

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
AMBIENTAL

FERNANDA CAPUCHO CEZANA

Estudo da transferência de massa de poluente no  
topo de um dossel urbano

VITÓRIA

2015

FERNANDA CAPUCHO CEZANA

# Estudo da transferência de massa de poluente no topo de um dossel urbano

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Ambiental, na área de concentração em Poluição do Ar.

Orientador: Neyval Costa Reis Jr.

Co-Orientadora: Elisa Valentim Goulart

VITÓRIA

2015

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)  
(Biblioteca Setorial Tecnológica,  
Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

---

C425e Cezana, Fernanda Capucho, 1980-  
Estudo da transferência de massa de poluente no topo de  
um dossel urbano / Fernanda Capucho Cezana. – 2015.  
125 f. : il.

Orientador: Neyval Costa Reis Júnior.

Coorientador: Elisa Valentim Goulart.

Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) – Universidade  
Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Massa – Transferência – Velocidade. 2. Poluentes. 3.  
Edifícios. 4. Simulação numérica. 5. Simulação das grandes  
escalas (LES). 6. Dossel urbano. I. Reis Júnior, Neyval Costa. II.  
Goulart, Elisa Valentim. III. Universidade Federal do Espírito  
Santo. Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 621.3

---

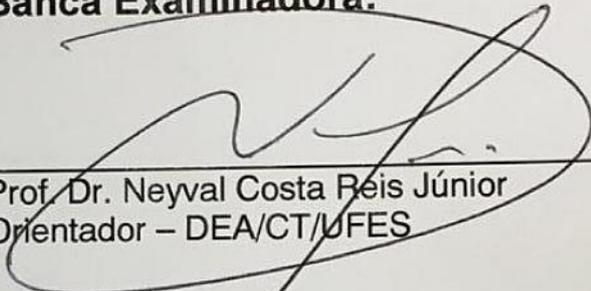


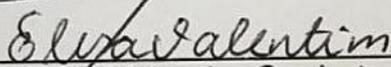
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

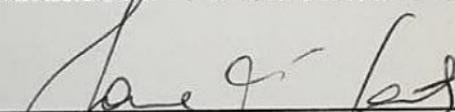
**“Estudo da transferência de massa de poluente no topo de um dossel urbano”.**

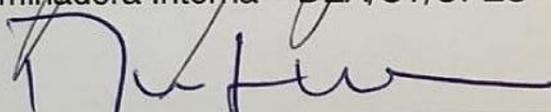
**FERNANDA CAPUCHO CEZANA**

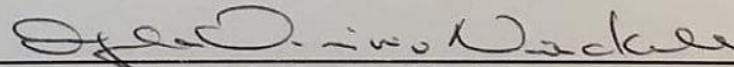
**Banca Examinadora:**

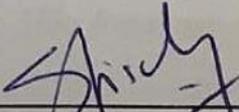
  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Neyval Costa Reis Júnior  
Orientador – DEA/CT/UFES

  
\_\_\_\_\_  
Profa. Dra. Elisa Valentim Goulart  
Coorientadora – PPGEA/CT/UFES

  
\_\_\_\_\_  
Profa. Dra. Jane Méri Santos  
Examinadora Interna – DEA/CT/UFES

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Davidson Martins Moreira  
Examinador Interno - PPGEA/CT/UFES

  
\_\_\_\_\_  
Profa. Dra. Angela Ourivio Nieckele  
Examinadora Externa – PUC-Rio

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Gilberto Fernando Fisch  
Examinador Externo - CTA

Coordenador do PPGEA: Prof. Dr. Edmilson Costa Teixeira

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
Vitória, ES, 03 de setembro de 2015.

*Ao Isaac, por estar sempre ao meu lado.  
Ao nosso filho João, que está nos proporcionando  
vivenciar o verdadeiro e sincero amor.*

## AGRADECIMENTOS

À Deus por todas as bênçãos alcançadas em minha vida e por me permitir o convívio com tantas pessoas (anjos) boas.

Ao meu querido marido Isaac por sempre estar presente e me incentivando desde sempre. *“Amo-te mais do que ontem e menos do que amanhã”*.

Aos meus pais, fontes de muita inspiração. Pessoas que tenho muito orgulho e que amo imensamente. Agradeço pelo incentivo e amor constante e mesmo com a distância se fazem tão perto e presentes.

À minha irmã Renata e seu esposo Fredy por estarem sempre ao meu lado e por me acolherem quando eu precisei.

Aos meus irmãos Diego e Filipe sempre dispostos a ajudar.

À minha co-orientadora Elisa, que tem sido, além de co-orientadora, uma grande amiga por todos esses anos. Obrigada por todos os conhecimentos compartilhados e por sempre estar disposta a ajudar. Obrigada pelas palavras de incentivo, atenção, compreensão e por compartilhar momentos mais que especiais nas nossas vidas.

Ao meu orientador, professor Neyval, pela oportunidade de realizar este trabalho, pela orientação sempre precisa e competente, pela paciência nos últimos meses, pelas discussões com o propósito de melhorar este trabalho cada vez mais.

À CAPES por me proporcionar a experiência do doutorado sanduíche e ao Departamento de Meteorologia da Universidade de Reading, UK, por ter me aceitado como aluna visitante sob supervisão do Dr. Omduth Coceal e Dr. Stephen Belcher. Com os quais tive imensa satisfação em trabalhar neste período.

Ao Dr. Omduth Coceal, faço um agradecimento especial. Por ter aceitado me supervisionar durante este período, por todas as discussões e encontros semanais, sempre muito produtivos, por estar sempre disponível, pela paciência, gentileza e principalmente

por não medir esforços em ajudar sempre. Muito obrigada Omduth! Essa experiência foi extremamente importante para minha vida acadêmica e pessoal.

Aos amigos do laboratório de Poluição do Ar pelos anos de convívio e por todos os momentos compartilhados. Alexandre, Antônio, Ayres, Bruno, Érica, Enilene, Edilson, Elson, Melina, Milena, Nadir, Rizzieri, Rafael, Rita e Willian.

À minha querida prima Andressa que sempre esteve perto todos esses anos.

Às minhas queridas amigas Damiany, Manu, Maria Clara e Chris por nossos encontros, sempre tão divertidos!

Aos amigos que conheci em Londres/UK durante o doutorado sanduíche, que fizeram com que eu tivesse dias maravilhosos naquele país.

À Malu pelas conversas e conselhos, que me fizeram refletir sobre minhas escolhas e decisões, sempre trazendo luz para meus pensamentos.

Ao PPGEA/UFES por possibilitar esta oportunidade de aprimoramento de meus conhecimentos. Aos professores do PPGEA, Jane Meri, Taciana e Davidson, que estiveram presentes nesta minha caminhada do doutorado. À secretária do PPGEA, Rose, por sempre estar disposta a ajudar.

Ao Instituto Federal do Espírito Santo – IFES – Campus Vitória, pela oportunidade de cursar o doutorado com afastamento das minhas atividades, em especial aos colegas da Coordenadoria de Matemática.

Aos meus eternos professores Joccitiel, Jamil e Rocha que também fazem parte desta conquista.

Aos membros da Banca, os professores: Jane Meri Santos, Davidson Martins Moreira, Gilberto Fernando Fisch e Angela Ourivio Nieckele, por aceitarem examinar o conteúdo desta tese.

*“O essencial é invisível aos olhos”*

*(Antoine de Saint-Exupéry)*

## RESUMO

O objetivo deste trabalho foi investigar o fenômeno de transferência de massa de poluente no topo de um dossel urbano. Para isso foram analisados dados de experimentos numéricos obtidos de duas diferentes metodologias: a simulação numérica direta (*direct numerical simulation* - DNS) e a simulação das grandes escalas (*large-eddy simulation* - LES). Foram utilizadas três diferentes configurações na obtenção dos dados de DNS: conjuntos de prédios alinhados com escoamento orientado à 0° e 45° e um conjunto de prédios escalonados com escoamento orientado à 45°. Para todas as configurações os prédios têm mesmas alturas e a fonte de poluentes foi posicionada no interior do dossel urbano. No caso do conjunto de prédios alinhados e escoamento à 0° uma fonte acima do dossel urbano também foi utilizada. Para a simulação LES foi considerada uma configuração de prédios escalonados e com diferentes alturas, com diferentes localizações da fonte. Verificou-se que para uma configuração mais realística, ou seja, prédios de diferentes alturas, o escoamento e dispersão de poluentes tornam-se mais complexos. Foi possível concluir também que os fluxos verticais de massa de poluente através de uma superfície localizada a uma altura média das alturas dos prédios, no caso de prédios de diferentes alturas, é influenciado tanto pelos efeitos turbulentos quanto pelos efeitos advectivos, enquanto apenas os efeitos turbulentos dominam os fluxos verticais no topo do dossel urbano considerando prédios de mesmas alturas. Dessa forma, a parametrização da velocidade de transferência no topo do dossel urbano será fortemente influenciada pelos diferentes mecanismos de transferência que ocorrem no topo desse dossel dependendo da configuração utilizada.

Palavras-Chave: transferência de massa, velocidade de transferência, dossel urbano, prédios de diferentes alturas.

## ABSTRACT

The objective of this work was to investigate the mass exchange process through the top of the urban canopy by two methodologies, i.e, direct numerical simulation (DNS) and large-eddy simulation (LES). Three different configurations were used to obtaining the DNS data: two over a regular aligned array and one over a staggered array. The wind directions for the simulations over the regular array were  $45^\circ$  and  $0^\circ$ . The third simulation has a  $45^\circ$  forcing direction to a staggered array. In all cases buildings have the same height and the scalar source is located within the urban canopy. For the aligned array and  $0^\circ$  forcing direction the scalar source above the canopy was used as well. LES simulation was performed over a staggered array of buildings with different heights and with different source locations. It was found that for a more realistic array of buildings (buildings with different heights) the flow and dispersion of pollutants become more complex than they are in the case of buildings with uniform heights. It was conclude that the vertical scalar transfer through a surface located at a mean height of the obstacles is influenced by both effects turbulent and advective, whereas the turbulent component dominates the vertical flux through the top of the array of buildings with uniform heights. Thus, the parameterization of the transfer velocity on the top of the urban canopy will be strongly influenced by different transfer process occurring on it, depending on the configuration used.

Keywords: mass exchange, transfer velocity, urban canopy, buildings with different heights.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Visualização do escoamento ao redor de um grupo de obstáculos (MAVROIDIS; GRIFFITHS, 2001). .....	2
Figura 1.2: (a) Geometria de um cânion urbano e (b) geometria de um dossel urbano. ...	2
Figura 1.3: Ilustração esquemática do vórtice característico formado dentro do cânion urbano (BERKOWICZ <i>et al.</i> , 1997).....	3
Figura 2.1: Diagrama esquemático do domínio computacional e condições de contorno para o escoamento e dispersão de poluentes em um cânion urbano idealizado com altura $H$ e largura da rua igual a $W$ (LIU <i>et al.</i> , 2005).....	10
Figura 2.2: Visualização do escoamento ao redor de um grupo de obstáculos (MAVROIDIS; GRIFFITHS, 2001). .....	13
Figura 2.3: Escoamento com direção do vento perpendicular aos prédios para diferentes valores da razão de aspecto: (a) escoamento do tipo rugosidade isolada, (b) escoamento do tipo interferência da esteira e (c) escoamento de tipo <i>skimming</i> (OKE, 1988).....	14
Figura 2.4: Limites de separação do escoamento em três diferentes regimes em função da geometria do prédio ( $L/H$ ) e do <i>canyon</i> ( $H/W$ ) (OKE, 1988).....	14
Figura 2.5: Escoamento médio entre os prédios para diferentes direções do vento: (a) direção do vento $0^\circ$ , (b) direção do vento variando de $5^\circ$ até $20^\circ$ e (c) direção do vento variando de $25^\circ$ até $45^\circ$ (KIM; BAIK, 2004).....	15
Figura 2.6: Configurações utilizadas no experimento de túnel de vento de Garbero <i>et al.</i> (2010) indicando a localização da fonte (losango preenchidos mostrados no meio do domínio). (a) Configuração 1: $S_x = S_y = H$ ; (b) Configuração 3: $S_x = 2H$ $S_y = H$ e (c) Configuração 2: $S_x = H$ $S_y = 2H$ (GARBERO <i>et al.</i> , 2010).....	16
Figura 2.7: Campo de velocidade média em um plano vertical $xz$ para um conjunto de prédios alinhados e escoamento oblíquo. Localização dos planos: (a) ( - ) e (b) ( - ). (c) Domínio computacional mostrando as localizações dos planos (GOULART, 2012).....	18
Figura 2.8: Pluma de poluentes ao redor de um grupo de obstáculos para $z/h = 1,2$ : (a) prédios de mesmas alturas e (b) prédios de diferentes alturas (BOPPANA <i>et al.</i> , 2010).....	23

- Figura 3.1: (a) Corte transversal, ao longo do eixo  $y$ , da malha computacional utilizada para a simulação LES e (b) ampliação da malha para os quatro primeiros prédios. ....36
- Figura 3.2: Vista do domínio computacional para a simulação DNS para um conjunto de prédios alinhados com (a) direção do vento igual a  $0^\circ$  e (b) direção do vento igual a  $45^\circ$  e (c) um conjunto de prédios escalonados com direção do vento igual a  $45^\circ$ .  $\times$  representam as fontes localizadas no interior do dossel urbano, para  $z = 0,00625H$ , e  $\times$  representam as fontes localizadas acima do dossel urbano, para  $z = 2H$ . Os quadrados brancos representam os prédios e os quadrados cinzas representam as ruas. ....37
- Figura 3.3: Vista esquemática do primeiro nível de caixas cúbicas (os prédios são representados pelas caixas cinzas) e o segundo nível de caixas cúbicas (acima do dossel urbano) (GOULART, 2012). ....38
- Figura 3.4: Domínio computacional para a simulação LES, mostrando um conjunto de prédios escalonados, com diferentes alturas e direção do vento igual a  $0^\circ$ . As fontes estão indicadas na figura e localizam-se a uma altura de  $z = 0,001hm$ . Os números no topo de cada prédio indicam as alturas dos prédios em milímetros. ....39
- Figura 4.1: Linhas de corrente do escoamento médio nos planos horizontais  $xy$  para (a)  $z/H = 0,14$ ; (b)  $z/H = 0,73$  e (c)  $z/H = 0,98$  com escoamento à  $45^\circ$  através de uma matriz regular; (d)  $z/H = 0,14$ ; (e)  $z/H = 0,73$  e (f)  $z/H = 0,98$  com escoamento à  $0^\circ$  através de uma matriz regular; (g)  $z/H = 0,14$ ; (h)  $z/H = 0,73$  e (i)  $z/H = 0,98$  com escoamento à  $45^\circ$  através de uma matriz escalonada. ....43
- Figura 4.2: Contornos da concentração média nos planos horizontais  $xy$  para um conjunto de prédios alinhados para (a)  $z/H = 0,14$  e (b)  $z/H = 0,98$  para escoamento à  $45^\circ$  e fonte localizada na posição  $(3,5H, 3,5H)$ ; (c)  $z/H = 0,14$  e (d)  $z/H = 0,98$  para escoamento à  $0^\circ$  e fonte localizada na posição  $(3,5H; 6,5H)$ . Em ambos os casos a fonte está localizada a uma altura de  $z/H = 0,0625$ . ....45
- Figura 4.3: Contornos da concentração média nos planos horizontais  $xy$  para um conjunto de prédios escalonados e escoamento à  $45^\circ$ . (a)  $z/H = 0,14$  e (b)  $z/H = 0,98$ , com fonte localizada atrás de um prédio na posição  $(1,5H, 2,5H)$ . (c)  $z/H = 0,14$  e (d)  $z/H = 0,98$ , com fonte localizada entre dois prédios na posição  $(2,5H, 2,5H)$ . (e)  $z/H = 0,14$  e (f)  $z/H = 0,98$ , com fonte localizada na frente de um prédio na

posição (1,5H, 3,5H). Em todos os casos a fonte está localizada a uma altura de $z/H = 0,0625$ . .....	46
Figura 4.4: Contornos da concentração média nos planos horizontais $xy$ para um conjunto de prédios alinhados e escoamento à $0^\circ$ para (a) $z/H = 0,48$ ; (b) $z/H = 0,98$ ; (c) $z/H = 1,98$ e (d) $z/H = 2,48$ . A fonte de poluentes é localizada a uma altura de $z/H = 2$ (fonte alta) com $x/H = 2,5$ e $y/H = 6,5$ . .....	47
Figura 4.5: Contornos da concentração média nos planos verticais $xz$ para um conjunto de prédios alinhados e escoamento à $0^\circ$ para (a) $y/H = 6,48$ e (b) $y/H = 7,48$ . A fonte de poluentes é localizada a uma altura de $z/H = 2$ com $x/H = 2,5$ e $y/H = 6,5$ . .....	48
Figura 4.6: Concentração média e intensidade da flutuação da concentração como função da distância de uma fonte localizada a uma altura de $z/H = 2$ com $x/H = 2,5$ e $y/H = 6,5$ , para as seguintes localizações (a) entre os cubos: dentro da matriz de prédios ( $\circ$ ) e acima da matriz de prédios ( $\circ$ ) e (b) na rua: dentro da matriz de prédios ( $\circ$ ) e acima da matriz de prédios ( $\circ$ ). $x_s$ é a posição da fonte. ....	50
Figura 4.7: Concentração média como função da distância de uma fonte alta (localizada acima do dossel urbano) para as seguintes localizações entre os cubos no interior da matriz de prédios ( $\circ$ ), entre os cubos acima da matriz de prédios ( $\circ$ ); na rua dentro da matriz de prédios ( $\circ$ ) e na rua acima da matriz de prédios ( $\circ$ ). .....	51
Figura 4.8: Concentração média como função da distância de uma fonte baixa (localizada no interior do domínio) para as seguintes localizações entre os cubos no interior da matriz de prédios ( $\circ$ ), entre os cubos acima da matriz de prédios ( $\circ$ ); na rua dentro da matriz de prédios ( $\circ$ ) e acima da matriz de prédios ( $\circ$ ). .....	52
Figura 4.9: Diferença da concentração média entre dentro e acima de uma matriz de cubos como função da distância de uma fonte baixa. ( $\circ$ ) entre os cubos e ( $\circ$ ) na rua. ....	53
Figura 4.10: A face cinza indica a superfície na qual o fluxo vertical foi calculado. ....	54
Figura 4.11: Perfis dos fluxos verticais (a) Total, (b) Advectivo e (c) Turbulento através do topo do dossel urbano considerando um conjunto de prédios alinhados com altura uniforme e escoamento à $45^\circ$ . (d) Locais onde os fluxos foram calculados de acordo com o símbolo. $x'$ é o eixo alinhado com a linha central da pluma. ....	55
Figura 4.12: Perfis dos fluxos verticais (a) Total, (b) Advectivo e (c) Turbulento através do topo do dossel urbano considerando um conjunto de prédios alinhados com altura	

uniforme e escoamento à 0°. (d) Locais onde os fluxos foram calculados de acordo com o símbolo. ....	56
Figura 4.13: Perfis dos fluxos verticais (a) Total, (b) Advectivo e (c) Turbulento através do topo do dossel urbano considerando um conjunto de prédios escalonados com altura uniforme, escoamento à 45° e fonte localizada atrás de um prédio. (d) Locais onde os fluxos foram calculados de acordo com o símbolo e localização da fonte. * indica a localização da fonte.....	58
Figura 4.14: Perfis dos fluxos verticais (a) Total, (b) Advectivo e (c) Turbulento através do topo do dossel urbano considerando um conjunto de prédios escalonados com altura uniforme, escoamento à 45° e fonte localizada entre dois prédios. (d) Locais onde os fluxos foram calculados de acordo com o símbolo e localização da fonte. * indica a localização da fonte.....	59
Figura 4.15: Perfis dos fluxos verticais (a) Total, (b) Advectivo e (c) Turbulento através do topo do dossel urbano considerando um conjunto de prédios escalonados com altura uniforme, escoamento à 45° e fonte localizada na frente de um prédio. (d) Locais onde os fluxos foram calculados de acordo com o símbolo e localização da fonte. * indica a localização da fonte. ....	60
Figura 4.16: (a) Fluxo total positivo e (b) fluxo total negativo no topo do dossel urbano para um conjunto de prédios alinhados com altura uniforme e escoamento à 45°. (c) Fluxo total positivo e (d) fluxo total negativo no topo do dossel urbano para um conjunto de prédios alinhados com altura uniforme e escoamento à 0°. + indica a localização da fonte. ....	62
Figura 4.17: (a) Fluxo total positivo e (b) fluxo total negativo no topo do dossel urbano com fonte localizada atrás de um prédio (fonte 1). (c) Fluxo total positivo e (d) fluxo total negativo no topo do dossel urbano com fonte localizada entre dois prédios (fonte 2). (e) Fluxo total positivo e (f) fluxo total negativo no topo do dossel urbano com fonte localizada na frente de um prédio (fonte 3). Para todos os casos o conjunto de prédios é escalonado e o escoamento à 45°. + indica a localização da fonte.....	63
Figura 4.18: (a) Fluxo total positivo e (b) fluxo total negativo no topo do dossel urbano para um conjunto de prédios alinhados com altura uniforme, escoamento à 0°. + indica a localização da fonte, considerando $z/H = 2$ . ....	64

- Figura 4.19: Série temporal da concentração média no volume. Números em vermelho mostram o primeiro instante em que a concentração foi detectada. Direção do vento 45° com fonte no solo em relação a matriz regular. ....66
- Figura 4.20: Unidades repetidas onde a velocidade de transferência foi calculada para cada configuração. (a) prédios alinhados e escoamento à 45°; (b) prédios alinhados e escoamento à 0° e (c) prédios escalonados e escoamento à 45°. \* indica a localização da fonte. No caso dos prédios escalonados os números 1, 2 e 3 representam as três diferentes localizações da fonte, atrás de um prédio (F1), entre dois prédios (F2) e na frente de um prédio (F3), respectivamente. ....68
- Figura 4.21: Unidade repetida de acordo com a configuração. (a) Prédios alinhados e escoamento à 45°; (b) Prédios alinhados e escoamento à 0° e (c) Prédios escalonados e escoamento à 45°. A seta indica a direção do escoamento. ....69
- Figura 4.22: Velocidade de transferência no topo do dossel urbano para cada unidade repetida considerando um conjunto de prédios alinhados e escoamento à 45°. (○) representa a velocidade de transferência na rua, (○) representa a velocidade na intersecção e (\*) representa velocidade de transferência média para cada unidade repetida. ....70
- Figura 4.23: Velocidade de transferência no topo do dossel urbano para cada unidade repetida considerando um conjunto de prédios alinhados e escoamento à 0°. (○) representa a velocidade de transferência na rua, (○) representa a velocidade de transferência na intersecção, (○) representa a velocidade de transferência atrás do prédio e (\*) representa a velocidade de transferência média para cada unidade repetida. ....71
- Figura 4.24: Velocidade de transferência no topo do dossel urbano para cada unidade repetida para um conjunto de prédios escalonados e escoamento à 45°. (a) Fonte localizada atrás de um prédio (F1); (b) Fonte localizada entre dois prédios (F2) e (c) fonte localizada na frente de um prédio (F3). (○) representa a velocidade de transferência atrás do prédio, (○) representa a velocidade de transferência na frente do prédio, (○) representa a velocidade de transferência entre dois prédios e (\*) representa a velocidade de transferência média para cada unidade repetida. ....72
- Figura 4.25: Velocidade de transferência no topo do dossel urbano calculada nas regiões (a) intersecção e (b) rua, considerando um conjunto de prédios alinhados e escoamento à 45°. (\*) representa os dados de DNS; (Δ) representa a parametrização

de SOULHAC01; ( $\diamond$ ) representa a parametrização de SOULHAC02; ( $\square$ ) representa a parametrização de B&B01 e ( $\circ$ ) representa a parametrização de B&B02. ....	75
Figura 4.26: Velocidade de transferência média no topo do dossel urbano em cada unidade repetida usando dados de DNS e diferentes parametrizações para um conjunto de prédios alinhados e escoamento à 45°. (*) representa os dados de DNS; ( $\Delta$ ) representa a parametrização de SOULHAC01; ( $\diamond$ ) representa a parametrização de SOULHAC02; ( $\square$ ) representa a parametrização de B&B01 e ( $\circ$ ) representa a parametrização de B&B02.....	76
Figura 4.27: Velocidade de transferência calculada no topo do dossel urbano calculada nas regiões (a) intersecção; (b) rua e (c) entre prédios, para um conjunto de prédios alinhados e escoamento à 0°. (*) representa os dados de DNS; ( $\Delta$ ) representa a parametrização de SOULHAC01; ( $\diamond$ ) representa a parametrização de SOULHAC02; ( $\square$ ) representa a parametrização de B&B01 e ( $\circ$ ) representa a parametrização de B&B02.....	77
Figura 4.28: Velocidade de transferência média no topo do dossel urbano em cada unidade repetida usando dados de DNS e três diferentes parametrizações para um conjunto de prédios alinhados e escoamento à 0°. (*) representa os dados de DNS; ( $\Delta$ ) representa a parametrização de SOULHAC01; ( $\diamond$ ) representa a parametrização de SOULHAC02; ( $\square$ ) representa a parametrização de B&B01 e ( $\circ$ ) representa a parametrização de B&B02.....	78
Figura 4.29: Velocidade de transferência no topo do dossel urbano calculada nas regiões (a) entre prédios (EP); (b) na frente do prédio (FP) e (c) atrás do prédio (AP) para um conjunto de prédios escalonados, escoamento à 45° e fonte localizada atrás de um prédio (fonte 1). (*) representa os dados de DNS; ( $\Delta$ ) representa a parametrização de SOULHAC01; ( $\diamond$ ) representa a parametrização de SOULHAC02; ( $\square$ ) representa a parametrização de B&B01 e ( $\circ$ ) representa a parametrização de B&B02. ....	80
Figura 4.30: Velocidade de transferência no topo do dossel urbano calculada nas regiões (a) entre prédios (EP); (b) na frente do prédio (FP) e (c) atrás do prédio (AP), para um conjunto de prédios escalonados, escoamento à 45° e fonte localizada entre prédios (Fonte 2). (*) representa os dados de DNS; ( $\Delta$ ) representa a parametrização de SOULHAC01; ( $\diamond$ ) representa a parametrização de SOULHAC02; ( $\square$ ) representa a parametrização de B&B01 e ( $\circ$ ) representa a parametrização de B&B02. ....	81

Figura 4.31: Velocidade de transferência no topo do dossel urbano calculada nas regiões (a) entre prédios (EP); (b) na frente do prédio (FP) e (c) atrás do prédio (AP), para um conjunto de prédios escalonados, escoamento à 45° e fonte localizada na frente do prédio (Fonte 3). (*) representa os dados de DNS; ( $\Delta$ ) representa a parametrização de SOULHAC01; ( $\diamond$ ) representa a parametrização de SOULHAC02; ( $\square$ ) representa a parametrização de B&B01 e ( $\circ$ ) representa a parametrização de B&B02. ....	82
Figura 4.32: Velocidade de transferência média no topo do dossel urbano para cada unidade repetida para um conjunto de prédios escalonados e escoamento à 45°. (a) Fonte 1; (b) Fonte 2 e (c) Fonte 3. (*) representa os dados de DNS; ( $\Delta$ ) representa a parametrização de SOULHAC01; ( $\diamond$ ) representa a parametrização de SOULHAC02; ( $\square$ ) representa a parametrização de B&B01 e ( $\circ$ ) representa a parametrização de B&B02.....	84
Figura 4.33: Média espacial da (a) velocidade média e da (b) componente $u'w'$ do tensor de Reynolds. A linha contínua representa a simulação LES do presente estudo e os símbolos representam os dados do experimento de Cheng e Castro (2002). ....	86
Figura 4.34: Perfis verticais da (a) velocidade média na direção $x$ , (b) rms da velocidade na direção $x$ , (c) rms da velocidade na direção $y$ e (d) rms da velocidade na direção $z$ . As linhas contínua e pontilhada representam a simulação LES do presente estudo nos pontos A e B, respectivamente. ( $\circ$ ) e ( $\square$ ) representam os dados de experimento de Cheng e Castro (2002) nos pontos A e B, respectivamente. Os pontos A e B são mostrados na Figura 3.4. ....	88
Figura 4.35: Linhas de corrente do escoamento médio nos planos horizontais $xy$ para um conjunto de prédios de diferentes alturas e escoamento à 0°. (a) $z/hm = 0,28$ (b) $z/hm = 1$ e (c) $z/hm = 1,72$ .....	90
Figura 4.36: Linhas de corrente do escoamento médio nos planos verticais $xz$ para um conjunto de prédios de diferentes alturas e escoamento à 0°. (a) $y/hm = 1$ (b) $y/hm = 2$ e (c) $y/hm = 3$ . ....	91
Figura 4.37: Contornos da concentração média nos planos horizontais $xy$ para um conjunto de prédios de diferentes alturas e escoamento à 0°. (a) $z/hm = 0,28$ ; (b) $z/hm = 1$ e (c) $z/hm = 1,72$ , com fonte localizada entre os prédios de alturas 0,01 m e 0,0172 m (Fonte 1). $x$ indica a localização da fonte. É utilizada a escala logarítmica e a concentração é dada em $kg\ kg^{-1}$ . ....	93
Figura 4.38: Isosuperfície de concentração da fonte 1. ....	94

- Figura 4.39: Contornos da concentração média nos planos horizontais  $xy$  para um conjunto de prédios de diferentes alturas e escoamento à  $0^\circ$ . (a)  $z/hm = 0,28$ ; (b)  $z/hm = 1$  e (c)  $z/hm = 1,72$ , com fonte localizada entre os prédios de alturas  $0,0172\text{ m}$  e  $0,0064\text{ m}$  (Fonte 2).  $x$  indica a localização da fonte. É utilizada a escala logarítmica e a concentração é dada em  $kg\ kg^{-1}$ .....95
- Figura 4.40: Contornos da concentração média nos planos horizontais  $xy$  para um conjunto de prédios de diferentes alturas e escoamento à  $0^\circ$ . (a)  $z/hm = 0,28$ ; (b)  $z/hm = 1$  e (c)  $z/hm = 1,72$ , com fonte localizada atrás do prédio de altura  $0,0172\text{ m}$  (Fonte 3).  $x$  indica a localização da fonte. É utilizada a escala logarítmica e a concentração é dada em  $kg\ kg^{-1}$ .....96
- Figura 4.41: Contornos da concentração média nos planos verticais  $xz$  para um conjunto de prédios de diferentes alturas e escoamento à  $0^\circ$ . (a)  $y/hm = 1$  (b)  $y/hm = 2$  e (c)  $y/hm = 3$ , com fonte localizada entre os prédios de alturas  $10\text{ mm}$  e  $17,2\text{ mm}$  (Fonte 1).  $x$  indica a localização da fonte. É utilizada a escala logarítmica e a concentração é dada em  $kg\ kg^{-1}$ .....98
- Figura 4.42: Contornos da concentração média nos planos verticais  $xz$  para um conjunto de prédios de diferentes alturas e escoamento à  $0^\circ$ . (a)  $y/hm = 3$  (b)  $y/hm = 4$  e (c)  $y/hm = 5$ , com fonte localizada entre os prédios de alturas  $17,2\text{ mm}$  e  $6,4\text{ mm}$  (Fonte 2).  $x$  indica a localização da fonte. É utilizada a escala logarítmica e a concentração é dada em  $kg\ kg^{-1}$ .....99
- Figura 4.43: Contornos da concentração média nos planos verticais  $xz$  para um conjunto de prédios de diferentes alturas e escoamento à  $0^\circ$ . (a)  $y/hm = 2$  (b)  $y/hm = 3$  e (c)  $y/hm = 4$ , com fonte localizada atrás do prédio de altura  $17,2\text{ mm}$  (Fonte 3).  $x$  indica a localização da fonte. É utilizada a escala logarítmica e a concentração é dada em  $kg\ kg^{-1}$ .....100
- Figura 4.44: Locais onde os fluxos foram calculados de acordo com o símbolo e localização da fonte: (a) fonte 1, (b) fonte 2 e (c) fonte 3. \* representa o local da fonte e os números no topo dos quadrados brancos indicam as suas alturas em milímetros.....102
- Figura 4.45: Perfis dos fluxos verticais (a) Total, (b) Advectivo e (c) Turbulento através do plano  $z/hm = 1$ , considerando um conjunto de prédios com diferentes alturas, escoamento à  $0^\circ$  e fonte localizada entre os prédios de alturas  $10\text{ mm}$  e  $17,2\text{ mm}$

(Fonte 1). Os locais onde os fluxos foram calculados de acordo com o símbolo são mostrados na Figura 4.44 (a). .....	103
Figura 4.46: Perfis dos fluxos verticais (a) Total, (b) Advectivo e (c) Turbulento através do plano $z/hm = 1$ , considerando um conjunto de prédios com diferentes alturas, escoamento à $0^\circ$ e fonte localizada entre os prédios de alturas $17,2\text{ mm}$ e $6,4\text{ mm}$ (Fonte 2). Os locais onde os fluxos foram calculados de acordo com o símbolo são mostrados na Figura 4.44 (b). .....	104
Figura 4.47: Perfis dos fluxos verticais (a) Total, (b) Advectivo e (c) Turbulento através do plano $z/hm = 1$ , considerando um conjunto de prédios com diferentes alturas, escoamento à $0^\circ$ e fonte localizada atrás do prédio de altura $17,2\text{ mm}$ (Fonte 3). Os locais onde os fluxos foram calculados de acordo com o símbolo são mostrados na Figura 4.44 (c). .....	106
Figura 4.48: Unidades repetidas onde a velocidade de transferência foi calculada para um conjunto de prédios de diferentes alturas e escoamento à $0^\circ$ . (*) representa a localização das fontes e os números no topo dos quadrados brancos indicam as suas alturas em milímetros. ....	107
Figura 4.49: Velocidade de transferência a uma altura de $z/hm = 1$ para diferentes tipos de caixas de cada unidade repetida considerando um conjunto de prédios de diferentes alturas e escoamento à $0^\circ$ . (a) Fonte localizada entre os prédios de alturas $10\text{ mm}$ e $17,2\text{ mm}$ (Fonte 1); (b) fonte localizada entre os prédios de alturas $17,2\text{ mm}$ e $6,4\text{ mm}$ (Fonte 2) e (c) fonte localizada atrás do prédio de altura $17,2\text{ mm}$ (Fonte 3). ( $\odot$ ) representa a velocidade de transferência atrás do prédio, ( $\circ$ ) representa a velocidade de transferência na frente do prédio, ( $\ominus$ ) representa a velocidade de transferência entre dois prédios e (*) representa a velocidade de transferência média para cada unidade repetida. ....	108
Figura 4.50: Velocidade de transferência calculada nas regiões (a) entre prédios (EP); (b) na frente do prédio (FP) e (c) atrás do prédio (AP) a uma altura de $z/hm = 1$ , para um conjunto de prédios de diferentes alturas, escoamento à $0^\circ$ e fonte 1. (*) representa velocidade de transferência média nas unidades repetidas usando dados de LES; ( $\Delta$ ) representa a parametrização de SOULHAC01; ( $\diamond$ ) representa a parametrização de SOULHAC02; ( $\square$ ) representa a parametrização de B&B01 e ( $\circ$ ) representa a parametrização de B&B02. ....	113

Figura 4.51: Velocidade de transferência calculada nas regiões (a) entre prédios (EP); (b) na frente do prédio (FP) e (c) atrás do prédio (AP) a uma altura de  $z/hm = 1$ , para um conjunto de prédios de diferentes alturas, escoamento à  $0^\circ$  e fonte 2. (\*) representa velocidade de transferência média nas unidades repetidas usando dados de LES; ( $\Delta$ ) representa a parametrização de SOULHAC01; ( $\diamond$ ) representa a parametrização de SOULHAC02; ( $\square$ ) representa a parametrização de B&B01 e ( $\circ$ ) representa a parametrização de B&B02. ....114

Figura 4.52: Velocidade de transferência calculada nas regiões (a) entre prédios (EP); (b) na frente do prédio (FP) e (c) atrás do prédio (AP) a uma altura de  $z/hm = 1$ , para um conjunto de prédios de diferentes alturas, escoamento à  $0^\circ$  e fonte 3. (\*) representa velocidade de transferência média nas unidades repetidas usando dados de LES; ( $\Delta$ ) representa a parametrização de SOULHAC01; ( $\diamond$ ) representa a parametrização de SOULHAC02; ( $\square$ ) representa a parametrização de B&B01 e ( $\circ$ ) representa a parametrização de B&B02. ....115

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Tempo de cada simulação DNS após incluir o escalar.....	29
Tabela 3.2: Resumo de todas as configurações utilizadas.....	40
Tabela 4.1: Média geral da velocidade de transferência para cada fonte para o caso de prédios escalonados e escoamento a 45°. .....	73
Tabela 4.2: Parametrizações para a velocidade de transferência usando dados de DNS.....	74
Tabela 4.3: Valores médios da velocidade de transferência para cada tipo de caixa dentro das unidades repetidas usando dados de LES.....	110
Tabela 4.4: Parametrizações para a velocidade de transferência usando dados de LES.....	111

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Símbolos Romanos

$A$  área da face da caixa

$c$  concentração do poluente

$c_p$  calor específico a pressão constante

$C_s$  constante de Smagorinsky

$C_{acima}$  concentração média acima do dossel urbano

$C_{interior}$  concentração média no interior do dossel urbano

$d$  distância do volume de controle mais próximo à parede

$D_m$  coeficiente de difusão do contaminante

$e$  entalpia

$f$  parâmetro de Coriolis.

$F_H$  fonte de energia

$F_{adv}$  fluxo vertical advectivo

$F_{turb}$  fluxo vertical turbulento

$h$  altura da camada limite

$H$  altura do prédio

$H_T$  é a altura total do domínio

$h_m$  altura média dos prédios

$k$  constante de Von Kármán

$k_c$  condutividade térmica do ar

$L$  é o comprimento do prédio

$L_S$  comprimento de mistura da escala de submalha

$p$  pressão

$Q$  taxa de emissão da fonte

$q_{ij}$  fluxo de submalha

$Re_*$  número de Reynolds baseado na velocidade de fricção

$S_{ij}$  tensor deformação

$S$  fonte de massa do poluente

$t$  tempo

$T$  temperatura

$T_s$  escala de tempo característica dos turbilhões gerados pelos prédios

$U_c$  velocidade característica do escoamento dentro do dossel urbano

$U_{ref}$  é a velocidade de referência para  $z_{ref} = 2,5H$

$U_i$  componente instantânea da velocidade na direção  $i$

$U_T$  velocidade de transferência

$u_*$  velocidade de fricção

$W$  largura da rua

$x_i$  coordenada na direção  $i$

$x_s$  é a posição da fonte

$x'$  distância ao longo da linha de centro da pluma

$y'$  distância perpendicular à direção do vento

$x, y$  coordenadas horizontais

$z$  coordenada vertical

### **Símbolos Gregos**

$\Delta$  tamanho característico do filtro

$\Delta x, \Delta y, \Delta z$  tamanho da malha em  $x, y$  e  $z$  respectivamente

$\lambda$  densidade de rugosidade

$\lambda_f$  densidade da área frontal dos prédios.

$\rho$  massa específica do fluido

$\mu$  viscosidade molecular do fluido

$\Phi$  dissipação viscosa da energia

$\tau_{ij}$  tensor das tensões de Reynolds

$\nu$  viscosidade cinemática

$\nu_t$  viscosidade cinemática turbulenta

$\sigma_w$  desvio padrão da velocidade vertical no topo do dossel urbano

### **Operadores**

$G$  função filtro

$\delta_{ij}$  delta de Kronecker

$-$  filtro da submalha

$'$  flutuação da variável

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	Objetivos.....	7
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>9</b>
2.1	Escoamento e dispersão de poluentes em cânions urbanos.....	9
2.2	Escoamento e dispersão de poluentes em um dossel urbano.....	12
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>25</b>
3.1	Simulação numérica direta ( <i>Direct numerical simulation</i> - DNS).....	27
3.2	Simulação das grandes escalas ( <i>Large-eddy simulation</i> - LES).....	30
3.3	Descrição das configurações estudadas.....	36
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>41</b>
4.1	Conjunto de prédios de alturas uniformes: dados de simulação numérica direta	41
4.1.1	Características gerais do escoamento e do campo de concentração médios	42
4.1.2	Transporte de massa de poluente no topo dossel urbano.....	53
4.1.3	Evolução temporal da concentração no interior do dossel urbano .....	65
4.1.4	Parametrização da transferência de massa de poluente no topo do dossel urbano	66
4.2	Conjunto de prédios com diferentes alturas - dados de simulação das grandes escalas	85

4.2.1	Validação da modelagem matemática .....	85
4.2.2	Características gerais do escoamento e do campo de concentração médios 88	
4.2.3	Transporte de massa de poluente no topo do dossel urbano.....	101
4.2.4	Parametrização da transferência de massa de poluente no topo do dossel urbano	106
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>117</b>
5.1	Recomendações para trabalhos futuros .....	119
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>121</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Nas grandes cidades, os problemas de poluição do ar são mais críticos do que em regiões rurais ou pequenas cidades devido a vários fatores, entre eles, emissão veicular e de gases e de partículas emitidos pelas grandes indústrias. Com o desenvolvimento econômico e sem um planejamento urbano adequado, surgem nas grandes cidades muitas edificações, formando os aglomerados de prédios. Nesses meios urbanos, trafegam durante o dia, pedestres, ciclistas, motoristas e moradores que estão expostos a concentrações de poluentes que muitas vezes excedem os padrões de qualidade do ar vigentes. Dessa forma, a preocupação com a qualidade do ar em áreas urbanas é um tópico que está em intenso crescimento (BELCHER *et al.*, 2015; BERKOWICZ *et al.*, 1997; CATON *et al.*, 2003). Com isso, torna-se importante o envolvimento de pesquisadores com o objetivo de entender melhor os mecanismos que estão presentes na dispersão de poluentes em áreas urbanas para que decisões sejam tomadas visando melhorar a qualidade do ar nessas regiões.

A Figura 1.1 apresenta uma fotografia de um experimento (MAVROIDIS; GRIFFITHS, 2001) realizado para estudar o escoamento ao redor de um grupo de edifícios. A presença das edificações altera significativamente o padrão do escoamento atmosférico na região de sua vizinhança, alterando o comportamento das plumas de poluentes nesta região, colocando muitas vezes a saúde da população em risco.

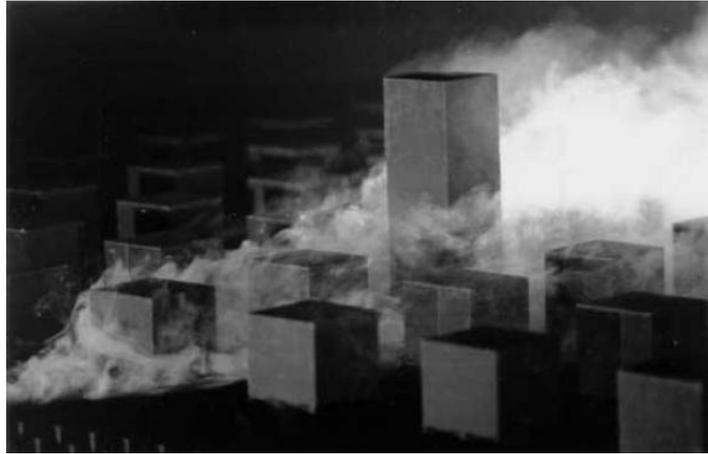


Figura 1.1: Visualização do escoamento ao redor de um grupo de obstáculos (MAVROIDIS; GRIFFITHS, 2001).

O escoamento e a dispersão de poluentes em cânions urbanos (*street canyons*) e/ou em dosséis urbanos (*urban canopy*) devem levar em conta os efeitos da microescala (arranjo, tamanho e formato dos prédios) para que um correto tratamento desses fenômenos seja feito (KAROUSOS, 2006). De acordo com Nicholson (1975) o termo cânion urbano é utilizado para definir ruas urbanas com edifícios contínuos dos dois lados, em geral, com grandes concentrações de poluentes (Figura 1.2a). Por outro lado, o termo dossel urbano é utilizado para referir-se a um conjunto de prédios considerando ruas e espaçamentos entre os prédios (Figura 1.2b).

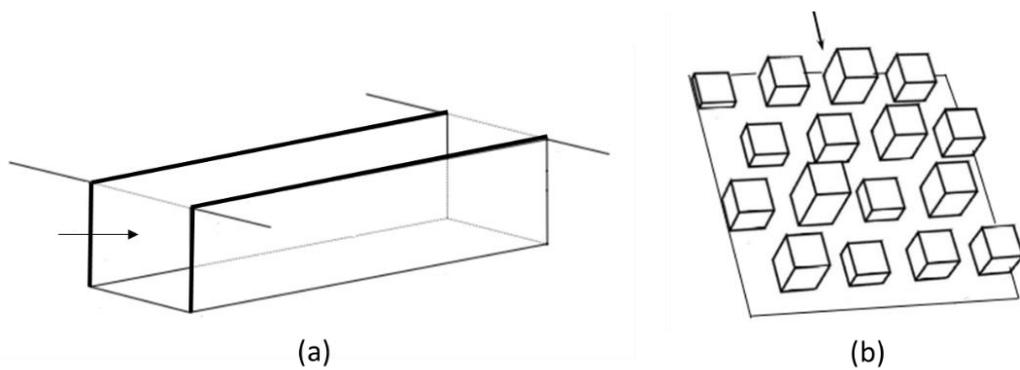


Figura 1.2: (a) Geometria de um cânion urbano e (b) geometria de um dossel urbano.

O efeito da geometria das edificações e sua distribuição ou arranjo na região urbana é um dos fatores dominantes dos padrões de escoamento e dispersão de poluentes em cânions urbanos ou dosséis urbanos (AHMAD *et al.*, 2005; BOPPANA *et al.*, 2010; GARBERO *et al.*, 2010; KIM e BAIK, 2003).

A razão entre a altura do edifício ( $H$ ) e a largura da rua ( $W$ ),  $H/W$ , chamada de razão de aspecto, pode variar determinando o formato de uma região urbana. De acordo com Liu *et al.* (2005), cânions com razões de aspecto menores têm maior ventilação dentro da rua do que cânions com razões de aspecto maiores. Assim, em cânions urbanos com altos valores da razão de aspecto podem ocorrer altas concentrações de poluentes levando a uma degradação da qualidade do ar neste ambiente.

A Figura 1.3 apresenta uma seção transversal típica de um cânion urbano com razão de aspecto igual a 1 e direção do vento perpendicular à rua. É possível observar a formação de um vórtice característico entre as ruas, sendo esta estrutura responsável pelo principal mecanismo de dispersão de poluentes dentro do cânion. Este vórtice transporta uma maior quantidade de poluente para a face do prédio que está a jusante da fonte, e assim, maiores valores de concentração de poluentes são encontrados nesta face do que na face do prédio a montante.

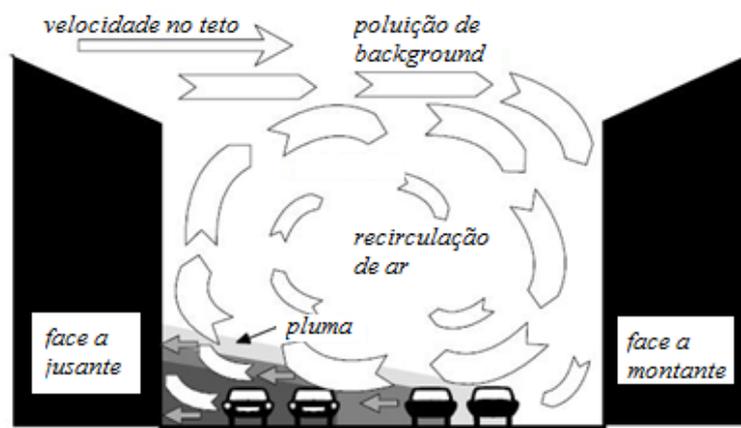


Figura 1.3: Ilustração esquemática do vórtice característico formado dentro do cânion urbano (BERKOWICZ *et al.*, 1997).

A região urbana também pode ser determinada por prédios de diferentes alturas (XIE *et al.*, 2008) e o arranjo desses prédios pode ser feito de várias formas, considerando, por exemplo, diferentes orientações da direção do vento. Garbero *et al.* (2010) mostraram que em uma mesma configuração, considerando uma mesma matriz de obstáculos, com diferentes orientações do escoamento externo, têm-se padrões de dispersão completamente diferentes.

Estudos recentes têm se preocupado em entender os processos de transferência de massa de um poluente em uma região urbana, tais como, Carpentieri *et al.* (2012), Garbero *et al.* (2010) e Salem *et al.* (2014). Os principais processos estudados são a canalização do poluente em uma rua do dossel urbano, a transferência de massa do poluente entre as intersecções e as ruas e a transferência vertical de massa do poluente entre o interior e o exterior do dossel urbano.

Neste contexto, a transferência de massa de poluente no topo de um cânion urbano é um tópico que tem sido bastante estudado. Isso se deve a necessidade de entender como o poluente se dispersa em uma área urbana (onde eventualmente os efeitos da poluição são mais sentidos), identificar seu tempo de permanência dentro dessa região, bem como verificar se o poluente que atinge a corrente livre irá retornar ao interior do cânion ou dossel urbano. Liu *et al.* (2005) e Liu e Wong (2014), por exemplo, identificaram que parte do poluente que sai do interior de um cânion urbano entra novamente no cânion fazendo com que o poluente fique mais tempo nessa região. Entretanto, ainda existem algumas lacunas quanto a saída e posterior reentrada de poluente em um dossel urbano quando uma fonte de poluentes é localizada no interior de uma matriz de prédios. Goulart (2012), por exemplo, afirma que existe a saída de material do interior de um dossel urbano e posterior reentrada, porém não identifica os mecanismos importantes nesse processo de transferência.

Salizzoni *et al.* (2011) mostraram que a transferência turbulenta de *momentum* no topo de uma cavidade bidimensional, com razão de aspecto aproximadamente igual a 1, é resultado do acoplamento das instabilidades geradas na camada cisalhante no topo da cavidade e das estruturas turbulentas do escoamento externo. Os autores ainda afirmam que os resultados obtidos nesse trabalho podem ser aplicados em regiões urbanas caracterizadas por ruas mais estreitas e longas. Porém, em um caso de uma matriz com prédios mais espaçados entre si, é provável que o comportamento seja diferente.

Os fluxos verticais de massa de contaminante através do topo do dossel urbano são importantes no processo de transferência de massa do contaminante entre o interior do dossel urbano e o escoamento acima dele. Em particular, Belcher *et al.* (2015) afirmam que para um conjunto de prédios alinhados, com alturas uniformes e direção do vento igual a 45°, esses fluxos verticais são dominados pelos efeitos turbulentos.

Nota-se que a grande maioria dos estudos que trata da dispersão de poluentes em regiões urbanas, em particular, do transporte de massa de contaminante no topo de regiões urbanas, consideram geometrias mais simplificadas, ou seja, cânions urbanos (LIU *et al.*, 2005; SALIZZONI *et al.*, 2011) ou dosséis urbanos com prédios de mesmas alturas (BELCHER *et al.*, 2015; GOULART, 2012). Trabalhos como os de Boppana *et al.* (2010) e Philips *et al.* (2013) que consideram uma configuração de prédios de diferentes alturas preocupam-se em investigar a influência da geometria e da direção do vento na pluma de contaminantes. Dessa forma, ainda existe a necessidade de investigar quais são os mecanismos que influenciam o transporte vertical de massa de poluente no topo de um conjunto de prédios de diferentes alturas.

Para representar a transferência de massa de poluente entre o interior e o exterior do dossel urbano, um parâmetro muito utilizado é a velocidade de transferência,  $U_T$  (HAMLYN *et al.*; BRITTER, 2007 e SOULHAC *et al.*, 2011). De acordo com Bentham e Britter (2003), a velocidade de transferência é uma velocidade característica do fluxo de *momentum* através da superfície no topo de um dossel urbano. Nesse trabalho os autores desenvolveram uma relação da velocidade de transferência,  $U_T$ , em função da velocidade de fricção,  $u_*$ , e de uma velocidade característica do escoamento dentro do dossel,  $U_c$ . Soulhac *et al.* (2011) assumem que a velocidade de transferência,  $U_T$ , depende somente do escoamento externo e é definida como sendo proporcional a flutuação da velocidade vertical no topo da região urbana. Entretanto, os autores afirmam que  $U_T$  também depende da geometria desta região, das condições dinâmicas do escoamento externo e da direção do vento. Um aspecto a ser ressaltado na parametrização de Soulhac *et al.* (2011) é que em sua dedução, os autores consideram um cânion urbano bidimensional. Desta forma, em regiões com características tridimensionais espera-se um desempenho menos adequado desta parametrização.

Soulhac *et al.* (2013) discutem a confiabilidade de modelos de redes de ruas na determinação da concentração de poluentes em regiões urbanas. Em particular, os autores apresentam uma comparação do modelo simplificado proposto por Soulhac *et al.* (2011) para representar a transferência de massa de contaminante no topo de um cânion urbano (consideram um caso idealizado de uma rua infinita) com modelos operacionais existentes (BERKOWICZ *et al.*, 1997; HOTCHKISS e HARLOW, 1973), mostrando que essas parametrizações são quase equivalentes. Salem *et al.* (2015) também discutem a

confiabilidade da parametrização do transporte vertical de massa de poluente no topo de regiões urbanas altamente densas. Entretanto, os autores afirmam que maiores análises do desempenho dessa parametrização ainda são necessárias, por exemplo, quando se considera uma região urbana menos densa ou no caso de regiões urbanas que considerem edifícios de alturas variadas.

Devido à complexidade do escoamento atmosférico em áreas urbanas (COCEAL *et al.*, 2007; XIE e CASTRO, 2009) torna-se importante a utilização de ferramentas de solução do escoamento e dispersão de poluentes que levem em consideração toda essa complexidade. É de conhecimento geral que a simulação numérica direta (*Direct Numerical Simulation* - DNS) é a mais poderosa ferramenta da dinâmica dos fluidos computacional (*Computational Fluid Dynamics* - CFD), pois resolve todas as escalas espaciais e temporais da turbulência. Por outro lado, a simulação das grandes escalas (*Large-Eddy Simulation* - LES) tem se mostrado uma excelente opção ao DNS, pois resolve as grandes escalas e modela as menores escalas. Com isso o tempo computacional é reduzido, mas a qualidade das soluções permanece, pois, as menores escalas tendem a ser mais homogêneas e isotrópicas e assim a sua modelagem é mais universal quando comparadas com as metodologias que utilizam as médias de Reynolds (*Reynolds average Navier-Stokes* - RANS), por exemplo.

Conforme exposto até o momento, são vários os estudos que tratam da dispersão de poluentes em áreas urbanas (BOPPANA *et al.*, 2010; BRANFORD *et al.*, 2011; PHILIPS *et al.*, 2013; SALIZZONI *et al.*, 2009). Em sua grande maioria, os estudos se preocupam em entender como ocorre o processo de dispersão de poluentes em regiões urbanas, que vão desde cânions urbanos idealizados até conjunto de prédios com diferentes alturas. Outros, se dedicam a entender os mecanismos da transferência vertical de massa de poluente no topo dos cânions urbanos ou dosséis urbanos. Porém, ainda existem algumas lacunas no estudo dos mecanismos de transporte de massa no topo de um dossel urbano. Por exemplo, identificar os mecanismos responsáveis pela saída e posterior reentrada de poluente em um dossel urbano. Outro tópico que ainda necessita de maior investigação é a parametrização desse transporte vertical de massa de contaminante em uma região urbana, considerando tanto um dossel urbano com prédios de alturas iguais e também prédios com diferentes alturas.

Pode ser visto também que as metodologias DNS e LES são extremamente confiáveis na determinação da solução do escoamento e dispersão de poluentes em áreas urbanas. Dessa forma, nesta tese serão utilizadas ambas as metodologias para gerar um conjunto de dados que seja confiável de forma a ter um bom entendimento do fenômeno físico e assim fazer análises de modelos mais simplificados do que os modelos baseados em CFD. Ressalta-se ainda que nesta tese será considerada a atmosfera como neutra, com fontes pontuais de um escalar passivo.

## 1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é entender os processos de transporte de massa de um poluente no topo de um dossel urbano, ou seja, entender os mecanismos que influenciam na transferência de massa do poluente do interior para o exterior do dossel e vice-versa, por meio de dados de DNS (configurações simplificadas – conjunto de prédios alinhados/escalonados e com mesmas alturas) e LES (configuração mais realística – conjunto de prédios escalonados e com alturas diferentes).

Como objetivos específicos têm-se:

- Investigar os mecanismos que são importantes no transporte vertical do poluente do interior para o exterior do dossel urbano, como por exemplo, os mecanismos que determinam a saída e posterior reentrada de poluente de um dossel urbano;
- Investigar se os mesmos mecanismos que afetam a transferência de massa de poluente para um conjunto de prédios de alturas uniformes ocorrem também para um conjunto de prédios com diferentes alturas.
- Avaliar parametrizações existentes para a transferência de massa de poluente no topo do dossel urbano para todas as configurações.

Este trabalho está dividido em cinco capítulos. Após a introdução, o Capítulo 2 apresenta uma revisão da literatura com o objetivo de contextualizar este trabalho, bem como introduzir uma visão geral da dispersão de poluentes em áreas urbanas. A Metodologia utilizada neste trabalho é apresentada no Capítulo 3, onde são descritos a modelagem matemática e os detalhes das simulações computacionais. O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos das simulações computacionais e uma discussão acerca deles. O

Capítulo 5 encerra esta tese apresentando as conclusões baseadas nas simulações numéricas e as recomendações para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo serão apresentados alguns conceitos e trabalhos importantes acerca do estudo da dispersão de poluentes em regiões urbanas. Conforme citado anteriormente, a maior parte dos estudos que se dedicam a estudar a transferência vertical de massa de contaminante no topo de áreas urbanas consideram geometrias idealizadas, como cânions urbanos, para os quais foram desenvolvidas as parametrizações (modelos simplificados) para o transporte vertical de massa de contaminante do interior do cânion para o escoamento acima dele, que por sua vez são utilizadas para dosséis urbanos. Dessa forma, este capítulo está dividido em duas principais seções: (i) escoamento e dispersão de poluentes em cânions urbanos e (ii) escoamento e dispersão de poluentes através de um dossel urbano considerando prédios de alturas iguais e prédios de diferentes alturas.

### 2.1 Escoamento e dispersão de poluentes em cânions urbanos

No contexto da dispersão de poluentes em regiões urbanas, um tópico que tem sido bastante estudado é a interação entre o escoamento externo e o escoamento dentro do cânion (CAI *et al.*, 2008; LIU *et al.*, 2014; SALIZZONI *et al.*, 2009; SALIZZONI *et al.*, 2011).

Cai *et al.* (2008) utilizaram a simulação de grandes escalas para calcular os fluxos médios de contaminante no topo do cânion em função da razão de aspecto ( $1/3 \leq H/W \leq 2$ , onde  $H$  é a altura do prédio e  $W$  é a largura da rua) e encontram uma boa concordância com os experimentos em túnel de vento de Barlow *et al.* (2004).

Liu *et al.* (2005) determinaram a taxa de transferência de massa de ar e de massa de poluentes no topo do cânion urbano com razões de aspecto 1/2, 1 e 2 usando a metodologia LES. Os autores utilizaram o número de Reynolds da ordem de  $10^4$  para facilitar a comparação com resultados anteriores. Segundo os autores, o mecanismo de remoção de poluentes no topo do cânion urbano é governado somente pelo transporte turbulento e tal remoção ocorre prioritariamente na face do prédio a jusante do cânion (veja Figura 2.1). Os autores observaram ainda que à medida que a razão de aspecto aumenta a transferência de massa de ar de dentro para fora do cânion é diminuída, fazendo com que uma menor ventilação ocorra dentro da rua. Outro aspecto importante é quando a remoção de poluentes é positiva, ou seja, está saindo poluente de dentro do cânion. Alguns dos poluentes na camada de superfície livre (acima do cânion) que se originaram a partir do cânion urbano, entram novamente no cânion, aumentando o tempo de retenção de poluentes nesta região. Nota-se também que se poluentes provenientes de fontes à montante estiverem na corrente livre, o arrastamento desses poluentes para dentro do cânion irá contribuir para degradação da qualidade do ar dentro do cânion urbano.

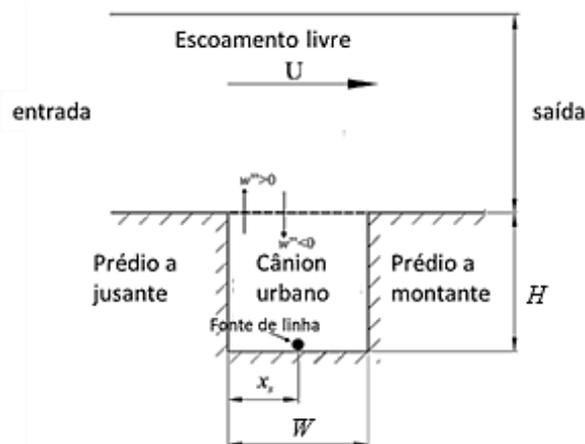


Figura 2.1: Diagrama esquemático do domínio computacional e condições de contorno para o escoamento e dispersão de poluentes em um cânion urbano idealizado com altura  $H$  e largura da rua igual a  $W$  (LIU *et al.*, 2005).

Caton *et al.* (2003) investigaram experimentalmente e analiticamente os mecanismos de dispersão de um escalar passivo em uma cavidade bidimensional, considerando a atmosfera neutra e número de Reynolds da ordem de  $10^3$ . Os autores preocuparam-se especialmente em investigar o processo de transferência de massa de poluentes entre o interior do cânion e o escoamento acima dele. Os autores apresentaram uma evolução

temporal do campo médio de concentração no topo da cavidade, com o objetivo de mostrar o importante papel da camada cisalhante no topo do cânion no processo de transferência vertical entre o interior da cavidade e o escoamento externo. Com isso, foi possível concluir que essa transferência depende fortemente da camada cisalhante no topo do dossel e também das estruturas turbulentas geradas pelos prédios da vizinhança.

A transferência de massa de um contaminante entre um cânion e o escoamento externo foi estudada por Salizzoni *et al.* (2009) por meio de experimentos em túnel de vento. Os resultados experimentais foram interpretados por meio de uma solução analítica de um sistema de equações diferenciais. A boa concordância entre os resultados experimentais e os analíticos permitiu esclarecer os mecanismos básicos que orientam a transferência de massa no cânion. Indicando que esse processo parece ser inteiramente governado pelas flutuações do escoamento turbulento e não pela magnitude da recirculação média no interior da cavidade. De forma geral, os autores afirmam que a turbulência externa tem uma influência direta sobre o escoamento e a dispersão dentro do cânion e, conseqüentemente, sobre toda a transferência turbulenta entre o interior do cânion e a atmosfera acima dele.

Salizzoni *et al.* (2011) realizaram um experimento em túnel de vento para medir a velocidade dentro e acima de um cânion urbano bidimensional considerando uma atmosfera neutra. Os resultados mostraram que a transferência de *momentum* é influenciada pelas estruturas turbulentas do escoamento externo e pelas instabilidades geradas na camada de cisalhamento na parte superior do cânion. Dessa forma, é necessário considerar todos estes processos na troca turbulenta de *momentum* para modelar essa transferência. Neste sentido, Solazzo e Britter (2007) realizaram um estudo por meio de experimentos numéricos em um cânion urbano bidimensional com o objetivo de investigar a influência da geometria no escoamento, a mistura dentro do cânion e o processo de transferência no topo do cânion. Entre suas conclusões destacam-se que dentro do cânion a mistura é bem realizada e que a velocidade de transferência é de aproximadamente 1% da velocidade característica acima do cânion urbano para todas as configurações adotadas. Porém, é importante ressaltar que a configuração utilizada é extremamente simples quando comparada com uma região urbana real.

## 2.2 Escoamento e dispersão de poluentes em um dossel urbano

Nas últimas décadas, muitos autores têm se dedicado a entender o escoamento e a dispersão de poluentes em áreas urbanas idealizadas. Particularmente, são muitos os trabalhos que se concentram em entender o padrão do escoamento e da dispersão de poluentes dentro e acima de um grupo de obstáculos de mesma altura (DAVIDSON *et al.*, 1995, 1996; GRIMMOND; OKE, 1998; MACDONALD *et al.*, 1997; MACDONALD *et al.*, 1998; THEURER *et al.*, 1996).

Os trabalhos experimentais de Macdonald *et al.*, 1997 e Macdonald *et al.*, 1998 foram conduzidos para fontes de poluentes localizadas a montante do grupo de obstáculos e mostraram que a pluma de contaminantes dentro do conjunto de obstáculos tiveram uma distribuição gaussiana, exceto nas duas primeiras fileiras de prédios, pois a pluma de poluentes é dividida em duas ao encontrar o obstáculo logo a jusante, devido à formação do vórtice da ferradura. Assim, os modelos de pluma gaussiana funcionam bem quando a altura da pluma é grande em comparação com o tamanho dos prédios (BELCHER, 2005). Porém, perto da fonte a pluma de poluentes sofre influência direta dos prédios (forma e disposição) e não pode ser modelada por meio de uma distribuição gaussiana (COCEAL *et al.*, 2014; THEURER *et al.*, 1996).

Mavroidis e Griffiths (2001) realizaram vários experimentos em túnel de vento para avaliar a influência de diferentes razões de aspecto no escoamento e na dispersão de poluentes no interior de uma matriz de obstáculos. A Figura 2.2 apresenta uma fotografia de um desses experimentos, mostrando que os obstáculos influenciam diretamente o padrão do escoamento ao seu redor e conseqüentemente a pluma de contaminantes nesta região. Os autores confirmaram a existência de três principais regimes de escoamento, conhecidos como: escoamento do tipo rugosidade isolada; escoamento do tipo interferência da esteira e escoamento do tipo *skimming*.

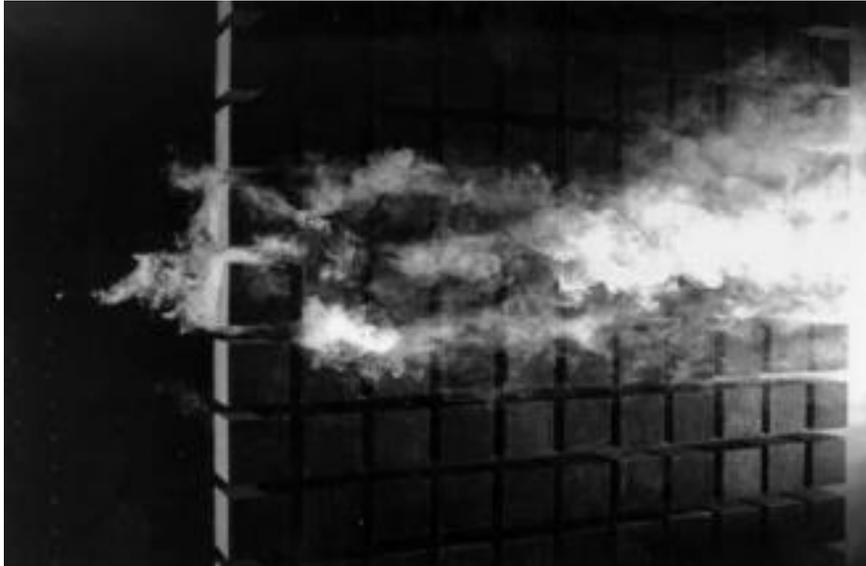


Figura 2.2: Visualização do escoamento ao redor de um grupo de obstáculos (MAVROIDIS; GRIFFITHS, 2001).

Este comportamento do escoamento dependente das diferentes razões de aspecto está de acordo com a classificação proposta por Oke (1988). Na Figura 2.3 pode-se observar essa influência da razão de aspecto para um escoamento com direção do vento perpendicular aos prédios. É possível ver na Figura 2.3 (a) que os prédios não interagem uns com os outros e, portanto, o escoamento pode ser tratado como um escoamento do tipo rugosidade isolada. Quando os prédios estão mais próximos uns dos outros (Figura 2.3b) a esteira do prédio a montante é perturbada pelo prédio a jusante e um fluxo descendente se forma na face frontal do prédio à jusante caracterizando o escoamento do tipo interferência da esteira. Na Figura 2.3 (c) os prédios estão muito próximos e uma recirculação aparece entre eles. O escoamento dentro da rua torna-se dissociado do escoamento acima dos prédios e este escoamento pode ser chamado de escoamento do tipo *skimming*. A transição entre esses três regimes de escoamento ocorre para combinações de valores críticos de  $H/W$  e  $L/H$ , onde  $L$  é o comprimento do prédio normal ao escoamento, conforme apresentado na Figura 2.4.

O espaçamento entre os prédios tem uma forte influência na dispersão de poluentes e no escoamento em áreas urbanas. Além da disposição dos prédios, a direção do vento também influencia fortemente o padrão do escoamento e da dispersão nestas matrizes de obstáculos (BRANFORD *et al.*, 2011; GARBERO *et al.*, 2010; KIM; BAIK, 2004).

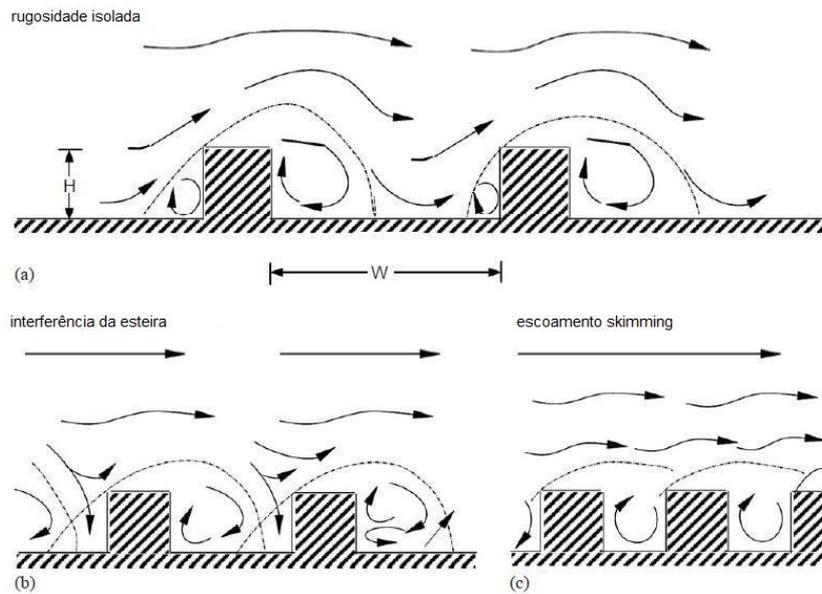


Figura 2.3: Escoamento com direção do vento perpendicular aos prédios para diferentes valores da razão de aspecto: (a) escoamento do tipo rugosidade isolada, (b) escoamento do tipo interferência da esteira e (c) escoamento de tipo *skimming* (OKE, 1988).

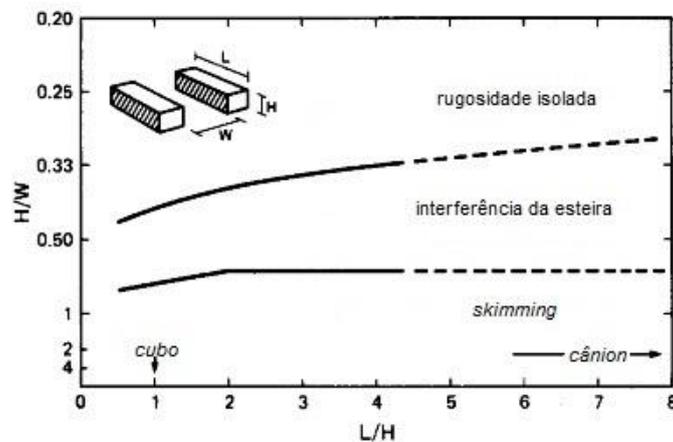


Figura 2.4: Limites de separação do escoamento em três diferentes regimes em função da geometria do prédio ( $L/H$ ) e do *canyon* ( $H/W$ ) (OKE, 1988).

A Figura 2.5 mostra a dependência do escoamento em relação à direção do vento. Verificam-se três diferentes padrões do escoamento formado entre os prédios. Quando a direção do vento é perpendicular aos prédios observa-se a formação de uma grande estrutura tridimensional e simétrica na forma de um arco que se estende desde o prédio a montante até o prédio a jusante. É possível ver que a base desta estrutura se localiza no chão próximo ao prédio a jusante (Figura 2.5a). À medida que o ângulo da direção do

vento aumenta de 5° até 20° as bases da estrutura tridimensional, que aparece neste escoamento entre os prédios, sofrem um deslocamento. Uma delas desloca-se para o centro da rua e a outra para próximo do canto nordeste do prédio a montante. Verifica-se que essa grande estrutura tridimensional se torna assimétrica neste caso (Figura 2.5b). No caso da direção do vento variando de 25° até 45° a grande estrutura tridimensional deste escoamento tem suas bases deslocadas como ocorre para os ângulos de 5° até 20°. Neste caso, as bases da estrutura tridimensional ficam localizadas nas faces leste e norte do prédio a montante. Quando o ângulo de incidência do escoamento é exatamente 45°, a estrutura tridimensional é diagonalmente simétrica atrás do prédio a montante (Figura 2.5c).

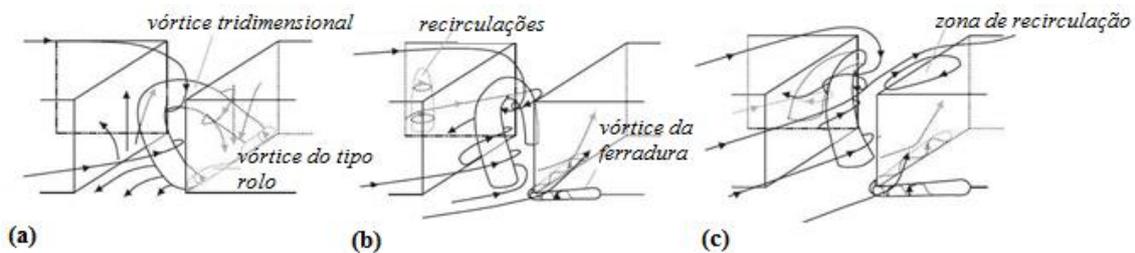


Figura 2.5: Escoamento médio entre os prédios para diferentes direções do vento: (a) direção do vento 0°, (b) direção do vento variando de 5° até 20° e (c) direção do vento variando de 25° até 45° (KIM; BAIK, 2004).

Garbero *et al.* (2010) realizaram um experimento em túnel de vento para investigar a influência da direção do vento no escoamento e na dispersão de poluentes em uma matriz de obstáculos de mesmas alturas, com alta densidade (veja Figura 2.6). A atmosfera foi considerada como neutra e o número de Reynolds baseado na altura dos obstáculos foi da ordem de  $10^3$ . Os autores destacaram alguns pontos relevantes para a dispersão de poluentes dentro dessa matriz de obstáculos, tais como, a canalização do contaminante ao longo da rua, o processo de mistura nas interseções das ruas e a transferência de massa entre as ruas e o escoamento acima da matriz. Eles comprovaram que estes processos são dependentes tanto das propriedades geométricas da matriz quanto da direção do vento incidente. A Figura 2.6 mostra as três diferentes configurações utilizadas em seus experimentos, variando o espaçamento entre os prédios na direção  $x$  (direção preferencial do escoamento) e na direção  $y$  (direção transversal ao escoamento). Essa variação na configuração da matriz de prédios teve uma influência direta na dispersão de poluentes dentro dessas matrizes. Quando o espaçamento entre os prédios na direção  $x$  é duas vezes

maior do que o espaçamento na direção  $y$ , o espalhamento da pluma de poluentes é maior do que quando o espaçamento entre os prédios na direção  $y$  é duas vezes maior do que o espaçamento na direção  $x$  ou quando esses espaçamentos são iguais. Isso significa que quando o espaçamento entre os prédios na direção  $y$  é duas vezes maior do que o espaçamento na direção  $x$  ou se esses espaçamentos forem iguais existe uma maior canalização da pluma de contaminantes através da rua. Para baixos ângulos de incidência do vento, os experimentos mostraram que ocorre uma canalização da pluma através da rua em que a fonte está localizada e que a transferência de massa na interface entre ruas e interseções é dominada pelos efeitos turbulentos. À medida que o ângulo de incidência do vento aumenta, ocorre também um aumento da troca de massa na direção transversal na interface entre as ruas e interseções e assim um maior espalhamento da pluma de contaminantes.

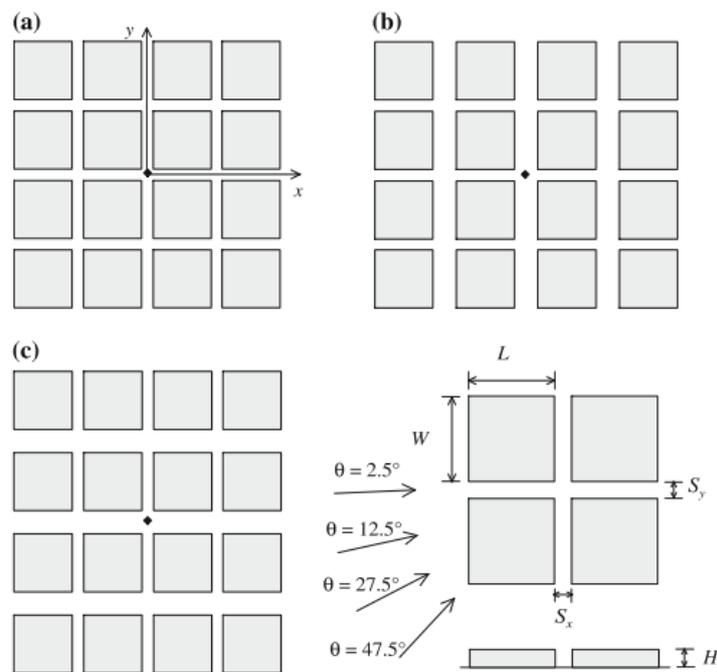


Figura 2.6: Configurações utilizadas no experimento de túnel de vento de Garbero *et al.* (2010) indicando a localização da fonte (losango preenchidos mostrados no meio do domínio). (a) Configuração 1:  $S_x = S_y = H$ ; (b) Configuração 3:  $S_x = 2H$   $S_y = H$  e (c) Configuração 2:  $S_x = H$   $S_y = 2H$  (GARBERO *et al.*, 2010).

Branford *et al.* (2011) utilizaram a simulação numérica direta para investigar a dispersão de uma fonte pontual de poluentes localizada dentro de um conjunto uniforme de prédios considerando diferentes direções do escoamento ( $0^\circ$ ,  $30^\circ$  e  $45^\circ$ ). Os experimentos

numéricos foram conduzidos considerando a atmosfera neutra e com número de Reynolds da ordem de  $10^3$ . Os autores observaram que à medida que o ângulo de inclinação da direção do vento é aumentado de  $0^\circ$  a  $45^\circ$  a densidade da área frontal do conjunto de prédios torna-se maior e isso acarreta em valores de velocidade mais baixos dentro do conjunto de prédios. Eles verificaram também que, para a direção do vento oblíquo, o material lançado tem um maior espalhamento na horizontal e decai mais rapidamente com a altura quando comparado com o escoamento à  $0^\circ$ . Isto sugere uma transferência de massa de contaminante inicial, saindo do dossel urbano, mais fraca e uma dispersão transversal e lateral mais forte para ângulos oblíquos. Segundo os autores um mecanismo importante na dispersão lateral de escoamentos oblíquos é a dispersão topológica, que ocorre quando o escoamento colide com os obstáculos e acontece a separação deste escoamento. Essa separação do escoamento gera um escoamento mais turbulento e então a dispersão lateral é ampliada.

Recentemente, Coceal *et al.* (2014) utilizaram dados de DNS para investigar a dispersão de poluentes devido à uma fonte pontual contínua localizada no interior de uma matriz de prédios. Foram investigados os efeitos de diferentes direções do vento, arranjo dos prédios e localização da fonte. O objetivo principal do trabalho foi analisar as principais características do processo de dispersão de poluentes na vizinhança de uma fonte localizada no interior de áreas urbanas. Os autores concluíram que o processo de dispersão em regiões próximas da fonte é fortemente afetado pela presença dos prédios e pela localização da fonte.

Goulart (2012) investigou o escoamento e a dispersão de poluentes através de um conjunto de prédios com alturas uniformes por meio da simulação numérica direta. Neste estudo discutiu-se, por exemplo, sobre a importância da dispersão topológica para escoamentos oblíquos, surgimento de fontes secundárias e sua importância no aumento da transferência de massa de poluente do interior do dossel urbano para o escoamento acima dele. A autora afirma ainda que para o caso de escoamento oblíquo existe um forte acoplamento entre o escoamento no interior e acima do dossel urbano, indicando que qualquer tentativa de calcular a concentração no interior do dossel por meio de modelos mais simplificados deve-se levar em consideração a dispersão acima do dossel.

Com o objetivo de estudar o escoamento e a dispersão de poluentes em interseções urbanas, Soulhac *et al.* (2009) realizaram um estudo numérico e experimental. Os autores

mostraram que a interseção influencia diretamente nos valores de concentração e velocidade nas ruas adjacentes. Na entrada das ruas transversais uma grande recirculação é formada, determinando assim a troca de poluentes entre a interseção e a rua. Outra conclusão deste trabalho foi que o escoamento médio tem pouca variação vertical na interseção. Porém, Goulart (2012), em sua tese de doutorado, apresenta um resultado contrário e afirma que a interseção deve ser considerada tridimensional. Na Figura 2.7 (a) pode ser visto este comportamento tridimensional, com movimentos descendentes e ascendentes, fazendo com que exista uma variação vertical na interseção, indicando troca de massa de contaminante entre o interior do dossel e o escoamento acima dele. A Figura 2.7 (b) mostra que para esta localização o escoamento está alinhado com a direção  $x$ .

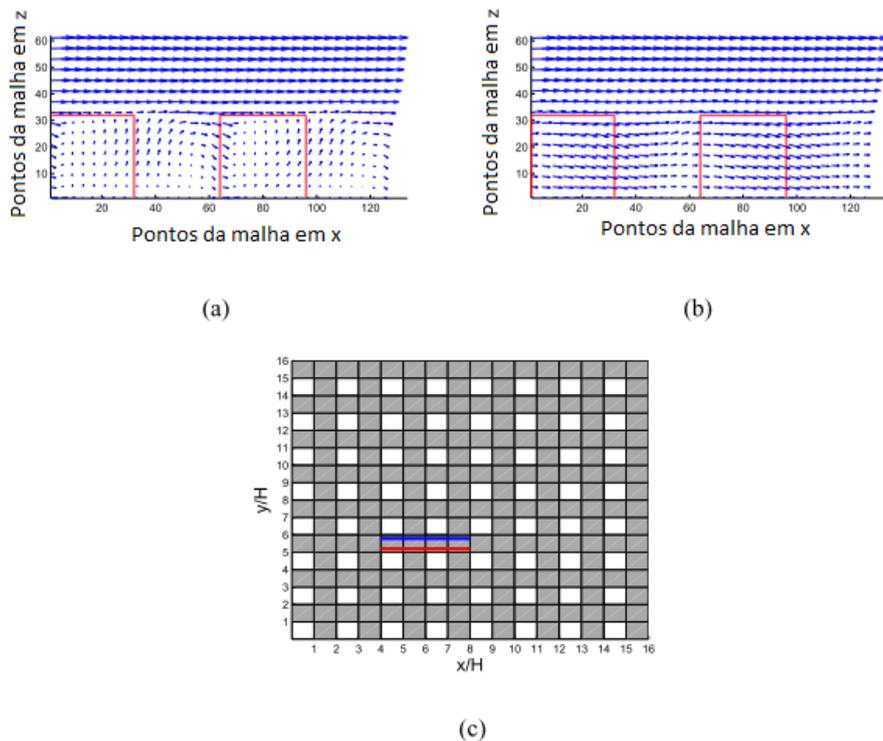


Figura 2.7: Campo de velocidade média em um plano vertical  $xz$  para um conjunto de prédios alinhados e escoamento oblíquo. Localização dos planos: (a) ( - ) e (b) ( - ). (c) Domínio computacional mostrando as localizações dos planos (GOULART, 2012).

Conforme dito na introdução, a velocidade de transferência é um parâmetro extremamente importante no contexto de regiões urbanas, e é utilizado para determinar as trocas de massa de poluentes entre o interior do dossel urbano e o escoamento acima dele. Dessa forma, Bentham e Britter (2003) desenvolveram um modelo simplificado para

o cálculo da velocidade de transferência,  $U_T$ , no topo de um dossel urbano. A equação 2.1 apresenta o modelo desenvolvido por Bentham e Britter (2003).

$$\frac{U_T}{u_*} = \left( \frac{U_{ref} - U_c}{u_*} \right)^{-1}, \quad 2.1$$

onde  $U_{ref}$  é a velocidade de referência para  $z_{ref} = 2,5H$ ,  $u_*$  é a velocidade de fricção e  $U_c$  é a velocidade que caracteriza o escoamento médio dentro do dossel urbano, que é calculada pela fórmula:

$$\frac{U_c}{u_*} = \left( \frac{\lambda_f}{2} \right)^{-1/2}, \quad 2.2$$

onde  $\lambda_f$  é a densidade da área frontal dos prédios.

Hamlyn e Britter (2005) realizaram um estudo numérico do escoamento através de uma matriz regular de prédios para três diferentes valores de densidade de rugosidade ( $\lambda = 0,0625; 0,16$  e  $0,44$ ) usando o modelo das tensões de Reynolds. O principal objetivo do trabalho foi examinar o escoamento dentro do dossel urbano e os processos de transferência no topo do dossel. O escoamento médio dentro do dossel urbano é extremamente dependente da densidade de rugosidade e o comportamento do escoamento pode influenciar o quanto de poluentes será transportado para fora do dossel urbano. Os autores calcularam a velocidade de transferência,  $U_T$ , para as três diferentes configurações. Foi encontrado que  $U_T$  tem um valor de aproximadamente 1% do valor da velocidade de referência para  $z = 2,5H$  no caso da matriz com densidade de rugosidade  $\lambda = 0,0625$  e  $0,16$ , porém um valor de aproximadamente 0,3% quando  $\lambda = 0,44$ . De acordo com os autores, em geometrias mais próximas de cidades reais, espera-se que as velocidades de transferência aumentem, devido ao aumento da turbulência e das trocas devido aos fluxos advectivos através do topo do dossel urbano.

Soulhac *et al.* (2011) apresentaram os detalhes do modelo operacional SIRANE. O modelo SIRANE é classificado como um modelo de redes de ruas, que descreve de forma simplificada a geometria de uma região urbana real baseado na metodologia do modelo de caixa e adota relações paramétricas para descrever os fenômenos de transferência de massa de um poluente dentro e fora do dossel urbano. Dentre as relações paramétricas adotadas no modelo SIRANE, destaca-se a velocidade de transferência,  $U_T$ . De acordo

com os autores, este parâmetro depende somente do escoamento externo e é definido como sendo proporcional a flutuação da velocidade vertical no topo do dossel.

$$U_T = \frac{\sigma_w}{\sqrt{2\pi}}, \quad 2.3$$

onde,  $\sigma_w$  é o desvio padrão da velocidade vertical no topo do dossel urbano. Ainda de acordo com Soulhac *et al.* (2011), para a atmosfera neutra,  $\sigma_w$  é escrito conforme a equação 2.4.

$$\sigma_w = 1,3u_*, \quad 2.4$$

onde  $u_*$  é a velocidade de fricção.

Ressalta-se entretanto, que a parametrização de Soulhac *et al.* (2011) para a velocidade de transferência  $U_T$  foi desenvolvida considerando um cânion urbano bidimensional, conforme pode ser visto em Soulhac *et al.* (2013). O modelo SIRANE aproxima uma região urbana por redes de ruas e considera as intersecções como nós (bidimensionais).

Neste contexto, Soulhac *et al.* (2013) investigaram a confiabilidade da abordagem dos modelos de rede de ruas na modelagem da dispersão de poluentes em áreas urbanas. Inicialmente, eles se concentram em investigar os fluxos verticais de massa de contaminante no topo de um cânion urbano idealizado e infinito, com direção do vento perpendicular ao cânion e com fonte localizada no interior dele. Para isto, os autores apresentam a parametrização proposta por Soulhac *et al.* (2011) para esse transporte vertical e fazem comparações com modelos existentes, concluindo que os modelos são quase equivalentes. Em uma comparação do modelo SIRANE, em sua forma final, com dados experimentais de túnel de vento, para o caso de uma rua de comprimento finito dentro de uma rede de rua, foi possível obter uma boa concordância. Os autores sugerem um estudo mais aprofundado para explorar o potencial deste modelo para fins operacionais. Afirmam ainda, a necessidade de estudos para testar as incertezas do modelo em regiões urbanas mais realísticas.

Em um trabalho recente, Salem *et al.* (2015) realizaram uma análise das parametrizações utilizadas no modelo de redes de ruas SIRANE (SOULHAC *et al.*, 2011). O modelo considera que a dispersão de poluentes dentro do cânion urbano pode ser totalmente simulada modelando três principais fenômenos de transferência: canalização ao longo do

eixo da rua, transferência nas intersecções e transferência vertical entre o interior do cânion e o escoamento acima dele. Dessa forma, o objetivo do trabalho foi avaliar a confiabilidade das parametrizações adotadas para simular estes fenômenos, focando na dependência do escoamento externo. Para isso foi fixado uma geometria (configuração 1 do experimento realizado por Garbero *et al.* (2010)) e considerou-se a variação da direção do vento. Os resultados provaram a confiabilidade do modelo na simulação da dispersão de poluentes em regiões urbanas densas, ou seja, regiões que se assemelham com cânions urbanos. Porém, os autores puderam verificar que o modelo pode ser melhorado considerando-se a dependência da flutuação da direção do vento nas intersecções e da velocidade de transferência vertical em relação a direção do vento incidente. Com isso, sugere-se que uma possível melhora neste modelo é a consideração de diferentes valores da velocidade de transferência, por exemplo, para cada rua, dependendo do ângulo de incidência do vento e não a consideração de um único valor representativo para todo o domínio. Os autores afirmam ainda que é necessário a realização de estudos que considerem regiões urbanas menos densas, que segundo os autores, tendem a ser mais complexas, caracterizadas pela grande interação do escoamento no interior da região urbana com o escoamento desenvolvido acima dela.

Entender o padrão do escoamento e da dispersão de poluentes em regiões urbanas considerando geometrias mais realísticas têm sido o objetivo de muito trabalhos recentes (BOPANA *et al.*, 2010; CARPENTIERI *et al.*, 2012; CARPENTIERI *et al.*, 2009; CHENG; CASTRO, 2002; XIE *et al.*, 2008; XIE *et al.*, 2013). Para tratar uma área urbana de forma mais realística, pode-se considerar um arranjo de prédios com diferentes alturas, larguras, formatos e com diferentes disposições e direções do vento.

Em uma pesquisa bibliográfica encontram-se alguns trabalhos que tratam do escoamento e da dispersão de poluentes em cânions urbanos considerando prédios de diferentes alturas, como por exemplo, So *et al.*(2005) e Xia e Leung (2001). No contexto de dispersão e escoamento em um dossel urbano considerando prédios de diferentes alturas, encontram-se alguns trabalhos que resolvem apenas o escoamento (XIE *et al.*, 2008) e outros que resolvem o escoamento e também a dispersão de contaminantes, considerando fontes pontuais, de linha ou de área (BOPANA *et al.*, 2012; XIE; CASTRO, 2009).

O comportamento do escoamento ao redor de um grupo de obstáculos com diferentes alturas utilizando a simulação de grandes escalas, para incluir os efeitos da turbulência,

foi investigado por Xie *et al.* (2008). Os resultados deste trabalho foram validados utilizando os dados de experimento de Cheng e Castro (2002). Comparações dos resultados deste estudo com resultados de outras simulações numéricas (obtidas por meio de LES) considerando um conjunto de prédios com mesmas alturas foram realizadas a fim de avaliar os efeitos que as diferentes alturas dos prédios promovem no escoamento. Os autores ressaltam a maior complexidade do escoamento ao redor do conjunto de prédios com diferentes alturas em relação ao escoamento ao redor do conjunto de prédios de alturas iguais. Eles afirmam que o escoamento ao redor do conjunto de prédios depende fortemente da disposição e alturas desses prédios. Porém, neste estudo os autores não puderam identificar regimes de escoamento típicos conforme Coceal *et al.* (2007) fizeram para um conjunto de prédios de alturas iguais. Assim os autores questionam se tal caracterização é relevante e se mesmo é possível.

Muitos dos trabalhos encontrados na literatura científica especializada acerca do escoamento e da dispersão de poluentes em áreas urbanas investigam como a variação nas alturas dos prédios pode influenciar os padrões do escoamento em áreas urbanas, como por exemplo, Gu *et al.* (2011); Xia e Leung (2001); Xie *et al.* (2008). Neste contexto, Brixey *et al.* (2009) e Heist *et al.* (2009) investigaram a influência de um único prédio mais alto (uma torre cuja altura é quatro vezes a altura do restante dos prédios) localizado dentro de um conjunto de prédios de alturas uniformes. Foi possível identificar que o escoamento na vizinhança da torre é extremamente alterado e que a velocidade dentro do dossel urbano é aumentada pela presença da torre, com fortes movimentos verticais, resultando em uma melhor ventilação nas ruas do dossel urbano. Esse escoamento vertical faz com que o poluente que está no nível da rua seja levado para fora do dossel. De acordo com Brixey *et al.* (2009) no caso de um grupo de prédios de mesmas alturas o poluente permanece mais tempo dentro do dossel degradando a qualidade do ar neste local. Os autores também apontaram que um movimento lateral ocorre na rua transversal logo a jusante da torre e tem efeitos significativos na dispersão de contaminantes lançados nesta vizinhança.

Para investigar a dispersão de poluentes, de uma fonte de área, dentro de dois diferentes conjuntos de prédios (blocos de mesmas alturas e blocos de diferentes alturas), Boppana *et al.* (2010) realizaram uma simulação numérica utilizando LES. Os resultados da simulação numérica foram comparados com os experimentos de Pascheke *et al.* (2008).

A Figura 2.8 mostra um resultado deste trabalho, onde é possível notar que o conjunto de prédios altera consideravelmente a pluma de poluentes na sua vizinhança. Comparando os resultados apresentados na Figura 2.8 percebe-se que quando o conjunto de prédios tem diferentes alturas (Figura 2.8b) a pluma de contaminantes fica extremamente alterada, diferenciando-se muito da pluma de poluentes ao redor do conjunto de prédios de alturas iguais (Figura 2.8a). Nota-se que a distribuição de concentração é aproximadamente gaussiana, especialmente para distâncias mais a jusante da fonte, quando o conjunto de prédios têm mesmas alturas e isso não ocorre no caso de prédios de diferentes alturas, considerando as mesmas distâncias. Os autores encontraram que altos valores de concentração são observados atrás dos prédios e baixos valores na frente dos prédios para ambas as configurações (para  $z/h_m = 0,3$ , onde  $h_m$  é a altura média dos blocos), embora para o conjunto de prédios com diferentes alturas, o padrão da distribuição não seja tão regular quanto o padrão encontrado no caso do conjunto de prédios com mesmas alturas. Também foi comprovado que uma maior dispersão vertical ocorre no caso do conjunto de prédios de alturas diferentes.

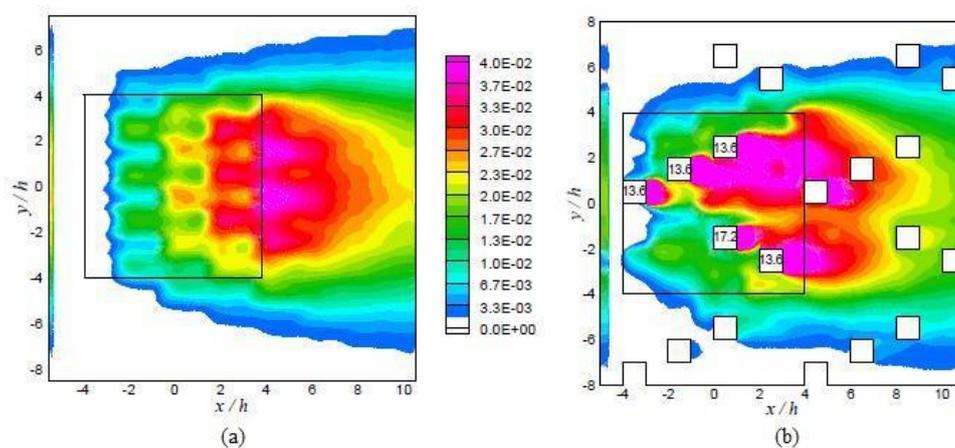


Figura 2.8: Pluma de poluentes ao redor de um grupo de obstáculos para  $z/h = 1,2$ : (a) prédios de mesmas alturas e (b) prédios de diferentes alturas (BOPPANA *et al.*, 2010).

Experimentos em túnel de vento foram realizados por Carpentieri *et al.* (2012) para medir os fluxos de massa de poluentes em interseções de ruas de áreas urbanas realísticas, ou seja, edifícios com alturas e formatos diferentes uns dos outros. Este trabalho foi parte do projeto DAPPLE/UK, focando na região da vizinhança da intersecção entre Marylebone Road e Gloucester Place no centro de Londres, Reino Unido. Os experimentos mostraram que os fluxos horizontais turbulentos de massa de poluentes são insignificantes quando

comparados com os fluxos médios de massa de poluentes dentro do dossel urbano. Por outro lado, os fluxos verticais turbulentos de massa de poluentes através do topo do dossel urbano são importantes no processo de transferência de massa de poluente entre o interior do dossel urbano e o escoamento acima dele. Esses fluxos provocam um aumento na troca turbulenta no topo do dossel urbano. Os autores afirmam que é importante realizar experimentos que resultem em conjuntos de dados confiáveis. Dessa forma, os processos físicos que ocorrem na dispersão de poluentes em áreas urbanas, como por exemplo, a transferência de massa de poluente através do topo de um dossel urbano, poderão ser mais bem entendidos e conseqüentemente modelos de dispersão para áreas urbanas, poderão ser desenvolvidos com maior generalidade.

Neste capítulo foi possível constatar que são muitos os trabalhos que investigam o escoamento e a dispersão de poluentes em áreas urbanas: cânions urbanos, dosséis urbanos com prédios de alturas iguais e dosséis urbanos com prédios de alturas diferentes. Porém, certos temas ainda necessitam ser mais estudados, como por exemplo, a transferência de massa no topo de um dossel urbano. Alguns autores que abordam este tema, Liu *et al.* (2005), por exemplo, tem como principal objetivo entender o processo de ventilação e diluição de poluentes dentro de um cânion urbano. Outros autores se concentram no desenvolvimento e análises de parametrizações para modelos mais simplificados (SALEM *et al.*, 2015; SALIZZONI *et al.*, 2011). Porém, no trabalho experimental de Salizzoni *et al.*, 2011 eles consideraram uma configuração bidimensional. Por outro lado, Salem *et al.*, 2014 realizam uma análise de sensibilidade de parâmetros importantes no fenômeno de transporte de massa de poluente em uma matriz de obstáculos que apesar de ser tridimensional, se assemelha a um cânion urbano. Outros autores se dedicam a entender o padrão do escoamento e da dispersão de poluentes dentro de um conjunto de prédios de diferentes alturas e com geometrias mais realísticas, focando principalmente no entendimento da dispersão de poluentes no interior de um dossel urbano e qual a influência da configuração (prédios de diferentes alturas) neste processo de dispersão.

Dessa forma, percebe-se que ainda é necessário um estudo mais aprofundado sobre a transferência de massa de poluentes no topo de um dossel urbano, utilizando configurações tridimensionais e geometrias mais realísticas com o objetivo de entender o processo de transferência de massa de poluentes no topo dessas regiões.

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo serão descritos os modelos matemáticos, métodos numéricos de solução das equações governantes e configurações de cada simulação realizada. Neste trabalho, foram utilizadas duas metodologias de solução das equações de conservação: Simulação numérica direta (*Direct Numerical Simulation* – DNS) e Simulação das grandes escalas (*Large-Eddy Simulation* – LES). Nas simulações DNS foram consideradas três diferentes configurações, todas com prédios de alturas iguais. Por outro lado, com a metodologia LES foi possível simular um conjunto de prédios com diferentes alturas.

Dessa forma, o capítulo está dividido em três principais seções. A Seção 3.1 apresenta uma descrição da metodologia DNS. A Seção 3.2 apresenta uma descrição da metodologia LES. Na Seção 3.3 são descritas as configurações utilizadas neste trabalho.

O escoamento de um fluido e o processo de dispersão de poluentes na atmosfera são governados pelas equações de conservação da massa, quantidade de movimento, energia e espécie química. A seguir são apresentadas as equações governantes na sua forma completa e considerando o fluido como newtoniano.

*Equação da Conservação de Massa*

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho U_i}{\partial x_i} = 0. \quad 3.1$$

*Equação da Conservação da Quantidade de Movimento*

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho U_i U_j}{\partial x_j} = \frac{\partial \left[ 2\mu S_{ij} - \left( p + \frac{2}{3}\mu \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \right]}{\partial x_j} + \rho g_i, \quad 3.2$$

onde

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right). \quad 3.3$$

*Equação da Conservação de Energia*

$$\frac{\partial \rho e}{\partial t} + \frac{\partial \rho U_i e}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( k_c \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \Phi + \left( \frac{\partial p}{\partial t} + U_i \frac{\partial p}{\partial x_i} \right) + F_H, \quad 3.4$$

onde (para um gás perfeito)

$$\frac{\partial e}{\partial x_i} = c_p \frac{\partial T}{\partial x_i}, \quad 3.5$$

*Equação da Conservação de Massa da Espécie Química*

$$\frac{\partial \rho c}{\partial t} + \frac{\partial \rho U_i c}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \rho D_m \frac{\partial c}{\partial x_i} \right) + S, \quad 3.6$$

onde  $x_i$  são as coordenadas cartesianas,  $U_i$  é a componente instantânea da velocidade na direção  $i$  [ $Lt^{-1}$ ],  $p$  é a pressão [ $mL^{-1}t^{-2}$ ],  $c$  é a concentração de contaminante [ $m/m$ ] e  $e$  é a entalpia [ $L^2t^{-2}$ ].  $\rho$ ,  $\mu$ ,  $c_p$  e  $k_c$  são, respectivamente, a massa específica [ $mL^{-3}$ ], a viscosidade molecular do fluido [ $mL^{-1}t^{-1}$ ], calor específico a pressão constante [ $L^2t^{-2}T^{-1}$ ] e a condutividade térmica do ar [ $mLT^{-1}t^{-3}$ ].  $D_m$  é a difusividade molecular do contaminante no fluido [ $L^2t^{-1}$ ].  $F_H$  e  $S$  são as fontes de energia [ $mL^{-1}t^{-3}$ ] e massa de um contaminante [ $mt^{-1}L^{-3}$ ], respectivamente.  $\Phi$  é a dissipação viscosa da energia [ $mL^{-1}t^{-3}$ ]. Com as dimensões escritas como segue: [m] massa, [L] comprimento, [t] tempo e [T]

temperatura.

Conforme foi visto nos capítulos anteriores, o escoamento ao redor de um grupo de obstáculos é extremamente complexo, com intensas zonas de recirculação, tridimensionais e movimentos turbulentos. As equações de conservação, da forma que foram escritas acima, são válidas para a solução do escoamento em regime laminar ou turbulento.

A seguir são descritas as duas metodologias utilizadas neste trabalho, bem como as equações governantes na forma em que serão resolvidas e as configurações utilizadas neste estudo.

### 3.1 Simulação numérica direta (*Direct numerical simulation - DNS*)

A metodologia DNS foi utilizada para resolver o escoamento e dispersão de poluentes, devido a uma fonte pontual contínua, através de uma matriz de obstáculos de mesmas alturas. Será apresentada a seguir uma breve descrição dessa metodologia para o problema estudado neste trabalho. É importante ressaltar que a simulação DNS foi executada na Universidade de Reading e que nesta tese realizou-se o tratamento dos dados obtidos nestes experimentos numéricos. Para uma descrição mais detalhada veja (BRANFORD *et al.*, 2011; COCEAL *et al.*, 2006; YAO *et al.*, 2001).

A simulação numérica direta resolve todas as escalas espaciais e temporais da turbulência, sendo necessária a utilização de um método numérico adequado para a discretização das equações de conservação. Neste trabalho considera-se o fluido newtoniano e incompressível e atmosfera neutra. Como a atmosfera é considerada neutra, a Equação 3.4 não será resolvida.

Considerando a equação de Navier-Stokes para um escoamento incompressível e com viscosidade constante:

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_j} + g_i, \quad 3.7$$

onde  $\rho$  é a densidade do fluido,  $p$  é a pressão,  $\nu$  é a viscosidade cinemática e  $g_i$  representa as forças de corpo. Dessa forma, com o objetivo de resolver o escoamento através de um

conjunto de obstáculos, a equação 3.7 foi discretizada usando um método de diferenças finitas centradas de segunda ordem no espaço e o método de segunda ordem explícito de Adams Bashforth no tempo, baseado no método da correção da pressão. O código é paralelizado e uma estratégia de mapeamento multibloco flexível é desenvolvida para lidar com o escoamento em um domínio contendo uma geometria complexa. Em seguida, a equação de Poisson para pressão é resolvida por um método *multigrid*. Uma descrição completa do código computacional pode ser encontrada em Branford *et al.* (2011).

Condições de contorno periódicas foram impostas nas faces laterais e nas seções de entrada e saída do domínio de estudo. No topo do domínio foi considerada a condição de cisalhamento livre (*free-slip*) e na parte inferior do domínio, chão e paredes dos prédios, foi considerada a condição de não deslizamento (*no-slip*) onde as componentes da velocidade são nulas. O escoamento é mantido por um gradiente de pressão dado por:

$$\frac{dp}{dz} = -\rho \frac{u_*^2}{H_T} \quad 3.8$$

onde  $u_*$  é a velocidade total de fricção e  $H_T$  é a altura total do domínio.

O número de Reynolds baseado na velocidade de fricção é calculado da seguinte forma:

$$Re_* = \frac{u_* H}{\nu}, \quad 3.9$$

onde  $H$  é a altura dos prédios e  $\nu$  é a viscosidade cinemática. Para todas as simulações que utilizam a metodologia DNS apresentadas nesta tese,  $Re_* = 500$ .

O número de Reynolds baseado na altura do prédio e na velocidade no topo do domínio está entre 4750 e 7000. Branford *et al.* (2011) e Coceal, *et al.* (2006) discutem o fato desse número de Reynolds ser muito pequeno quando comparado com o número de Reynolds encontrado em um escoamento atmosférico real. Porém, eles encontraram evidências nos trabalhos de túnel de vento de Snyder e Castro (2002) e nas simulações numéricas de Xie e Castro (2006) de uma fraca dependência do número de Reynolds para escoamentos através de obstáculos com formas retangulares nesta faixa de Reynolds estudado.

Os experimentos numéricos de DNS foram executados no supercomputador ThamesBlue<sup>1</sup> da Universidade de Reading, Reino Unido (mais detalhes veja BRANFORD *et al.*, 2011). O tempo total de simulação foi determinado em função de uma escala de tempo característica definida como  $T_s = H/u_*$ , onde  $T_s$  é a escala de tempo característica dos turbilhões gerados pelos prédios. Todos os experimentos numéricos foram simulados com um passo de tempo de  $0,00025T_s$  e com resolução da malha computacional igual a  $\Delta = H/32$ . A Tabela 3.1 mostra o tempo de simulação de cada experimento numérico após incluir o escalar.

É importante ressaltar que nesta tese foram analisados os dados de DNS e não foram realizadas as simulações. As simulações foram realizadas por pesquisadores da Universidade de Reading, UK.

Tabela 3.1: Tempo de cada simulação DNS após incluir o escalar.

<b>Simulações</b>	<b>Tempo total de simulação após incluir o escalar</b>
45° regular	$100T_s$
0° regular	$75T_s$
45° escalonado	$100T_s$

Todos os experimentos numéricos foram inicialmente simulados até que o escoamento estivesse completamente desenvolvido, com um tempo total de simulação igual a  $200T_s$ . Após esse estágio, o escalar foi incluído por meio da resolução numérica da equação de conservação de massa de uma espécie química dada pela equação 3.10, na qual é então inserida o campo de velocidade resolvido.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + U_i \frac{\partial c}{\partial x_i} = D_m \frac{\partial^2 c}{\partial x_j \partial x_j} + S, \quad 3.10$$

---

<sup>1</sup> O supercomputador ThamesBlue é composto de 700 nós de processamento, interconectados por uma rede Myrinet de baixa latência. Cada nó de processamento é composto por 2 processadores dual core Power PC 970 MP com 8 GB de memória RAM.

onde  $c$  é a concentração do poluente,  $D_m$  é a difusividade molecular do fluido e  $S$  é o termo de fonte que é escrito da seguinte forma:

$$S = Q\delta^3(x - x_s), \quad 3.11$$

onde  $Q$  é a taxa de emissão da fonte, que é constante para estas simulações,  $x$  é a posição qualquer no espaço,  $x_s$  é a posição da fonte e  $\delta^3(x)$  é a função delta de Dirac.

Considerando as condições de contorno periódicas utilizadas nestas simulações, uma camada de esponja (concentração igual a zero) é aplicada em torno de todo o domínio para impedir que o escalar entre novamente dentro do domínio. Dessa forma o escalar irá escapar livremente no topo do domínio.

Nestes experimentos numéricos foi possível inserir fontes pontuais múltiplas do escalar. Dessa forma, com apenas um experimento tem-se várias fontes, o que permite fazer uma média *ensemble* para o escalar. De acordo com Branford *et al.* (2011) essa estratégia pode reduzir substancialmente o tempo de duração na qual a simulação deve ser executada para produzir estatísticas estáveis.

### **3.2 Simulação das grandes escalas (*Large-eddy simulation* - LES)**

Conforme seção anterior, a DNS foi utilizada para a simulação das configurações com prédios de alturas similares. Devido à complexidade da geometria e a não disponibilidade de recursos computacionais, as simulações da configuração com prédios de diferentes alturas foi efetuada usando a LES. As simulações LES foram realizadas no Laboratório de Poluição do Ar do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo.

A LES é uma metodologia intermediária à simulação numérica direta e à simulação via equações médias de Reynolds. Na LES as estruturas turbulentas transportadoras de energia e quantidade de movimento são resolvidas diretamente da solução das equações filtradas, enquanto que apenas as menores estruturas são modeladas. Essa característica dos modelos LES é um dos grandes atrativos do uso dessa técnica na modelagem da turbulência.

Segundo Xie e Castro (2006), a metodologia LES mostra-se mais adequada para simular o escoamento ao redor de um grupo de obstáculos do que a RANS. A técnica RANS falha em prever adequadamente alguns fenômenos, como por exemplo, a intensidade do fluxo reverso atrás de cada obstáculo.

A LES ainda permite uma análise mais aprofundada dos fenômenos físicos envolvidos no escoamento ao redor de um grupo de obstáculos, pois a solução obtida por meio desta técnica é transiente, possibilitando a obtenção do espectro da turbulência, o que não é possível com a utilização dos modelos baseados em RANS.

Na LES um filtro é aplicado para a separação das escalas que serão resolvidas diretamente das escalas de submalha que serão modeladas. Assim, as variáveis presentes nas equações governantes são separadas em uma parte chamada de grandes escalas  $\bar{F}(\vec{x}, t)$  e em outra parte chamada submalha  $f'(\vec{x}, t)$ :

$$F(\vec{x}, t) = \bar{F}(\vec{x}, t) + f'(\vec{x}, t). \quad 3.12$$

A parte filtrada é dada por:

$$\bar{F}(\vec{x}, t) = \int_D F(\vec{x}', t) G(\vec{x} - \vec{x}', t) d\vec{x}' \quad 3.13$$

A função G é o filtro de corte no espaço físico, também definida como *top-hat* no espaço físico ou filtro por volume, e é definida por:

$$G(\vec{x}) = \begin{cases} 1/\Delta^3, & \text{se } |\vec{x}| \leq \Delta/2, \\ 0, & \text{se } |\vec{x}| > \Delta/2. \end{cases} \quad 3.14$$

$\Delta$  é o tamanho característico do filtro, que caracteriza a frequência de corte da filtragem.

### ***Separação de Escalas e Filtragem das Equações***

Aplicando-se o processo de filtragem às equações de conservação de massa, quantidade de movimento e espécie química (a equação de energia não é resolvida, pois a atmosfera é considerada neutra) e considerando o fluido newtoniano e incompressível obtém-se:

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i} = 0 \quad 3.15$$

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}_i \bar{U}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} [2\nu \bar{S}_{ij} - \tau_{ij}] \quad 3.16$$

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}_i \bar{c}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( D_m \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_j} - q_j \right) + S \quad 3.17$$

onde  $x_i$  são as coordenadas cartesianas na direção  $i$  ( $i = 1, 2, 3$ ),  $t$ ,  $\nu$  e  $D_m$ , são respectivamente, o tempo, a viscosidade cinemática e o coeficiente de difusão do contaminante.  $\bar{U}_i$ ,  $\bar{c}$  e  $\bar{P}$  representam, respectivamente, os valores filtrados da velocidade na direção  $i$ , a concentração do contaminante e a pressão.  $\bar{S}_{ij}$  é o tensor taxa de deformação calculado em função das escalas resolvidas e é escrito conforme Equação 3.18.

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right]. \quad 3.18$$

O efeito das escalas não resolvidas de submalha aparece nas equações como a tensão de submalha  $\tau_{ij}$  e o fluxo de submalha  $q_j$  escritos como:

$$\tau_{ij} = \overline{U_i U_j} - \bar{U}_i \bar{U}_j \quad 3.19$$

e

$$q_j = \overline{cU_j} - \bar{c}\bar{U}_j. \quad 3.20$$

### ***Modelo de Escala de Submalha***

Nas Equações 3.16 e 3.17 aparecem os termos de submalha que representam a interação entre as grandes e pequenas escalas. Estes termos devem ser modelados, já que não podem ser resolvidos diretamente. A seguir é apresentado o modelo de submalha de Smagorinsky, que será utilizado nesta tese.

O modelo de submalha de Smagorinsky foi proposto por Smagorinsky em 1963, baseando-se na hipótese de equilíbrio local para as pequenas escalas, ou seja, que a produção de tensões turbulentas da escala submalha seja igual a dissipação conforme mostra a Equação 3.21 (SILVEIRA-NETO, 2002).

$$-\tau_{ij}\bar{S}_{ij} = \varepsilon_{ij} \quad 3.21$$

Considerando

$$\tau_{ij} = -2\nu_t\bar{S}_{ij} \quad 3.22$$

A Equação 3.21 pode ser escrita como  $2\nu_t\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij} = \varepsilon_{ij}$ . Com este conjunto de equações pode-se exprimir a viscosidade turbulenta da seguinte forma:

$$\nu_t = (C_s\Delta)^{4/3}\varepsilon_{ij} \quad 3.23$$

onde  $C_s$  é um parâmetro denominado constante de Smagorinsky e  $\Delta$  é a banda do filtro,  $\Delta = (\Delta x\Delta y\Delta z)^{1/3}$ , que depende da malha de discretização. Substituindo a Equação 3.23 na Equação 3.21, a viscosidade cinemática turbulenta pode ser obtida por:

$$\nu_t = (C_s\Delta)^2 \sqrt{2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij}} \quad 3.24$$

O modelo de Smagorinsky tende a produzir valores elevados da viscosidade turbulenta próximo à parede. Por isso, LILLY, 1966 propôs uma modificação no modelo, tendo como resultado a seguinte expressão:

$$\mu_t = \rho L_s^2 \sqrt{2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij}} \quad 3.25$$

onde  $L_s$  é o comprimento de mistura da escala de submalha, sendo calculado pela Equação 3.26 .

$$L_s = \min(kd, C_s\Delta). \quad 3.26$$

Onde  $k$  é a constante de Von Kármán (considerada igual a 0,42) e  $d$  é a distância do volume de controle mais próximo à parede. Essa modificação faz com que o cálculo da viscosidade turbulenta tenha um amortecimento no valor da viscosidade apenas na região próxima a parede, para as regiões afastadas o modelo é igual ao modelo de Smagorinsky na sua forma original.

O fluxo da submalha,  $q_j$ , também é escrito em função da viscosidade turbulenta, da seguinte forma  $q_j = -\frac{\nu_t}{Sc} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_j}$ , onde  $Sc$  é o número de Schmidt.

Assim como nos experimentos numéricos usando a metodologia DNS, condições de contorno periódicas serão impostas nas faces laterais e nas seções de entrada e saída do domínio de estudo para a simulação LES. No topo do domínio será considerada a condição de cisalhamento livre (*free-slip*) e na parte inferior do domínio, chão e paredes dos prédios, é considerada a condição de não deslizamento (*no-slip*), ou seja, as componentes da velocidade são nulas. Além disso, o fluxo de massa é considerado nulo. Portanto a derivada da concentração na direção normal às paredes é nula. Novamente, o escoamento é mantido por um gradiente de pressão dado por:

$$\frac{dp}{dz} = -\rho \frac{u_*^2}{H_T}, \quad 3.27$$

onde  $u_*$  é a velocidade total de fricção e  $H_T$  é a altura total do domínio. O número de Reynolds baseado na velocidade de fricção,  $Re_* = u_* h_m / \nu$ , foi de 341. Assim como o valor de Reynolds utilizado foi selecionado para permitir a comparação com os dados experimentais de Cheng e Castro (2002).

As equações de conservação apresentadas nesta seção são solucionadas numericamente empregando o *software* comercial FLUENT 14.5 (ANSYS Inc.). O método numérico utilizado é o método de volumes finitos. Em Patankar (1980) e Versteeg e Malalasekera (1997) são dados mais detalhes do método numérico utilizado nesta simulação LES.

Para discretizar as equações de conservação de massa e de quantidade de movimento foi utilizado um método de segunda ordem denominado diferenças centrais limitado (*bounded central differencing*) e para a discretização no tempo foi utilizado um método de segunda ordem implícito. Para a discretização da equação de conservação de massa de uma espécie química utilizou-se o método *upwind* de primeira ordem. O acoplamento pressão-velocidade foi realizado através do algoritmo SIMPLEC (*SIMPLE-Consistent*) que é baseado no algoritmo SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*) descrito por Patankar (1980).

Depois de realizada a discretização das equações no espaço e no tempo, o sistema algébrico de equações gerado será resolvido utilizando o método *multigrid* (HUTCHINSON; RAIHBY, 1986), juntamente com o algoritmo Gauss-Seidel (PATANKAR, 1980). O método *multigrid* trabalha com uma faixa de malha, cada vez mais grossa, onde o erro é suavizado. Em cada nível de malha, os componentes do erro correspondente são reduzidos, acelerando o processo de convergência.

De forma análoga à simulação DNS, nesta simulação LES, o tempo total de simulação também foi determinado em função de uma escala de tempo característica  $T_s$ . Neste caso  $T_s = h_m/u_*$ , onde  $h_m$  é a altura média dos prédios. O passo de tempo foi de  $0,002T_s$ , sendo o tempo total de simulação igual a  $400T_s$ , que foram definidos de acordo com Xie *et al.* (2008).

A malha de discretização empregada é composta de volumes hexaédricos com tamanho não uniforme, possuindo um maior refinamento próximo às superfícies dos prédios e do solo, conforme indicado na Figura 3.1. A resolução da malha próximo aos prédios é  $\Delta = h_m/20$  e no núcleo do escoamento, nas regiões mais afastadas das superfícies  $\Delta = h_m/10$ . A malha utilizada na simulação possui um total de quatro milhões de pontos.

As simulações foram executadas em um cluster de PCS composto por 5 nós de processamento, cada um com 1 processador Intel I7 4770 3.40 GHz de oito núcleos e 32 GB de memória RAM.

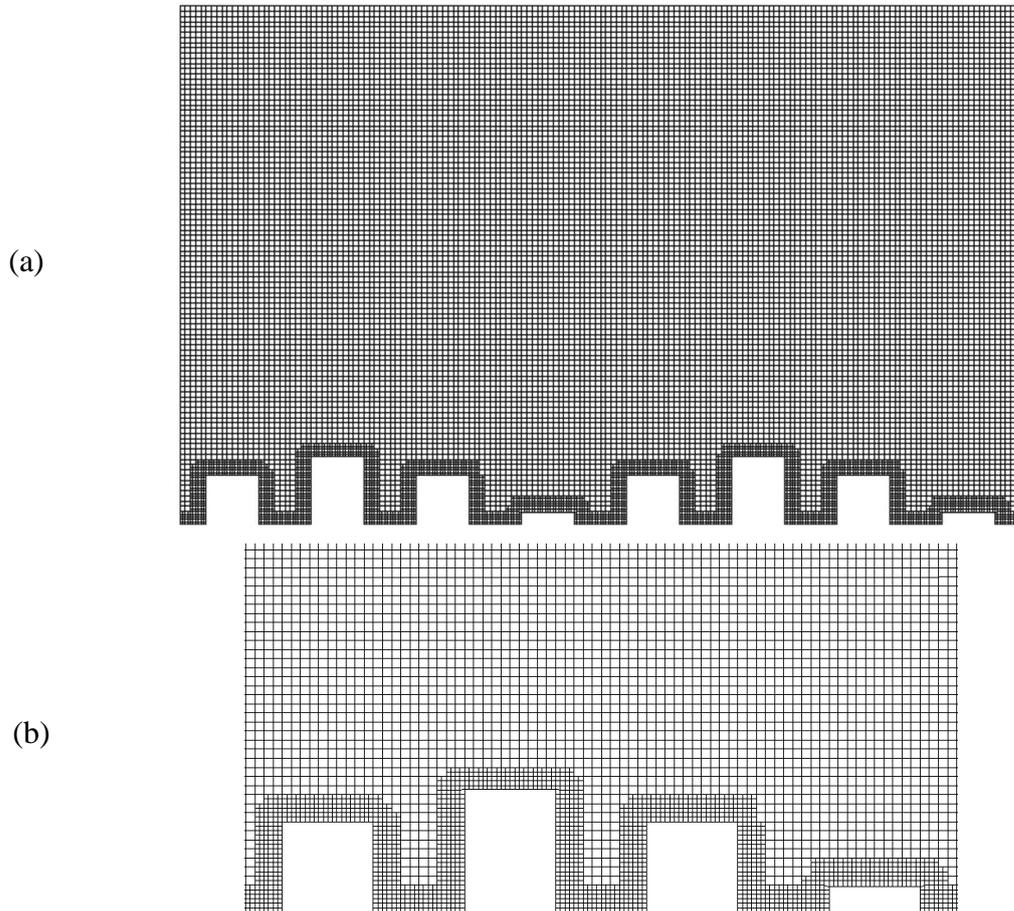


Figura 3.1: (a) Corte transversal, ao longo do eixo  $y$ , da malha computacional utilizada para a simulação LES e (b) ampliação da malha para os quatro primeiros prédios.

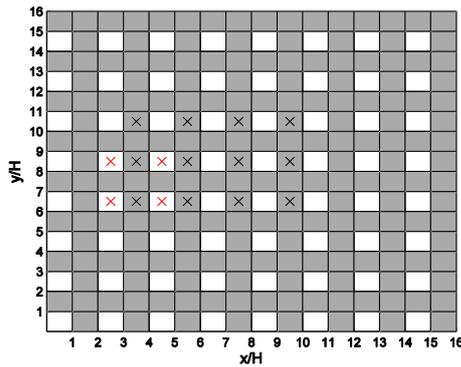
### 3.3 Descrição das configurações estudadas

#### *Descrição das configurações para a simulação DNS*

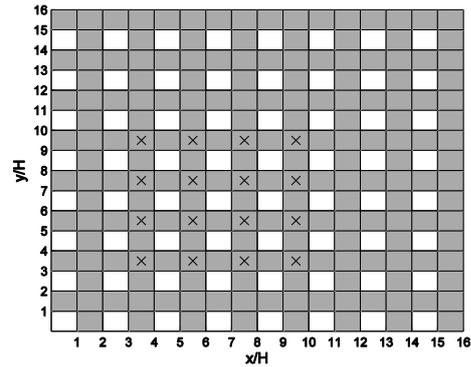
Os dados de DNS foram obtidos utilizando três diferentes configurações de prédios, um conjunto de prédios alinhados e direção do vento igual a  $45^\circ$  e  $0^\circ$ , e um conjunto de prédios escalonados com direção do vento igual a  $45^\circ$ . A fonte de poluentes é pontual, contínua sem reação química ou qualquer tipo de deposição, localizada no interior do conjunto de prédios, próximo ao chão. No caso do escoamento direcionado a  $0^\circ$ , além da

fonte no interior do conjunto de prédios, existe também a fonte localizada acima do dossel urbano, a uma altura de  $2H$  a partir do solo.

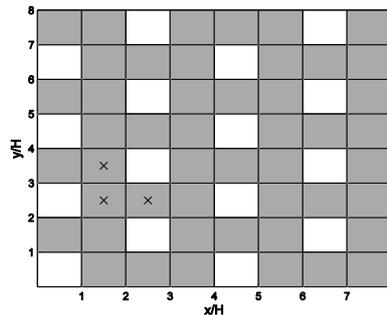
A Figura 3.2 apresenta as três diferentes configurações mostrando a localização das fontes. Para todos os domínios, os prédios são cúbicos de altura  $H$  e o espaçamento entre os prédios tem a mesma medida da largura dos prédios (que neste caso é  $H$ ). As dimensões do domínio são  $16H$  de comprimento,  $16H$  de largura e  $8H$  de altura.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.2: Vista do domínio computacional para a simulação DNS para um conjunto de prédios alinhados com (a) direção do vento igual a  $0^\circ$  e (b) direção do vento igual a  $45^\circ$  e (c) um conjunto de prédios escalonados com direção do vento igual a  $45^\circ$ .  $\times$  representam as fontes localizadas no interior do dossel urbano, para  $z = 0,00625H$ , e  $\times$  representam as fontes localizadas acima do dossel urbano, para  $z = 2H$ . Os quadrados brancos representam os prédios e os quadrados cinzas representam as ruas.

A Figura 3.2a mostra a configuração de prédios alinhados e escoamento à  $0^\circ$ , onde são observadas doze fontes próximas ao chão (localizadas entre os prédios) e quatro fontes acima do dossel urbano (localizadas a  $2H$  a partir do solo). Para o caso de prédios

alinhados e escoamento à 45° (Figura 3.2b), são consideradas dezesseis fontes no interior do dossel urbano, localizadas próximas ao chão. Quando, na simulação de DNS, é considerada a quantidade de fontes citadas acima, os resultados levam em consideração uma média *ensemble* das fontes.

A Figura 3.2c mostra o domínio computacional para o caso de prédios escalonados e escoamento à 45°. Neste caso são consideradas três diferentes localizações da fonte e não é feita uma média das repetições como nos casos anteriores, devido ao tamanho do domínio. Denota-se fonte 1 (F1) a fonte localizada atrás do prédio, fonte 2 (F2) a fonte localizada entre dois prédios e fonte 3 (F3) a fonte localizada na frente do prédio.

O domínio apresentado na Figura 3.2 é dividido em caixas cúbicas de altura  $H$ , conforme Figura 3.3. O primeiro nível de caixas cúbicas consiste exatamente do interior do dossel urbano, prédios, ruas e intersecções, e a partir do segundo nível de caixas cúbicas, tem-se a região acima do dossel urbano.

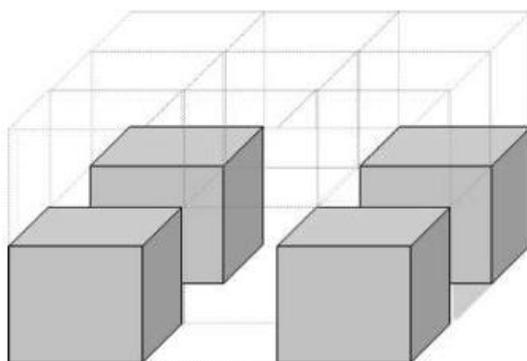


Figura 3.3: Vista esquemática do primeiro nível de caixas cúbicas (os prédios são representados pelas caixas cinzas) e o segundo nível de caixas cúbicas (acima do dossel urbano) (GOULART, 2012).

### ***Descrição da configuração para a simulação LES***

Os dados de LES foram obtidos a partir de uma única configuração de prédios, um conjunto de prédios escalonados e com diferentes alturas. Essa configuração é a mesma utilizada no experimento em túnel de vento Cheng e Castro (2002). Este experimento foi realizado para uma atmosfera neutra e considerou-se apenas o escoamento, com direção do vento igual a 0°. Entretanto, nesta tese, os experimentos numéricos consideram três

diferentes localizações para fonte, que são pontuais, contínuas e sem reação química ou qualquer tipo de deposição.

Na Figura 3.4 é apresentada a configuração utilizada na simulação LES, mostrando a direção do vento e a localização das fontes. As três posições diferentes para a fonte foram simuladas de maneira a investigar o efeito da emissão sobre o padrão da dispersão e fluxos através do dossel. As fontes foram localizadas próximo ao chão, a uma altura de  $z = 0,001h_m$ . Duas fontes estão localizadas entre dois prédios e a outra localizada na frente do prédio mais alto do domínio (como pode ser visto na Figura 3.4). O domínio é composto de 64 prédios com alturas que variam de 2,8 mm até 17,2 mm. Dessa forma, a altura média dos prédios é  $h_m = 10\text{ mm}$ . O espaçamento entre os prédios na direção  $y$  é de 10 mm e a distância entre as fileiras de prédios na direção  $x$  também é de 10 mm (veja Figura 3.4). As dimensões do domínio são  $16h_m$  de comprimento,  $16h_m$  de largura e  $8h_m$  de altura.

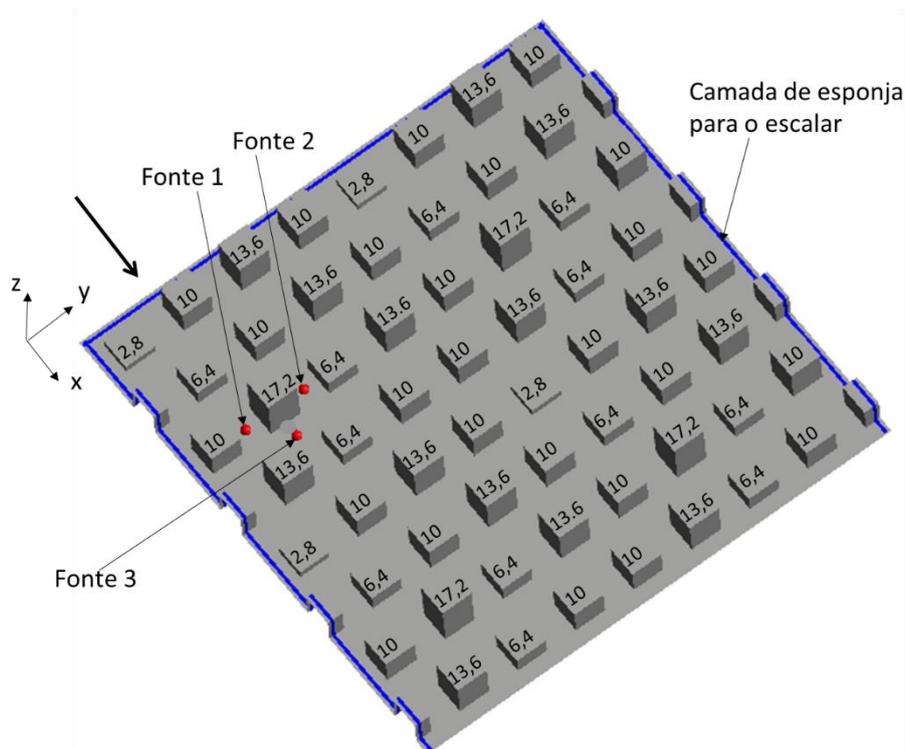


Figura 3.4: Domínio computacional para a simulação LES, mostrando um conjunto de prédios escalonados, com diferentes alturas e direção do vento igual a  $0^\circ$ . As fontes estão indicadas na figura e localizam-se a uma altura de  $z = 0,001h_m$ . Os números no topo de cada prédio indicam as alturas dos prédios em milímetros.

A Tabela 3.2 apresenta um resumo de todas as simulações utilizadas nesta tese.

Tabela 3.2: Resumo de todas as configurações utilizadas.

<b>Simulação</b>	<b>Configuração</b>	<b>Localização da Fonte</b>	<b><i>L</i></b>	<b><i>W</i></b>	<b><i>H</i></b>	<b>Direção do Vento</b>
DNS_0R_A	Prédios alinhados e alturas iguais	No interior do dossel	16	16	8	0°
DNS_0R_B	Prédios alinhados e alturas iguais	Acima do dossel	16	16	8	0°
DNS_45R	Prédios alinhados e alturas iguais	No interior do dossel	16	16	8	45°
DNS_45E_A	Prédios escalonados e alturas iguais	No interior do dossel, atrás do prédio (F1)	8	8	8	45°
DNS_45E_B	Prédios escalonados e alturas iguais	No interior do dossel, entre dois prédios (F2)	8	8	8	45°
DNS_45E_C	Prédios escalonados e alturas iguais	No interior do dossel, na frente do prédio (F3)	8	8	8	45°
LES_0E_A	Prédios escalonados e alturas diferentes	No interior do dossel, entre dois prédios (F1)	16	16	8	0°
LES_0E_B	Prédios escalonados e alturas diferentes	No interior do dossel, entre dois prédios (F2)	16	16	8	0°
LES_0E_C	Prédios escalonados e alturas diferentes	No interior do dossel, na frente do prédio (F3)	16	16	8	0°

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Neste capítulo serão apresentados os resultados das simulações numéricas para o escoamento e dispersão de um escalar passivo através de um conjunto de prédios. Os resultados estão divididos em duas seções principais. A Seção 4.1 apresenta os resultados e discussões para as simulações com prédios de altura uniforme. A Seção 4.2 apresenta os resultados para as simulações com um conjunto de prédios de alturas diferentes (conforme apresentado no Capítulo 3).

### **4.1 Conjunto de prédios de alturas uniformes: dados de simulação numérica direta**

Nesta seção serão apresentados resultados de simulação numérica direta para o escoamento e a dispersão de um escalar passivo considerando um conjunto de prédios. Conforme descrito no Capítulo 3, são consideradas duas diferentes configurações de prédios (alinhados e escalonados), duas diferentes direções do vento ( $0^\circ$  e  $45^\circ$ ) e a fonte de poluente é posicionada no interior do dossel. Para caso do escoamento à  $0^\circ$  também é considerada uma fonte acima do dossel urbano. Os resultados desta seção estão divididos em quatro principais subseções, que apresentam uma visão geral do escoamento e da dispersão de poluentes em um dossel urbano, onde são discutidos os principais mecanismos que influenciam a saída e reentrada de massa de poluente em um dossel urbano, em seguida é apresentada uma evolução temporal da concentração dentro do dossel urbano, mostrando o instante inicial que o poluente atinge uma determinada rua, e

finalmente é feita uma análise de algumas parametrizações disponíveis para o transporte vertical de massa de contaminante no topo do dossel urbano.

#### **4.1.1 Características gerais do escoamento e do campo de concentração médios**

Nesta seção é apresentada uma visão geral do escoamento e da dispersão de poluentes através de um conjunto de prédios alinhados e um conjunto de prédios escalonados.

A Figura 4.1 mostra as linhas de corrente do escoamento médio no tempo no plano horizontal  $xy$ , considerando um conjunto de prédios alinhados com escoamento direcionado à  $0^\circ$  e  $45^\circ$  e um conjunto de prédios escalonados com escoamento direcionado à  $45^\circ$  para três diferentes alturas,  $z/H = 0,14$ ,  $z/H = 0,73$  e  $z/H = 0,98$ , onde  $H$  é a altura dos prédios.

A Figura 4.1a, a Figura 4.1b e a Figura 4.1c mostram as linhas de corrente do escoamento médio através de um conjunto de prédios alinhados com direção do vento igual a  $45^\circ$ . As linhas de corrente do escoamento sofrem uma divisão ao encontrar um prédio e então se formam regiões de recirculação nas faces leste e norte de cada prédio. Nota-se que tais recirculações diminuem à medida que a altura  $z/H$  é aumentada. Os poluentes lançados dentro do dossel urbano ficarão mais tempo aprisionados nesta região devido às recirculações presentes. Por outro lado, quando o escoamento é dividido em duas partes ao encontrar um prédio, a dispersão de poluentes será favorecida e assim a pluma de poluentes ficará cada vez maior e conseqüentemente mais diluída. É importante observar que na interseção, a variação das linhas de corrente com a altura é muito pequena. Porém, entre os prédios a variação dessas linhas é mais significativa, indicando um comportamento tridimensional nestas regiões.

Na Figura 4.1d, na Figura 4.1e e na Figura 4.1f são apresentadas as linhas de corrente do escoamento médio com direção do vento igual a  $0^\circ$  e através de um conjunto de prédios alinhados. O escoamento na rua é canalizado enquanto atrás de cada prédio existe uma recirculação. À medida que a altura  $z/H$  aumenta as linhas de corrente na rua não sofrem qualquer modificação, indicando que nesta região o escoamento pode ser considerado bidimensional. Porém, atrás dos prédios as recirculações têm aspectos diferentes à medida que  $z/H$  aumenta, ou seja, a recirculação atrás de cada prédio é uma estrutura tridimensional.

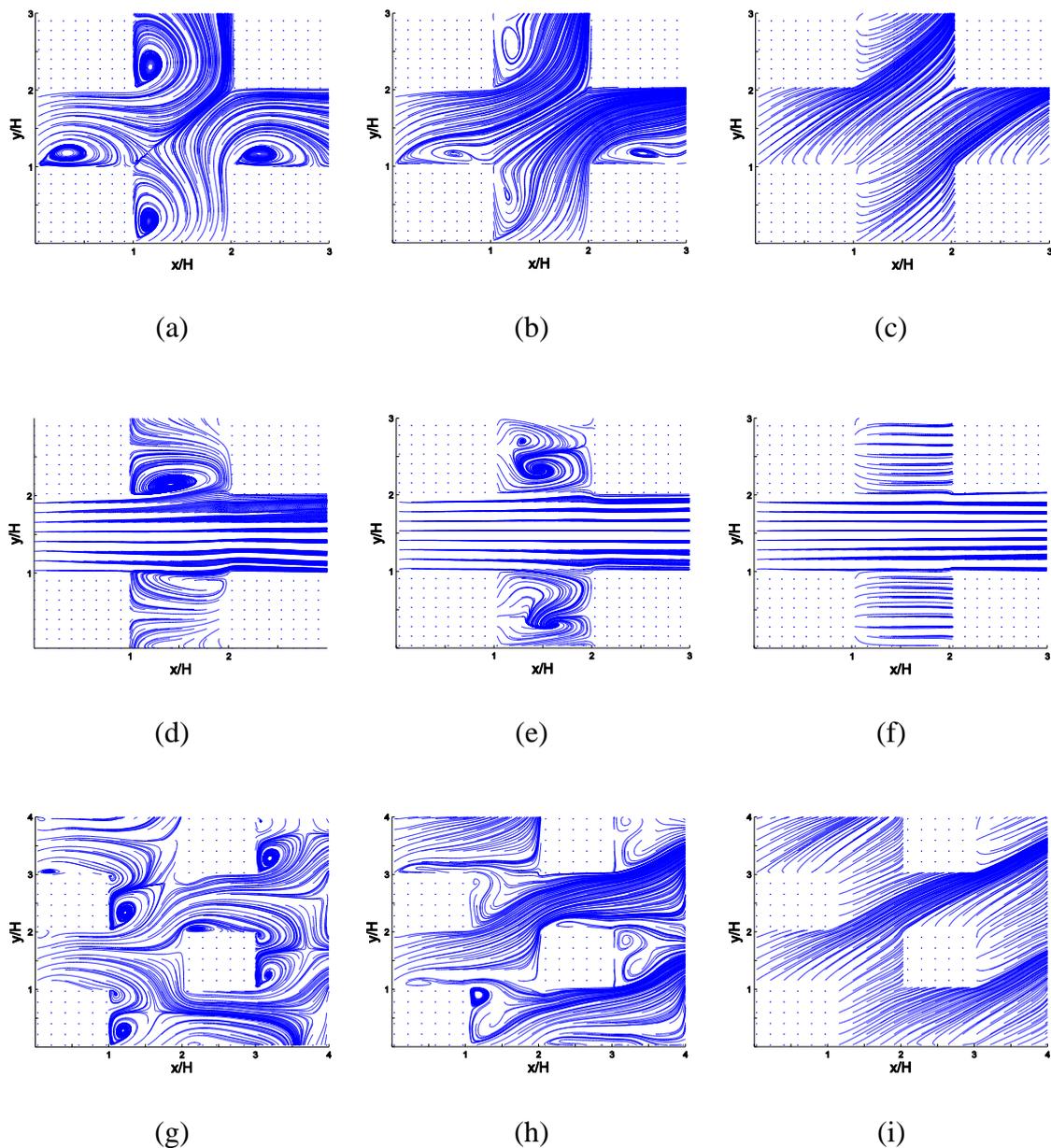


Figura 4.1: Linhas de corrente do escoamento médio nos planos horizontais  $xy$  para (a)  $z/H = 0,14$ ; (b)  $z/H = 0,73$  e (c)  $z/H = 0,98$  com escoamento à  $45^\circ$  através de uma matriz regular; (d)  $z/H = 0,14$ ; (e)  $z/H = 0,73$  e (f)  $z/H = 0,98$  com escoamento à  $0^\circ$  através de uma matriz regular; (g)  $z/H = 0,14$ ; (h)  $z/H = 0,73$  e (i)  $z/H = 0,98$  com escoamento à  $45^\circ$  através de uma matriz escalonada.

A Figura 4.1g, a Figura 4.1h e a Figura 4.1i apresentam as linhas de corrente do escoamento médio para três diferentes alturas,  $z/H = 0,14$ ,  $z/H = 0,73$  e  $z/H = 0,98$ , considerando um conjunto de prédios escalonados e com direção do vento igual a  $45^\circ$ . É

possível ver que dentro do dossel, o escoamento não parece ser orientado à 45°. À medida que a altura  $z/H$  aumenta o escoamento vai sofrendo uma rotação (veja Figura 4.1h) e no topo do dossel urbano (Figura 4.1i) o escoamento é orientado à 45°. Neste caso, o escoamento é mais complexo do que nos casos anteriores devido à configuração dos prédios, porém verificam-se alguns aspectos que aparecem no caso do escoamento direcionado à 45° através de um conjunto de prédios alinhados. Por exemplo, as recirculações nas faces leste e norte de cada prédio e que as linhas continuam a ser divididas quando encontram com um obstáculo. As zonas de recirculação são intensas e altamente tridimensionais, pois a variação das linhas de corrente com a altura é bastante evidente.

A Figura 4.2 e a Figura 4.3 apresentam os contornos de concentração média para um conjunto de prédios alinhados e para um conjunto de prédios escalonados, respectivamente, para duas diferentes alturas.

A escala utilizada em todos os gráficos de contorno de concentração é a escala logarítmica. Dessa forma, os valores apresentados são negativos, variando de -5 a 0. Os valores de concentração são normalizados pelo valor da concentração na fonte.

O campo de concentração médio para o conjunto de prédios alinhados é apresentado na Figura 4.2. São observadas diferenças marcantes entre os campos de concentração para os escoamentos orientados à 45° e à 0°. Quando o escoamento é orientado à 45° a pluma de poluentes encontra um obstáculo e é dividida, fazendo com que a dispersão de poluentes nesta configuração tenha uma pluma de poluentes com maior amplitude. É possível ver que parte do poluente lançado é capturada pelas zonas de recirculação dos prédios adjacentes à fonte, surgindo então as fontes conhecidas como secundárias. Dessa forma, essa fonte secundária irá emitir poluente e parte desse material irá para fora da matriz e a outra parte é carregada pelo escoamento dentro do dossel.

A pluma de poluentes com escoamento orientado à 45° é maior do que a pluma de poluentes com escoamento orientado à 0°. Isto se deve a dispersão topológica que acontece no escoamento oblíquo, pois a pluma encontra o canto de cada prédio e é dividida em duas partes ficando cada vez maior. Por outro lado, no caso do escoamento perpendicular à matriz de obstáculos, em um primeiro momento a pluma encontra a face de um prédio e é dividida em duas partes, alcançando as ruas, onde será quase que

completamente canalizada ao longo dessas ruas, fazendo com que a pluma seja menor do que no caso do escoamento oblíquo.

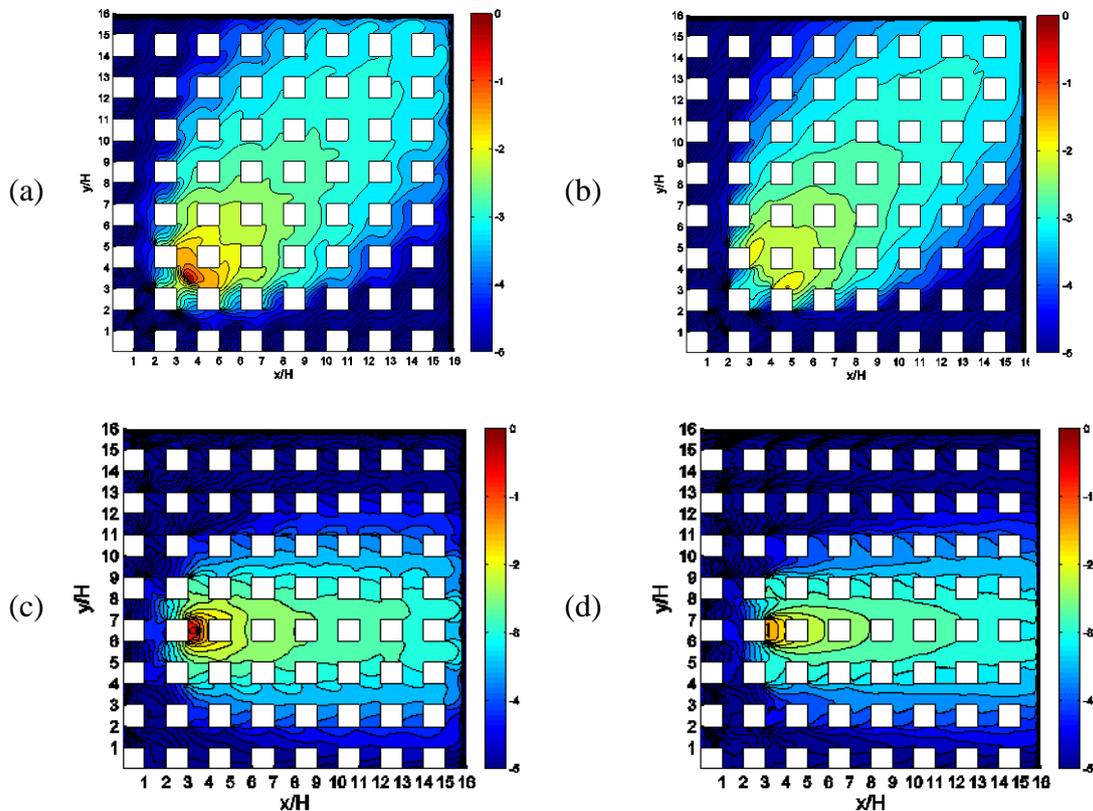


Figura 4.2: Contornos da concentração média nos planos horizontais  $xy$  para um conjunto de prédios alinhados para (a)  $z/H = 0,14$  e (b)  $z/H = 0,98$  para escoamento à  $45^\circ$  e fonte localizada na posição  $(3,5H, 3,5H)$ ; (c)  $z/H = 0,14$  e (d)  $z/H = 0,98$  para escoamento à  $0^\circ$  e fonte localizada na posição  $(3,5H; 6,5H)$ . Em ambos os casos a fonte está localizada a uma altura de  $z/H = 0,0625$ .

A Figura 4.3 apresenta os contornos de concentração média para duas diferentes alturas, considerando um conjunto de prédios escalonados com escoamento direcionado à  $45^\circ$ . Três diferentes localizações de fonte são consideradas: atrás de um prédio (Figura 4.3a e Figura 4.3b); entre dois prédios (Figura 4.3c e Figura 4.3d) e na frente de um prédio (Figura 4.3e e Figura 4.3f).

Quando a fonte é localizada atrás de um prédio a maior parte do poluente lançado fica aprisionada nesta região, devido às zonas de recirculação presentes (Figura 4.3a). No caso da fonte localizada entre dois prédios (Figura 4.3c) a maior parte da pluma é transportada para rua seguinte e parte do poluente é capturada, ficando aprisionado na região de

recirculação do prédio que está localizado à direita da fonte. Comportamento parecido é observado quando a fonte de poluentes é localizada na frente de um prédio. Neste caso, o poluente é lançado numa região de separação do escoamento e a pluma de poluentes é dividida em duas partes e irá se dispersar ao redor do prédio.

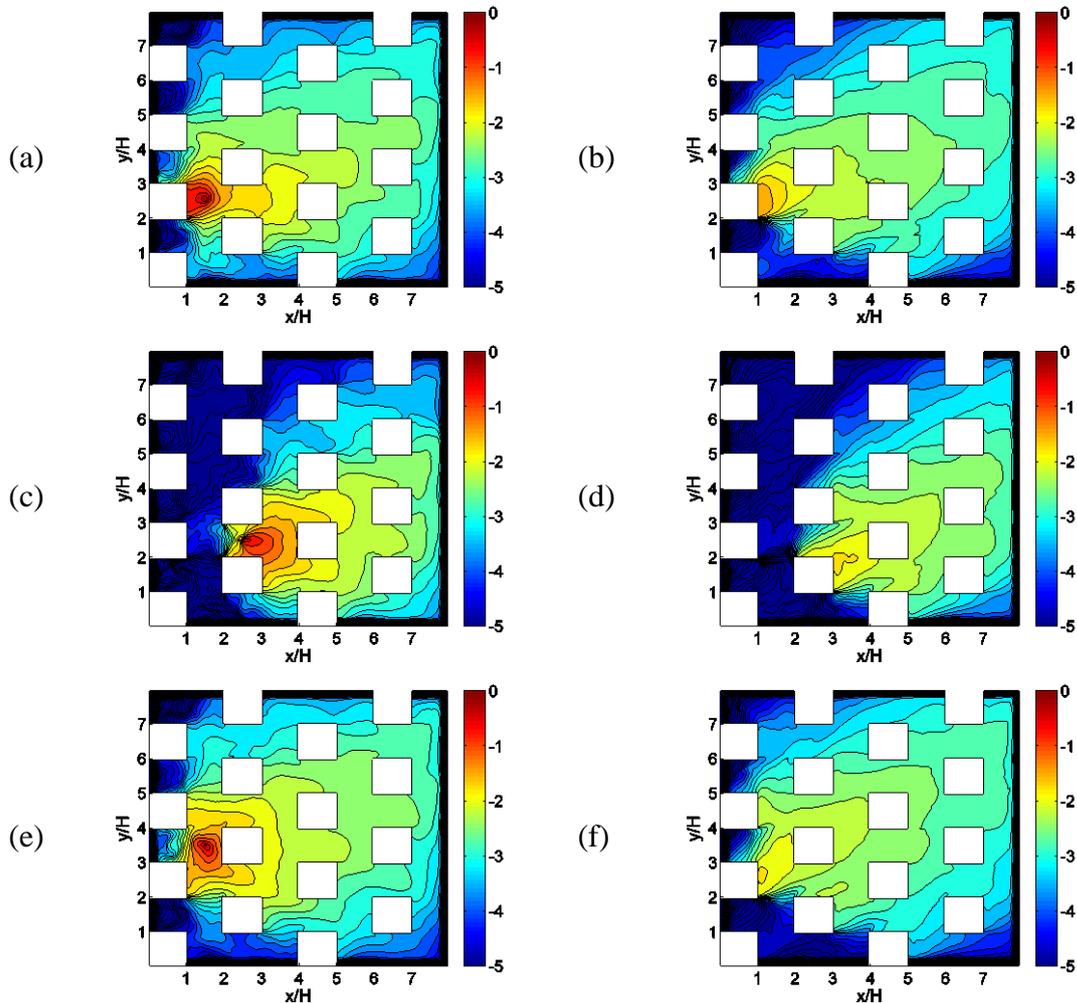


Figura 4.3: Contornos da concentração média nos planos horizontais  $xy$  para um conjunto de prédios escalonados e escoamento à  $45^\circ$ . (a)  $z/H = 0,14$  e (b)  $z/H = 0,98$ , com fonte localizada atrás de um prédio na posição  $(1,5H, 2,5H)$ . (c)  $z/H = 0,14$  e (d)  $z/H = 0,98$ , com fonte localizada entre dois prédios na posição  $(2,5H, 2,5H)$ . (e)  $z/H = 0,14$  e (f)  $z/H = 0,98$ , com fonte localizada na frente de um prédio na posição  $(1,5H, 3,5H)$ . Em todos os casos a fonte está localizada a uma altura de  $z/H = 0,0625$ .

A Figura 4.4 e a Figura 4.5 mostram os contornos de concentração média para um conjunto de prédios alinhados, escoamento  $0^\circ$  e com fonte de poluentes localizada acima do dossel urbano.

A Figura 4.4a e a Figura 4.4b mostram os contornos de concentração média para um conjunto de prédios alinhados dentro do dossel urbano para a fonte alta, nos planos horizontais  $z/H = 0,48$  e  $z/H = 0,98$ , respectivamente. A pluma de poluentes entra no dossel a uma distância de  $x/H = 2,0$  a montante da fonte. A maior parte do poluente é canalizada através das ruas, como acontece quando a fonte de poluentes é localizada dentro do dossel.

Na Figura 4.4c e na Figura 4.4d são apresentados os contornos de concentração média acima do dossel urbano, para  $z/H = 1,98$  e  $z/H = 2,48$ , respectivamente. Verifica-se que a pluma de poluentes é ligeiramente estreita e está sendo transportada pelo escoamento médio. Acima do dossel, o espalhamento da pluma acontece devido ao efeito da difusão turbulenta e dentro do dossel esse efeito é ampliado pela presença dos prédios.

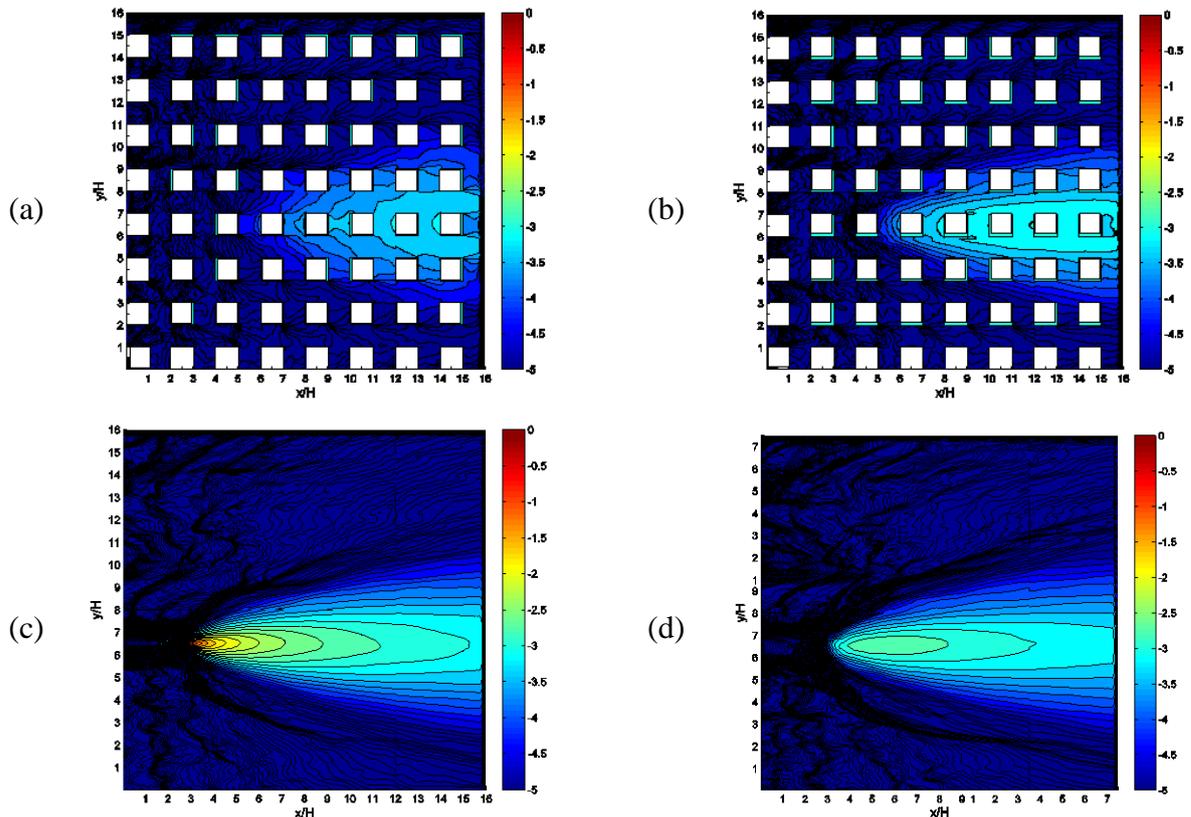
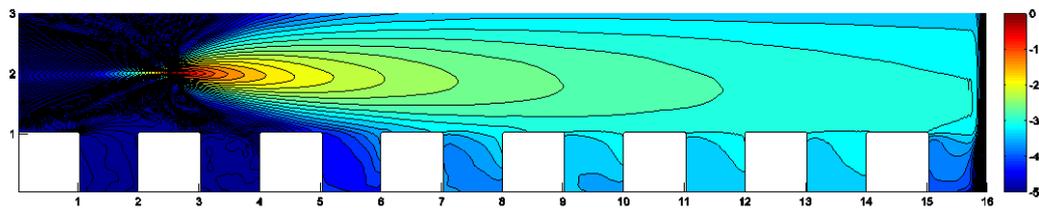


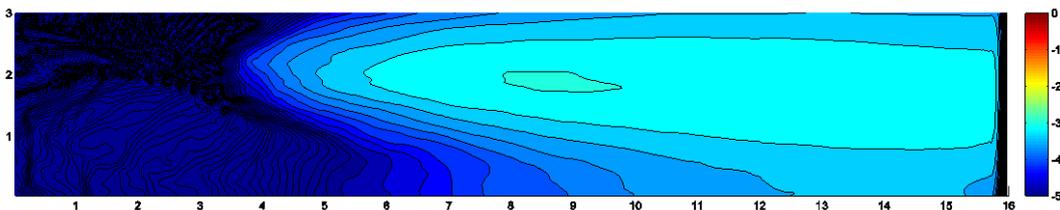
Figura 4.4: Contornos da concentração média nos planos horizontais  $xy$  para um conjunto de prédios alinhados e escoamento à  $0^\circ$  para (a)  $z/H = 0,48$ ; (b)  $z/H = 0,98$ ; (c)  $z/H = 1,98$  e (d)  $z/H = 2,48$ . A fonte de poluentes é localizada a uma altura de  $z/H = 2$  (fonte alta) com  $x/H = 2,5$  e  $y/H = 6,5$ .

A Figura 4.5 mostra os contornos de concentração média nos planos verticais  $y/H = 6,48$  (linha central da pluma) e  $y/H = 7,48$  (rua adjacente à linha central da pluma). Na linha central da pluma,  $y/H = 6,48$ , pode ser visto mais claramente o momento em que o poluente entra no dossel urbano. A linha de centro da pluma é levemente desviada para baixo, em direção ao dossel. Isso provavelmente acontece pelo efeito do dossel sobre o escoamento turbulento acima, gerando um fluxo descendente de poluentes.

Como a fonte de poluentes está acima do dossel urbano, a maior parte do poluente será transportada acima do dossel até atingir o final do domínio. Na Figura 4.5b é possível ver que a pluma de contaminantes está sendo canalizada através da rua.



(a)



(b)

Figura 4.5: Contornos da concentração média nos planos verticais  $xz$  para um conjunto de prédios alinhados e escoamento à  $0^\circ$  para (a)  $y/H = 6,48$  e (b)  $y/H = 7,48$ . A fonte de poluentes é localizada a uma altura de  $z/H = 2$  com  $x/H = 2,5$  e  $y/H = 6,5$ .

Os perfis da concentração média e intensidade da flutuação da concentração como função da distância de uma fonte alta são apresentados na Figura 4.6. Os valores apresentados nestes perfis são coletados acima do dossel (a uma altura de  $1,5H$ ) e no interior do dossel (a uma altura de  $0,5H$ ). São coletados valores médios da concentração em um único ponto, exatamente no meio das caixas localizadas acima do dossel e nas caixas localizadas no interior do dossel. A Figura 3.3 mostra como o domínio computacional foi dividido em caixas cúbicas. A intensidade da flutuação da concentração é denotada por

$C_{rms}/C_{média}$ , onde  $C_{rms}$  é definido como sendo o desvio padrão da concentração em cada caixa.

Analisando a Figura 4.6a, verifica-se que a pluma atinge o chão a distância de  $1H$  a jusante da fonte com níveis extremamente baixos de concentração. O gráfico mostra que o maior valor da concentração média dentro da matriz de cubos ocorre para  $9H$  a jusante da fonte. Acima do dossel, o valor máximo da concentração média ocorre para  $3H$  a jusante da fonte. Neste caso, perto da fonte a largura da pluma é pequena e todo material é transportado pelo escoamento devido aos efeitos advectivos e por difusão turbulenta, sendo que os menores valores de concentração são encontrados perto da fonte. Isso é explicado pelo fato dos valores de concentração terem sido coletados acima do dossel a uma altura de  $1,5H$  e a fonte estar localizada a uma altura de  $2H$ . Um efeito importante nesse estágio é que a pluma é serpenteada e com a distância da fonte ocorre um maior espalhamento e conseqüentemente a largura da pluma é aumentada. Assim, um valor máximo da concentração média (acima do dossel) é encontrado a apenas para  $(x - x_s)/H = 4$  (DAVIDSON *et al.*, 1995).

Com o aumento da distância da fonte a diferença de concentração entre a parte de cima e o interior do dossel aumenta, atinge um valor máximo e então começa a diminuir. Ressalta-se que enquanto essa diferença de concentração for positiva, existirá troca de material de cima para baixo. É esperado que longe da fonte a diferença de concentração tenda a zero. Isso significa que quando essa diferença de concentração entre acima e dentro do dossel for próximo de zero, indicará que a troca de material entrará em equilíbrio. Porém, não é possível ver esse comportamento neste caso, pois o domínio computacional não é grande o suficiente.

Na Figura 4.6 também são apresentados os valores da intensidade da flutuação da concentração. Os maiores valores de  $C_{rms}/C_{média}$  ocorrem próximo aos maiores valores da concentração média. Observa-se também que valores mais altos ocorrem acima do dossel urbano.

A concentração média e a intensidade da flutuação da concentração como função da distância de uma fonte alta para amostragens na rua adjacente à linha central da pluma, dentro e acima da matriz de obstáculos são apresentadas na Figura 4.6b. Comparando os gráficos apresentados na Figura 4.6a e na Figura 4.6b, pode-se concluir que a troca de

material entre a parte de cima e o interior da matriz de obstáculos é maior entre os obstáculos do que na rua. De fato, na rua o escoamento é canalizado e assim todo o material é transportado pelo escoamento, tendo como consequência a fraca transferência vertical de material na rua.

A intensidade da flutuação da concentração,  $C_{rms}/C_{média}$ , decresce monotonicamente com a distância da fonte. Isso indica que à medida que se distancia da fonte a intensidade da flutuação torna-se cada vez menor, visto que a pluma se torna mais homogênea.

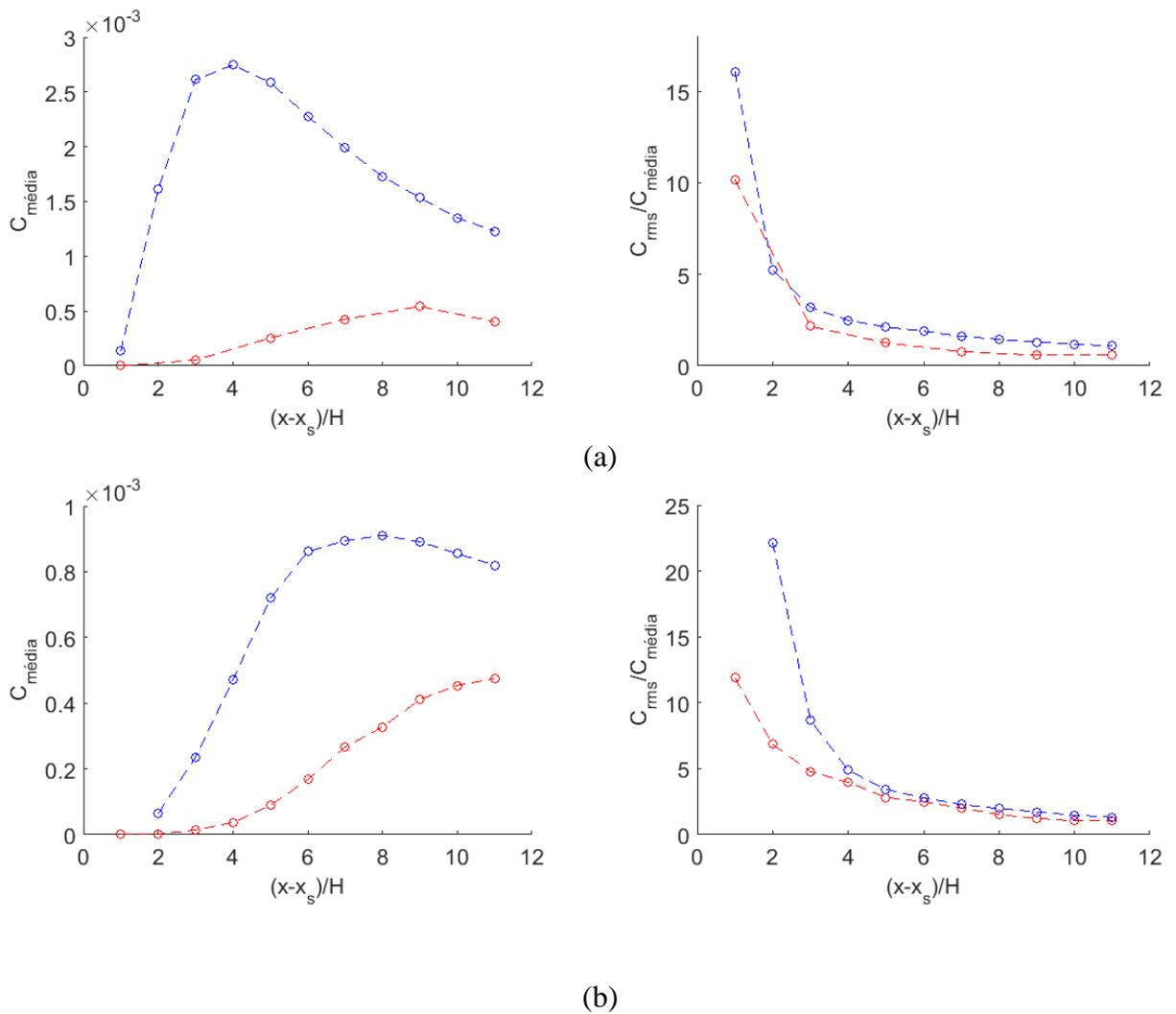


Figura 4.6: Concentração média e intensidade da flutuação da concentração como função da distância de uma fonte localizada a uma altura de  $z/H = 2$  com  $x/H = 2,5$  e  $y/H = 6,5$ , para as seguintes localizações (a) entre os cubos: dentro da matriz de prédios ( $\circ$ ) e acima da matriz de prédios ( $\circ$ ) e (b) na rua: dentro da matriz de prédios ( $\circ$ ) e acima da matriz de prédios ( $\circ$ ).  $x_s$  é a posição da fonte.

A concentração média como função da distância de uma fonte alta para amostragens entre os cubos e na rua, acima e no interior da matriz de obstáculos é apresentada na Figura 4.7. O gráfico mostra que o maior valor da concentração acontece para  $(x - x_s)/H = 4$  a uma altura de  $z/H = 1,5$ .

Conforme discussão anterior, perto da fonte a pluma é bastante estreita e o escalar é transportado pelo escoamento médio na região acima do dossel urbano. Dessa forma, perto da fonte são encontrados os menores valores da concentração média. Espera-se que os valores de concentração média no interior do dossel urbano, entre os cubos e na rua, convirjam para uma única curva. É esperado o mesmo comportamento no caso dos valores de concentração acima da matriz, entre os cubos e na rua. Porém, o domínio computacional não é longo o suficiente para observar esse comportamento. O que se pode ver no gráfico apresentado na Figura 4.7 é que existe essa tendência no comportamento dos valores de concentração. Esse comportamento indica que existirá um total espalhamento e mistura da pluma na horizontal, ou seja, tanto no interior do dossel quanto acima do dossel a pluma estará completamente espalhada e misturada. Se todas as curvas convergirem para uma mesma curva, isto indicará que a pluma estará completamente espalhada e misturada tanto horizontalmente quanto verticalmente. Assim, a pluma estará tão grande que não haverá mais nenhuma troca líquida de material no topo do dossel urbano.

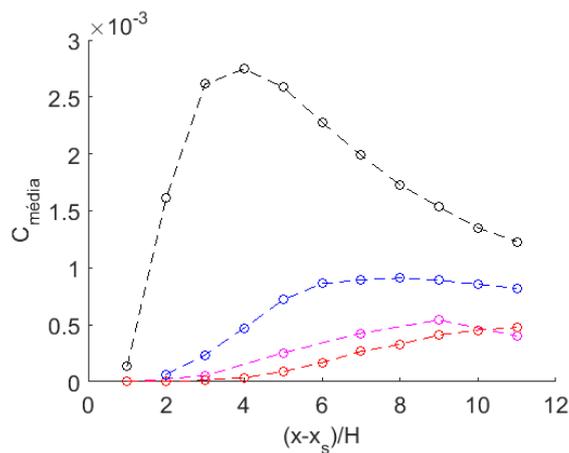


Figura 4.7: Concentração média como função da distância de uma fonte alta (localizada acima do dossel urbano) para as seguintes localizações entre os cubos no interior da matriz de prédios ( $\circ$ ), entre os cubos acima da matriz de prédios ( $\circ$ ); na rua dentro da matriz de prédios ( $\circ$ ) e na rua acima da matriz de prédios ( $\circ$ ).

Com o objetivo de comparar a dispersão de poluentes devido a uma fonte alta e uma fonte baixa, são apresentadas as concentrações médias de uma fonte baixa como função da distância dessa fonte (Figura 4.8). Neste caso a direção do vento é a mesma considerada para a fonte alta, ou seja, escoamento à  $0^\circ$ . São apresentadas na Figura 4.8 as concentrações médias para uma fonte baixa medidas entre os cubos e na rua, acima e dentro da matriz de blocos (da mesma forma apresentada na Figura 4.7 para a fonte alta).

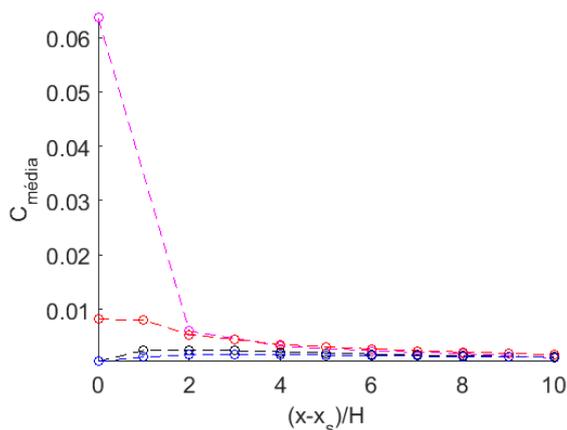


Figura 4.8: Concentração média como função da distância de uma fonte baixa (localizada no interior do domínio) para as seguintes localizações entre os cubos no interior da matriz de prédios ( $\circ$ ), entre os cubos acima da matriz de prédios ( $\circ$ ); na rua dentro da matriz de prédios ( $\circ$ ) e acima da matriz de prédios ( $\circ$ ).

O maior valor de concentração média ocorre exatamente onde a fonte está localizada. Este comportamento é esperado, pois a fonte de poluentes está localizada atrás de um prédio, onde existe uma zona de recirculação. A maior parte do material lançado pela fonte fica aprisionada na zona de recirculação, permanecendo um longo período de tempo nesta região. Verifica-se que na próxima caixa, na linha central da pluma a jusante da fonte, a concentração é muito baixa, ou seja, a concentração média tem decaimento muito rápido. Neste caso, a maior parte do material atrás do prédio irá se mover para as ruas e então será conduzido para fora do domínio pelo escoamento. Isso acontece, pois, o escoamento é canalizado ao longo das ruas, fazendo com que o material lançado nesta região seja rapidamente conduzido para fora do domínio.

É possível ver na Figura 4.8 que os valores da concentração média dentro da matriz de cubos, entre os cubos e na rua, tendem para uma única curva. Da mesma forma, os valores da concentração média acima da matriz, entre os cubos e na rua, também tendem para

uma única curva. Conforme discutido anteriormente, isto indica que horizontalmente a pluma está totalmente misturada. Verifica-se ainda que todas as curvas tendem para uma única curva no final do domínio. Esse comportamento sugere que verticalmente a pluma estará totalmente misturada, porém, isso só irá acontecer no final do domínio.

Na Figura 4.9 é apresentada a diferença dos valores da concentração média entre dentro e acima de uma matriz de blocos, como função da distância de uma fonte baixa, entre os cubos e na rua. Perto da fonte, a diferença de concentração entre os cubos é alta, ou seja, a transferência de material de cima para baixo entre os cubos é grande. Na rua, perto da fonte, essa diferença também é grande. Porém, esta diferença é aproximadamente seis vezes menor do que a diferença de concentração entre os prédios perto da fonte. Para  $4H$  a montante da fonte, a concentração média dentro e acima da matriz de cubos é muito similar. Isso indica que nesta região a transferência de material que existe é muito pequena. Conclui-se então que a pluma de contaminantes é grande o suficiente quando comparada com os prédios e neste estágio atingiu seu estado de equilíbrio.

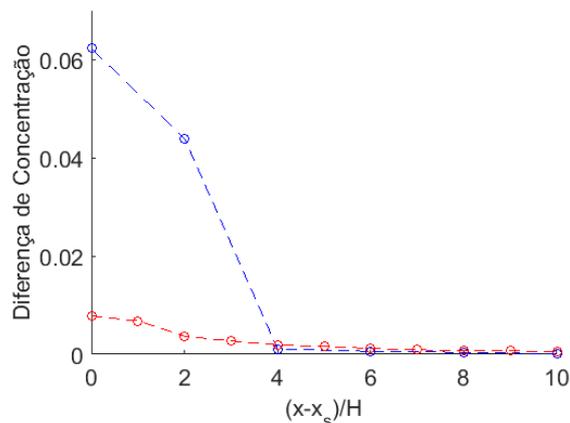


Figura 4.9: Diferença da concentração média entre dentro e acima de uma matriz de cubos como função da distância de uma fonte baixa. (○) entre os cubos e (○) na rua.

#### 4.1.2 Transporte de massa de poluente no topo dossel urbano

Uma análise dos fluxos de massa de contaminante é importante, pois, a partir deles é possível entender melhor os processos de entrada e saída de poluente do dossel urbano e também quais mecanismos se tornam importantes nesta transferência de massa de poluentes no topo do dossel.

O fluxo total de massa de poluentes se relaciona com os fluxos médio e turbulento através da seguinte equação:

$$\langle \overline{c u_i} \rangle = \langle \overline{c u_i} \rangle + \langle \overline{c' u_i'} \rangle, \quad 4.1$$

onde  $\langle \overline{c u_i} \rangle$  representa o fluxo total,  $\langle \overline{c u_i} \rangle$  o fluxo advectivo e  $\langle \overline{c' u_i'} \rangle$  o fluxo turbulento. O símbolo  $\langle \ \rangle$  representa a média espacial e a barra,  $\overline{\ \ }$ , representa a média temporal. Dessa forma, é calculado uma média espacial do valor do fluxo no topo de cada caixa localizada no interior do dossel. A Figura 4.10 mostra a face localizada no topo do dossel urbano, para uma caixa, na qual o valor médio do fluxo foi calculado.

Para todos os casos, os fluxos são normalizados pelo valor do fluxo no local da fonte.

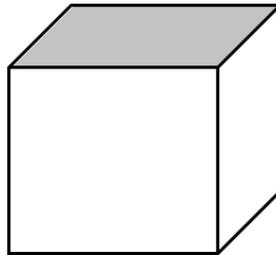


Figura 4.10: A face cinza indica a superfície na qual o fluxo vertical foi calculado.

A Figura 4.11 mostra os perfis horizontais dos fluxos verticais total, advectivo e turbulento em diferentes localizações para o caso de um conjunto de prédios alinhados e escoamento à 45°. Os fluxos são calculados nas intersecções e nas ruas, no topo do dossel urbano, como pode ser visto na Figura 4.11 (d).

A Figura 4.11a mostra o fluxo total de massa do contaminante. O fluxo é maior perto da fonte e à medida que se distancia da fonte fica cada vez menor. A partir de  $x'/H = 9$  ( $x'$  é o eixo alinhado com a linha central da pluma) o fluxo total apresenta valores negativos, que significa que nesta região ocorre reentrada de material no interior do dossel. O contrário ocorre próximo à fonte, pois os fluxos calculados perto da fonte são positivos. No local da fonte o fluxo total é menor do que nas ruas adjacentes, indicando que primeiro o poluente é transportado pelo escoamento por advecção e somente depois nas ruas adjacentes são carregados para cima do dossel.

Na Figura 4.11b é apresentado o fluxo vertical médio advectivo de massa do poluente. Nas intersecções o fluxo médio é positivo, porém nas ruas (entre os prédios) o fluxo é negativo. Isso indica que os efeitos advectivos nas intersecções promovem a saída do poluente do dossel, enquanto nas ruas, os efeitos advectivos promovem a entrada do poluente no dossel. Porém, os efeitos advectivos são menos efetivos no processo de dispersão do que os efeitos turbulentos (veja Figura 4.11c), pois os fluxos advectivos são uma ordem de grandeza menor do que os fluxos turbulentos.

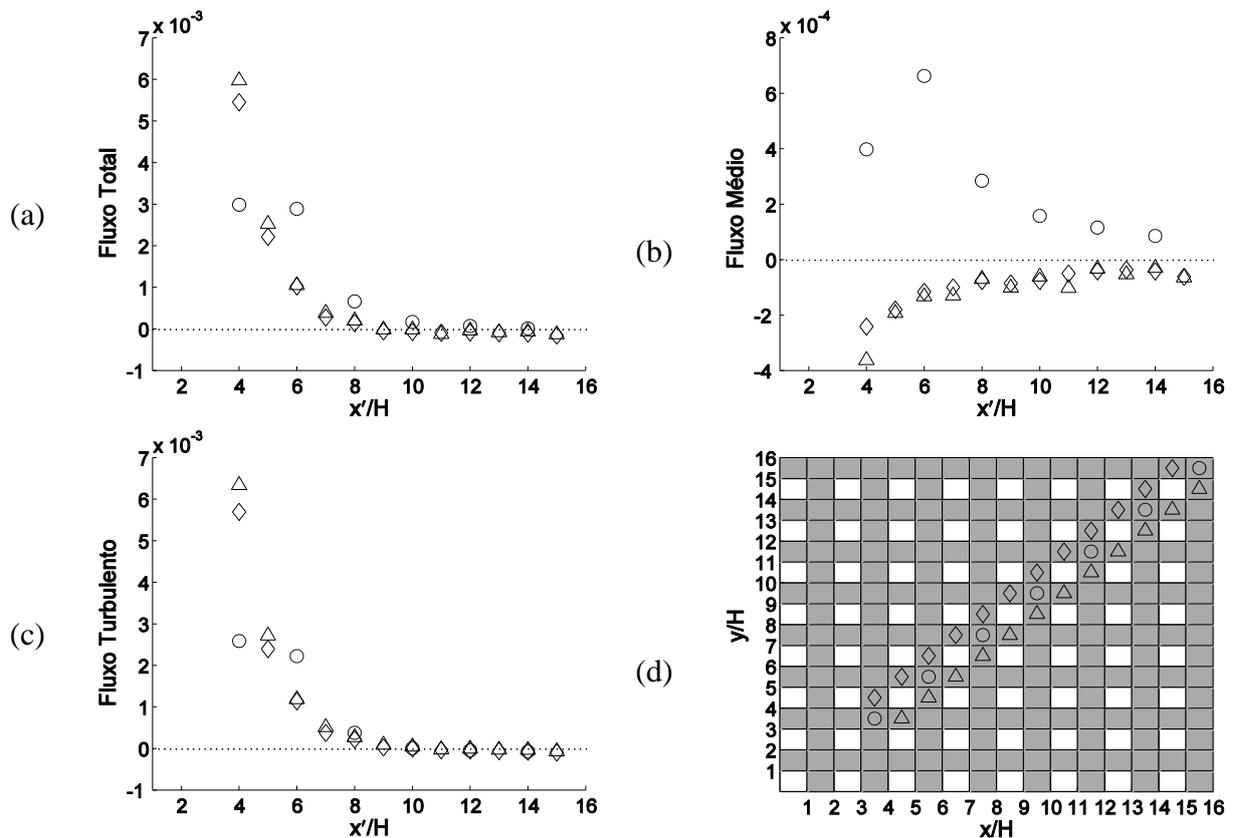


Figura 4.11: Perfis dos fluxos verticais (a) Total, (b) Advectivo e (c) Turbulento através do topo do dossel urbano considerando um conjunto de prédios alinhados com altura uniforme e escoamento à 45°. (d) Locais onde os fluxos foram calculados de acordo com o símbolo.  $x'$  é o eixo alinhado com a linha central da pluma.

Os fluxos turbulentos (Figura 4.11c) são da mesma ordem de grandeza dos fluxos totais (Figura 4.11a) e com comportamento bastante parecido. De acordo com Belcher *et al.* (2015) o fluxo advectivo no topo do dossel urbano é em torno de 10% do fluxo vertical total nesta região. Porém, quando se afasta da fonte, a partir de  $x'/H = 9$ , não é possível mais verificar esse comportamento. Analisando os gráficos da Figura 4.11 é possível ver

que os fluxos se aproximam de zero à medida que  $x'/H$  se aproxima do final do domínio. Segundo Goulart (2012) nesta região a pluma de contaminantes é maior do que a altura dos prédios e neste estágio ela já está bem misturada. Dessa forma, a troca líquida de material no topo do dossel é mais fraca (Belcher *et al.*, 2015), fazendo com que os efeitos turbulentos e advectivos sejam comparáveis.

Os perfis horizontais dos fluxos verticais total, advectivo e turbulento para um conjunto de prédios alinhados e escoamento à  $0^\circ$  são apresentados na Figura 4.12. A Figura 4.12d mostra o local onde os fluxos foram calculados.

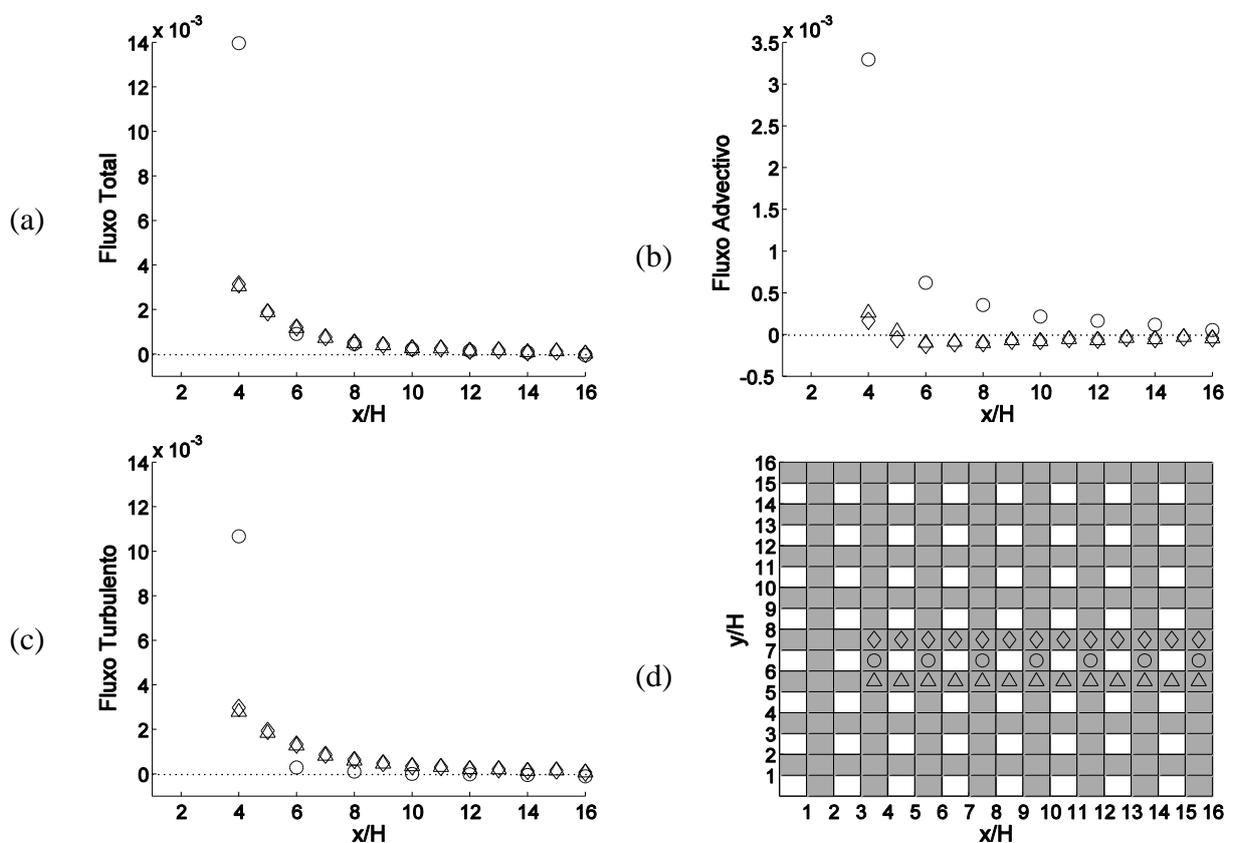


Figura 4.12: Perfis dos fluxos verticais (a) Total, (b) Advectivo e (c) Turbulento através do topo do dossel urbano considerando um conjunto de prédios alinhados com altura uniforme e escoamento à  $0^\circ$ . (d) Locais onde os fluxos foram calculados de acordo com o símbolo.

Podem ser vistas poucas semelhanças entre os resultados obtidos no caso do escoamento oblíquo e o escoamento à  $0^\circ$ . Por exemplo, o fluxo turbulento tem um perfil bem similar com o fluxo total e perto da fonte o fluxo turbulento é mais importante do que o fluxo

advectivo. Porém, o fluxo advectivo é da mesma ordem de grandeza dos fluxos total e turbulento, mas com valores relativamente menores.

Na Figura 4.12b pode ser visto que o fluxo advectivo na região entre os prédios é positivo, indicando que nessas regiões existe uma saída de material devido aos efeitos advectivos. Tais efeitos são comparáveis aos efeitos turbulentos nestas regiões, dessa forma os efeitos advectivos e turbulentos são somados proporcionando a saída de material do dossel por ambos os efeitos. O fluxo advectivo nas ruas é bem próximo de zero. Até  $x/H = 1$  a jusante da fonte, o fluxo advectivo é positivo, porém a partir  $x/H = 6$  este fluxo é negativo. A partir deste ponto o poluente está entrando novamente dentro do dossel devido aos efeitos advectivos.

Analisando o gráfico do fluxo turbulento, apresentado na Figura 4.12c, verifica-se que o fluxo turbulento é positivo nas ruas, fazendo com que o poluente tenha a tendência de sair do dossel por esses efeitos. Nota-se que os efeitos turbulentos são ligeiramente mais importantes do que os efeitos advectivos, fazendo com que a transferência de massa do poluente do interior para fora do dossel seja mais efetiva devido aos efeitos turbulentos.

A Figura 4.13 mostra os perfis horizontais dos fluxos verticais total, advectivo e turbulento, no topo do dossel, considerando um conjunto de prédios escalonados e escoamento direcionado à 45°. A fonte de poluentes é localizada atrás de um prédio. Os locais onde os fluxos foram calculados são apresentados na Figura 4.13d.

A Figura 4.13a mostra o fluxo total através do topo do dossel. A maior parte do poluente que é transportado para fora do dossel ocorre próximo à fonte e o maior valor do fluxo total ocorre exatamente na localização da fonte. A fonte está localizada atrás de um prédio, onde existe uma intensa zona de recirculação. Dessa forma, é provável que a maior parte do poluente ficará aprisionada nesta região atrás do prédio, sendo transportado para cima e conseqüentemente para fora do dossel urbano. Nota-se que, a partir da fonte, o fluxo total na frente de um prédio é sempre maior do que nas outras regiões. À medida que se afasta da fonte o fluxo total torna-se cada vez menor, ficando próximo de zero.

O fluxo médio advectivo é apresentado na Figura 4.13b. O maior valor do fluxo advectivo ocorre na frente de um prédio duas caixas a montante da fonte. Pode-se verificar que o fluxo advectivo nestas regiões é maior do que o fluxo advectivo na região atrás de um

prédio e entre dois prédios, exceto no final do domínio, onde o fluxo em ambos os locais tendem a zero. O fluxo advectivo entre os prédios é negativo. Isso indica que os efeitos advectivos nestas regiões fazem com que o poluente entre novamente dentro do dossel. Porém, ao analisar o fluxo turbulento, percebe-se que o fluxo advectivo é uma ordem de grandeza menor do que o fluxo turbulento (veja Figura 4.13c), indicando que os efeitos turbulentos são dominantes em relação aos efeitos advectivos no transporte de massa do escalar no topo do dossel urbano.

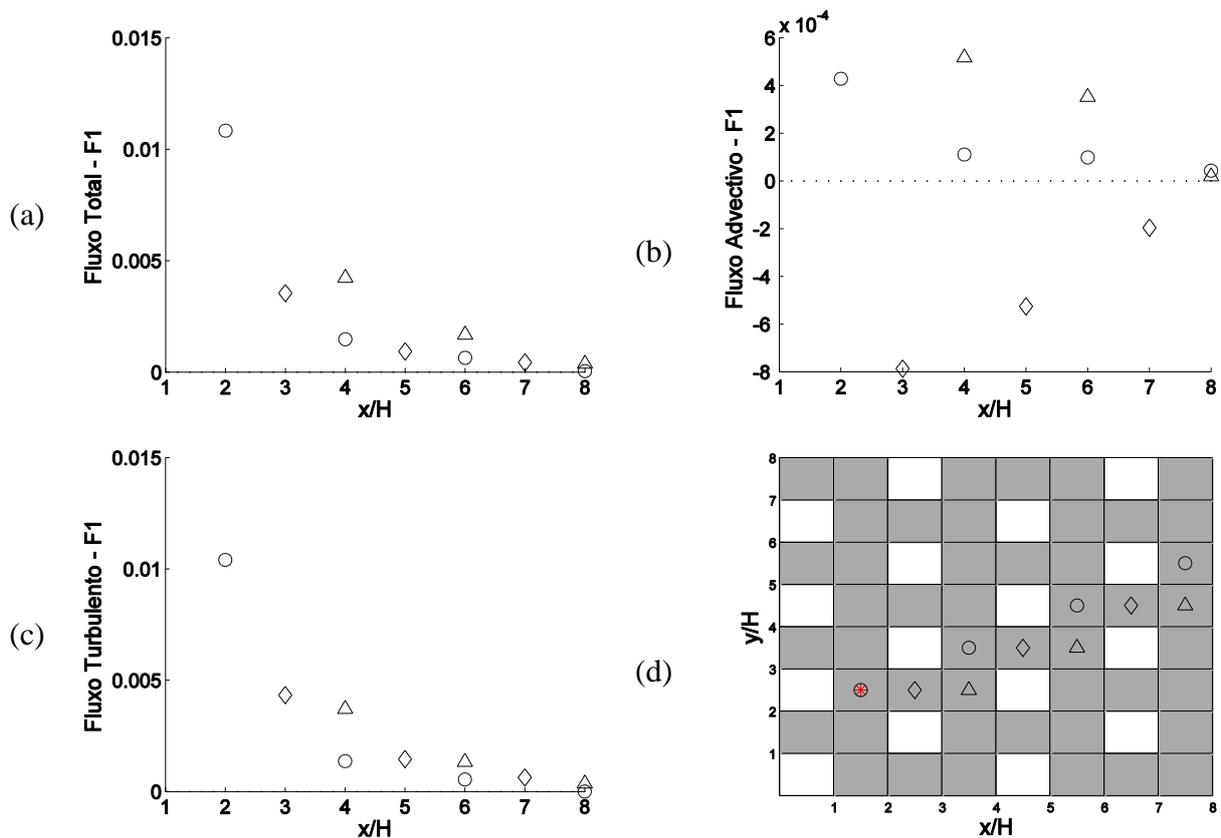


Figura 4.13: Perfis dos fluxos verticais (a) Total, (b) Advectivo e (c) Turbulento através do topo do dossel urbano considerando um conjunto de prédios escalonados com altura uniforme, escoamento à 45° e fonte localizada atrás de um prédio. (d) Locais onde os fluxos foram calculados de acordo com o símbolo e localização da fonte. \* indica a localização da fonte.

Na Figura 4.14 são apresentados os perfis horizontais dos fluxos verticais total, advectivo e turbulento, no topo do dossel, considerando um conjunto de prédios escalonados, escoamento direcionado à 45° e fonte de poluentes é localizada entre dois prédios. Os locais onde os fluxos foram calculados são apresentados na Figura 4.14d.

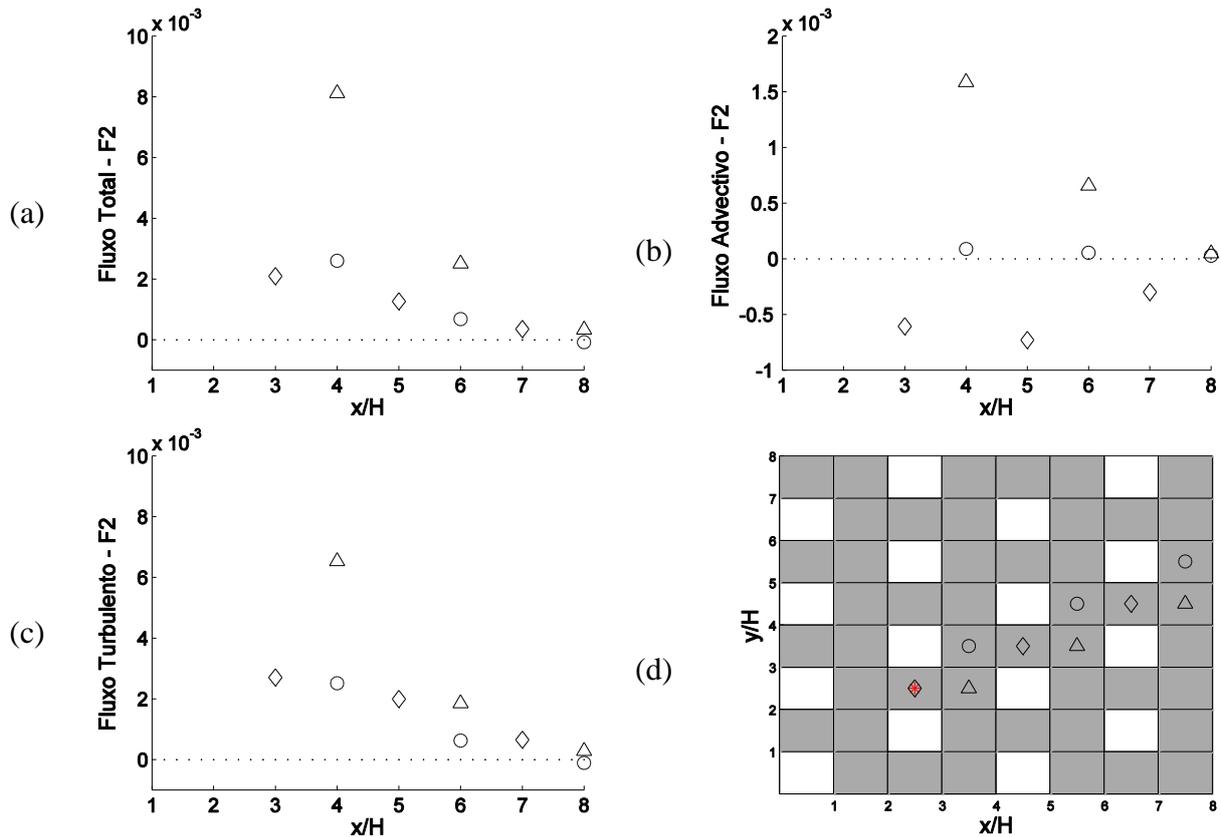


Figura 4.14: Perfis dos fluxos verticais (a) Total, (b) Advectivo e (c) Turbulento através do topo do dossel urbano considerando um conjunto de prédios escalonados com altura uniforme, escoamento à 45° e fonte localizada entre dois prédios. (d) Locais onde os fluxos foram calculados de acordo com o símbolo e localização da fonte. \* indica a localização da fonte.

O fluxo total é apresentado na Figura 4.14a e verifica-se que a maior parte do poluente é transportada para fora do dossel na região perto da fonte. Porém, existe uma diferença marcante neste caso em relação ao caso anterior, onde a fonte está localizada na frente de um prédio. Como a fonte está localizada entre dois prédios, o poluente será advectado para a caixa a jusante e então o poluente será transportado verticalmente. Dessa forma, o maior valor do fluxo total ocorre na caixa que está localizada atrás de um prédio, exatamente a jusante da fonte.

Os fluxos advectivo e turbulento são apresentados na Figura 4.14b e na Figura 4.14c. O maior valor do fluxo turbulento, localizado na frente do prédio a jusante da fonte, é quatro vezes maior do que o fluxo advectivo nesta mesma caixa. Indicando que na região bem próxima à fonte os efeitos turbulentos são mais importantes do que os efeitos advectivos.

Analisando os fluxos turbulento e total, verifica-se uma semelhança entre seus perfis e em seus valores, mostrando que os efeitos advectivos são menos importantes do que os turbulentos. Entretanto, neste caso, a ordem de grandeza dos fluxos advectivos é a mesma dos fluxos turbulentos.

Os perfis horizontais dos fluxos verticais total, advectivo e turbulento, no topo do dossel, considerando um conjunto de prédios escalonados, escoamento direcionado à 45° e fonte de poluentes localizada na frente de um prédio são apresentados na Figura 4.15. Os locais onde os fluxos foram calculados são apresentados na Figura 4.15d.

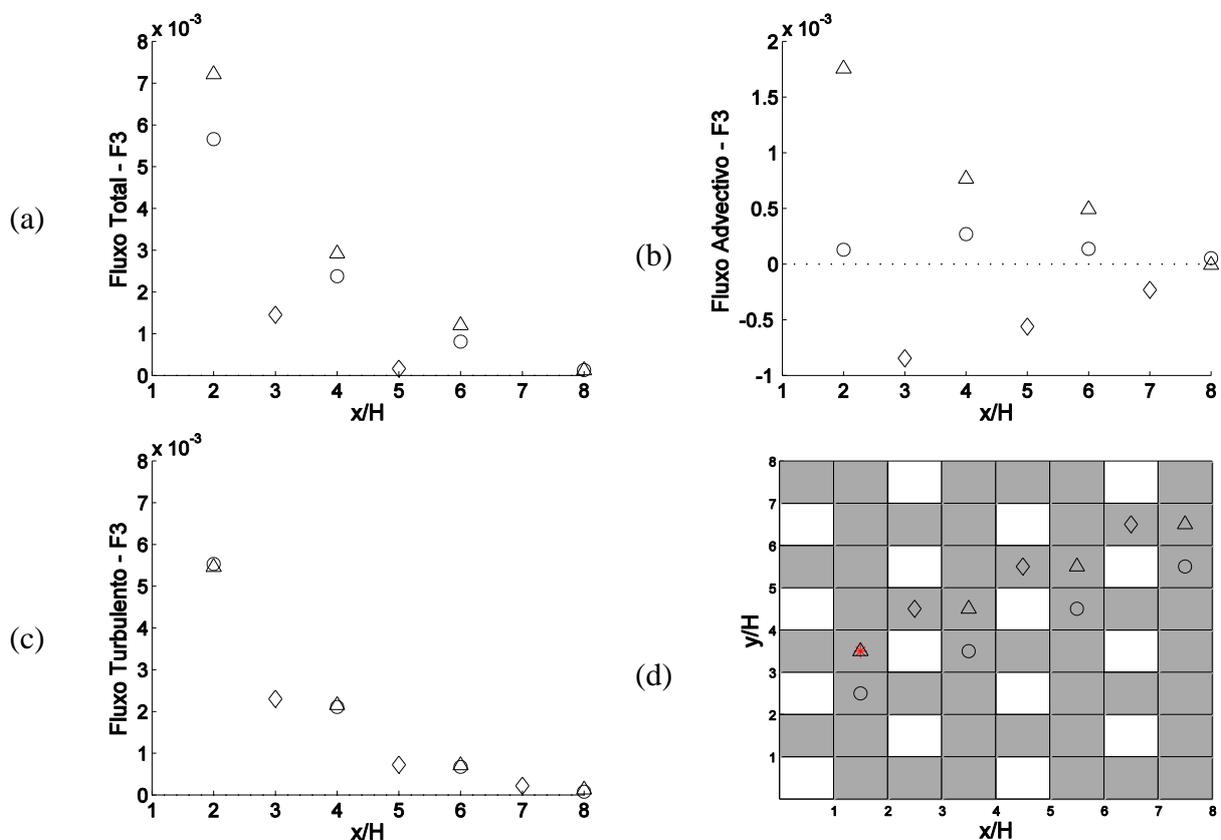


Figura 4.15: Perfis dos fluxos verticais (a) Total, (b) Advectivo e (c) Turbulento através do topo do dossel urbano considerando um conjunto de prédios escalonados com altura uniforme, escoamento à 45° e fonte localizada na frente de um prédio. (d) Locais onde os fluxos foram calculados de acordo com o símbolo e localização da fonte. \* indica a localização da fonte.

Neste caso a fonte é localizada na frente de um prédio e nesta região existe um forte movimento vertical devido à divisão do escoamento quando ele encontra o prédio. Dessa forma, o maior valor dos fluxos total, advectivo e turbulento ocorrem no local da fonte.

Porém, o fluxo vertical turbulento também tem seu maior valor atrás do prédio adjacente à fonte (conforme Figura 4.15c). Este alto valor do fluxo turbulento nesta região atrás do prédio, ou seja, na caixa adjacente ao local da fonte, pode ser explicado devido à recirculação que se forma nesta região e que irá capturar e aprisionar grande parte do poluente lançado na fonte. Segundo Goulart (2012) é nesta região que surge uma fonte secundária.

Em geral os perfis horizontais dos fluxos verticais no topo do dossel têm um comportamento parecido em todos os casos. Algumas características são diferentes devido à localização da fonte, por exemplo, o local onde o fluxo total tem seu maior valor é determinando de acordo com a localização da fonte.

O fluxo vertical total positivo e o fluxo vertical total negativo no topo do dossel urbano para um conjunto de prédios alinhados e com escoamento orientado à 45° são apresentados na Figura 4.16a e na Figura 4.16b, respectivamente. Conforme pontuado anteriormente, o fluxo total positivo (Figura 4.16a) é mais intenso na região próxima à fonte, principalmente nas duas caixas adjacentes a montante da fonte, onde se formam as fontes secundárias. Nesta região, o escalar irá alcançar o topo do dossel urbano e será transportado pelo escoamento médio acima do dossel.

Na Figura 4.16b é apresentado o fluxo vertical negativo no topo do dossel urbano. É possível ver que o fluxo negativo é mais intenso algumas ruas a montante da fonte. Isso indica que algumas ruas a montante da fonte o poluente entrará novamente no dossel urbano. É importante ressaltar que o fluxo negativo é uma ordem de grandeza menor do que o fluxo positivo, indicando que o fluxo positivo é mais efetivo do que o fluxo negativo no processo de transporte do escalar do interior para fora do dossel e vice-versa.

Próximo da fonte a concentração de poluentes é mais alta do que fora do dossel. Assim, parte dos poluentes é transportada para fora do dossel. Com o aumento da distância da fonte, o espalhamento topográfico e o fluxo turbulento ascendente fazem com que a concentração no interior do dossel decresça. Desta forma, a partir de uma certa distância as concentrações acima do dossel são superiores as concentrações no interior do dossel, gerando um fluxo turbulento descendente. Comportamento análogo pode ser observado para o caso com o escoamento orientado à 0°, na Figura 4.16c e na Figura 4.16d. Próximo à fonte o fluxo positivo é intenso (Figura 4.16c), fazendo com que a massa do escalar saia

do interior do dossel e alcance a corrente livre. Da mesma forma, algumas ruas a montante da fonte o poluente irá entrar novamente dentro do dossel, ou seja, nesta região o fluxo negativo é mais intenso (Figura 4.16d).

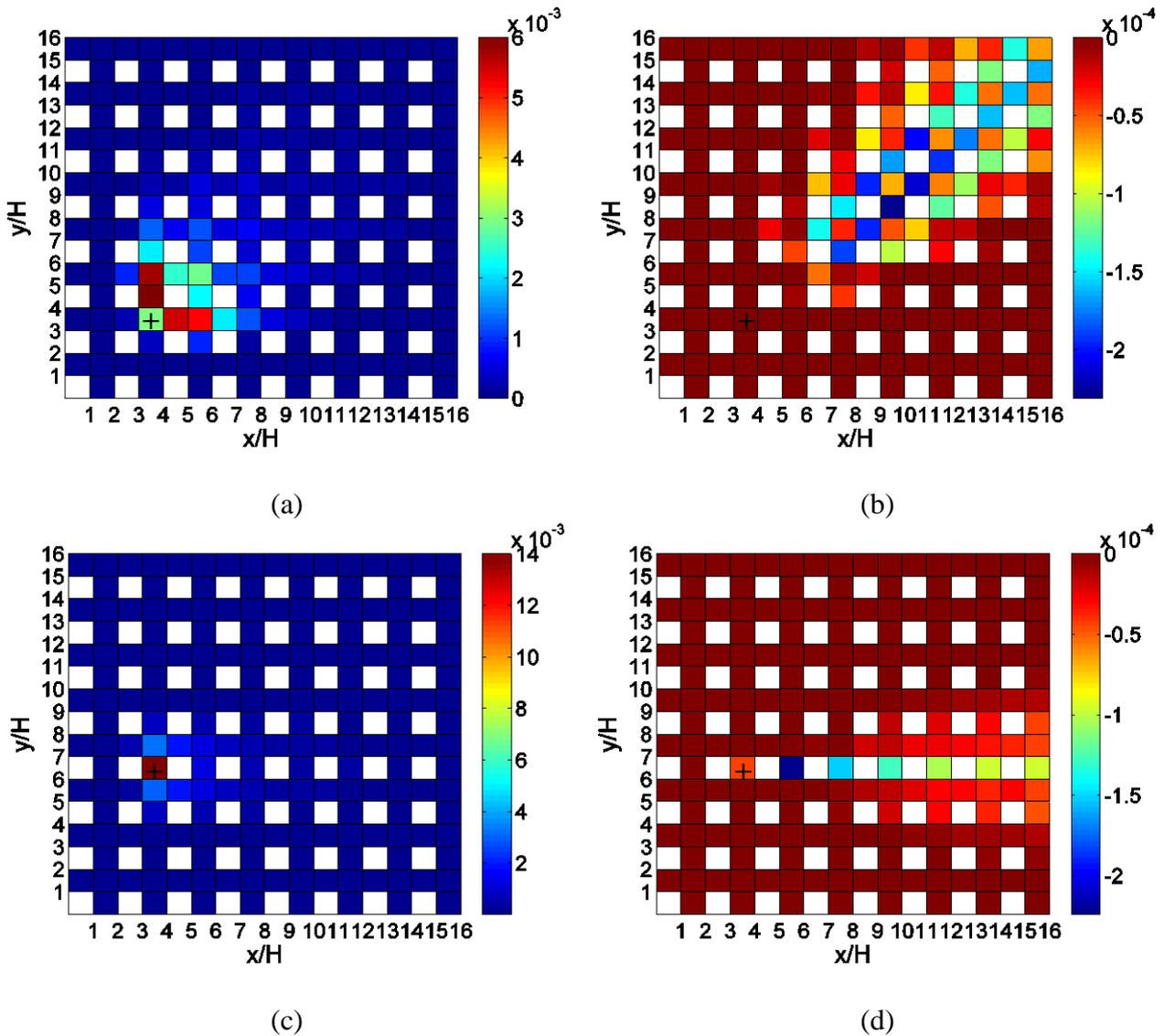


Figura 4.16: (a) Fluxo total positivo e (b) fluxo total negativo no topo do dossel urbano para um conjunto de prédios alinhados com altura uniforme e escoamento à  $45^\circ$ . (c) Fluxo total positivo e (d) fluxo total negativo no topo do dossel urbano para um conjunto de prédios alinhados com altura uniforme e escoamento à  $0^\circ$ . + indica a localização da fonte.

Comparando os fluxos negativos apresentados na Figura 4.16b e na Figura 4.16d nota-se que a pluma de poluentes é maior quando o escoamento é oblíquo do que quando o escoamento é perpendicular à matriz de prédios. Neste último caso, o escalar irá entrar novamente dentro do dossel somente nas regiões bem próximas a linha de centro da

pluma, pois a pluma de poluentes neste caso é mais estreita e quase totalmente canalizada pelo escoamento médio na rua.

A Figura 4.17a e a Figura 4.17b mostram os fluxos positivo e negativo, respectivamente, no topo de um dossel urbano com prédios escalonados e escoamento direcionado à 45°.

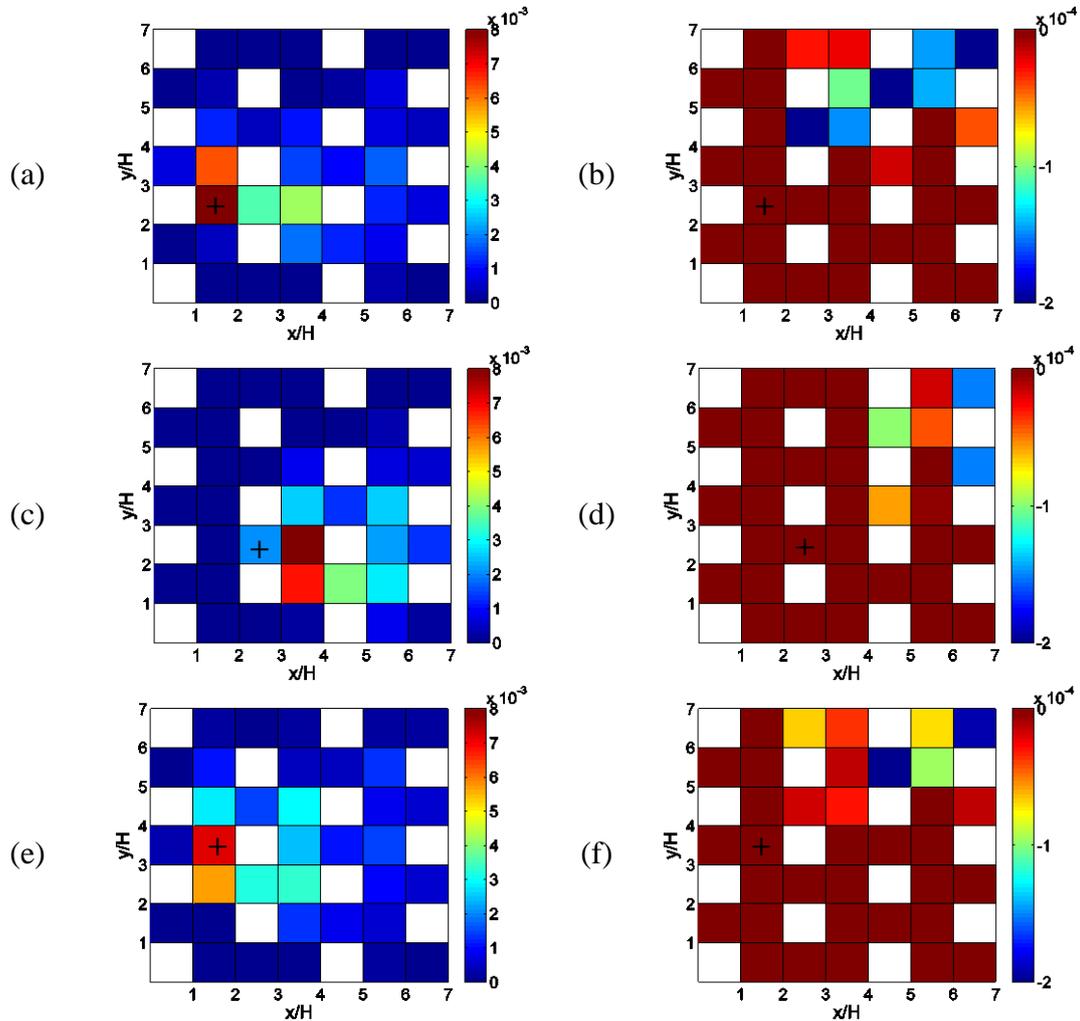


Figura 4.17: (a) Fluxo total positivo e (b) fluxo total negativo no topo do dossel urbano com fonte localizada atrás de um prédio (fonte 1). (c) Fluxo total positivo e (d) fluxo total negativo no topo do dossel urbano com fonte localizada entre dois prédios (fonte 2). (e) Fluxo total positivo e (f) fluxo total negativo no topo do dossel urbano com fonte localizada na frente de um prédio (fonte 3). Para todos os casos o conjunto de prédios é escalonado e o escoamento à 45°. + indica a localização da fonte.

Neste caso a fonte de poluentes está localizada atrás de um prédio e próxima ao chão. O maior valor do fluxo positivo ocorre exatamente na localização da fonte. Conforme

discutido anteriormente, na região atrás dos prédios existem intensas zonas de recirculação e isso faz com que o poluente seja transportado para cima do dossel atingindo a corrente livre do escoamento. A outra parte do material é transportada para a caixa adjacente à fonte e então para o topo do dossel urbano. O material que é transportado para cima do dossel será transportado pela corrente livre e no final do domínio entrará novamente dentro do dossel urbano, como pode ser observado na Figura 4.17b, que mostra o fluxo negativo no topo do dossel.

O mesmo comportamento é observado para as outras localizações das fontes, isto é, fonte localizada entre prédios (Figura 4.17c e Figura 4.17d) e fonte localizada na frente de um prédio (Figura 4.17e e Figura 4.17f).

A Figura 4.18a e a Figura 4.18b apresentam os fluxos positivo e negativo, respectivamente, no topo do dossel urbano para um conjunto de prédios alinhados, escoamento à  $0^\circ$  e considerando uma fonte alta, localizada a uma altura de  $z/H = 2$  com  $x/H = 2,5$  e  $y/H = 6,5$ .

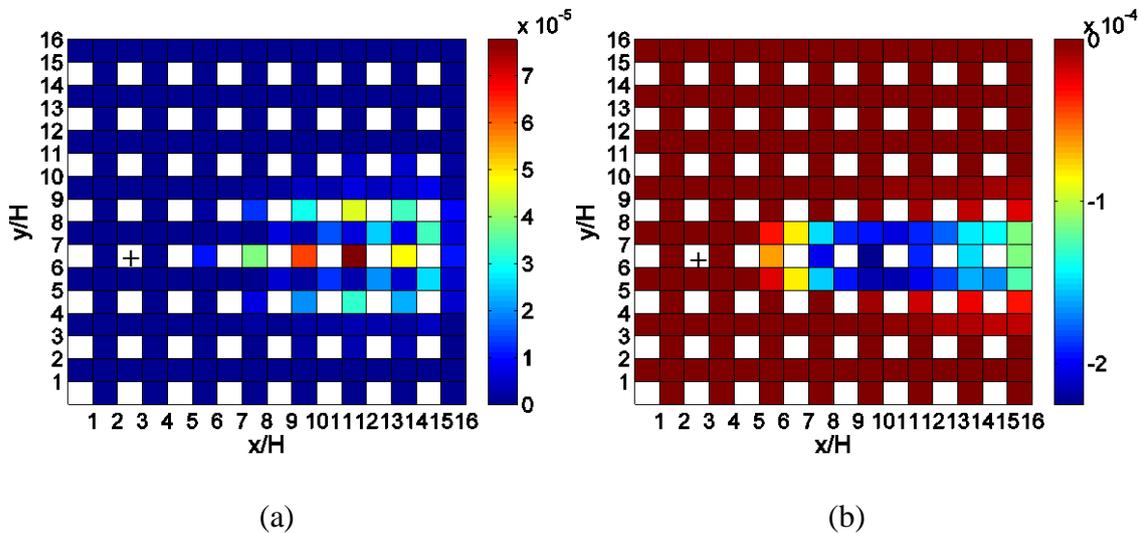


Figura 4.18: (a) Fluxo total positivo e (b) fluxo total negativo no topo do dossel urbano para um conjunto de prédios alinhados com altura uniforme, escoamento à  $0^\circ$ . + indica a localização da fonte, considerando  $z/H = 2$ .

Ao contrário dos casos com a fonte no interior do dossel, o fluxo positivo é uma ordem de grandeza menor do que o fluxo negativo, sendo mais intenso a partir da terceira rua a jusante da fonte e com um valor máximo na quarta rua a partir da fonte. Este é exatamente o ponto onde ocorre o maior valor de concentração acima do dossel. O fluxo negativo

indica que está entrando material no dossel urbano e o fluxo positivo indica que está saindo material do dossel. O fluxo positivo é bem menos intenso do que o fluxo negativo. Dessa forma, a quantidade de material que sai do dossel é menor do que a quantidade de material que entra no dossel. Neste caso, o comportamento dos fluxos é diferente dos apresentados nos casos anteriores devido à localização da fonte, que está localizada acima do dossel urbano.

#### **4.1.3 Evolução temporal da concentração no interior do dossel urbano**

Estudos anteriores postularam que os poluentes são emitidos do dossel para a atmosfera livre próximo a fonte de emissão e que a longas distâncias, tais poluentes reingressam no dossel, entre outros, Goulart (2012) e Carpentieri *et al.* (2012). Entretanto, até o momento não haviam sido apresentadas evidências claras deste comportamento ou comprovação experimental para sua quantificação.

Dessa forma, nesta seção são apresentadas as séries temporais da média volumétrica da concentração para cada caixa da matriz de prédios no interior da matriz com escoamento direcionado à 45°, com o objetivo de identificar os mecanismos relacionados com esse fenômeno de reingresso do poluente no dossel urbano.

A Figura 4.19 mostra uma série temporal da média volumétrica da concentração para um conjunto de prédios alinhados com direção externa do vento oblíqua (45°). As séries temporais foram determinadas para cada caixa no interior do dossel urbano e assim as caixas cinzas que aparecem na Figura 4.19 representam os prédios. Observe que cada um dos gráficos nesta figura apresenta a concentração média no volume em função do tempo. A localização da fonte está marcada com uma seta preta. Os dados de DNS mostram que a velocidade normalizada entre os prédios é de aproximadamente 1 e acima dos prédios a velocidade do vento é de aproximadamente 3. A velocidade vertical é de 0,5. Assim, após ser emitido pela fonte, o escalar levaria 7 unidades de tempo para chegar até a caixa destacada em verde na lateral do domínio. Como a matriz é regular, todos os possíveis percursos para chegar a uma determinada caixa terão a mesma distância. Seleccionada a caixa destacada em vermelho dentro do domínio (segunda intersecção a montante da fonte, na direção do escoamento) era esperado que a concentração fosse detectada após 8 unidades de tempo. Porém a concentração foi detectada com 5 unidades de tempo. Dessa forma presume-se existir um outro mecanismo ou percurso que levaria o escalar a chegar

mais rápido a um determinado local. Esse mecanismo pode ser chamado de reentrada do poluente. O poluente é primeiramente transportado para fora do dossel urbano e em seguida transportado pelo escoamento mais rápido e reentra no dossel após uma certa distância. Esse processo de transporte vertical é pouco descrito na literatura. Alguns autores mostram a existência da perda de material para a região acima dos prédios (CARPENTIERI *et al.*, 2012), porém a sua reentrada ainda não tinha sido demonstrada.

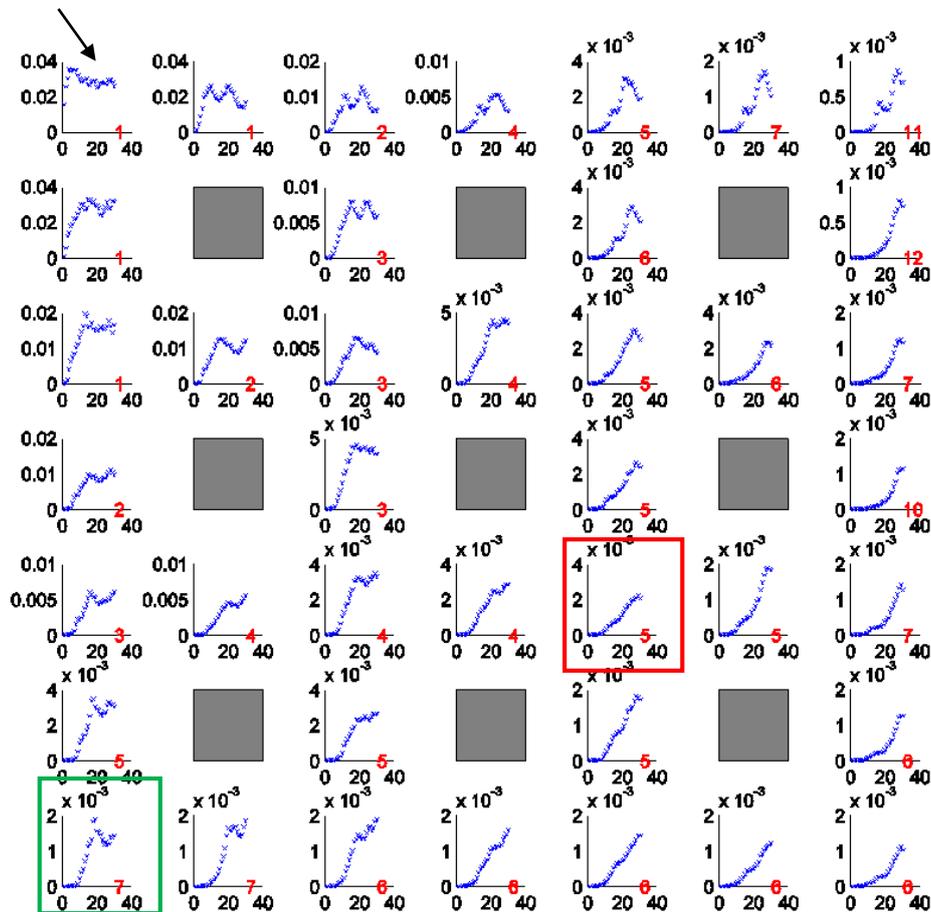


Figura 4.19: Série temporal da concentração média no volume. Números em vermelho mostram o primeiro instante em que a concentração foi detectada. Direção do vento 45° com fonte no solo em relação a matriz regular.

#### 4.1.4 Parametrização da transferência de massa de poluente no topo do dossel urbano

A velocidade de transferência é um parâmetro extremamente importante no contexto de regiões urbanas. Através deste parâmetro é possível determinar as trocas de massa de poluentes entre o interior do dossel urbano e o escoamento acima dele.

As formulações atualmente empregadas consideram muitas hipóteses simplificadoras, tais como, a dependência somente do escoamento externo ou somente de uma velocidade característica do escoamento no interior do dossel. Outras ainda desconsideram a tridimensionalidade do fenômeno e a existência de intersecções, por exemplo, desenvolvendo formulações para cavidades bidimensionais.

Por isso, entender o processo de transferência de massa de poluente que acontece no topo de um dossel urbano é muito importante para que esse fenômeno possa ser incorporado de forma fiel em modelos mais simples. Se os parâmetros utilizados representam bem os fenômenos que ocorrem dentro e fora do dossel urbano, teremos assim modelos práticos ou operacionais cada vez melhores e mais fiéis à realidade.

A seguir são apresentados resultados da velocidade de transferência usando dados de DNS e parametrizações. A expressão para calcular a velocidade de transferência é dada pela Equação 4.2.

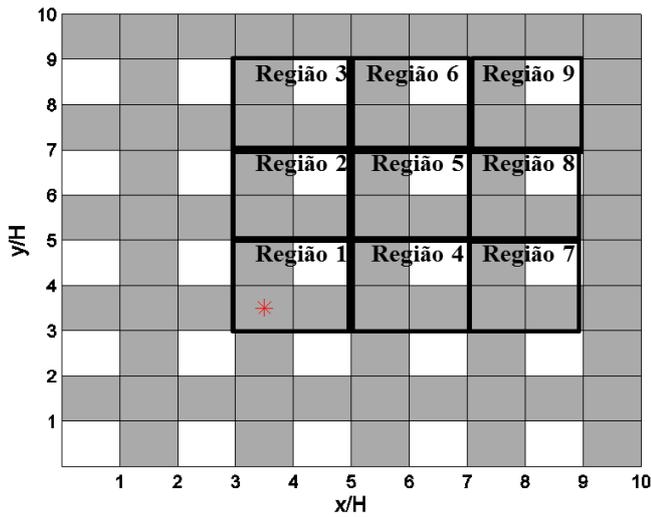
$$U_T = \frac{F_{adv} + F_{turb}}{A(C_{acima} - C_{interior})} \quad 4.2$$

onde  $F_{adv}$  é o fluxo vertical advectivo e  $F_{turb}$  é o fluxo vertical turbulento no topo do dossel urbano,  $A$  é a área da face da caixa (igual a 1),  $C_{acima}$  é a concentração média acima do dossel urbano e  $C_{interior}$  é a concentração média no interior do dossel urbano.

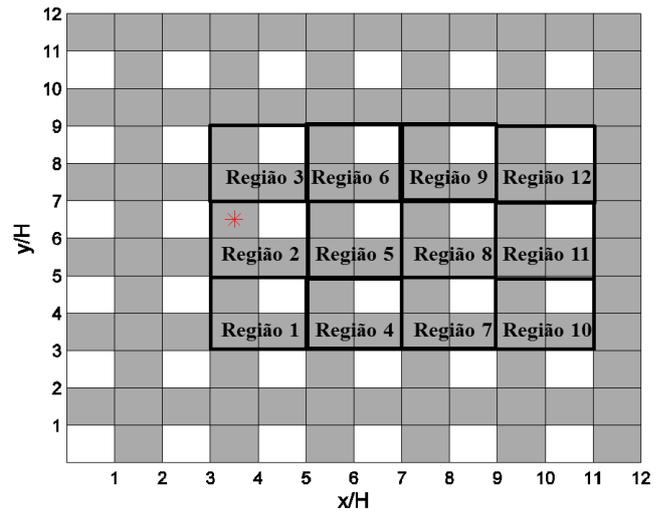
Conforme visto anteriormente, o fluxo vertical no topo do dossel urbano é dominado pelos efeitos turbulentos. Utilizando essa hipótese, a Equação 4.2 pode ser escrita da seguinte forma:

$$U_T = \frac{F_{turb}}{A(C_{acima} - C_{interior})} \quad 4.3$$

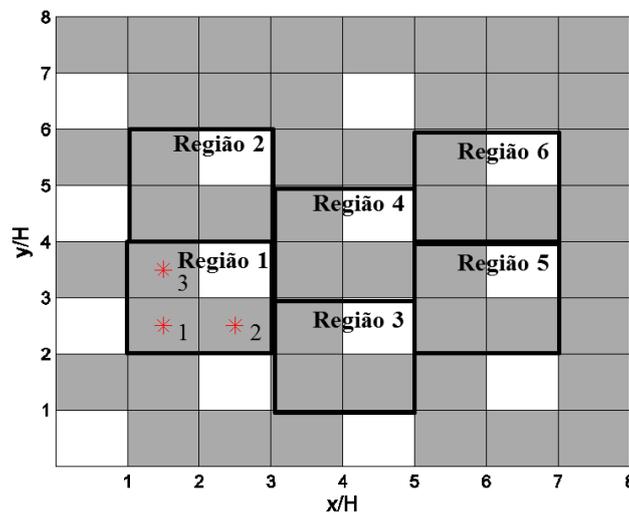
A velocidade de transferência foi calculada em unidades repetidas de acordo com cada configuração. Na Figura 4.20 são apresentadas essas unidades repetidas e as respectivas localizações das fontes. As unidades repetidas foram escolhidas de acordo com a localização da pluma de poluentes. Cada unidade repetida é composta de quatro caixas.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.20: Unidades repetidas onde a velocidade de transferência foi calculada para cada configuração. (a) prédios alinhados e escoamento à 45°; (b) prédios alinhados e escoamento à 0° e (c) prédios escalonados e escoamento à 45°. \* indica a localização da fonte. No caso dos prédios escalonados os números 1, 2 e 3 representam as três diferentes localizações da fonte, atrás de um prédio (F1), entre dois prédios (F2) e na frente de um prédio (F3), respectivamente.

Para o caso de conjunto de prédios alinhados com escoamento orientado à 45°, as caixas são um prédio, uma interseção e as outras duas caixas são ruas (Figura 4.21a). Quando um conjunto de prédios alinhados com escoamento orientado à 0° é considerado as quatro caixas que compõem cada unidade repetida são um prédio, uma interseção, uma rua e

uma caixa localizada atrás do prédio (Figura 4.21b) e no caso do conjunto de prédios escalonados com escoamento orientado à 45°, as caixas são um prédio, uma caixa atrás de um prédio, uma caixa na frente de um prédio e uma caixa entre dois prédios (Figura 4.21c).

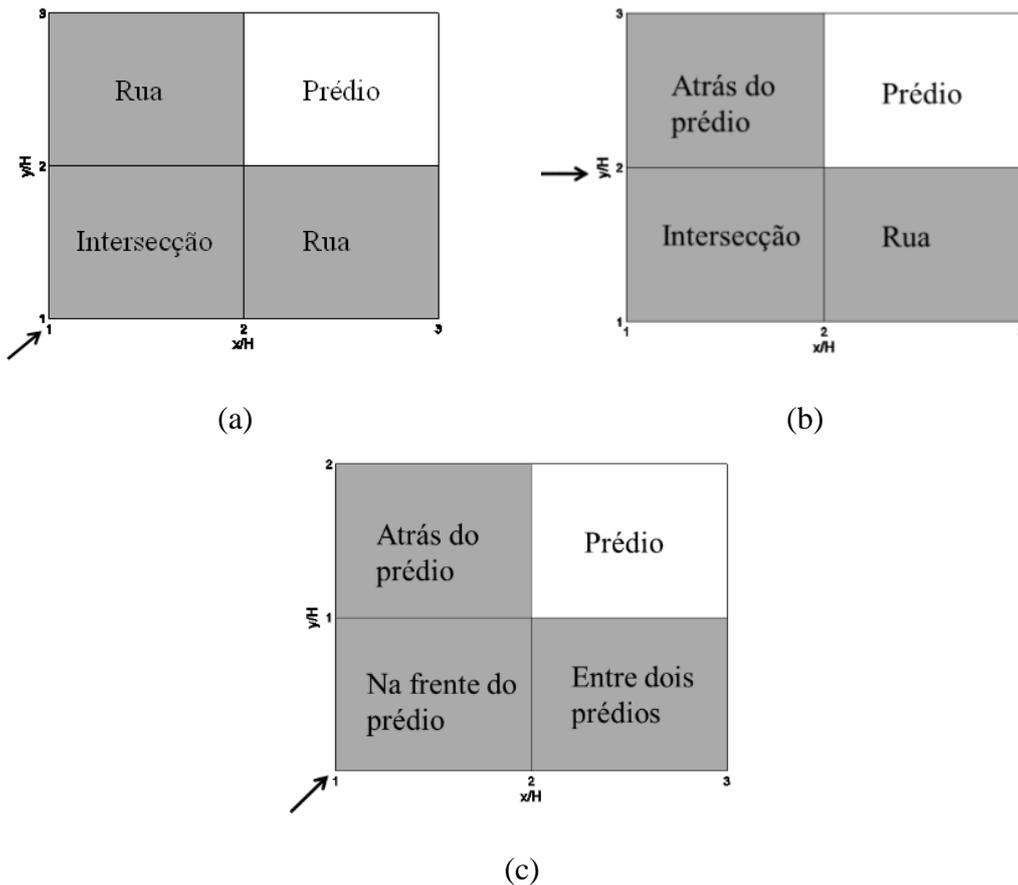


Figura 4.21: Unidade repetida de acordo com a configuração. (a) Prédios alinhados e escoamento à 45°; (b) Prédios alinhados e escoamento à 0° e (c) Prédios escalonados e escoamento à 45°. A seta indica a direção do escoamento.

Na Figura 4.22, na Figura 4.23 e na Figura 4.24 são apresentados gráficos da velocidade de transferência calculados usando os dados de DNS para as regiões repetidas. Observe que o eixo  $x$  representa as regiões repetidas e o eixo  $y$  representa a velocidade de transferência.

A Figura 4.22 mostra a velocidade de transferência calculada em cada intersecção e em cada rua das unidades repetidas para o caso de prédios alinhados e escoamento à 45°. Também mostra uma média da velocidade de transferência para cada unidade repetida, ou seja, toma-se a velocidade de transferência nas ruas e na intersecção de cada unidade

repetida e calcula-se uma média desse valor para a unidade repetida. A média da velocidade de transferência nas intersecções é igual a 0,5, enquanto a média nas ruas é igual a 0,3. A média global da velocidade de transferência é igual a 0,4.

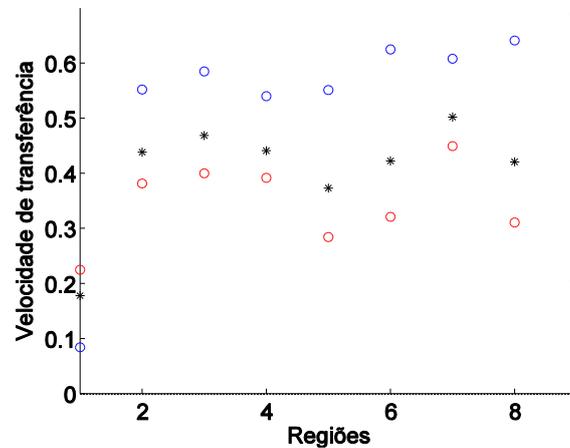


Figura 4.22: Velocidade de transferência no topo do dossel urbano para cada unidade repetida considerando um conjunto de prédios alinhados e escoamento à 45°. (○) representa a velocidade de transferência na rua, (○) representa a velocidade na intersecção e (\*) representa velocidade de transferência média para cada unidade repetida.

A Figura 4.23 mostra a velocidade de transferência para o caso de prédios alinhados com escoamento à 0° nas unidades repetidas. A velocidade de transferência é calculada na rua, intersecção e atrás de cada prédio de cada unidade repetida e também é apresentada uma média desses valores para cada unidade. As características da intersecção e rua são parecidas e dessa forma a velocidade de transferência nestes locais também tem seus valores mais próximos. Atrás de cada prédio existem fortes recirculações, indicando fortes movimentos verticais, entretanto a velocidade de transferência nestas caixas também tem valores similares aos demais. Dessa forma, a velocidade de transferência neste caso é bem similar nas diferentes caixas: intersecção, rua e atrás de um prédio. A média da velocidade de transferência nas ruas é 0,32, nas intersecções seu valor médio é 0,37, enquanto a média da velocidade atrás de cada prédio é 0,36. Neste caso as velocidades têm valores médios similares, porém na intersecção a velocidade de transferência é ligeiramente maior do que nas outras regiões.

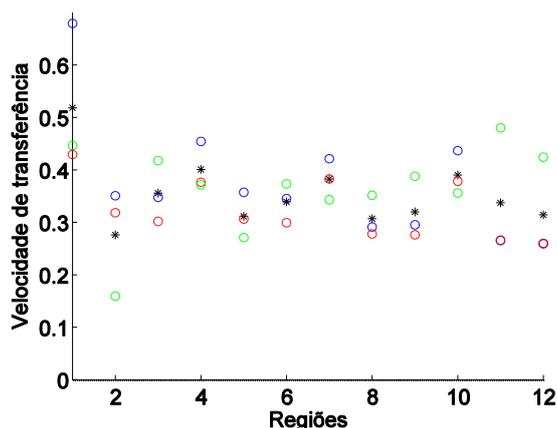


Figura 4.23: Velocidade de transferência no topo do dossel urbano para cada unidade repetida considerando um conjunto de prédios alinhados e escoamento à 0°. (○) representa a velocidade de transferência na rua, (○) representa a velocidade de transferência na intersecção, (○) representa a velocidade de transferência atrás do prédio e (\*) representa a velocidade de transferência média para cada unidade repetida.

A Figura 4.24 mostra a velocidade de transferência para um conjunto de prédios escalonados, com escoamento à 45° e três diferentes localizações da fonte. A velocidade de transferência é calculada atrás do prédio, entre dois prédios e na frente do prédio para cada uma das seis diferentes unidades repetidas. A velocidade de transferência média para cada unidade repetida também é apresentada na figura.

Na Figura 4.24a a fonte de poluentes é localizada atrás do prédio. Nota-se que a velocidade de transferência neste caso varia de 0,2 e 0,6. Ressalta-se que esses foram os mesmos valores utilizados por Salem *et al.* (2014) em um estudo avaliando a sensibilidade das parametrizações do modelo SIRANE. Os perfis da velocidade de transferência para cada tipo de caixa são bastante diferentes. Este comportamento é esperado devido à diferença no tipo de cada caixa. Em cada caixa o comportamento do escoamento é completamente diferente e isso acarreta em diferenças nestes perfis. Por outro lado, a média geral da velocidade de transferência para cada unidade repetida é similar. De forma geral, a velocidade de transferência na frente dos prédios é maior do que atrás do prédio e entre dois prédios. Observa-se também que a velocidade de transferência entre dois prédios é menor do que nas outras caixas. A velocidade de transferência média (considerando as seis regiões) atrás do prédio, entre dois prédios e na frente do prédio é 0,31, 0,25 e 0,56, respectivamente.

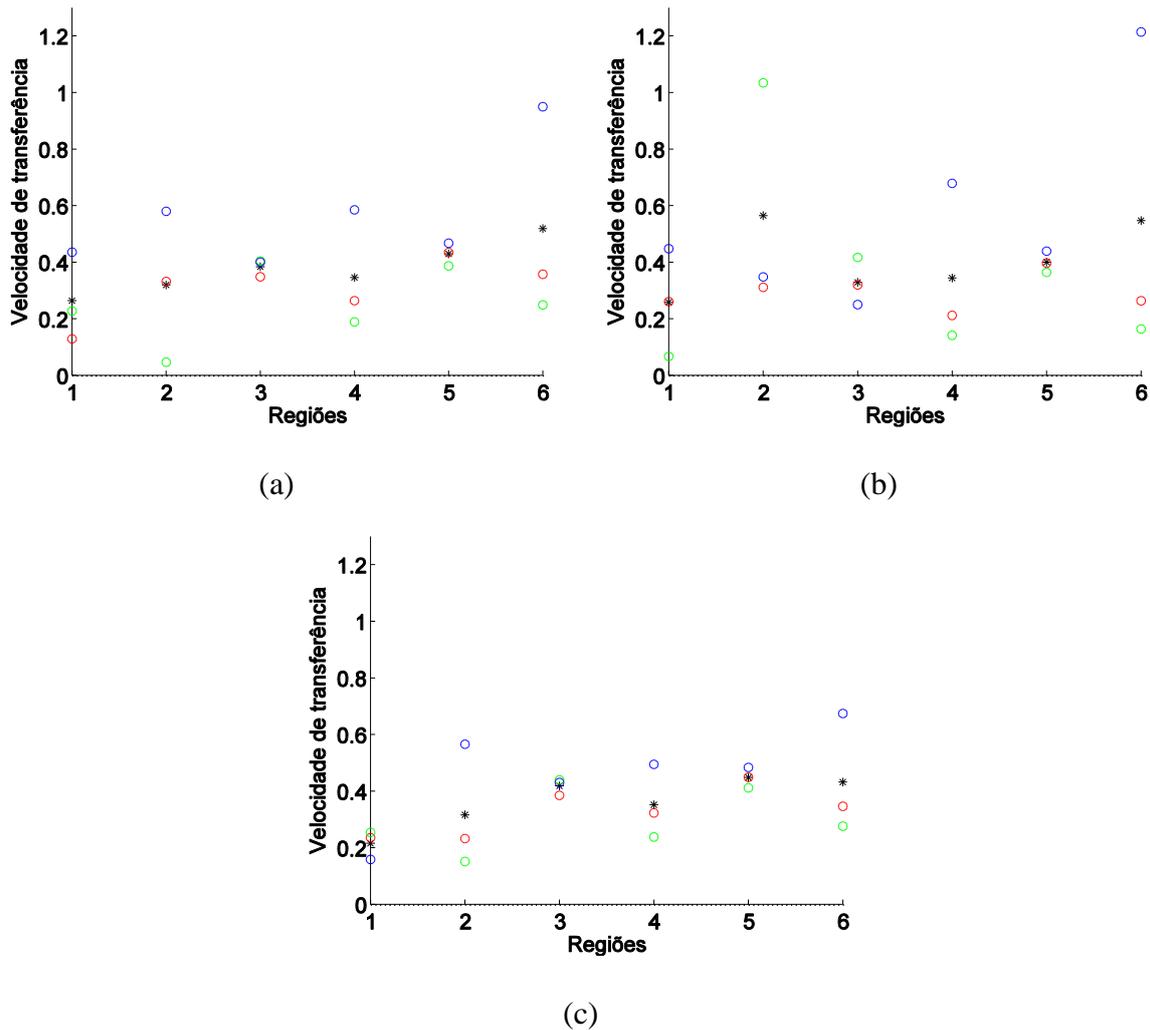


Figura 4.24: Velocidade de transferência no topo do dossel urbano para cada unidade repetida para um conjunto de prédios escalonados e escoamento à 45°. (a) Fonte localizada atrás de um prédio (F1); (b) Fonte localizada entre dois prédios (F2) e (c) fonte localizada na frente de um prédio (F3). (○) representa a velocidade de transferência atrás do prédio, (○) representa a velocidade de transferência na frente do prédio, (○) representa a velocidade de transferência entre dois prédios e (\*) representa a velocidade de transferência média para cada unidade repetida.

De forma análoga, é apresentada a velocidade de transferência em cada unidade repetida quando a fonte de poluentes é localizada entre dois prédios na Figura 4.24b. Neste caso, não existe um padrão tão bem definido que caracteriza a velocidade de transferência. Na região 1, o menor valor da velocidade de transferência ocorre no local da fonte. Na região 2 e na região 3 a velocidade de transferência é maior na região entre os prédios. A partir da região 4 a velocidade de transferência passa a ser maior na região que se localiza na

frente dos prédios. O comportamento da velocidade da transferência neste caso tem características bastante diferentes dos outros dois (fonte na frente do prédio e fonte atrás do prédio).

A velocidade de transferência para a fonte localizada na frente de um prédio é apresentada na Figura 4.24 (c). Este caso é bastante similar ao caso em que a fonte é localizada atrás de um prédio. Os valores da velocidade de transferência média estão entre 0,2 e 0,5. Como no primeiro caso, a velocidade de transferência é maior na região na frente dos prédios e menor entre os prédios.

Comparando os três gráficos apresentados na Figura 4.24, nota-se o mesmo comportamento a partir da região 4. Dessa forma, pode-se concluir que a localização da fonte não tem uma forte influência nos valores da velocidade de transferência para locais mais afastados da fonte. Por outro lado, a velocidade de transferência é fortemente influenciada pela localização da fonte na região bem próxima à fonte. Observa-se ainda que em geral os valores da velocidade de transferência média são similares para os três casos.

Uma média geral da velocidade de transferência é mostrada na Tabela 4.1 para cada uma das três fontes. Nota-se que na média os valores da velocidade de transferência são parecidos, indicando que a velocidade não tem forte dependência da localização da fonte.

Tabela 4.1: Média geral da velocidade de transferência para cada fonte para o caso de prédios escalonados e escoamento a 45°.

<b>Localização da fonte</b>	<b>Média geral para <math>U_T</math></b>
Atrás de um prédio	0,37
Entre dois prédios	0,4
Na frente de um prédio	0,35

Com o objetivo de avaliar a precisão das parametrizações empregadas em modelos mais simplificados de avaliação da concentração de poluentes no interior de dosséis urbanos, duas parametrizações mais amplamente citadas na literatura científica são analisadas. A Tabela 4.2 resume as parametrizações que serão utilizadas neste trabalho.

Tabela 4.2: Parametrizações para a velocidade de transferência usando dados de DNS.

Parametrização	Fórmula para $U_T$
SOULHAC01 (SOULHAC <i>et al.</i> , 2011)	$U_T = \frac{\sigma_w}{\sqrt{2\pi}}$ , onde $\sigma_w$ foi calculado usando dados de DNS.
SOULHAC02 (SOULHAC <i>et al.</i> , 2011)	$U_T = \frac{\sigma_w}{\sqrt{2\pi}}$ , onde $\sigma_w$ foi calculado pela equação 2.4
B&B01 (BENTHAM; BRITTER, 2003)	$\frac{U_T}{u^*} = \left(\frac{U_{ref} - U_c}{u^*}\right)^{-1}$ , onde $U_{ref}$ e $U_c$ são calculadas usando dados de DNS.
B&B02 (BENTHAM; BRITTER, 2003)	$\frac{U_T}{u^*} = \left(\frac{U_{ref} - U_c}{u^*}\right)^{-1}$ , onde $U_{ref}$ é calculada usando dados de DNS e $U_c$ é calculada pela expressão $\frac{U_c}{u^*} = \left[\frac{\lambda_f}{2}\right]^{-1/2}$ .

A Figura 4.25 apresenta a velocidade de transferência calculada em duas regiões distintas, intersecção (Figura 4.25a) e rua (Figura 4.25b) para um conjunto de prédios alinhados e escoamento à 45°. A velocidade de transferência na intersecção calculada usando os dados de DNS tem um valor médio de 0,5 enquanto as parametrizações têm valores que variam de 0,34 a 0,25. Por outro lado, a velocidade de transferência calculada nas ruas usando os dados de DNS tem um valor médio de 0,3, mostrando que as parametrizações têm uma melhor concordância com as velocidades calculadas nas ruas (veja Figura 4.25b).

Na parametrização desenvolvida por Soulhac *et al.* (2011), os autores consideram apenas a transferência na rua e as intersecções são consideradas bidimensionais não sendo levadas em consideração para o cálculo da parametrização da velocidade de transferência. Dessa forma, os valores da velocidade de transferência calculados na intersecção usando essa parametrização não terão uma boa concordância com os valores calculados usando dados de DNS.

Para o cálculo da velocidade de transferência nas ruas, os resultados da parametrização de Bentham e Britter (2003) com  $U_c$  calculado como função de  $\lambda_f$  apresentam resultados bem mais próximos dos resultados de DNS do que as demais parametrizações.

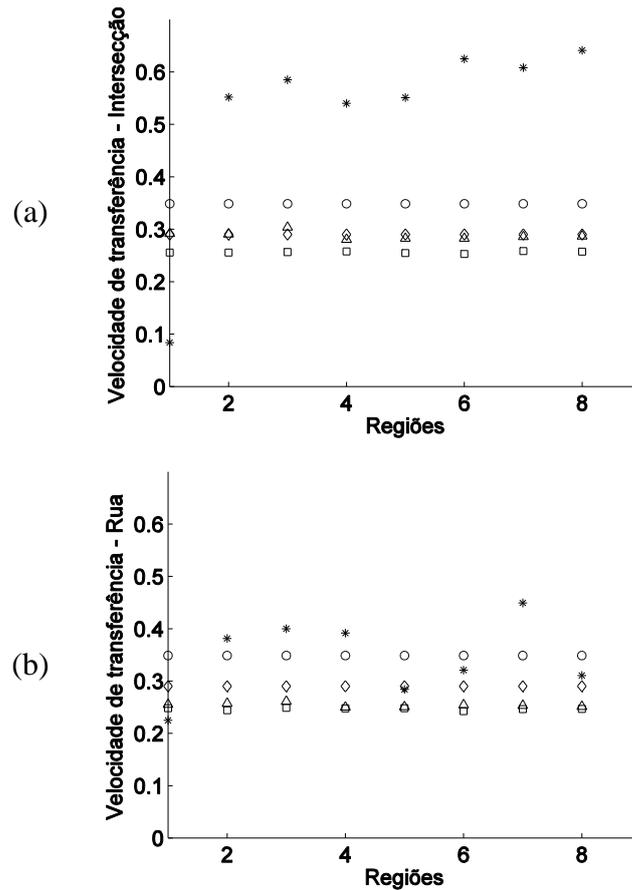


Figura 4.25: Velocidade de transferência no topo do dossel urbano calculada nas regiões (a) intersecção e (b) rua, considerando um conjunto de prédios alinhados e escoamento à 45°. (\*) representa os dados de DNS; ( $\Delta$ ) representa a parametrização de SOULHAC01; ( $\diamond$ ) representa a parametrização de SOULHAC02; ( $\square$ ) representa a parametrização de B&B01 e ( $\circ$ ) representa a parametrização de B&B02.

A Figura 4.26 apresenta a velocidade de transferência média em cada unidade repetida usando dados de DNS (é feita uma média das velocidades de transferência nas ruas e intersecção de cada unidade repetida) para um conjunto de prédios alinhados e escoamento à 45° e as diferentes parametrizações. A velocidade de transferência calculada usando a parametrização proposta por Soulhac *et al.* (2011) tanto com  $\sigma_w$  calculado usando dados de DNS ou utilizando uma fórmula para  $\sigma_w$  e a parametrização proposta por Bentham e Britter (2003) com  $U_c$  calculado usando dados de DNS são bem similares. A média da velocidade de transferência calculada usando a parametrização de Soulhac *et al.* (2011) com  $\sigma_w$  calculado usando dados de DNS é de 0,27 e usando a equação 2.4 é de 0,29, enquanto usando a parametrização proposta por Bentham e Britter (2003) com  $U_c$  calculado usando dados de DNS é 0,25. Por outro lado, a velocidade de

transferência calculada usando a parametrização proposta por Bentham e Britter (2003) com  $U_c$  calculado como função de  $\lambda_f$  é 0,34. Ou seja, a diferença entre as parametrizações de Bentham e Britter (2003) com as duas formas de calcular  $U_c$  é de 26% e a diferença entre as parametrizações de Soulhac *et al.* (2011) é de apenas 6%.

A Figura 4.27 mostra a velocidade de transferência calculada em três diferentes caixas de cada unidade repetida, intersecção, rua e entre prédios, para uma configuração de prédios alinhados e escoamento direcionado à  $0^\circ$ . A parametrização que melhor representa a velocidade de transferência nesta configuração é a parametrização de Soulhac *et al.* 2011 com  $\sigma_w$  calculado utilizando a equação 2.4. A velocidade de transferência que teve melhor concordância com as parametrizações foi a velocidade na rua enquanto a velocidade entre prédios teve a pior concordância com as parametrizações.

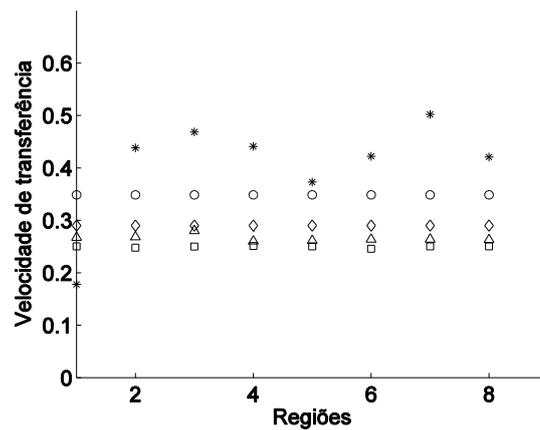


Figura 4.26: Velocidade de transferência média no topo do dossel urbano em cada unidade repetida usando dados de DNS e diferentes parametrizações para um conjunto de prédios alinhados e escoamento à  $45^\circ$ . (\*) representa os dados de DNS; ( $\Delta$ ) representa a parametrização de SOULHAC01; ( $\diamond$ ) representa a parametrização de SOULHAC02; ( $\square$ ) representa a parametrização de B&B01 e ( $\circ$ ) representa a parametrização de B&B02.

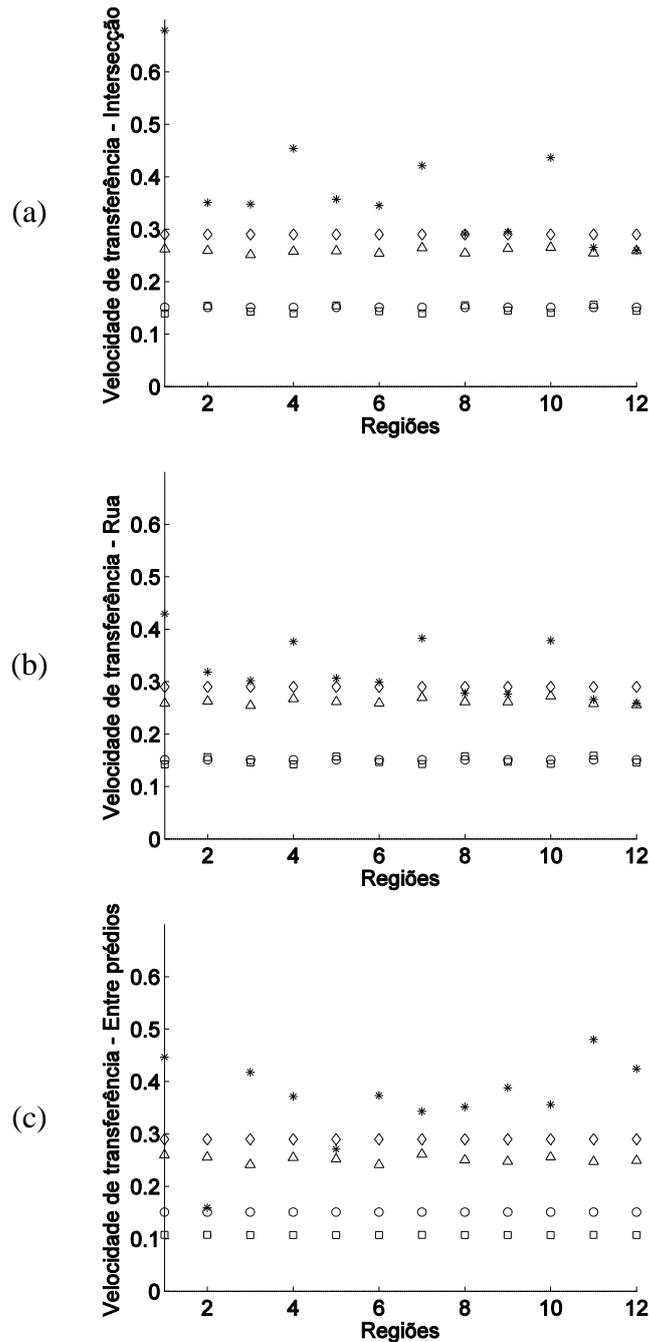


Figura 4.27: Velocidade de transferência calculada no topo do dossel urbano calculada nas regiões (a) intersecção; (b) rua e (c) entre prédios, para um conjunto de prédios alinhados e escoamento à  $0^\circ$ . (\*) representa os dados de DNS; ( $\Delta$ ) representa a parametrização de SOULHAC01; ( $\diamond$ ) representa a parametrização de SOULHAC02; ( $\square$ ) representa a parametrização de B&B01 e ( $\circ$ ) representa a parametrização de B&B02.

A Figura 4.28 mostra velocidade de transferência média calculada nas unidades repetidas, juntamente com as parametrizações dessa velocidade. É possível ver que a parametrização que mais se aproxima dos dados de DNS é a parametrização proposta por

Soulhac *et al.* (2011). A média da velocidade de transferência calculada usando dados de DNS é de 0,35 enquanto o valor médio para a velocidade de transferência usando a parametrização de Soulhac *et al.* (2011) com  $\sigma_w$  calculado usando a equação 2.4 é de 0,29 e usando  $\sigma_w$  calculado utilizando os dados de LES é de 0,25, dando uma diferença percentual de aproximadamente 21% para ambos os casos. A parametrização proposta por Bentham e Britter (2003) estima valores em torno de 0,15, tanto para  $U_c$  calculado usando dados de DNS como para  $U_c$  calculado em função de  $\lambda_f$ . Com isso, pode-se concluir que a parametrização que melhor representa a velocidade de transferência calculada usando dados de DNS foi a parametrização de Soulhac *et al.* (2011) com  $\sigma_w$  calculado usando a equação 2.4.

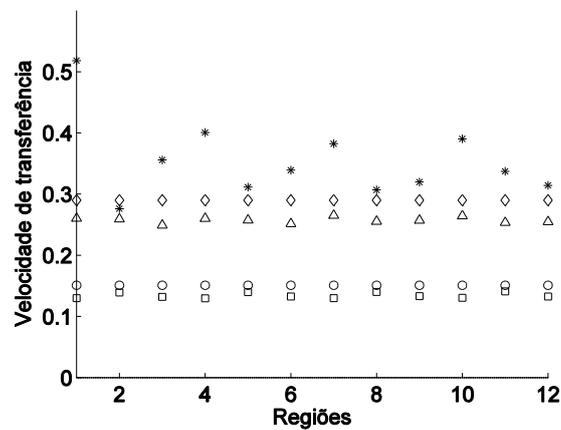


Figura 4.28: Velocidade de transferência média no topo do dossel urbano em cada unidade repetida usando dados de DNS e três diferentes parametrizações para um conjunto de prédios alinhados e escoamento à 0°. (\*) representa os dados de DNS; (Δ) representa a parametrização de SOULHAC01; (◇) representa a parametrização de SOULHAC02; (□) representa a parametrização de B&B01 e (○) representa a parametrização de B&B02.

A Figura 4.29, a Figura 4.30 e a Figura 4.31 apresentam a velocidade de transferência para um conjunto de prédios escalonados e escoamento direcionado à 45°. Para todas as figuras, a velocidade de transferência foi calculada usando dados de DNS e parametrizações para os três diferentes tipos de caixas (entre prédios, na frente do prédio e atrás do prédio) de cada unidade repetida. A Figura 4.29 considera a fonte localizada atrás de um prédio (fonte 1). A Figura 4.30 considera a fonte localizada entre prédios (fonte 2) e a Figura 4.31 considera a fonte localizada na frente de um prédio (fonte 3).

Na Figura 4.29 pode-se verificar que as parametrizações de Soulhac *et al.* (2011), tanto usando  $\sigma_w$  calculado através de dados de DNS como calculado através da equação 2.4, são as que mais se aproximam dos valores da velocidade de transferência calculadas usando os dados de DNS nas caixas entre prédios e atrás do prédio. Como a velocidade na frente dos prédios é mais alta do que nas outras caixas, ambas as parametrizações de Soulhac *et al.* (2011) e de Bentham e Britter (2003), com  $U_c$  calculado através dos dados de DNS, não conseguem determinar de forma satisfatória este parâmetro. Porém, a parametrização de Bentham e Britter (2003), com  $U_c$  calculado em função de  $\lambda_f$ , consegue prever melhor esse valor.

Quando a fonte 2 é considerada (Figura 4.30), novamente as parametrizações de Soulhac *et al.* (2011) (com  $\sigma_w$  calculado através de dados de DNS ou calculado através da equação 2.4) tem bom desempenho para calcular velocidade de transferência atrás do prédio. A parametrização de Bentham e Britter (2003) (com  $U_c$  calculado através dos dados de DNS) também representa bem a velocidade de transferência atrás do prédio. Novamente, a velocidade na frente do prédio é mais elevada do que nas outras caixas e assim a parametrização de Bentham e Britter (2003), com  $U_c$  calculado em função de  $\lambda_f$  é a melhor.

A Figura 4.31 mostra que a parametrização de Soulhac *et al.* (2011) (com  $\sigma_w$  calculado através de dados de DNS ou calculado através da equação 2.4 e de Bentham e Britter (2003) (com  $U_c$  calculado através dos dados de DNS) são as melhores para a região entre prédios e atrás do prédio. Para esta localização da fonte (fonte 3), a velocidade entre prédios é a que melhor é representada pelas parametrizações. Na região na frente do prédio são observados os maiores valores da velocidade de transferência e novamente a parametrização de Bentham e Britter (2003), com  $U_c$  calculado em função de  $\lambda_f$ , aproxima-se mais desses valores.

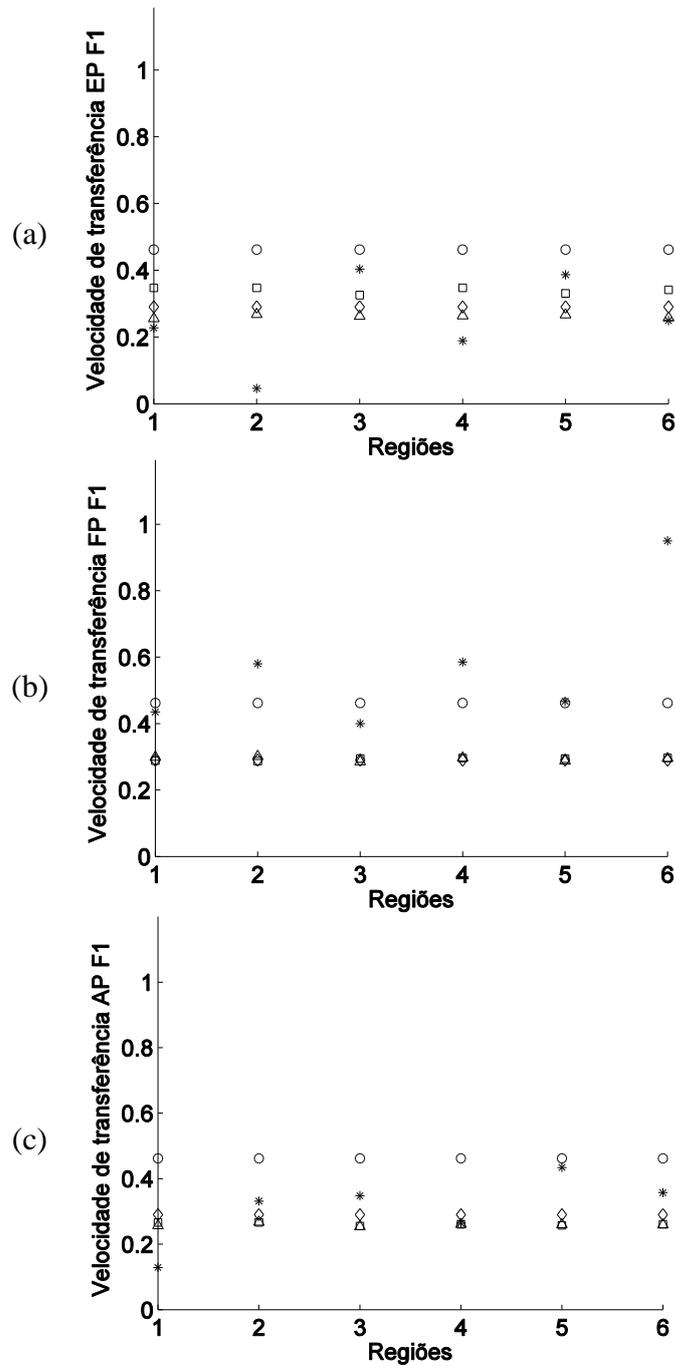


Figura 4.29: Velocidade de transferência no topo do dossel urbano calculada nas regiões (a) entre prédios (EP); (b) na frente do prédio (FP) e (c) atrás do prédio (AP) para um conjunto de prédios escalonados, escoamento à 45° e fonte localizada atrás de um prédio (fonte 1). (\*) representa os dados de DNS; ( $\Delta$ ) representa a parametrização de SOULHAC01; ( $\diamond$ ) representa a parametrização de SOULHAC02; ( $\square$ ) representa a parametrização de B&B01 e ( $\circ$ ) representa a parametrização de B&B02.

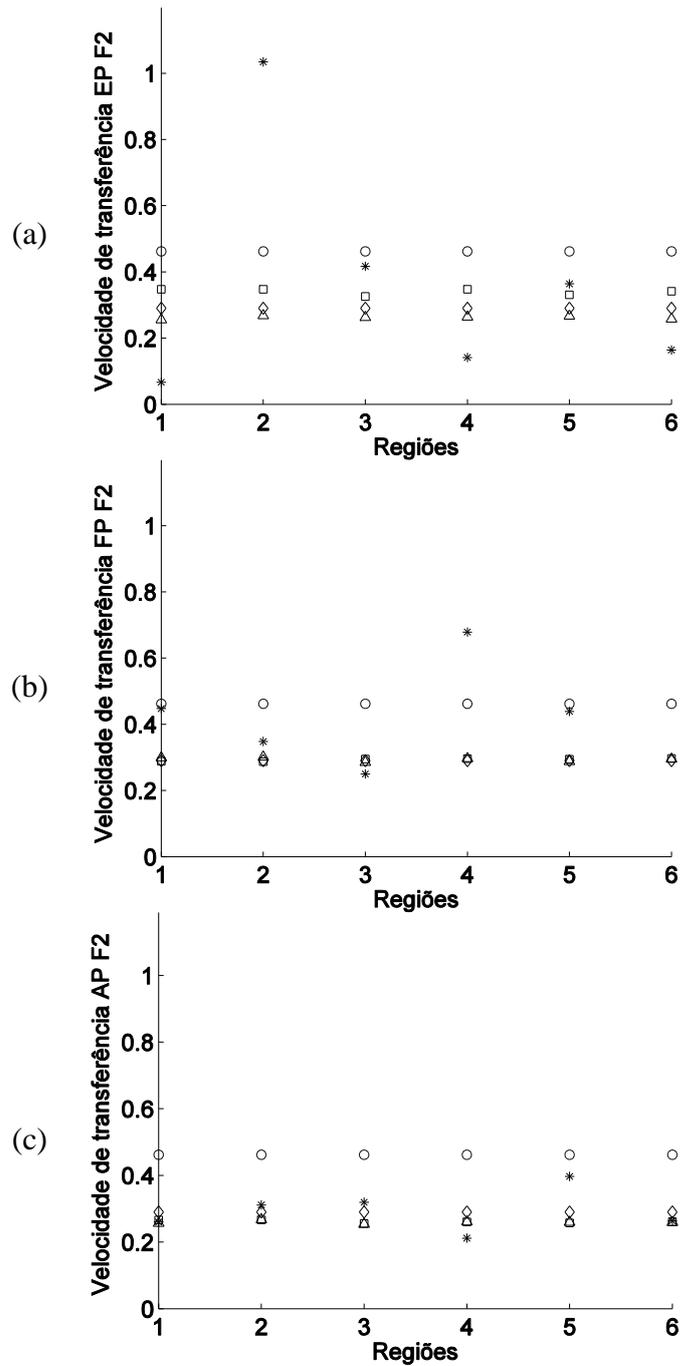


Figura 4.30: Velocidade de transferência no topo do dossel urbano calculada nas regiões (a) entre prédios (EP); (b) na frente do prédio (FP) e (c) atrás do prédio (AP), para um conjunto de prédios escalonados, escoamento à 45° e fonte localizada entre prédios (Fonte 2). (\*) representa os dados de DNS; ( $\Delta$ ) representa a parametrização de SOULHAC01; ( $\diamond$ ) representa a parametrização de SOULHAC02; ( $\square$ ) representa a parametrização de B&B01 e ( $\circ$ ) representa a parametrização de B&B02.

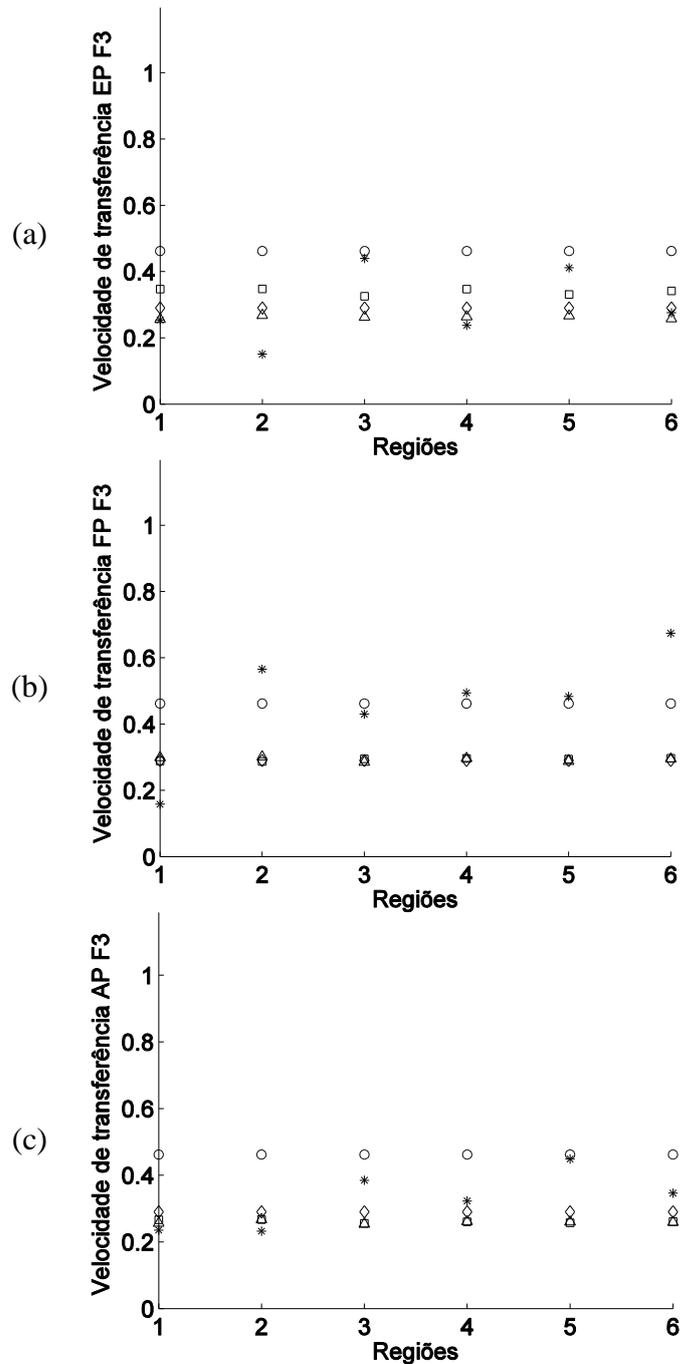


Figura 4.31: Velocidade de transferência no topo do dossel urbano calculada nas regiões (a) entre prédios (EP); (b) na frente do prédio (FP) e (c) atrás do prédio (AP), para um conjunto de prédios escalonados, escoamento à 45° e fonte localizada na frente do prédio (Fonte 3). (\*) representa os dados de DNS; ( $\Delta$ ) representa a parametrização de SOULHAC01; ( $\diamond$ ) representa a parametrização de SOULHAC02; ( $\square$ ) representa a parametrização de B&B01 e ( $\circ$ ) representa a parametrização de B&B02.

A velocidade de transferência média para cada unidade repetida considerando um conjunto de prédios escalonados e escoamento à 45° é apresentada na Figura 4.32 para as três diferentes localizações da fonte. A parametrização de Soulhac *et al.* (2011) (com  $\sigma_w$  calculado através de dados de DNS ou calculado através da equação 2.4 e de Bentham e Britter (2003) (com  $U_c$  calculado com dados de DNS) dão resultados muito próximos. Por outro lado, a velocidade de transferência média calculada usando a parametrização de Bentham e Britter (2003) (com  $U_c$  calculado em função de  $\lambda_f$ ) é igual a 0,46.

Para a fonte 1 a velocidade de transferência média é de 0,37, dessa forma, as parametrizações com resultados mais próximos dessa média são as de Soulhac *et al.* (2011) (com  $\sigma_w$  calculado usando a equação 2.4 e Bentham e Britter (2003) (com  $U_c$  calculado com dados de DNS e com  $U_c$  calculado em função de  $\lambda_f$ ).

Para a fonte 2 a melhor parametrização é a de Bentham e Britter (2003) (com  $U_c$  calculado em função de  $\lambda_f$ ). Isso acontece, pois, a velocidade de transferência no topo do dossel urbano é mais elevada para a fonte 2, fazendo com que na média a velocidade fique mais elevada do que nos outros casos.

No terceiro caso, quando a fonte 3 é considerada, a média da velocidade de transferência é de 0,35 e assim as melhores parametrizações são a de Soulhac *et al.* (2011) (com  $\sigma_w$  calculado usando a equação 2.4 e a de Bentham e Britter (2003) (com  $U_c$  calculado com dados de DNS).

Nota-se que existem algumas diferenças nos valores das velocidades de transferência para cada tipo de fonte, fazendo com que as parametrizações sejam melhores em um caso e em outro caso não sejam tão boas. Porém, uma média geral da velocidade de transferência, considerando uma média das fontes, mostra que todas as parametrizações são razoáveis para determinação deste parâmetro. Ressalta-se ainda que no caso de utilização das parametrizações em modelos mais simplificados é importante que em média o fenômeno seja bem representado, o que é possível ver nas avaliações feitas nesta seção.

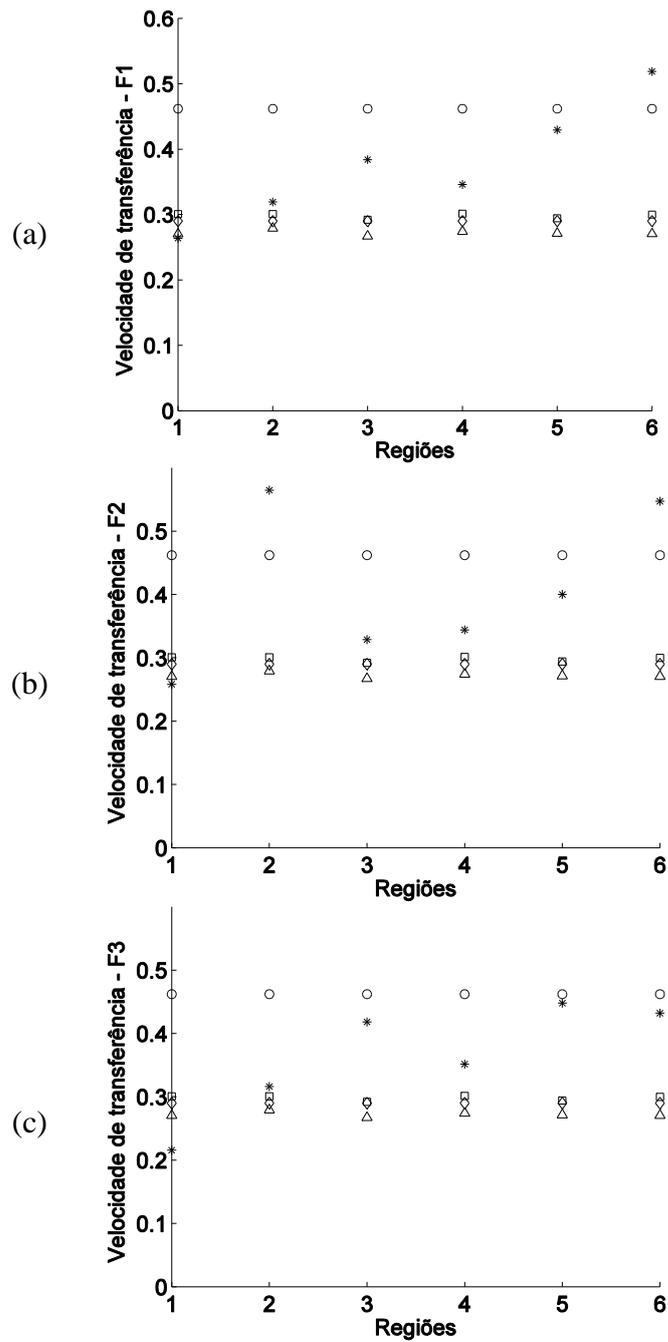


Figura 4.32: Velocidade de transferência média no topo do dossel urbano para cada unidade repetida para um conjunto de prédios escalonados e escoamento à 45°. (a) Fonte 1; (b) Fonte 2 e (c) Fonte 3. (\*) representa os dados de DNS; ( $\Delta$ ) representa a parametrização de SOULHAC01; ( $\diamond$ ) representa a parametrização de SOULHAC02; ( $\square$ ) representa a parametrização de B&B01 e ( $\circ$ ) representa a parametrização de B&B02.

## 4.2 Conjunto de prédios com diferentes alturas - dados de simulação das grandes escalas

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos da simulação das grandes escalas para o escoamento e dispersão de um escalar passivo através de um conjunto de prédios. Conforme descrito no Capítulo 3, uma única configuração foi considerada, um conjunto de prédios de diferentes alturas e dispostos de forma escalonada com direção do vento igual a  $0^\circ$ . A configuração simulada aqui é a mesma estudada experimentalmente por Cheng e Castro (2002) para permitir a comparação dos resultados numéricos com os dados experimentais.

Os resultados estão divididos em quatro subseções, que apresentam a validação da modelagem matemática para o escoamento, uma visão geral do escoamento e dispersão de poluentes em um dossel urbano com prédios de diferentes alturas, também são discutidos os principais mecanismos que influenciam a saída e reentrada de massa de poluente em um dossel urbano composto de prédios de diferentes alturas e finalmente é feita uma análise de algumas parametrizações disponíveis para o transporte vertical de massa de contaminante no topo deste dossel urbano.

### 4.2.1 Validação da modelagem matemática

Uma comparação entre os resultados obtidos na simulação numérica LES deste trabalho e dados de experimentos de Cheng e Castro (2002) é realizada nesta seção. A configuração utilizada neste experimento e a malha adotada foram descritos no Capítulo 3. É importante ressaltar que essa configuração foi escolhida para reproduzir o experimento de Cheng e Castro (2002).

Na Figura 4.33 são apresentadas médias espaciais da velocidade média na direção de  $x$  e da componente  $\overline{u'w'}$  do tensor de Reynolds normalizados por  $u^*$  e  $u^{*2}$ , respectivamente. Utiliza-se a expressão  $\sqrt{\tau^*/\rho}$ , onde  $\tau^*$  é a tensão de cisalhamento e  $\rho$  é a massa específica do fluido. Para o cálculo da média espacial, consideram-se perfis verticais da variável por todo o domínio e é feita uma média desses valores. Os dados de experimento de Cheng e Castro (2002) não são medidos desde o chão. Dessa forma, não é possível comparar os resultados da simulação LES obtidos dentro do dossel urbano. A Figura 4.33a mostra que a média espacial da velocidade média na direção de  $x$  tem uma razoável concordância

com os dados de experimento até a altura  $z/h_m = 6$ . Na Figura 4.33b é apresentado uma comparação da média espacial do tensor de Reynolds  $\overline{u'w'}$  obtido com a simulação LES e como experimento de Cheng e Castro (2002). É possível perceber que a concordância com o dado experimental é razoável no que se refere à magnitude dos valores de  $\overline{u'w'}$  e da inclinação das curvas, porém existe uma subestimação dos valores de  $\overline{u'w'}$ .

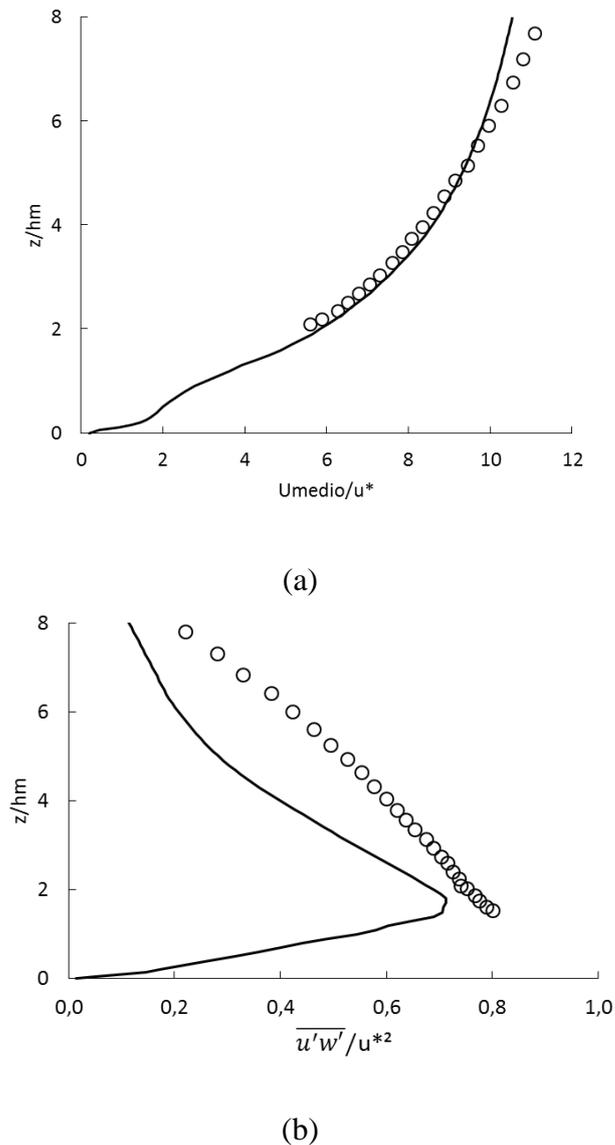


Figura 4.33: Média espacial da (a) velocidade média e da (b) componente  $\overline{u'w'}$  do tensor de Reynolds. A linha contínua representa a simulação LES do presente estudo e os símbolos representam os dados do experimento de Cheng e Castro (2002).

A Figura 4.34 mostra os perfis verticais da velocidade média na direção de  $x$  e dos perfis verticais do rms da velocidade nas direções  $x$ ,  $y$  e  $w$ . A quantidade rms (*root mean square*)

equivale ao desvio padrão da variável de interesse ( $\phi$ ) que é dada da seguinte forma  $\phi_{rms} = \sqrt{\phi'\phi'}$ . São realizadas comparações com o experimento para duas diferentes localizações, um ponto A e um ponto B. Os pontos estão localizados  $0,5h_m$  a jusante de um prédio de  $10\text{ mm}$  de altura. A diferença entre as localizações desses pontos é que o ponto A a montante de um prédio de  $17,2\text{ mm}$  e o ponto B a montante de um prédio de  $2,8\text{ mm}$  de altura, conforme pode ser observado na (Figura 3.4).

Na Figura 4.34b aparecem dois picos no perfil do rms da velocidade na direção  $x$  localizado no ponto A, sendo um mais estreito e outro com maior amplitude. De acordo com Xie *et al.* (2008) esses picos são devido à camada cisalhante resultante dos prédios localizados à montante desses pontos. O pico mais estreito é devido à camada cisalhante gerada pelo prédio de altura  $10\text{ mm}$ , localizado logo à montante do ponto A e o pico mais intenso e com maior amplitude é devido à camada cisalhante gerada pelo prédio de altura  $17,2\text{ mm}$ , localizado mais à montante do ponto A. No ponto B o prédio mais a montante têm altura de  $2,8\text{ mm}$  e seu efeito é menor quando comparado com o efeito produzido pelo prédio de  $10\text{ mm}$  localizado logo à montante.

Na Figura 4.34c são apresentados os perfis verticais do rms da velocidade na direção  $y$ , porém, não existem dados de experimento para efeito de comparação. É possível ver que um pico ocorre bem próximo ao chão e a uma altura de aproximadamente  $2h_m$ .

A Figura 4.34d mostra os perfis do rms da velocidade na direção  $z$  nos pontos A e B. Nota-se uma diferença entre os dados do experimento e os resultados da simulação LES, porém o pico que ocorre a uma altura de aproximadamente  $2h_m$  coincide com os dados do experimento. Nota-se que o pico no perfil no ponto B é maior do que pico encontrado no ponto A.

Depois de realizada a comparação dos dados experimentais de Cheng e Castro (2002) com os dados produzidos na simulação LES, pode-se concluir que os resultados obtidos da simulação LES estão em razoável concordância com os dados do experimento, especialmente na região próxima da superfície do dossel urbano. Dessa forma, assume-se que a simulação LES produz resultados suficientemente confiáveis do escoamento na região dentro do dossel, permitindo a análise da influência do dossel urbano no escoamento e dispersão de poluentes no seu interior.

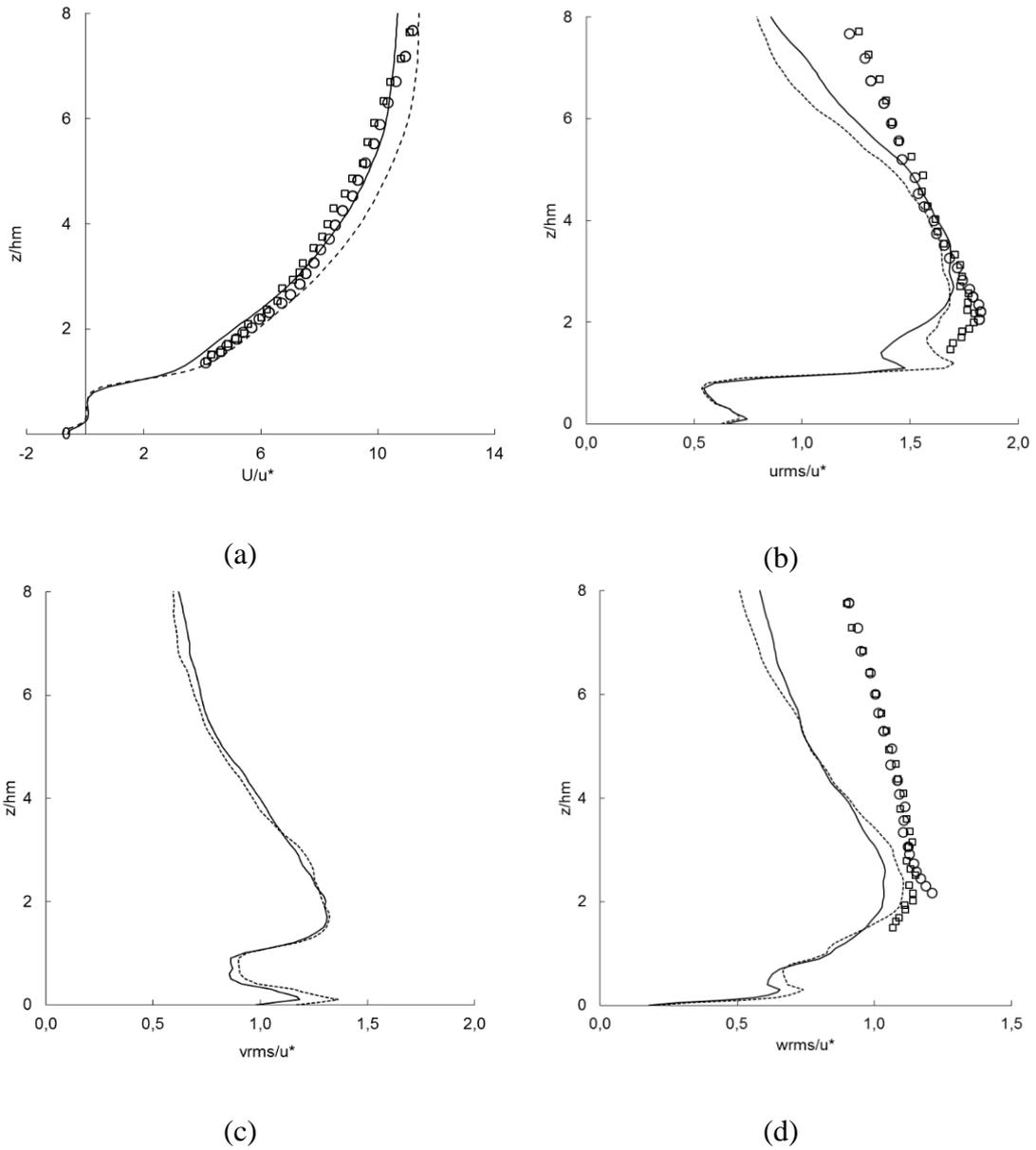


Figura 4.34: Perfis verticais da (a) velocidade média na direção  $x$ , (b) rms da velocidade na direção  $x$ , (c) rms da velocidade na direção  $y$  e (d) rms da velocidade na direção  $z$ . As linhas contínua e pontilhada representam a simulação LES do presente estudo nos pontos A e B, respectivamente. ( $\circ$ ) e ( $\square$ ) representam os dados de experimento de Cheng e Castro (2002) nos pontos A e B, respectivamente. Os pontos A e B são mostrados na Figura 3.4.

#### 4.2.2 Características gerais do escoamento e do campo de concentração médios

Com o objetivo de investigar a dispersão de poluentes no interior do dossel urbano, foram consideradas três diferentes localizações das fontes de poluentes, conforme mostradas na Figura 3.4.

A Figura 4.35 apresenta as linhas de corrente do escoamento médio no tempo nos planos horizontais  $xy$  para  $z/h_m = 0,28$  (Figura 4.35a),  $z/h_m = 1$  (Figura 4.35b) e  $z/h_m = 1,72$  (Figura 4.35c).

O escoamento dentro da matriz de prédios de diferentes alturas é bastante complexo, não sendo possível destacar um padrão comum, conforme foi feito no caso de prédios de mesmas alturas, onde em determinadas regiões do domínio computacional é possível prever um padrão aproximado do escoamento. Porém, destacam-se algumas características. Na Figura 4.35a observam-se intensas zonas de recirculação. Algumas zonas formam-se no canto de um prédio, outras atrás e na frente dos prédios. Também se observam zonas de recirculação nas regiões entre os prédios, como por exemplo, uma intensa zona de recirculação formada na quinta fileira de prédios entre os prédios de alturas  $10\text{ mm}$  e  $2,8\text{ mm}$ . Por outro lado, na Figura 4.35b as zonas de recirculação observadas estão localizadas nas regiões próximas aos prédios mais altos, ou seja, nas proximidades dos prédios de alturas  $13,6\text{ mm}$  e  $17,2\text{ mm}$ . Isso significa que os prédios de menores alturas não tem mais tanta influência sobre o escoamento a uma altura de  $z/h_m = 10$ , fazendo com que o escoamento acima deles seja menos perturbado. É importante ressaltar que os poluentes liberados nas proximidades dessas regiões que contém os prédios mais altos tenderão a ficar mais tempo presos nestas recirculações. As linhas de corrente apresentadas na altura do prédio mais alto,  $z/h_m = 17,2$ , mostram que o escoamento é mais perturbado nas proximidades deste prédio. No restante do domínio os prédios não têm mais tanta influência no escoamento, isso faz com que o escoamento médio seja mais uniforme e sem perturbações.

A maior densidade das linhas de corrente entre prédios de maior altura indica a formação de alguns “caminhos” preferenciais para o escoamento próximo ao nível do solo. Esta canalização é menos frequente nas proximidades de prédios de menor altura, visto que o escoamento tende a passar sobre os prédios mais baixos e não entre eles.

Prédios mais altos também tendem a apresentar regiões de recirculação mais claramente marcadas. Pode-se observar regiões em que a presença dos prédios é “percebida” pelo escoamento mesmo acima de suas alturas (Figura 4.35b e Figura 4.35c).

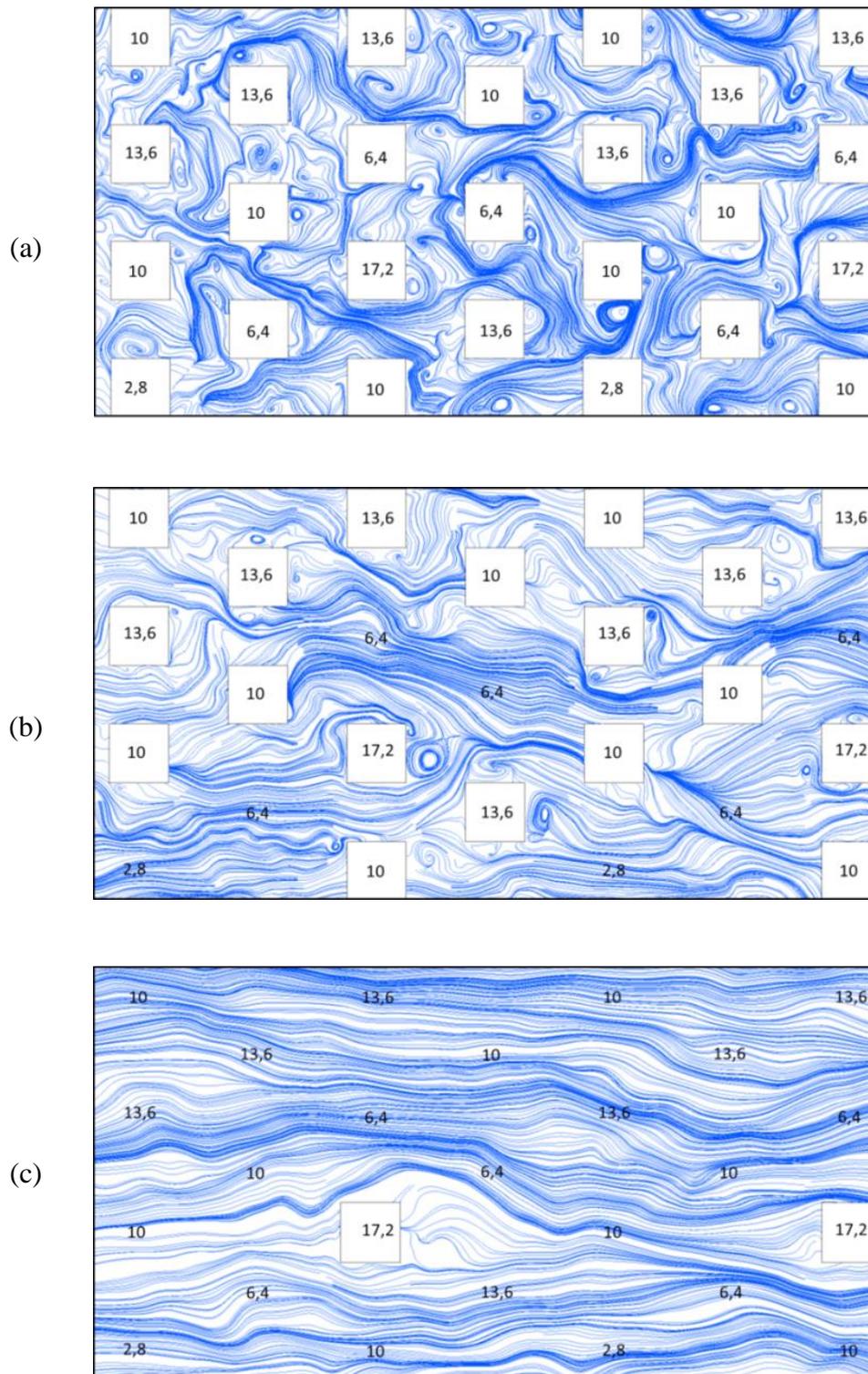


Figura 4.35: Linhas de corrente do escoamento médio nos planos horizontais  $xy$  para um conjunto de prédios de diferentes alturas e escoamento à  $0^\circ$ . (a)  $z/h_m = 0,28$  (b)  $z/h_m = 1$  e (c)  $z/h_m = 1,72$ .

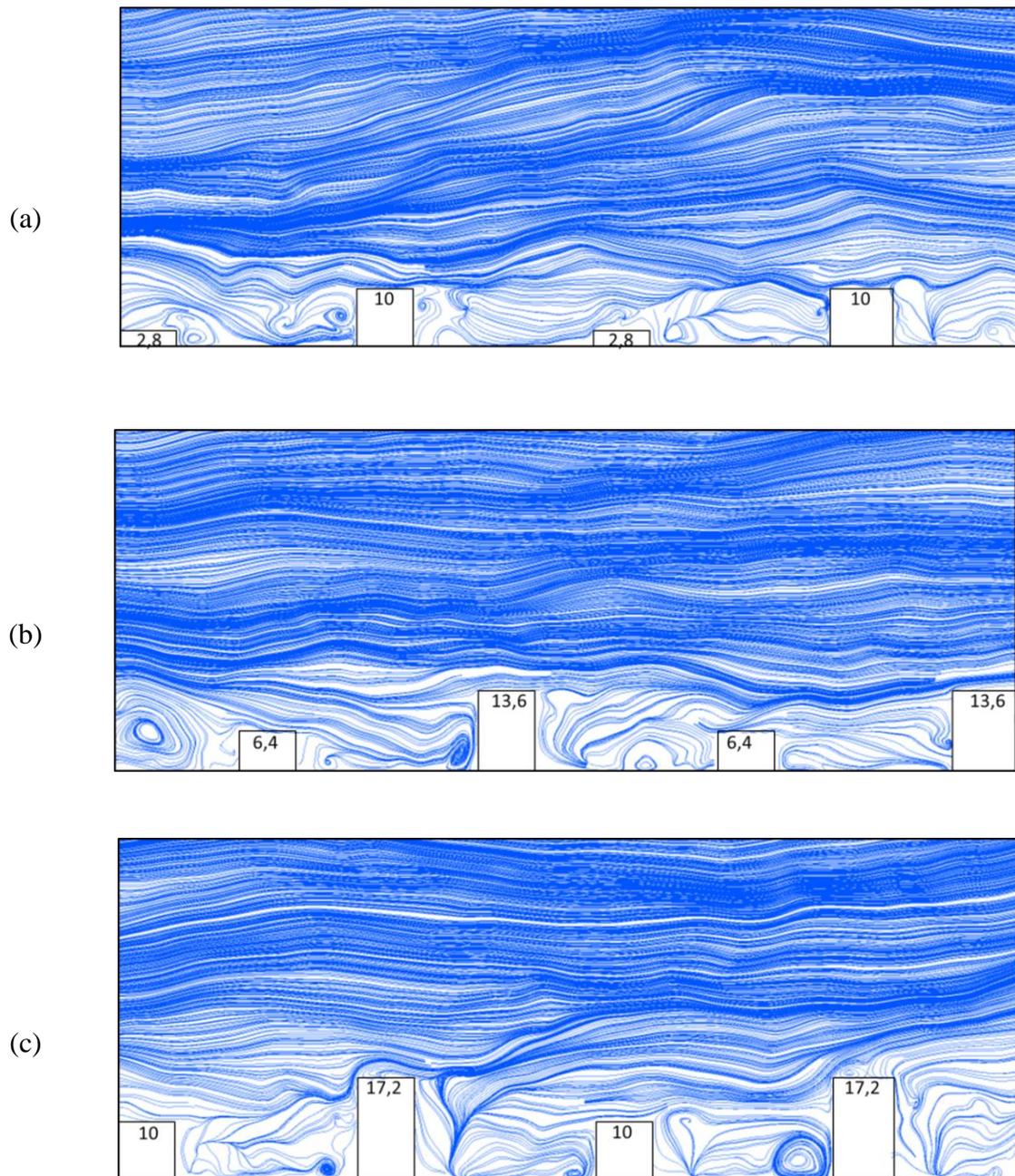


Figura 4.36: Linhas de corrente do escoamento médio nos planos verticais  $xz$  para um conjunto de prédios de diferentes alturas e escoamento à  $0^\circ$ . (a)  $y/h_m = 1$  (b)  $y/h_m = 2$  e (c)  $y/h_m = 3$ .

São apresentadas na Figura 4.36, as linhas de corrente do escoamento médio nos planos verticais  $xz$  para  $y/h_m = 1$  (Figura 4.36a),  $y/h_m = 2$  (Figura 4.36b) e  $y/h_m = 3$  (Figura 4.36c). Em todos os casos são observadas regiões de recirculação na vizinhança dos prédios. Destacam-se as intensas recirculações na vizinhança do prédio mais alto

(17,2mm de altura). Na região atrás do prédio mais alto nota-se um movimento ascendente, que fará o papel de uma chaminé, ou seja, irá transportar o poluente que ali se encontra para o topo do dossel urbano, fazendo com que o poluente saia com maior facilidade do interior do dossel.

O padrão do escoamento observado assemelha-se mais a um escoamento do tipo interferência da esteira do que do tipo *skimming*, conforme definido na Figura 2.3. Esta tendência é notada de maneira mais acentuada, principalmente, nas regiões onde os prédios mais baixos estão localizados a montante dos prédios mais elevados.

A Figura 4.37 mostra os contornos da concentração média nos planos horizontais  $xy$  para três diferentes valores de  $z/h_m$  com fonte localizada entre os prédios de alturas 10 mm e 17,2 mm (fonte 1) e próxima ao chão.

A Figura 4.37a apresenta os contornos da concentração média para  $z/h_m = 0,28$ . Neste plano é possível ver claramente a localização da fonte entre os dois prédios e a pluma dispersando-se na direção principal do escoamento. Na Figura 4.37b nota-se que parte do poluente lançado entre os prédios é capturado pela recirculação localizada atrás do prédio de maior altura ( $z = 17,2\text{ mm}$ ), gerando assim uma fonte de poluentes secundária atrás desse prédio. No topo do maior prédio (Figura 4.37c) o poluente é ainda emitido pelo efeito de “chaminé” que este prédio proporciona. Dessa forma, parte do poluente lançado entre os dois prédios é capturada pela zona de recirculação atrás do prédio de maior altura ficando ali mais tempo do que em outras recirculações. Em seguida será transportado para cima, chegando ao topo do prédio, sendo então transportado para fora do dossel. Esse comportamento pode ser claramente visto na isosuperfície de concentração apresentada na Figura 4.38.

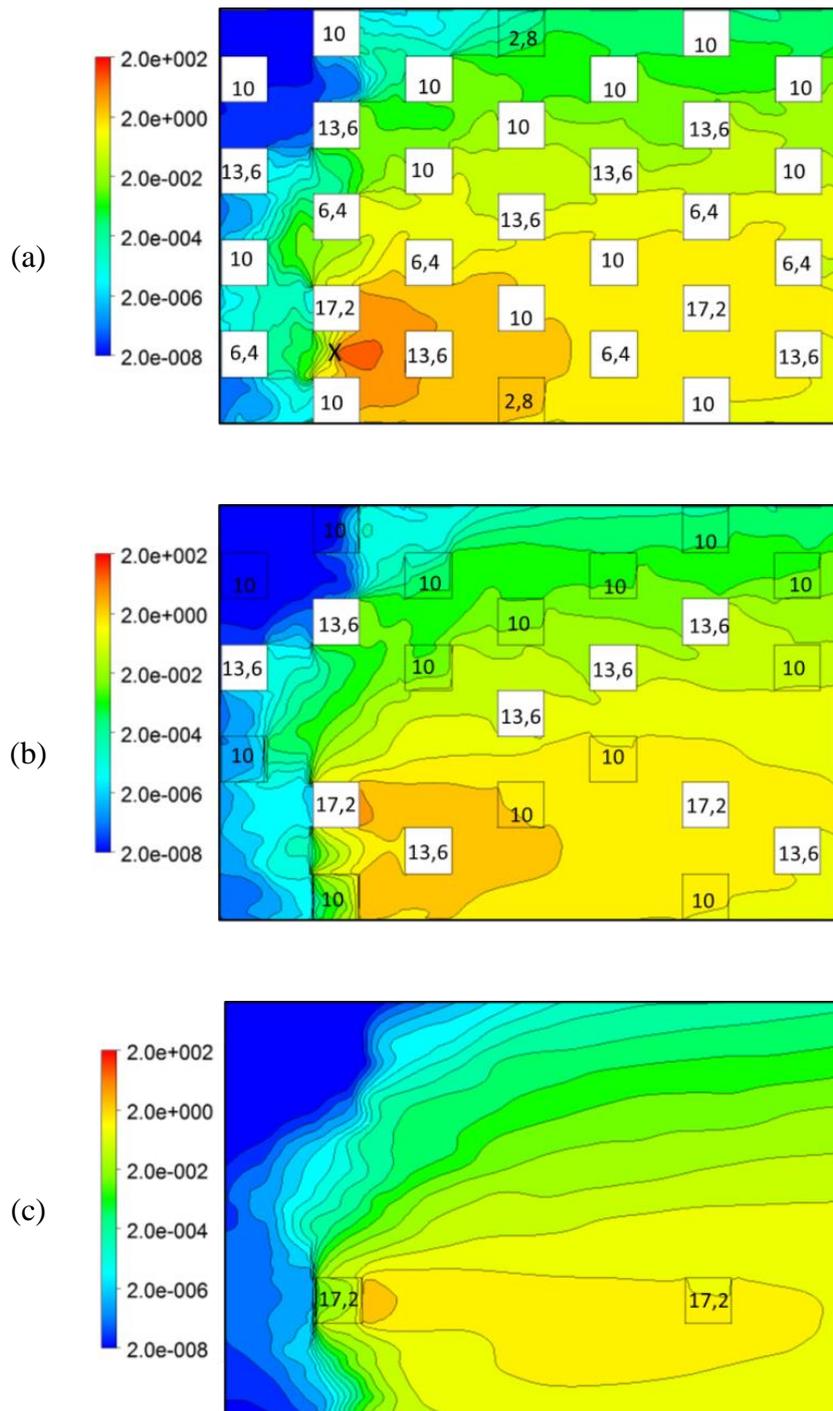


Figura 4.37: Contornos da concentração média nos planos horizontais  $xy$  para um conjunto de prédios de diferentes alturas e escoamento à  $0^\circ$ . (a)  $z/h_m = 0,28$ ; (b)  $z/h_m = 1$  e (c)  $z/h_m = 1,72$ , com fonte localizada entre os prédios de alturas  $0,01\text{ m}$  e  $0,0172\text{ m}$  (Fonte 1).  $x$  indica a localização da fonte. É utilizada a escala logarítmica e a concentração é dada em  $kg\text{ kg}^{-1}$ .

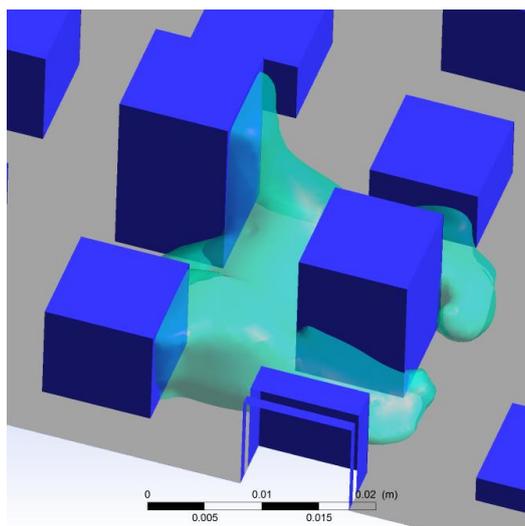


Figura 4.38: Isosuperfície de concentração da fonte 1.

Na Figura 4.39 são apresentados os contornos de concentração média em planos horizontais  $xy$  para uma fonte localizada entre os prédios de alturas  $17,2\text{ mm}$  e  $6,4\text{ mm}$  (fonte 2) e próxima ao chão. É possível ver que no plano mais próximo do chão (Figura 4.39a) a pluma de poluentes tem uma leve tendência para esquerda, ou seja, tende a se movimentar para trás do prédio de altura  $6,4\text{ mm}$  e isso é devido à forma do escoamento neste nível. À medida que a altura aumenta observa-se que a pluma de poluentes será capturada pela recirculação localizada atrás do prédio mais alto, ou seja, o prédio de altura  $17,2\text{ mm}$  (Figura 4.39b e Figura 4.39c). Dessa forma, o comportamento da pluma de poluentes no topo do prédio de maior altura é parecido para as duas localizações da fonte, entre os prédios de alturas  $10\text{ mm}$  e  $17,2\text{ mm}$  (fonte 1) e entre os prédios de alturas  $17,2\text{ mm}$  e  $6,4\text{ mm}$  (fonte 2). Como no caso anterior parte do poluente será capturado pela recirculação localizada atrás do prédio mais alto e será transportado para fora do dossel urbano. Neste caso também se nota a existência de uma fonte secundária atrás desse prédio.

Na Figura 4.40 são apresentados os contornos da concentração média nos planos horizontais  $xy$  para fonte 3, localizada atrás do prédio mais alto ( $17,2\text{ mm}$  de altura). Como a fonte está localizada em uma zona de recirculação o material ficará preso nesta região por mais tempo e neste caso será transportada para cima, saindo do dossel urbano em seguida.

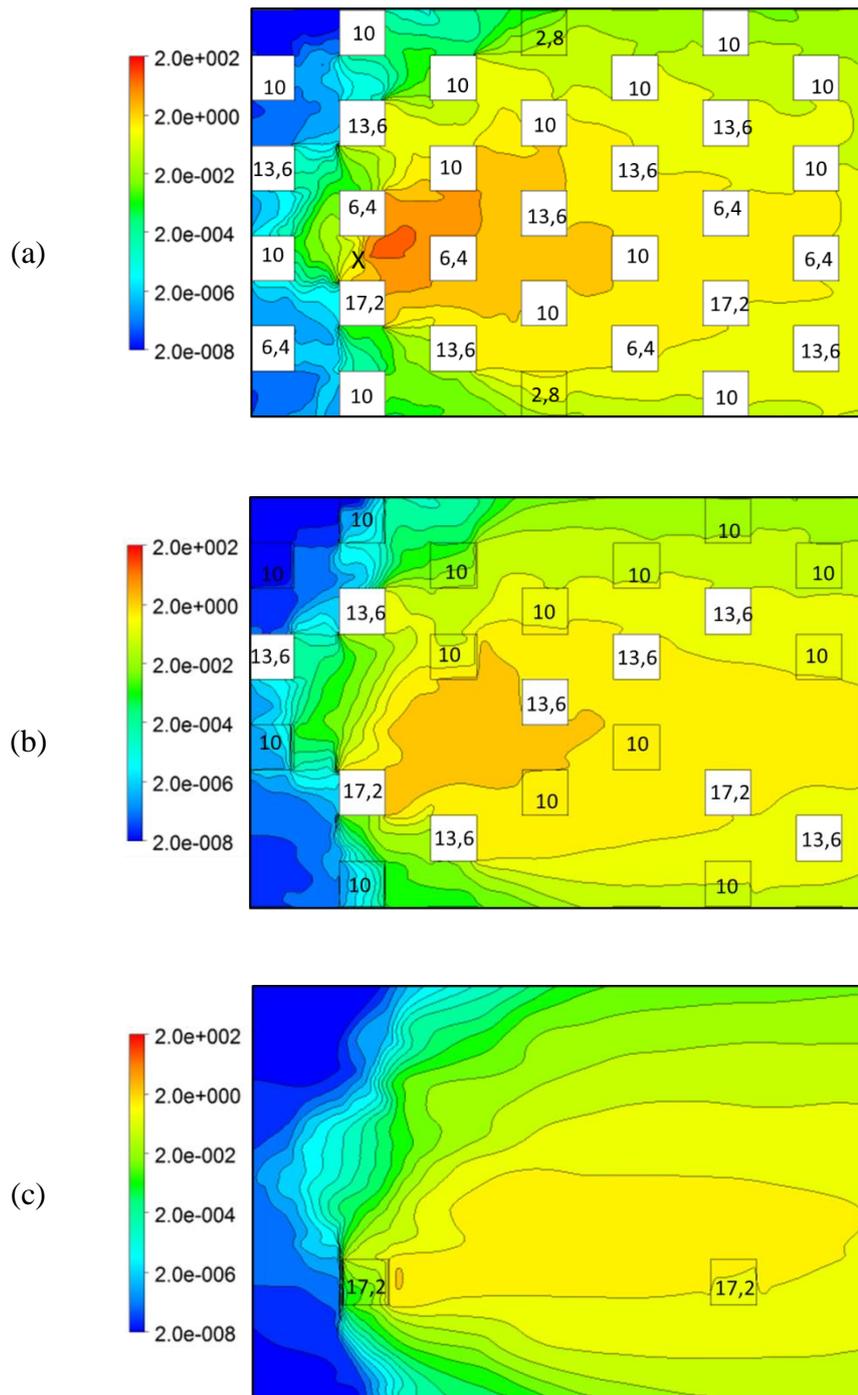


Figura 4.39: Contornos da concentração média nos planos horizontais  $xy$  para um conjunto de prédios de diferentes alturas e escoamento à  $0^\circ$ . (a)  $z/h_m = 0,28$ ; (b)  $z/h_m = 1$  e (c)  $z/h_m = 1,72$ , com fonte localizada entre os prédios de alturas 0,0172 m e 0,0064 m (Fonte 2).  $x$  indica a localização da fonte. É utilizada a escala logarítmica e a concentração é dada em  $kg\ kg^{-1}$ .

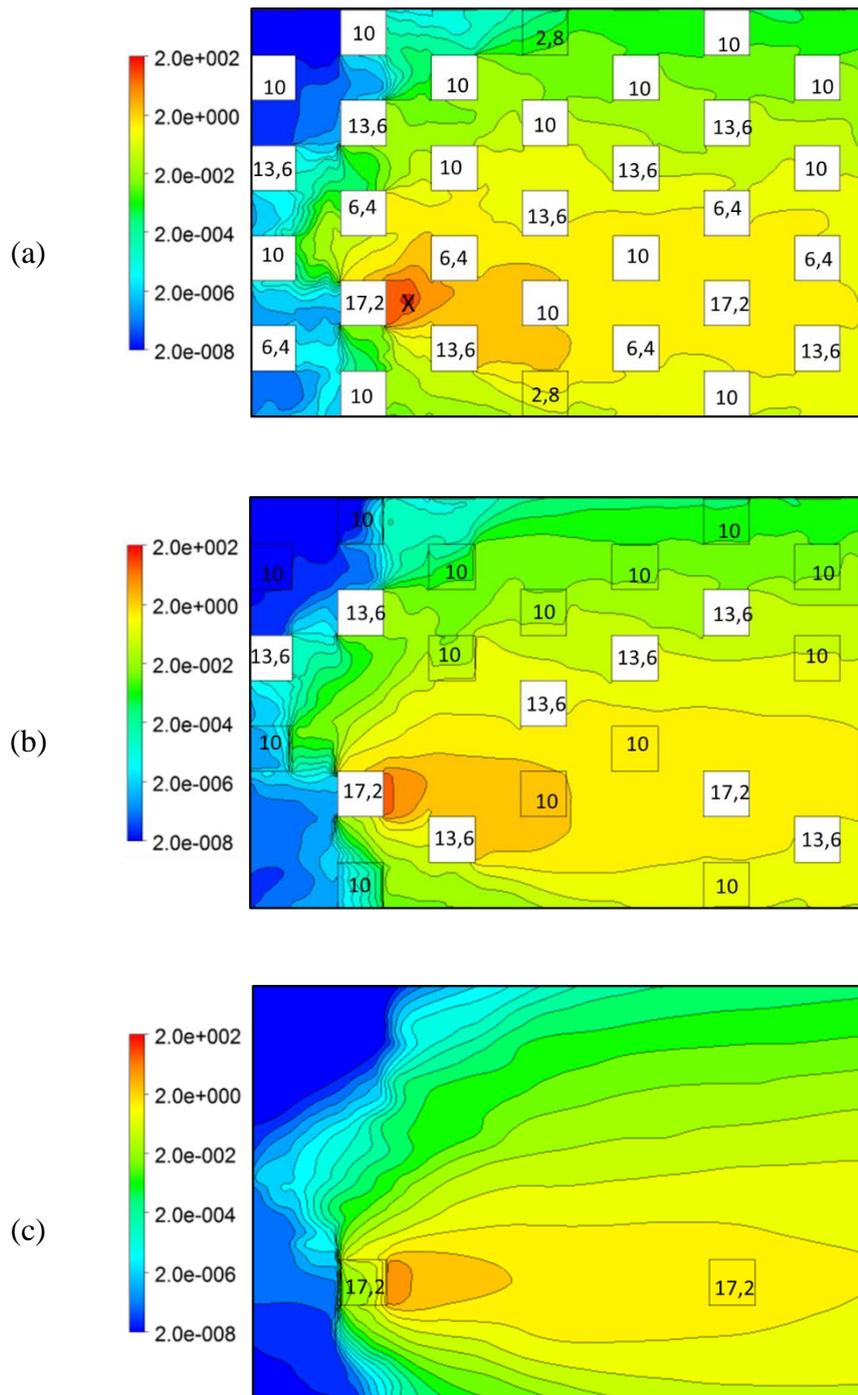


Figura 4.40: Contornos da concentração média nos planos horizontais  $xy$  para um conjunto de prédios de diferentes alturas e escoamento à  $0^\circ$ . (a)  $z/h_m = 0,28$ ; (b)  $z/h_m = 1$  e (c)  $z/h_m = 1,72$ , com fonte localizada atrás do prédio de altura  $0,0172 \text{ m}$  (Fonte 3).  $x$  indica a localização da fonte. É utilizada a escala logarítmica e a concentração é dada em  $kg \text{ kg}^{-1}$ .

Na Figura 4.41 são apresentados os contornos de concentração média nos planos verticais  $xz$  para  $y/h_m = 1$  (Figura 4.41a),  $y/h_m = 2$  (Figura 4.41b) e  $y/h_m = 3$  (Figura 4.41 c), com fonte localizada entre os prédios de alturas  $10\text{ mm}$  e  $17,2\text{ mm}$  (Fonte 1). O plano  $y/h_m = 2$  está na linha de centro da pluma enquanto os planos  $y/h_m = 1$  e  $y/h_m = 3$  estão à direita e à esquerda, respectivamente, da linha de centro da pluma. Verifica-se que a pluma é capturada pelas zonas de recirculação da vizinhança da fonte e ao mesmo tempo os prédios de maior altura irão transportar os poluentes para fora do dossel urbano. Por exemplo, o prédio mais alto ( $17,2\text{ mm}$  de altura) irá promover um efeito de chaminé, fazendo com que o poluente chegue ao topo do dossel de forma mais rápida.

A Figura 4.42 mostra os contornos da concentração média nos planos verticais  $xz$  para  $y/h_m = 3$  (Figura 4.42a),  $y/h_m = 4$  (Figura 4.42b) e  $y/h_m = 5$  (Figura 4.42c), com fonte localizada entre os prédios de alturas  $17,2\text{ mm}$  e  $6,4\text{ mm}$  (Fonte 2). O plano  $y/h_m = 4$  está na linha de centro da pluma enquanto os planos  $y/h_m = 3$  e  $y/h_m = 5$  estão à direita e à esquerda, respectivamente, da linha de centro da pluma. Neste caso a fonte 2 está localizada à montante do prédio da altura  $6,4\text{ mm}$ . Dessa forma, parte da pluma irá passar por cima desse prédio, enquanto no caso da fonte 1 a pluma de poluentes irá contornar o prédio que se situa a jusante da fonte. Esse comportamento gera padrões de dispersão diferentes para essas fontes no interior do dossel urbano. Por outro lado, no topo do prédio mais alto, a pluma de poluentes é similar para ambas as fontes, com a diferença de que a pluma devido à fonte 1 tem maior dispersão para o lado direito enquanto a pluma devido à fonte 2 tem maior dispersão para o lado esquerdo. Isso é devido à localização da fonte, pois a fonte 1 está localizada entre os prédios de alturas  $10\text{ mm}$  e  $17,2\text{ mm}$  enquanto a fonte 2 localiza-se entre os prédios de alturas  $17,2\text{ mm}$  e  $6,4\text{ mm}$ . O prédio mais baixo,  $6,4\text{ mm}$  de altura, não irá promover tanto a dispersão quanto os outros prédios mais altos. A pluma de poluentes sofrerá mais influência dos prédios mais altos do que dos mais baixos.

A Figura 4.43 apresentam os contornos da concentração média em planos verticais  $xz$  para a fonte 3, que localiza-se atrás do prédio de altura  $17,2\text{ mm}$ . Os contornos de concentração média nos planos à direita da linha central da pluma (Figura 4.43a) mostram que uma pequena parte da pluma é capturada pelas recirculações localizadas na frente do prédio de altura  $13,6\text{ mm}$  e à esquerda da linha central da pluma (Figura 4.43c) também uma pequena parte do poluente é capturada pelas recirculações localizadas na parte de

trás do prédio de 6,4  $m$ . Pode ser visto que o poluente liberado nesta região será transportado prioritariamente para cima e em seguida sairá do dossel urbano. Isso é devido ao forte movimento vertical existente na parte de trás desse prédio.

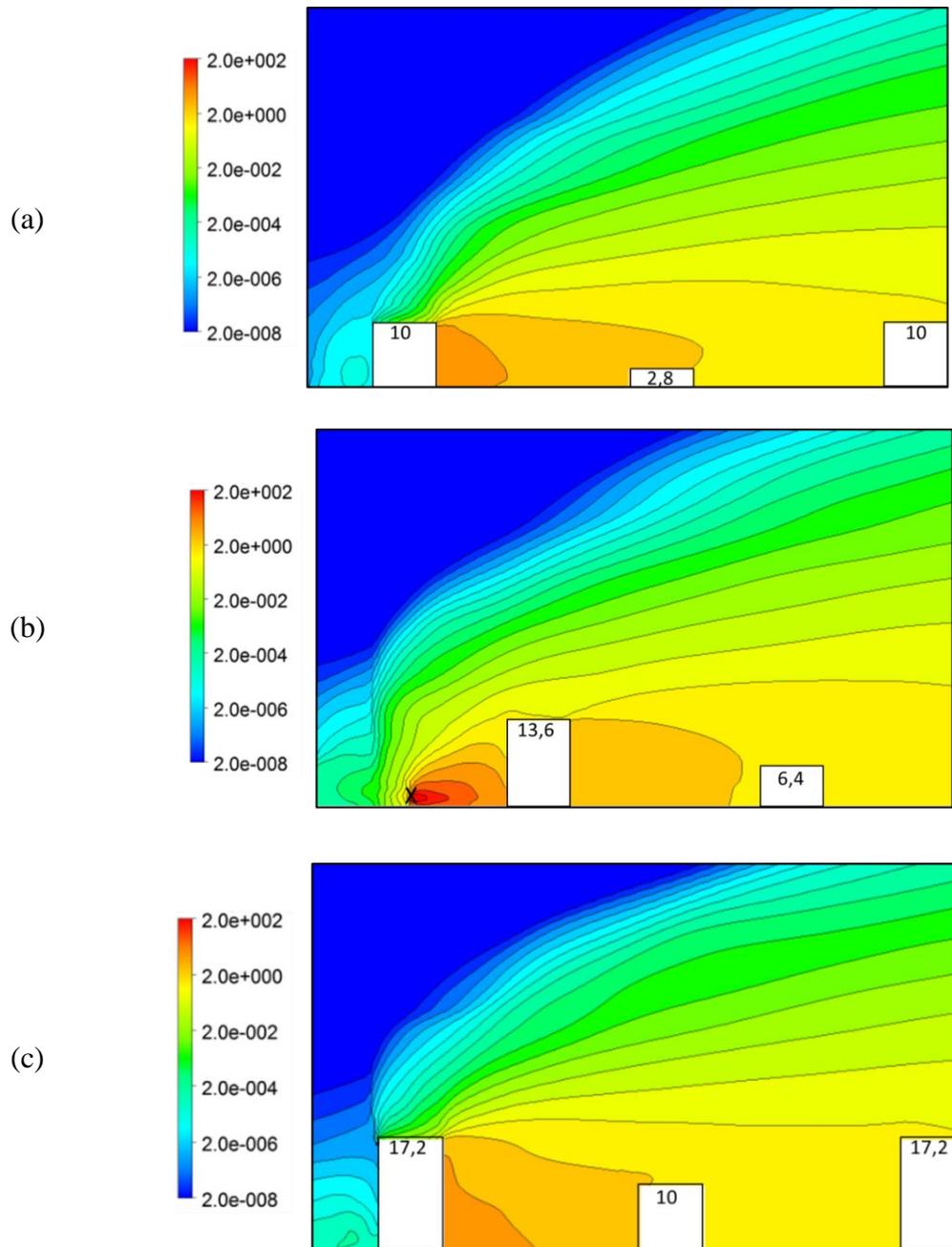


Figura 4.41: Contornos da concentração média nos planos verticais  $xz$  para um conjunto de prédios de diferentes alturas e escoamento à  $0^\circ$ . (a)  $y/h_m = 1$  (b)  $y/h_m = 2$  e (c)  $y/h_m = 3$ , com fonte localizada entre os prédios de alturas 10  $mm$  e 17,2  $mm$  (Fonte 1).  $x$  indica a localização da fonte. É utilizada a escala logarítmica e a concentração é dada em  $kg\ kg^{-1}$ .

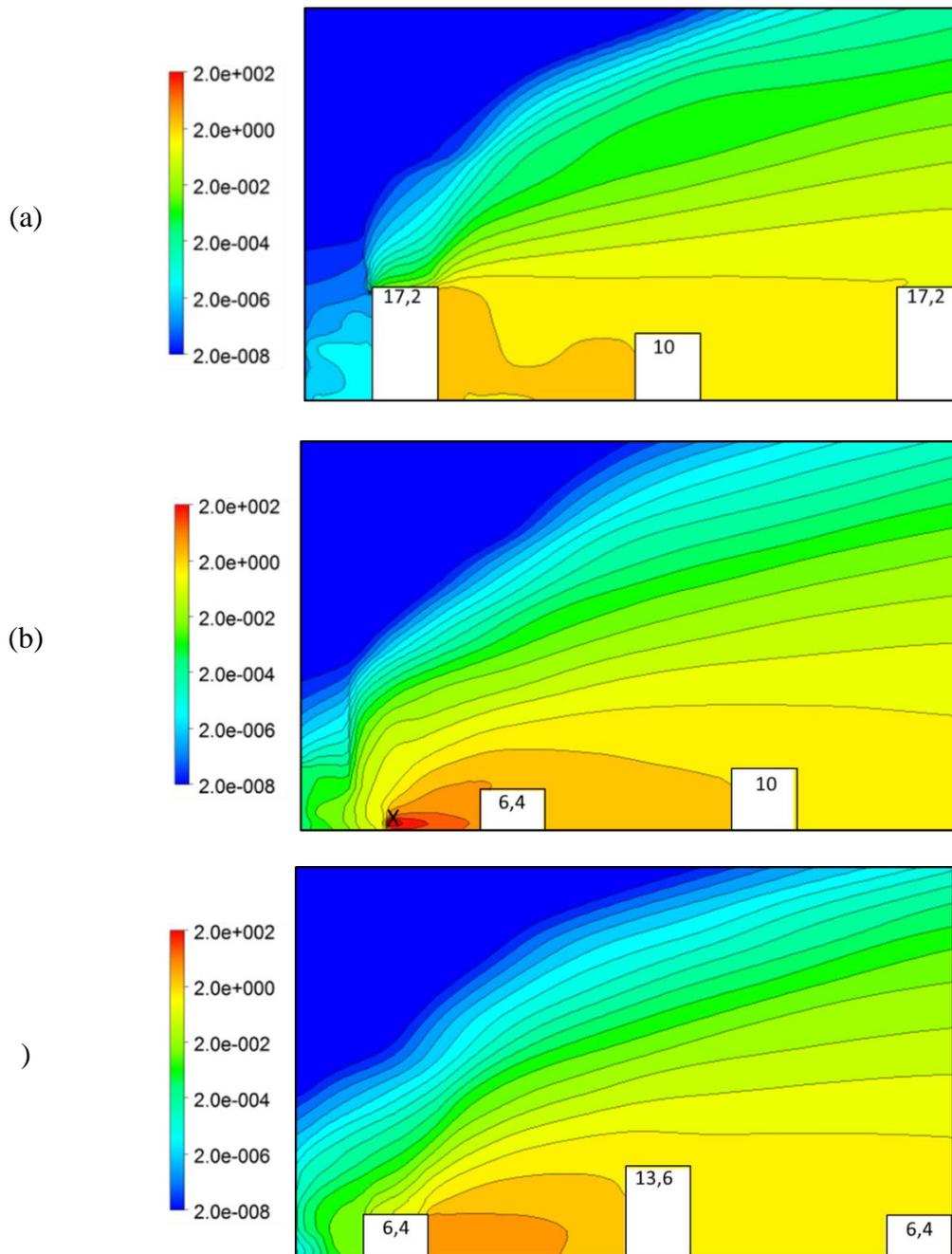


Figura 4.42: Contornos da concentração média nos planos verticais  $xz$  para um conjunto de prédios de diferentes alturas e escoamento à  $0^\circ$ . (a)  $y/h_m = 3$  (b)  $y/h_m = 4$  e (c)  $y/h_m = 5$ , com fonte localizada entre os prédios de alturas  $17,2\text{ mm}$  e  $6,4\text{ mm}$  (Fonte 2).  $x$  indica a localização da fonte. É utilizada a escala logarítmica e a concentração é dada em  $kg\text{ kg}^{-1}$ .

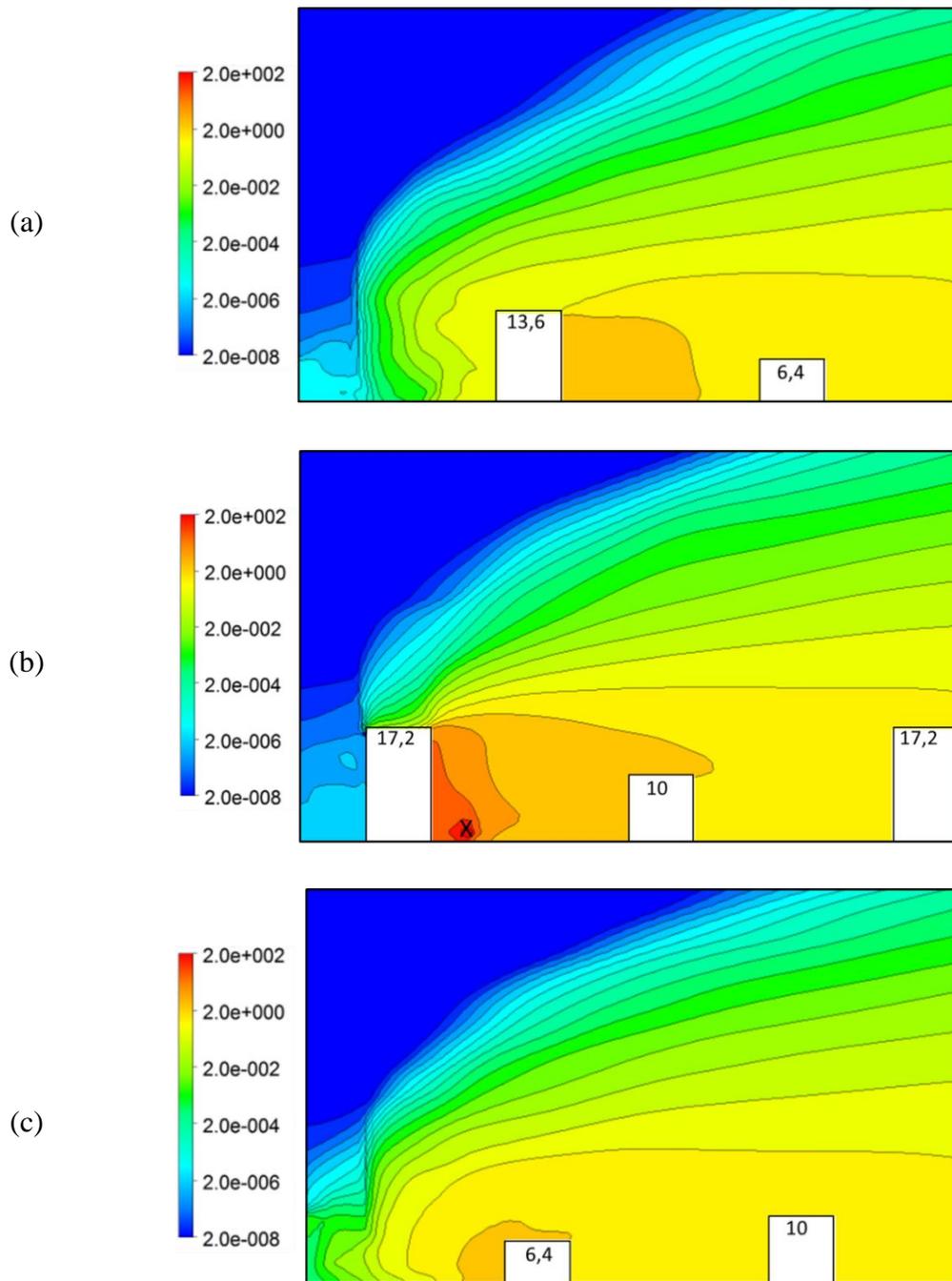


Figura 4.43: Contornos da concentração média nos planos verticais  $xz$  para um conjunto de prédios de diferentes alturas e escoamento à  $0^\circ$ . (a)  $y/h_m = 2$  (b)  $y/h_m = 3$  e (c)  $y/h_m = 4$ , com fonte localizada atrás do prédio de altura  $17,2 \text{ mm}$  (Fonte 3).  $x$  indica a localização da fonte. É utilizada a escala logarítmica e a concentração é dada em  $kg \text{ kg}^{-1}$ .

Em todos os casos a fonte de poluentes está localizada na vizinhança do prédio mais alto ( $z = 17,2 \text{ mm}$ ). Dessa forma, um comportamento comum encontrado na pluma de poluentes para todas as fontes é que, a pluma é capturada pela recirculação localizada

atrás do prédio mais alto e o poluente será transportado para fora do dossel urbano no topo desse prédio. Pode-se ressaltar a formação de uma fonte secundária em ambos os casos no topo do prédio mais alto (veja Figura 4.37c, Figura 4.39c e Figura 4.40c). Com isso conclui-se que, se a fonte estiver localizada em uma vizinhança do prédio mais alto, uma fonte secundária surgirá no topo desse prédio. Observa-se também que a amplitude da pluma é maior para a fonte 2. Neste caso, um prédio de menor altura ( $z = 6,4 \text{ mm}$ ) localiza-se do lado esquerdo, fazendo com que a pluma se disperse mais para este lado.

### 4.2.3 Transporte de massa de poluente no topo do dossel urbano

Nesta seção são apresentados os gráficos do fluxo de massa de um escalar através da superfície localizada a uma altura de  $10 \text{ mm}$ . Essa é a altura média dos prédios, que foi calculada tomando as alturas de todos os 64 prédios do domínio. Na Figura 4.44 é possível ver que os prédios têm alturas que variam de  $2,8 \text{ mm}$  a  $17,2 \text{ mm}$ . A Figura 4.44 também mostra onde os fluxos de massa do poluente foram calculados de acordo com a localização da fonte.

O fluxo total de massa do escalar é igual a soma dos fluxos médio e turbulento, como mostrado na equação 4.1. Neste caso, os fluxos são calculados da mesma forma como foram calculados os fluxos nas simulações de DNS.

A Figura 4.45 mostra os perfis dos fluxos verticais de massa do escalar total, advectivo e turbulento através do plano  $z/h_m = 1$  para a fonte de poluentes localizada entre os prédios de alturas  $10 \text{ mm}$  e  $17,2 \text{ mm}$  (Fonte 1). Pode ser visto na Figura 4.45a que o maior valor do fluxo através dessa superfície acontece atrás do prédio mais alto (localizado do lado esquerdo da fonte). Isso pode ser explicado pelo fato de que grande parte do poluente é capturada pela recirculação atrás desse prédio, sendo transportada para o topo do prédio.

Na linha central de pluma, o maior valor do fluxo total ocorre atrás do prédio à jusante da fonte. Parte do poluente liberado irá contornar esse prédio e será capturado pela zona de recirculação ali localizada. O fluxo total na linha central da pluma é próximo de zero na caixa da fonte e na caixa a jusante (na frente do prédio de  $13,6 \text{ mm}$  de altura). De fato, a maior parte do poluente liberada nesta caixa é transportada para frente e em seguida é capturada pelas recirculações dos prédios vizinhos. Na caixa localizada atrás do prédio

de 13,6 mm de altura, logo a jusante da fonte, o fluxo tem um aumento e diminui em seguida ficando muito próximo de zero.

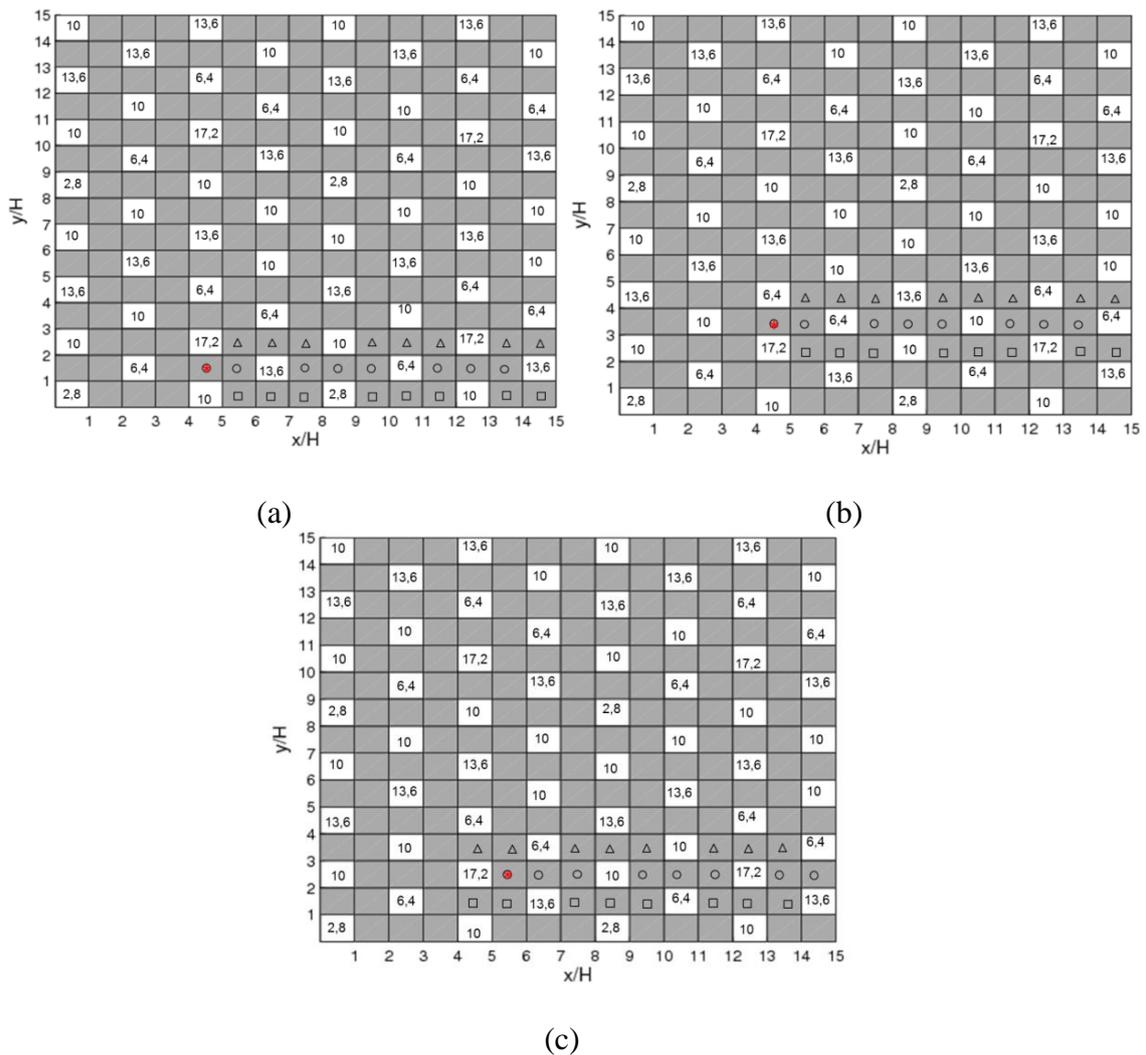


Figura 4.44: Locais onde os fluxos foram calculados de acordo com o símbolo e localização da fonte: (a) fonte 1, (b) fonte 2 e (c) fonte 3. \* representa o local da fonte e os números no topo dos quadrados brancos indicam as suas alturas em milímetros.

É importante ressaltar que os fluxos advectivo e turbulento tem a mesma ordem de grandeza. Isso indica que ambos os efeitos são importantes nesta altura. De fato, em alguns pontos o fluxo advectivo é significativamente maior do que o fluxo turbulento, notadamente nas regiões de recirculação a jusante do prédios mais altos. Na linha central da pluma observa-se que na caixa atrás do prédio a jusante da fonte, o fluxo advectivo é positivo. Indicando que o poluente está saindo do dossel pelos efeitos médios. Por outro lado, o fluxo turbulento é negativo, neste mesmo ponto, indicando que o poluente está

entrando no dossel pelos efeitos turbulentos. Nota-se que a uma distância de  $5h_m$  a jusante da fonte o fluxo é zero em ambos os locais, porém a partir desse ponto o fluxo varia em torno de zero.

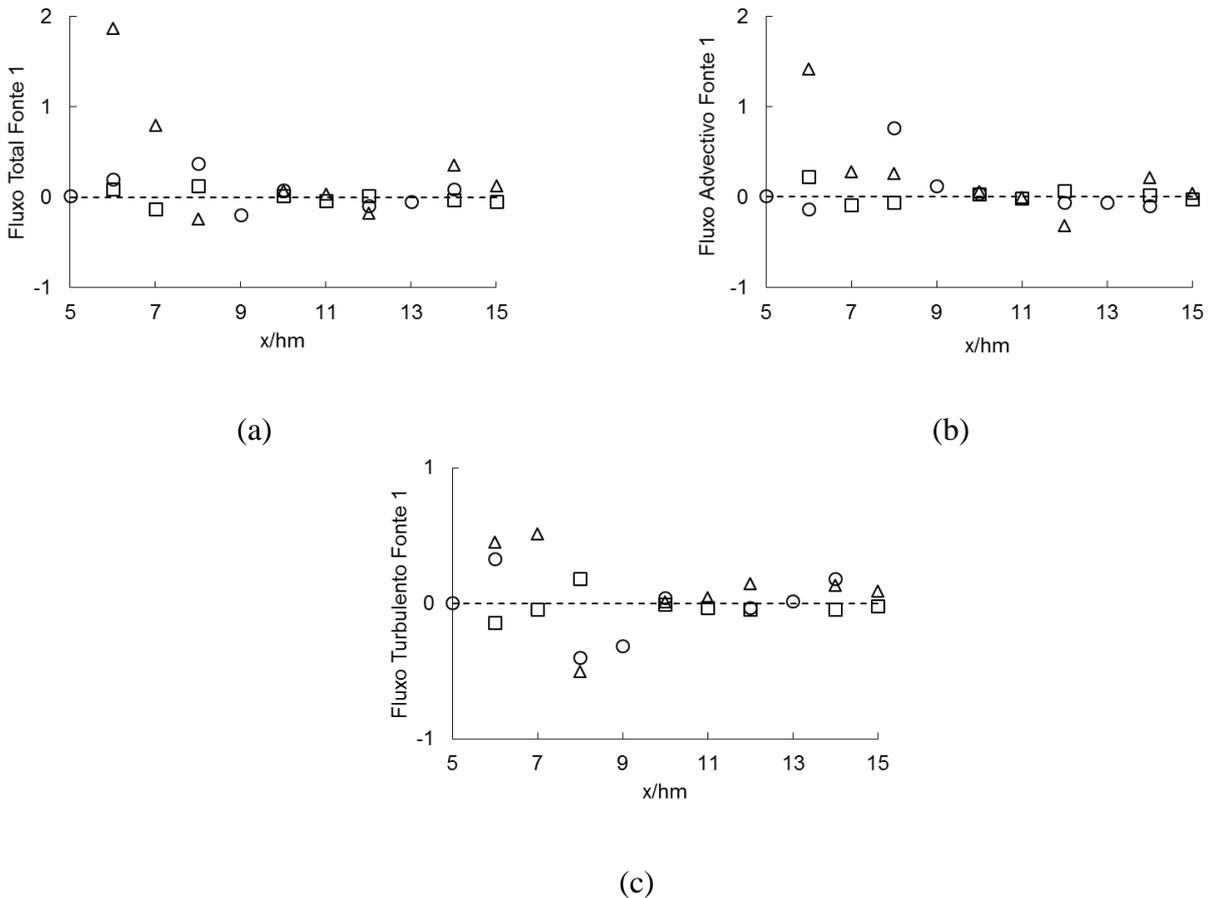


Figura 4.45: Perfis dos fluxos verticais (a) Total, (b) Advectivo e (c) Turbulento através do plano  $z/h_m = 1$ , considerando um conjunto de prédios com diferentes alturas, escoamento à  $0^\circ$  e fonte localizada entre os prédios de alturas  $10\text{ mm}$  e  $17,2\text{ mm}$  (Fonte 1). Os locais onde os fluxos foram calculados de acordo com o símbolo são mostrados na Figura 4.44 (a).

Quando a fonte 2, localizada entre os prédios de alturas  $17,2\text{ mm}$  e  $6,4\text{ mm}$ , é considerada, os fluxos verticais total, advectivo e turbulento através do plano  $z/h_m = 1$  (Figura 4.46) tem comportamento similar, em alguns pontos, com os fluxos da fonte 1. Na Figura 4.46 (a) é possível ver que o fluxo vertical total tem seu maior valor atrás do prédio localizado à direita da fonte, que é o prédio de maior altura ( $17,2\text{ mm}$ ). Até uma distância de  $6h_m$  a jusante da fonte o fluxo turbulento é positivo, indicando que o material está saindo de dentro do dossel devido os efeitos turbulentos. A uma distância de  $3h_m$  a

Justante da fonte verifica-se que o fluxo advectivo é negativo na linha central da pluma e na linha à esquerda da linha central da pluma. Indicando que o poluente está entrando no dossel urbano devido os efeitos advectivos. Ao mesmo tempo o fluxo turbulento é positivo neste ponto, dessa forma o poluente estaria saindo do dossel urbano. Como a ordem de grandeza desses fluxos é a mesma um efeito anularia o outro, fazendo com que o fluxo total seja muito próximo de zero neste ponto. De fato, na linha central da pluma é exatamente isso que acontece. Porém, nas linhas à esquerda e à direita, o fluxo total é negativo e positivo, respectivamente.

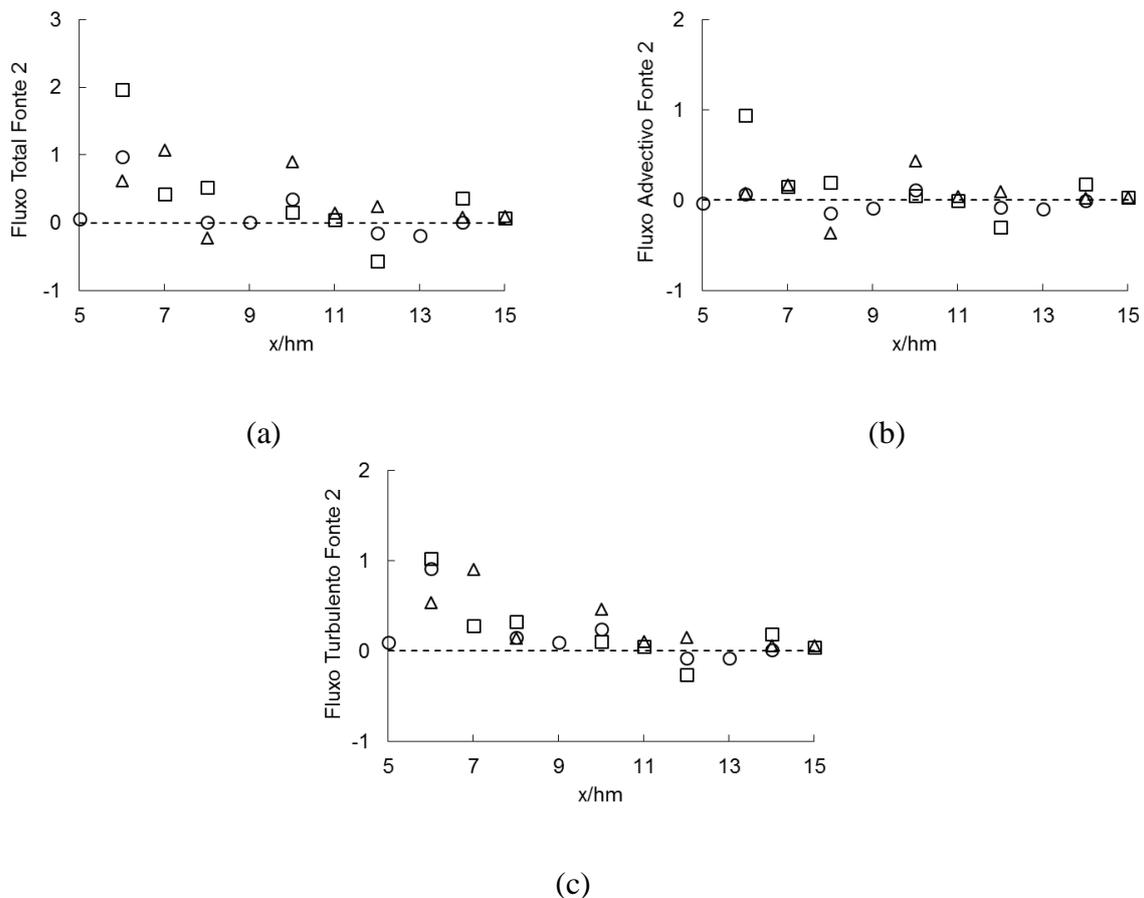


Figura 4.46: Perfis dos fluxos verticais (a) Total, (b) Advectivo e (c) Turbulento através do plano  $z/h_m = 1$ , considerando um conjunto de prédios com diferentes alturas, escoamento à  $0^\circ$  e fonte localizada entre os prédios de alturas  $17,2\text{ mm}$  e  $6,4\text{ mm}$  (Fonte 2). Os locais onde os fluxos foram calculados de acordo com o símbolo são mostrados na Figura 4.44 (b).

É interessante notar que a presença de prédios mais elevados, além de contribuir para o transporte de poluentes para fora do dossel próximo à fonte, pode gerar entrada de massa

no dossel. Ao observar os fluxos de massa na vizinhança do prédio de  $17,2\text{ mm}$  localizado em  $x/h_m = 13$  é possível perceber que existe um fluxo de massa negativo a montante do prédio e um positivo a jusante do prédio, ambos mais relacionados ao transporte advectivo do escoamento médio. Este efeito está provavelmente relacionado à grande recirculação formada à montante do prédio, conforme indicado pelas linhas de corrente na Figura 4.36: Linhas de corrente do escoamento médio nos planos verticais  $xz$  para um conjunto de prédios de diferentes alturas e escoamento à  $0^\circ$ . (a)  $y/h_m = 1$  (b)  $y/h_m = 2$  e (c)  $y/h_m = 3$ . Este comportamento também pode ser observado para o prédio com altura  $13,6\text{ mm}$  localizado em  $x/h_m = 6$ .

A Figura 4.47 apresentam os perfis dos fluxos verticais de massa do escalar para a fonte 3, através do plano  $z/h_m = 1$ . A fonte 3 foi posicionada atrás do prédio de  $17,2\text{ mm}$  (veja Figura 4.44c). Neste caso, o fluxo no local da fonte é mais alto do que nos outros pontos. Esse valor alto do fluxo no local da fonte é porque neste ponto existem zonas de recirculação que fazem com que o poluente fique retido neste ponto por mais tempo e em seguida é transportado para o topo do prédio, saindo do dossel urbano. Nos outros pontos o fluxo tem uma variação em torno de zero. Indicando que em alguns pontos o poluente está saindo do dossel urbano e em outros está entrando no dossel. A ordem de grandeza dos fluxos advectivo e turbulento é a mesma para esta fonte, indicando que ambos os efeitos contribuem para o processo de troca de massa do poluente através da superfície localizada a uma altura de  $z/h_m = 1$ .

Enquanto no caso de altura regular havia uma clara tendência de saída de poluentes do dossel mais próximo à fonte e entrada em regiões mais afastadas, no caso de altura não uniforme observa-se que as diferenças de altura entre os prédios possuem um papel crucial na dinâmica do processo. Sendo o fluxo advectivo, gerado pelos prédios mais elevados, um fator significativamente importante para o transporte de massa para dentro e para fora do dossel.

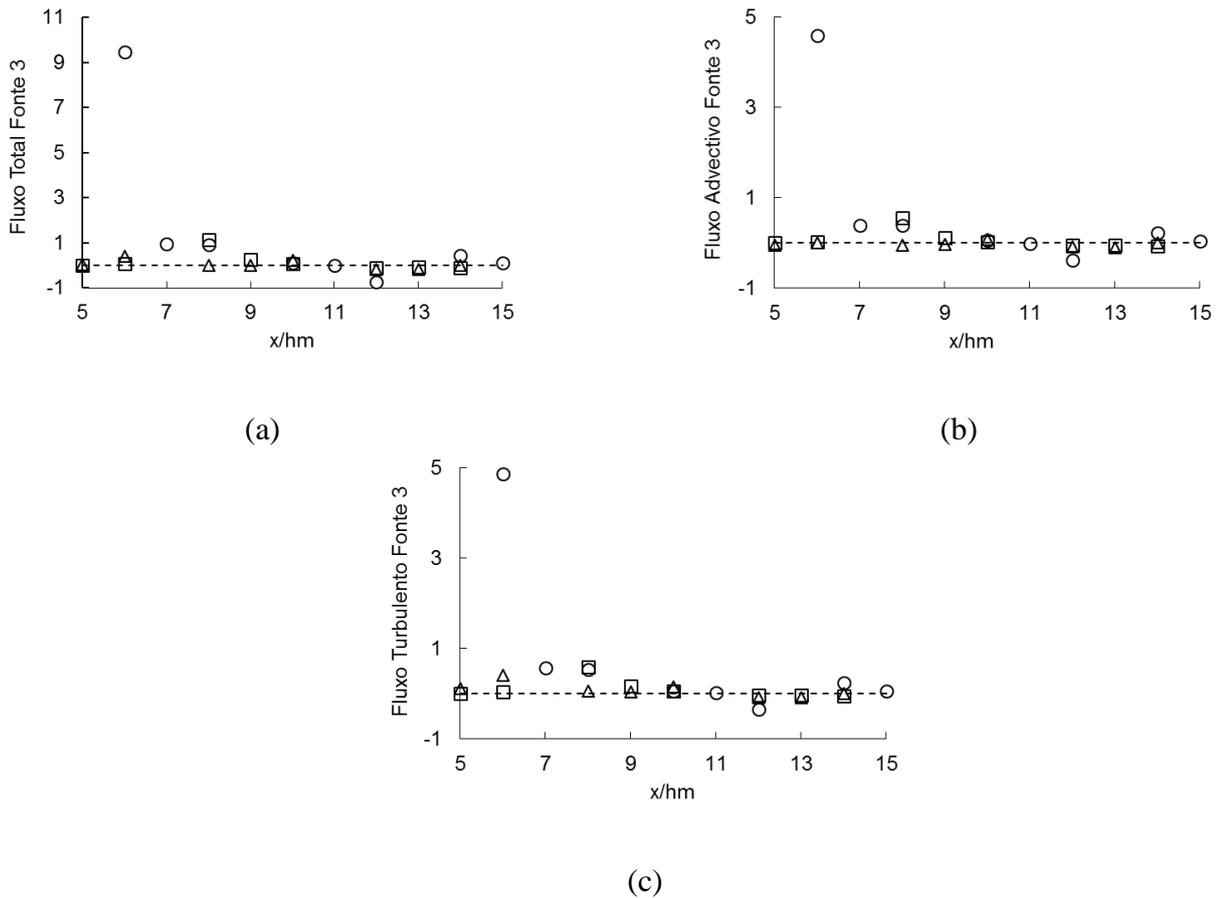


Figura 4.47: Perfis dos fluxos verticais (a) Total, (b) Advectivo e (c) Turbulento através do plano  $z/h_m = 1$ , considerando um conjunto de prédios com diferentes alturas, escoamento à  $0^\circ$  e fonte localizada atrás do prédio de altura  $17,2 \text{ mm}$  (Fonte 3). Os locais onde os fluxos foram calculados de acordo com o símbolo são mostrados na Figura 4.44 (c).

#### 4.2.4 Parametrização da transferência de massa de poluente no topo do dossel urbano

Nesta seção são apresentados os resultados para a velocidade de transferência usando dados de LES e algumas parametrizações. Conforme discutido anteriormente, o transporte de poluente através da superfície localizada na altura média dos prédios, ou seja,  $z/h_m = 1$ , é influenciada tanto pelos efeitos advectivos quanto pelos efeitos turbulentos. Dessa forma, a velocidade de transferência é calculada através da expressão dada na Equação 4.2, ou seja, considerando ambos os efeitos advectivos e turbulentos. Na Equação 4.2,  $A$  é a área da face da caixa (igual a 1),  $C_{acima}$  é a concentração média acima do plano  $z/h_m = 1$  e  $C_{interior}$  é a concentração média abaixo do plano  $z/h_m = 1$ .

Como nos dados de DNS, a velocidade de transferência foi calculada em unidades repetidas conforme mostra a Figura 4.48, onde também são apresentadas essas unidades repetidas e as respectivas localizações das fontes. As unidades repetidas foram escolhidas de acordo com a localização da pluma de poluentes. Cada unidade repetida é composta de quatro caixas: um prédio, uma caixa atrás de um prédio, uma caixa na frente de um prédio e uma caixa entre dois prédios.

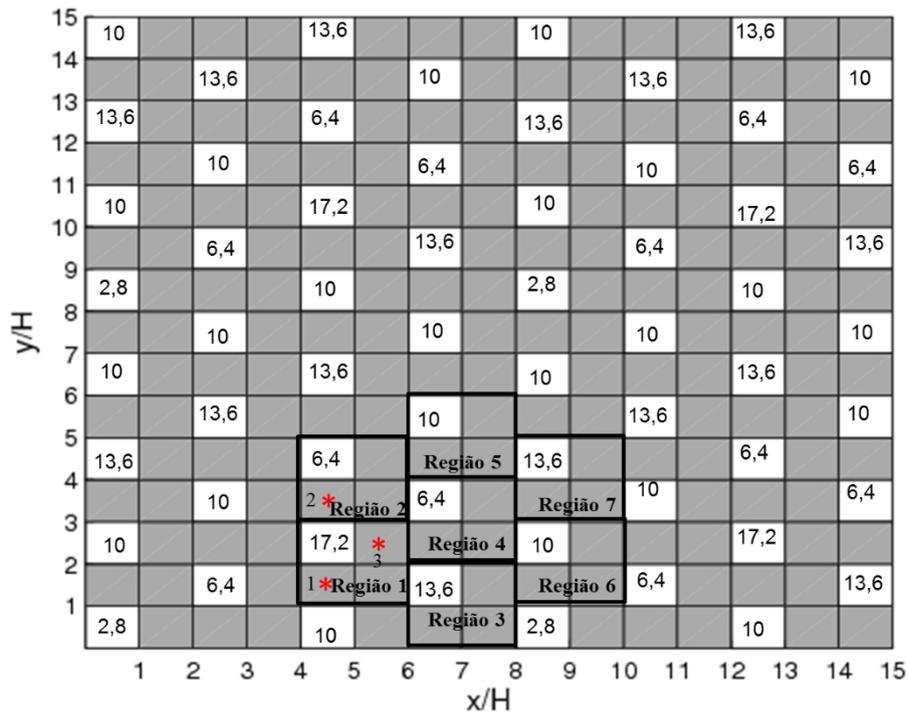
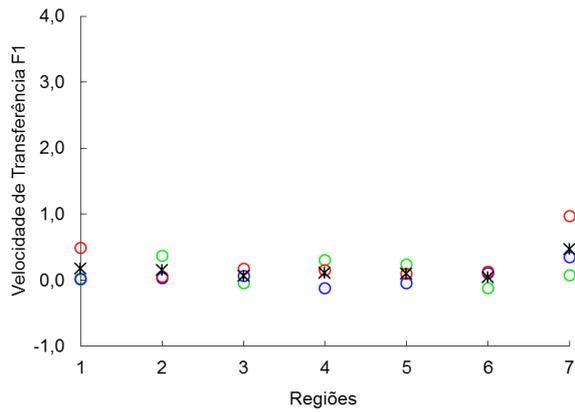
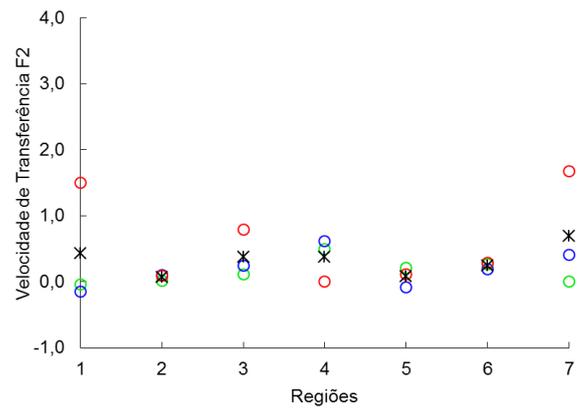


Figura 4.48: Unidades repetidas onde a velocidade de transferência foi calculada para um conjunto de prédios de diferentes alturas e escoamento à 0°. (\*) representa a localização das fontes e os números no topo dos quadrados brancos indicam as suas alturas em milímetros.

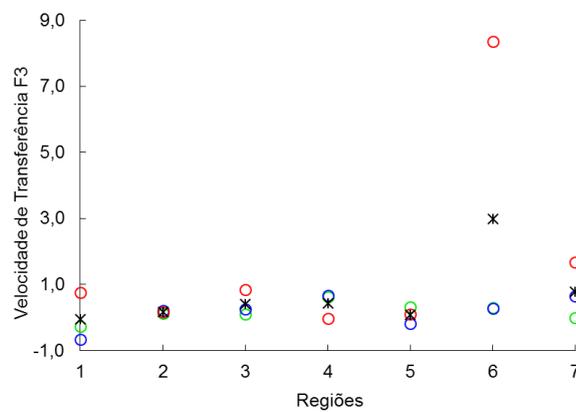
A Figura 4.49 mostra a velocidade de transferência para um conjunto de prédios de diferentes alturas e escalonados, com escoamento à 0° e três diferentes localizações da fonte. A velocidade de transferência é calculada atrás do prédio, entre dois prédios e na frente do prédio para cada uma das sete unidades repetidas (Figura 4.48). A velocidade de transferência média para cada unidade repetida também é apresentada na Figura 4.49.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.49: Velocidade de transferência a uma altura de  $z/h_m = 1$  para diferentes tipos de caixas de cada unidade repetida considerando um conjunto de prédios de diferentes alturas e escoamento à  $0^\circ$ . (a) Fonte localizada entre os prédios de alturas  $10\text{ mm}$  e  $17,2\text{ mm}$  (Fonte 1); (b) fonte localizada entre os prédios de alturas  $17,2\text{ mm}$  e  $6,4\text{ mm}$  (Fonte 2) e (c) fonte localizada atrás do prédio de altura  $17,2\text{ mm}$  (Fonte 3). ( $\circ$ ) representa a velocidade de transferência atrás do prédio, ( $\circ$ ) representa a velocidade de transferência na frente do prédio, ( $\circ$ ) representa a velocidade de transferência entre dois prédios e (\*) representa a velocidade de transferência média para cada unidade repetida.

A Figura 4.49a apresenta os valores da velocidade de transferência para a fonte 1 para as três diferentes caixas que compõem cada unidade repetida e uma média de cada unidade. A média da velocidade de transferência atrás dos prédios é igual a  $0,29$  enquanto entre os

prédios a média é de 0,11 e em frente aos prédios é de 0,054 (veja Tabela 4.3). Ou seja, na média a velocidade de transferência atrás dos prédios é maior do que nas outras caixas.

A velocidade de transferência considerando a fonte 2 é apresentada na Figura 4.49b. A fonte 2 localiza-se na região 2, entre os prédios de alturas 17,2 mm e 6,4 mm. Conforme a Tabela 4.3, a média da velocidade de transferência atrás dos prédios é maior do que nas outras caixas. Na região 1 a velocidade de transferência atrás do prédio é positiva enquanto a velocidade entre os prédios e na frente do prédio é negativa. Neste caso, apesar do fluxo ser positivo, teremos velocidades negativas, pois, a diferença entre as concentrações dentro e acima do dossel é negativa, ou seja, a concentração dentro da caixa de 10 mm de altura que está completamente dentro do dossel é menor do que da caixa de mesma altura acima dela. Esse comportamento é influenciado pela altura do prédio mais alto localizado à direita da fonte que tem a tendência de levar material para cima do dossel. Na região 5 a velocidade de transferência também é negativa na caixa atrás do prédio. Neste caso, o fluxo é negativo, indicando que está entrando material dentro do dossel. Quando os perfis médios da velocidade de transferência da fonte 2 são comparados com a fonte 1, percebe-se uma maior variação dos dados da velocidade de transferência em relação à média geral para a fonte 2.

Na Figura 4.49c são apresentados os valores de velocidade de transferência para a fonte 3. Nas caixas entre prédios e na frente do prédio, a velocidade de transferência é similar neste caso. Entretanto, nas caixas localizadas atrás do prédio é possível observar um valor médio da velocidade de transferência bastante elevado (veja Tabela 4.3). Observe que isto acontece pois na região 6 a velocidade de transferência atrás do prédio é muito elevada. Isso ocorre, pois, a diferença de concentração é uma ordem de grandeza menor do que o fluxo total vertical de massa do escalar para esta caixa.

O cálculo de  $U_T$  na forma da equação 4.2 é relevante somente para os casos onde o transporte por difusão turbulenta é dominante. Uma vez que no ponto indicado o transporte advectivo é significativamente maior que o transporte turbulento e a diferença de concentração que aparece no denominador da equação 4.2, é muito baixo, o valor calculado de  $U_T$  é pouco representativo.

Pode-se concluir nesta seção que não existe um padrão bem definido de comportamento para a velocidade de transferência nestas regiões repetidas. Apesar de existirem algumas

semelhanças, não é possível determinar um padrão no cálculo da velocidade de transferência, pois pelo fato dos prédios terem alturas diferentes e randômicas, isso acaba acarretando um escoamento com dispersão de poluentes muito complexos (XIE *et al.*, 2008), não sendo possível estabelecer critérios claros de semelhança ou o motivo da semelhança.

Tabela 4.3: Valores médios da velocidade de transferência para cada tipo de caixa dentro das unidades repetidas usando dados de LES.

Fontes	Locais onde as velocidades foram calculadas		
	Entre prédios	Em frente ao prédio	Atrás do prédio
Fonte 1	0,11	0,05	0,29
Fonte 2	0,15	0,19	0,63
Fonte 3	0,17	0,17	1,70

Com o objetivo de analisar a precisão das parametrizações disponíveis na literatura para a velocidade de transferência no topo do dossel urbano para prédios de alturas diferentes, a Figura 4.50, a Figura 4.51 e a Figura 4.52 apresentam as comparações dos resultados da LES com as parametrizações empregadas. A Tabela 4.4 sumariza as parametrizações analisadas.

A Figura 4.50 apresenta uma comparação entre as diferentes parametrizações da velocidade de transferência e os dados de LES para os três diferentes tipos de caixas em cada região a uma altura de  $z/h_m = 1$ , considerando a fonte 1. Na Figura 4.50a, na Figura 4.50b e na Figura 4.50c são apresentados os dados calculados para caixas entre os prédios, na frente dos prédios e atrás dos prédios, respectivamente, para cada região. Analisando separadamente cada região (entre prédios, na frente do prédio e atrás do prédio) de cada unidade repetida não é possível identificar um padrão nestes locais. Porém, é possível verificar que em geral as parametrizações funcionam melhor para a região entre prédios (veja Tabela 4.3). A parametrização de Soulhac *et al.*(2011) com  $\sigma_w$  calculado utilizando os dados de LES é a que mais se aproxima desse valor médio das velocidades de transferência nas caixas localizadas entre prédios. Nota-se que na região atrás dos prédios,

nas unidades repetidas de 2 a 6 as parametrizações estão bem próximas dos valores das velocidades de transferência calculada usando dados de LES. Contudo, ao tomar uma média das 7 regiões repetidas isso não acontece, pois nas regiões 1 e 7 as velocidades de transferência são elevadas, fazendo com que na média geral da velocidade de transferência nas caixas localizadas atrás dos prédios, os valores das parametrizações sejam mais afastados dos dados de LES.

Tabela 4.4: Parametrizações para a velocidade de transferência usando dados de LES.

Parametrização	Fórmula para $U_T$
SOULHAC01 (SOULHAC <i>et al.</i> , 2011)	$U_T = \frac{\sigma_w}{\sqrt{2\pi}}$ , onde $\sigma_w$ foi calculado usando dados de LES.
SOULHAC02 (SOULHAC <i>et al.</i> , 2011)	$U_T = \frac{\sigma_w}{\sqrt{2\pi}}$ , onde $\sigma_w$ foi calculado pela equação 2.4.
B&B01 (BENTHAM; BRITTER, 2003)	$\frac{U_T}{u^*} = \left(\frac{U_{ref} - U_c}{u^*}\right)^{-1}$ , onde $U_{ref}$ e $U_c$ são calculadas usando dados de LES.
B&B02 (BENTHAM; BRITTER, 2003)	$\frac{U_T}{u^*} = \left(\frac{U_{ref} - U_c}{u^*}\right)^{-1}$ , onde $U_{ref}$ é calculada usando dados de LES e $U_c$ é calculada pela expressão $\frac{U_c}{u^*} = \left[\frac{\lambda_f}{2}\right]^{-1/2}$ .

A Figura 4.51 apresenta uma comparação entre as diferentes parametrizações da velocidade de transferência e os dados de LES para os três diferentes tipos de caixas em cada região a uma altura de  $z/h_m = 1$  para a fonte 2. Na Figura 4.51a, na Figura 4.51b e na Figura 4.51c são apresentados os dados calculados para caixas entre os prédios, para as caixas em frente aos prédios e para as caixas atrás dos prédios, respectivamente, para cada região. Altos valores da velocidade de transferência são observados em algumas regiões. Por exemplo, nas regiões 1, 3 e 7 a velocidade de transferência atrás do prédio é mais elevada do que nas demais regiões. Enquanto nas outras regiões os valores variam de 0,05 até 0,3, nestas regiões a velocidade fica acima de 0,7 chegando a 1,7. Nas caixas entre prédios e na frente dos prédios o maior valor da velocidade de transferência acontece na região 4. Tomando uma média das velocidades de transferência calculada usando dados de LES, observa-se que na região entre prédios essa média é 0,15 e na região na

frente do prédio a média é 0,19, mostrando que as parametrizações se aproximam mais desses valores nestas regiões do que na região atrás do prédio, pois a média da velocidade de transferência nas caixas localizadas atrás do prédio é mais elevada devido aos altos valores da velocidade de transferência nas regiões 1, 3 e 7.

A Figura 4.52 apresenta uma comparação entre as diferentes parametrizações da velocidade de transferência e os dados de LES para os três diferentes tipos de caixas em cada região a uma altura de  $z/h_m = 1$  para a fonte 3. Na Figura 4.52a, na Figura 4.52b e na Figura 4.52c são apresentados os dados calculados para caixas entre os prédios, para as caixas em frente aos prédios e para as caixas atrás dos prédios, respectivamente, para cada região. A velocidade de transferência calculada entre prédios e na frente dos prédios tem uma média de aproximadamente 0,16, que é um valor razoavelmente próximo das parametrizações. Entretanto, a velocidade de transferência média atrás dos prédios é extremamente elevada, em torno de 1,7, pois o valor da velocidade na região 6 na caixa atrás do prédio é elevada (na Figura 4.52c não é mostrado esse valor).

Em geral é possível identificar que na região entre os prédios as parametrizações dão melhores resultados independentemente da fonte. Por outro lado, na região atrás dos prédios os valores da velocidade de transferência são mais elevados e dessa forma as parametrizações não concordam de forma satisfatória com os valores obtidos dos dados de LES. Os altos valores da velocidade de transferência nas caixas localizadas atrás dos prédios podem ser explicados devido à intensa movimentação vertical que acontece nessas regiões, fazendo com que o poluente seja levado para a parte de cima do dossel e assim a diferença de concentração entre o interior e acima do dossel será pequena, levando a altos valores da velocidade de transferência.

É importante ressaltar que na formulação da parametrização de Soulhac *et al.* (2011) uma das hipóteses é que os fluxos no topo do dossel urbano são dominados pelos efeitos turbulentos. Porém, para esta configuração de prédios de diferentes alturas, tanto os efeitos advectivos quanto turbulentos são importantes na altura em que as velocidades de transferência foram calculadas, ou seja,  $z = 10 \text{ mm}$ . Dessa forma não é possível dizer se essa parametrização, em particular, tem um bom desempenho, pois os fenômenos físicos que ela considera não são os mesmos que acontecem para esta configuração.

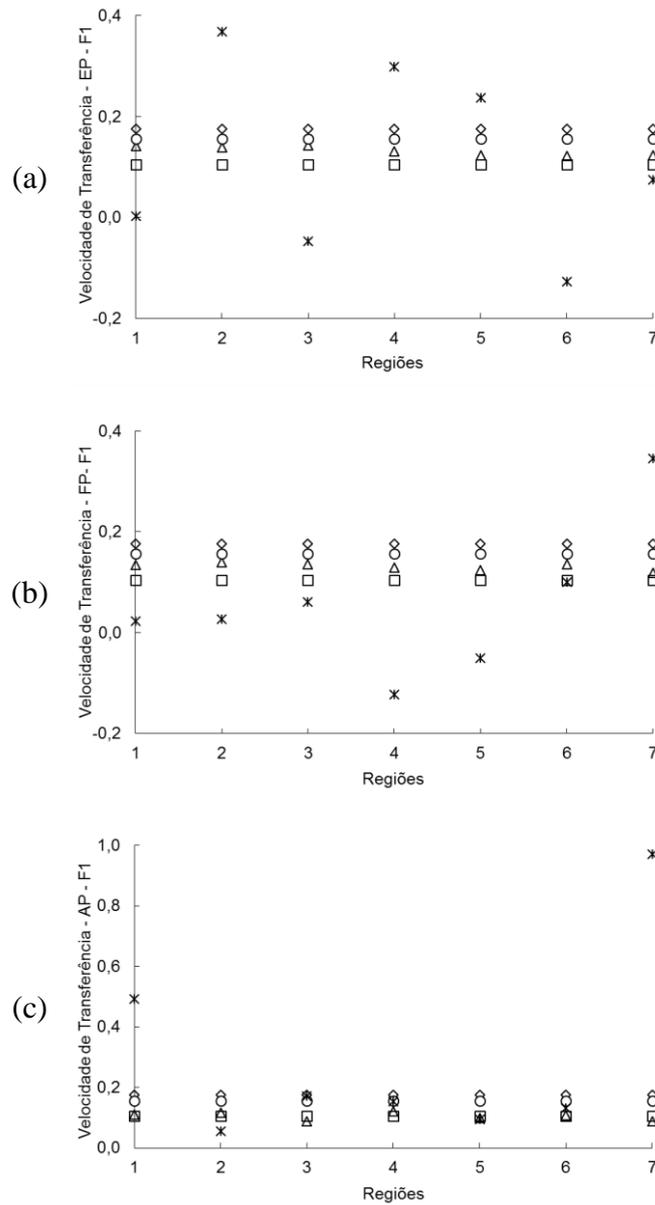


Figura 4.50: Velocidade de transferência calculada nas regiões (a) entre prédios (EP); (b) na frente do prédio (FP) e (c) atrás do prédio (AP) a uma altura de  $z/h_m = 1$ , para um conjunto de prédios de diferentes alturas, escoamento à  $0^\circ$  e fonte 1. (\*) representa velocidade de transferência média nas unidades repetidas usando dados de LES; ( $\Delta$ ) representa a parametrização de SOULHAC01; ( $\diamond$ ) representa a parametrização de SOULHAC02; ( $\square$ ) representa a parametrização de B&B01 e ( $\circ$ ) representa a parametrização de B&B02.

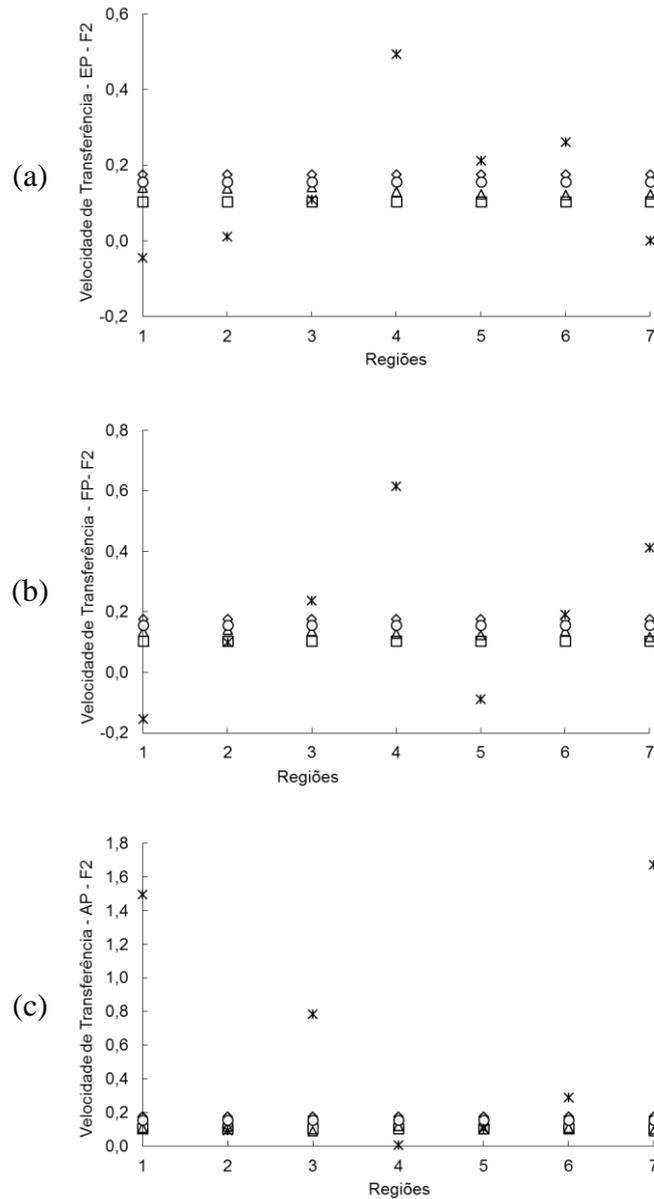


Figura 4.51: Velocidade de transferência calculada nas regiões (a) entre prédios (EP); (b) na frente do prédio (FP) e (c) atrás do prédio (AP) a uma altura de  $z/h_m = 1$ , para um conjunto de prédios de diferentes alturas, escoamento à  $0^\circ$  e fonte 2. (\*) representa velocidade de transferência média nas unidades repetidas usando dados de LES; ( $\Delta$ ) representa a parametrização de SOULHAC01; ( $\diamond$ ) representa a parametrização de SOULHAC02; ( $\square$ ) representa a parametrização de B&B01 e ( $\circ$ ) representa a parametrização de B&B02.

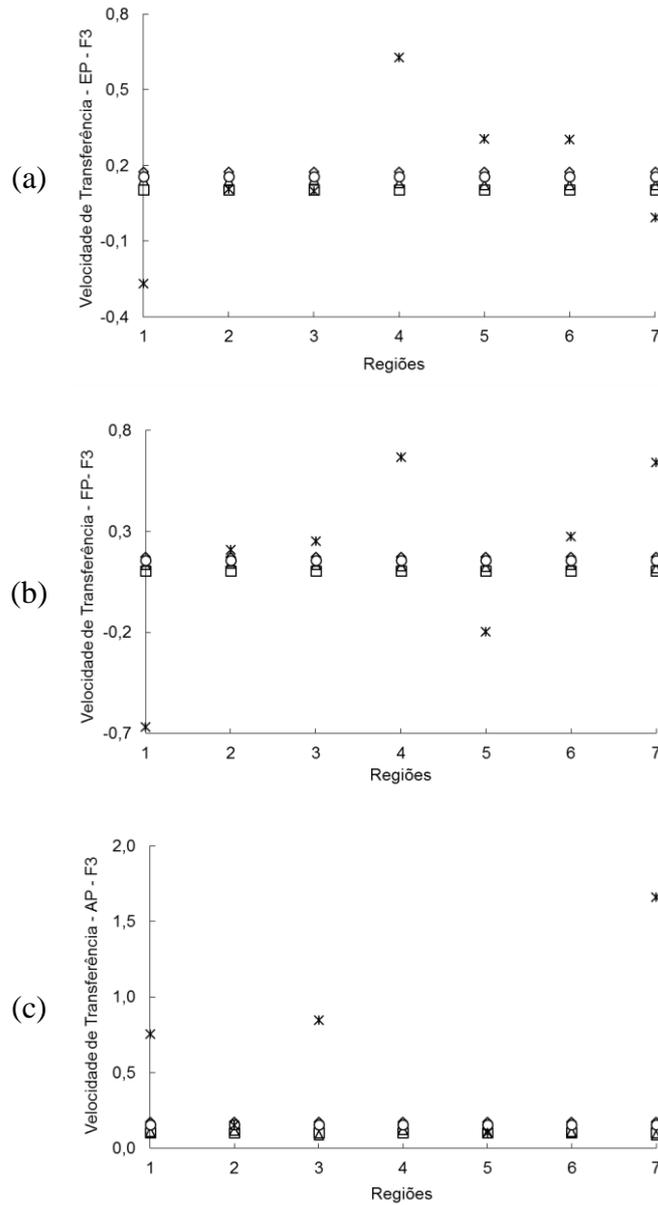


Figura 4.52: Velocidade de transferência calculada nas regiões (a) entre prédios (EP); (b) na frente do prédio (FP) e (c) atrás do prédio (AP) a uma altura de  $z/h_m = 1$ , para um conjunto de prédios de diferentes alturas, escoamento à  $0^\circ$  e fonte 3. (\*) representa velocidade de transferência média nas unidades repetidas usando dados de LES; ( $\Delta$ ) representa a parametrização de SOULHAC01; ( $\diamond$ ) representa a parametrização de SOULHAC02; ( $\square$ ) representa a parametrização de B&B01 e ( $\circ$ ) representa a parametrização de B&B02.

De maneira geral, as parametrizações não apresentam desvios significativos se forem consideradas as médias de  $U_T$  para todo o dossel. Entretanto, pontualmente os desvios são consideráveis, sendo muitas vezes por um fator de 2, principalmente em regiões onde

o fluxo advectivo é importante. Esta tendência pode levar a uma considerável superestimação ou subestimação dos valores de concentração no interior do dossel urbano predita por modelos práticos, como por exemplo, os modelos de redes de ruas (SOULHAC *et al.*, 2011). Desta forma, é necessária maior investigação usando a adequação/correção das parametrizações para estas condições.

## **5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Neste trabalho foram estudados o escoamento e dispersão de poluentes em áreas urbanas, tendo como objetivo geral entender os processos de transporte de massa de poluente no topo do dossel urbano. Foram consideradas duas diferentes metodologias para o cálculo do escoamento e concentração nessas regiões: DNS e LES. As configurações utilizadas nas simulações de DNS são conjuntos de prédios de alturas iguais e a matriz de prédio está alinhada ou escalonada considerando duas diferentes direções de vento,  $0^\circ$  e  $45^\circ$ . A configuração utilizada na simulação LES é um conjunto de prédios de diferentes alturas e escoamento a  $0^\circ$ .

Foram simulados três diferentes casos utilizando a metodologia DNS: (i) um conjunto de prédios alinhados, com mesmas alturas, direção do vento igual a  $45^\circ$  e fonte de poluente localizada em uma intersecção; (ii) um conjunto de prédios alinhados, com mesmas alturas, direção do vento igual a  $0^\circ$  e uma fonte de poluente localizada no interior do dossel urbano, entre dois prédios e uma fonte de poluente localizada acima do dossel urbano e (iii) um conjunto de prédios escalonados, com mesmas alturas, direção do vento igual a  $45^\circ$  e três diferentes localizações para a fonte de poluente, na frente de um prédio, atrás de um prédio e entre dois prédios. Foi possível verificar que para as três configurações os mecanismos que dominam a transferência de massa do escalar no topo do dossel urbano são os efeitos turbulentos. Dessa forma, os efeitos advectivos podem ser negligenciados na modelagem da transferência de massa do escalar no topo do dossel urbano.

De maneira geral, para o caso do conjunto de prédios alinhados e fonte localizada no interior do dossel urbano, o poluente lançado em uma intersecção irá atingir o topo do dossel exatamente uma caixa depois da fonte, onde aparece a fonte secundária. Foi possível concluir também que a algumas ruas a jusante da fonte o poluente entra novamente no interior do dossel urbano. No caso do escoamento orientado à 45° foi possível verificar que o tempo que o poluente demora a atingir uma determinada posição no interior do dossel é menor do que se ele percorresse as ruas do dossel. Com isso, pode-se concluir que o escoamento entre o interior e acima do dossel urbano estão completamente acoplados e, o poluente que sai do dossel entra novamente a algumas ruas a jusante da fonte.

Quando um conjunto de prédios escalonados, com diferentes alturas e com três diferentes localizações de fonte é considerado, o transporte de poluente no topo do dossel urbano tem comportamento similar ao caso de conjunto de prédios alinhados, com mesmas alturas e escoamento a 45°. Nota-se que o poluente atinge a corrente livre na vizinhança da fonte e a algumas ruas a jusante da fonte entra novamente no dossel urbano.

Foi possível verificar que o escoamento e dispersão de poluentes usando uma configuração mais realística são extremamente complexos. Não é possível identificar um padrão no escoamento para este caso. Porém, foi possível verificar que quando a fonte de poluentes é localizada na proximidade de um prédio mais alto, a maior parte do poluente é capturada pelas intensas zonas de recirculação existentes atrás desse prédio, sendo transportado para a parte superior do dossel. O prédio mais alto faz um papel de chaminé, levando o poluente do interior para fora do dossel urbano.

Os mecanismos que influenciam a transferência de massa do poluente no topo do dossel urbano em geometrias mais realísticas não são os mesmo que ocorrem para uma geometria mais simplificada. Por exemplo, os efeitos turbulentos são dominantes no topo de um dossel com prédios de alturas iguais, enquanto ambos os efeitos, advectivo e turbulento, são importantes no transporte vertical de massa do poluente em um dossel com prédios de diferentes alturas.

Uma avaliação de duas diferentes parametrizações da velocidade de transferência foi realizada para todas as configurações.

Para o caso de um conjunto de prédios com mesmas alturas, alinhados e direção do vento igual a 45° verificou-se que as parametrizações têm boa concordância com os valores da velocidade de transferência calculados usando os dados de DNS para as ruas. Porém, não existe uma boa concordância das parametrizações com os valores da velocidade de transferência calculados usando os dados de DNS para as intersecções. Esse resultado é esperado, pois, as parametrizações consideram um cânion urbano e não uma região urbana formada por prédios, ruas e intersecções.

Considerando um conjunto de prédios com mesmas alturas, alinhados e direção do vento igual a 0° as parametrizações também concordam melhor com os valores da velocidade de transferência calculados usando os dados de DNS nas ruas.

A velocidade de transferência calculada usando as parametrizações para um conjunto de prédios de mesmas alturas e escalonados produz resultados satisfatórios quando uma média geral é considerada. Neste caso, verificou-se que independentemente da localização da fonte, a parametrização tem uma boa concordância com os valores da velocidade de transferência calculados usando dados de DNS.

Para a simulação LES as parametrizações produzem resultados mais próximos das velocidades calculadas usando os dados da simulação para a região entre os prédios e na região atrás dos prédios os valores são os que mais se distanciam das parametrizações. Ressalta-se, entretanto que a parametrização de Soulhac *et al.* (2011) tem certas limitações quanto à formulação. Uma delas é a hipótese de que os fluxos no topo do dossel são dominados pelos efeitos turbulentos e que os efeitos advectivos podem ser negligenciados. Porém, neste trabalho verificou-se que para um conjunto de prédios com diferentes alturas, o fluxo de massa do escalar através da superfície localizada a uma altura média dos prédios, ambos os efeitos, advectivos e turbulentos, são importantes. Com isso, pode-se concluir que essa parametrização deve ser usada com ressalvas nos casos de regiões urbanas com prédios de diferentes alturas.

## **5.1 Recomendações para trabalhos futuros**

Neste trabalho foram investigados os fenômenos de transferência de massa de poluente no topo de um dossel urbano, considerando geometrias idealizadas e uma geometria mais realística. Foi possível concluir que quando uma geometria mais realística é considerada

a complexidade aumenta, e dessa forma, as parametrizações utilizadas devem ser melhor investigadas. Nesta tese, considerou-se o cálculo dos fluxos e da velocidade de transferência a uma altura constante no conjunto de prédios de diferentes alturas. Percebe-se, entretanto, que ainda é necessária uma investigação para determinação dessa superfície e a realização do cálculo da velocidade de transferência localmente, ou seja, considerando diferentes superfícies de transferência para cada bloco de prédios.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMAD, K.; KHARE, M.; CHAUDHRY, K. Wind tunnel simulation studies on dispersion at urban street canyons and intersections—a review. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 93, n. 9, p. 697–717, set. 2005.

BARLOW, J. F.; HARMAN, I. N.; BELCHER, S. E. Scalar fluxes from urban street canyons. Part I: Laboratory simulation. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 113, n. 3, p. 369–385, dez. 2004.

BELCHER, S. E. Mixing and transport in urban areas. **Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences**, v. 363, n. 1837, p. 2947–68, 15 dez. 2005.

BELCHER, S.E. *et al.* Processes controlling atmospheric dispersion through city centres. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 763, p. 51–81, 2015.

BEN SALEM, N. *et al.* Modelling Pollutant Dispersion in a Street Network. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 155, n. 1, p. 157–187, 2015.

BENTHAM, T.; BRITTER, R. Spatially averaged flow within obstacle arrays. **Atmospheric Environment**, v. 37, n. 15, p. 2037–2043, 2003.

BERKOWICZ, R. *et al.* Modelling traffic pollution in streets. **National Environmental Research Institute, Roskilde, Denmark**, v. 10129, n. 10136, p. 20, 1997.

BOPPANA, V.B.L.; XIE, Z.T.; CASTRO, I.P. Large-eddy simulation of dispersion from line sources in a turbulent channel flow. **Flow, Turbulence and Combustion**, v. 88, n. 3, p. 311–342, 2012.

BOPPANA, V.B.L.; XIE, Z.T.; CASTRO, I.P. Large-Eddy Simulation of Dispersion from Surface Sources in Arrays of Obstacles. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 135, n. 3, p. 433–454, 8 abr. 2010.

BRANFORD, S. *et al.* Dispersion of a Point-Source Release of a Passive Scalar Through an Urban-Like Array for Different Wind Directions. **Boundary-Layer Meteorology**, Lido, v. 139, n. 3, p. 367–394, 20 jan. 2011.

BRIXEY, L.A. *et al.* The effect of a tall tower on flow and dispersion through a model urban neighborhood: part 2. Pollutant dispersion. **Journal of environmental monitoring**, v. 11, p. 2171–2179, 2009.

CAI, X.M.; BARLOW, J.F.; BELCHER, S.E. Dispersion and transfer of passive scalars in and above street canyons—Large-eddy simulations. **Atmospheric Environment**, v. 42, p. 5885–5895, 2008.

CARPENTIERI, M. *et al.* Evaluation of a neighbourhood scale, street network dispersion model through comparison with wind tunnel data. **Environmental Modelling and Software**, p. 1–15, 2012.

- CARPENTIERI, M.; HAYDEN, P.; ROBINS, A.G. Wind tunnel measurements of pollutant turbulent fluxes in urban intersections. **Atmospheric Environment**, v. 46, p. 669–674, 2012.
- CARPENTIERI, M.; ROBINS, A.G.; BALDI, S. Three-dimensional mapping of air flow at an urban canyon intersection. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 133, p. 277–296, 2009.
- CATON, F.; BRITTER, R. E.; DALZIEL, S. Dispersion mechanisms in a street canyon. **Atmospheric Environment**, v. 37, n. 5, p. 693–702, 2003.
- CHENG, H.; CASTRO, I. P. Near wall flow over urban-like roughness, November 2001, p. 229–259, 2002.
- COCEAL, O. *et al.* Flow structure and near-field dispersion in arrays of building-like obstacles. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 125, p. 52–68, 2014.
- COCEAL, O. *et al.* Mean flow and turbulence statistics over groups of urban-like cubical obstacles. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 121, n. 3, p. 491–519, 2006.
- COCEAL, O. *et al.* Structure of turbulent flow over regular arrays of cubical roughness. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 589, p. 375–409, 2007.
- COCEAL, O.; THOMAS, T.G.; BELCHER, S.E. Spatial variability of flow statistics within regular building arrays. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 125, n. 3, p. 537–552, 2007.
- DAVIDSON, M.J. *et al.* Plume Dispersion Through Large Groups Of Obstacles - A Field Investigation. **Atmospheric Environment**, v. 29, n. 22, p. 3245–3256, 1995.
- DAVIDSON, M.J. *et al.* Wind tunnel simulations of plume dispersion through groups of obstacles. **Atmospheric Environment**, v. 30, n. 22, p. 3715–3731, 1996.
- GARBERO, V.; SALIZZONI, P.; SOULHAC, L. Experimental Study of Pollutant Dispersion Within a Network of Streets. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 136, n. 3, p. 457–487, 4 jun. 2010.
- GOULART, E.V. **Flow and dispersion over urban areas**. 2012. 1-157 f. University of Reading, 2012.
- GRIMMOND, C. S. B.; OKE, T. R. **Aerodynamic Properties of Urban Areas Derived from Analysis of Surface Form**. **Journal of Applied Meteorology**, 1998
- GU, Z.L. *et al.* Effect of uneven building layout on air flow and pollutant dispersion in non-uniform street canyons. **Building and Environment**, v. 46, n. 12, p. 2657–2665, 2011.

HAMLIN, D.; BRITTER, R. A numerical study of the flow field and exchange processes within a canopy of urban-type roughness. **Atmospheric Environment**, v. 39, n. 18, p. 3243–3254, 2005.

HAMLIN, D.; HILDERMAN, T.; BRITTER, R. A simple network approach to modelling dispersion among large groups of obstacles. **Atmospheric Environment**, v. 41, n. 28, p. 5848–5862, set. 2007.

HEIST, D.K. *et al.* The effect of a tall tower on flow and dispersion through a model urban neighborhood: part 1. Flow characteristics. **Journal of environmental monitoring**, v. 11, p. 2163–2170, 2009.

HOTCHKISS, R.S.; HARLOW, F.H. **Air Pollution Transport in Street Canyons**, 1973.

HUTCHINSON, B.; RAIHBY, G. A multigrid method based on the additive correction strategy. **Numerical heat transfer**, v. 9, p. 511–537, 1986.

KAROUSOS, I.A. **Modelling of air quality in street canyons**. **Dissertação Universidade de Leeds**, 2006

KIM, J.J.; BAIK, J.J. A numerical study of the effects of ambient wind direction on flow and dispersion in urban street canyons using the RNG k-ε turbulence model. **Atmospheric Environment**, v. 38, n. 19, p. 3039–3048, 2004.

KIM, J.J.; BAIK, J.J. Effects of inflow turbulence intensity on flow and pollutant dispersion in an urban street canyon. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 91, n. 3, p. 309–329, 2003.

LILLY, D.K. On the application of the eddy viscosity concept in the inertial sub-range of turbulence. **NCAR Manuscript**, v. 123, p. 1–19, 1966.

LIU, C.H.; LEUNG, D.Y.C.; BARTH, M.C. On the prediction of air and pollutant exchange rates in street canyons of different aspect ratios using large-eddy simulation. **Atmospheric Environment**, v. 39, p. 1567–1574, 16 fev. 2005.

LIU, C.H.; WONG, Colman C C. On the pollutant removal, dispersion, and entrainment over two-dimensional idealized street canyons. **Atmospheric Research**, v. 135-136, p. 128–142, 2014.

MACDONALD, R.W.; GRIFFITHS, R.F.; CHEAH, S.C. Field Experiments Of Dispersion Through Regular Arrays Of Cubic Structures. **Atmospheric Environment**, v. 31, n. 6, p. 783–795, 1997.

MACDONALD, R.W.; GRIFFITHS, R.F.; HALL, D.J. An improved method for the estimation of surface roughness of obstacle arrays. **Atmospheric Environment**, v. 32, n. 11, p. 1857–1864, 1998.

MAVROIDIS, I.; GRIFFITHS, R.F. Local characteristics of atmospheric dispersion within building arrays. **Atmospheric Environment**, v. 35, n. 16, p. 2941–2954, 2001.

- NICHOLSON, S.E. A pollution model for street-level air. **Atmospheric environment**, v. 9, n. 1, p. 19–31, 1975.
- OKE, T.R. Street design and urban canopy layer climate. **Energy and Buildings**, v. 11, p. 103–113, 1988.
- PASCHEKE, F; BARLOW, J.F.; ROBINS, A. Wind-tunnel modelling of dispersion from a scalar area source in urban-like roughness. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 126, p. 103–124, 2008.
- PATANKAR, S. **Numerical Heat Transfer and Fluid Flow**. Second Edition. USA: Hemisphere Publishing Corporation, 1980.
- PHILIPS, D.A.; ROSSI, R.; IACCARINO, G. Large-eddy simulation of passive scalar dispersion in an urban-like canopy. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 723, p. 404–428, 2013.
- SALIZZONI, P. *et al.* Turbulent Transfer Between Street Canyons and the Overlying Atmospheric Boundary Layer. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 141, n. 3, p. 393–414, 2011.
- SALIZZONI, P.; SOULHAC, L.; MEJEAN, P. Street canyon ventilation and atmospheric turbulence. **Atmospheric Environment**, v. 43, n. 32, p. 5056–5067, out. 2009.
- SILVEIRA-NETO, A. Simulação de Grandes Escalas de Escoamentos Turbulentos. **Turbulência**, 2002. p. 159–188.
- SNYDER, W.H.; CASTRO, I.P. The critical Reynolds number for rough-wall boundary layers. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 90, n. 1, p. 41–54, 2002.
- SO, E.S.P.; CHAN, A.T.Y.; WONG, A.Y.T. Large-eddy simulations of wind flow and pollutant dispersion in a street canyon. **Atmospheric Environment**, v. 39, n. 20, p. 3573–3582, 2005.
- SOLAZZO, E.; BRITTER, R. E. Transfer processes in a simulated urban street canyon. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 124, n. 1, p. 43–60, 2007.
- SOULHAC, L. *et al.* Flow and dispersion in street intersections. **Atmospheric Environment**, v. 43, n. 18, p. 2981–2996, jun. 2009.
- SOULHAC, L. *et al.* Parametric laws to model urban pollutant dispersion with a street network approach. **Atmospheric Environment**, v. 67, p. 229–241, 2013.
- SOULHAC, L. *et al.* The model SIRANE for atmospheric urban pollutant dispersion; part I, presentation of the model. **Atmospheric Environment**, v. 45, n. 39, p. 7379–7395, 2011.

THEURER, W.; PLATE, E. J.; HOESCHELE, K. Semi-empirical models as a combination of wind tunnel and numerical dispersion modelling. **Atmospheric Environment**, v. 30, n. 21, p. 3583–3597, 1996.

VERSTEEG, H.; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics - the finite volume method**. Essex: Pearson Education Limited, 2007.

XIA, J.; LEUNG, D.Y.C. Pollutant dispersion in urban street canopies. **Atmospheric Environment**, v. 35, n. 11, p. 2033–2043, 2001.

XIE, Z.T.; CASTRO, I. P. Large-eddy simulation for flow and dispersion in urban streets. **Atmospheric Environment**, v. 43, n. 13, p. 2174–2185, 2009.

XIE, Z.T.; CASTRO, I.P. LES and RANS for turbulent flow over arrays of wall-mounted obstacles. **Flow, Turbulence and Combustion**, v. 76, n. 3, p. 291–312, 2006.

XIE, Z.T.; COCEAL, O.; CASTRO, I. P. Large-Eddy Simulation of Flows over Random Urban-like Obstacles. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 129, p. 1–23, 20 ago. 2008.

XIE, Z.T.; HAYDEN, P.; WOOD, C.R. Large-eddy simulation of approaching-flow stratification on dispersion over arrays of buildings. **Atmospheric Environment**, v. 71, p. 64–74, 2013.

YAO, Y. F.; THOMAS, T. G.; SANDHAM, N. D. Direct numerical simulation of turbulent flow over a rectangular trailing edge. **Theoretical and Computational Fluid Dynamics**, v. 14, p. 337–358, 2001.