



André Augusto Isnard

**Investigação Computacional do Escoamento e da
Dispersão de Poluentes Atmosféricos sobre
Topografias Complexas**

Tese de Doutorado

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do
título de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

Orientador: Marcos Sebastião de Paula Gomes

Rio de Janeiro, 05 de abril de 2004



André Augusto Isnard

**Investigação Computacional do Escoamento e da
Dispersão de Poluentes Atmosféricos sobre
Topografias Complexas**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Marcos Sebastião de Paula Gomes

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Angela Ourivio Nieckele

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Mônica Feijó Naccache

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Jane Méri Santos

Universidade Federal do Espírito Santo – UFES

Neyval Costa Reis Jr.

Universidade Federal do Espírito Santo - UFES

Paulo Roberto Pagot

CENPES/PETROBRÁS

José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do
Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 05 de abril de 2004

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

ANDRÉ AUGUSTO ISNARD

Graduou-se em Engenharia Mecânica na PUC-Rio em 1997. Obteve o título de Mestre em Engenharia Mecânica na PUC-Rio em 2000. Desenvolve projetos na linha de pesquisa Engenharia Ambiental – Poluição Atmosférica.

Ficha Catalográfica

Isnard, André Augusto

Investigação computacional do escoamento e da dispersão de poluentes atmosféricos sobre topografias complexas / André Augusto Isnard ; orientador: Marcos Sebastião de Paula Gomes. – Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Engenharia Mecânica, 2004.

230 f. : il. ; 30 cm

Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Dispersão atmosférica. 3. Dinâmica dos fluídos computacional. 4. Topografia complexa. 5. Turbulência. I. Gomes, Marcos Sebastião de Paula. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

Para minha esposa Michelle.

Agradecimentos

Ao meu orientador Professor Marcos Sebastião de Paula Gomes pelo estímulo e parceria para a realização deste trabalho.

Ao CNPq e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Ao Professor Fernando Tadeu Boçon por ter fornecido importantes fontes de informação para a elaboração desta pesquisa.

À minha esposa Michelle por todo o apoio e compreensão ao longo desta jornada.

Ao meu pai, à minha mãe, à minha irmã, à Sonia e a todos os amigos e familiares que de uma forma ou de outra me estimularam ou me ajudaram.

Aos meus colegas do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio, pela agradável convivência, pela valiosa troca de informações e, em especial, pelas instigantes discussões nos horários dos cafés.

Aos professores que participaram da Comissão examinadora.

A todos os professores e funcionários do Departamento pelos ensinamentos e pela ajuda.

Resumo

Isnard, André Augusto; Gomes, Marcos Sebastião de Paula (Orientador). **Investigação computacional do escoamento e da dispersão de poluentes atmosféricos sobre topografias complexas**. Rio de Janeiro, 2004. 230p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O objetivo principal do presente trabalho foi investigar computacionalmente o escoamento e a dispersão de poluentes atmosféricos sobre topografias complexas tridimensionais em escala de laboratório. Foram realizadas simulações numéricas de escoamentos neutros e estavelmente estratificados sobre colinas e também sobre terreno plano. A modelagem matemática, baseada na solução das equações gerais de conservação, incluiu o modelo de tensões de Reynolds para a turbulência e um modelo de duas camadas para o tratamento do escoamento na região próxima à parede. O código comercial Fluent (Versão 6.0.12), que emprega o método de volumes finitos, foi utilizado nas simulações computacionais. Os resultados numéricos foram comparados a dados obtidos em experimentos em túnel de vento disponíveis na literatura. Também foram realizadas comparações com resultados obtidos com a utilização do modelo $k-\varepsilon$ clássico.

A comparação entre os resultados obtidos com as diversas modelagens numéricas e os dados experimentais mostrou que a utilização conjunta do modelo de tensões de Reynolds e do tratamento em duas camadas produziu os melhores resultados na predição do escoamento. O desempenho dessa modelagem foi particularmente superior na representação da recirculação no escoamento na região a jusante da colina.

Com relação ao cálculo das concentrações, os resultados obtidos foram razoáveis nas regiões mais distantes da fonte quando comparados aos experimentais. Na região mais próxima à fonte emissora, foram calculadas concentrações excessivamente altas ao nível do solo. Estas discrepâncias foram atribuídas ao fato de ter-se utilizado um modelo de difusividade turbulenta isotrópica para os cálculos da dispersão turbulenta do poluente. Ainda assim, os

campos de concentrações apresentados mostraram importantes aspectos qualitativos relativos ao problema como, por exemplo, os efeitos da estabilidade atmosférica na dispersão do poluente, que foram adequadamente previstos.

Palavras-Chave

Dispersão atmosférica, dinâmica dos fluidos computacional, topografia complexa, turbulência.

Abstract

Isnard, André Augusto; Gomes, Marcos Sebastião de Paula (Advisor). **Computational investigation on the flow and atmospheric pollutant dispersion over complex topography**. Rio de Janeiro, 2004. 230p. D.Sc. Thesis – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The main objective of the present work was to investigate computationally the flow and the dispersion of atmospheric pollutants over three-dimensional complex topographies in laboratory scale. The investigations included the numerical simulation of the neutral and stably stratified flows over hills and flat terrain. The mathematical model was based on the solution of the general conservation equations and included the Reynolds stress model for turbulence and a two-layer zonal model for the flow treatment in the near-wall region. The commercial code Fluent (Version 6.0.12), which is based on the finite volume method, was employed in the computational simulations. The numerical results were compared to data obtained in wind tunnel experiments, available in the literature. Comparisons were also made with results obtained by employing the standard $k-\varepsilon$ model for turbulence.

The comparisons between the experimental data and the numerical results showed that the combined use of the Reynolds stress model and the two-layer treatment provided the best results for the flow representation. This modeling approach was particularly superior in representing the flow recirculation on the leeside of the hill.

The predicted concentrations results were reasonably good at regions far away from the emission source. In the near source regions, the ground level concentrations were overestimated by the numerical modeling. These discrepancies were attributed to the employment of an isotropic turbulent diffusivity model in the turbulent dispersion calculations. Nevertheless, the calculated concentration fields represented well important qualitative features of

the problem as, for example, the atmospheric stability effects on the pollutant dispersion, which were correctly predicted.

Keywords

Atmospheric diffusion, complex terrain, computational fluid dynamics, turbulence.

Sumário

1 Introdução	23
1.1. Objetivo do Trabalho	27
1.2. Organização do Trabalho	28
2 Dispersão Atmosférica	29
2.1. Conceitos Gerais	29
2.2. Modelos Matemáticos para a Dispersão Atmosférica	42
3 Revisão da Literatura	77
4 Modelagem Matemática e Método Numérico	91
4.1. Modelagem Matemática	93
4.2. Método Numérico	108
5 Estudo da Dispersão sobre Topografias Complexas em Escala Reduzida	113
5.1. Experimento em Túnel de Vento	113
5.2. Configuração das Simulações	114
5.3. Resultados	134
6 Conclusões e Recomendações para Futuros Trabalhos	202
6.1. Conclusões	202
6.2. Recomendações para Futuros Trabalhos	206
7 Referências Bibliográficas	208
Apêndice A	218

Lista de figuras

Figura 1 – Vista esquemática lateral do túnel de vento (Boçon, 1998). Obs: as medidas estão em metros.	114
Figura 2 – Perfis utilizados para a representação das colinas: (a) com altura máxima igual a $100mm$ e (b) com altura máxima igual a $200mm$.	115
Figura 3 – Esquema da Simulação.	116
Figura 4 – Malha para simulação do escoamento (vista lateral).	118
Figura 5 - Malha para simulação do escoamento (vista superior)	118
Figura 6 - Malha para simulação do escoamento (vista frontal – plano $x = -1000mm$)	119
Figura 7 - Malha para a concentração (vista lateral)	120
Figura 8 - Malha para concentração (vista superior)	120
Figura 9 – Topografia discretizada da colina alta.	120
Figura 10 – Perfis de (a) velocidade u (m/s), (b) energia cinética turbulenta k (m^2/s^2) e (c) temperatura potencial θ (K) para a fronteira de entrada nos casos neutros (Ohba, R., apud Boçon, 1998).	123
Figura 11 - Perfis de (a) velocidade u (m/s), (b) energia cinética turbulenta k (m^2/s^2) e (c) temperatura potencial θ (K) para a fronteira de entrada nos casos estáveis (Ohba, R., apud Boçon, 1998).	124
Figura 12 - Perfis verticais da componente (u) da velocidade no plano de simetria ($y = 0$) - Caso D1.	137
Figura 13 - Perfis verticais de energia cinética (k) no plano de simetria ($y = 0$) - Caso D1.	138
Figura 14 - Perfis verticais da componente (u) da velocidade no plano de simetria ($y = 0$) - Caso E1.	139
Figura 15 - Perfis verticais de energia cinética (k) no plano de simetria ($y = 0$) - Caso E1.	142
Figura 16 - Perfis verticais da componente (u) da velocidade no plano de simetria ($y = 0$) - Caso D2.	143

- Figura 17 - Perfis verticais de energia cinética (k) no plano de simetria ($y = 0$) - Caso D2. 146
- Figura 18 - Perfis verticais da componente (u) da velocidade no plano de simetria ($y = 0$) - Caso E2. 147
- Figura 19 - Perfis verticais de energia cinética (k) no plano de simetria ($y = 0$) - Caso E2. 148
- Figura 20 - Vetores velocidade na região de recirculação (no plano de simetria) para o caso E2: (a) resultados obtidos no experimento em túnel de vento (Ohba, R., apud Boçon, 1998); (b) vetores velocidade calculados com a combinação TR-2C. 150
- Figura 21 - Campo de magnitude de velocidade (m/s) calculado no plano de simetria com a combinação TR-2C - Caso E2. 151
- Figura 22 - Campo de temperatura potencial (K) calculado no plano de simetria com a combinação TR-2C - Caso E2. 152
- Figura 23 - Campo de densidades (kg/m^3) calculado no plano de simetria com a combinação TR-2C - Caso E2. 152
- Figura 24 - Campo de energia cinética turbulenta (m^2/s^2) calculado no plano de simetria com a combinação TR-2C - Caso E2. 153
- Figura 25 - Campo de dissipação da energia cinética turbulenta (m^2/s^3) calculado no plano de simetria com a combinação TR-2C - Caso E2. 153
- Figura 26 - Isolinhas de concentração ao nível de solo – caso D1: (a) experimental (Ohba, R., apud Boçon, 1998), (b) numérico sem tratamento para a difusividade e (c) numérico com o tratamento para a difusividade próximo à fonte. 158
- Figura 27 – Isolinhas de concentração no plano de simetria – caso D1: (a) experimental (Ohba, R., apud Boçon, 1998), (b) numérico sem tratamento para a difusividade e (c) numérico com o tratamento para a difusividade próximo à fonte.. 159
- Figura 28 - Isolinhas de concentração no plano vertical transversal ($x = 0$) – caso D1: (a) experimental (Ohba, R., apud Boçon, 1998), (b) numérico sem tratamento para a difusividade e (c) numérico com o tratamento para a difusividade próximo à fonte. 160

- Figura 29 - Isolinhas de concentração ao nível de solo – caso E2: (a) experimental (Ohba, R., apud Boçon, 1998), (b) numérico sem tratamento para a difusividade e (c) numérico com o tratamento para a difusividade próximo à fonte. 162
- Figura 30 - Isolinhas de concentração no plano de simetria – caso E2: (a) experimental (Ohba, R., apud Boçon, 1998), (b) numérico sem tratamento para a difusividade e (c) numérico com o tratamento para a difusividade próximo à fonte. 163
- Figura 31 - Isolinhas de concentração no plano vertical transversal ($x = 0$) – caso E2: (a) experimental (Ohba, R., apud Boçon, 1998), (b) numérico sem tratamento para a difusividade e (c) numérico com o tratamento para a difusividade próximo à fonte. 164
- Figura 32 - Isolinhas de concentração ao nível do solo – caso E0: (a) experimental (Ohba, R., apud Boçon, 1998), (b) numérico sem tratamento para a difusividade e (c) numérico com o tratamento para a difusividade próximo à fonte. 166
- Figura 33 - Isolinhas de concentração no plano de simetria – caso E0: (a) experimental (Ohba, R., apud Boçon, 1998), (b) numérico sem tratamento para a difusividade e (c) numérico com o tratamento para a difusividade próximo à fonte. 167
- Figura 34 - Isolinhas de concentração no plano vertical transversal ($x = 0$) – caso E0: (a) experimental (Ohba, R., apud Boçon, 1998), (b) numérico sem tratamento para a difusividade e (c) numérico com o tratamento para a difusividade próximo à fonte. 168
- Figura 35 - Campos de concentrações (C^*) ao nível do solo e no plano de simetria – caso D1. A simulação não utilizou o tratamento para a difusividade 172
- Figura 36 - Campos de concentrações (C^*) ao nível do solo e no plano de simetria – caso E1. A simulação não utilizou o tratamento para a difusividade. 172
- Figura 37 - Campos de concentrações (C^*) ao nível do solo e no plano de simetria – caso D1. A simulação utilizou o tratamento para a difusividade 173
- Figura 38 - Campos de concentrações (C^*) ao nível do solo e no plano de simetria – caso E1. A simulação utilizou o tratamento para a difusividade 173
- Figura 39 - Campos de concentrações (C^*) ao nível do solo e no plano de simetria

– caso D2. A simulação não utilizou o tratamento para a difusividade.	174
Figura 40 - Campos de concentrações (C^*) ao nível do solo e no plano de simetria	
– caso E2. A simulação não utilizou o tratamento para a difusividade.	174
Figura 41 - Campos de concentrações (C^*) ao nível do solo e no plano de simetria	
– caso D2. A simulação utilizou o tratamento para a difusividade	175
Figura 42 - Campos de concentrações (C^*) ao nível do solo e no plano de simetria	
– caso E2. A simulação utilizou o tratamento para a difusividade	175
Figura 43 – Máximas concentrações (C^*) ao nível do solo para o caso D1 – as simulações não utilizaram o tratamento para a difusividade.	177
Figura 44 - Máximas concentrações (C^*) ao nível do solo para o caso D1 – as simulações utilizaram o tratamento para a difusividade próximo à fonte.	177
Figura 45 - Perfis verticais de concentração (C^*) no plano de simetria ($y = 0$) - Caso D1.	179
Figura 46 - Perfis verticais de concentração (C^*) no plano de simetria ($y = 0$) - Caso D1 (continuação).	180
Figura 47 - Máximas concentrações (C^*) ao nível do solo para o caso E1 – as simulações não utilizaram o tratamento para a difusividade.	180
Figura 48 - Máximas concentrações (C^*) ao nível do solo para o caso E1 – as simulações utilizaram o tratamento para a difusividade próximo à fonte.	181
Figura 49 - Perfis verticais de concentração (C^*) no plano de simetria ($y = 0$) - Caso E1.	182
Figura 50 - - Máximas concentrações (C^*) ao nível do solo para o caso D2 – as simulações não utilizaram o tratamento para a difusividade.	183
Figura 51 - Máximas concentrações (C^*) ao nível do solo para o caso D2 – as simulações utilizaram o tratamento para a difusividade próximo à fonte.	183
Figura 52 - Perfis verticais de concentração (C^*) no plano de simetria ($y = 0$) - Caso D2.	185
Figura 53 - Perfis verticais de concentração (C^*) no plano de simetria ($y = 0$) - Caso D2 (continuação).	186
Figura 54 - Máximas concentrações (C^*) ao nível do solo para o caso E2 – as simulações não utilizaram o tratamento para a difusividade.	186

- Figura 55 - Máximas concentrações (C^*) ao nível do solo para o caso E2 – as simulações utilizaram o tratamento para a difusividade próximo à fonte. 187
- Figura 56 - Perfis verticais de concentração (C^*) no plano de simetria ($y = 0$) - Caso E2. 188
- Figura 57 - Máximas concentrações (C^*) ao nível do solo para o caso D0 – as simulações não utilizaram o tratamento para a difusividade. 189
- Figura 58 - Máximas concentrações (C^*) ao nível do solo para o caso D0 – as simulações utilizaram o tratamento para a difusividade próximo à fonte. 190
- Figura 59 - Perfis verticais de concentração (C^*) no plano de simetria ($y = 0$) - Caso D0. 191
- Figura 60 - Perfis verticais de concentração (C^*) no plano de simetria ($y = 0$) - Caso D0 (continuação) 192
- Figura 61 - Máximas concentrações (C^*) ao nível do solo para o caso E0 – as simulações não utilizaram o tratamento para a difusividade. 192
- Figura 62 - Máximas concentrações (C^*) ao nível do solo para o caso E0 – as simulações utilizaram o tratamento para a difusividade próximo à fonte. 193
- Figura 63 - Perfis verticais de concentração (C^*) no plano de simetria ($y = 0$) - Caso E0. 194
- Figura 64 - Máximas concentrações ao nível do solo para o caso D1 normalizadas pelas correspondentes máximas concentrações ao nível do solo em terreno plano (caso D0) – as simulações não utilizaram o tratamento para a difusividade. 199
- Figura 65 – Máximas concentrações ao nível do solo para o caso D1 normalizadas pelas correspondentes máximas concentrações ao nível do solo em terreno plano (caso D0) – as simulações utilizaram o tratamento para a difusividade próximo à fonte. 200
- Figura 66 - Máximas concentrações ao nível do solo para o caso E1 normalizadas pelas correspondentes máximas concentrações ao nível do solo em terreno plano (caso E0) – as simulações não utilizaram o tratamento para a difusividade. 200
- Figura 67 - Máximas concentrações ao nível do solo para o caso E1 normalizadas pelas correspondentes máximas concentrações ao nível do solo em terreno

plano (caso E0) – as simulações utilizaram o tratamento para a difusividade.

201

Figura 68 - Perfis de velocidade (u) em diversas posições no plano de simetria ($y = 0$) calculados com KE-LP. As simulações reproduzem o caso E2 utilizando-se as malhas grosseira, intermediária e fina. 220

Figura 69 - Perfis de energia cinética turbulenta (k) em diversas posições no plano de simetria ($y = 0$) calculados com KE-LP – Caso E2. 221

Figura 70 - Perfis de velocidade (u) em diversas posições no plano de simetria ($y = 0$) calculados com TR-LP o modelo de tensões de Reynolds. As simulações reproduzem o caso E2 utilizando-se as malhas grosseira, intermediária e fina. 222

Figura 71 - Perfis de energia cinética turbulenta (k) em diversas posições no plano de simetria ($y = 0$) calculados com TR-LP – Caso E2. 223

Figura 72 – Perfis verticais de concentração normalizada C^* no plano $y = 0$, para as malhas grosseira, intermediária e fina. Os perfis foram calculados a partir da solução do escoamento obtida com KE-LP para o caso E2. 224

Figura 73 - Perfis verticais de concentração normalizada C^* no plano $y = 0$, para as malhas grosseira, intermediária e fina. Os perfis foram calculados a partir da solução do escoamento obtida com TR-LP para o caso E2. 225

Figura 74 - Perfis de velocidade (u) obtidos em diversas posições no plano de simetria ($y = 0$) calculados com o modelo $k - \varepsilon$ e o tratamento em duas camadas. Foram testadas três malhas distintas: a malha intermediária do escoamento acrescida de 10, 25 e 22 linhas respectivamente, na região próxima à parede. 227

Figura 75 - Perfis de energia cinética turbulenta (k) obtidos em diversas posições no plano de simetria ($y = 0$), calculados com o modelo $k - \varepsilon$ e o tratamento em duas camadas. Foram testadas três malhas distintas: a malha intermediária do escoamento acrescida de 10, 25 e 22 linhas respectivamente, na região próxima à parede. 228

Figura 76 - Perfis de concentração normalizada C^* em diversas posições no plano de simetria ($y = 0$), calculados utilizando-se a solução do escoamento

obtida com o modelo de tensões de Reynolds e o tratamento em duas camadas. Foram testadas três malhas distintas: a malha intermediária do escoamento acrescida de 10, 25 e 22 linhas respectivamente, na região próxima à parede.

229

Lista de tabelas

Tabela 1- Categorias de Estabilidade de Pasquill-Gifford (Seinfeld e Pandis, 1998 e Schnelle e Dey, 2000).	35
Tabela 2 – Relação entre o comprimento de Monin-Obukhov (L) e as condições de estabilidade.	38
Tabela 3 – Casos Investigados	116
Tabela 4 – Malhas computacionais investigadas	117

Lista de Símbolos

Nota: (*) indica que a unidade dimensional para a quantidade depende da propriedade ϕ

a_p, a_E, a_W	coeficientes das equações de discretização
c	concentração (kg/m^3)
C^*	concentração normalizada (m^{-2}) ou concentração adimensionalizada
c_p	calor específico a pressão constante ($J kg^{-1} s^{-1}$)
c_v	calor específico a volume constante ($J kg^{-1} s^{-1}$)
$c_\mu, c_{1\varepsilon}, c_{2\varepsilon}$	constantes do modelo $k - \varepsilon$ de turbulência
D_m	difusividade molecular ($m^2 s^{-1}$)
f	força de corpo ($N m^{-3}$)
g	módulo da aceleração gravitacional (ms^{-2})
G_k	produção da energia cinética turbulenta por efeitos de empuxo ($N m^{-2} s$)
h	entalpia específica ($J kg^{-1}$), altura do topo da colina (m), altura da linha de centro da pluma (m)
I	intensidade de radiação solar ($W m^{-2}$), intensidade de turbulência
k	condutividade térmica ($J m^{-1} K^{-1}$), energia cinética turbulenta ($m^2 s^{-2}$)
K	difusividade turbulenta (*)
l	comprimento de escala da turbulência, comprimento de mistura (m)
l_m	comprimento de mistura (m)

L	comprimento de Monin-Obukhov (m), escala de comprimento de turbulência (m)
m_i	fração mássica da espécie química i
M	massa molecular ($kg / kmol$)
p	pressão termodinâmica (Pa)
p_{atm}	pressão atmosférica (Pa)
Pr	número de Prandtl
P_k	termo de produção de turbulência ($N m^{-2} s$)
Q	intensidade da fonte emissora (kg / s)
q	fluxo de calor ($W m^{-2}$)
q_w	fluxo vertical de calor do solo ($W m^{-2}$)
r	distância radial (m)
\bar{R}	constante dos gases ideais ($J mol^{-1} K^{-1}$)
Ri	número de Richardson
Ri_f	número de Richardson fluxo
Re	número de Reynolds
Sc	número de Schimidt
S	termo fonte (*)
t	tempo (s)
T	temperatura (K)
u'_i	flutuações de velocidade na direção i (ms^{-1})
u_i	componente da velocidade na direção i (ms^{-1})
u', v', w'	flutuações de velocidade nas direções x, y , e z , respectivamente (ms^{-1})
u, v, w	componentes cartesianas da velocidade nas direções x, y , e z , respectivamente (ms^{-1})

u_*	velocidade de atrito, velocidade de fricção (ms^{-1})
u^*	velocidade adimensional
u^+	velocidade adimensional
x, y, z	direções do sistema cartesiano de coordenadas (m)
y	distância normal em relação à parede (m)
y^*	distância adimensional normal em relação à parede
y^+	distância adimensional normal em relação à parede
y_θ^*	espessura adimensional da sub-camada térmica
z_t	altura da topografia (m)
z_s	altura da emissão (m)
z_0	parâmetro de rugosidade do terreno (m)

Símbolos Gregos

β	coeficiente de expansão térmica (K^{-1})
δ_{pl}	fração considerada na definição da largura da pluma
δ_{ij}	operador delta de Kroenecker
ε	taxa de dissipação da energia cinética turbulenta (m^2s^{-3})
Γ	taxa de lapso adiabático ($K m^{-1}$), coeficiente de difusão (*), função de ponderação
θ	temperatura potencial (K)
γ	difusividade turbulenta (*)
κ	constante de Von Karman
λ	direção coordenada binormal
λ_ε	função de ponderação
μ	viscosidade molecular ($N s m^{-2}$)
μ_t	viscosidade turbulenta ($N s m^{-2}$)

η	direção coordenada normal
ν	viscosidade cinemática ($m^2 s^{-2}$)
ρ	densidade (kg / m^3)
σ_t	número de Prandtl turbulento
σ_y, σ_z	coeficientes de dispersão lateral e vertical (m)
σ_s	número de Schmidt turbulento
$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$	constantes empíricas no modelo $k - \varepsilon$ de turbulência
τ	direção coordenada tangencial
τ_w	tensão de cisalhamento na parede ($N m^{-2}$)
ε	taxa de dissipação de energia cinética turbulenta ($m^2 s^{-3}$)
ϕ	propriedade genérica (*)

Subscritos

i, j, k	notação indicial
e	valor de equilíbrio
eff	efetiva
o	valor de referência
∞	valor na corrente livre
y	a direção normal à parede
P, E, W	pontos da malha
p	relativo ao ponto p
nb	vizinho
t	turbulento

Sobrescritos

'	flutuações turbulentas
-	valores médio-temporais
~	desvio em relação ao estado de equilíbrio