

# SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO SOBRE UMA COLINA ISOLADA EM ATMOSFERA NÃO-NEUTRA: COMPARAÇÃO COM OS EXPERIMENTOS DE COOPER'S RIDGE

Leanderson Marcos da SILVA PAIVA<sup>1</sup>, Almir VENANCIO FERREIRA<sup>1</sup>, Wallace Figueiredo MENEZES<sup>2</sup>, Gustavo César Rachid BODSTEIN<sup>3</sup>

## INTRODUÇÃO

Não é comum encontrar resultados de experimentos de campo, laboratório, analíticos, e de simulação numérica que possuam análises do perfil de velocidade do vento em condições atmosféricas não-neutras sobre colinas. O trabalho de Coppin *et al.* (1994) possui alguns resultados em tais condições, para Cooper's Ridge. Cooper's Ridge é uma colina de caráter bidimensional, situada no noroeste de Goulburn, Austrália.

Recentemente Pellegrini (2001) obteve resultados analíticos qualitativamente bons, através de uma lei logarítmica modificada, válida para colinas isoladas e vegetadas, em condições atmosféricas neutras e não-neutras. O conhecimento do comportamento do escoamento do vento sobre colinas, em condições de atmosferas neutras e não-neutras, é extremamente importante para os engenheiros, tendo em vista o aproveitamento de energia eólica. Portanto, a previsão do escoamento é de grande interesse para o agricultor, que faz uso deste tipo de energia em suas lavouras, dentre outros.

De forma a contribuir com a literatura, os objetivos deste trabalho se resumem em simular numericamente o escoamento do vento dentro da Camada Limite Atmosférica (CLA), para casos bidimensionais, em regime quase-permanente, sobre uma colina isolada e suave, de vegetação baixa e não-uniforme, em atmosfera seca, neutra e não-neutra, utilizando o modelo RAMS (*Regional Atmospheric Modeling System*, versão 3b, Walko *et al.*, 1995), e comparar os resultados aos experimentos de campo de Cooper's Ridge.

## MATERIAL E MÉTODOS

O conjunto de equações do RAMS, resolvido numericamente através de um esquema híbrido em diferenças finitas, escrito em coordenadas cartesianas, no caso de escoamento bidimensional, em regime transiente, numa atmosfera seca e não-hidrostática, sob a decomposição de Reynolds e a aproximação de Boussinesq, desprezando-se o efeito da força de coriolis, adicionando-se o esquema de parametrização da turbulência, é descrito em Silva Paiva *et al.* (2003a,b). Detalhes relacionados ao sistema de coordenada vertical, as condições de contorno, as condições iniciais e a consulta das referências bibliográficas citadas são dados em Silva Paiva (2002).

Assumiu-se Cooper's Ridge com altura  $h = 115$  m e meio-comprimento  $L_{hx}$ , normal ao eixo maior da colina, igual a 400 m. O eixo maior está orientado na direção norte-sul. Os ventos

predominantes na região são de oeste. O perfil da colina é dado por

$$z_h(x) = h[1 + (x/L_{hx})^2]^{-1}, \quad (1)$$

apesar de que, na região de jusante, esta função não reproduz as peculiaridades do terreno. Segundo Coppin *et al.* (1994), a cobertura da grama se manteve uniforme sobre o terreno, com exceção na região correspondente ao TC (topo da colina). Portanto, a variação do comprimento de rugosidade  $z_0$  é estimada por

$$z_0(x, y) = 0,03 \text{ m}, \quad \text{para } -L_{hx} > x > L_{hx} \quad (2)$$

$$z_0(x) = \frac{z_0}{3} \left\{ 1 + 2 \exp \left[ - \left( \frac{x + L_{hx}}{L_{hx}/2} \right)^2 \right] \right\}, \quad \text{para } -L_{hx} \leq x \leq L_{hx} \quad (3)$$

A velocidade de fricção foi adotada de Pellegrini (2001), com o valor igual a 0,9 m/s.

A resolução da grade é de  $\Delta x = 80$  m, num domínio de  $30L_{hx} \times 75h$ , sendo  $\Delta z = 1$  m no primeiro nível, variando numa taxa de 1,2, até a altura onde  $\Delta z$  atinge 1 Km. A partir desta altura  $\Delta z$  é mantido constante.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figuras 1 e 2 ilustram o efeito da variação do grau de estabilidade atmosférica sobre os perfis verticais de velocidade média horizontal nas ER (encosta de referência) e no TC, no instante final de 19 horas de tempo físico para os casos neutro e instável e 17 horas para o caso estável. O comportamento geral das curvas simuladas apresenta-se de acordo com as medidas em Cooper's Ridge. No caso das medidas de campo, as condições de estabilidade são avaliadas com respeito ao comprimento de Obukhov  $L_0$ . Neste caso,  $L_0 = 400$  m equivale ao caso quase neutro,  $L_0 = 24$  m ao caso estável e  $L_0 = -33$  m ao instável. Nas simulações, o grau de estabilidade é dado em termos do gradiente de temperatura potencial média  $\partial\theta/\partial z$ .

As variações encontradas nas velocidades, apesar de quantitativamente distintas, apresentam-se qualitativamente semelhantes em suas formas. Na ER, verifica-se que, quando uma atmosfera torna-se estável, a concavidade do perfil de velocidade é negativa, enquanto que, à medida que a atmosfera torna-se mais instável, a concavidade da curva torna-se positiva. Este comportamento é corroborado pelos dados de Cooper's Ridge e pela teoria (Kaimal e Finnigan, 1994).

No TC, a Figura 2 ilustra que, embora a atmosfera estável cause uma aceleração do escoamento, a concavidade adquirida pelo perfil de velocidade é ligeiramente oposta a da ER. Por este motivo, a velocidade simulada para o caso estável, por exemplo, exibe uma variação quase logarítmica com a altura. Este resultado também foi alcançado por Pellegrini (2001). A

<sup>1</sup> M.Sc. Prof., Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Av. Maracanã, n° 229, Torre, 4° andar, Maracanã, CEP 20271-110, Rio de Janeiro, RJ, tel.: (21) 25693022 (r. 163), [leanderson@cefet-rj.br](mailto:leanderson@cefet-rj.br).

<sup>2</sup> D.Sc. Prof. Adjunto 1, Departamento de Meteorologia, IGEO/UFRJ.

<sup>3</sup> PhD. Prof. Adjunto 3, Departamento de Engenharia Mecânica, DEM/COPPE/UFRJ.

confirmação vem da analogia flutuação-aceleração (Finnigan, 1992). Segundo esta, o escoamento acelerado sobre o TC comporta-se como se estivesse submetido a uma atmosfera instável. Esta instabilidade fictícia tende a compensar a estabilidade verdadeira e restaura a forma logarítmica do perfil de velocidade.

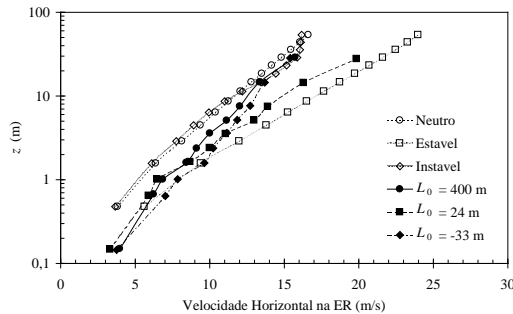


Figura 1: Perfil de velocidade média na ER.

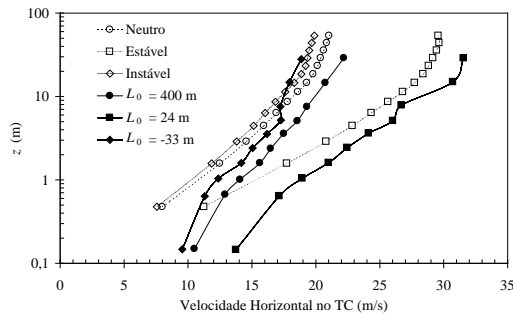


Figura 2: Perfil de velocidade média no TC.

À respeito das discrepâncias encontradas, deve-se considerar que a análise da estabilidade para as medidas de campo não são idênticas das simulações, devido a carência dos fluxos de calor nos dados de campo, que relaciona  $L_0$  e  $\partial\theta/\partial z$ .

Os casos estudados são para atmosferas de fraça a moderadamente não-neutras. Esta inferência deve-se aos perfis verticais de  $\partial\theta/\partial z$  (não mostrados) e, aos perfis verticais de aumento de velocidade absoluto  $\Delta u(x,z) = u(x,z) - u_0(z)$  e relativo  $\Delta S(x,z) = \Delta u(x,z)/u_0(z)$ , que são ilustrados nas Figuras. 3 e 4, respectivamente. Neste caso,  $u(x,z)$  é a velocidade no TC e  $u_0(z)$  na ER. As alturas onde ocorrem o máximo de  $\Delta u(x,z)$  são razoavelmente previstas pelo modelo RAMS. As discrepâncias na intensidade de  $\Delta u(x,z)$  se devem aos perfis de velocidades subestimadas no TC. Essas aumentam nos perfis encontrados para  $\Delta S(x,z)$ . Os perfis de  $\Delta u(x,z)$  e  $\Delta S(x,z)$  apresentam um comportamento que é esperado para atmosferas de fraça à moderadamente não-neutras, segundo Kaimal e Finnigan (1994). Deve-se ressaltar que estas comparações são feitas apenas sob o ponto de vista qualitativo, pois não houve uma correlação exata entre  $L_0$  e  $\partial\theta/\partial z$ .

## CONCLUSÕES

Os perfis de velocidade simulados com o RAMS tiveram boa concordância qualitativa com os perfis medidos em Cooper's Ridge. Os resultados fornecem subsídios importantes, para diversas aplicações, no entendimento do comportamento do escoamento do vento em atmosferas não-neutras. Uma comparação mais exata não pôde ser efetuada devido ao desconhecimento dos fluxos de

calor na superfície. Necessita-se obter resultados em casos de atmosferas mais fortemente não-neutras e úmidas, caracterizando, portanto, atmosferas mais realistas. Entretanto, é necessário que dados de campo obtidos nessas situações estejam disponíveis. Nesses casos, é necessário realizar alguns ajustes no RAMS, principalmente, relacionadas à parametrização de turbulência. Informações de campo são necessárias, afim de fornecer subsídios para avaliação e comparação do comportamento das linhas de corrente simuladas (não mostradas), assim como, informações relacionadas aos fluxos de calor. Sugere-se a realização de simulações tridimensionais utilizando dados reais de topografia, afim de caracterizar efeitos tridimensionais presentes nos experimentos de campo, mas ausentes de simulações bidimensionais, tais como efeitos de sombra devido a outros obstáculos.

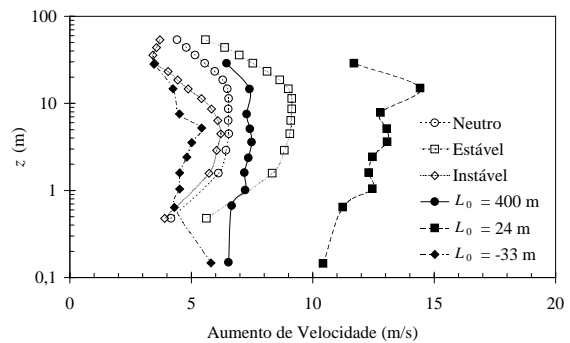


Figura 3: Perfil de aumento absoluto de velocidade.

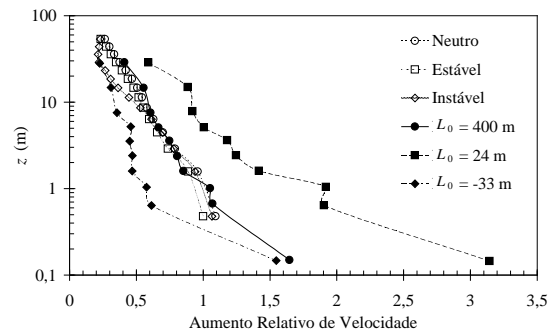


Figura 4: Perfil de aumento relativo de velocidade.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- SILVA PAIVA, L.M. **Simulação Numérica do Escoamento na Camada Limite Atmosférica sobre Colinas Suaves, Isoladas e Vegetadas em Atmosferas Neutra, Não-Neutra e Seca, Utilizando o Código RAMS**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2002. 220 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - PEM/COPPE/UFRJ, 2002.
- SILVA PAIVA, L.M.; BODSTEIN, G.C.R.; MENEZES, W.F. Simulação Numérica do Escoamento na Camada Limite Atmosférica sobre uma Colina Idealizada. Parte I: Comparação com os Experimentos de Black Mountain. In: CONGRESSO CUBANO DE METEOROLOGIA, 9, 2003a, **Anais...**, Cuba: SOMETCUBA, 2003. (CD-ROM).
- SILVA PAIVA, L.M.; BODSTEIN, G.C.R.; MENEZES, W.F. Simulação Numérica do Escoamento na Camada Limite Atmosférica sobre uma Colina Idealizada. Parte II: Comparação com os Experimentos de Askervein. In: CONGRESSO CUBANO DE METEOROLOGIA, 9, 2003b, **Anais...**, Cuba: SOMETCUBA, 2003. (CD-ROM).