CASTELLI, S. T.; ANFOSSI, D. Characterization of wind meandering in low-wind-speed conditions. *Boundary-Layer Meteorology*, Springer, v. 161, n. 1, p. 165–182, 2016.

SHAH, S. K.; BOU-ZEID, E. Direct numerical simulations of turbulent ekman layers with increasing static stability: modifications to the bulk structure and second-order statistics. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge University Press, v. 760, p. 494–539, 2014.

SPALART, P. R.; COLEMAN, G. N.; JOHNSTONE, R. Direct numerical simulation of the ekman layer: A step in reynolds number, and cautious support for a log law with a shifted origin. *Physics of Fluids*, AIP, v. 20, n. 10, p. 101507, 2008.

SUN, J.; MAHRT, L.; BANTA, R. M.; PICHUGINA, Y. L. Turbulence regimes and turbulence intermittency in the stable boundary layer during cases-99. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 69, n. 1, p. 338–351, 2012.

Michel B. Stefanello

Departamento de Física, UFSM, Santa Maria, Brasil
E-mail: michelstefanello@gmail.com

Leandro C. Pinto

Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFSM, Santa Maria Brasil
E-mail: leandro.pinto@ufsm.br

Ricardo Frantz

Faculdade de Engenharia, PUCRS, Porto Alegre, Brasil
E-mail: rasfrantz@gmail.com

Luca Mortarini

CNR-ISAC, Torino, Itália
E-mail: l.mortarini@gmail.com

Otávio Costa Acevedo

Departamento de Física, UFSM, Santa Maria, Brasil
E-mail: otavio@ufsm.br

Jorge Hugo Silvestrini

Faculdade de Engenharia, PUCRS, Porto Alegre, Brasil
E-mail: jorgehs@pucrs.br

Gervásio Annes Degrazia

Departamento de Física, UFSM, Santa Maria, Brasil
E-mail: gervasiodegrazia@gmail.com