5
Estudo da Dispersão sobre Topografias Complexas em Escala Reduzida

Neste capítulo são realizadas investigações computacionais do escoamento e da dispersão de poluentes sobre topografias complexas correspondendo a colinas tridimensionais em escala de laboratório. Os resultados relativos às modelagens numéricas investigadas são comparados entre si e também a dados experimentais obtidos em túnel de vento, disponíveis na literatura (Ohba, R., apud Boçon, 1998). Primeiramente, são descritos diversos aspectos do experimento em túnel de vento e das simulações computacionais realizadas. Em seguida são apresentados resultados relativos às simulações do escoamento. Por fim, são apresentados os resultados obtidos para as concentrações.

5.1.
Experimento em Túnel de Vento

Serão apresentados aqui alguns dos aspectos mais importantes relativos ao experimento em túnel de vento. Maiores detalhes do experimento estão descritos em (Ohba, R., apud Boçon, 1998).

Os experimentos foram realizados no túnel de vento do Research Institute of Mitsubishi Heavy Industries, em Nagasaki – Japão. Os resultados das medições feitas foram reportados num relatório interno da empresa, datado de março de 1992, segundo Boçon (1998). É um túnel de vento do tipo sucção, tem 1m de altura por 2,5m de largura e 19,5m de comprimento. A seção de testes tem 10m e é isolada termicamente. O túnel tem uma seção de aquecimento na entrada e painéis de resfriamento no chão da seção de testes (o modelo do terreno é em alumínio) para produzir um escoamento estratificado. O gás traçador (metano) é introduzido por um tubo fonte. A temperatura foi medida com termopares e a velocidade com anemômetro de fio quente ou com um medidor tipo "photo-fiber Laser doppler". O

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

traçador foi analisado por cromatografia a gás. A figura abaixo apresenta um esquema do túnel de vento utilizado nos experimentos do Research Institute of Mitsubishi Heavy Industries.

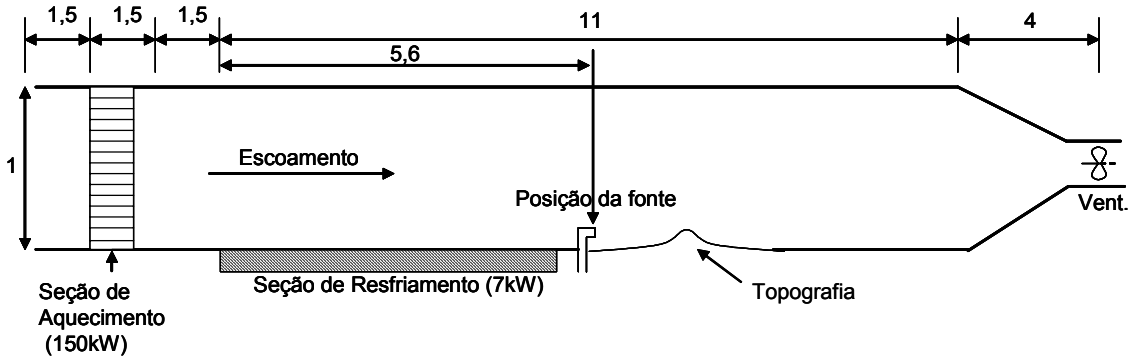


Figura 1 – Vista esquemática lateral do túnel de vento (Boçon, 1998). Obs: as medidas estão em metros.

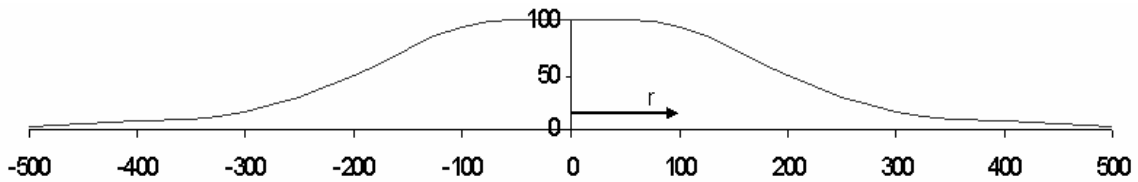
PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

5.2. Configuração das Simulações

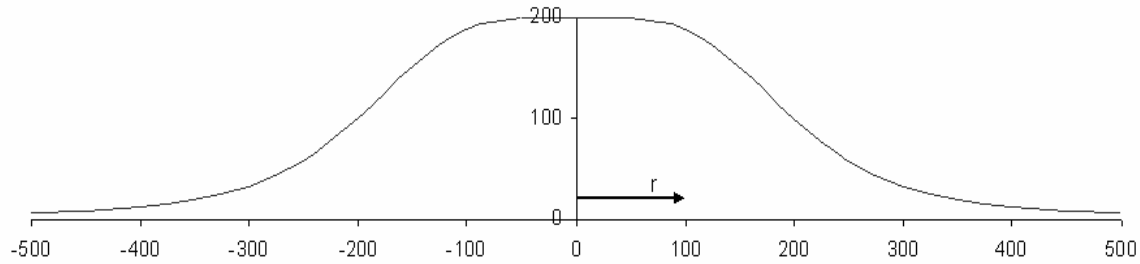
Na presente investigação procurou-se simular as condições dos experimentos realizados em túnel de vento. Nestes, foram realizados experimentos de dispersão em escoamentos neutros e estavelmente estratificados sobre três configurações de terreno: plano, colina de 100mm e colina de 200mm de altura máxima. A representação da colina, axisimétrica, foi obtida através da utilização do seguinte perfil:

$$z_t(r) = \frac{h}{1+\left(r/200\right)^4} \tag{5.1}$$

onde h corresponde à altura máxima da colina, z_t é a altura da topografia e r é a distância horizontal a partir do centro. A figura 2 apresenta os perfis utilizados na modelagem das colinas.



(a)



(b)

Figura 2 – Perfis utilizados para a representação das colinas: (a) com altura máxima igual a $100mm$ e (b) com altura máxima igual a $200mm$.

Foram realizadas no presente trabalho simulações computacionais para as três topografias distintas mencionadas acima (terreno plano, colina baixa e colina alta). Para cada topografia foram realizadas simulações em condições de estabilidade neutra e estável. A letra D é relativa aos casos de estabilidade neutra e a letra E refere-se aos casos estáveis. Após a letra (D ou E) é colocado o número 0, 1 ou 2 que define a topografia investigada. A tabela 3 apresenta as características das simulações que procuram reproduzir os experimentos realizados em túnel de vento. A velocidade U_∞ é uma velocidade de referência, que é aproximadamente a velocidade medida no escoamento fora da camada limite. $\Delta\theta$ é a diferença entre a temperatura potencial no solo (θ_0) e a temperatura potencial no escoamento fora da camada limite (θ_∞). A grandeza z_s representa a altura da emissão do poluente e h é a altura do topo da colina.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

Tabela 3 – Casos Investigados

CASO	ESTABILIDADE	$h\ (mm)$	$U_\infty (m/s)$	$(\Delta\theta)$ (ºC)	$z_s (mm)$
D0	D	0	1,0	0	50
D1	D	100	1,0	0	50
D2	D	200	1,0	0	100
E0	E	0	1,0	20	50
E1	E	100	1,0	20	50
E2	E	200	1,0	20	100

O valor do número de Reynolds calculado para a situação de montanha baixa ($h = 100mm$) é $\mathrm{Re} = 6,7 \times 10^3$. Para os casos de montanha alta ($h = 200mm$) $\mathrm{Re} = 1,3 \times 10^4$.

A figura abaixo apresenta o esquema utilizado para as simulações. Nela pode-se notar o escoamento imposto na entrada do domínio computacional e 500mm a montante do topo da colina está posicionada a injeção do poluente.

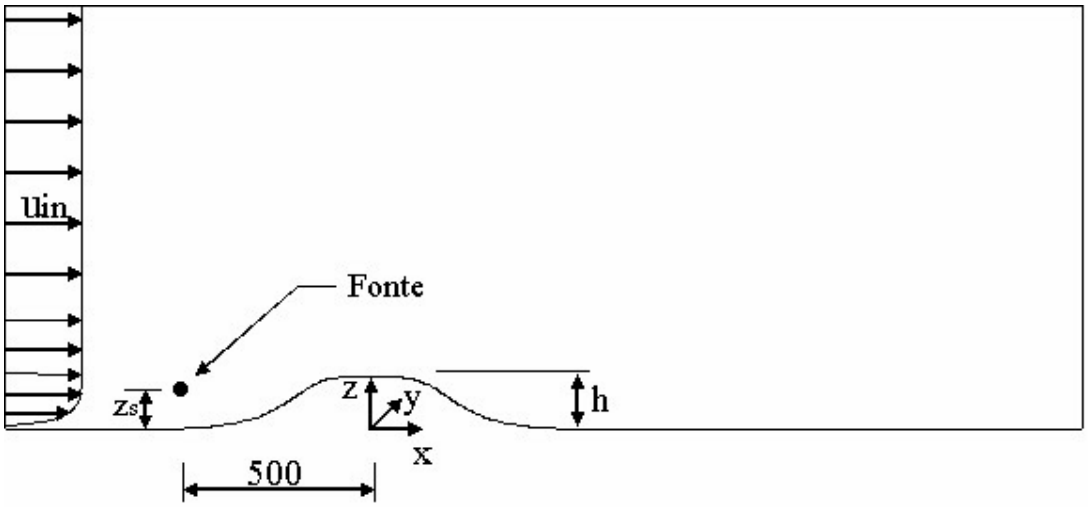


Figura 3 – Esquema da Simulação.

Como o problema é simétrico em relação ao plano $y = 0$, apenas uma metade $(y > 0)$ do problema real foi simulada. Foram utilizadas malhas computacionais

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

distintas para a simulação do escoamento e da concentração. Dessa forma foi possível empregar a distribuição de volumes mais adequada para captar os gradientes característicos de cada situação. Todas as malhas são estruturadas e foram geradas com o software Gambit (versão 2.0.1).

No teste de malha, cujos resultados são apresentados no Apêndice A, foram obtidas soluções em três malhas distintas, com diferentes graus de refinamento, tanto no estudo do escoamento como no da concentração. Essas malhas foram denominadas como grosseira, intermediária e fina. Foi utilizado o fator 1,5 no aumento do número de volumes de controle em cada direção ao passar-se da malha grosseira para a intermediária e da intermediária para a fina.

Na simulação da concentração somente é resolvida uma equação diferencial, a equação de transporte do poluente (equação (4.6)). Já na solução do escoamento são resolvidas diversas equações diferenciais, de forma que é de se esperar que na simulação da concentração se utilize muito menos memória e tempo de processamento do que no escoamento. Assim foi possível se utilizar malhas muito mais refinadas no estudo da concentração do que na solução do escoamento. A tabela 4 apresenta informações sobre as malhas utilizadas.

Tabela 4 – Malhas computacionais investigadas

	Escoamento		Concentração	
	NX x NY x NZ	Total	NX x NY x NZ	Total
Grosseira	42 x 18 x 18	13608	64 x 32 x 32	65536
Intermediária	63 x 27 x 27	45927	96 x 48 x 48	221184
Fina	95 x 41 x 41	159695	144 x 72 x 72	663552

As figuras 4,5 e 6 apresentam a malha intermediária empregada na solução do escoamento para os casos de colina baixa, D1 e E1. A direção x corresponde à direção principal do escoamento, a direção y é transversal e a direção z é a direção vertical. A origem do sistema de coordenadas (0,0,0) está posicionada no centro da colina conforme a figura.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

O domínio computacional utilizado nas soluções do escoamento tem as dimensões de $2500 \times 1000 \times 1000\, mm$ nas direções x, y e z respectivamente. Na direção longitudinal a malha varia segundo uma progressão geométrica a montante e a jusante da colina. Na região correspondendo à colina, a malha é igualmente espaçada. Também na direção transversal, a malha é igualmente espaçada na região correspondendo à colina e varia conforme uma progressão geométrica na região além da colina. Na direção vertical a malha varia segundo uma progressão geométrica.

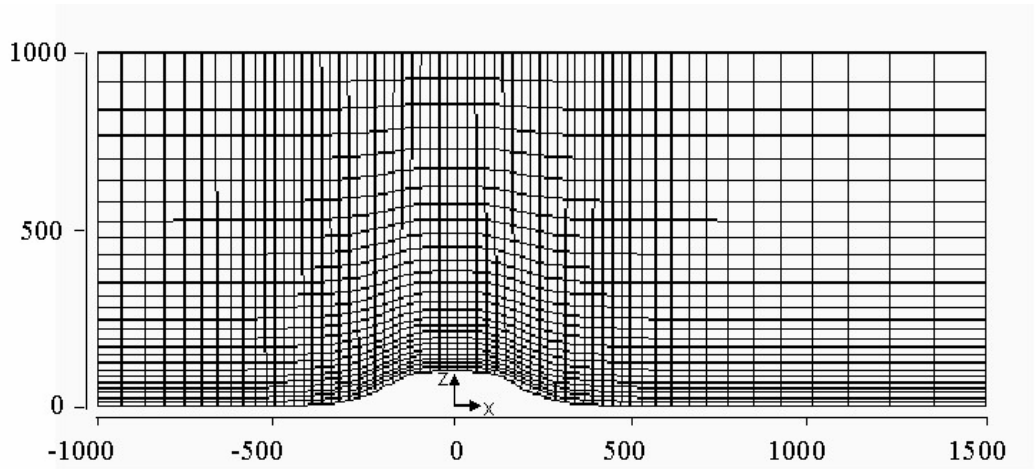


Figura 4 – Malha para simulação do escoamento (vista lateral).

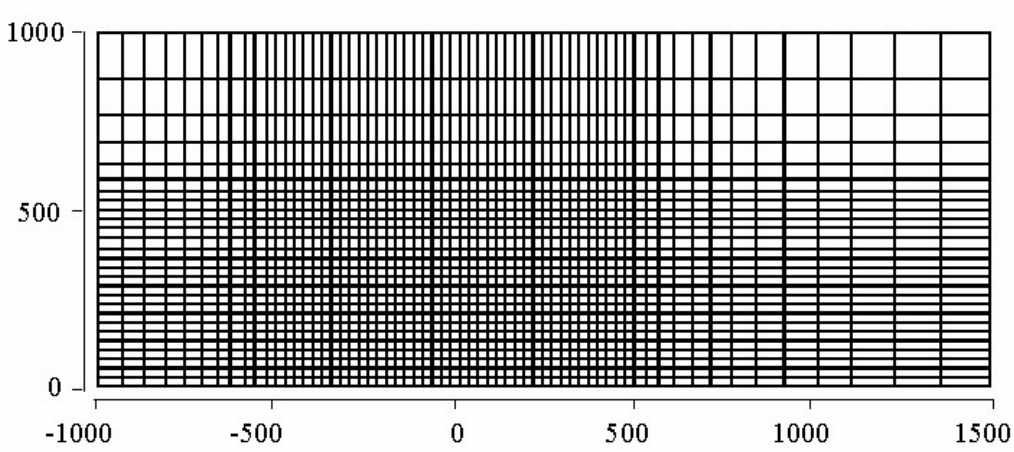


Figura 5 - Malha para simulação do escoamento (vista superior)

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

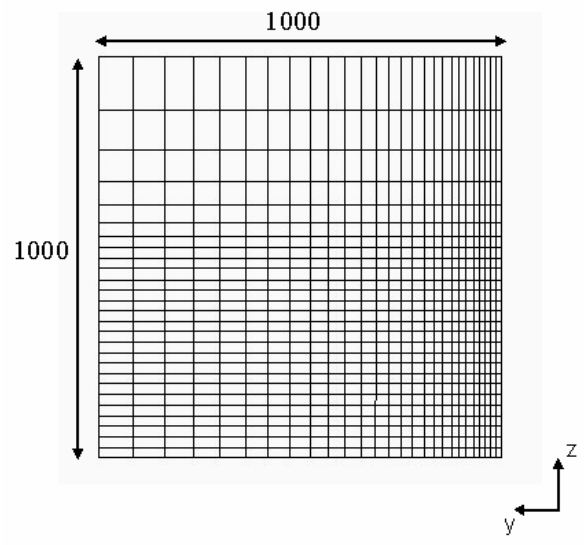


Figura 6 - Malha para simulação do escoamento (vista frontal – plano $x = -1000mm$)

As figuras 7 e 8 apresentam a malha intermediária utilizada para os cálculos de concentração. O domínio computacional utilizado para as soluções das concentrações tem dimensões de $2000 \times 500 \times 500mm$ nas direções x, y e z respectivamente. As dimensões são menores do que aquelas relativas às malhas do escoamento, já que a região de interesse para as concentrações é menor do que a necessária para os cálculos do escoamento. A fonte está posicionada $500mm$ a montante da colina e a z_s mm do solo $(x = -500,\ y = 0,\ z = z_s)$. Para a injeção do poluente foi definida na posição da fonte uma seção retangular de $0{,}75\,mm$ na direção y e $1{,}5\,mm$ na direção z. A malha possui maior refinamento na região próxima à fonte e também próxima ao solo onde ocorrem os maiores gradientes de concentração.

A figura 9 apresenta a topografia da colina alta, tal como discretizada pela malha fina do escoamento.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

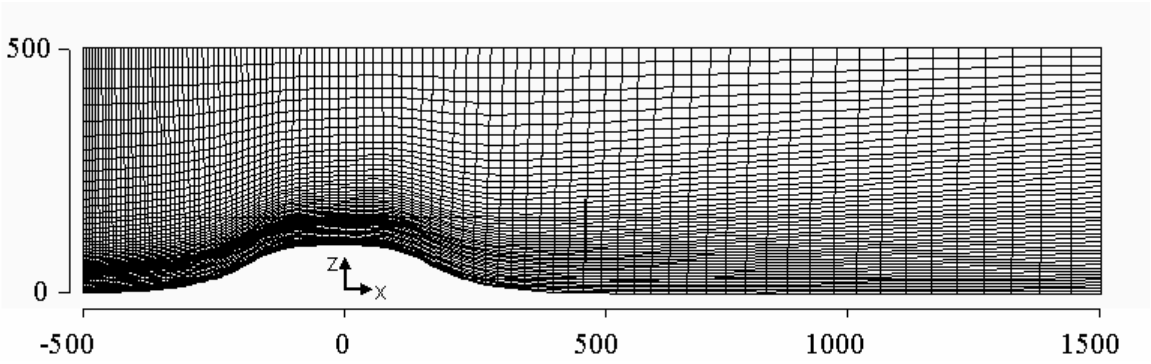


Figura 7 - Malha para a concentração (vista lateral)

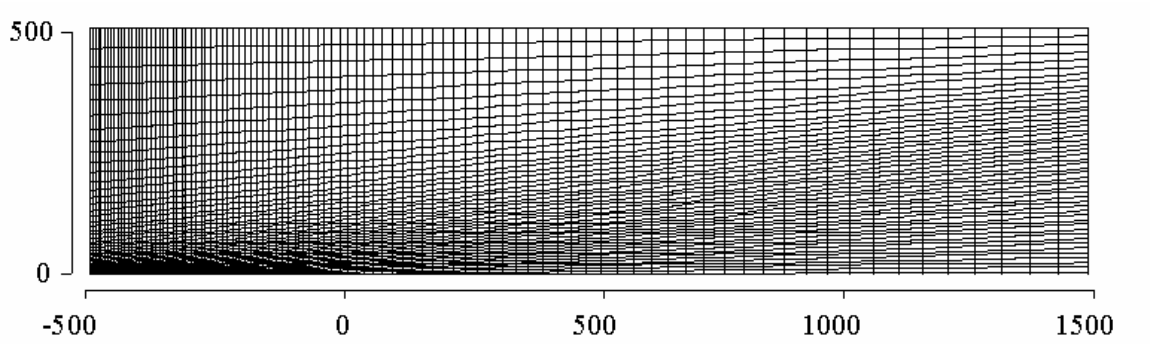


Figura 8 - Malha para concentração (vista superior)

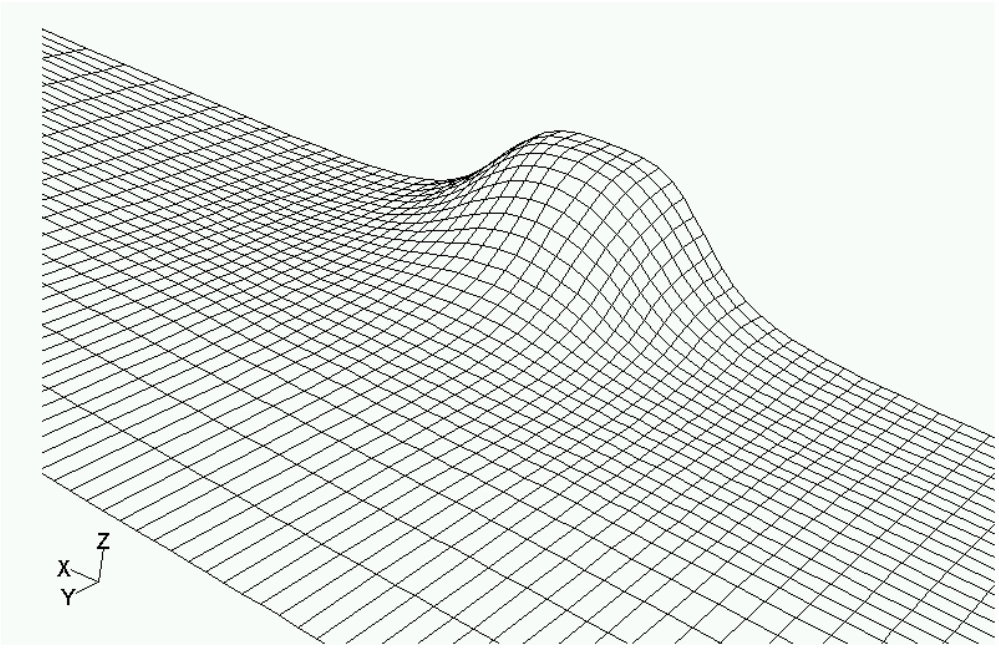


Figura 9 – Topografia discretizada da colina alta.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

Os resultados correspondentes ao teste de malha estão apresentados no Apêndice A. De maneira geral, o teste de malha mostrou que houve pouca variação nos resultados obtidos pelas diferentes malhas computacionais (grosseira, fina e intermediária). Levando em consideração o tempo para a obtenção das soluções com as diferentes malhas, mas também objetivando a qualidade dos resultados, definimos que as malhas intermediárias (escoamento e concentração) seriam aquelas a serem empregadas nas investigações computacionais que se seguem.

Para as simulações em que se empregou o tratamento em duas camadas foram acrescentados mais volumes de controle na direção vertical (direção z) próximo à parede, promovendo-se um maior refinamento da malha nesta região. Foram realizados testes para se investigar o número de linhas a serem acrescentadas nessa região (ver Apêndice A) e, finalmente, chegou-se à conclusão que o acréscimo de 15 linhas seria razoável. Dessa forma, nas investigações computacionais em que foi empregado o tratamento em duas camadas, foram utilizadas as malhas intermediárias (escoamento e concentração) como base, acrescidas de 15 linhas na região junto à parede (em uma distância de até $3mm$ na direção z em relação à parede).

Assim, a malha utilizada para os cálculos do escoamento, quando empregado o tratamento em duas camadas, corresponde a $63 \times 27 \times 42$ volumes de controle nas direções x, y e z respectivamente, totalizando 71442 células. Para a concentração, a malha utilizada corresponde a $96 \times 48 \times 63 = 290304$ volumes de controle.

No procedimento utilizado nas investigações computacionais, a solução obtida para o escoamento foi interpolada para a malha de concentração. Neste domínio, somente a equação de transporte do poluente foi resolvida.

5.2.1. Condições de Contorno

5.2.1.1. Fronteira de Entrada

Para o escoamento, foram prescritos perfis de entrada para a velocidade, temperatura potencial (θ), energia cinética turbulenta (k), dissipação de energia

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

cinética turbulenta (ε), e Tensões de Reynolds (quando empregando o modelo de tensões de Reynolds). Os perfis de u, k e θ, definidos a partir de dados obtidos através de medições em túnel de vento, foram extraídos de Ohba, R., apud Boçon (1998) e estão apresentados nas figuras 11 e 12. Para a definição de θ, considerou-se que $T = \theta$ conforme explicado na seção 4.1.3. As figuras a seguir apresentam os perfis de u, k e θ utilizados nas simulações. De acordo com Boçon (1998), com relação aos resultados experimentais obtidos pelo instituto de pesquisas da Mitsubishi Heavy Industries, não há informações sobre a banda de erro associada às incertezas de medição.

Como não foram realizadas medições da taxa de dissipação (ε), o seu perfil na entrada foi prescrito em função do comprimento de escala da turbulência (l). Para os casos neutros (D) foi utilizado (Boçon, 1998):

$$l_{entrada} = \kappa z \tag{5.2}$$

onde κ é a constante de Von Karman.

Para as situações em que a atmosfera apresenta estratificação estável o comprimento de escala é limitado a um valor máximo devido a essa estratificação. O comprimento de escala pode então ser escrito como (Boçon, 1998):

$$l_{entrada} = \left(\frac{1}{\kappa z} + \frac{1}{l_{\max}} \right)^{-1} = \frac{\kappa z}{1 + \dfrac{\kappa z}{l_{\max}}} \tag{5.3}$$

De acordo com a teoria da similaridade de Monin-Obukhov para a camada superficial, a viscosidade turbulenta é escrita como (Panofsky e Dutton, 1984)

$$\nu_t = \frac{\kappa u_* z}{\phi_m} \tag{5.4}$$

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

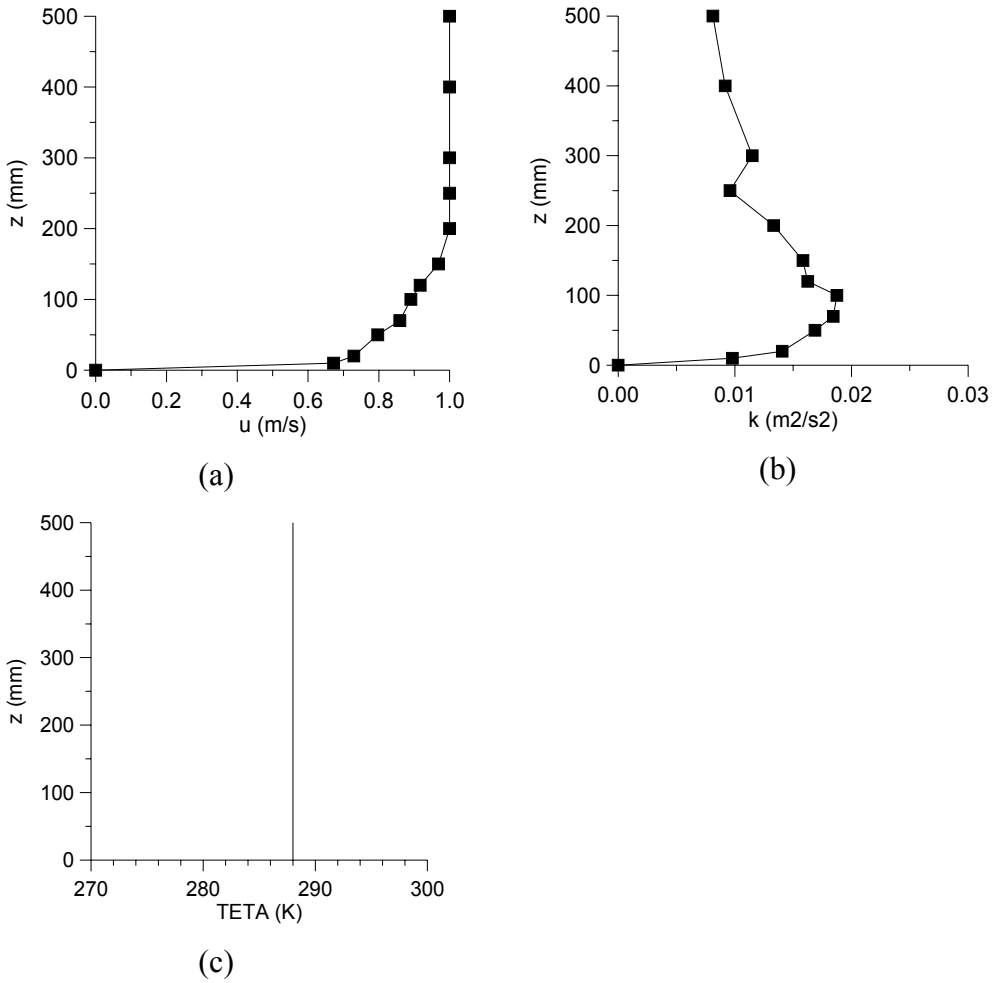


Figura 10 – Perfis de (a) velocidade u (m/s), (b) energia cinética turbulenta k (m2/s2) e (c) temperatura potencial θ (K) para a fronteira de entrada nos casos neutros (Ohba, R., apud Boçon, 1998).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

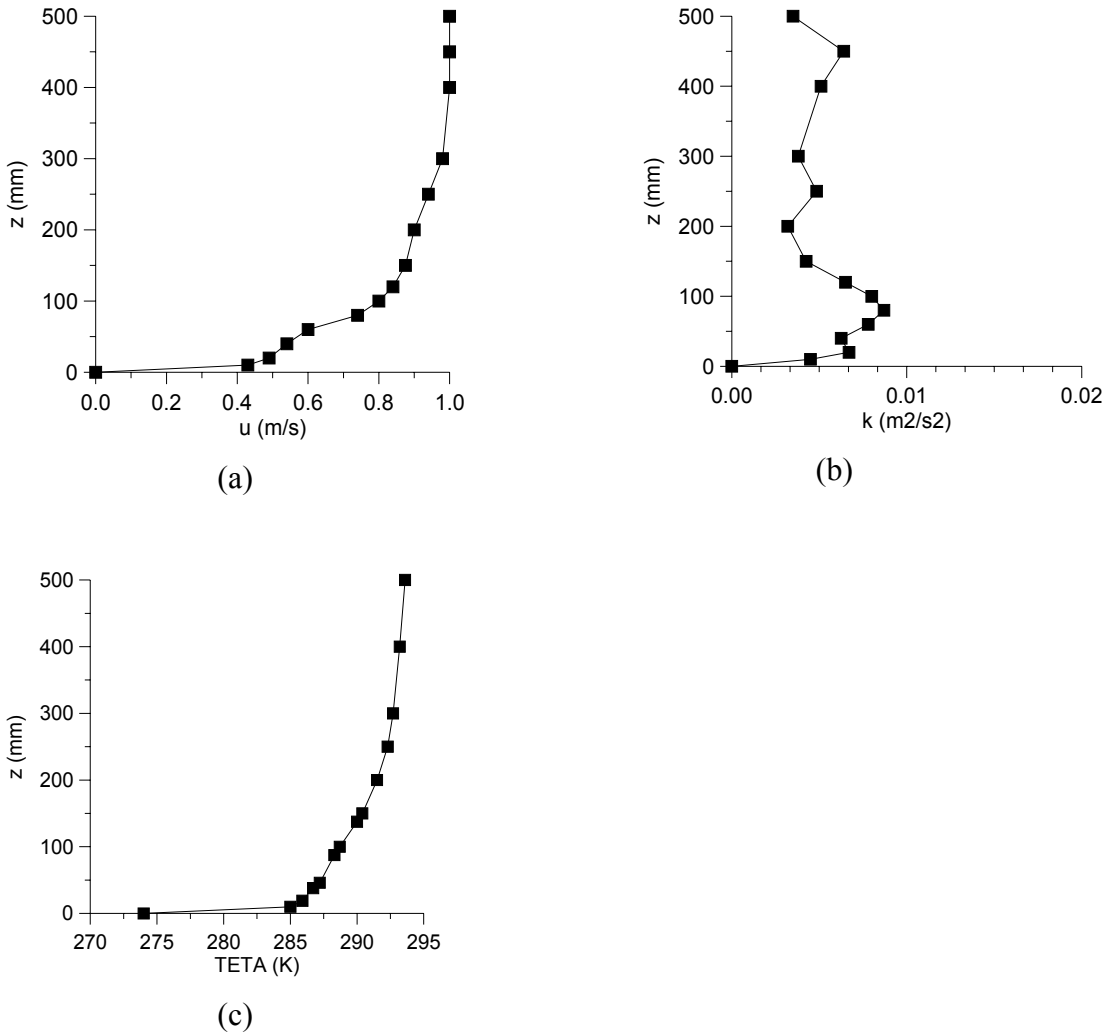


Figura 11 - Perfis de (a) velocidade u (m/s), (b) energia cinética turbulenta k (m2/s2) e (c) temperatura potencial θ (K) para a fronteira de entrada nos casos estáveis (Ohba, R., apud Boçon, 1998).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

onde ϕ_m é uma função de z e L. O comprimento de escala da turbulência é (tomando ϕ_m para condições estáveis)

$$l_{entrada} = \frac{\kappa z}{1 + \frac{5z}{L}} \tag{5.5}$$

Comparando (5.5) com (5.3) obtém-se uma expressão para o comprimento de escala na entrada do escoamento.

$$l_{entrada} = \frac{\kappa z}{1 + \frac{\kappa z}{0,084L}} \tag{5.6}$$

Utilizando o valor médio de $L = 0,13m$, estimado em Boçon (1998) para os casos estáveis através dos dados experimentais, tem-se a expressão para o comprimento de escala de turbulência (l) para os casos estáveis.

Quando utilizado o modelo de tensões de Reynolds para a turbulência, na ausência de dados experimentais para o valor das tensões de Reynolds na entrada, estas foram definidas assumindo-se isotropia da turbulência:

$$\overline{u_i'^2} = \frac{2}{3}k \tag{5.7}$$

$$\overline{u_i' u_j'} = 0 \tag{5.8}$$

onde $\overline{u_i'^2}$ é a componente normal das tensões de Reynolds em cada direção.

Considerando que as condições de anisotropia na turbulência tendem a intensificar-se na medida em que as condições de estabilidade atmosférica afastam-se

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

da situação neutra, entende-se que esta aproximação (isotropia da turbulência na entrada do escoamento) é menos adequada nos casos em que foram simuladas condições estáveis do que naqueles neutros.

No domínio correspondente a malha para a concentração, a condição de contorno na fronteira de entrada utilizada foi a prescrição da fração mássica $c_{entrada}$ de poluente na face da célula que representa a injeção, de forma a se estabelecer o valor da fonte Q (kg/s) de poluente. Nas demais faces da fronteira de entrada, que não representavam a injeção do poluente, foi utilizado $c_{entrada} = 0$.

5.2.1.2.
Fronteira Inferior

A fronteira inferior foi considerada como parede impermeável. O tratamento da turbulência próximo à parede foi considerado por duas diferentes abordagens: a lei logarítmica da parede (seção 4.1.7.1) e o tratamento em duas camadas (seção 4.1.7.2). A temperatura potencial da parede inferior foi fixada em 274 K para os casos estáveis.

Com relação à concentração, considerou-se que o gradiente de concentração junto à parede é igual a zero, ou seja, a parede não absorve o poluente.

$$\frac{\partial c}{\partial z} = 0 \tag{5.9}$$

5.2.1.3.
Fronteiras Lateral e Superior

Nas superfícies lateral e superior foi assumido que o escoamento próximo a essas fronteiras não é perturbado pela presença da colina. Para isso tomou-se o cuidado de posicionar as fronteiras distantes o bastante da colina para assegurar essa condição de não perturbação.

Desta forma foi implementada a condição de fluxo normal à fronteira nulo para todas as quantidades ϕ (onde $\phi = u, w, \theta, \varepsilon$, tensões de Reynolds quando utilizando o

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

modelo de tensões de Reynolds e c quando tratar-se da malha para a concentração). Assim, tem-se para a parede lateral:

$$\frac{\partial \phi}{\partial y} = 0 \text{ e } v = 0 \tag{5.10}$$

e para a fronteira superior

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \qquad \text{e } w = 0 \tag{5.11}$$

De modo semelhante, considerou-se nulo em tais fronteiras o fluxo de massa do poluente.

5.2.1.4.
Fronteira de Simetria

Na fronteira de simetria $(y = 0)$ tem-se que

$$\frac{\partial \phi}{\partial y} = 0 \qquad \text{e } v = 0 \tag{5.12}$$

5.2.1.5.
Fronteira de Saída

Na fronteira de saída considerou-se a condição de escoamento totalmente desenvolvido. Desta forma, os fluxos difusivos normais a esta são considerados nulos para todas as variáveis.

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \tag{5.13}$$

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

5.2.2.
Casos Investigados – Nomenclatura

5.2.2.1.
Escoamento

Quatro diferentes combinações de modelos de turbulência e tratamentos da turbulência na região da parede foram definidos para teste e investigação:

- KE-LP é a combinação que inclui o modelo $k-\varepsilon$ de turbulência e a lei logarítmica da parede.
- TR-LP é a combinação que inclui o modelo de tensões de Reynolds para turbulência e a lei logarítmica da parede.
- KE-2C é a combinação que inclui o modelo $k-\varepsilon$ de turbulência e o modelo de duas camadas para o tratamento da turbulência na região próxima à parede.
- TR-2C é a combinação que inclui o modelo de tensões de Reynolds para a turbulência e o modelo de duas camadas para o tratamento da turbulência na região próxima à parede.

5.2.2.2.
Concentração

Para o cálculo do campo de concentrações, a solução do escoamento foi interpolada da malha utilizada para a solução do escoamento para a malha de concentração. Neste domínio computacional, somente a equação de transporte do poluente (equação (4.6)) foi resolvida, alimentada pela solução do escoamento. Desta forma, a seguinte nomenclatura: KE-LP, TR-LP, KE-2C e TR-2C, quando utilizada na etapa de cálculo das concentrações, define qual o campo de escoamento originalmente empregado para o calculo das concentrações.

Para fins de comparação com os dados experimentais (cujos resultados foram apresentados na forma a seguir), a concentração calculada C (kg/m^3) foi transformada em

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

$$C^* = \frac{U_\infty C}{Q} \quad (m^{-2}) \tag{5.14}$$

onde Q é a intensidade da fonte (kg/s).

5.2.3.
Tratamento para a Difusividade Turbulenta na Região próxima à Fonte

Em Seinfeld e Pandis (1998) (Capítulo 17) é apresentada uma análise das condições necessárias para a validade de modelos de difusividade turbulenta de massa (teoria K) na dispersão de poluentes na atmosfera. Entre as condições citadas, temos que a escala de comprimento característico e a escala de tempo para variações no campo de concentração média devem ser grandes comparadas com as escalas correspondentes para o transporte turbulento. Ainda segundo os autores, como a escala de tempo e a escala de comprimento dos vórtices na atmosfera são freqüentemente grandes, tais condições são violadas na região próxima a fontes isoladas.

Baseando-se na análise apresentada por Seinfeld e Pandis (1998) pode se analisar o problema da difusão turbulenta de concentração de forma análoga à difusividade turbulenta de quantidade de movimento. Como foi apresentado na seção 2.2.1.2.2. Prandtl imaginou para o escoamento turbulento ao longo da parede porções de fluido que se juntam e movimentam-se através de um determinado comprimento l_m sem alterar sua quantidade de movimento na direção do escoamento principal. Portanto, espera-se que o comprimento l_m tenha dimensões pequenas quando comparadas às dimensões das variações de quantidade de movimento do escoamento médio.

Através de uma analogia com a abordagem para o problema da quantidade de movimento apresentada acima, para o problema da difusão turbulenta de poluente a hipótese do comprimento de mistura de Prandtl assume que porções de fluido movimentam-se através de um comprimento l_c sem alterar sua concentração. Dessa

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

forma, o comprimento l_c tem dimensões pequenas quando comparadas às dimensões das variações de concentração média no escoamento L_c.

Segundo Seinfeld e Pandis (1998), a flutuação de concentração em um ponto P deve-se à chegada neste ponto de um vórtice originado em algum outro local onde a concentração média era diferente daquela em P. Assim a expressão para a flutuação de concentração c' pode ser escrita como:

$$c' \propto l_c \frac{\partial c}{\partial z} \tag{5.15}$$

de forma análoga à expressão (2.39) utilizada para o problema da quantidade de movimento.

A dimensão das variações de concentração média L_c em uma pluma pode ser definida como a dimensão, por exemplo, da largura da pluma. Próximo à fonte do poluente as dimensões da largura da pluma são pequenas e podem ser da mesma ordem de magnitude das dimensões do comprimento de mistura nesta região. Considerando que a difusividade turbulenta de massa K é calculada a partir da viscosidade turbulenta como:

$$K = \frac{\nu_t}{Sc_t} \tag{5.16}$$

a hipótese de que $l_c < L_c$ não é satisfeita na região próxima à fonte e a dispersão turbulenta pode ser superestimada próxima à fonte do poluente.

Nos trabalhos de Apsley (1995) e Boçon (1998) foram utilizados tratamentos especiais para se descrever a dispersão da pluma na região próxima a uma fonte pontual. Apsley (1995) afirma que, sendo a dimensão da pluma inicialmente pequena em relação ao tamanho dos vórtices turbulentos, algumas questões fundamentais seriam levantadas sobre a validade da hipótese de fluxo-gradiente para a concentração. Estas questões, segundo o autor, são discutidas no trabalho de Pasquill

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

e Smith (1983). Para superar estas dificuldades o autor utilizou o método de definir um domínio analítico para especificar diretamente as concentrações próximas à fonte.

O método de definir-se um domínio analítico permite a utilização de uma malha computacional mais grosseira através do emprego da solução exata de uma equação de advecção-difusão com coeficientes constantes para especificar analiticamente as concentrações em um domínio local ao redor da fonte.

Em Boçon (1998), foi relatado que os resultados iniciais calculados para as concentrações indicavam uma tendência dos modelos numéricos utilizados em promover uma exagerada dispersão da pluma no estágio inicial do seu desenvolvimento, quando (a pluma) está próxima à fonte e possui dimensões menores. De acordo com o autor, a elevada dispersão da pluma prevista numericamente ocorria em ambas as direções (vertical e transversal). Com o propósito de efetuar uma calibração do modelo de dispersão foram realizadas simulações alterando-se o número de Schmidt turbulento. Porém os resultados mostraram que $Sc_t = 0,5$ era o valor adequado e que deveria ser realizada uma outra análise com relação à exagerada dispersão inicial da pluma numérica.

Nos estágios iniciais da pluma, o comprimento de escala característico dos vórtices turbulentos é maior que a dimensão da pluma. Além disso, os gradientes de concentração são significativamente maiores que os gradientes de quantidade de movimento e energia, cujos campos já se encontram bem desenvolvidos. Segundo Boçon (1998), os vórtices não devem promover sobre a massa que inicia sua dispersão a mesma difusão turbulenta que ocorre com quantidade de movimento e energia. Assim, o autor considerou que o comprimento de escala a ser aplicado na determinação das difusividades turbulentas de massa devia ser apropriadamente reduzido para o estágio inicial de dispersão da pluma, de acordo com as dimensões locais desta.

Baseado numa distribuição gaussiana da pluma próxima a fonte, como uma primeira investigação, as difusividades turbulentas obtidas pela solução do escoamento foram linearmente reduzidas para serem aplicadas no cálculo da concentração. Isto é equivalente a reduzir (também linearmente) o comprimento de escala turbulento.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

O entendimento do fenômeno da dispersão turbulenta requer a definição da largura da pluma. Panofsky e Dutton (1984) definem a largura da pluma em uma dada direção (vertical ou transversal) como sendo a distância do centro da pluma ao ponto em que a concentração é igual a 10% de seu valor máximo (no centro da pluma). Esta definição é a usualmente adotada na literatura, e através dela 95% da massa da pluma estão dentro dos limites de sua dimensão, supondo-se uma distribuição gaussiana.

O procedimento para a redução das difusividades turbulentas próximas à fonte consiste em tomar o valor da difusividade na posição da emissão, a partir da solução do escoamento, e aplicá-lo no modelo de pluma gaussiana para dispersão de fonte pontual. Assim, consegue-se determinar a que distância do ponto de emissão a largura da pluma é comparável ao comprimento de escala local da turbulência (também tomado na posição da fonte). Na equação de dispersão gaussiana, iguala-se a largura da pluma ao comprimento de escala da turbulência multiplicado por um fator a ser determinado (α).

Da equação da dispersão gaussiana (2.108) tem-se para a direção lateral (Boçon, 1998)

$$\exp\left(\frac{-uy^2}{4K_y x}\right) = \delta_{pl} \tag{5.17}$$

onde $\delta_{pl} = 0{,}1$ é a fração considerada na definição da dimensão da pluma (10%) e K_y é tomado na posição da fonte (no referido trabalho foram consideradas diferentes difusividades para as direções horizontais (K_x e K_y) e vertical (K_z)). Relacionando a largura da pluma (y em (5.17)) ao comprimento de escala da turbulência linearmente por

$$y = \alpha l \tag{5.18}$$

e resolvendo (5.17) para a distância da fonte (x) tem-se

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

$$x_{\text{mod}} = \frac{-u}{4K_y \ln \delta_{pl}} (\alpha l)^2 \tag{5.19}$$

onde u é a velocidade na posição da fonte e

$$l = C_\mu^{3/4} \frac{k^{3/2}}{\varepsilon} \tag{5.20}$$

A partir da fonte até a distância dada por (5.19) a difusividade é modificada por

$$\left(K_y\right)_{\text{mod}} = \frac{x}{x_{\text{mod}}} K_y \tag{5.21}$$

Procedimento similar foi adotado para a difusividade turbulenta vertical.

O valor do coeficiente α foi determinado empiricamente através da comparação dos resultados numéricos com os valores experimentais. Foi constatado que $\alpha \approx 5$ foi adequado para todos os casos de túnel de vento estudados.

No presente trabalho, já em nossos primeiros testes percebemos que o problema da exagerada dispersão nos estágios iniciais da pluma também aparecia em nossos resultados. Assim, decidimos realizar simulações utilizando um tratamento especial para a difusividade na região próxima à fonte e comparar com simulações sem a utilização do tratamento especial. Optamos por utilizar um tratamento semelhante àquele proposto por Boçon (1998) porque, além de ter produzido bons resultados no referido trabalho, os detalhes da formulação empregada estavam disponibilizados na literatura. Sua implementação no presente trabalho foi possível através da elaboração de uma rotina definida pelo usuário (UDF – User Defined Function) no software Fluent.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

A formulação apresentada foi empregada no presente trabalho, com a diferença de que na modelagem utilizada para a dispersão do poluente consideramos o mesmo valor para a difusividade turbulenta em todas as direções. Portanto, consideramos que

$$K_x = K_y = K_z = \frac{\mu_t}{Sc_t} \tag{5.22}$$

e

$$\left(K_x\right)_{\text{mod}} = \left(K_y\right)_{\text{mod}} = \left(K_z\right)_{\text{mod}} \tag{5.23}$$

O valor da difusividade modificada é então utilizado na equação (4.6) até a distância dada por (5.19).

5.2.4.
Equações Governantes

As equações governantes para o problema investigado neste capítulo são as equações de conservação de massa (4.1), quantidade de movimento (4.2), energia (4.4) e transporte de espécie química (4.6) apresentadas no capítulo 4. As equações de transporte de k e ε são, respectivamente, as equações (4.11) e (4.12). Ao utilizar o modelo de tensões de Reynolds, as tensões de Reynolds foram obtidas das suas equações de transporte (4.15).

5.3.
Resultados

5.3.1.
Resultados – Escoamento

É primeiramente apresentada e discutida a solução do escoamento para depois dedicar-se atenção aos resultados de concentração. São comparados nesta seção os

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

resultados numéricos de velocidade (u) e energia cinética turbulenta (k) obtidos com as diversas combinações de modelos apresentadas anteriormente (seção 5.2.2) e valores experimentais medidos em túnel de vento (Ohba, R., apud Boçon, 1998).

A figura 12 representa perfis da componente horizontal da velocidade u em diversas posições x ao longo do eixo de simetria $(y = 0)$ para o caso D1. Nota-se que os resultados numéricos são muito próximos entre si e concordam razoavelmente com os valores experimentais. Vale ressaltar que na posição $x = 190mm$, os resultados relativos à combinação do modelo de Tensões de Reynolds com o tratamento em duas camadas apresentam valores negativos de u na região bem próxima à parede. Esses valores negativos de u, representam a recirculação prevista no escoamento ocorrendo à jusante da colina. Como os sensores utilizados no experimento foram posicionados acima de tal região de recirculação observada na simulação computacional, não temos como saber se essa recirculação ocorreu neste experimento em túnel de vento.

Ainda com relação ao caso D1, a figura 13 apresenta perfis de energia cinética turbulenta (k) em diversas posições x tomadas ao longo do eixo de simetria y = 0. Pode-se perceber, particularmente nas posições $x = 0$, $x = 190mm$ e $x = 380mm$, que a combinação TR-2C forneceu os resultados numéricos mais próximos daqueles obtidos experimentalmente. Quando se compara os resultados relativos às combinações que utilizaram a Lei da parede clássica (KE-LP e TR-LP) observa-se que, nas posições $x = 0$, $x = 190mm$, os resultados de energia cinética turbulenta obtidos com o modelo de Tensões de Reynolds foram mais próximos dos dados experimentais.

A figura 14 representa perfis da componente horizontal da velocidade (u) para o caso E1. Percebe-se que os resultados numéricos concordam razoavelmente com os valores experimentais. Na posição $x = 0$, as simulações superestimaram as velocidades próximas ao terreno. Os resultados do experimento em túnel de vento apontam para uma redução das velocidades nessa região.

Dentre as simulações realizadas podemos notar que para as posições $x = -200mm$ e $x = 0$, os resultados numéricos são praticamente idênticos entre si. Porém, nas posições $x = 250mm$ e $x = 500mm$ os resultados das simulações

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

apresentam diferenças significativas. Na posição $x = 250mm$ nota-se que as combinações que utilizaram o tratamento em 2 camadas (KE-2C e TR-2C) para a região próxima à parede apresentaram resultados mais realistas do que as combinações que utilizaram a Lei da Parede clássica. Os primeiros foram capazes de prever a existência da recirculação à jusante da colina, cuja presença é confirmada pelos resultados experimentais.

Na região que inclui a recirculação ($x = 250mm$), dentre as combinações que empregaram o tratamento em 2 camadas a combinação TR-2C foi a que produziu valores de velocidade mais próximos aos experimentais. Este melhor desempenho obtido com o uso da combinação TR-2C pode ser novamente verificado na figura correspondente à posição $x = 500mm$.

A figura 15 mostra perfis de energia cinética turbulenta (k) em diversas posições x tomadas ao longo do eixo de simetria $(y = 0)$ para o caso E1. As principais diferenças entre os resultados numéricos e experimentais, apontadas pelos gráficos, encontram-se na região mais próxima à parede. Nas posições $x = -200mm$ e $x = 0$ os resultados calculados para esta região superestimam os valores de k, quando comparados com o experimento. Já nas posições $x = 250mm$ e $x = 500mm$ os valores calculados de k foram subestimados.

Ainda com relação às posições $x = 250mm$ e $x = 500mm$, à jusante da colina, pode-se notar um melhor desempenho das combinações que utilizam o tratamento em 2 Camadas do que aquelas que utilizam a Lei da Parede. A comparação entre os resultados numéricos e experimentais mostra que as combinações TR-2C e KE-2C conseguem representar o crescimento da energia cinética turbulenta (k) próximo ao solo, enquanto as outras combinações não o conseguem. No gráfico relativo à posição $x = 500mm$ pode-se observar que os resultados obtidos com a TR-2C foram os mais próximos dos dados experimentais.

Passando agora para o caso D2, a figura 16 apresenta perfis de u no plano $y = 0$. Os resultados numéricos relativos às posições $x = -200mm$ e $x = 0$ são muito parecidos entre si e concordam razoavelmente com os resultados experimentais. Na posição $x = 300mm$, que encontra-se na região de recirculação, pode-se observar que

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

a combinação TR-2C é a única que consegue representar adequadamente o perfil de velocidade medido experimentalmente.

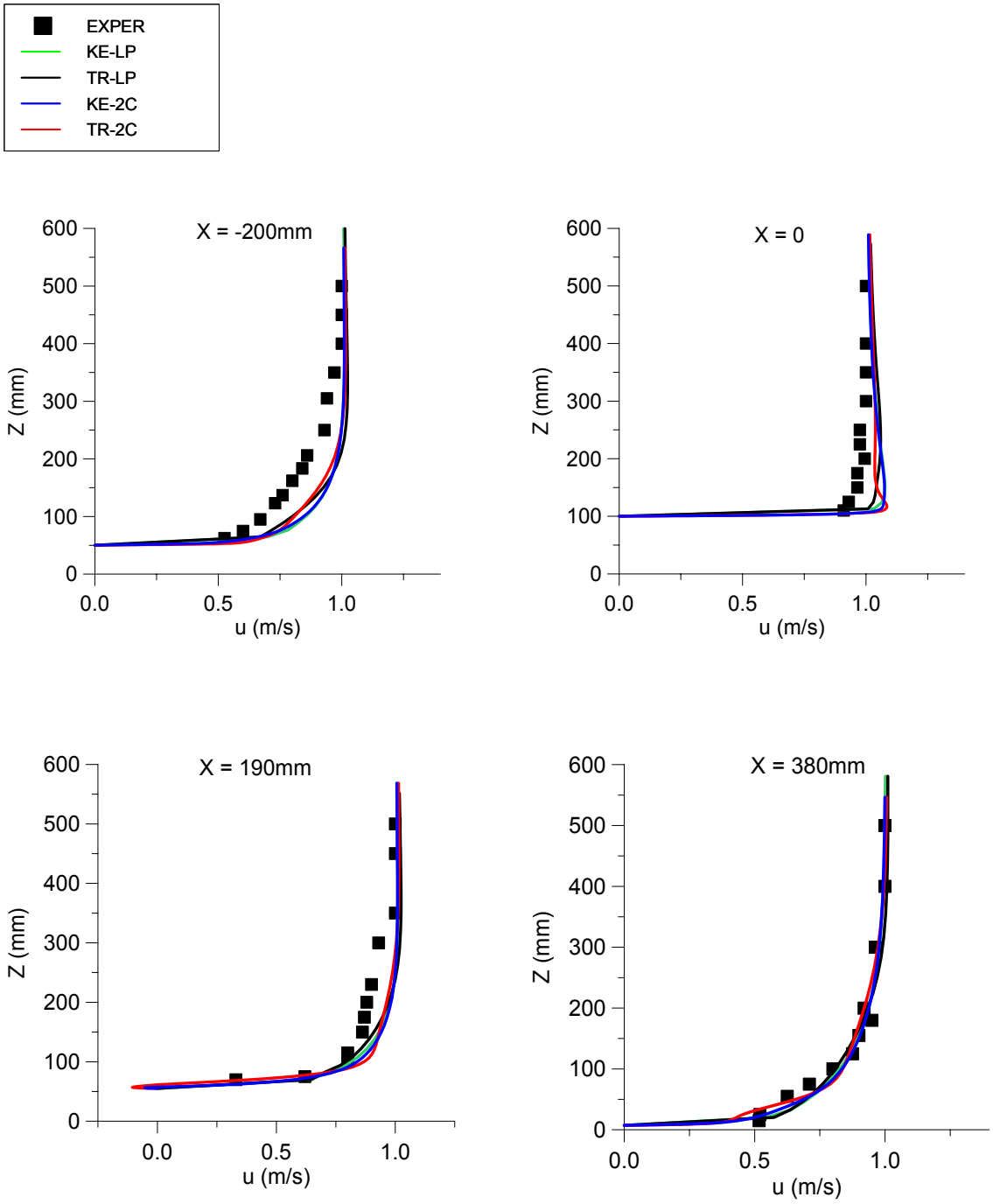


Figura 12 - Perfis verticais da componente (u) da velocidade no plano de simetria $(y = 0)$ - Caso D1.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

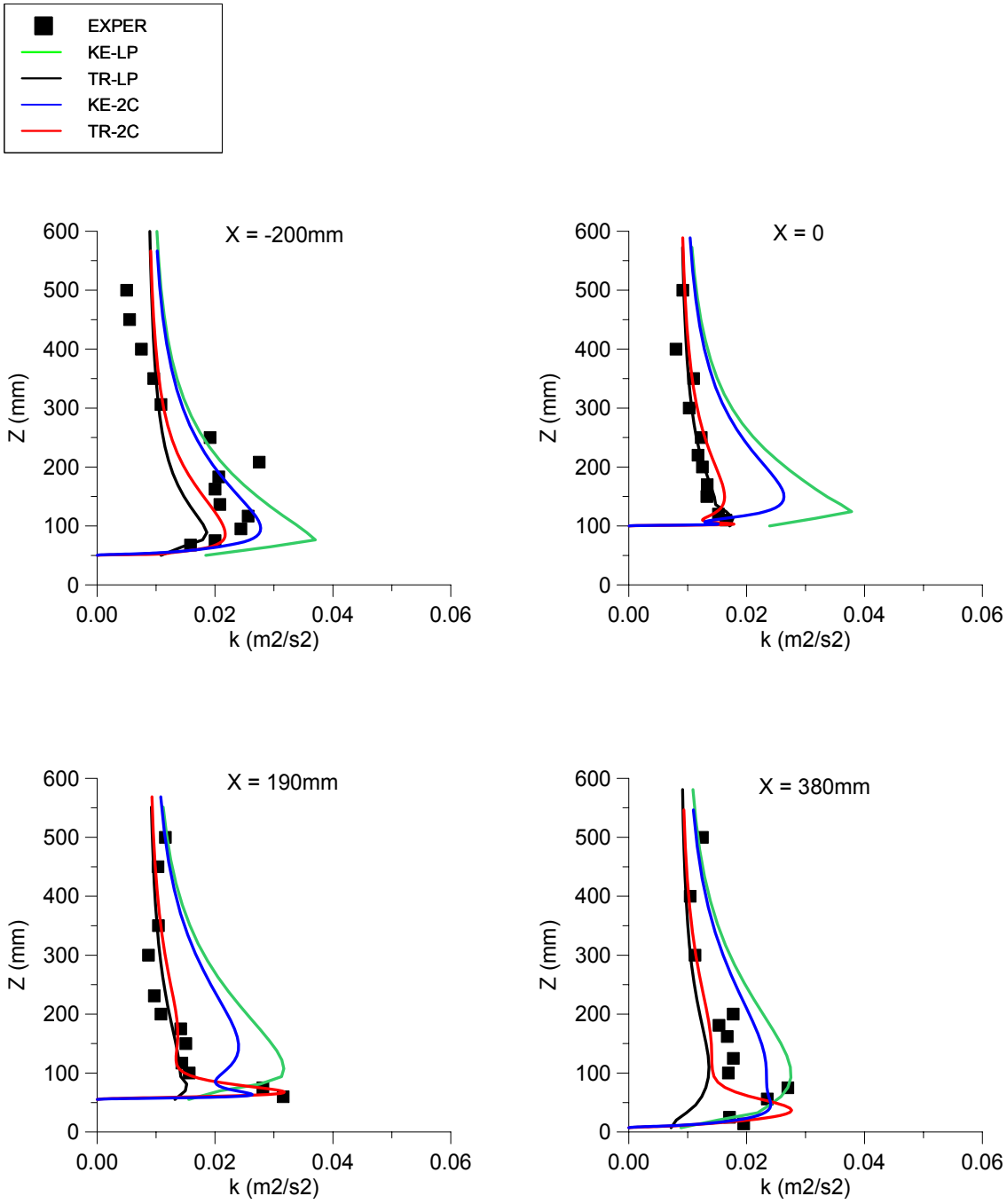


Figura 13 - Perfis verticais de energia cinética (k) no plano de simetria $(y = 0)$ - Caso D1.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

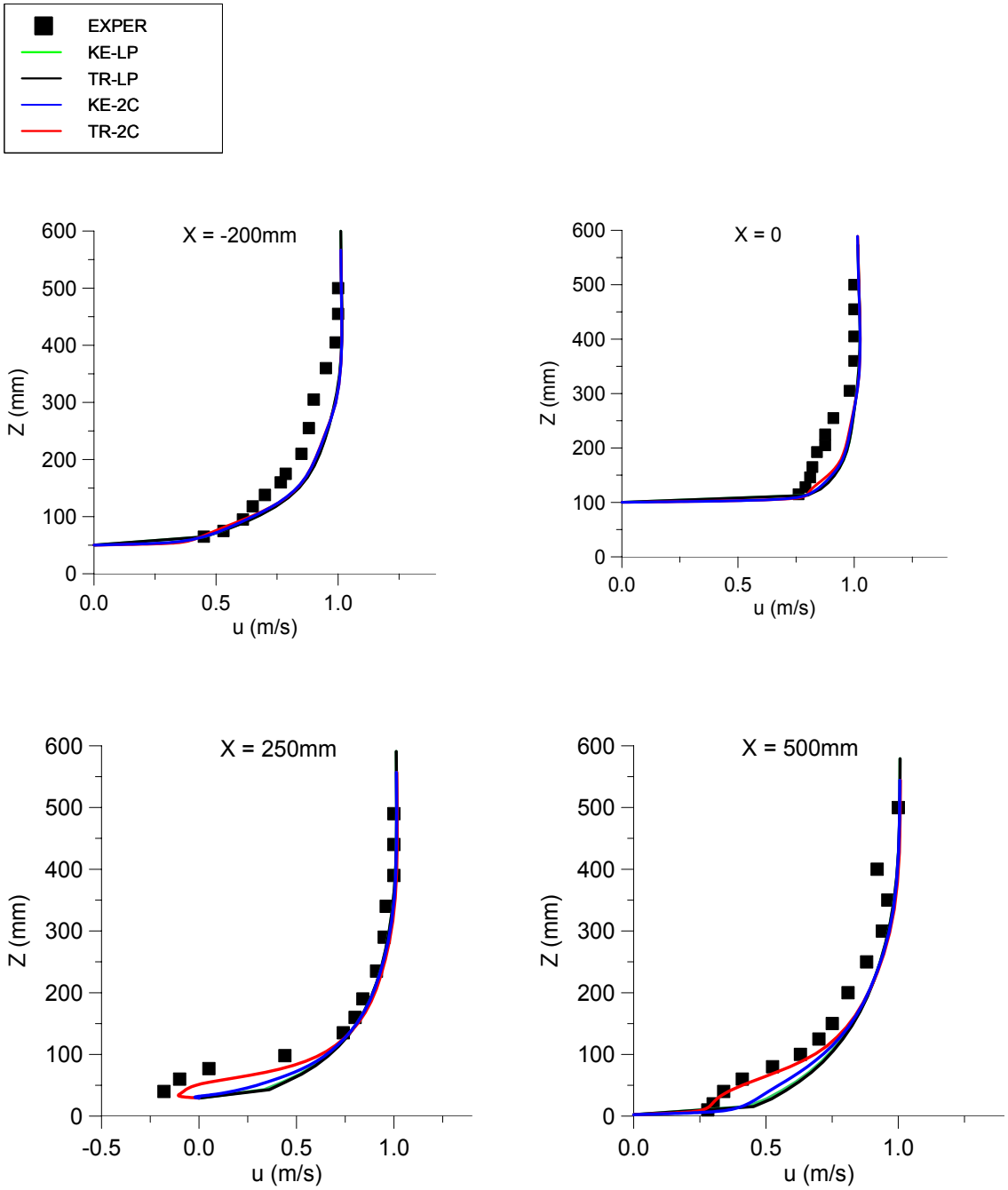


Figura 14 - Perfis verticais da componente (u) da velocidade no plano de simetria $(y = 0)$ - Caso E1.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

O desempenho dos modelos numéricos na representação da recirculação no escoamento ($x = 300mm$) levanta algumas discussões concernentes às características dos modelos testados. Para o modelo $k-\varepsilon$, a dificuldade na predição das características da recirculação poderia ser associada à predição de um elevado nível de viscosidade turbulenta nessa região. Isto significa uma elevação do nível da difusividade (transporte de quantidade de movimento), resultando no fracasso em representar a separação do escoamento. Uma possível explicação para este elevado nível de viscosidade turbulenta seria que os pronunciados gradientes de velocidade (tanto na direção vertical como na transversal), devido ao desvio de parte do escoamento em torno da colina, causam um aumento no termo de produção de k, provocando uma elevação do nível da turbulência. Como será visto na figura 17, os níveis de k calculados com o emprego do modelo $k-\varepsilon$ (KE-LP e KE-2C) na posição $x = 300mm$ (que encontra-se dentro da recirculação) estão realmente um pouco distantes daqueles obtidos experimentalmente. No entanto, não fica evidenciada uma superestimativa que justificasse tal elevação nos níveis de turbulência. Dessa forma, poderíamos supor que a deficiência do $k-\varepsilon$, com relação aos altos níveis de viscosidade turbulenta nessa região, deveriam ser atribuídas à equação de dissipação, a qual estaria subestimando ε, e não a uma superestimação da produção de energia cinética turbulenta.

Segundo Apsley (1995), em regiões de elevados gradientes de pressão como, por exemplo, em camadas limite desaceleradas a dissipação calculada com o $k-\varepsilon$ é pequena demais e, assim, os níveis de turbulência tornam-se muito altos, resultando na deficiência em prever a separação no escoamento. De forma similar, níveis não realísticos de turbulência são previstos à montante de corpos rombudos. Particularmente os gradientes de pressão favoráveis, próximos à quina à montante, elevam o transporte de quantidade de movimento através da camada separada ocasionando um recolamento precoce. Dessa forma, a dificuldade encontrada em representar a recirculação com as combinações que empregaram o modelo $k-\varepsilon$ (KE-LP e KE-2C) poderia ser justificada através dessa análise.

Conforme já discutido no capítulo 2, a obtenção das tensões $\overline{u'_i u'_j}$ diretamente de suas equações de transporte utilizando-se o modelo de tensões de Reynolds

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

apresenta vantagens em relação aos modelos de viscosidade turbulenta na representação de situações como, por exemplo, os efeitos de curvatura sobre o escoamento e na avaliação das tensões normais de Reynolds, de grande importância em escoamentos com separação. Essas vantagens poderiam justificar os melhores resultados obtidos a partir da utilização da combinação TR-2C em comparação com as demais combinações testadas. Apesar disso, observando os resultados obtidos com a modelagem TR-LP na posição $x = 300mm$, nota-se que neste caso o modelo de Tensões de Reynolds não foi capaz de representar adequadamente a recirculação.

De acordo com (Silva Freire, 1998), a descrição do comportamento da camada limite turbulenta próxima a um ponto de separação não pode ser realizada dentro do contexto desenvolvido para a dedução da equação clássica da camada limite. Quando a camada limite encontra-se sujeita a intensos gradientes adversos de pressão, os argumentos utilizados para a dedução da equação clássica da camada limite também deixam de ser válidos, de modo que não pode-se mais esperar a existência de um perfil logarítmico de solução. Uma análise completa do problema para os campos de velocidade e temperatura pode ser obtida em Cruz e Silva Freire (1995a, 1995b, 1998).

Uma alternativa para a representação da camada limite em tais situações dá-se através da utilização do tratamento em duas camadas. A aplicação do tratamento em duas camadas implica na solução da região próxima à parede, afetada pela viscosidade, até a subcamada viscosa. Por isso espera-se que este tratamento seja capaz de prever na região próxima à parede, com maior precisão, as características do escoamento com separação do que com a utilização da Lei de Parede clássica. Enquanto os resultados relativos à TR-LP não representaram adequadamente a recirculação, o modelo de Tensões de Reynolds associado ao tratamento em duas camadas (TR-2C) conseguiu gerar bons resultados quanto à representação das velocidades u na posição $x = 300mm$. Desta forma fica claro que o tratamento da turbulência na região próxima à parede foi um fator determinante na diferença entre os resultados obtidos.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

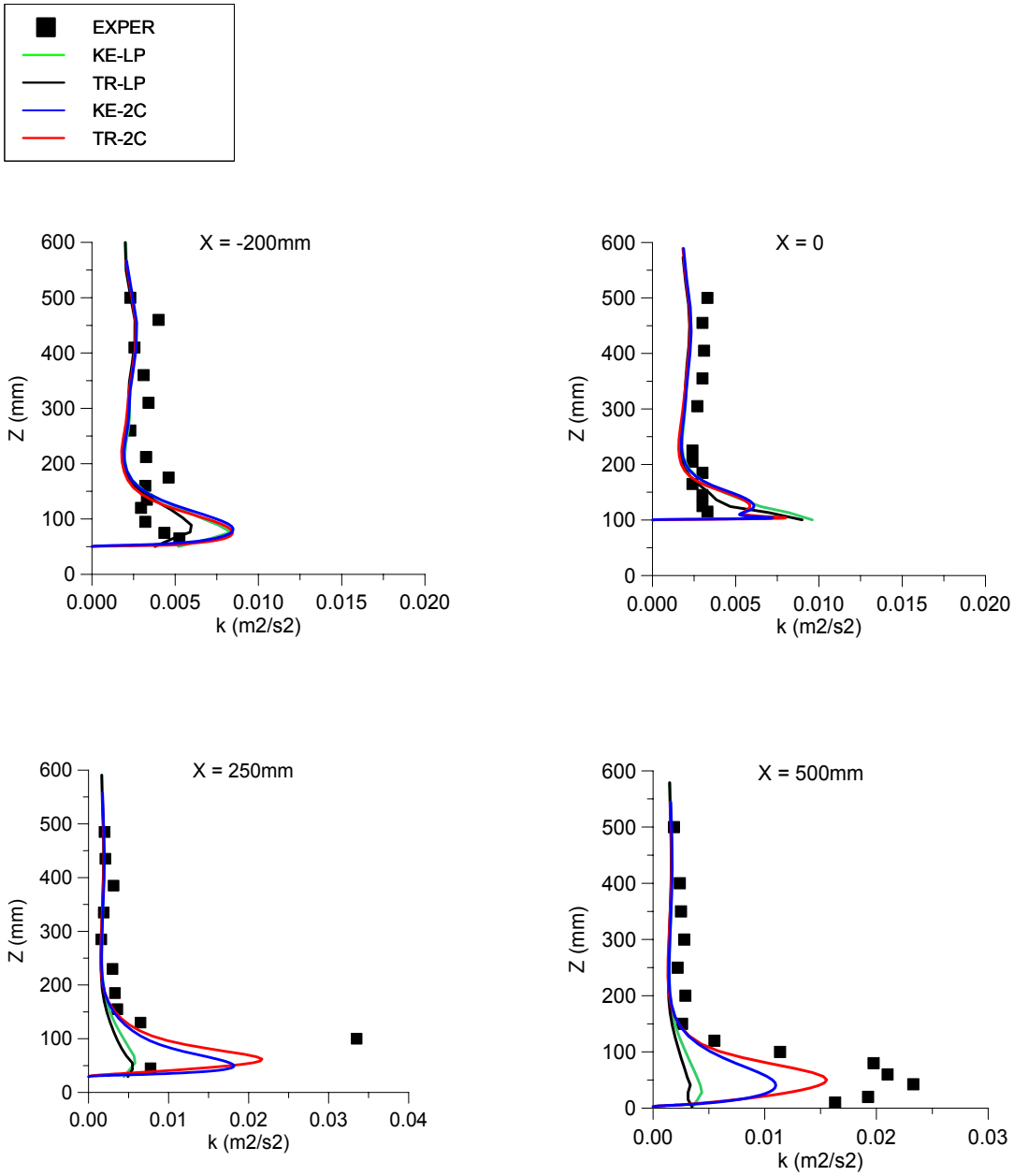


Figura 15 - Perfis verticais de energia cinética (k) no plano de simetria $(y = 0)$ - Caso E1.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

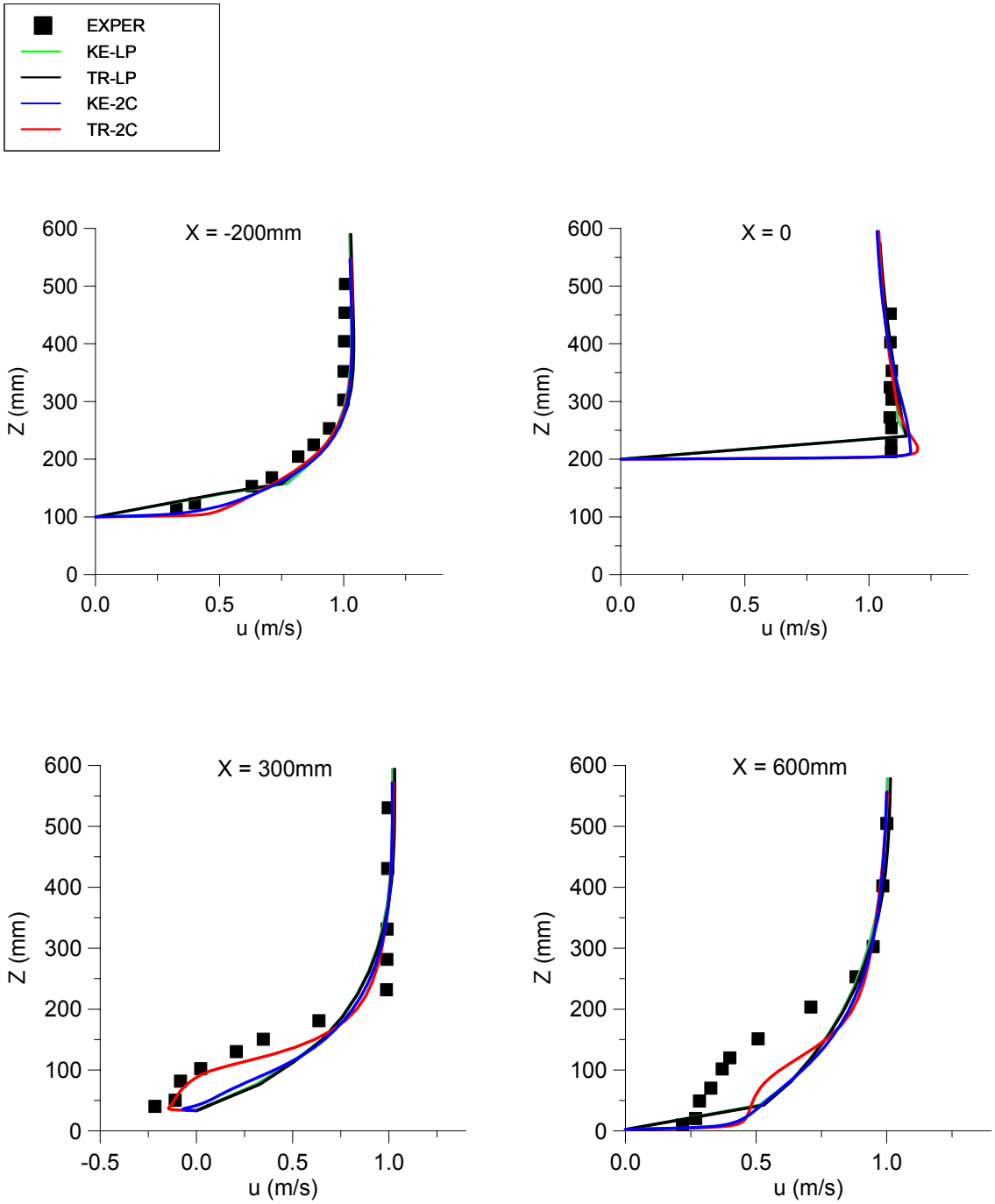


Figura 16 - Perfis verticais da componente (u) da velocidade no plano de simetria $(y = 0)$ - Caso D2.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

Por outro lado, o tratamento em duas camadas empregado em conjunto com o modelo $k-\varepsilon$ (KE-2C) não produziu uma boa representação da recirculação. Esta análise mostra que existem importantes características do escoamento que são bem representadas pelo modelo de tensões de Reynolds mas não pelo $k-\varepsilon$. Também mostra que existem características do escoamento na região próxima à parede que não são bem representadas pela Lei da Parede, mas são adequadamente representadas pelo tratamento em duas camadas.

Um fato interessante é que os resultados obtidos com a utilização do modelo de Tensões de Reynolds e com a utilização do tratamento em duas camadas só representaram adequadamente o escoamento quando essas modelagens foram aplicadas juntas (TR-2C). Quando aplica-se o modelo de Tensões de Reynolds associado à Lei da Parede (TR-LP), ou quando aplica-se o tratamento em duas camadas associado ao modelo $k-\varepsilon$ (KE-2C), percebe-se que os resultados não evidenciaram vantagens na utilização dessas modelagens. Como se, separadamente, as suas qualidades não prevalecessem, provavelmente afetadas pelas deficiências atribuídas à utilização do $k-\varepsilon$ e à Lei da Parede nestes tipos de escoamento.

Uma outra importante vantagem dos modelos de fechamento de segunda ordem está na capacidade de lidar com intensa anisotropia, onde as componentes individuais de tensão são seletivamente aumentadas ou reduzidas. Nos escoamentos estavelmente estratificados as flutuações verticais são inibidas devido às forças de empuxo (provenientes do gradiente de temperatura positivo na direção vertical), enquanto as flutuações horizontais não são. Assim, os modelos isotrópicos de turbulência não reproduzem adequadamente a difusão turbulenta não-isotrópica. Ainda com relação à anisotropia, devido à inibição do movimento do fluido na direção normal à parede, a anisotropia das flutuações de velocidade próxima à parede é bem maior do que no caso de escoamento livre.

Possivelmente, características anisotrópicas dos escoamentos (particularmente dos estavelmente estratificados) contribuíram para o melhor desempenho do modelo de tensões de Reynolds (evidenciado nos resultados obtidos com a TR-2C), no que diz respeito a representação das velocidades u na região de recirculação.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

Ainda no caso D2, a figura 17 apresenta perfis verticais de k no plano de simetria. Os resultados numéricos variam bastante entre si e não ficou evidenciada a superioridade de uma modelagem em especial. Enquanto na posição $x = 0$ as simulações que empregaram o $k - \varepsilon$ (KE-LP e KE-2C) produziram resultados mais parecidos com os dados experimentais, na posição $x = 300mm$ os resultados obtidos com o modelo de Tensões de Reynolds (TR-LP e TR-2C) parecem ser um pouco melhores.

Para analisar os resultados relativos ao caso E2 são primeiramente apresentados, na figura 18, perfis verticais de u em diversas posições ao longo da coordenada x, no plano de simetria $(y = 0)$. Na posição $x = -200mm$ os resultados numéricos são muito parecidos entre si e estão de acordo com os dados do experimento em túnel de vento. Já na posição $x = 0$, pode-se perceber que as velocidades calculadas estão superestimadas. Nas posições $x = 250mm$ e $x = 500mm$, que se encontram à jusante da colina, fica evidente a superioridade dos resultados calculados com a combinação TR-2C em relação às demais. Assim como foi observado no caso D2, as velocidades negativas presentes na recirculação, calculadas através desta combinação, estão bastante parecidas com as velocidades obtidas experimentalmente.

A figura 19 apresenta os perfis de k para o caso E2, e pode se observar que, exceto em $x = 500mm$, os resultados numéricos superestimam os valores de k nas regiões mais próximas à parede. Na posição $x = 500mm$ ocorre o inverso. Porém, os valores experimentais de k para esta posição provavelmente estão incorretamente superestimados, dada à incoerência com relação aos valores nas demais posições.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

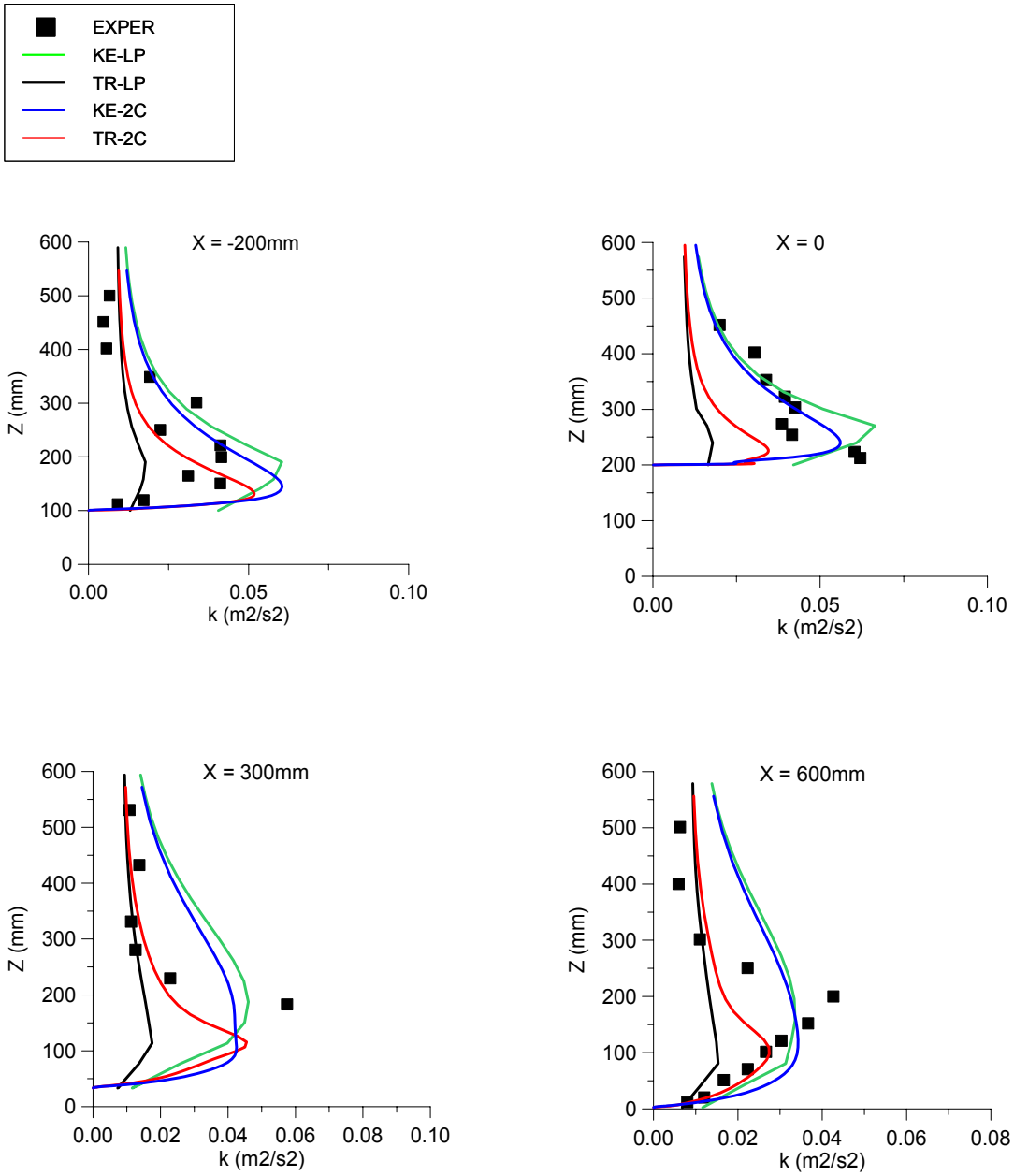


Figura 17 - Perfis verticais de energia cinética (k) no plano de simetria $(y = 0)$ - Caso D2.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

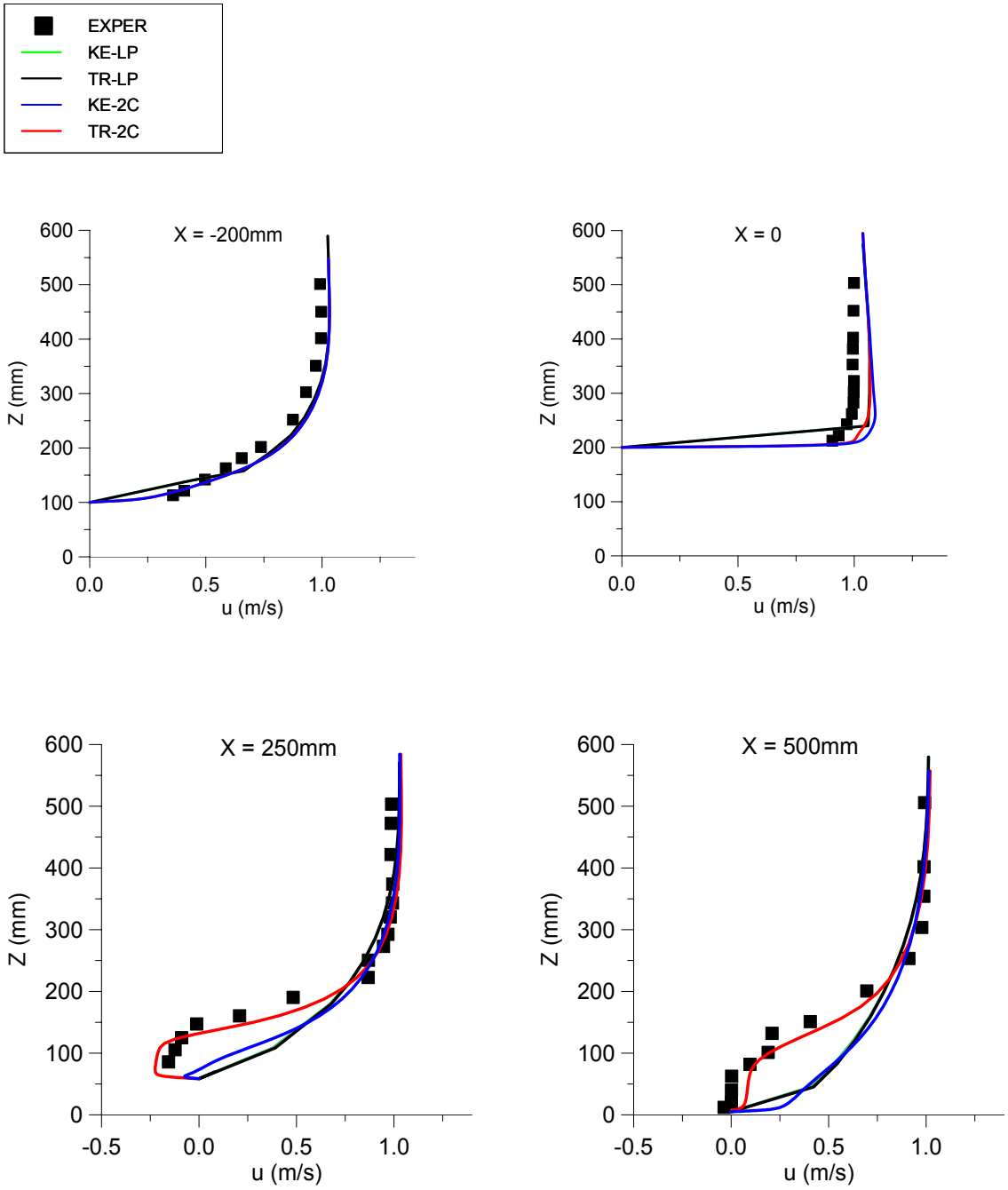


Figura 18 - Perfis verticais da componente (u) da velocidade no plano de simetria $(y = 0)$ - Caso E2.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

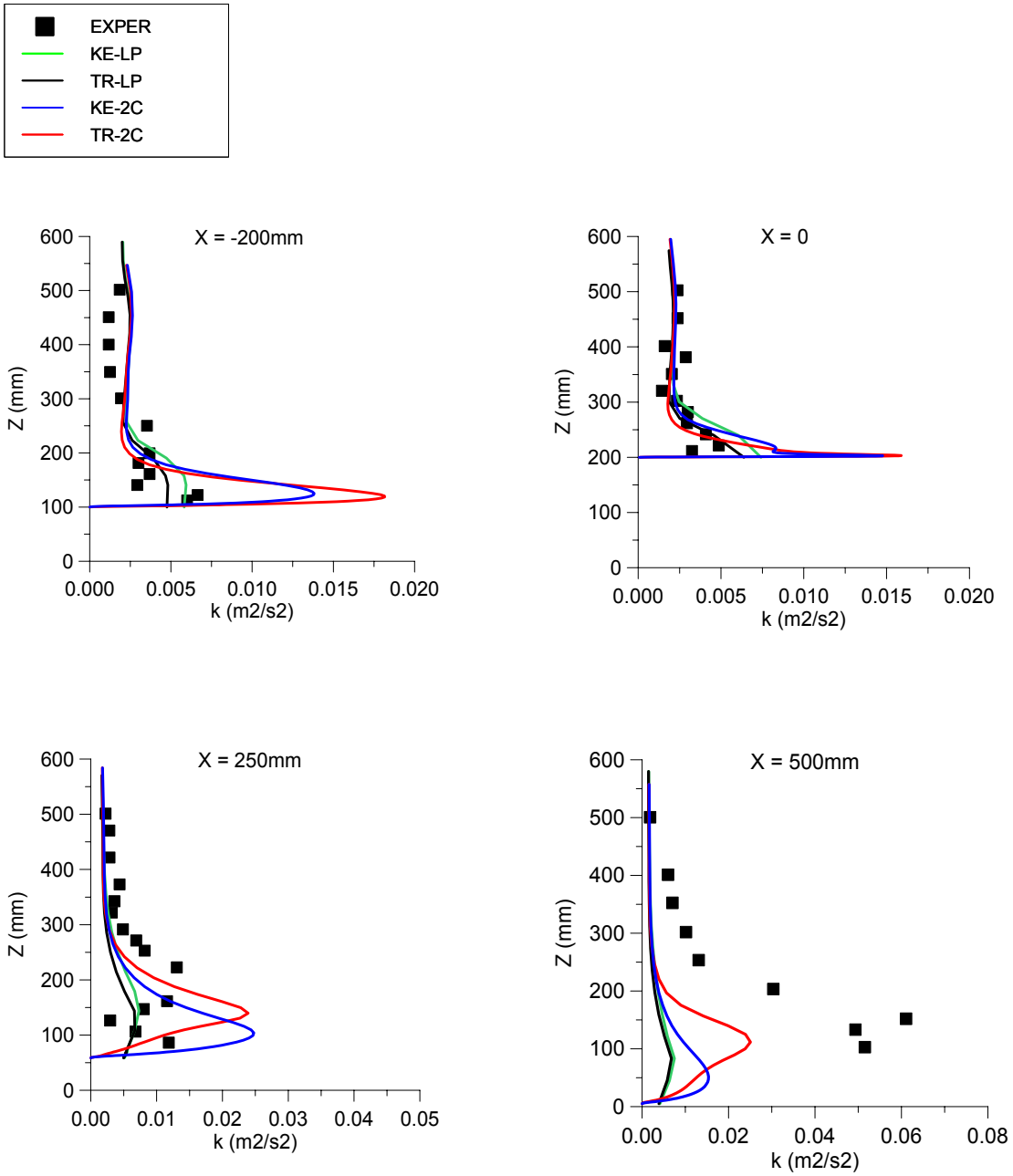


Figura 19 - Perfis verticais de energia cinética (k) no plano de simetria $(y = 0)$ - Caso E2.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

Com relação ao esforço computacional exigido pelas diferentes modelagens observamos que, em termos gerais, a modelagem KE-LP exigiu aproximadamente 1 hora para alcançar a convergência dos resultados. Com o objetivo de facilitar a convergência da solução a ser obtida com o modelo de tensões de Reynolds, utilizamos as soluções obtidas com o modelo $k-\varepsilon$ como valores iniciais para o campo de escoamento. A solução obtida com a TR-LP levou aproximadamente 1 hora a partir da solução obtida com a KE-LP.

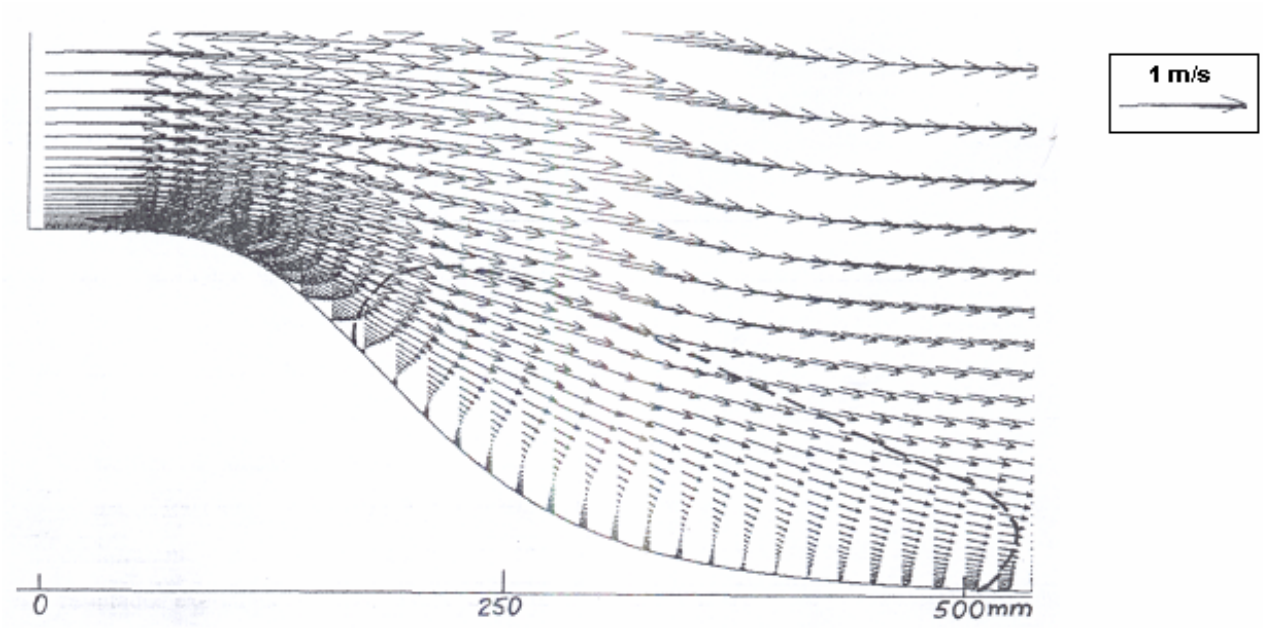
O emprego do tratamento em duas camadas teve um impacto significativo no esforço computacional necessário para as soluções obtidas. Em média, as soluções obtidas através da utilização da combinação KE-2C exigiram aproximadamente 8 horas para se alcançar a convergência dos resultados. Já a solução obtida com a TR-2C levou aproximadamente 5 horas a partir da solução obtida com a KE-2C.

Pode se considerar que, em média, o emprego do modelo de tensões de Reynolds exigiu de 50 a 100% de acréscimo sobre o tempo necessário para o modelo $k-\varepsilon$. A utilização do tratamento em duas camadas refletiu em um tempo computacional de 6 a 8 vezes superior ao tempo necessário para a solução do escoamento empregando-se a Lei da Parede.

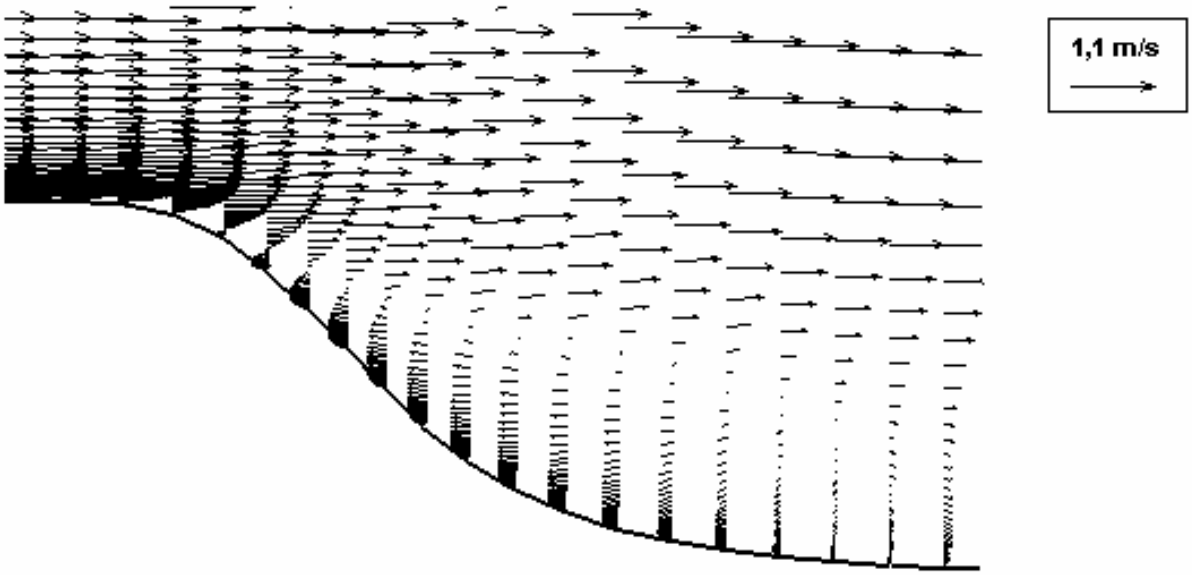
Serão apresentados a seguir outros resultados relativos ao caso E2 que foram obtidos com o emprego da combinação TR-2C. A escolha dessa combinação deve-se ao seu melhor desempenho quanto à representação do escoamento em relação às demais modelagens investigadas, como foi observado nos resultados anteriormente analisados. Como o caso E2 representa a situação de colina alta e escoamento estável, teoricamente esta seria a situação mais delicada dentre as simuladas.

Na figura 20, pode-se ver em detalhe a recirculação prevista numericamente e a obtida experimentalmente na região à jusante da colina. Observando a figura nota-se que a recirculação obtida experimentalmente está posicionada em uma região mais próxima ao terreno em relação àquela prevista numericamente. Além disso, esta última se inicia em uma região mais próxima ao topo da colina. De qualquer forma, o comprimento da recirculação prevista numericamente é razoavelmente parecido com aquele obtido no experimento.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA



(a)



(b)

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.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

Na figura 21 é apresentado o campo de magnitude de velocidade (m/s) calculado no plano de simetria $(y = 0)$. Nela podemos ter uma visão geral do comportamento do escoamento neste plano desde a fronteira de entrada até a saída. Particularmente, pode ser observada a redução das velocidades à jusante da colina e a aceleração que ocorre na região do topo, ocasionados pela presença do obstáculo.

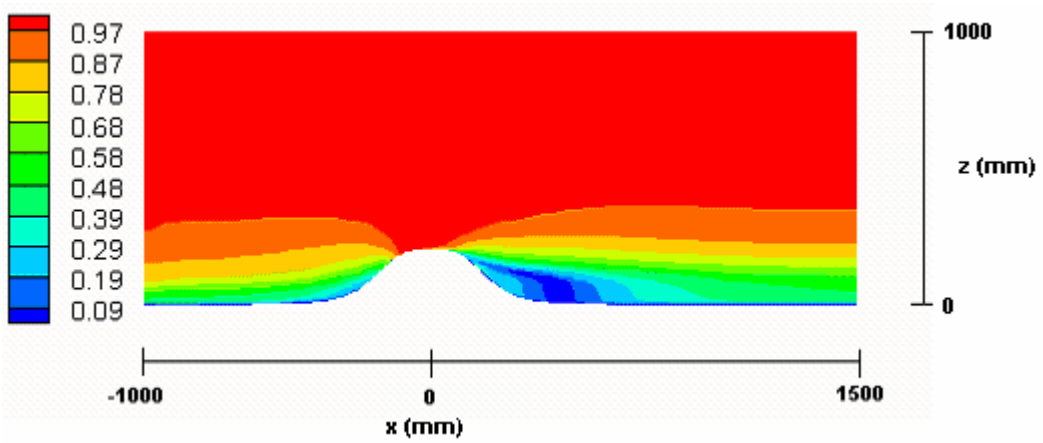


Figura 21 - Campo de magnitude de velocidade (m/s) calculado no plano de simetria com a combinação TR-2C - Caso E2.

As figuras 22 e 23 mostram, respectivamente, os campos de temperatura potencial e densidade no plano $y = 0$, calculados com TR-2C ainda para o caso E2. É importante ressaltar que a estratificação estável imposta na fronteira de entrada por meio de um perfil de temperatura potencial, apesar de sofrer alguma alteração, mantém suas principais características em todo o escoamento, até a fronteira de saída.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

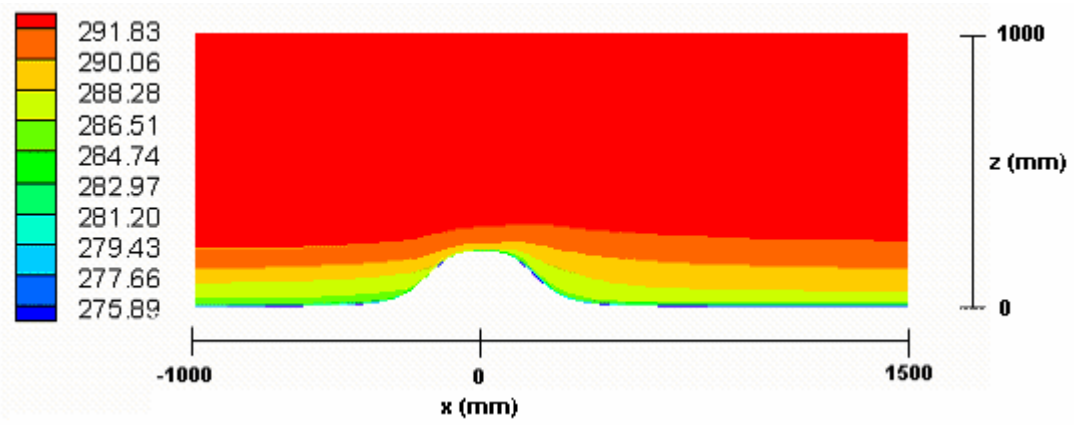


Figura 22 - Campo de temperatura potencial (K) calculado no plano de simetria com a combinação TR-2C - Caso E2.

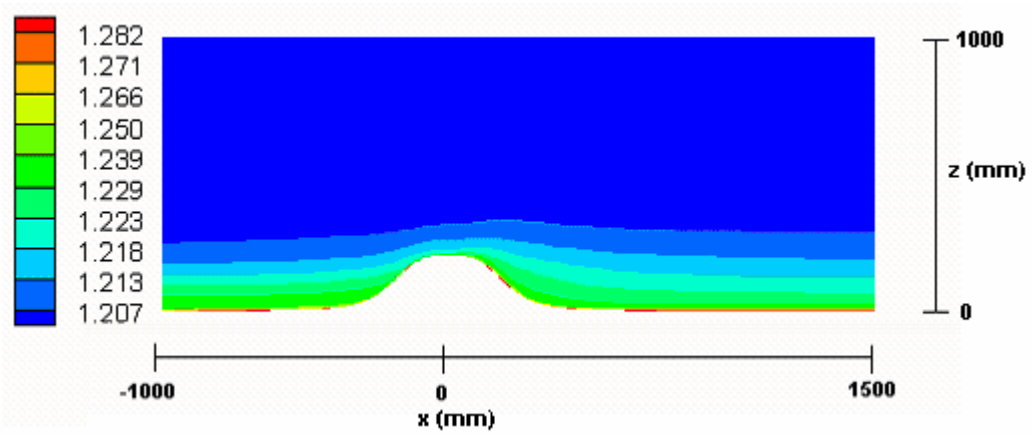


Figura 23 - Campo de densidades (kg/m^3) calculado no plano de simetria com a combinação TR-2C - Caso E2.

As figuras 24 e 25 apresentam, respectivamente, os campos de energia cinética turbulenta (k) e sua dissipação (ε) calculados no plano de simetria. Na primeira figura, pode-se observar que os máximos valores de k estão na região da recirculação, bem junto ao solo na face frontal (à montante do topo) da colina, e também na região próxima ao seu topo. Os máximos valores de ε encontram-se nessas mesmas regiões apontadas para os máximos valores de k.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

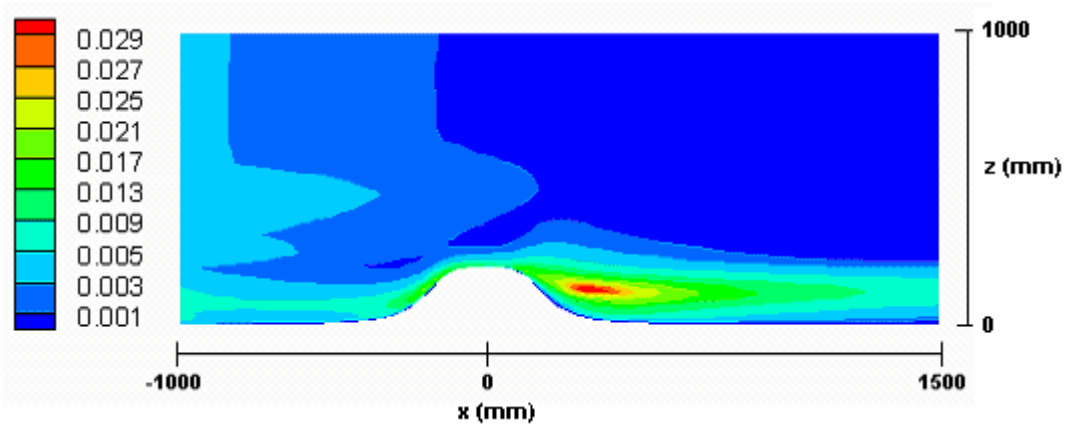


Figura 24 - Campo de energia cinética turbulenta (m^2/s^2) calculado no plano de simetria com a combinação TR-2C - Caso E2.

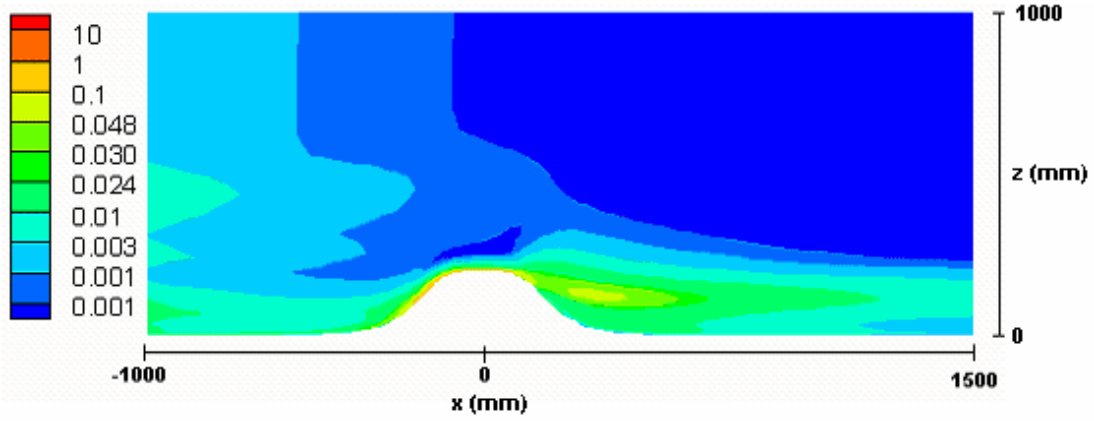


Figura 25 - Campo de dissipação da energia cinética turbulenta (m^2/s^3) calculado no plano de simetria com a combinação TR-2C - Caso E2.

Apesar de não terem sido apresentadas comparações dos resultados obtidos no presente trabalho com os resultados obtidos por outros autores, vale à pena fazer alguns comentários qualitativos sobre tais comparações. No trabalho desenvolvido por Boçon e Maliska (2000), foi implementado um modelo $k-\varepsilon$ modificado não-isotrópico que leva em consideração as diferentes difusividades turbulentas nas direções laterais e verticais na atmosfera. Quanto à solução do campo de escoamento para as mesmas topografias investigadas no presente trabalho, segundo os autores, o modelo apresentou dificuldades em prever a zona de recirculação tridimensional, que

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

ocorre na região à jusante do topo das colinas. Nas zonas de recirculação, as viscosidades turbulentas foram superestimadas e assim o tamanho da recirculação foi subestimado.

De maneira geral, consideramos satisfatórios os resultados calculados para o campo de escoamento utilizando a modelagem TR-2C. Na comparação com as demais modelagens investigadas, a TR-2C foi a que melhor representou as características do escoamento, tendo como referência os resultados experimentais. Isto pode ser verificado nos casos de colina alta e baixa, e em atmosferas neutras ou estáveis. Particularmente a região de recirculação foi razoavelmente representada por esta modelagem, como foi possível observar através dos perfis de velocidade apresentados e também na figura 20 que mostra o comprimento da recirculação.

A adequada previsão da recirculação neste tipo de escoamento corresponde a um resultado bastante importante. Diversos trabalhos têm sido desenvolvidos com este objetivo, pois trata-se de um problema de difícil representação. É importante ressaltar que para a correta previsão das concentrações sobre topografias complexas é necessário se obter uma boa representação do escoamento.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

5.3.2.
Resultados – Concentração

Os campos obtidos na solução do escoamento foram interpolados da malha em que este foi resolvido para a malha da concentração. A equação de transporte do poluente foi então resolvida separadamente, alimentada pelos campos do escoamento, e os resultados obtidos para as concentrações são apresentados nessa seção. Como já foi comentado anteriormente, a seguinte nomenclatura: KE-LP, TR-LP, KE-2C e TR-2C, quando utilizada na etapa de cálculo das concentrações, define qual o campo de escoamento originalmente empregado para o calculo das concentrações, já que a modelagem do transporte do poluente é sempre realizada através da equação (4.6).

São apresentados primeiramente os resultados de concentrações na forma de isolinhas de concentração para os casos D1, E2 e E0, cujos resultados experimentais neste formato estavam disponíveis (Ohba, R., apud Boçon, 1998) para comparação. As isolinhas apresentadas são relativas a planos de interesse na investigação das

concentrações, como o plano que representa o nível do terreno, o plano de simetria $(y = 0)$ e o plano transversal ao escoamento que passa através do topo da colina $(x = 0)$. São apresentados resultados experimentais e também aqueles calculados utilizando-se a solução do escoamento obtida com a combinação TR-2C. Esta solução do escoamento foi escolhida porque, de maneira geral, foi a que gerou os resultados mais próximos dos experimentais, como foi visto na seção anterior (relacionada aos resultados do escoamento). Ainda com relação às isolinhas obtidas numericamente, são apresentados os resultados obtidos com e sem o tratamento para a difusividade turbulenta na região próxima à fonte, para fins de comparação.

Posteriormente, são também apresentados os campos de concentrações calculados no plano de simetria e no solo para os casos D1, E1, D2, E2 para se obter uma melhor visualização das plumas numéricas.

Em seguida são apresentados gráficos comparativos para os vários casos investigados (D1, E1, D2, E2, D0, E0). São mostrados perfis verticais de concentração, experimentais e numéricos, em diversas posições ao longo do domínio investigado e também os valores de concentração ao nível do solo. Foram testadas simulações alimentadas pelas diversas soluções de escoamento investigadas e os resultados são comparados e discutidos. Enquanto os resultados apresentados na forma de isolinhas permitem uma observação dos aspectos gerais da dispersão, através dos resultados apresentados nos gráficos pode-se analisar mais detalhadamente as características dos resultados obtidos.

Finalmente, é realizada uma discussão sobre o fator de amplificação de terreno e são apresentados resultados relativos a este interessante parâmetro investigado.

5.3.2.1.
Concentração – Isolinhas

Como já foi mencionado, os resultados de concentração apresentados nesta seção foram obtidos através da solução da equação de transporte do poluente alimentada pelo campo de escoamento obtido com a utilização da combinação TR-2C.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

A seguir são apresentados resultados na forma de isolinhas de concentração para os casos D1, E2 e E0 (nesta ordem). Para cada um desses casos, são apresentadas isolinhas de concentração ao nível do solo, no plano de simetria ($y = 0$) e em um plano transversal ao escoamento passando através da coordenada $x = 0$ (topo da colina). Para cada um desses planos são apresentadas para fins de comparação, nesta ordem, as isolinhas de concentração obtidas no experimento em túnel de vento, as isolinhas de concentração calculadas numericamente sem a utilização do tratamento para a difusividade e aquelas calculadas numericamente com a utilização do tratamento para a difusividade na região próxima à fonte.

Os resultados de concentração para o caso D1 podem ser analisados através das figuras 26-(a), (b) e (c). Tais figuras apresentam, respectivamente, os níveis de concentração junto ao solo obtidos experimentalmente, numericamente sem o tratamento para a difusividade e numericamente utilizando o tratamento para a difusividade na região próxima à fonte.

Comparando-se as figuras 26-(a) e (b) verifica-se que os resultados numéricos superestimam os valores das concentrações no solo sob a linha de centro da pluma na região do topo e a montante deste. A partir do topo da colina, ao longo da direção x, os níveis calculados são mais parecidos com os experimentais.

Na fig. 26-(c) observa-se que o tratamento para a difusividade resultou em uma redução das concentrações no solo na região mais próxima à fonte em relação àquelas encontradas na fig 26-(b). Além disso, ocorre um estreitamento na distribuição lateral (direção y) dos níveis de concentração na região a jusante da colina. O valor de x_{mod} calculado para o caso D1 foi de aproximadamente 400mm. Isto significa que o tratamento para a difusividade atuou na região entre a posição da fonte ($x = -500mm$) e a posição $x = -100mm$.

As figuras 27-(a), (b) e (c) apresentam, respectivamente, os níveis de concentração no plano de simetria ($y = 0$) obtidos experimentalmente, numericamente sem o tratamento para a difusividade e numericamente com o tratamento para a difusividade. A comparação entre as figuras 27-(a) e 27-(b) indica que os níveis calculados se assemelham mais aos experimentais a jusante do topo da colina. A montante deste, apesar dos níveis de concentração experimentais estarem

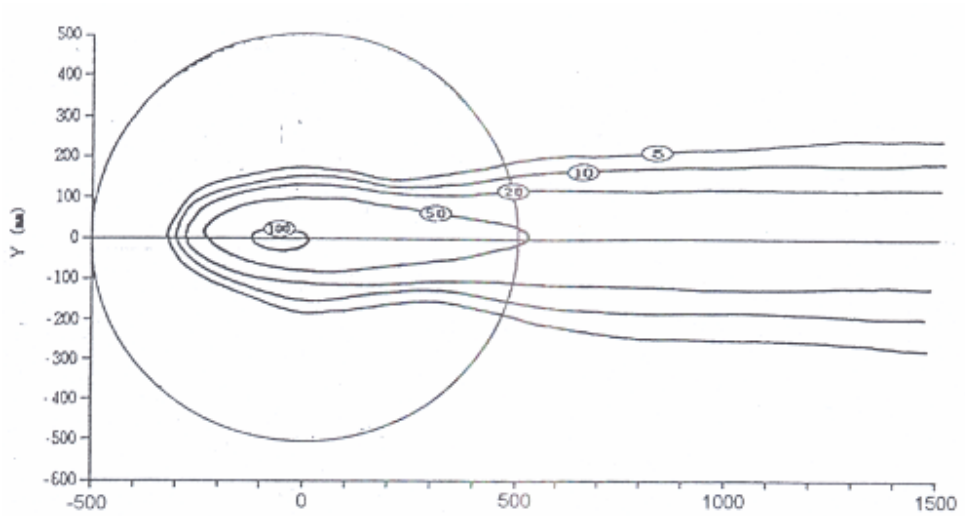
PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

somente parcialmente disponíveis, pode-se perceber que os resultados indicam que as maiores concentrações estão mais afastadas do solo no caso experimental do que no numérico. Comparando as figuras 27-(b) e 27-(c) podemos observar o efeito produzido pelo tratamento para a difusividade próxima à fonte na forma da pluma. Na figura 27-(b) a dispersão vertical da pluma próxima à fonte é bem maior do que na figura 27-(c). Por outro lado, as mais altas concentrações $(C^* > 200)$ são encontradas ao longo de uma distância longitudinal maior na fig 27-(c).

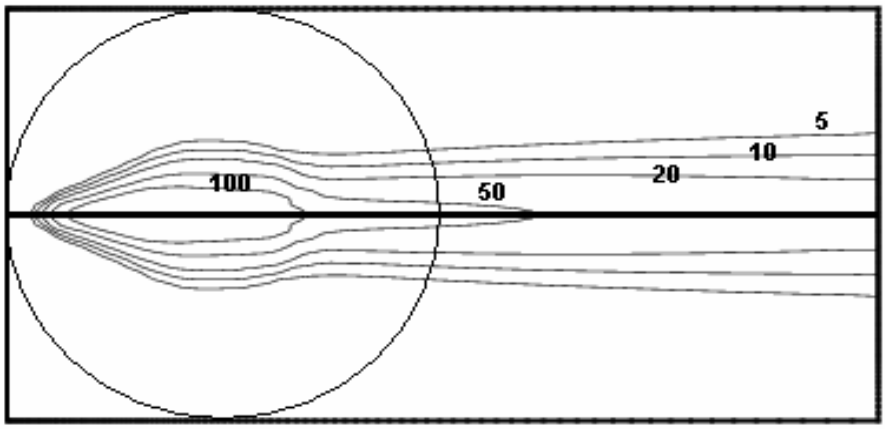
Ainda no caso D1, as figuras 28-(a), (b) e (c) mostram os níveis de concentração em um plano transversal passando através da coordenada $x = 0$ (topo da colina). A comparação entre as figuras 28-(a) e (b) indica que a dispersão vertical do poluente é maior no caso numérico do que no experimental, enquanto que a dispersão lateral parece ser razoavelmente prevista pela modelagem numérica.

Na figura 28-(c) pode-se observar os níveis mais altos de concentração $(C^* > 200)$ ocupando maiores áreas no centro da pluma do que o verificado na figura 28-(b). É interessante notar que a redução das difusividades lateral e vertical provocou essas exageradas concentrações no centro da pluma. No parágrafo anterior foi observado que a dispersão lateral calculada sem o tratamento para a difusividade parecia estar em concordância com os resultados experimentais. É possível que a utilização do tratamento para a redução da difusividade próxima à fonte tenha resultado em uma sub-estimativa da difusividade lateral, ocasionando as exageradas concentrações no centro da pluma que são mostradas na figura 28-(c).

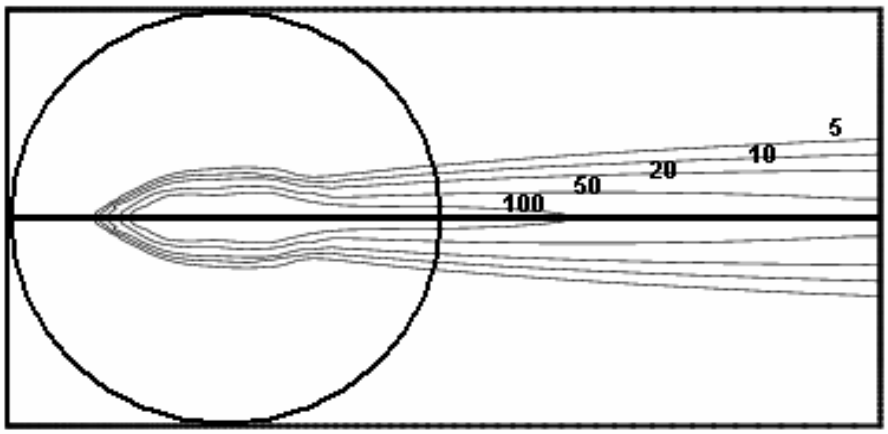
PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA



(a)



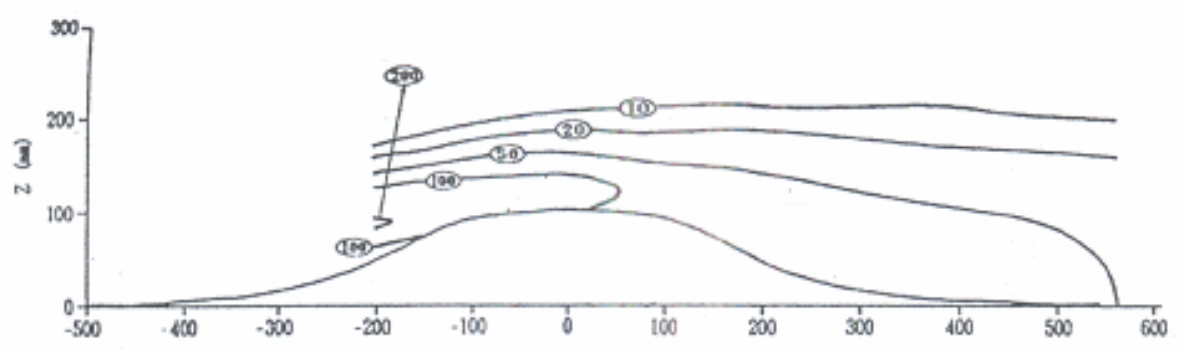
(b)



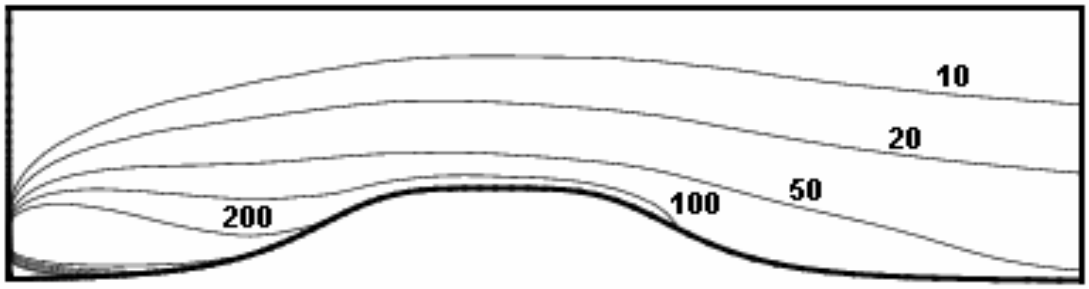
(c)

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.

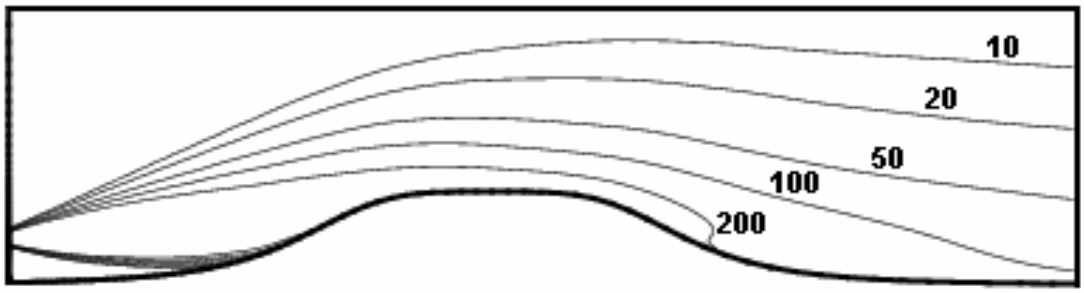
PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA



(a)



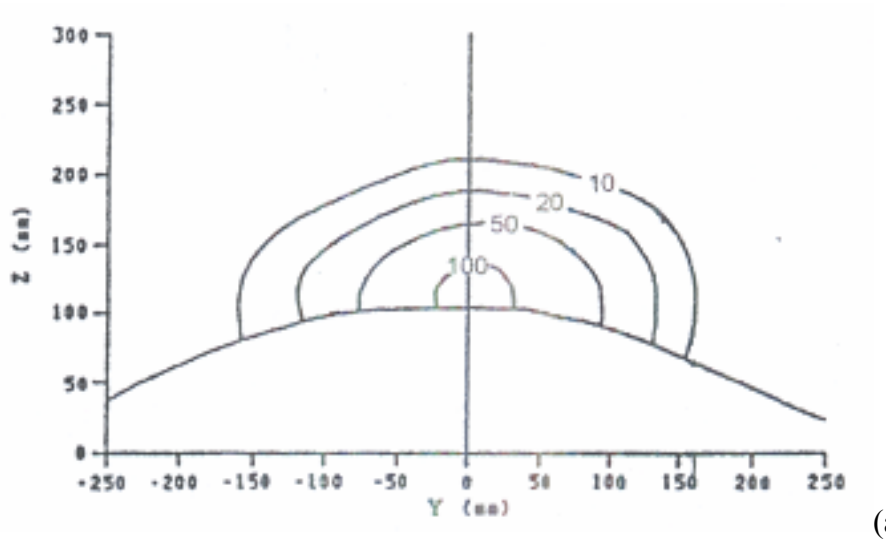
(b)



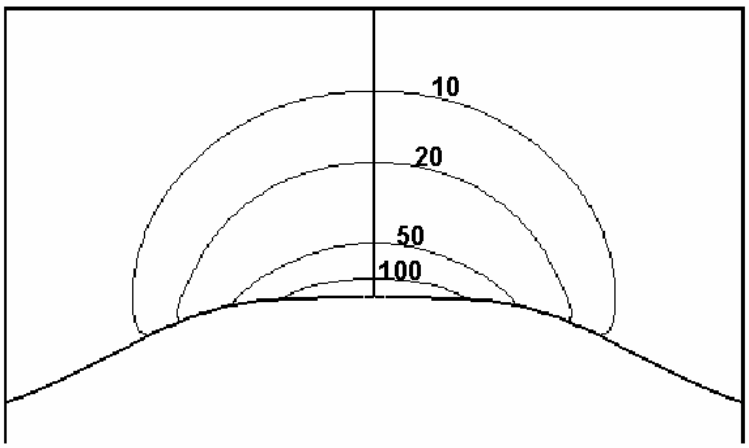
(c)

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..

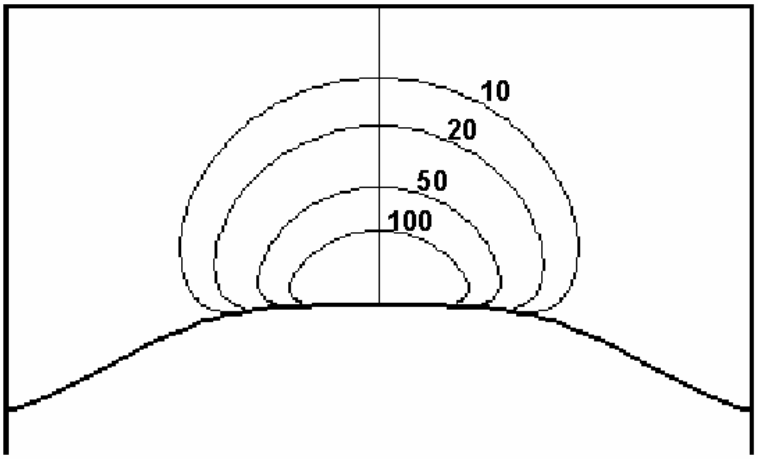
PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA



(a)



(b)



(c)

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.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

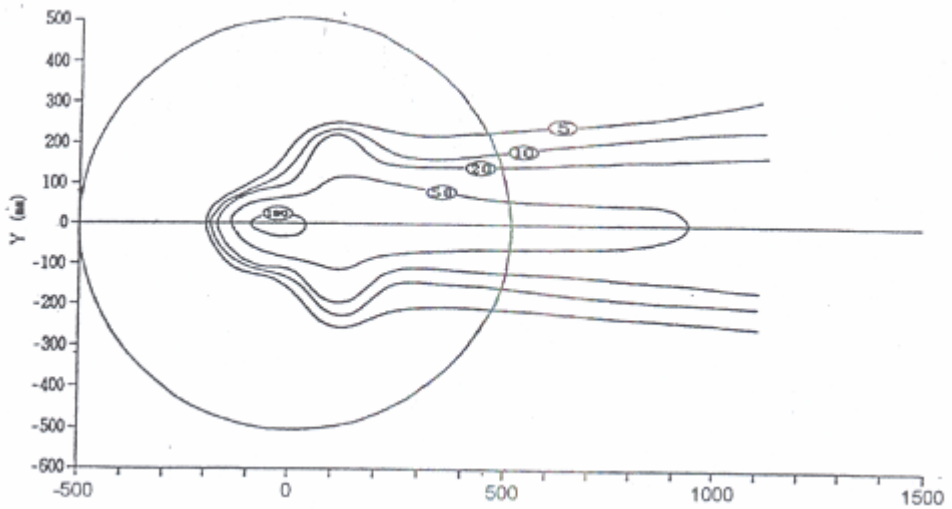
As figuras 29-(a), (b) e (c) apresentam isolinhas de concentração (C^*) ao nível do solo para o caso E2. A figura 29-(a) representa os níveis obtidos experimentalmente, enquanto as figuras 29-(b) e (c) referem-se aos resultados numéricos sem o tratamento para a difusividade (figura (b)) e com o tratamento (figura (c)). Assim como ocorreu em outros casos já analisados, os níveis de concentração calculados no solo na região próxima à fonte estão superestimados em relação aos valores observados no experimento em túnel de vento. No entanto, a jusante da colina, os níveis obtidos numericamente são razoavelmente parecidos com os experimentais. O valor de x_{mod} calculado para o caso E2 foi de aproximadamente 300mm. Isto significa que o tratamento para a difusividade atuou na região entre a posição da fonte ($x = -500mm$) e a posição $x = -200mm$.

Nas figuras 30-(a), (b) e (c) são apresentadas as isolinhas de concentração no plano $y = 0$ para o caso E2. Os resultados apresentados nas figuras 30- (a) e (b) são razoavelmente semelhantes (apesar dos resultados experimentais não disponibilizarem as isolinhas na região mais próxima à fonte), mostrando que as concentrações no plano vertical foram adequadamente previstas pela simulação computacional. Comparando as figuras 30-(b) e (c) nota-se que, na primeira, o nível $C^* > 500$ ocupa somente a região à montante da colina, e que esses níveis de concentração não atingem o solo. Já na figura (c), cujos resultados apresentados foram obtidos com o emprego do tratamento para a difusividade, os níveis de $C^* > 500$ alcançam regiões a jusante do topo da colina, sendo encontrados inclusive ao nível do terreno.

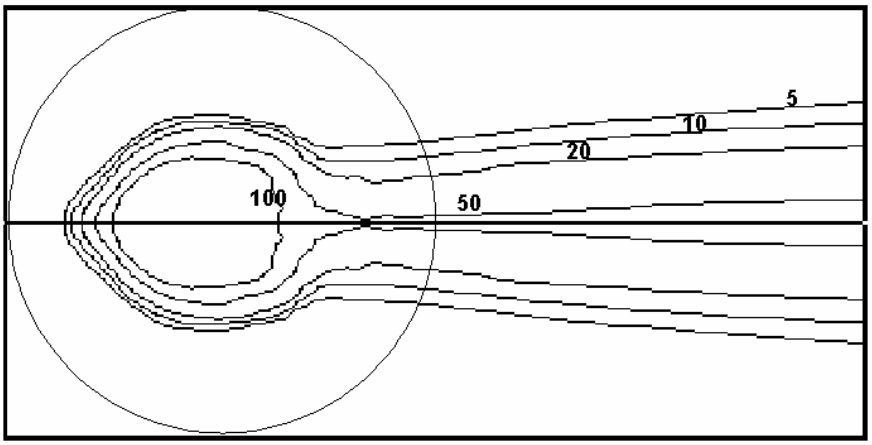
Ainda com relação ao caso E2, a figura 31 mostra os níveis de concentração em um plano transversal ao escoamento passando pela coordenada $x = 0$. Podemos observar a sobreestimativa das concentrações calculadas ao nível do solo em comparação com os resultados obtidos no experimento.

Nota-se também que, enquanto nas figuras 31-(b) e (c) os níveis de concentração avançam pelas laterais da colina, na figura 31-(a) esses níveis se concentram sobre o topo da colina. Possivelmente, a elevada concentração de poluente prevista ao nível do solo na região próxima à fonte (devido à exagerada dispersão vertical observada nos estágios

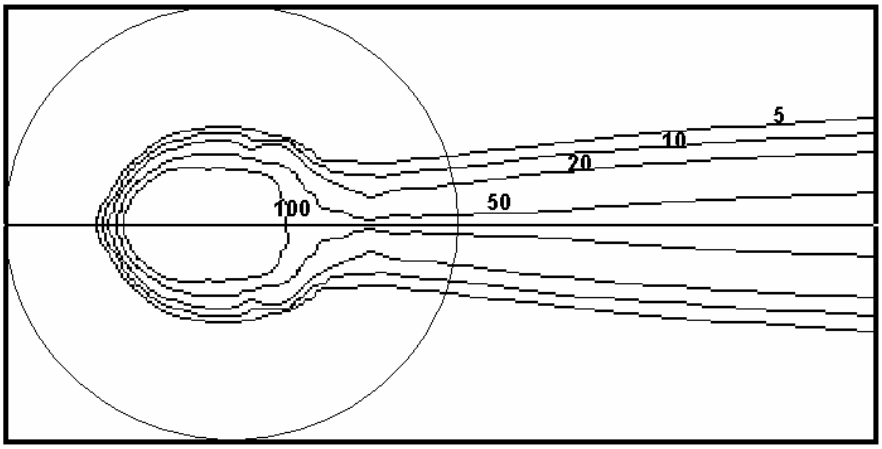
PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA



(a)



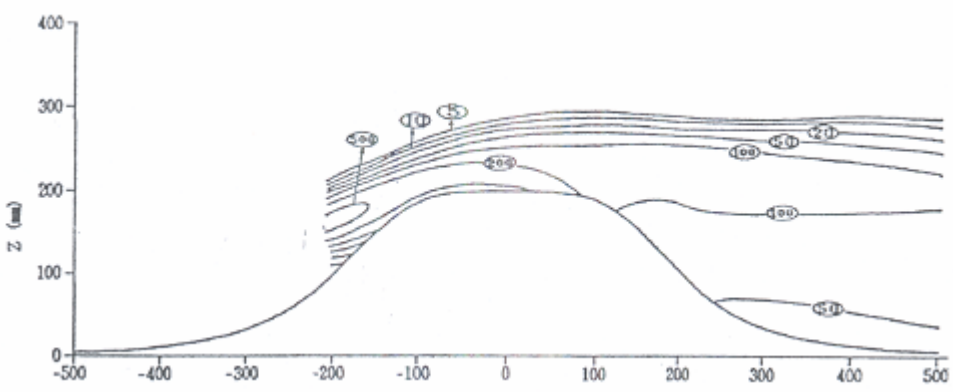
(b)



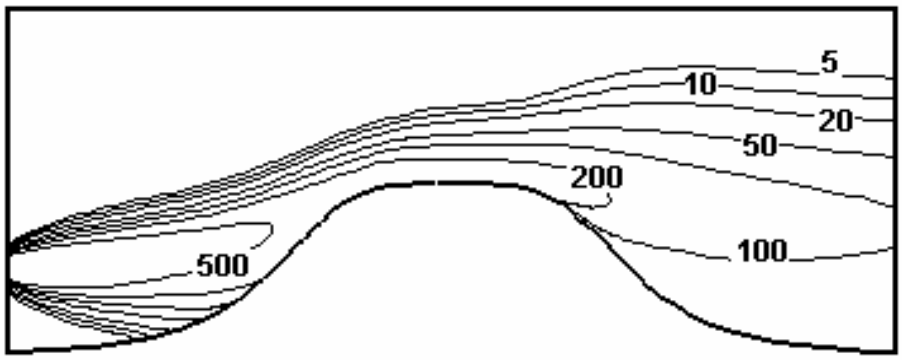
(c)

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.

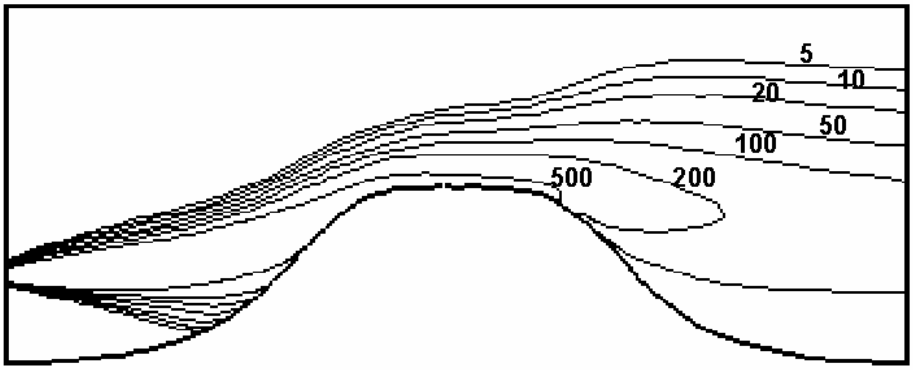
PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA



(a)



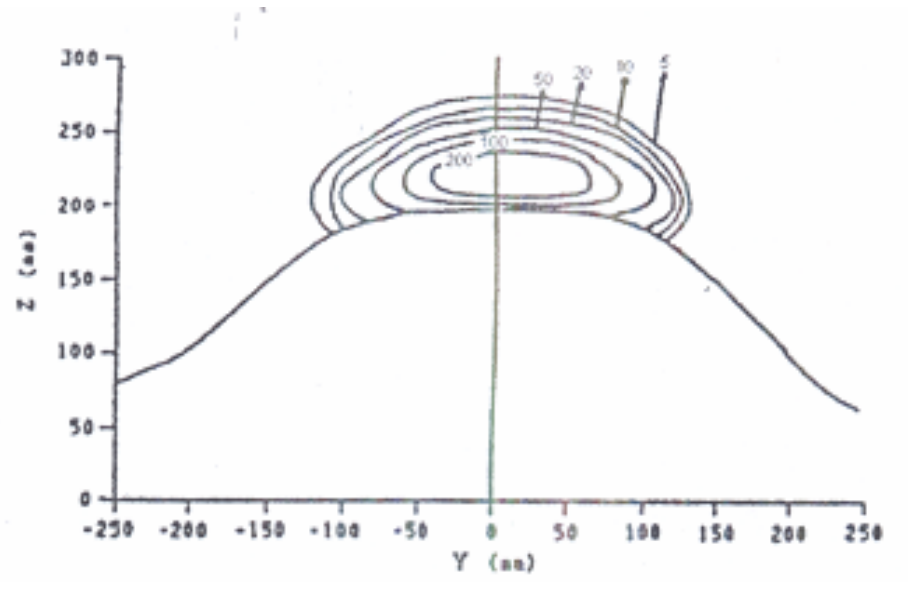
(b)



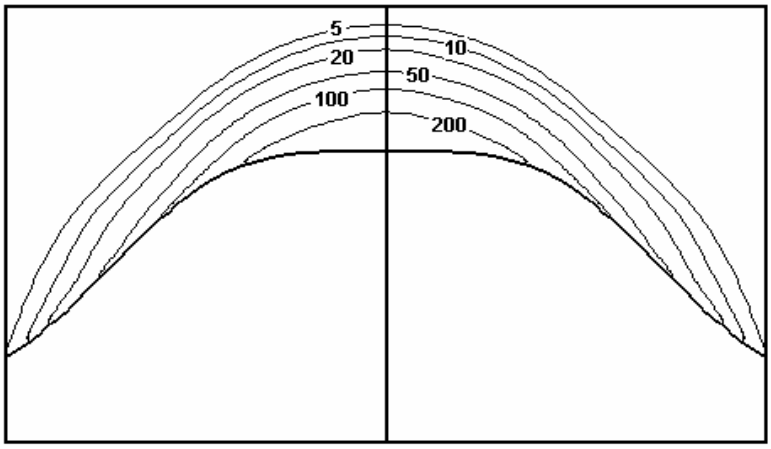
(c)

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.

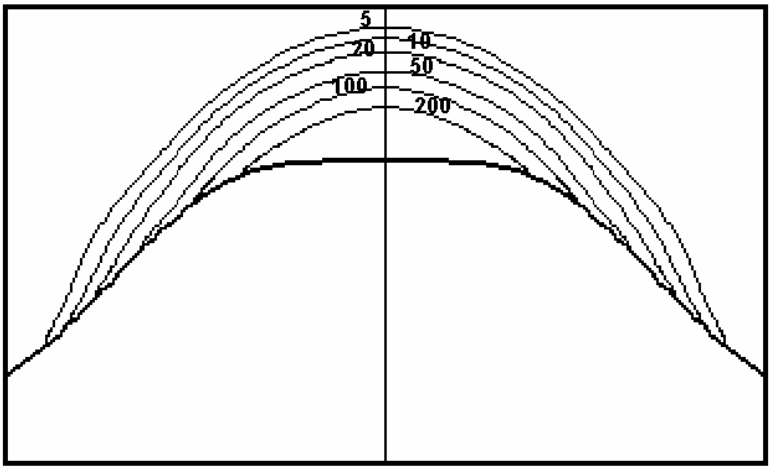
PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA



(a)



(b)



(c)

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.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

iniciais da pluma numérica) seja transportada pelo escoamento que desvia pelas laterais da colina.

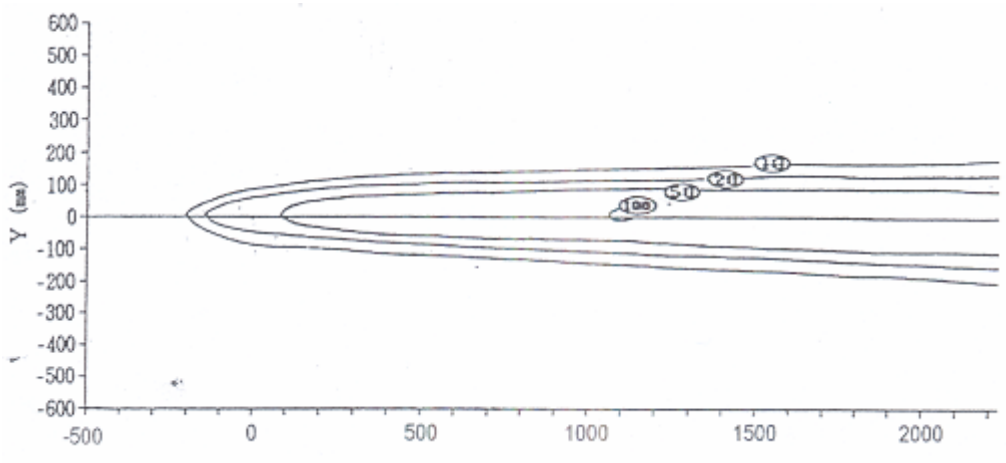
É verificado um ligeiro estreitamento dos níveis de concentração nas laterais da colina devido ao tratamento da difusividade, quando comparamos as figuras 31-(b) e (c).

As figuras 32-(a), (b) e (c) mostram os níveis de concentração no solo para o caso E0. Observando as figuras notamos que as concentrações no solo, na região mais próxima à emissão, são bem mais altas nas figuras relativas aos resultados numéricos do que naquela relativa ao experimento (fig. 32-(a)). A utilização do tratamento para a difusividade reduz ligeiramente os níveis de concentração nessa região, mas as discrepâncias com relação aos níveis obtidos experimentalmente persistem. Para as regiões mais afastadas da fonte ($x > 500mm$), os níveis obtidos numericamente se assemelham aos experimentais. O valor de x_{mod} calculado para o caso E0 foi de aproximadamente 150mm. Isto significa que o tratamento para a difusividade atuou na região entre a posição da fonte ($x = -500mm$) e a posição $x = -350mm$.

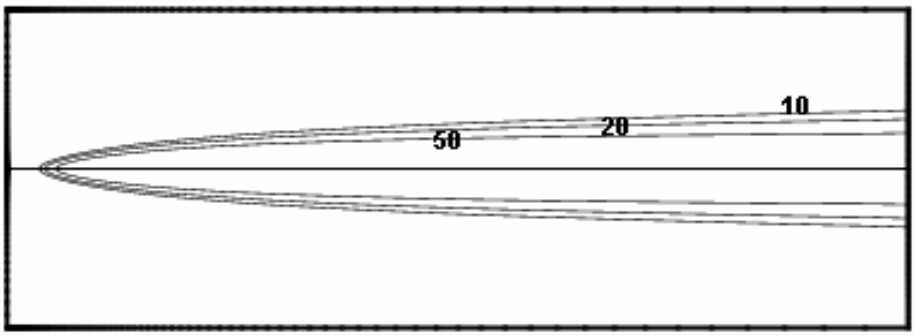
As figuras 33-(a),(b) e (c) apresentam níveis de concentração no plano de simetria $(y = 0)$. Comparando as figuras relativas aos resultados numéricos, nota-se que o formato da pluma junto à fonte emissora $(x = -500mm)$ é bastante afetado pelo tratamento para a redução da difusividade. Na figura 33-(c) o perfil vertical da pluma é mais estreito do que na figura 33-(b) na região que compreende os estágios iniciais da pluma.

As figuras 34-(a), (b) e (c) mostram os níveis de concentração em um plano transversal ao escoamento, passando pela coordenada $x = 0$. As principais diferenças entre os resultados apresentados nas figuras estão nos níveis de concentração próximos ao solo. Os resultados numéricos (figs.34-(b) e (c)) mostram a sobreestimativa das concentrações no solo em relação aos contornos experimentais (fig-(a)).

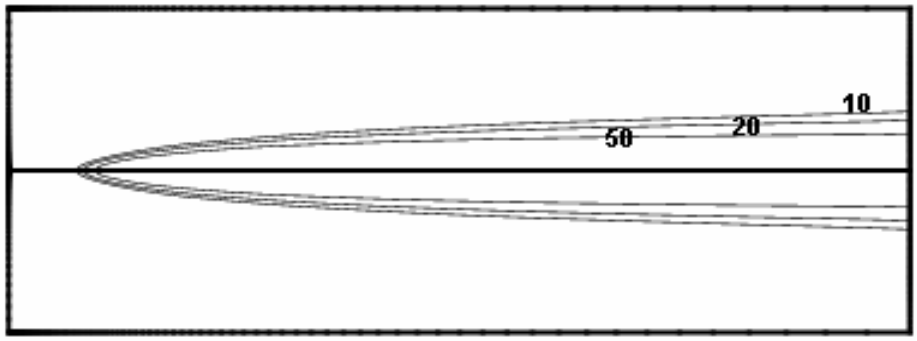
PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA



(a)



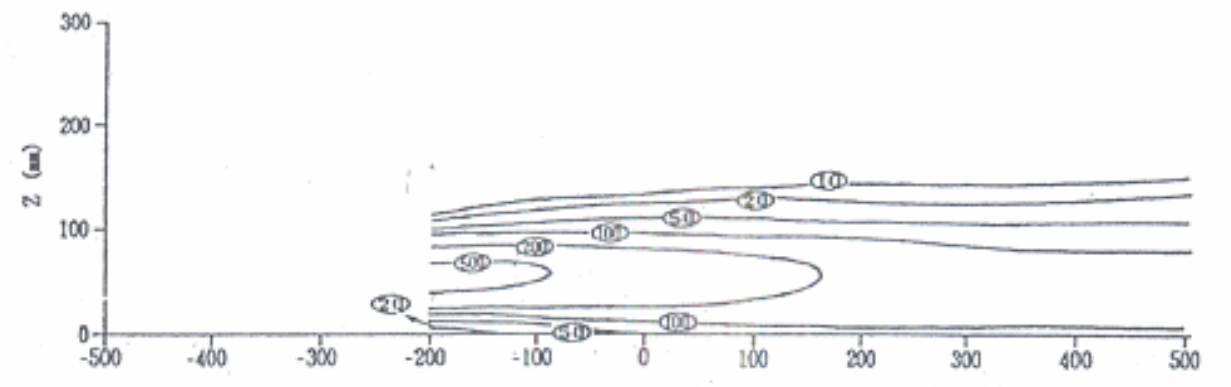
(b)



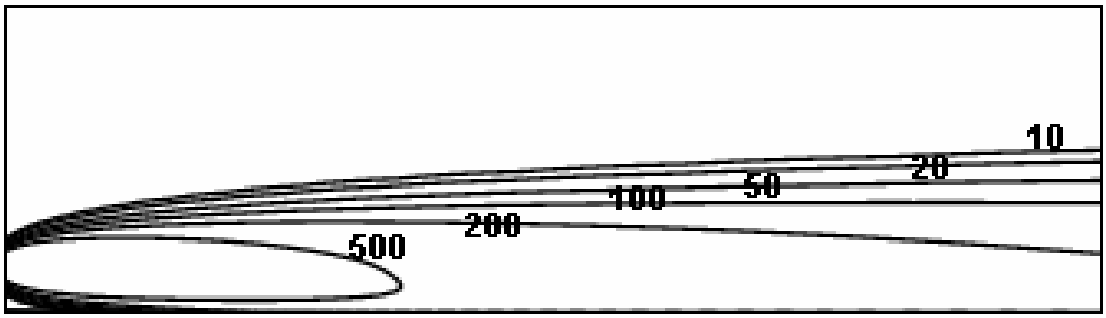
(c)

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.

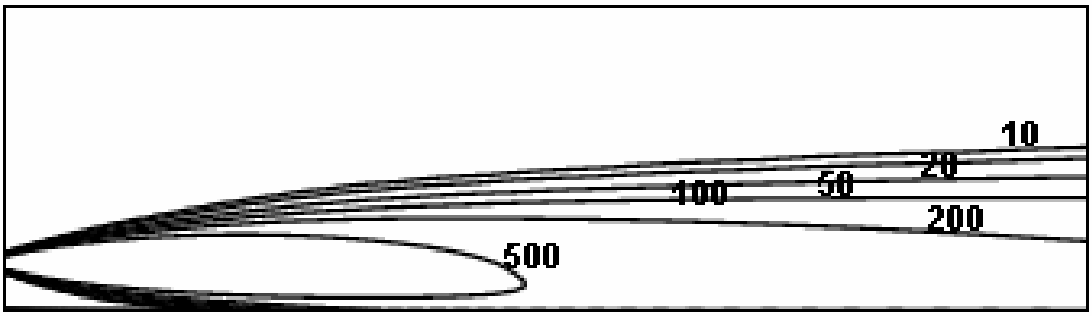
PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA



(a)



(b)



(c)

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.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

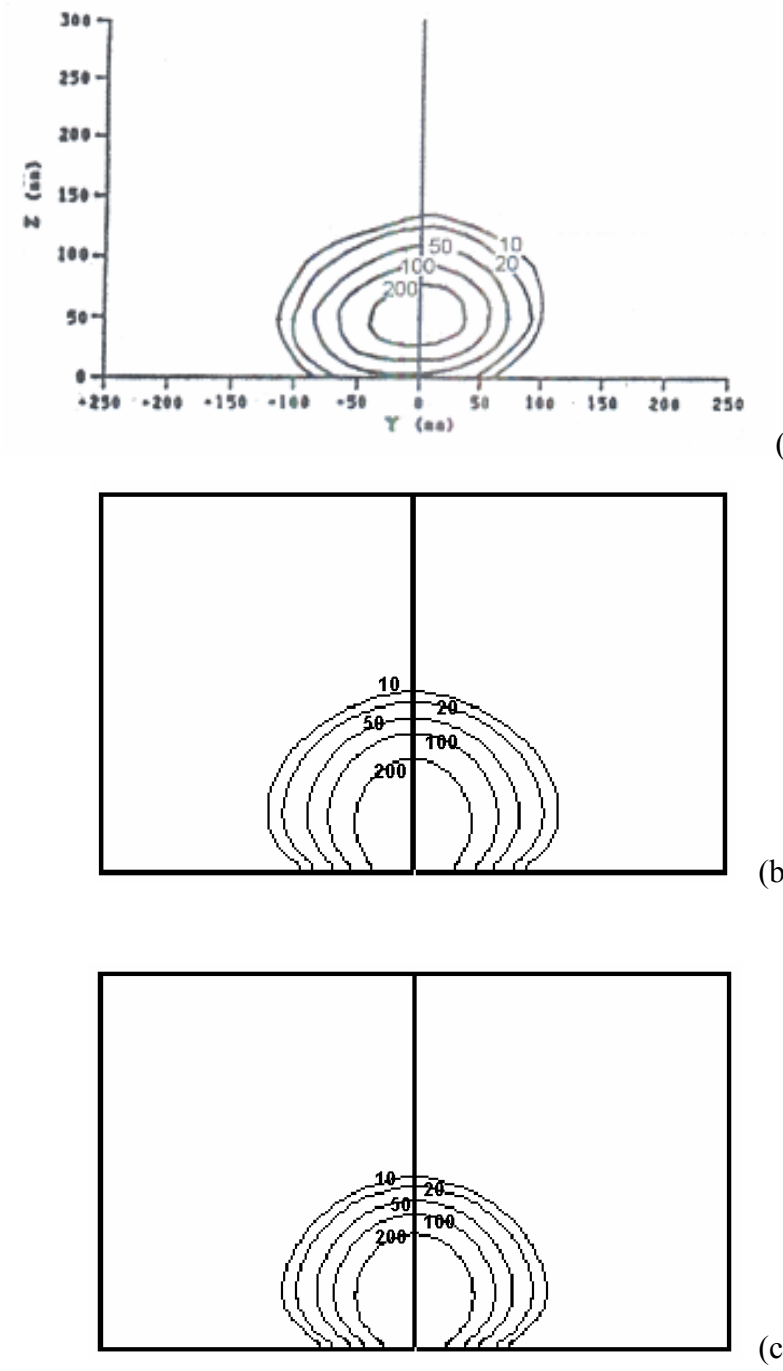


Figura 34 - Isolinhas de concentração no plano vertical transversal ($x = 0$) – caso E0: (a) experimental (Ohba, R., apud Boçon, 1998), (b) numérico sem tratamento para a difusividade e (c) numérico com o tratamento para a difusividade próximo à fonte.

De maneira geral, os resultados apresentados na forma de isolinhas de concentração para os casos D1, E2 e E0 mostraram, para regiões mais afastadas da fonte emissora, razoável concordância entre os valores numéricos (obtidos com e sem

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

o emprego do tratamento para a difusividade) e aqueles obtidos experimentalmente. Nessas regiões, a distribuição dos níveis de concentração no solo foi razoavelmente semelhante à distribuição observada nos resultados obtidos em túnel de vento. Também no plano vertical $y = 0$, os níveis de concentração relativos à pluma numérica a jusante da colina coincidiram razoavelmente com os níveis experimentais.

Apesar disso, na região próxima à fonte emissora, foram percebidas importantes discrepâncias entre os resultados numéricos e experimentais. As figuras mostraram que o emprego da modelagem numérica sem o tratamento para a difusividade resultou na sobreestimativa da dispersão vertical da pluma numérica. Devido a isso, foram previstas concentrações irrealisticamente elevadas ao nível do solo na região próxima à fonte, incluindo a região que compreende a colina.

Um aspecto interessante é que, apesar da difusividade vertical ter sido sobreestimada pela modelagem numérica sem o tratamento para a difusividade, a dispersão lateral calculada pareceu estar em razoável concordância com os resultados experimentais.

Por outro lado, o emprego do tratamento para a redução da difusividade na região próxima à fonte causou importantes alterações nos resultados numéricos. Foi observado que a redução da difusividade vertical levou a uma certa diminuição dos níveis das concentrações no solo na região próxima à emissão do poluente. Entretanto, foi verificado que os níveis de concentração no centro da pluma tornaram-se muito elevados quando comparados aos resultados experimentais e, também, aos resultados numéricos obtidos sem a utilização do tratamento para a difusividade. É possível que o tratamento tenha causado a subestimativa da difusividade lateral e, isto tenha ocasionado a excessiva elevação dos níveis de concentração no centro da pluma numérica.

A equação de transporte do poluente (equação (4.6)) representa um modelo de difusividade turbulenta isotrópica, já que o coeficiente de difusividade turbulenta é o mesmo nas direções horizontal e vertical (μ_t / Sc_t). Nos resultados apresentados, em geral, verificamos que as simulações numéricas mostraram dificuldade em representar adequadamente a dispersão do poluente na região mais próxima à fonte. Quando utilizou-se o tratamento para reduzir a excessiva dispersão na direção vertical

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

nesta região foi observado que ocorreu uma redução excessiva na dispersão lateral da pluma. Este resultado indica que para a correção deste problema seja mais apropriada a utilização de uma modelagem anisotrópica para a dispersão turbulenta do poluente.

As figuras 35 a 42 apresentam os campos de concentrações C^* calculados ao nível do solo e no plano de simetria $(y = 0)$ em diversas situações investigadas. Os resultados de concentração apresentados nas figuras foram calculados a partir de soluções de escoamento obtidas com a utilização da combinação TR-2C.

A figura 35 corresponde ao caso D1 simulado sem o emprego do tratamento para a difusividade próximo à fonte. Pode-se observar na figura a intensa dispersão vertical da pluma na região próxima da injeção do poluente.

Os resultados apresentados na figura 36, que são relativos ao caso E1, também foram obtidos sem o emprego do tratamento para a difusividade. Comparando os resultados mostrados nesta figura com aqueles da figura 35 (caso D1) pode-se notar algumas importantes diferenças entre eles. Em primeiro lugar, a dispersão vertical é menor no caso E1. Este efeito está relacionado aos menores níveis de energia cinética turbulenta (k) encontrados no caso estável. Como os níveis de turbulência são menores, a difusividade turbulenta é menor e, assim, também é menor a dispersão do poluente no caso E1.

Outro ponto que chama a atenção é que os níveis de concentração no terreno e também próximo a ele, na região da colina, são bem maiores no caso estável (E1) do que no caso neutro (D1). Uma das causas, como já foi comentado, é que a menor dispersão da pluma devido a menor difusão turbulenta de massa no caso E1 resultaria em maiores concentrações próximo à sua linha de centro. Uma outra consideração importante é que o perfil de velocidade na entrada no caso D1 é diferente do perfil na entrada do caso E1. No caso D1 o perfil de velocidade na entrada é "mais achatado" do que no caso E1. Maiores ou menores velocidades do vento têm também o efeito de provocar maior ou menor dispersão do poluente (transporte advectivo), influenciando seus níveis de concentrações.

A figura 37 mostra as concentrações para o caso D1 obtidas com o tratamento para a difusividade. Nesta figura pode-se observar que a pluma apresenta menor dispersão vertical próximo da posição de injeção do poluente do que aquela

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

observada na figura 35 (D1 sem o tratamento para a difusividade). Ainda comparando os resultados com a figura 35, percebe-se que, devido ao tratamento da difusividade, as concentrações perto do solo, na região da colina sob a linha de centro da pluma, são maiores na figura 37.

A figura 38, que corresponde ao caso E1, também apresenta resultados obtidos com a utilização do tratamento para a difusividade. Os efeitos relacionados ao emprego do tratamento para a difusividade descritos no parágrafo anterior também podem ser observados quando compara-se os resultados apresentados na figura 38 com aqueles apresentados na figura 36 (E1 sem o tratamento para a difusividade). Entretanto, é interessante observar que na presente comparação tais efeitos parecem bem menos intensos do que aqueles observados na comparação anterior, relativa ao caso neutro.

Tal observação significa que o tratamento para a redução da difusividade teve maior impacto no caso neutro (D1), ou ainda, os campos de concentrações calculados com o tratamento para a difusividade e sem o tratamento são mais semelhantes no caso estável (E1).

Uma possível explicação para este fato é que o mecanismo de difusão turbulenta tem um papel mais importante no transporte de massa no caso neutro (D1) do que no caso estável (E1). Dessa forma, os resultados conseqüentes à alteração da difusividade turbulenta, através do tratamento para a região próxima à fonte, serão mais evidentes no caso D1 do que no caso E1.

Nas figuras 39 e 40 são apresentados, respectivamente, os campos de concentrações para os casos D2 e E2 obtidos sem o tratamento para a difusividade. Também nas figuras 41 e 42 são apresentados resultados para os casos D2 e E2, porém aqui os resultados foram obtidos empregando-se o tratamento para a difusividade na região próxima à fonte. As observações feitas com relação aos resultados obtidos para colina baixa (figuras 35 a 42) permanecem apropriadas para os resultados obtidos para colina alta.

Além disso, nota-se que a presença da colina alta ocasiona níveis ainda mais elevados de concentração no solo do que nos casos de colina baixa, como resultado do encontro da pluma transportada no escoamento e o obstáculo (colina).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

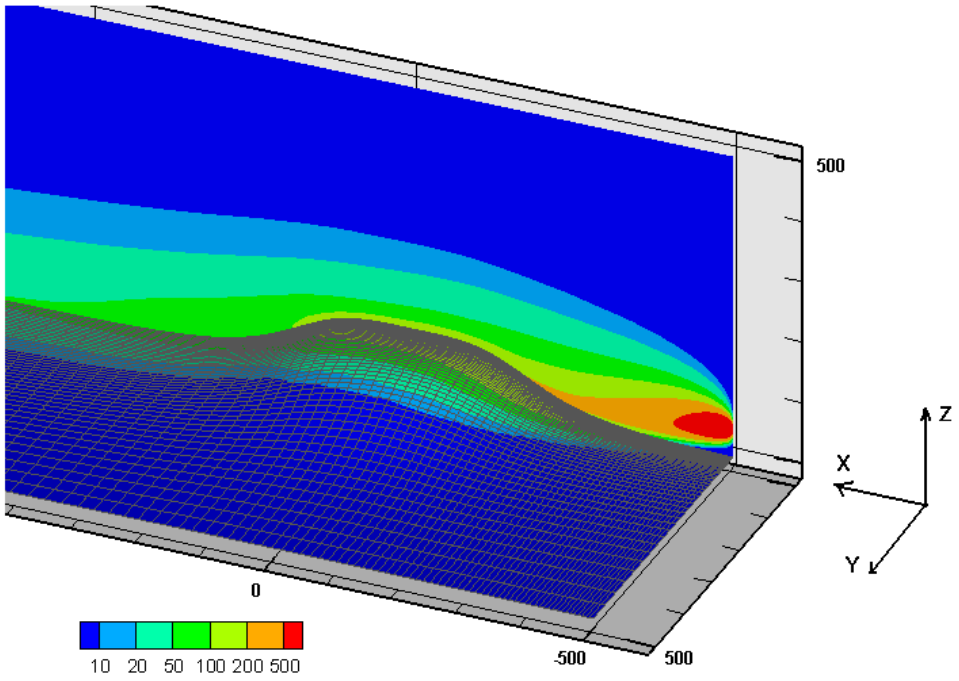


Figura 35 - Campos de concentrações (C^*) ao nível do solo e no plano de simetria – caso D1. A simulação não utilizou o tratamento para a difusividade

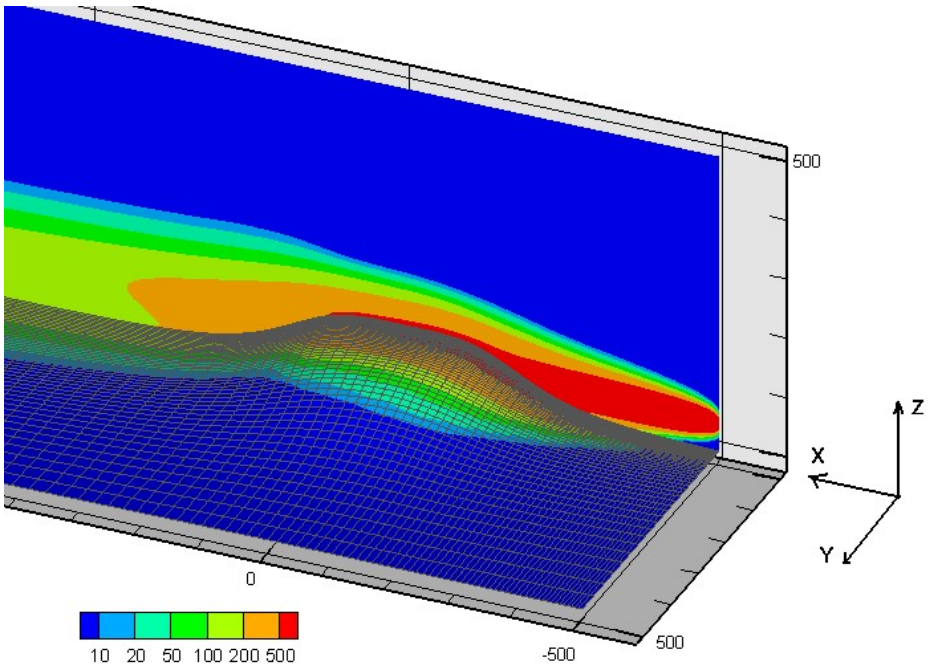


Figura 36 - Campos de concentrações (C^*) ao nível do solo e no plano de simetria – caso E1. A simulação não utilizou o tratamento para a difusividade.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

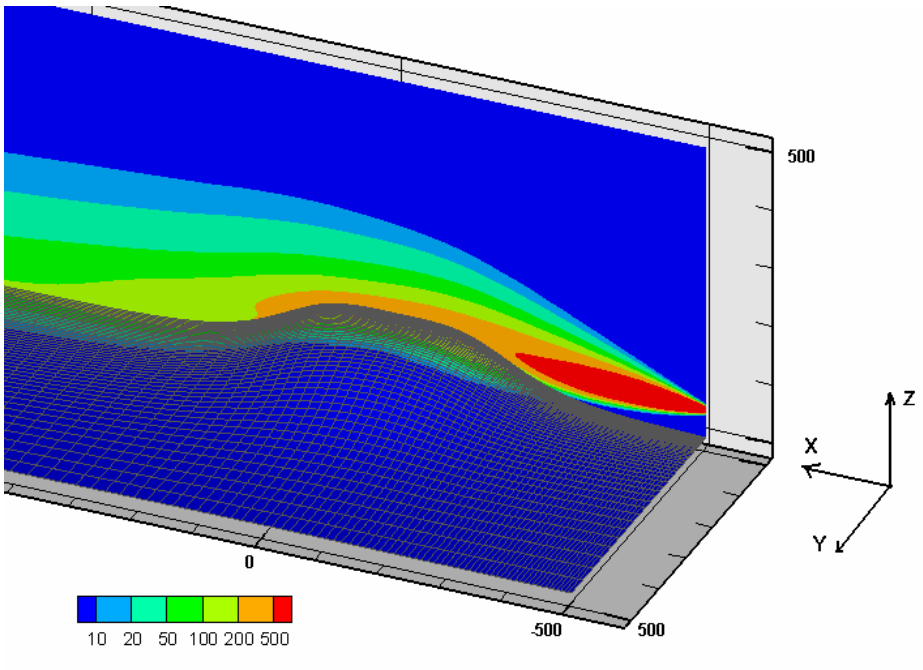


Figura 37 - Campos de concentrações (C^*) ao nível do solo e no plano de simetria – caso D1. A simulação utilizou o tratamento para a difusividade

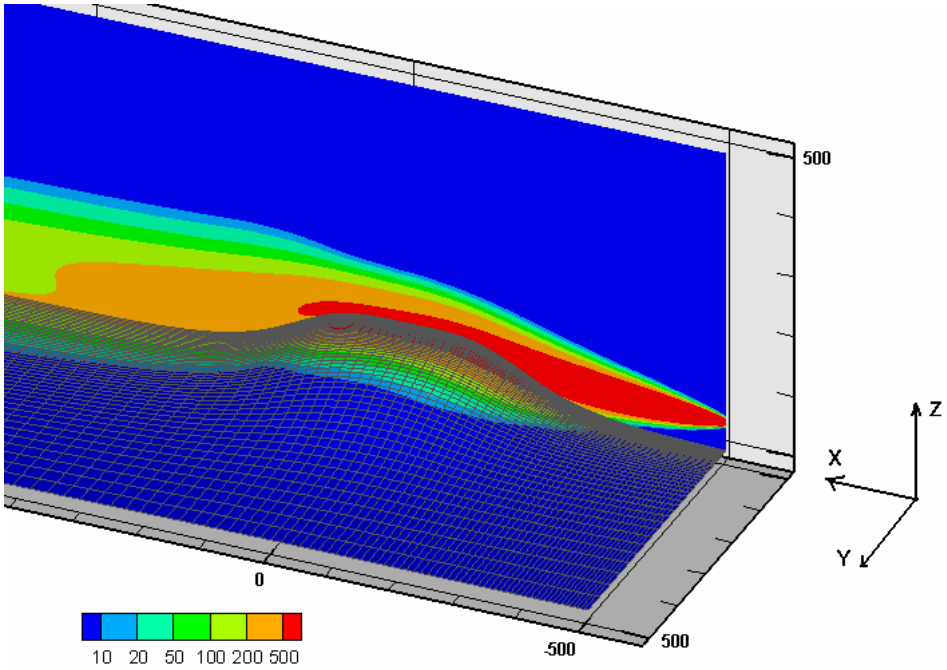


Figura 38 - Campos de concentrações (C^*) ao nível do solo e no plano de simetria – caso E1. A simulação utilizou o tratamento para a difusividade

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

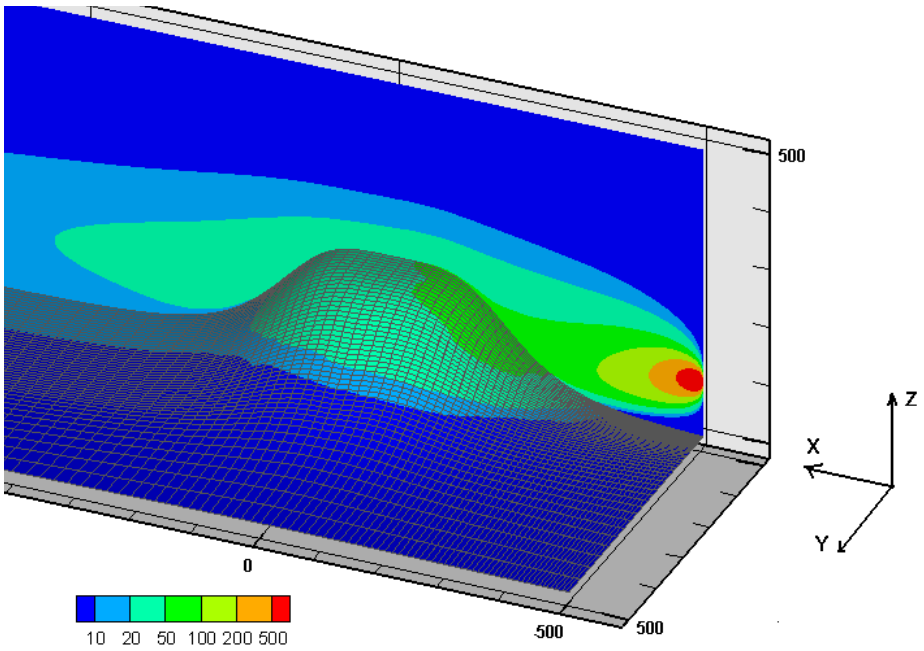


Figura 39 - Campos de concentrações (C^*) ao nível do solo e no plano de simetria – caso D2. A simulação não utilizou o tratamento para a difusividade.

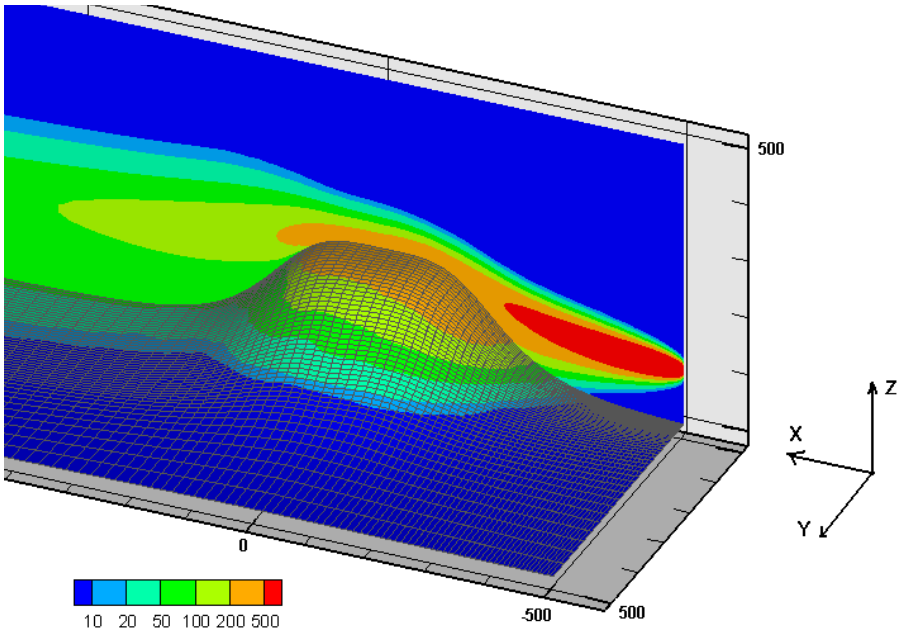


Figura 40 - Campos de concentrações (C^*) ao nível do solo e no plano de simetria – caso E2. A simulação não utilizou o tratamento para a difusividade.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

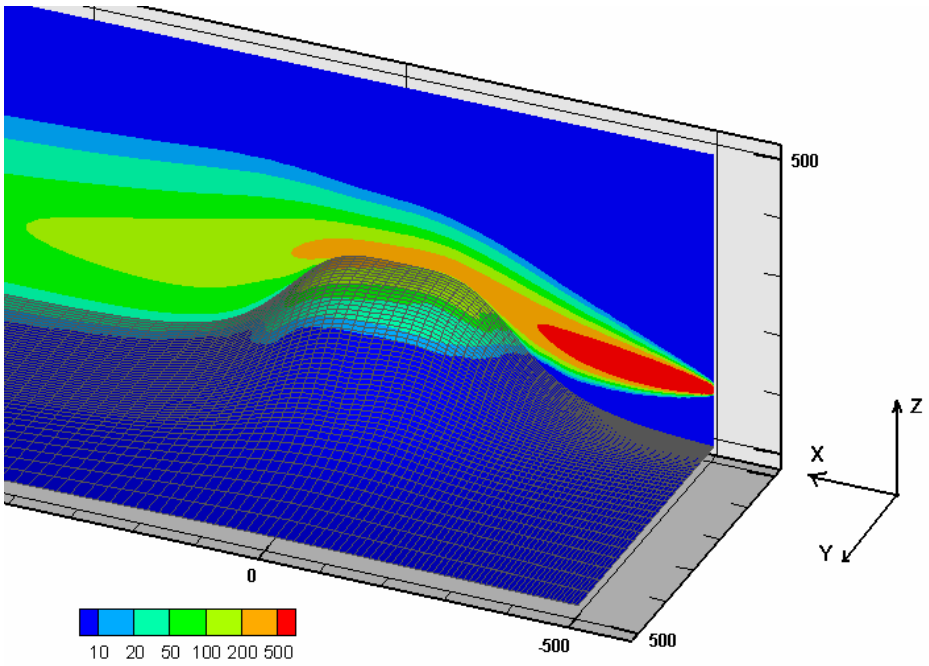


Figura 41 - Campos de concentrações (C^*) ao nível do solo e no plano de simetria – caso D2. A simulação utilizou o tratamento para a difusividade

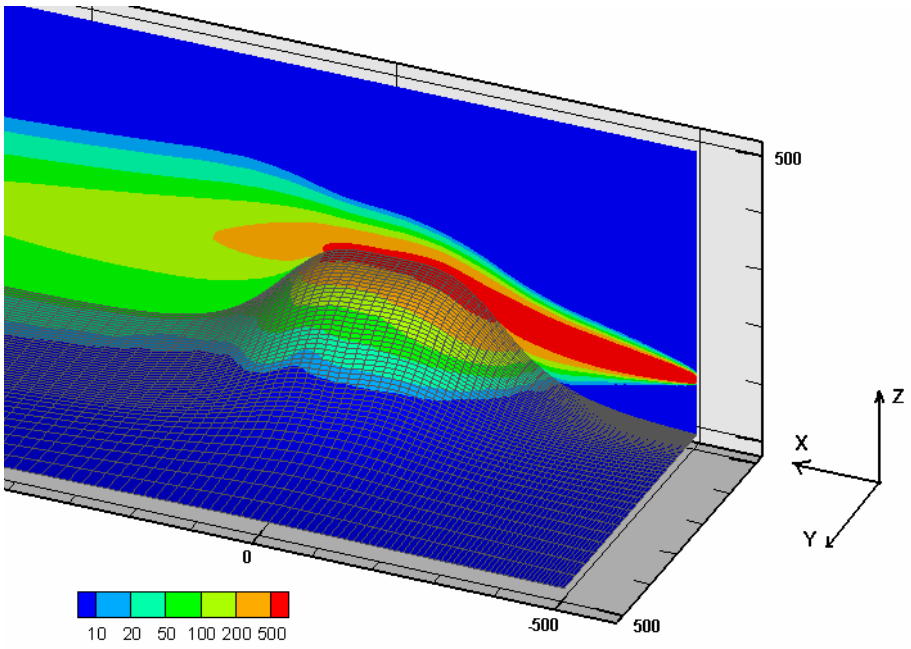


Figura 42 - Campos de concentrações (C^*) ao nível do solo e no plano de simetria – caso E2. A simulação utilizou o tratamento para a difusividade

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

5.3.2.2.
Concentração – Perfis Verticais e Horizontais

A figura 43 apresenta valores de concentração ao nível do solo, ao longo da direção x, para $y = 0$, referentes ao caso D1. Os resultados numéricos obtidos com as diferentes combinações testadas sem o emprego do tratamento para a difusividade na região próxima à fonte, assim como os dados experimentais, mostram um acentuado crescimento dos valores de concentração ao nível do solo na região próxima à emissão do poluente. Após o pico de concentração os valores decaem gradativamente. Percebe-se que a concordância com os valores medidos são melhores nos estágios mais afastados da fonte $(x > 200mm)$. Os valores máximos calculados de concentração ao nível do solo estão superestimados em relação àqueles determinados experimentalmente. Além disso, nota-se que as concentrações ao nível do solo previstas numericamente crescem em uma região mais próxima à fonte do que aquelas previstas experimentalmente.

Na figura seguinte, figura 44, observa-se que o acentuado crescimento das concentrações calculadas ao nível do solo na região próxima à emissão coincide com o crescimento verificado no experimento em túnel de vento. Este resultado deve-se ao emprego do tratamento da difusividade na região próxima à fonte. Como conseqüência, as posições onde são encontrados os valores numéricos máximos de concentração são mais próximas das posições para os máximos experimentais do que na figura 43. No entanto, nota-se também que, devido ao emprego do tratamento, os valores máximos das concentrações previstas ao nível do solo tornam-se ainda mais elevados e distantes dos valores experimentais. Além disso, as concentrações ao nível do solo nas regiões mais afastadas da fonte também apresentam-se sobreestimadas.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

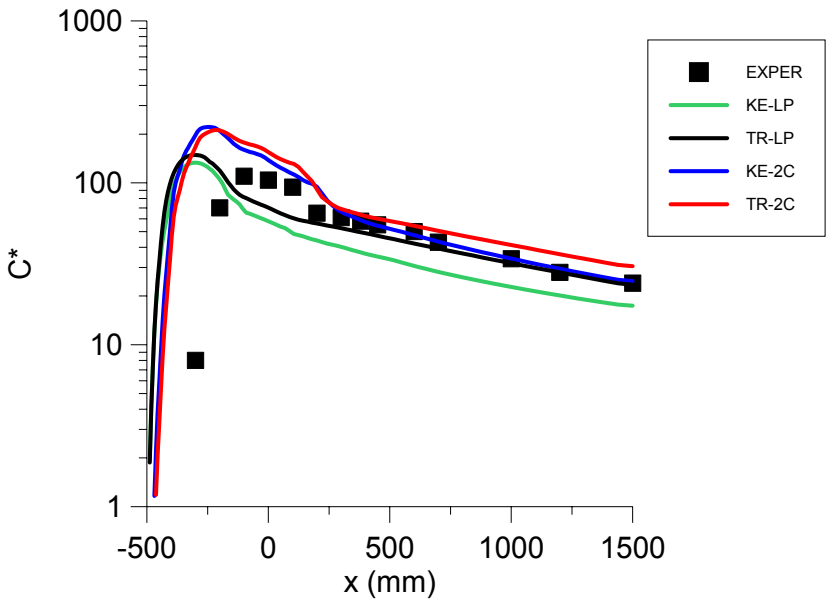


Figura 43 – Máximas concentrações (C*) ao nível do solo para o caso D1 – as simulações não utilizaram o tratamento para a difusividade.

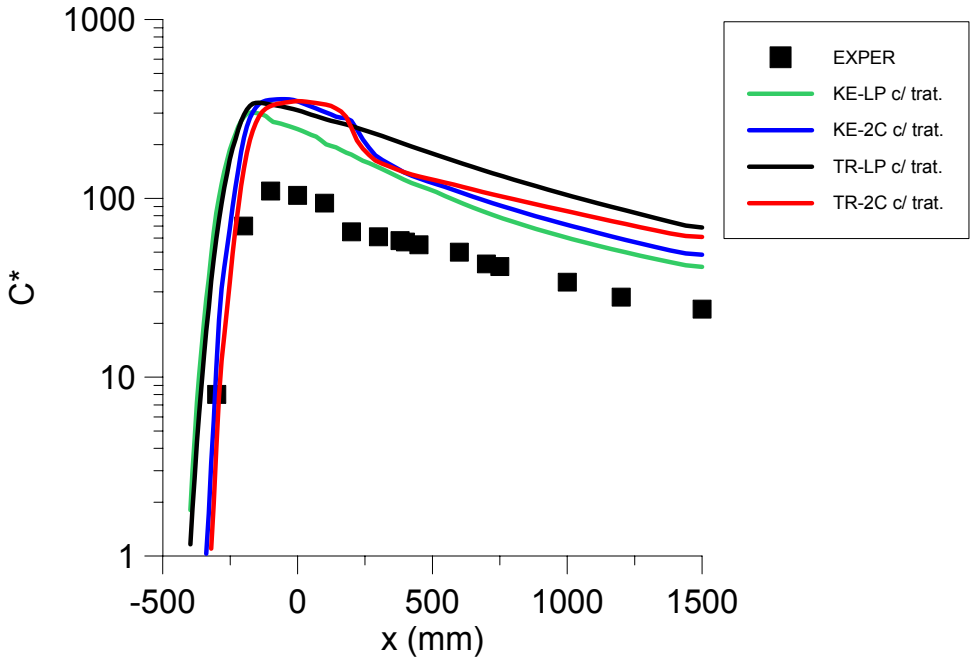


Figura 44 - Máximas concentrações (C*) ao nível do solo para o caso D1 – as simulações utilizaram o tratamento para a difusividade próximo à fonte.

As figuras 45 e 46 apresentam perfis verticais de concentração normalizada para o caso D1 para diversas posições x no plano de simetria $(y = 0)$. Verifica-se

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

que os perfis verticais calculados sem o uso do tratamento para a difusividade tornam-se mais próximos daqueles obtidos através do experimento nos estágios mais distantes da fonte. Na posição $x = -200mm$, as curvas numéricas mostram que as maiores concentrações encontram-se ao nível do solo. Enquanto a linha de centro da pluma obtida experimentalmente se eleva até aproximadamente $z = 100mm$ (a emissão ocorre em $z = 50mm$), as plumas previstas numericamente, sem o tratamento para a difusividade, se dispersam excessivamente próximo à fonte.

Pode também ser observado que o emprego do tratamento para difusividade gerou uma sobreestimativa dos valores máximos de concentração no plano de simetria em todas as posições x investigadas.

A figura 47 apresenta valores de concentração ao nível do solo, ao longo da direção x para $y = 0$, referente ao caso E1. Pode-se notar que, de maneira geral, os valores máximos de concentração calculados (sem o tratamento para a difusividade) estão superestimados em comparação com os dados experimentais. As curvas numéricas apresentam um acentuado crescimento dos valores de concentração na região mais próxima à fonte. Os valores máximos de concentração ao nível do solo estão em uma região um pouco anterior ao topo da colina $(x = 0)$. A jusante da colina ocorre uma redução dos níveis de concentração no solo com o afastamento em relação à fonte.

O efeito do tratamento da difusividade próxima à fonte pode ser verificado na figura 48. O acentuado crescimento das concentrações na região próxima à fonte é deslocado para a direita em comparação às curvas numéricas mostradas na figura 47. No entanto, mesmo com o tratamento para a redução da difusividade, o crescimento acentuado das concentrações no solo previstas numericamente ocorre em uma região anterior àquela observada experimentalmente. Ainda assim, as posições onde são encontrados os valores numéricos máximos de concentração são mais próximas das posições para os máximos experimentais como conseqüência da utilização do tratamento.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

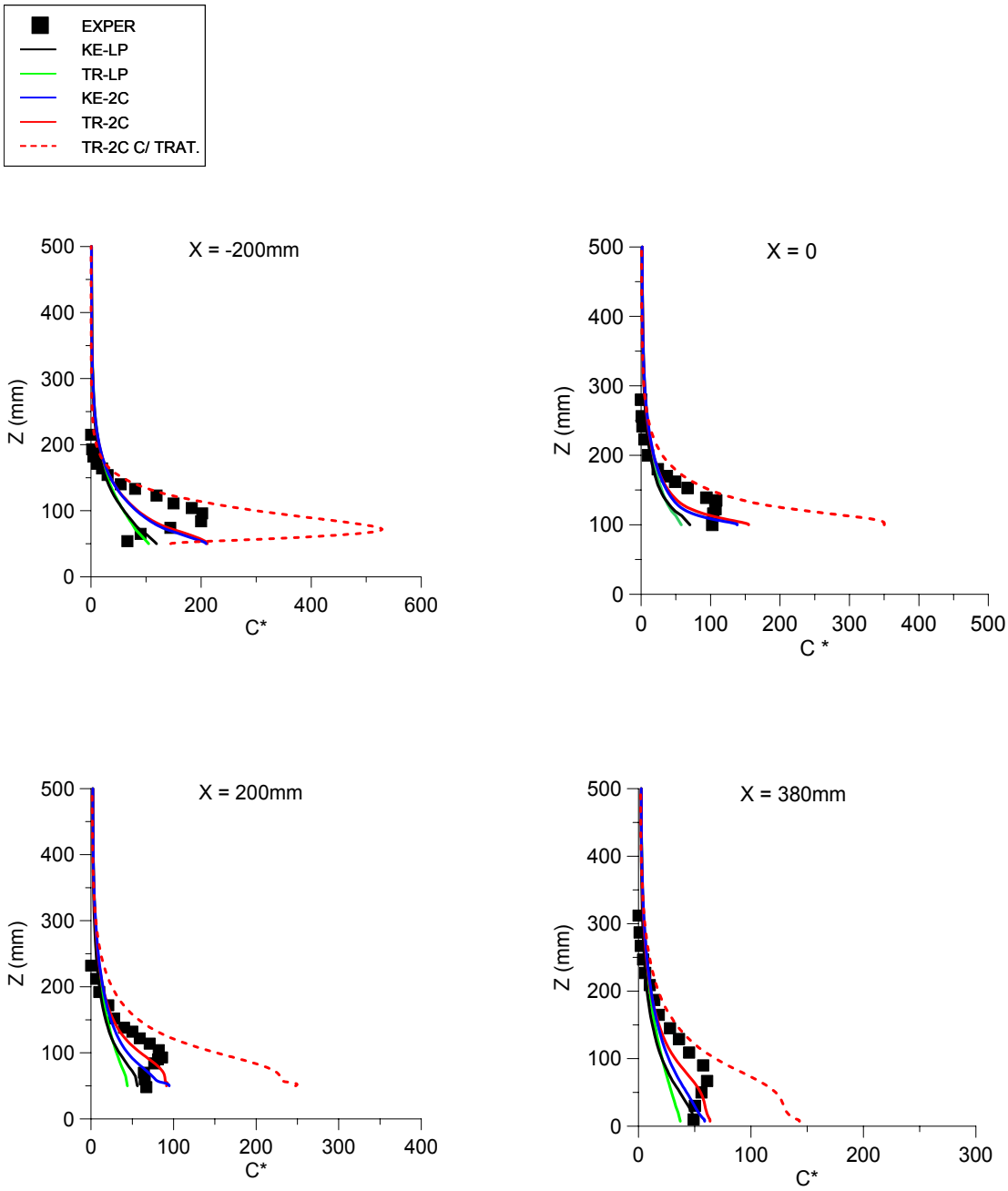


Figura 45 - Perfis verticais de concentração (C^*) no plano de simetria $(y = 0)$ - Caso D1.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

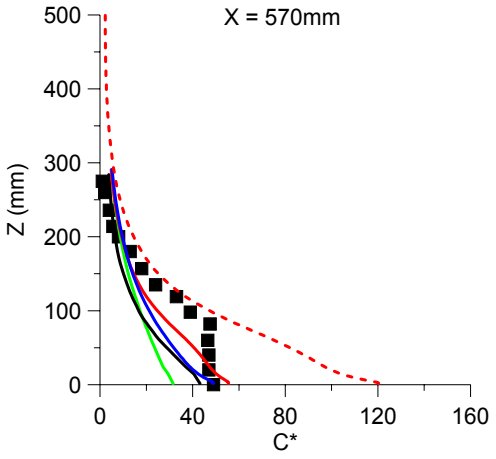


Figura 46 - Perfis verticais de concentração (C^*) no plano de simetria $(y=0)$ - Caso D1 (continuação).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

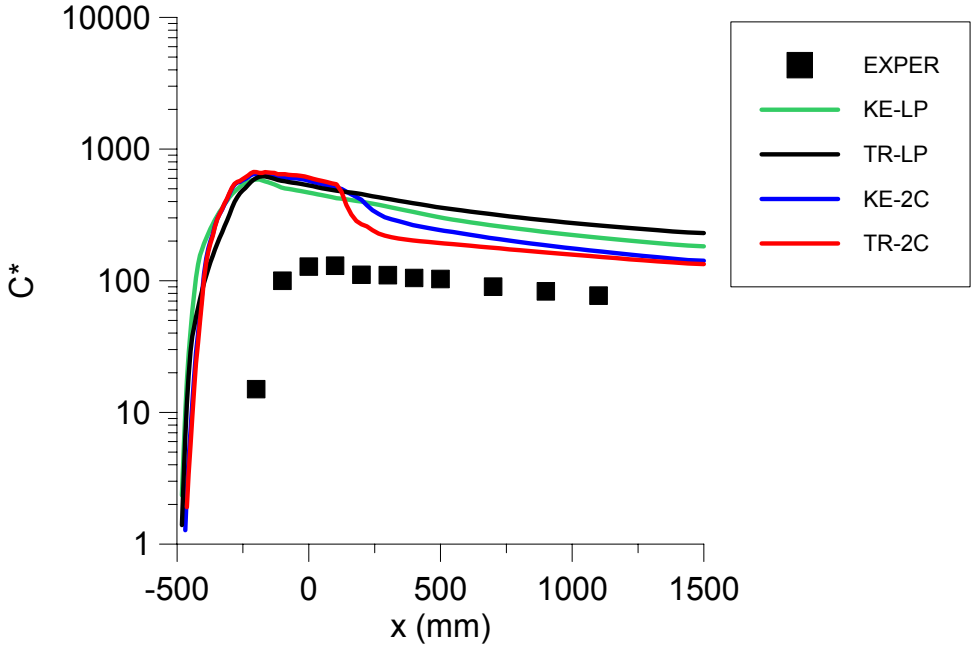


Figura 47 - Máximas concentrações (C^*) ao nível do solo para o caso E1 – as simulações não utilizaram o tratamento para a difusividade.

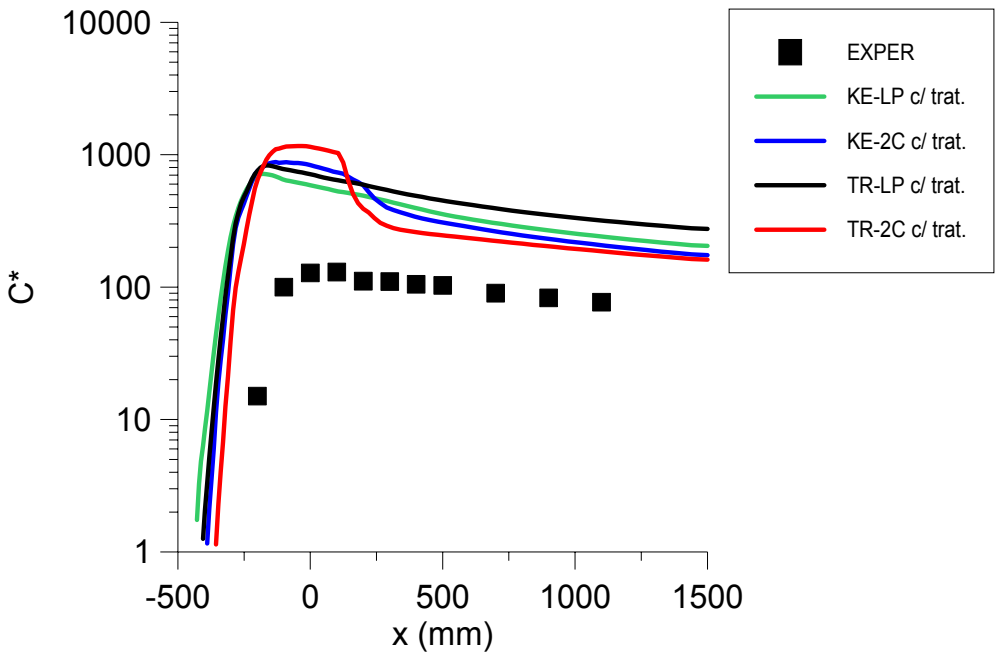


Figura 48 - Máximas concentrações (C^*) ao nível do solo para o caso E1 – as simulações utilizaram o tratamento para a difusividade próximo à fonte.

A figura 49 apresenta perfis verticais de concentração para o caso E1. Nas posições $x = -200mm$ e $x = 0$, os perfis obtidos numericamente apresentam altos valores de concentração na região mais próxima ao solo, enquanto nos perfis experimentais é possível identificar a elevação da linha de centro da pluma conforme esta avança sobre a colina. Para posições mais afastadas em relação à fonte ($x = 500mm$), os resultados através das simulações TR-2C com e sem o tratamento ficam mais parecidos entre si.

As figuras 50 e 51 apresentam as concentrações ao nível do solo para o caso D2, que representa o estudo em colina alta em condições neutras. As simulações que produziram os resultados apresentados na figura 51 utilizaram o tratamento para a difusividade enquanto aquelas referentes à figura 50 não o utilizaram. Na figura 50 percebemos que as concentrações máximas no solo foram subestimadas numericamente, já a figura 51 mostra que a utilização do tratamento para a difusividade próxima à fonte gerou uma superestimativa dos níveis de concentração calculados, quando comparados aos valores experimentais.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

Pode-se notar na figura 51 uma grande variação dos resultados numéricos entre si. As concentrações calculadas no solo relativas à TR-LP apresentam valores mais elevados que aqueles calculados com a TR-2C.

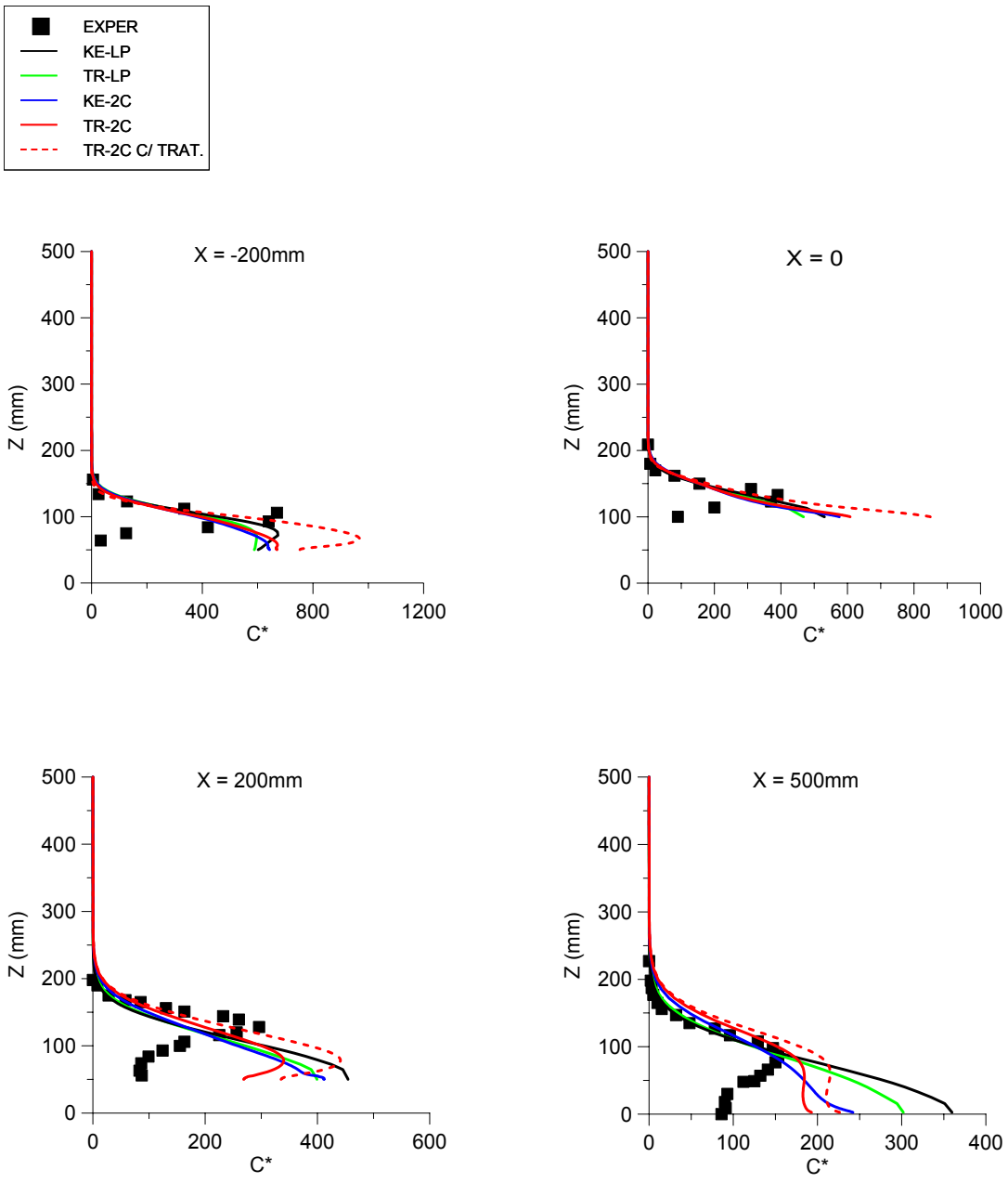


Figura 49 - Perfis verticais de concentração (C^*) no plano de simetria $(y = 0)$ - Caso E1.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

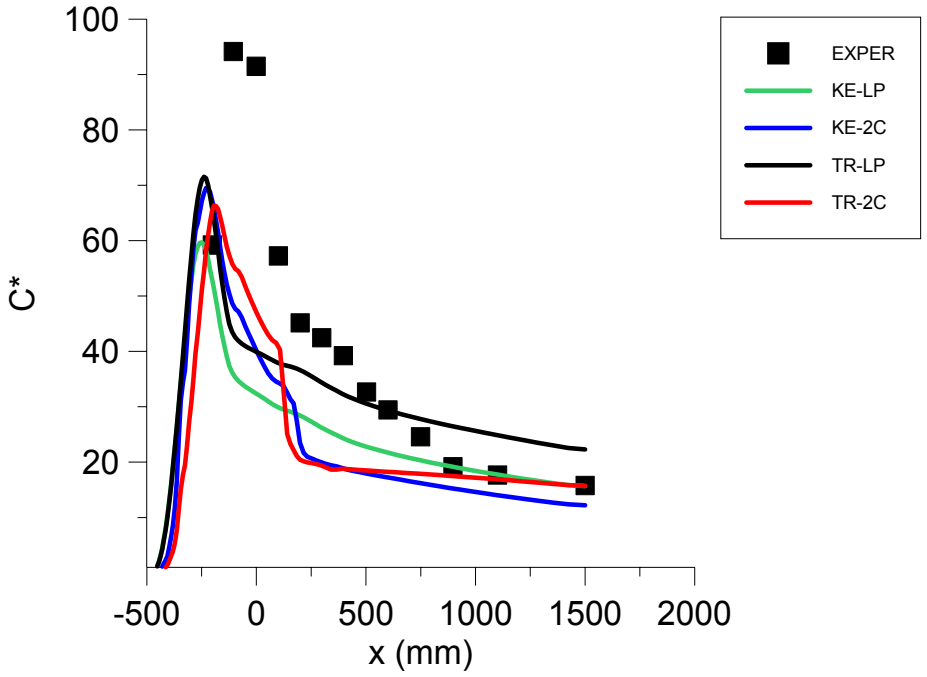


Figura 50 - - Máximas concentrações (C^*) ao nível do solo para o caso D2 – as simulações não utilizaram o tratamento para a difusividade.

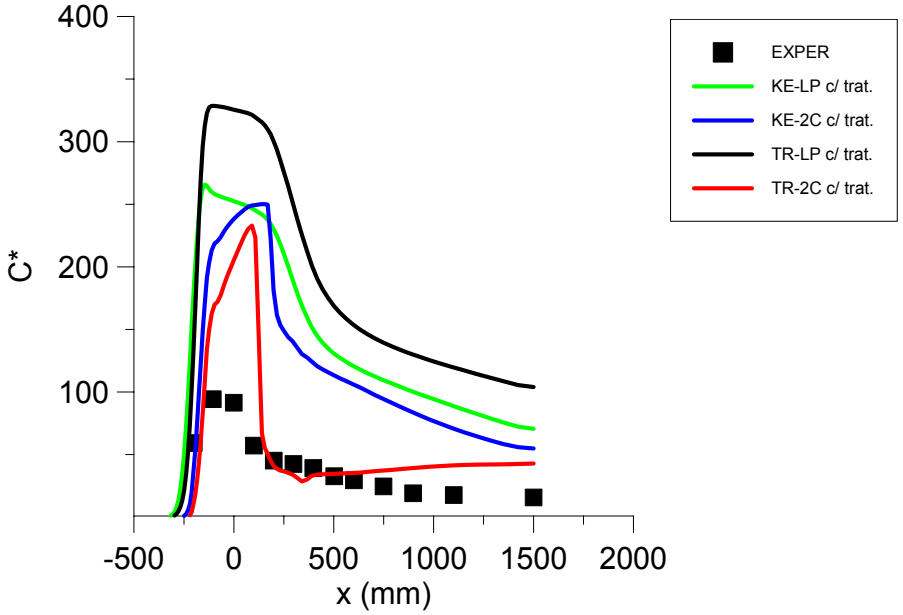


Figura 51 - Máximas concentrações (C^*) ao nível do solo para o caso D2 – as simulações utilizaram o tratamento para a difusividade próximo à fonte.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

A figura 52 apresenta perfis verticais de concentração experimentais e numéricos em diversas posições x para o caso D2, no plano $y = 0$. Observando os resultados apresentados notamos que o tratamento da difusividade na região próxima à fonte resultou na superestimativa dos valores máximos de concentração nos diversos perfis apresentados. Com relação às simulações que não empregaram o tratamento, a comparação com os valores experimentais mostra que nas posições $x = -200mm$ e $x = 0$ as concentrações numéricas estão subestimadas. Já nas posições mais afastadas da emissão ($x = 600mm$ e $x = 900mm$) notamos que os resultados numéricos aproximam-se dos experimentais.

Na posição $x = -200mm$ também podemos observar que a elevação da pluma (altura da linha de centro da pluma em relação ao solo) prevista com a modelagem TR-2C com o tratamento para a difusividade está de acordo com aquela observada no experimento. Nesta posição x, a linha de centro da pluma numérica está em torno de $z = 160mm$ (lembrando que para este caso a emissão ocorre em $z = 100mm$), bastante semelhante à linha de centro da pluma experimental.

As figuras 54 e 55 apresentam, respectivamente, as concentrações C^* ao nível do solo em $y = 0$ calculadas sem o tratamento para a difusividade e com o tratamento, para o caso E2. Em ambas as figuras nota-se que as concentrações máximas calculadas estão superestimadas em relação aos valores experimentais. Ainda assim, a posição x relativa ao valor máximo de concentração no solo calculada nas simulações TR-2C e KE-2C é próxima àquela verificada no experimento. Os campos de escoamento obtidos nessas duas simulações foram obtidos com a utilização do tratamento em duas camadas.

É interessante notar nas duas figuras que os resultados relativos à TR-2C se aproximam dos valores experimentais a partir da coordenada $x = 200mm$. Para valores menores de x, as concentrações no solo foram superestimadas.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

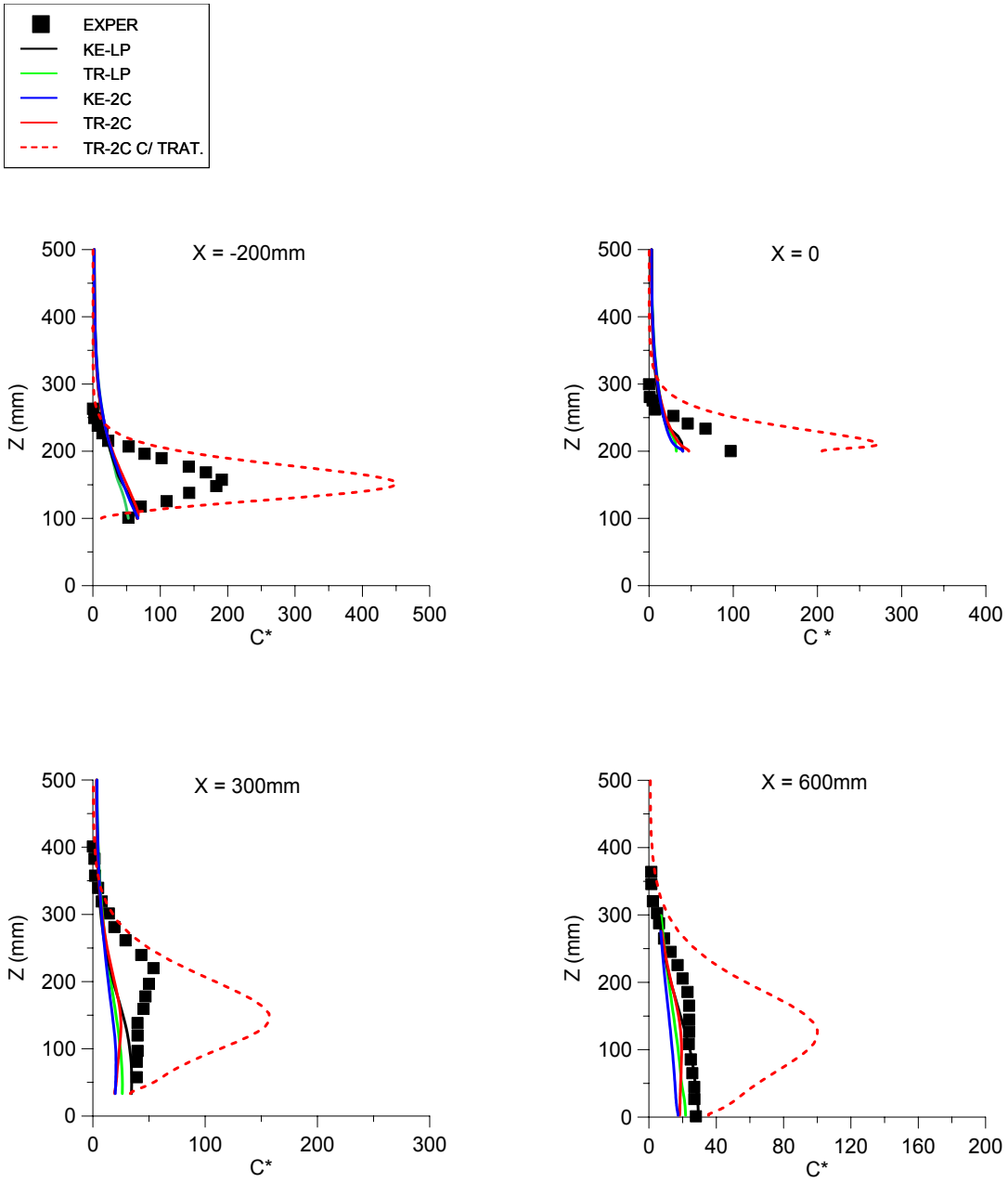


Figura 52 - Perfis verticais de concentração (C^*) no plano de simetria $(y = 0)$ - Caso D2.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

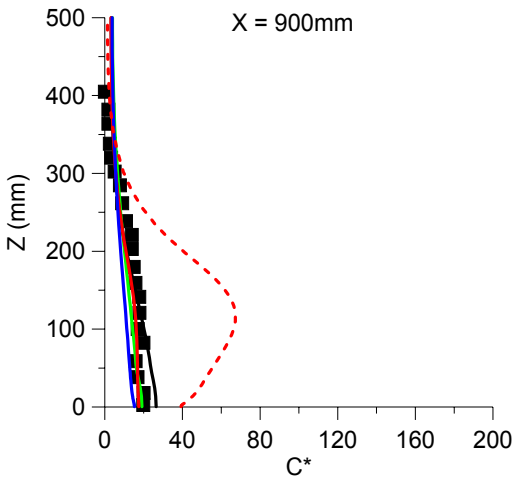


Figura 53 - Perfis verticais de concentração (C^*) no plano de simetria $(y = 0)$ - Caso D2 (continuação).

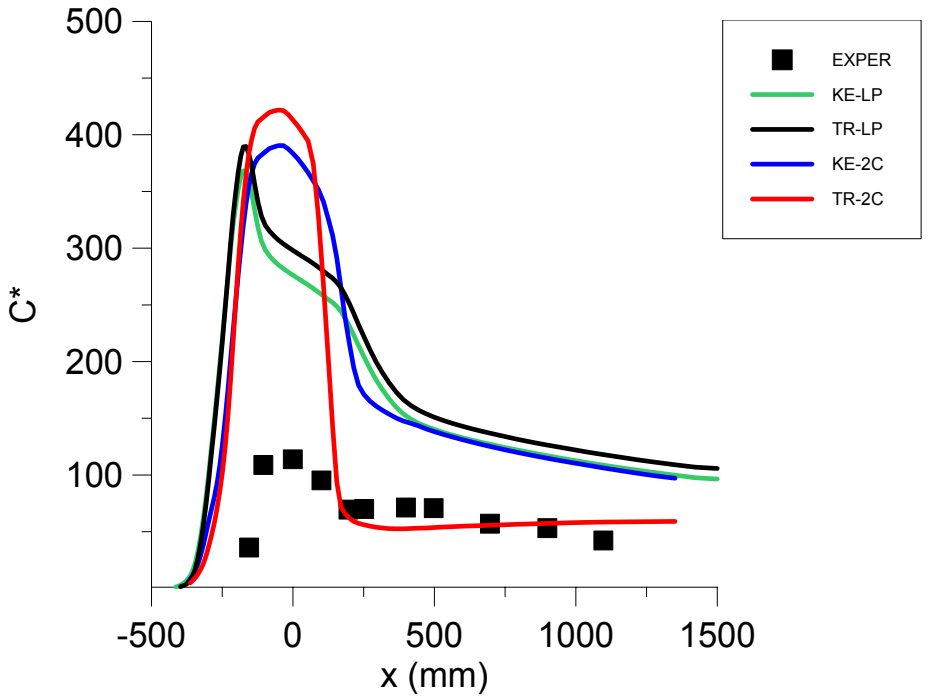


Figura 54 - Máximas concentrações (C^*) ao nível do solo para o caso E2 – as simulações não utilizaram o tratamento para a difusividade.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

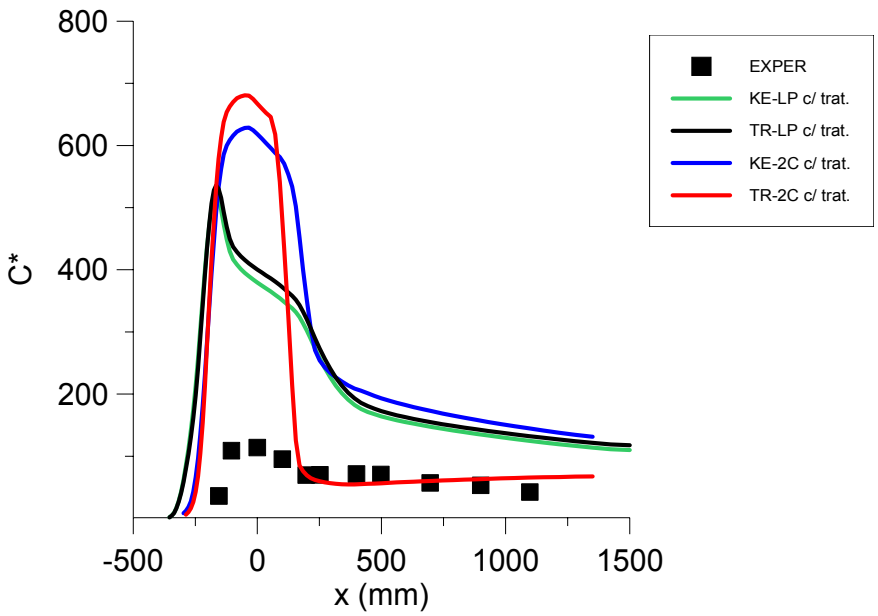


Figura 55 - Máximas concentrações (C^*) ao nível do solo para o caso E2 – as simulações utilizaram o tratamento para a difusividade próximo à fonte.

A figura 56 apresenta os perfis verticais de concentração $C*$ no plano $y = 0$ em diversas posições x para o caso E2. Podemos observar que os resultados relativos à TR-2C (com o tratamento para a difusividade e sem o tratamento) ficam mais parecidos entre si nos estágios mais avançados da pluma. É também nessa região que os resultados obtidos com essas simulações mais se aproximam dos resultados experimentais. Como pode ser observado nas posições $x = 200mm$ e $x = 500mm$, os valores de concentração ao nível do solo calculados nas simulações TR-2C estão mais parecidos com os valores experimentais do que os resultados obtidos com as demais combinações.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

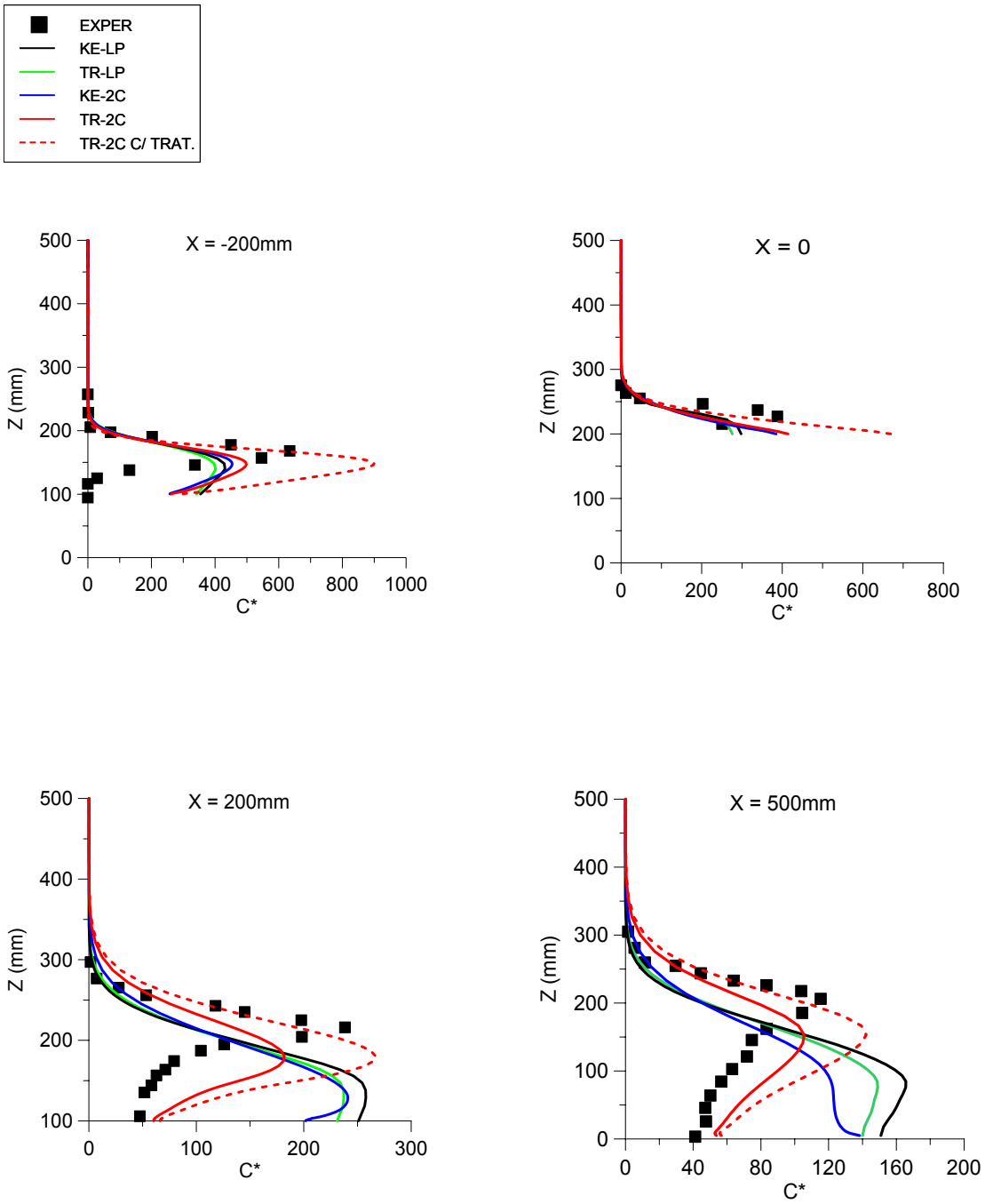


Figura 56 - Perfis verticais de concentração (C^*) no plano de simetria $(y = 0)$ - Caso E2.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

A figura 57 apresenta os valores das concentrações ao nível do solo para o caso D0 (terreno plano e estabilidade neutra) obtidos sem o tratamento para a difusividade. Já na figura 58 são apresentadas as concentrações calculadas com o tratamento para a difusividade próxima à fonte. Em ambas as figuras, podemos notar que os modelos numéricos superestimam os valores máximos de concentração ao nível do solo. Na figura 57 observa-se que os valores máximos de concentração obtidos numericamente situam-se em coordenadas x anteriores àquelas verificadas experimentalmente. Já na figura 58 nota-se que os valores máximos de concentração calculados no solo, empregando-se o tratamento para a difusividade próxima à fonte, estão em posições mais próximas daquelas verificada experimentalmente.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

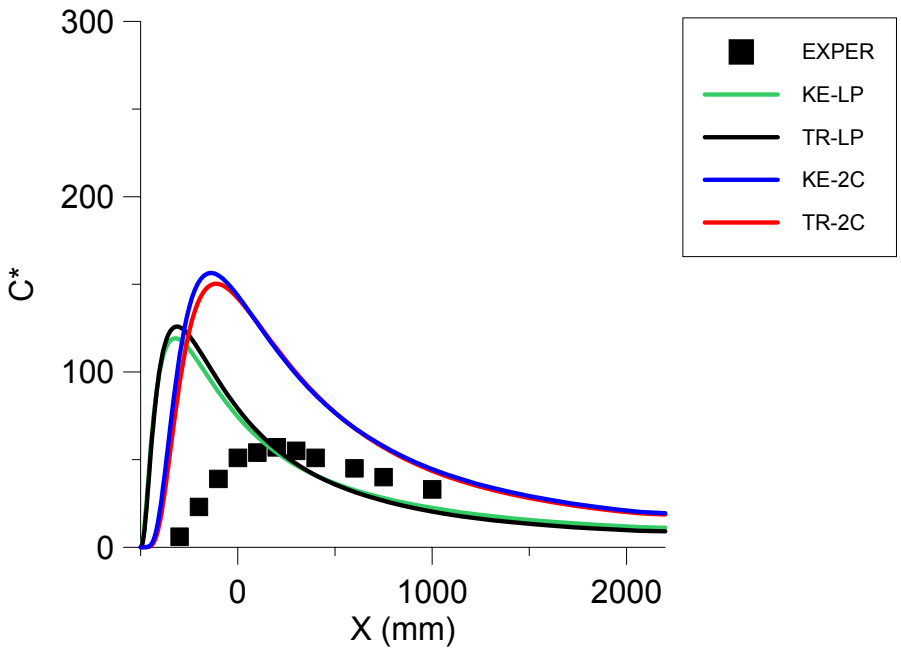


Figura 57 - Máximas concentrações (C^*) ao nível do solo para o caso D0 – as simulações não utilizaram o tratamento para a difusividade.

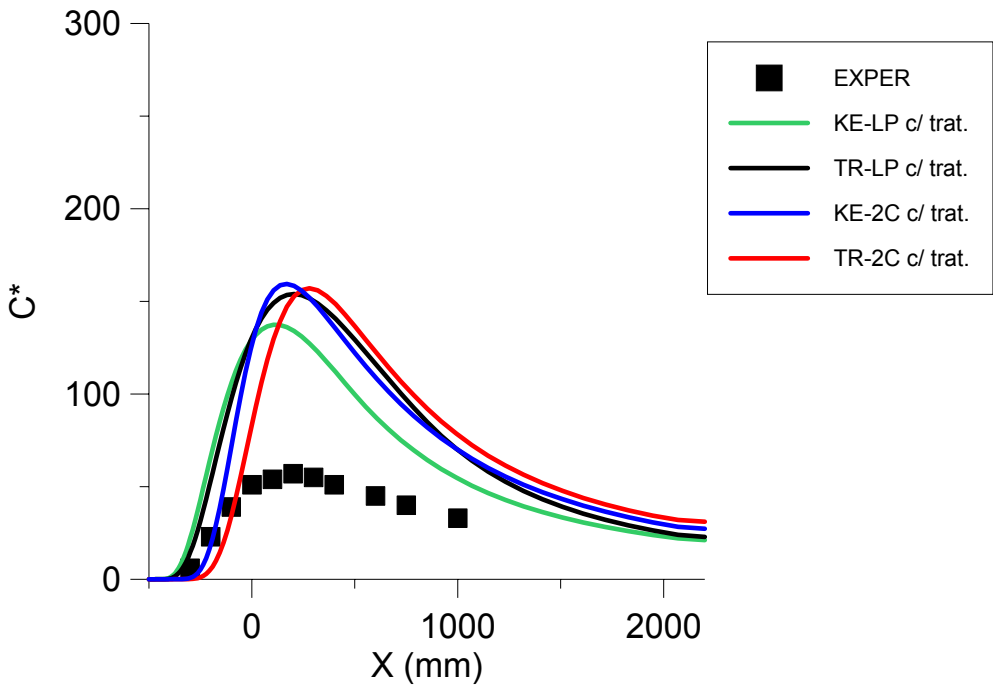


Figura 58 - Máximas concentrações (C^*) ao nível do solo para o caso D0 – as simulações utilizaram o tratamento para a difusividade próximo à fonte.

As figuras 61 e 62 referem-se às concentrações ao nível do solo para o caso E0. A primeira figura apresenta os valores numéricos obtidos sem o tratamento para a difusividade próxima à fonte. Os resultados relativos à segunda foram obtidos utilizando-se o tratamento para a difusividade nos cálculos das concentrações. Nas duas figuras pode-se perceber que as concentrações ao nível do solo foram superestimadas pelos cálculos quando comparadas aos valores experimentais. Com o afastamento em relação à fonte, os valores calculados de concentração no solo se reduzem consideravelmente.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

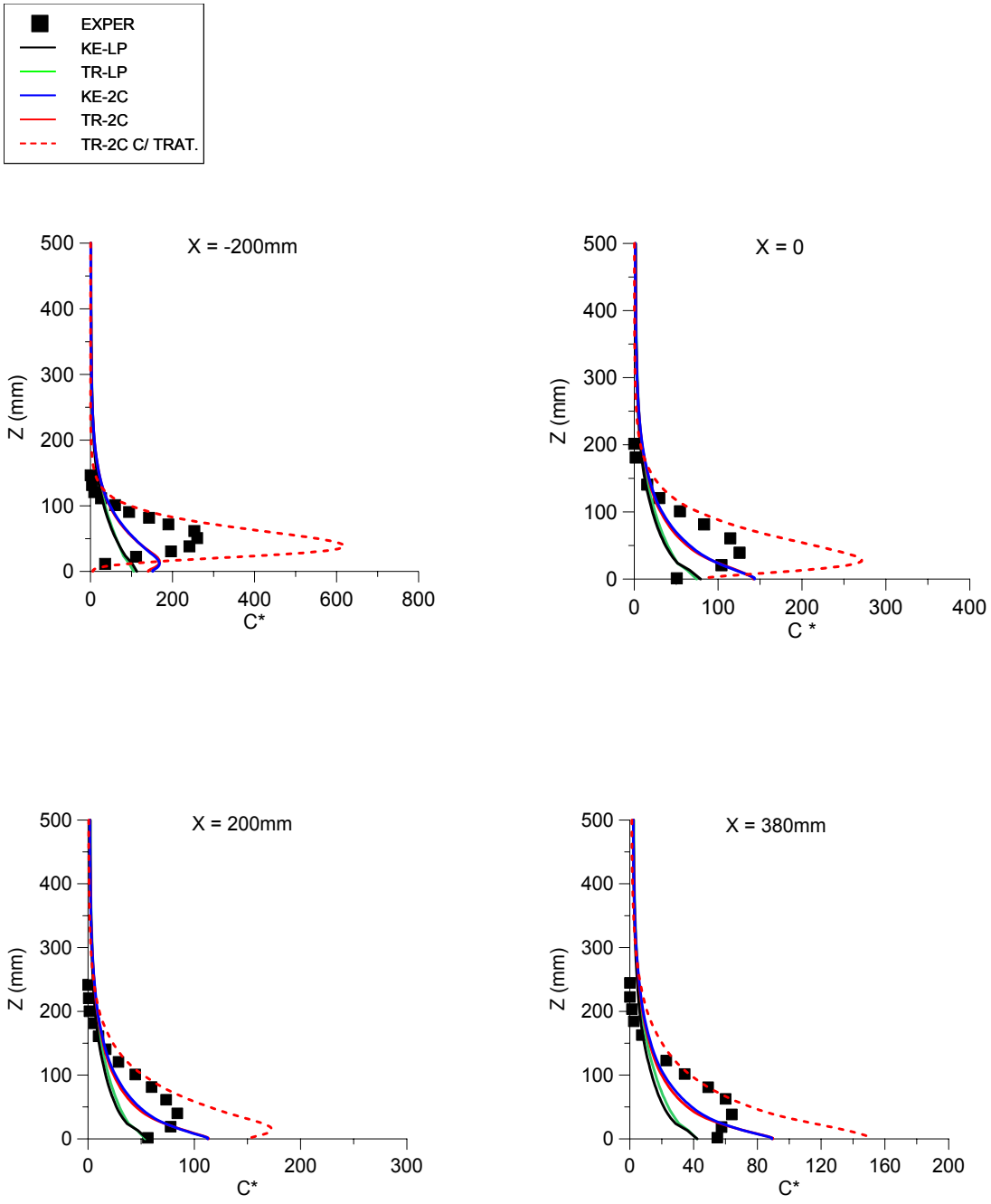


Figura 59 - Perfis verticais de concentração (C^*) no plano de simetria $(y = 0)$ - Caso D0.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

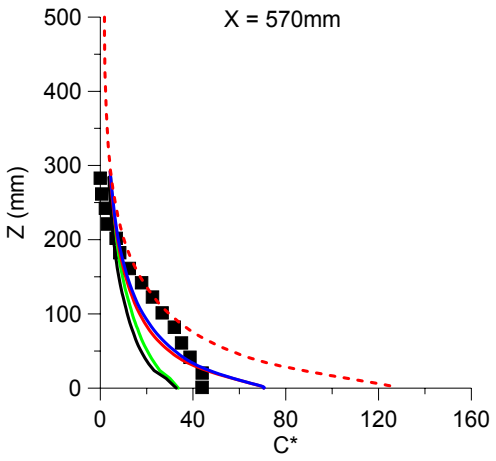


Figura 60 - Perfis verticais de concentração (C^*) no plano de simetria $(y = 0)$ - Caso D0 (continuação)

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

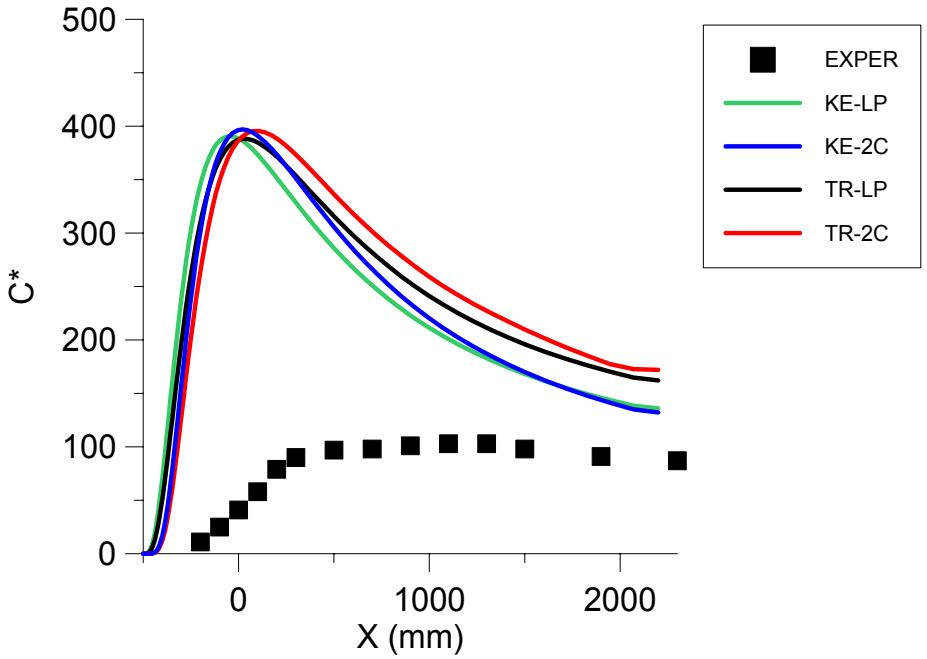


Figura 61 - Máximas concentrações (C^*) ao nível do solo para o caso E0 – as simulações não utilizaram o tratamento para a difusividade.

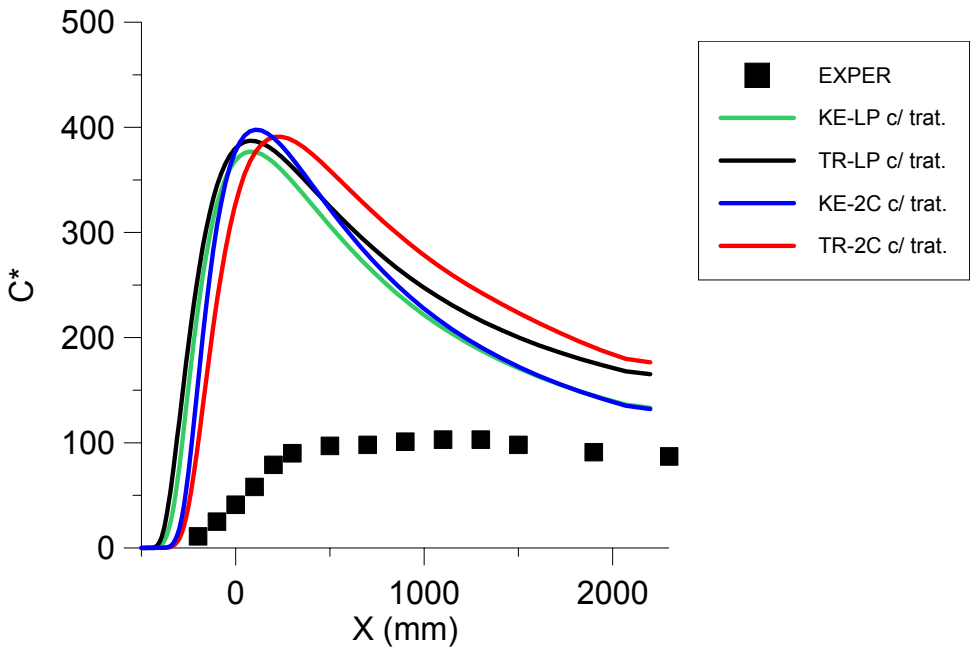


Figura 62 - Máximas concentrações (C^*) ao nível do solo para o caso E0 – as simulações utilizaram o tratamento para a difusividade próximo à fonte.

A figura 63 apresenta perfis verticais de concentração no plano de simetria ($y = 0$) para o caso E0. Apesar dos modelos numéricos terem superestimado as concentrações ao nível do solo, os valores máximos de concentração na pluma estão razoavelmente próximos àqueles obtidos experimentalmente nas posições $x = -200mm$ e $x = 0$. Nas posições $x = 200mm$ e $x = 500mm$ os resultados numéricos são muito parecidos entre si e apontam para excessivos níveis de concentração no plano ($y = 0$). Baseados na conservação de massa de poluente somos levados a suspeitar que a causa para estes excessivos níveis esteja relacionada à subestimativa da dispersão horizontal da pluma numérica. É interessante notar que neste caso (E0), o tratamento para a difusividade na região próxima à fonte teve um efeito mais discreto sobre os valores de concentração do que foi percebido em outros casos analisados.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

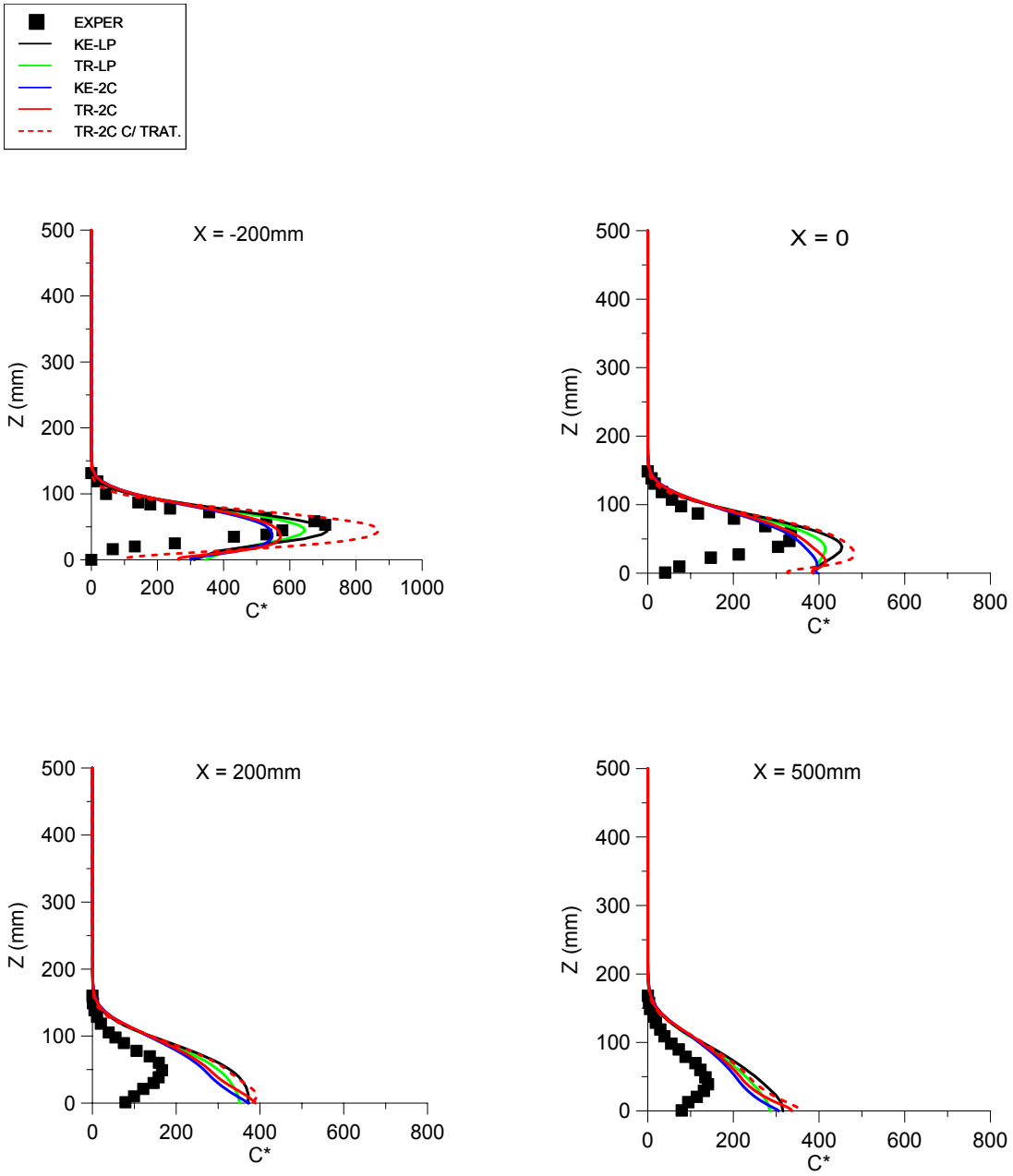


Figura 63 - Perfis verticais de concentração (C^*) no plano de simetria $(y = 0)$ - Caso E0.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

Os resultados de concentração apresentados na forma de perfis verticais e horizontais de concentração permitiram uma análise mais detalhada do desempenho das modelagens numéricas investigadas. De maneira geral, os gráficos de concentração mostraram que os resultados numéricos foram mais realistas em regiões mais afastadas da fonte. Isto já havia sido percebido anteriormente quando analisamos as isolinhas de concentração. Porém, através da análise dos resultados em perfis verticais e horizontais de concentração foi possível verificar em maior detalhe as divergências entre os resultados obtidos com as modelagens numéricas investigadas e os dados experimentais disponíveis na região próxima à emissão.

Para a maioria dos casos (D1, E1, E2, D0 e E0) os resultados obtidos com as diversas modelagens numéricas investigadas, sem a utilização do tratamento para a difusividade, sobreestimaram as concentrações ao nível do solo na região próxima à emissão. A exceção foi o caso D2, onde este efeito não foi verificado. Entendemos que as altas concentrações no solo foram decorrentes de uma excessiva dispersão vertical nos estágios iniciais da pluma numérica.

A utilização do tratamento para a difusividade não possibilitou a solução de tal problema. Por um lado, a dispersão vertical junto à emissão foi reduzida com a utilização do tratamento. Também as previsões relativas às posições dos valores máximos de concentração no solo melhoraram na maior parte dos casos estudados. Por outro lado, as concentrações no solo tornaram-se ainda mais elevadas na região da colina. É provável que a difusividade lateral tenha sido subestimada com a utilização do tratamento para a difusividade, o que acabou por ocasionar níveis excessivamente altos de concentração no centro da pluma. Esses altos níveis também acabam sendo encontrados na superfície da colina devido ao encontro da pluma com a colina.

A origem de tal problema deve estar relacionada à modelagem isotrópica da dispersão turbulenta utilizada para a solução do campo de concentrações. Como foi observado anteriormente, o caráter anisotrópico da turbulência atmosférica é bastante relevante. Para levar em consideração a anisotropia foi investigada uma modelagem anisotrópica para os cálculos do escoamento turbulento. Enquanto na solução do escoamento foi testada uma modelagem anisotrópica para a turbulência (modelo de

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

tensões de Reynolds), na equação de transporte do poluente (equação (4.6)) empregou-se um modelo de difusividade turbulenta isotrópica.

Assim, apesar de ter-se levado em consideração o caráter anisotrópico da turbulência atmosférica nos cálculos do escoamento, nos cálculos da concentração este não foi considerado, já que o coeficiente de difusividade turbulenta na equação (4.6), μ_t / Sc_t, é o mesmo para as direções (horizontais e vertical). A consideração da anisotropia apenas na solução do escoamento não se mostrou apropriada, de forma tal que entendemos ser necessária a utilização de uma modelagem anisotrópica também para a dispersão turbulenta de massa, para que se obtenha melhores resultados quanto à previsão do campo de concentrações.

No trabalho desenvolvido por Boçon e Maliska (2000), os autores utilizaram um modelo $k-\varepsilon$ modificado não-isotrópico para a representação da dispersão turbulenta do poluente. Neste modelo a difusividade turbulenta vertical e horizontal eram calculadas através de expressões específicas para cada direção. Nesta situação o tratamento para a difusividade próximo à fonte gerou importantes melhorias nos resultados de concentrações.

Um resultado interessante observado no presente trabalho é que, de maneira geral, as concentrações calculadas ao nível do solo nos casos em que se tinha estabilidade neutra (D1, D2 e D0) foram um pouco menos distantes dos resultados experimentais do que aquelas calculadas nos casos estáveis. Como os efeitos anisotrópicos são menores nos escoamentos neutros do que naqueles estavelmente estratificados, os resultados obtidos com a utilização de uma modelagem isotrópica para a dispersão turbulenta (como a utilizada no presente trabalho) afastam-se menos dos resultados experimentais na simulação dos escoamentos neutros.

Foi também percebido que os efeitos relacionados ao emprego do tratamento para a difusividade próxima à fonte pareceram ter maior impacto nos casos neutros (D1, D2 e D0) do que nos estáveis (E1, E2 e E0). Acreditamos que o mecanismo de difusão turbulenta tenha tido um papel mais importante no transporte de massa de poluente nos casos neutros do que nos estáveis. Assim, os resultados conseqüentes à alteração da difusividade turbulenta, através do tratamento para a região próxima à fonte, ficaram mais evidentes nos casos neutros.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

Como já foi explicado anteriormente, na solução do campo de concentrações a equação de transporte do poluente foi alimentada pelas diferentes soluções de escoamento obtidas através da utilização das diversas modelagens numéricas investigadas. De maneira geral, a alimentação da equação de transporte do poluente com as melhores soluções para o escoamento (obtidas com a TR-2C) não necessariamente produziram as melhores soluções para os campos de concentrações. O caso E2 foi uma das poucas exceções em se pode verificar resultados numéricos de concentração mais próximos dos experimentais obtidos a partir da solução do escoamento com a TR-2C.

Provavelmente as deficiências relacionadas à modelagem utilizada para o cálculo das concentrações, já descritas, foram responsáveis pelo nivelamento da qualidade dessas soluções.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

5.3.2.3.
Fator de Amplificação devido ao Terreno

De acordo com Castro e Apsley (1997), assumindo-se que as escalas de dispersão lateral e vertical do poluente sobre terreno plano permanecem em razão constante (isto é, $\sigma_y = \gamma\sigma_z$) então, para um determinado formato de pluma, a concentração máxima ao nível do solo é independente da taxa $\partial\sigma_z/\partial x$, mas é criticamente dependente da altura da pluma e, em menor grau, da velocidade média do vento (U).

Os autores afirmam que embora a argumentação apresentada seja verdadeira estritamente para terrenos planos, ainda assim ela sugere que ao utilizar-se um modelo de difusividade isotrópica os valores absolutos de concentração previstos numericamente estarão errados por um fator γ, refletindo a inabilidade do modelo em representar a dispersão anisotrópica. Apesar disso, o *fator de amplificação devido ao terreno* – definido como a razão entre a concentração máxima ao nível do solo em um escoamento perturbado (pela presença da colina) e a concentração máxima ao nível do solo sobre terreno plano – pode ser calculado corretamente, desde que os cálculos relativos ao campo de velocidades estejam corretos. Além disso, se σ_z

estiver corretamente calculado então também deverá estar a localização da concentração máxima.

A partir dos resultados de concentração $C*$ calculados para os casos D1 e D0 foram encontrados os valores para o fator de amplificação devido ao terreno relativo a esses casos. As figuras 64 e 65 apresentam os valores, numéricos e experimentais, de concentração ($C*$) obtidos em D1 normalizados pelas correspondentes concentrações obtidas em terreno plano, ao longo da direção x ao nível do solo para $y = 0$. Enquanto na figura 65 os resultados foram obtidos com o emprego do tratamento para a redução da difusividade próxima à fonte, os resultados mostrados na figura 64 foram gerados sem o tratamento para a difusividade.

É interessante observar que a utilização do tratamento para a difusividade resultou em uma evidente melhoria nas previsões do fator de amplificação devido ao terreno para os casos D1/D0. Além disso, os resultados relativos a KE-2C e TR-2C são os mais parecidos com os resultados experimentais. Vale lembrar que os resultados calculados para o escoamento através da combinação TR-2C foram os que mais se aproximaram dos resultados obtidos em túnel de vento.

Da mesma forma, a partir dos resultados de concentração $C*$ calculados para os casos E1 e E0, foram encontrados os valores para o fator de amplificação devido ao terreno. As figuras 66 e 67 apresentam os valores numéricos e experimentais para o fator de amplificação. Na obtenção dos resultados numéricos apresentados na figura 67 foi empregado o tratamento para a difusividade; já os resultados relativos à figura 66 foram calculados sem a utilização do tratamento.

Assim como aconteceu no caso neutro (D1), no caso estável (E1) a utilização do tratamento para a difusividade próxima à fonte mostrou-se decisiva na qualidade das predições do fator de amplificação devido ao terreno.

Seria interessante também investigar o fator de amplificação de terreno para os casos de colina alta: D2 e E2, nos quais a emissão do poluente ocorre em $z_s = 100mm$. Apesar de termos disponíveis os resultados experimentais para estes casos, não temos resultados experimentais para a situação de terreno plano com a

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

emissão do poluente na posição $z_s = 100mm$. Vale lembrar que nos casos D0 e E0, a emissão ocorre em $z_s = 50mm$, assim como em D1 e E1.

Em uma análise anterior observou-se que, nos resultados de concentração ao nível do solo, as previsões das posições relativas aos valores máximos de concentração melhoraram com a utilização do tratamento para a difusividade. Também os resultados relativos ao fator de amplificação de terreno mostram uma evolução com o emprego do tratamento. A previsão qualitativa dos valores de concentração ao nível do solo melhorou com a utilização do tratamento para a difusividade, apesar dos valores absolutos de concentração ainda não estarem corretos.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

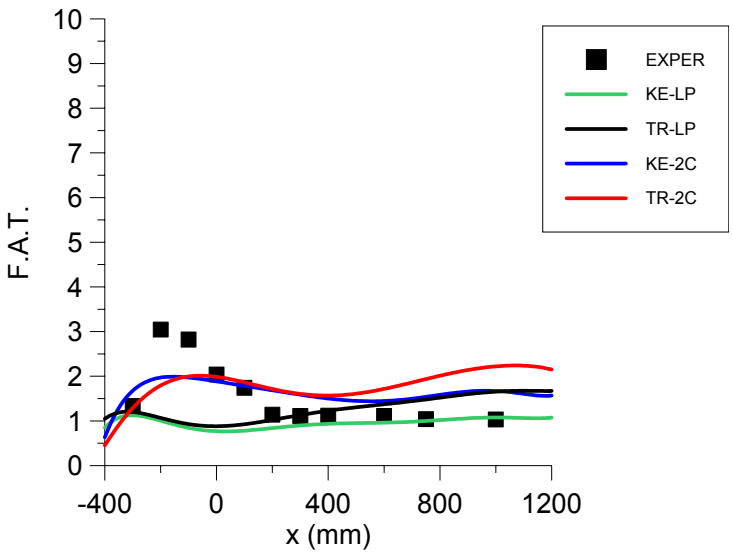


Figura 64 - Máximas concentrações ao nível do solo para o caso D1 normalizadas pelas correspondentes máximas concentrações ao nível do solo em terreno plano (caso D0) – as simulações não utilizaram o tratamento para a difusividade.

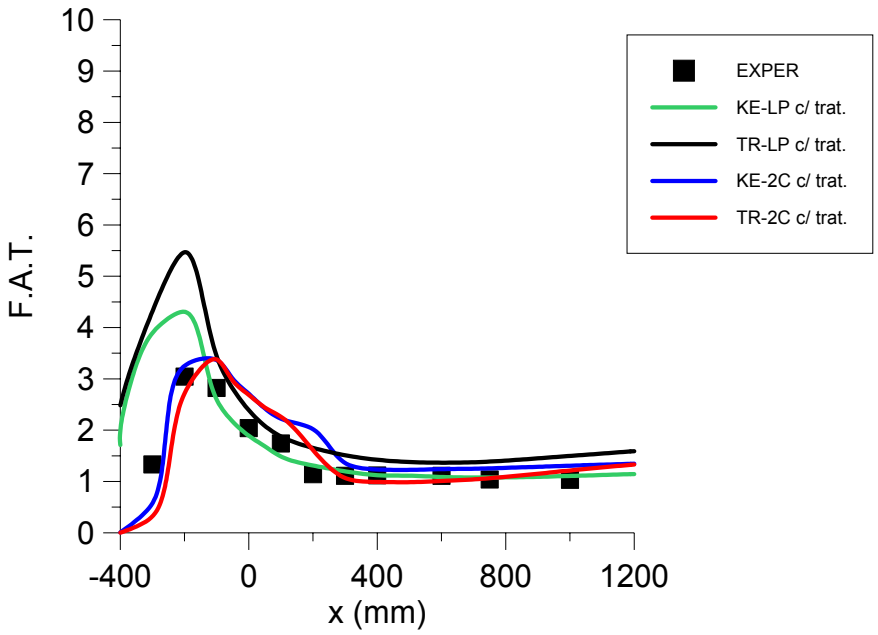


Figura 65– Máximas concentrações ao nível do solo para o caso D1 normalizadas pelas correspondentes máximas concentrações ao nível do solo em terreno plano (caso D0) – as simulações utilizaram o tratamento para a difusividade próximo à fonte.

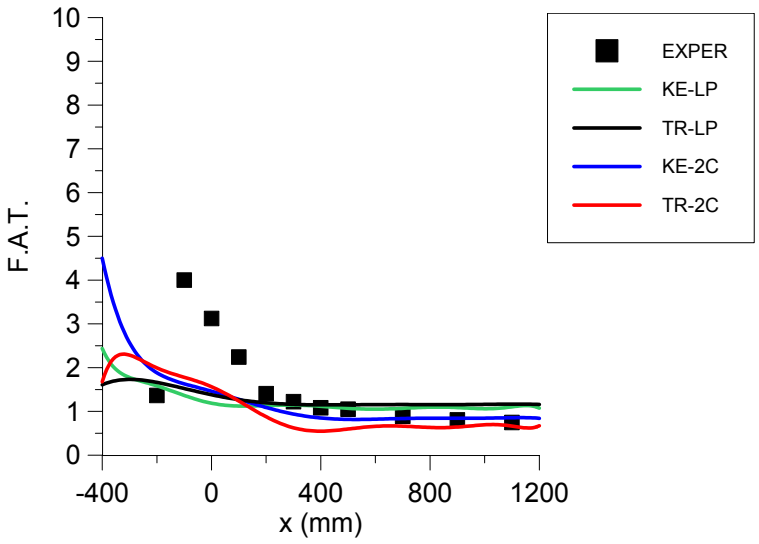


Figura 66 - Máximas concentrações ao nível do solo para o caso E1 normalizadas pelas correspondentes máximas concentrações ao nível do solo em terreno plano (caso E0) – as simulações não utilizaram o tratamento para a difusividade.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA

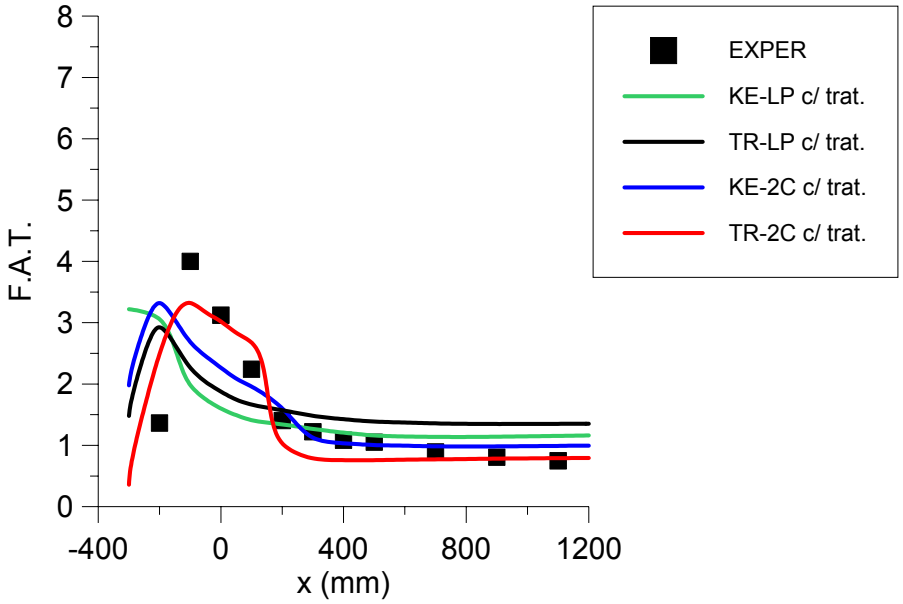


Figura 67 - Máximas concentrações ao nível do solo para o caso E1 normalizadas pelas correspondentes máximas concentrações ao nível do solo em terreno plano (caso E0) – as simulações utilizaram o tratamento para a difusividade.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 9925056/CA