UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO CENTRO TECNOLÓGICO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

ANDRESSA LIZZIE RIBEIRO SILVA TALITA BORTOLON RODRIGUES

A INFLUÊNCIA DA MORFOLOGIA URBANA NO ESCOAMENTO DA ATMOSFERA

VITÓRIA 2018

ANDRESSA LIZZIE RIBEIRO SILVA TALITA BORTOLON RODRIGUES

A INFLUÊNCIA DA MORFOLOGIA URBANA NO ESCOAMENTO DA ATMOSFERA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Ambiental do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Ambiental. Orientador: Prof^a. Dr^a. Elisa Valentim Goulart

AGRADECIMENTOS

A Deus, nosso porto seguro, onde encontramos força e coragem. Ele está ao nosso lado a todo momento.

Aos familiares pelo amor incondicional, e, também pelo apoio e paciência.

Aos amigos por tornar a vida mais leve e divertida. É muito bom ter alguém para compartilhar as dificuldades e, também as alegrias do dia a dia.

À nossa querida professora e orientadora Elisa Goulart, pela atenção e auxílio neste trabalho. Não poderíamos ter escolhido pessoa mais calma e solícita para nos acompanhar neste fim de percurso.

Aos membros da banca: Bruno Furieri e Fernanda Cezana por aceitarem avaliar o conteúdo dessa monografia.

E a todos que direta ou indiretamente contribuíram para nossa formação, o nosso muito obrigado.

RESUMO

O foco do estudo deste trabalho é a camada limite planetária (CLP), definida como a parte da troposfera que sofre influência direta pela presença da superfície terrestre, sendo o escoamento a maior parte do tempo turbulento. O principal objetivo consiste em analisar escoamento ao redor de um conjunto de prédios. Para isso, foram realizadas simulações numéricas com Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) empregando o software FLUENT (ANSYS Inc.). As equações de médias de Reynolds (RANS) foram utilizadas para simular o escoamento e foram resolvidas pelo método dos volumes finitos. Foram investigados três modelos de turbulência para avaliar o tensor das tensões de Reynolds: modelo RSM, modelo $k - \mathcal{E}$ e modelo $k - \omega$ SST. Três diferentes configurações urbanas foram consideradas para análise, variando a velocidade do vento em duas direções (0º e 90º), sendo dois modelos com configurações mais simples e uniformes e, outro com uma configuração mais realista. A partir do estudo de validação das simulações numéricas foi selecionado o modelo $k - \omega$ SST como o mais adequado para prever o escoamento dos casos analisados. A modelagem RANS com modelo de turbulência os $k - \omega SST$ apresentou resultados conforme esperados. Observaram-se fenômenos do escoamento como regiões de velocidades negativas (sentido contrário à direção principal do escoamento) no teto e nas laterais dos prédios, a região conhecida como esteira turbulenta, seções transversais típicas com vórtices característicos, e o efeito de canalização nas entradas das ruas, entre outros. Além também da influência da direção do vento no escoamento, em que a direção do vento paralela às ruas mais largas permite um fluxo com maiores velocidades nas mesmas. E para as ruas perpendiculares à direção do vento, verificou-se zonas de baixas velocidades nas mesmas, propiciando a formação de recirculações. possível averiguar que o escoamento para uma configuração mais realística é extremamente complexo, não sendo possível identificar um padrão no escoamento. Assim, modelos simplificados não representam uma área urbana diversificada, onde o escoamento é muito mais difícil de ser descrito.

Palavras-chaves: Turbulência. Simulação Numérica. Fluxos Atmosféricos. Conjunto de Prédios.

ABSTRACT

The focus of the study of this work is the planetary boundary layer (PBL), defined as the part of the troposphere that is directly influenced by the presence of the earth's surface, with the flow being turbulent most of the time. The main objective is to analyze flow around a set of buildings. For this, numerical simulations with CFD were performed using FLUENT software (ANSYS Inc.). The Reynolds averages equations (RANS) were used to simulate the flow and were solved by the finite volume method. Three models of turbulence were investigated to evaluate the tensor of the Reynolds tensions: model RSM, model k-ε and model k-ω SST. Three different urban configurations were considered for analysis, varying the wind speed in two directions (0° and 90°), being two models with simpler and more uniform configurations and one with a more realistic configuration. From the validation study of the numerical simulations, the k-ω SST model was selected as the most adequate to predict the flow of the analyzed cases. The RANS model with turbulence model k-ω SST presented the results as expected. Flow phenomena were observed as regions of negative velocities (opposite to the main direction of the flow) in the roof and sides of the buildings, the region known as turbulent mat, typical cross sections with characteristic vortices, and the channeling effect in the entrances streets, among others. The influence of the direction of the wind in the flow, in which the direction of the wind parallel to the wider streets allows a flow with greater speeds in the same ones was also observed. And for the streets perpendicular to the direction of the wind, there were zones of low speeds in the same ones, favoring the formation of recirculations. It was possible to ascertain that the flow to a more realistic configuration is extremely complex and it is not possible to identify a pattern in the flow. Thus, simplified models do not represent a diversified urban area, where flow is much more difficult to describe.

Keywords: Turbulence. Numerical Simulations. Atmospheric Flow. Building Arrays.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Definição de densidade da área plana (λP) e a densidade da área fronta (λF)31
Figura 2 - 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 34
Figura 3 - Limites de separação do escoamento em três diferentes regimes em função da geometria do prédio (L/H) e do canyon (H/W)
Figura 4 - Interseção entre as ruas Marylebone Road e Gloucester Place, em Westminster, no centro de Londres, UK
Figura 5 - Modelo no túnel de vento de escala 1:200 dos experimentos realizados no Centro de Pesquisa de Fluxo Ambiental (EnFlo), projeto DAPPLE41
Figura 6 - Representação 3D dos modelos: DAPPLE, SimpleC e SimpleV; as cores representam o alcance da altura do edifício: verde (55-75 mm), amarelo (75-95 mm) laranja (95-115 mm), azul (115-155 mm) e vermelho (155-170 mm)41
Figura 7 - Perfil vertical de velocidade de entrada (componente <i>x</i> da velocidade) medições em túnel de vento
Figura 8 - Perfis de velocidade para o modelo SimpleC a 90º medidos e resultantes das simulações para os três modelos de turbulência, determinados para as coordenadas $y/Hb = -0.88$ e (a) $x/Hb =$
Figura 9 - Perfis de velocidade para o modelo SimpleV a 90º medidos e resultantes das simulações para os três modelos de turbulência, determinados para as coordenadas $y/Hb = -0.88$ e (a) $x/Hb =$
Figura 10 - Malha Computacional dos modelos: (a) Simplec, (b) SimpleV e (c) DAPPLE

Figura 11 - Distribuição da velocidade ao longo do modelo SimpleC para direção vento 0º no plano horizontal xy em (a) Hb/4, (b) Hb/2, (c) Hb e (d) 2Hb	
Figura 12 - Linhas de corrente do escoamento médio ao longo do modelo Simplo para a direção do vento 0º no plano horizontal xy em (a) Hb/4, (b) Hb/2, (c) Hb e 2Hb	(d)
Figura 13 - Localização no plano horizontal xy selecionada para análise escoamento para direção de vento 0º no modelo SimpleC	
Figura 14 - Distribuição da velocidade para direção do vento 0º no plano vertical no modelo SimpleC	
Figura 15 - Campo de velocidade para direção do vento 0º no plano vertical xz modelo SimpleC	
Figura 16 - Distribuição da velocidade ao longo do modelo SimpleC para direção vento 90° no plano horizontal xy em (a) $Hb/4$, (b) $Hb/2$, (c) Hb e (d) $2Hb$	
Figura 17 - Linhas de corrente do escoamento médio ao longo do modelo Simple para a direção do vento 90º no plano horizontal xy em (a) $Hb/4$, (b) $Hb/2$, (c) Hb (d) $2Hb$	b e
Figura 18 - Localização no plano horizontal xy selecionada para análise escoamento para direção de vento 90º no modelo SimpleC	
Figura 19 - Distribuição da velocidade para direção do vento 90º no plano vertical no modelo SimpleC	
Figura 20 - Campo de velocidade para direção do vento 90º no plano vertical yz modelo SimpleC	
Figura 21 - Distribuição da velocidade ao longo do modelo SimpleV para direção vento 0º no plano horizontal xy em (a) Hb/4, (b) Hb/2, (c) Hb e (d) 2Hb	

Figura 22 - Linhas de corrente do escoamento médio ao longo do modelo SimpleV
para a direção do vento 0º no plano horizontal xy em (a) Hb/4, (b) Hb/2, (c) Hb e (d) 2Hb71
2110
Figura 23 - Localização no plano horizontal xy selecionada para análise do
escoamento para direção de vento 0º no modelo SimpleV74
Eiguro 24. Distribuição do volocidado para direção do vento 00 po plano vertical va
Figura 24- Distribuição da velocidade para direção do vento 0º no plano vertical xz no modelo SimpleV
Figura 25 - Campo de velocidade para direção do vento 0º no plano vertical xz no
modelo SimpleV75
Figura 26 - Distribuição da velocidade ao longo do modelo SimpleV para direção do
vento 90º no plano horizontal xy em (a) Hb/4, (b) Hb/2, (c) Hb e (d) 2Hb76
Figura 27 - Linhas de corrente do escoamento médio ao longo do modelo SimpleV
para a direção do vento 90º no plano horizontal xy em (a) Hb/4, (b) Hb/2, (c) Hb e (d)
2Hb78
Figura 28 - Localização no plano horizontal xy selecionada para análise do
escoamento para direção de vento 90º no modelo SimpleV81
Figura 29 - Distribuição da velocidade para direção do vento 90º no plano vertical yz
no modelo SimpleV81
Figura 30 - Campo de velocidade para direção do vento 90º no plano vertical yz no
modelo SimpleV82
Figura 31- Distribuição da velocidade ao longo do modelo DAPPLE para direção do
vento 0º no plano horizontal xy em (a) Hb/4, (b) Hb/2, (c) Hb e (d) 2Hb83
Figura 32 - Linhas de corrente do escoamento médio ao longo do modelo DAPPLE
para a direção do vento 0º no plano horizontal xy em (a) Hb/4, (b) Hb/2, (c) Hb e (d)
2Hb84

Figura 33 - Distribuição da velocidade ao longo do modelo DAPPLE para direção do
vento 90º no plano horizontal xy em (a) Hb/4, (b) Hb/2, (c) Hb e (d) 2Hb86
Figura 34- Linhas de corrente do escoamento médio ao longo do modelo DAPPLE
para a direção do vento 90º no plano horizontal xy em (a) Hb/4, (b) Hb/2, (c) Hb e (d)
2Hb87
Figura 35 - Distribuição da velocidade vertical no para direção do vento 0º no plano
vertical xz nos modelos (a) SimpleC, (b) SimpleV e (c) DAPPLE90
Figura 36- Distribuição da velocidade vertical para direção do vento 90º no plano
vertical yz nos modelos (a) SimpleC, (b) SimpleV e (c) DAPPLE91
Figura 37 - Localização no plano horizontal xy selecionada para análise do
escoamento para direção de vento 0º nos modelos SimpleC, SimpleV e DAPPLE
(Local 1 e Local 2 apontados nas figuras)94
Figura 38 - Distribuição da velocidade no Local 1 para direção do vento 0º no plano
vertical xz nos modelos (a) SimpleC, (b) SimpleV e (c) DAPPLE95
Figura 39 - Campo de velocidade no Local 1 para direção do vento 0º no plano
vertical xz nos modelos (a) SimpleC, (b) SimpleV e (c) DAPPLE96
Figura 40 - Distribuição da velocidade no Local 2 para direção do vento 0º no plano
vertical xz nos modelos (a) SimpleC, (b) SimpleV e (c) DAPPLE97
Figura 41 - Campo de velocidade no Local 2 para direção do vento 0º no plano
vertical xz nos modelos (a) SimpleC, (b) SimpleV e (c) DAPPLE98
Figura 42 - Localização no plano horizontal xy selecionada para análise do
escoamento para direção de vento 90º nos modelos SimpleC, SimpleV e DAPPLE
(Local 1 e Local 2 apontados nas figuras)99
Figura 43 - Distribuição da velocidade no Local 1 para direção do vento 90º no plano
vertical yz nos modelos (a) SimpleC, (b) SimpleV e (c) DAPPLE100

Figura 44 - Campo de velocidade no Local 1 para direção do vento 90º no pla	ano
vertical yz nos modelos (a) SimpleC, (b) SimpleV e (c) DAPPLE1	101
Figura 45 - Distribuição da velocidade no Local 2 para direção do vento 90º no pla vertical yz nos modelos (a) SimpleC, (b) SimpleV e (c) DAPPLE1	
Figura 46 - Campo de velocidade no Local 2 para direção do vento 0º no pla	ano
vertical yz nos modelos (a) SimpleC, (b) SimpleV e (c) DAPPLE1	103

SUMÁRIO

1	INTRO	DDUÇÃO	13
2	OBJE	TIVOS	15
	2.1 OBJ	ETIVO GERAL	15
	2.2 OBJ	ETIVOS ESPECÍFICOS	15
3	REVIS	SÃO BIBLIOGRÁFICA	15
	3.1 A	TMOSFERA	16
	3.1.1	Camadas da Atmosfera	16
	3.1.2	Camada Limite Planetária	18
	3.2 SI	MULAÇÃO NUMÉRICA COM CFD	19
	3.2.1	Fundamentos da Turbulência	21
	3.2.2	Modelagem da Turbulência	22
	3.2.3	Modelos de Viscosidade Turbulenta	25
	3.3 ESC	COAMENTO EM CÂNIONS URBANOS	30
	3.4 ESC	COAMENTO EM UM DOSSEL URBANO	32
4	METO	DDOLOGIA	37
	4.1 IN	TRODUÇÃO AOS MODELOS	38
	4.2 DI	ESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS DE TÚNEL DE VENTO	41

4	4.3	DESCRIÇÃO DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS	44
5	RE	SULTADOS	47
į	5.1	COMPARAÇÃO COM DADOS DE TÚNEL DE VENTO	47
		ANÁLISE DO ESCOAMENTO EM UM CONJUNTO DE PRÉDIOS I JRAS UNIFORMES	
		ANÁLISE DO ESCOAMENTO EM UM CONJUNTO DE PRÉDIO I JRAS VARIÁVEIS	
		ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA MORFOLOGIA URBANA MORFOLOGIA MORFO	
6	CC	DNCLUSÃO1	04
7	RE	FERÊNCIAS1	06

1 INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento econômico e não dispondo de um planejamento urbano apropriado, surgem nas grandes cidades aglomerados de prédios. Os moradores e as pessoas que transitam nesses meios urbanos durante o dia estão expostos a concentrações de poluentes que podem ser prejudiciais a sua saúde. Sendo assim, existe um constante crescimento da preocupação com a qualidade do ar em áreas urbanas (BELCHER, et al., 2015; BERKOWICZ et al., 1997; CATON et al., 2003).

É fundamental o entendimento dos mecanismos que estão presentes no escoamento da atmosfera em áreas urbanas, com o objetivo final de que decisões sejam tomadas para criar condições propícias à promoção de ventilação.

As diferentes configurações urbanas exercem impacto de variadas formas no fluxo natural de ventilação. A configuração urbana espacial é representada pela disposição, afastamentos, altura, largura e profundidade da massa edificada, associada às características do sítio físico, como a topografia (SILVA, 2014).

Estudos numéricos e experimentais foram realizados para caracterizar o fluxo e a dispersão em configurações típicas de rugosidade urbana (MACDONALD et al., 1998a, 2000). Eles levaram ao desenvolvimento dos poucos modelos de dossel urbano disponíveis hoje. Os estudos que tratam da dispersão em regiões urbanas, em sua maioria atribuem geometrias simplificadas para representá-las, como cânions urbanos (*street canyon*) (LIU et al., 2005; SALIZZONI et al., 2011) ou dosséis urbanos (*urban canopy*) com prédios de mesmas alturas (BELCHER et al., 2015; GOULART, 2012). Por conseguinte, faltam estudos que investiguem o comportamento do fluxo de ar para um uma configuração mais realística.

Segundo Nicholson (1975), o termo dossel urbano é usado para abordar um conjunto de prédios considerando ruas e espaçamentos entre os prédios. Já o termo cânion urbano é usado para estabelecer ruas urbanas com edifícios contínuos dos dois lados, em geral, com grandes concentrações de poluentes.

Estudos recentes (CARPENTIERI et al., 2009; CARPENTIERI; ROBINS, 2010; HARMS et al., 2011; KLEIN et al., 2011), no entanto, destacaram a complexidade dos campos de fluxo e dispersão em geometrias urbanas reais (em oposição a arranjos de construção idealizados). É evidente a partir desses estudos que mais parâmetros, como a variabilidade da altura e a razão de aspecto do prédio, devem

ser levados em conta para uma previsão mais precisa do fluxo e da dispersão em configurações urbanas reais.

Para desenvolver modelos de dispersão em áreas urbanas (escala local e na vizinhança) é preciso entender os processos que ocorrem nas interseções, as quais constituem em áreas de transferência de poluentes entre várias ruas, e entre o dossel urbano o escoamento acima (escoamento livre). Não é fácil entender esses processos uma vez que a geometria de interseções realísticas conduz a fluxos tridimensionais complexos e condições de dispersão associadas. Além dos processos de fluxos médios, fluxos turbulentos podem desempenhar um papel significativo na troca de poluentes entre ruas com escoamento acima do dossel. (CATON et al., 2003).

Os estudos de Xie e Castro (2006) e Xie e outros (2008) mostraram que muitas características do fluxo sobre o arranjo de altura variável são bastante diferentes daquelas no escoamento uniforme sobre o fluxo. Eles concluíram que as abordagens de modelagem genéricas, derivadas de arranjos mais simples e uniformes não são uma opção viável para matrizes urbanas, e estudos mais experimentais e computacionais sobre esse aspecto são necessários.

A Dispersão da Poluição do Ar e sua Penetração no Meio Ambiente Local (DAPPLE) é um projeto financiado pelo Conselho de Pesquisa de Engenharia e Ciências Físicas do Reino Unido (EPSRC) de 4 anos dentro do Programa de Infraestrutura e Meio Ambiente. O objetivo do projeto DAPPLE é aprimorar a compreensão dos processos de dispersão de poluentes em ambientes urbanos realistas, ou seja, uma interseção urbana real, caracterizada por edifícios de diferentes formas e alturas, não ininterruptos, com geometrias de diferentes larguras e comprimentos. (CARPENTIERI et al., 2009; ARNOLD et al., 2004).

O escoamento da ventilação urbana pode ser investigado com medições em campo (SCHATZMANN; LEITL, 2011; VAN HOOFF; BLOCKEN, 2012), experimentos com modelos de escala reduzida em túnel de vento (QUAN et al. 2007a,b; CARPENTIERI et al., 2012) ou simulação numérica com CFD (LIN et al., 2014; RAMPONI et al., 2015).

O uso de dinâmica dos fluidos computacional (CFD) nas simulações numéricas usa um modelo computacional para simular os processos físicos de uma situação

determinada, o que permite prever diversos cenários fomentando mais possibilidades para o planejamento urbano. O uso do CFD também tem sido implementado de forma mais fácil devido aos avanços nas tecnologias de computador (CHUNG; CHO, 2011).

Neste projeto de graduação, será realizado o estudo da influência da altura e das características geométricas dos prédios no escoamento de ar em um bairro no centro de Londres através da comparação dos resultados das simulações numéricas realizadas com CFD para configurações com geometrias mais simples e uniformes, e para uma configuração mais realista, como o modelo DAPPLE.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar o escoamento ao redor de um conjunto de prédios, observando a influência da direção do vento, das dimensões das ruas e da altura e geometria dos prédios.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar a validação dos resultados obtidos para as simulações numéricas dos modelos simplificados;
- Avaliar o desempenho de três modelos de fechamento de turbulência e selecionar o mais adequado;
- Analisar a influência da direção do vento no escoamento;
- Analisar a influência da variação das alturas dos prédios no escoamento;
- Analisar a influência da morfologia urbana no escoamento.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção iniciará discorrendo sobre as principais características da atmosfera terrestre e de suas camadas, com uma atenção maior para a parte da troposfera conhecida como camada limite planetária (CLP), onde se concentra os estudos deste trabalho. Posteriormente, serão descritos os fundamentos e modelagem da

turbulência que estão por trás das simulações numéricas apresentadas no desenvolvimento deste trabalho. E por fim, serão abordados alguns conceitos e trabalhos importantes a respeito do estudo do escoamento da atmosfera e da dispersão de poluentes em áreas urbanas, em que serão apresentados estudos do escoamento em cânions e dosséis urbanos.

3.1 ATMOSFERA

A atmosfera terrestre é uma camada de ar que envolve a superfície terrestre e é retida pela força da gravidade, sendo composta de gases e aerossóis (partículas sólidas ou líquidas que se encontram suspensas no ar com diâmetro médio da ordem nano ou micrométrica).

3.1.1 Camadas da Atmosfera

A atmosfera terrestre é usualmente dividida em camadas de acordo com o perfil vertical médio de temperatura. As áreas de contato entre elas são áreas de descontinuidades e possuem o sufixo "pausa", após o nome da camada subjacente. A temperatura na atmosfera terrestre vai ser determinada, essencialmente, pela proximidade em relação ao solo e pela interação da radiação com os gases presentes na atmosfera. As camadas da atmosfera são: troposfera, estratosfera, mesosfera, termosfera e exosfera.

A troposfera é a camada mais baixa da atmosfera terrestre, sendo a mais próxima da superfície terrestre na qual a temperatura decresce com a altitude. Isto acontece, pois, a superfície é aquecida pela radiação solar, e, devido ao efeito estufa que mantém o meio em que vive a humanidade aquecido. Os gases de efeito estufa estão em uma maior concentração próxima à superfície terrestre, e à medida que se distancia, esta concentração diminui. De acordo com Stull (1988), a troposfera possui uma altura que varia de 9 a 16 km, dependendo da latitude e da época do ano.

Desde a tropopausa, com uma espessura que vai até 45 a 55 km, temos a estratosfera, porção da atmosfera onde está a camada de ozônio (região com maior concentração de gás ozônio), essencial para preservar a vida terrestre. Há um

aquecimento da atmosfera nesta camada uma vez que há produção e destruição do gás ozônio constantemente. O gás ozônio tem a característica de absorver radiação ultravioleta (radiação de curto comprimento de onda com alta energia) por meio da fotodecomposição, resultando em átomos excitados, ou seja, com energia maior do que no estado fundamental. Sendo assim, nesta camada, a temperatura aumenta à medida que altura aumenta.

Na camada subsequente, como na troposfera, a temperatura diminui com a altitude. A denominada mesosfera é a região com espessura que segue desde a estratopause até 80 a 90 km. Esta camada é, em relação às outras camadas, a que apresenta as mais baixas temperaturas, demarcando um ponto de temperatura mínima na atmosfera.

A termosfera, eleva-se desde a mesopausa até cerca de 700 km. Na termosfera, há absorção de radiação em comprimento de ondas curtos pelos gases nitrogênio e oxigênio, caracterizando uma região de altas temperaturas, e, como resultado deste fenômeno denominado fotoionização, a temperatura cresce com a altitude nesta camada.

A exosfera é a camada mais externa da atmosfera, o final da mesma estabelece o limite entre a atmosfera e o início do espaço cósmico, de forma que aquelas moléculas com energia suficiente escapam da atmosfera constantemente. Nesta camada há em predominância os gases hidrogênio e hélio (gases de baixa densidade). Apresentando ar extremamente rarefeito pelo fato de ser a camada mais distante da superfície terrestre.

Os poluentes emitidos próximos a superfície terrestre, quase todos, são transportados, dispersos, transformados e removidos dentro da troposfera. Na troposfera ocorre o transporte de massa (água, gases, partículas sólidas), energia (radiações vindas do sol e da superfície) e quantidade de movimento (ventos). No fim da troposfera, quando o ar ascendente atingir a tropopausa, será espalhado para os lados uma vez que o ar acima (região da estratosfera) é mais leve e mais quente, impedindo a passagem do ar para camada superior. As gotículas de água em forma de vapor e os compostos químicos em forma de gás dificilmente conseguem atravessar esta barreira invisível na tropopausa.

3.1.2 Camada Limite Planetária

A troposfera pode ser dividida em camada limite planetária (CLP) e atmosfera livre. A camada limite planetária pode ser definida como a parte da troposfera que sofre influência direta pela presença da superfície terrestre, sendo o escoamento a maior parte do tempo turbulento. Responde rapidamente, em cerca de uma hora ou menos, às forçantes superficiais, tangenciais e de empuxo (STULL, 1988). Acima, na atmosfera livre, os efeitos indiretos advindos da presença da superfície terrestre são pouco sentidos, com uma resposta mais lenta, sendo o escoamento nesta porção predominantemente laminar.

O escoamento de ar na atmosfera é fortemente influenciado pelas tensões de cisalhamento, devido à sua interação com a superfície da Terra e aos escoamentos atmosféricos de larga escala e pelas forças de empuxo, devido ao gradiente de densidade vertical. As influências das tensões de cisalhamento e forças de empuxo são limitadas a Camada Limite Planetária. Acima da CLP, na atmosfera livre está localizada a camada geostrófica onde apenas os gradientes horizontais de pressão e as forças de Coriolis exercem influência no escoamento (SEINFELD; PANDIS, 1998). Em geral, o fenômeno da dispersão de poluentes é apenas estudado nesta pequena parte da troposfera, a CLP, onde os principais processos de transporte e remoção dos poluentes ocorrem mais frequentemente.

A CLP não tem altura constante, ela varia de centenas de metros a poucos quilômetros, dependendo da taxa de aquecimento e resfriamento da superfície terrestre, intensidade do vento, rugosidade do terreno e características topográficas da superfície, movimento vertical de grande escala, advecção horizontal de calor e umidade e localização geográfica. A mudança na altura da CLP pela variação de temperatura ocorre, por exemplo, durante o dia, quando a superfície terrestre está aquecida pelo sol, há uma transferência do calor desta para a atmosfera que se encontra mais fria, o que causa uma mistura térmica fazendo com que a CLP cresça e atinja uma altura de aproximadamente 1 a 2 km. Durante a noite, não ocorre esta transferência de calor e assim a mistura térmica é suprimida, causando um decréscimo na altura da CLP que pode chegar a menos de 100 m de altura (PANOFSKY; DUTTON, 1984).

A parte mais baixa da CLP é chamada de Camada Superficial (CS) e ocupa cerca de 10% da altura da CLP, e é onde a maioria das atividades humanas ocorre. A CS apresenta pouca variação de altura e os fluxos não variam mais de 10%, sendo assim considerada uma camada de fluxos constantes e desta forma a tensão de cisalhamento e fluxo de calor são considerados constantes. A resposta da superfície terrestre à radiação provoca mudanças na CLP através de processos de transporte, sendo a turbulência um dos processos de transporte mais importantes. A espessura da camada superficial depende das condições atmosféricas e pode variar de 10 m numa noite com céu limpo e ventos fracos até 100 m em um dia com ventos fortes.

3.2 SIMULAÇÃO NUMÉRICA COM CFD

A dinâmica dos fluidos é a ciência que estuda o comportamento e as propriedades de fluidos em movimento. As equações de Navier-Stokes são normalmente usadas para modelar o escoamento na camada limite planetária. A modelagem matemática aparece como uma ferramenta útil na compreensão dos fenômenos envolvidos em escoamentos reais, permitindo a simulação computacional do escoamento. A dinâmica dos fluidos computacional (CFD) utiliza métodos numéricos para simular o escoamento. A simulação numérica pode ser entendida como sendo uma relação entre resultados teóricos e práticos.

Para a simulação numérica com CFD, a modelagem matemática através das equações governantes é solucionada por métodos numéricos, obtendo uma solução, isto é, uma simulação numérica aproximada, aplicando um processo de discretização. Posteriormente, são feitas análises e interpretações dos resultados advindos das simulações numéricas, geralmente usando técnicas de visualização para diversas situações, permitindo uma análise qualitativa e rápida.

As equações diferenciais de Navier-Stokes que descrevem o movimento e espécie química do fluido são apresentadas a seguir. Para resolver as equações contínuas é preciso aproximá-las numericamente usando funções discretas. Os fluxos da superfície podem ser representados discretamente por pontos de integração para a conversão da equação contínua em sua forma discreta, estes pontos são localizados no centro de cada segmento da superfície. Após a discretização das equações, elas

devem ser resolvidas (exceto pelas equações de energia e massa por um aplicativo computacional capaz de operar estas aproximações.

Equação de Conservação da Massa

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho U_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

Equação de Conservação da Quantidade de Movimento

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho U_i U_j}{\partial x_i} = \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i \tag{2}$$

onde,

$$\tau_{ij} = 2\mu S_{ij} - \left(p + \frac{2}{3}\mu \frac{\partial U_K}{\partial x_K} \delta_{ij}\right)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_i} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right)$$
(3)

Equação de Conservação da Energia

$$\frac{\partial \rho e}{\partial t} + \frac{\partial \rho U_i e}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_c \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \varphi + \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + U_i \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \right) + F_H \tag{4}$$

• Equação de Conservação de Massa de Espécie Química $\frac{\partial \rho c}{\partial t} + \frac{\partial \rho U_i c}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho D_m \frac{\partial c}{\partial x_i} \right) + S$ (5)

Onde t retrata o tempo; x_i são as coordenadas cartesianas, g_i é a aceleração da gravidade, U_i é a componente instantânea da velocidade na direção i, ρ é a massa específica do fluido, δ_{ij} representa o Delta de Kronecker, μ a viscosidade molecular do fluido, τ_{ij} o tensor das tensões de Reynolds, ρ a pressão, S_{ij} o tensor taxa de deformação do fluido, e representa a entalpia, φ a dissipação viscosa da energia, e0 temperatura, e0 a condutividade térmica do ar, e0 a concentração de contaminante, e1 e2 e3 a difusividade molecular da espécie química no fluido, e4 e5 são as fontes de energia.

A modelagem matemática tem como objetivo possibilitar a solução das equações de Navier-Stokes aplicadas a escoamentos reais, uma vez que soluções analíticas para estas equações somente são obtidas para escoamentos simples em condições ideais. Sendo assim, as equações devem ser substituídas por aproximações algébricas e resolvidas por um método numérico. Os métodos numéricos utilizam a discretização do domínio espacial para obter o valor das quantidades de interesse em pontos discretos dentro do domínio do escoamento, utilizando malhas estruturadas ou não estruturadas.

3.2.1 Fundamentos da Turbulência

A turbulência é uma característica do escoamento e não do fluido. O conceito da turbulência tem relação com a natureza caótica do escoamento, em que de acordo com Arya (2001), a turbulência se manifesta forma de flutuações irregulares e aleatórias de velocidade do vento, temperatura e grandezas escalares, em torno de seus valores médios no tempo e no espaço.

Segundo Hinze (1975), o movimento turbulento de um fluido é uma condição irregular do escoamento, há uma variação randômica no tempo e espaço das propriedades do fluido, podendo ser diferenciados de seus valores médios.

O escoamento turbulento apresenta como características a alta difusividade e por ser um fenômeno dissipativo, rotacional e tridimensional.

A turbulência é um fenômeno altamente dissipativo, de forma que o escoamento turbulento está constantemente dissipando energia cinética. Para o escoamento turbulento ser mantido, é necessário haver uma fonte contínua de energia.

No escoamento turbulento, o cisalhamento mecânico será considerado como uma fonte contínua de produção de vórtices turbulentos, por conta da presença da superfície terrestre. Os vórtices maiores transferem energia para os vórtices menores e assim sucessivamente, até atingir escalas suficientemente pequenas para que a dissipação de energia ocorra através das forças viscosas (KITAGAWA, 2018).

Para cálculo do regime de escoamento de um fluido sobre uma superfície é utilizado o número de Reynolds (*Re*), parâmetro adimensional que classifica os escoamentos em laminares, transição ou turbulentos, representado pelo quociente a seguir:

$$Re = \frac{\rho ul}{\mu} \tag{6}$$

onde u é a velocidade característica, ρ é a massa específica do fluido, l é um comprimento característico e μ é a viscosidade do fluido.

O valor do número de Reynolds que estabelece a passagem do regime laminar para o turbulento é denominado número de Reynolds crítico (Re_{crit}). Esse número é determinado experimentalmente para cada configuração de escoamento. Para valores de Re inferiores ao Re_{crit} , o escoamento se comporta de maneira suave, como se uma camada de fluido deslizasse suavemente sobre a outra, daí o nome escoamento laminar. Ao contrário, quando o número de Re é superior ao Re_{crit} , o escoamento é caracterizado por vórtices turbulentos (COSTA, 2016).

A turbulência é dita como homogênea quando apresenta a mesma estrutura em todo o escoamento, isto é, a homogeneidade da turbulência está relacionada à distribuição das suas propriedades estatísticas no espaço. A turbulência é chamada de isotrópica se as propriedades estatísticas se apresentam iguais em toda as direções. Por outro lado, a turbulência é chamada anisotrópica quando existe uma direção preferencial: as propriedades não são iguais em todas as direções (COSTA, 2016).

3.2.2 Modelagem da Turbulência

Não existe nenhum modelo de turbulência que possa ser aplicado adequadamente a todos os tipos de escoamento, ainda que haja muita pesquisa no campo de turbulência, disponibilizando uma grande quantidade de modelos de turbulência.

A modelagem da turbulência pode ser dividida nos seguintes campos primários (dispostos de acordo com a exigência computacional):

 Simulação Numérica de Escoamentos Turbulentos através de Equações Médias de Reynolds (RANS - Reynolds Averaged Navier-Stokes). A estratégia da modelagem RANS é modelar todas as escalas da turbulência embasando-se nas equações de Médias de Reynolds, obtidas através de um conjunto de médias das equações de Navier-Stokes e da continuidade. O ponto crítico da modelagem RANS é a representação do tensor das tensões de Reynolds ou tensões turbulentas que descrevem os efeitos das flutuações turbulentas de pressão e velocidades;

- Simulação de Grandes Escalas (LES Large Eddy Simulation). Nesta técnica, as grandes escalas, consideradas como os turbilhões que contém energia, são calculadas diretamente e para as pequenas escalas utilizam-se modelos de escalas sub-malha (RODI, 2006). Para este caso, a formulação é necessariamente transiente e tridimensional;
- Simulação Numérica Direta (DNS Direct Numerical Simulation). Nesta técnica, as equações de Navier-Stokes tridimensionais e transientes, diferente das anteriores, são resolvidas sem modelagem, em malhas bastante refinadas com passos de tempo bem pequenos, a fim de registrar toda a gama de escalas turbulentas. De forma que todas as escalas espaciais e temporais da turbulência são resolvidas aplicando esta técnica.

Os modelos mais complexos exigem alto desempenho computacional para solução do escoamento. A modelagem LES e a DNS buscam informações instantâneas acerca do escoamento e assim maior será o tempo de simulação necessário. Comparativamente à simulação numérica direta (DNS) que registra todas as frequências de energia, a LES obtém apenas parte do espectro de energia. O tempo de simulação está diretamente associado à instabilidade física: quanto menor a instabilidade, mais refinada deverá ser a malha de simulação e, portanto, mais onerosa e demorada. O modelo RANS apresenta menor custo computacional e menor tempo de simulação que a DNS e a LES. Por esse motivo, a modelagem RANS foi utilizada no presente estudo, e está apresentada no próximo item, com uma breve introdução.

3.2.2.1 Decomposição de Reynolds e o problema de fechamento

Por via de regra, é sabido que as equações de Navier-Stokes não podem ser usadas diretamente para resolver o fluxo e dispersão uma vez que a solução exigirá a resolução de todas as escalas espaciais e temporais contínuas da turbulência, o que

é impossível para os recursos disponíveis atualmente. Dessa forma, o sistema de equações deve ser simplificado para torná-lo numericamente solucionável.

Reynolds em 1895 propôs um tratamento estatístico para a solução de escoamentos turbulentos. Este tratamento consiste na aplicação da decomposição das propriedades envolvidas, na forma de valores médios e suas flutuações, nas equações de conservação da quantidade de movimento, que ficou conhecido como *Reynolds-Avereged Navier-Stokes* (RANS). As equações de RANS governam as médias da velocidade e pressão, o que simplifica a resolução do problema uma vez que estas grandezas variam suavemente no tempo e espaço. Sendo assim, são escritos o valor instantâneo da velocidade e de qualquer variável escalar genérica Φ da seguinte forma:

$$U_i = \overline{U}_i + u_i \tag{7}$$

$$\varphi = \bar{\varphi} + \varphi' \tag{8}$$

A partir da decomposição de Reynolds aplicada à equação de conservação de quantidade de movimento, surge o termo $\rho \overline{u_i'u_j'}$ conhecido como tensor das tensões de Reynolds que representa a influência das flutuações turbulentas no fluxo médio. Com o surgimento deste termo, não há nenhuma equação adicional ao sistema, existem mais variáveis do que equações, concebendo o chamado problema de fechamento matemático da turbulência. Para solucionar este problema é preciso introduzir modelos para avaliar o tensor das tensões de Reynolds.

Em 1877, Boussinesq fez uma analogia entre as tensões turbulentas e as tensões viscosas do escoamento laminar, ao propor que o fluxo turbulento de quantidade de movimento está relacionado ao gradiente local de velocidades do escoamento médio através de uma viscosidade associada às características do fluido, do escoamento e da geometria considerada no problema sob análise (SILVEIRA NETO, 2002):

$$\rho \overline{u_i' u_l'} = \mu_{turb} \overline{S_{ij}} \tag{9}$$

Dessa forma, basta introduzir apenas uma equação para o cálculo da viscosidade turbulenta, ao invés de ser necessário introduzir seis equações suplementares para calcular separadamente cada um dos componentes do tensor das tensões de

Reynolds, simplificando significativamente o problema de fechamento. Foram desenvolvidos modelos de turbulência fundamentados na hipótese de Boussinesq, como os modelos de viscosidade turbulenta.

3.2.3 Modelos de Viscosidade Turbulenta

Este estudo utilizou 3 modelos nas simulações numéricas: Modelo RSM, Modelo $k-\mathcal{E}$ e Modelo $k-\omega$ SST em que os dois últimos são modelos de viscosidade turbulenta de duas equações, que são assim chamados porque se utilizam de duas equações de transporte: uma para calcular a energia cinética turbulenta (k) e outra para calcular o comprimento de escala da turbulência (l). Na equação para obter o l, a variável dependente pode ser o próprio comprimento l ou uma função das duas variáveis k e l. Há modelos de viscosidade turbulenta de 7 equações $(RSM-Reynolds\ Stress\ Model$, por exemplo) que são mais complexos e demandam um maior custo computacional. A seguir se encontram os modelos utilizados neste presente estudo.

3.2.3.1 Modelo RSM

Os Reynolds Stress Models (RSM) são fechamentos de turbulência de alto nível e representam o mais completo modelo clássico de turbulência. O método de fechamento empregado é geralmente chamado de fechamento de segunda ordem. Esta abordagem de modelagem origina-se dos trabalhos de Chou (1945) e Rotta (1951). Em Reynolds Stress Models, a abordagem de viscosidade por turbilhonamento é evitada e os componentes individuais do tensor de tensão de Reynolds são calculados diretamente. Esses modelos dependem da exata equação de transporte de tensão de Reynolds. Eles são capazes de explicar do Tensor de Reynolds.

Este modelo envolve o cálculo das tensões individuais de Reynolds, $\rho \overline{u'_l u'_l}$, usando equações diferenciais de transporte. Os tensores individuais de Reynolds são então usados para obter o fechamento da equação do momento médio de Reynolds.

As equações para o transporte das tensões de Reynolds, $\rho \overline{u_l'u_j'}$, podem ser escritas como segue:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\rho \overline{u_i' u_j'} \right) + \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\rho u_k \overline{u_i' u_j'} \right) \\
= -\frac{\partial}{\partial x_k} \left[\rho \overline{u_i' u_j' u_k'} + \overline{p'(\delta_{kJ} u_i' + \delta_{lk} u_j')} \right] + \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\mu \frac{\partial}{\partial x_k} \left(u_i' u_j' \right) \right] \\
- \rho \left(\overline{u_i' u_k'} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u_j' u_k'} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) + p' \left(\overline{\frac{\partial u_i'}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j'}{\partial x_l}} \right) - 2\mu \frac{\overline{\partial u_i'}}{\partial x_k} \frac{\partial u_j'}{\partial x_k} \\
- 2\rho \Omega_k \left(u_j' u_m' t_{lkm} + u_i' u_j' t_{jkm} \right) \tag{10}$$

Ou

Taxa de variação local
$$+C_{ij}=D_{T,ij}+D_{L,ij}+P_{ij}+\phi_{ij}-t_{ij}+F_{ij}$$

Onde C_{ij} é o Termo de Conversão, $D_{T,ij}$ é igual à Difusão Turbulenta, $D_{L,ij}$ representa a Difusão Molecular, P_{ij} é o termo para Produção de Tensão, ϕ_{ij} é para o Tensão de Pressão, t_{ij} significa Dissipação e F_{ij} é a Produção por Rotação do Sistema.

Destes termos, C_{ij} , $D_{T,ij}$, P_{ij} e F_{ij} não requerem modelagem. Entretanto, $D_{T,ij}$, ϕ_{ij} e t_{ij} precisam ser modelados para fechar as equações. A fidelidade do modelo de tensão de Reynolds depende da precisão dos modelos para o transporte turbulento, a correlação pressão-deformação e os termos de dissipação.

3.2.3.2 Modelo $k - \varepsilon$ Padrão

O modelo $k - \mathcal{E}$ Padrão foi desenvolvido por Jones e Launder (1972). As constantes do modelo foram aprimoradas por Launder e Sharma (1974). Ao longo dos anos, diversos estudos foram apresentados no sentido de ampliar a generalidade e a sua precisão (CEZANA, 2007).

O conceito básico do modelo $k-\mathcal{E}$ consiste em determinar a viscosidade turbulenta com base na energia cinética turbulenta e na dissipação de energia cinética turbulenta.

$$\mu_{turb} = \frac{C_{\mu}\rho k^2}{\mathcal{E}} \tag{11}$$

Onde k é a energia cinética turbulenta; \mathcal{E} é a dissipação da energia cinética turbulenta e; $\mathcal{C}\mu$ é constante empírica do modelo.

Para determinar os valores da energia cinética turbulenta (k) e da dissipação da energia cinética turbulenta (\mathcal{E}) são resolvidas duas equações diferenciais adicionais:

$$\frac{\partial(\overline{u}_{j}k)}{\partial x_{i}} = \frac{\partial}{\partial x_{i}} \left[\left(\frac{\mu_{turb}}{\rho \sigma_{k}} \right) \frac{\partial(k)}{\partial x_{i}} \right] + P_{k} + G_{k} - \varepsilon$$
(12)

$$\frac{\partial (\overline{u_j} \mathcal{E})}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu_{turb}}{\rho \sigma_k} \right) \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial x_j} \right] + \frac{\mathcal{E}}{k} (C_1 P_k + C_3 G_k) - C_2 \frac{\mathcal{E}^2}{k}$$
(13)

Onde:

$$P_{k} = \overline{-u'_{l}u'_{J}} \frac{\partial \overline{U}_{l}}{\partial x_{i}} = \frac{\mu_{turb}}{\rho} \left(\frac{\partial \overline{U}_{l}}{\partial x_{i}} + \frac{\partial \overline{U}_{J}}{\partial x_{i}} \right) \frac{\partial \overline{U}_{l}}{\partial x_{i}}$$
(14)

$$G_k = \beta g \delta_{3i} \overline{u_i' T'} = \frac{\mu_{turb}}{\rho \sigma_t} g \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z}$$
 (15)

Onde P_k representa a produção de energia cinética turbulenta por tensão de cisalhamento; G_k é a produção de energia cinética por forças de empuxo; \mathcal{E} é a taxa de dissipação de energia cinética; C_1 , C_2 , C_3 , $\sigma_{\mathcal{E}}$, σ_k , e σ_t , são constantes empíricas para o modelo $k-\mathcal{E}$ padrão.

Assim, no modelo de turbulência k-£, as escalas de comprimento e tempo têm sua formulação a partir da energia cinética e dissipação dos turbilhões. Pode-se relacionar como desvantagem a maior dificuldade do modelo: a representação de escoamentos sujeitos a gradientes adversos de pressão, superestimando a tensão de cisalhamento. Outra desvantagem é a necessidade de modificação nas regiões próximas de parede para determinar o escoamento próximo à parede onde as forças viscosas dissipam os vórtices turbulentos (RONG et al., 2010; SANTOS et al., 2009).

Além do modelo $k - \mathcal{E}$ padrão, a literatura descreve o modelo $k - \omega$, em que viscosidade turbulenta é calculada como uma função de k e a taxa de dissipação específica ω , como apresentado na Equação que segue:

$$\mu_{turb} = \alpha^* \rho \frac{k}{\omega} \tag{17}$$

Onde α^* é calculado em função do Número de Reynolds.

Este modelo é baseado na relação entre k, ω e o comprimento característico (l), inicialmente definido por Kolmogorov:

$$\omega = \frac{Ck^{\frac{1}{2}}}{l} \tag{18}$$

Onde C é constante.

As equações que seguem representam a formulação das equações de transporte para o modelo $k-\omega$:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \overline{u}_I \frac{\partial k}{\partial x_I} = P_k - \beta^* k \omega Y_k + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(v + \sigma_k + v_T) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right]$$
(19)

$$\frac{\partial(\omega)}{\partial t} + \overline{u_J} \frac{\partial \omega}{\partial x_J} = \alpha S^2 - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + \sigma_k + v_T) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right]$$
 (20)

Onde P_k é a produção de energia cinética turbulenta por tensão de cisalhamento e ω é a taxa de dissipação.

Menter (1994) relatou que o modelo $k-\omega$ apresenta resultados mais precisos do que o modelo $k-\varepsilon$ para escoamentos compressíveis e com gradientes adversos de pressão. Este modelo se adapta melhor aos escoamentos complexos e na região próxima à parede apresentam resultados mais precisos. Segundo Furieri (2012), este modelo é fortemente dependente do refinamento da malha perto da parede.

3.2.3.4 Modelo $k - \omega$ SST

Uma variante do modelo $k-\omega$ é o modelo $k-\omega$ SST (*Shear Stress Transport*), desenvolvido por Menter (1994). O modelo $k-\omega$ SST foi projetado para dar maior precisão às previsões de separação de escoamento sob gradientes adversos de pressão, incluindo os efeitos de transporte introduzidos de viscosidade turbulenta. Esse modelo inclui duas alterações:

- A viscosidade turbulenta é modificada de acordo com a Equação 21, que representa melhor os efeitos de transporte de tensão cisalhante e assim permite resolver um número maior de problemas do que os resolvidos pelo modelo k – ε.
- A adição de um termo na Equação 23 da difusão ω e uma função específica que permite a validade das equações nas zonas próximas à parede ou distantes. Estes dois modelos de k – ω são usados para número de Reynolds baixos e altos.

$$v_T = \frac{a_1 k}{max(a_1 \omega S F_2)} \tag{21}$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \overline{u_j} \frac{\partial k}{\partial x_l} = P_k - \beta^* K \omega Y_k + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(v + \sigma_k v_T) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right]$$
 (22)

$$\frac{\partial(\omega)}{\partial t} + \overline{u}_j \frac{\partial \omega}{\partial x_i} = aS^2 - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(v + \sigma_\omega v_T) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right] + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega^2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}$$
(23)

onde os coeficientes e relações auxiliares são dados por:

$$F_2 = Tanh \left[\left[max \left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500v}{y^2 \omega} \right) \right]^2 \right]$$
 (24)

$$P_k = min\left(\tau_{ij}\frac{\delta U_i}{\delta x_i}, 10\beta^* ky\right)$$
 (25)

$$F_{1} = tanh \left\{ \left\{ min \left[max \left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^{*}\omega y}, \frac{500v}{y^{2}\omega} \right), \frac{4\sigma_{\omega 2}k}{CD_{k\omega}y^{2}} \right] \right\}^{4} \right\}$$
 (26)

Cada modelo de viscosidade turbulenta apresenta especificidades que o tornam aplicáveis ou não para cada situação. O modelo $k-\mathcal{E}$, por exemplo, apresenta resultados ótimos em pontos distantes da região de parede. Já o modelo $k-\omega$ apresenta resultados satisfatórios próximo à parede. As especificidades de cada modelo e a compreensão das características de cada um deles se deram a partir de estudos comparativos em várias aplicações de dispersão de compostos gasosos ao redor de obstáculos.

O modelo $k-\omega$ SST utiliza critérios para a definição de qual viscosidade turbulenta será utilizada em cada volume de controle, de modo que, nas regiões mais próximas à parede, o modelo $k-\omega$ é utilizado, enquanto que nas regiões mais distantes da parede o modelo $k-\varepsilon$, através do termo de difusão cruzada, é inserido na equação de taxa de dissipação específica.

Os modelos de turbulência de duas equações apresentam a desvantagem de representar excessivamente a geração de turbulência na vizinhança dos pontos de estagnação. Esta função foi criada com a finalidade de controlar a produção de energia cinética turbulenta nas regiões de estagnação, como as regiões frontais e laterais do obstáculo.

Esta formulação de limitadores para a produção de energia cinética turbulenta por cisalhamento (P_k) é apresentada a seguir:

$$P_k = \min(P_k, C_{lim} \rho \varepsilon) \tag{27}$$

 C_{lim} é definido como *Clip Factor* e tem valor igual a 10 para modelos baseados nas equações de ω , de acordo com testes anteriormente realizados por Valger e outros (2015).

3.3 ESCOAMENTO EM CÂNIONS URBANOS

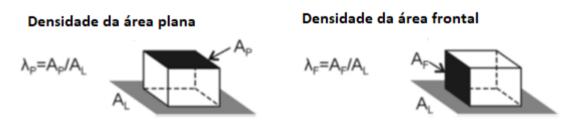
Cai e outros (2008), Liu e outros (2014), Salizzoni e outros (2009) e Salizzoni e outros (2011) realizaram estudos da interação entre o escoamento externo e o escoamento dentro do cânion.

Cai e outros (2008) utilizaram a simulação de grandes escalas (LES) na resolução de fluxos de contaminante no topo do cânion urbano e obtiveram boa concordância

ao comparar com os experimentos em túnel de vento de Barlow e outros (2004). Os fluxos médios de contaminante no topo do cânion urbano foram calculados em função da razão de aspecto ($1/3 \le H/W \le 2$) onde H é a altura do prédio e W a largura da rua.

O fluxo de vento urbano está fortemente relacionado à morfologia urbana como uma combinação da densidade urbana e da disposição mútua dos edifícios e suas formas e dimensões individuais. A densidade urbana pode ser descrita com parâmetros geométricos como a densidade da área plana (λ_P) e a densidade da área frontal (λ_F) (Figura 1) (RAMPONI et al., 2015).

Figura 1 - Definição de densidade da área plana (λ_P) e a densidade da área frontal (λ_F)



Fonte: Ramponi et al. (2015).

LIU e outros (2014) também utilizaram a simulação LES para determinar a taxa de transferência de massa de ar e de massa de poluentes do cânion urbano com razões de aspecto ½, 1 e 2. Como conclusões, obtiveram que o mecanismo de transferência de poluentes do cânion urbano para o escoamento acima, no topo do cânion urbano, é governado somente pelo transporte turbulento. E, também que à medida que a razão de aspecto aumenta, a transferência de dentro para fora do cânion diminui. Outro aspecto relevante é que alguns poluentes na camada de superfície livre que se originam a partir do cânion urbano, reentram no cânion, aumentando o tempo de retenção de poluentes nesta região, e que os poluentes que estiverem no escoamento livre a montante do cânion urbano irão ser arrastados para dentro do cânion e contribuirão para a degradação da qualidade do ar dentro do mesmo.

Segundo Liu e outros (2005), cânions urbanos com razões de aspecto menores têm maior ventilação dentro da rua do que cânions com razões de aspecto maiores. Portanto, em cânions urbanos com altos valores de razão de aspecto, pode-se

verificar a ocorrência de altas concentrações de poluentes acarretando na degradação da qualidade do ar neste local.

Caton e outros (2003) concluíram em seu estudo que a transferência de massa de poluentes entre o interior do cânion e o escoamento acima deles depende fortemente da camada cisalhante no topo do dossel urbano e, também das estruturas turbulentas geradas pelos prédios da vizinhança.

Salizzoni e outros (2009) ao final de seus estudos de transferência de massa de um contaminante entre um cânion e o escoamento acima obtiveram uma boa concordância entre os resultados experimentais em túnel de vento e os analíticos por meio de uma solução analítica de um sistema de equações diferenciais. Os autores constataram que essa transferência é governada em sua totalidade pelas flutuações do escoamento turbulento, contrapondo o conceito de ser governado pela magnitude da recirculação média.

Salizzoni e outros (2011) obtiveram como resultados de um experimento em túnel de vento (para cânion urbano bidimensional considerando atmosfera neutra) que a transferência de momentum é influenciada pelas estruturas turbulentas de escoamento externo e pelas instabilidades geradas na camada de cisalhamento na parte superior do cânion urbano.

3.4 ESCOAMENTO EM UM DOSSEL URBANO

Modelos que dão suporte para a dispersão de materiais prejudiciais de fontes pontuais em áreas urbanas devem representar não apenas a dispersão dentro do cânion urbano e a mistura com o escoamento externo, mas também as trocas nas interseções, como o ar contaminado se comporta através da rede urbana. (HUNT et al., 2004). O modelo básico para cânion urbano necessita de algumas capacidades adicionais para permitir esta consideração. Uma abordagem alternativa baseia-se no tratamento das áreas urbanas como um dossel urbano, através do qual o escoamento é determinado pelo balanço entre a força de cisalhamento acima e o arrasto dentro do dossel.

Há diversos estudos que procuram entender o padrão do escoamento e da dispersão de poluentes no interior e acima de dosséis urbanos. (DAVIDSON et al.,

1995; GRIMMOND; OKE, 1998; MACDONALD et al., 1997; MACDONALD et al., 1998; 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. 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*.

Na Figura 2 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 (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 (b), 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 (c) os prédios estão muitos 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 3.

Figura 2 - 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

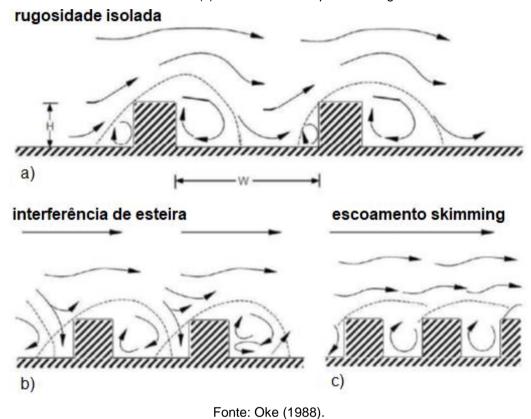
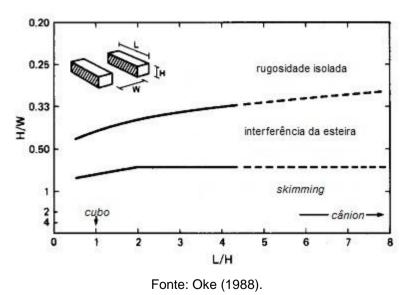


Figura 3 - Limites de separação do escoamento em três diferentes regimes em função da geometria do prédio (L/H) e do canyon (H/W)



O escoamento do tipo rugosidade isolada pode ser verificado para uma configuração em que os prédios não interagem uns com os outros. Já quando os prédios estão

mais próximos uns dos outros, a esteira do prédio a montante é perturbada pelo prédio a jusante e um fluxo descendente se forma na face central do prédio a jusante caracterizando o escoamento do tipo interferência da esteira. E o terceiro, escoamento do tipo *skimming*, é atribuído a uma recirculação que aparece entre os prédios muito próximos, em que o escoamento dentro da rua se dissocia do escoamento acima dos prédios.

A disposição dos prédios, considerando os espaçamentos entre eles, tem uma forte influência no padrão de escoamento. Ao variar a direção do vento, também se percebe uma mudança no padrão do escoamento, evidenciando também uma forte influência da mesma. (BRANFORD et al., 2011; GARBERO et al., 2010; KIM; BAIK, 2004).

Garbero e outros (2010) realizaram um experimento em túnel de vento para investigar a influência da direção do vento no escoamento e dispersão de poluentes em uma matriz densa de obstáculos de mesmas alturas. Os autores variaram o espaçamento entre os prédios na direção x (direção preferencial do escoamento) e na direção y (direção transversal ao escoamento) e concluíram que há um maior espalhamento da pluma de poluentes quando o espaçamento na direção preferencial do escoamento é duas vezes maior ou igual o espaçamento na direção transversal ao escoamento. Em relação ao ângulo de incidência, à medida que este aumenta, há um maior espalhamento da pluma de contaminantes.

Branford e outros (2011) ao utilizarem 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, concluíram que a dispersão topológica contribui para a dispersão lateral de escoamentos oblíquos. A dispersão topológica ocorre quando o escoamento colide com os obstáculos e acontece a separação deste escoamento, gerando um escoamento mais turbulento, e a dispersão lateral é amplificada.

Além da razão de aspecto e da direção da velocidade do vento, outro parâmetro que influencia fortemente no escoamento e dispersão de poluente para o contexto de regiões urbanas é a velocidade de transferência. Este parâmetro é usado para estabelecer as trocas de massa de poluentes entre o interior do dossel urbano e o escoamento acima dele.

Hamlyn e Britter (2005) fizeram um trabalho com objetivo de examinar o escoamento dentro do dossel urbano e os processos de transferência no topo do dossel urbano, e a dependência em relação à densidade de rugosidade. De acordo com os autores, em geometrias mais realísticas, 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.

Estão sendo desenvolvidos, recentemente, trabalhos com o objetivo de entender o padrão do escoamento e da dispersão de poluentes em regiões urbanas considerando geometrias mais realísticas que envolvem prédios com diferentes alturas, larguras, formatos e com diferentes disposições. (BOPPANA et al. 2010; CARPENTIERI et al., 2012; CARPENTIERI et al., 2009; CHENG; CASTRO, 2002; XIE et al., 2008; XIE et al., 2013).

Xie e outros (2008) investigaram o comportamento do escoamento ao redor de um grupo de obstáculos com diferentes alturas utilizando a simulação de grandes escalas (LES), para introduzir os efeitos de turbulência, e na validação dos resultados foram utilizados os dados do experimento de Cheng e Castro (2002). Ademais, os autores realizaram comparações dos resultados obtidos com resultados de outras simulações numéricas (obtidas através de LES) que consideraram um conjunto de prédios de mesmas alturas, para verificar os efeitos que diferentes alturas provocam no escoamento. Foi observado que há uma maior complexidade do escoamento ao redor do conjunto de prédios com diferentes alturas ao afirmarem que o escoamento depende fortemente da disposição e altura desses prédios.

Boppana e outros (2010) realizaram uma simulação numérica utilizando LES para investigar a dispersão de poluentes de uma fonte de área no interior de um conjunto de prédio com blocos de mesma altura, e, também para blocos de diferentes alturas. Para o conjunto de prédios de mesma altura a distribuição de concentração de poluentes é aproximadamente gaussiana, em particular para distâncias mais a jusante da fonte e isso não acontece no caso de prédios de diferentes alturas. A pluma de contaminantes para este último cenário fica bastante alterada, diferenciando-se muito da pluma de poluentes ao redor do conjunto de prédios de alturas iguais. Também foi confirmado que uma maior dispersão vertical ocorre no caso do conjunto de prédios de alturas diferentes.

4 METODOLOGIA

Para este trabalho foi utilizado o método numérico de volumes finitos para resolução das equações diferenciais, dentre os métodos mais utilizados (diferenças finitas, volumes finitos e elementos finitos). Este método envolve a divisão do domínio computacional em volumes de controle discretos. Assim, as equações governantes são integradas sobre cada volume de controle, cujo domínio espacial foi discretizado, de modo que todas as quantidades de interesse (massa, energia, quantidade de movimento e espécie química) sejam conservadas de maneira discreta sobre cada volume de controle. A cada volume de controle dentro da malha existe um nó que está cercado por um conjunto de superfícies que compreendem o volume finito. Todas as soluções das variáveis e propriedades fluidas são armazenadas nos nós do elemento.

Para a integração das equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia sobre um volume de controle fixo aplica-se o Teorema de Divergência de Gauss, que possibilita a conversão de integrais de volume em integrais de superfície. As integrais de volume correspondem aos termos de fonte ou acumulação e as integrais de superfície correspondem aos fluxos que cruzam as superfícies do volume de controle.

Neste estudo, foi empregado o software comercial FLUENT (ANSYS Inc.) para resolução das equações diferenciais utilizando o método de volumes finitos. O Fluent utiliza um esquema co-localizado, no qual os valores de pressão e velocidade são armazenados no centro das células (método *upwind* de 1ª ordem). Para calcular os valores de pressão nas faces a partir dos valores no centro das células é utilizado um esquema de interpolação utilizando os coeficientes da equação de quantidade de movimento (método *upwind* de 2ª ordem).

Foram tomados os seguintes passos para a realização da simulação no Fluent: a modelagem da geometria, a definição da malha; a configuração do método e condições de análise, a resolução pelo software; e os resultados.

Este capítulo é dividido em três principais seções, descrevendo primeiramente os modelos de dosséis urbanos considerados neste trabalho, onde são apresentadas as características geométricas e espaciais dos mesmos. Posteriormente, há uma

breve descrição dos experimentos de túnel de vento realizados por Carpentieri e outros (2015), em que as medições de velocidade horizontal média obtidas foram utilizadas na validação das simulações numéricas realizadas neste trabalho. Na última seção, são apresentadas as diretrizes tomadas nas simulações numéricas para prever o escoamento nas áreas de estudo.

4.1 INTRODUÇÃO AOS MODELOS

O local de estudo do projeto DAPPLE está localizado em Westminster, no centro de Londres, na interseção entre as ruas Marylebone Road e Gloucester Place (Figura 4) (ARNOLD et al., 2004; CARPENTIERI et al., 2009). Esta interseção foi escolhida para estudo pois, segundo Arnold e outros (2004), está documentado como sendo uma das regiões mais poluídas de Londres (SCAPERDAS et al., 2000).

A rua Marylebone Road é uma via dupla movimentada com até sete faixas de largura, enquanto Gloucester Place tem três faixas, sendo uma via única com sentido norte. O vento na região é predominantemente sudoeste (ARNOLD et al., 2004; CARPENTIERI et al., 2009).

Carpentieri e outros (2009) realizaram experimentos de túnel de vento no Centro de Pesquisa de Fluxo Ambiental (EnFlo), Universidade de Surrey, Reino Unido. O modelo em escala 1:200 reproduzindo o local de estudo do projeto DAPPLE pode ser observado na Figura 5. Este modelo foi denominado como modelo DAPPLE.

No modelo DAPPLE, foi considerada a rua Marylebone Road ao longo do eixo x, e a rua Gloucester Place ao longo do eixo y. A altura média dos edifícios (Hb) na parte central do modelo é de 102 mm (aproximadamente 20 metros na escala real). O índice conhecido como densidade da área plana dos prédios (λ_P) é de 0,54 e o índice conhecido como densidade da área frontal dos prédios da área frontal (λ_F) é 0,24 para a direção do vento paralela ao eixo x, e 0,16 para a direção do vento paralela ao eixo y (CARPENTIERI et al., 2015).

Figura 4 - Interseção entre as ruas Marylebone Road e Gloucester Place, em Westminster, no centro de Londres, UK



Fonte: Google Earth Pro.

Carpentieri e outros (2015) utilizaram dois modelos para investigar a influência da variabilidade da altura do edifício no fluxo do ar e dispersão de poluentes para o local de estudo do projeto DAPPLE. O ponto de partida para o arranjo dos modelos elaborados em Carpentieri e outros (2015), Figura 5, foi o modelo em escala 1:200 (ARNOLD et al., 2004; CARPENTIERI et al., 2009). O modelo mais simples, denominado SimpleC com altura dos edifícios constante igual a Hb, e o outro modelo, projetado com edifícios de cinco alturas diferentes (65 mm, 85 mm, 102 mm, 135 mm e 162 mm), o SimpleV. Para a distribuição das alturas dos prédios no modelo SimpleV corresponder ao modelo DAPPLE, foi feita uma divisão em cinco classes de faixas de altura (55-75 mm, 75-95 mm, 95-115 mm, 115-155 mm e 155-170 mm). A altura de 102 mm foi escolhida para a classe de 95-115 mm por conveniência. As outras alturas foram ajustadas para fornecer a altura média (Hb), os índices λ_p e λ_f , e a variabilidade da altura (σ = 32 \emph{mm}), obtidos para o modelo DAPPLE. A distribuição dos diferentes edifícios no modelo SimpleV foi definida para fornecer uma simetria ao longo da interseção, com os quatro edifícios centrais escolhidos com uma altura de 102 mm, a fim de ter uma similaridade na parte central dos modelos SimpleC e SimpleV.

Os dois modelos estão também em uma escala de 1:200 com duas ruas principais que se interceptam e várias ruas menores, aproximadamente correspondentes as do

modelo DAPPLE. As ruas principais denotam larguras de: 220 mm e 110 mm, respectivamente. Os edifícios ocupam no total uma área de 230 x 350 mm^2 (organizados com a maior dimensão ao longo do eixo y). Para corresponder ao λ_P igual a 0,54 obtido para o modelo DAPPLE, foi determinado um conjunto de 6 x 8 edifícios, com a largura das ruas secundárias igual a 99 mm. O sistema de coordenadas está alinhado com o do modelo DAPPLE, o eixo x é sempre paralelo à rua mais larga, com o eixo y perpendicular a ele com uma origem no centro do modelo.

Como pode ser observado na Figura 5 e na Figura 6 a principal característica do modelo DAPPLE é a representação mais real do local de estudo, quando comparado com estudos mais simples (LIU et al., 2005; SALIZZONI et al., 2011; BELCHER et al., 2015; GOULART, 2012), ao denotar alturas e geometrias dos edifícios diferentes, além da rua Marylebone ser duas vezes mais larga que a Gloucester Place (CARPENTIERI et al., 2009). Pode ser observado na Figura 5 e na Figura 6 que há duas torres, uma com pequena seção transversal (WCC, Westminster City Council), já a outra, com uma seção transversal ampla (MH, Marathon House). Vale ressaltar que apesar de se aproximar mais do real, os edifícios ainda assim foram reduzidos a blocos cúbicos simples com telhados planos.

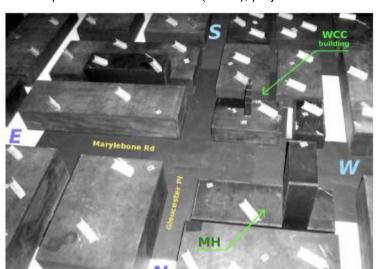
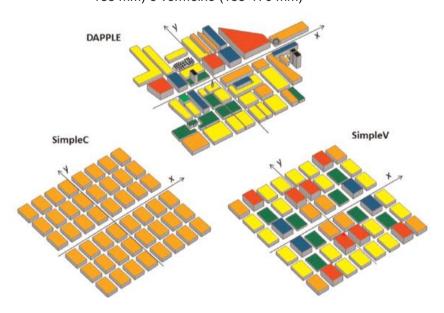


Figura 5 - Modelo no túnel de vento de escala 1:200 dos experimentos realizados no Centro de Pesquisa de Fluxo Ambiental (EnFlo), projeto DAPPLE.

Fonte: Carpentieri et al. (2009).

Figura 6 - Representação 3D dos modelos: DAPPLE, SimpleC e SimpleV; as cores representam o alcance da altura do edifício: verde (55-75 mm), amarelo (75-95 mm), laranja (95-115 mm), azul (115-155 mm) e vermelho (155-170 mm)



Fonte: Carpentieri et al. (2015).

4.2 DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS DE TÚNEL DE VENTO

Neste trabalho, foram realizadas simulações numéricas com CFD para os dois modelos desenvolvidos em Carpentieri e outros (2015) e para o modelo DAPPLE. Para a validação das simulações, então, foram utilizados os dados do experimento

de túnel de vento de Carpentieri e outros (2015). O estudo de validação fundamentou-se nos perfis verticais da velocidade horizontal média.

Os experimentos de túnel de vento foram realizados no Centro de Pesquisa de Fluxo Ambiental (EnFlo), Universidade de Surrey, Reino Unido. É um túnel de vento de "circuito aberto" com $20\ m$ de comprimento, $3.5\ m$ de largura e $1.5\ m$ de altura. A velocidade do vento pode estar na faixa de $0.3\ a\ 3.5\ ms^{-1}$. O modelo é instalado em uma plataforma giratória para que possa ser girada para investigar várias direções do vento. As condições de fluxo de referência são medidas por dois anemômetros ultrassônicos, um mantido em um local fixo e o outro posicionado conforme necessário, e dois anemômetros de hélice montados em lados transversais do túnel de vento; a velocidade do eixo do motor também é medida. As condições de temperatura são monitoradas por ancinhos de termopar no fluxo, e termopares individuais em cada painel de parede do túnel de vento. A queda de pressão na entrada também é monitorada. O túnel de vento e a instrumentação associada são totalmente automatizados e controlados utilizando o ambiente de programação gráfica denominado LabVIEW (CARPENTIERI et al., 2015).

Anteriormente ao início da execução do plano experimental, foram feitas medidas preliminares para validar as metodologias de medição e testar a configuração do túnel de vento. Além disso, foi considerado como necessário um conjunto de medições com dados de alta qualidade para serem aplicados como condições de contorno nas simulações numéricas a serem descritas no item 4.3.

Os testes preliminares foram realizados no modelo SimpleC para a rotação 0° . Para os testes de condições de contorno, as medidas também foram realizadas novamente com um túnel vazio para avaliar a influência do modelo no fluxo de aproximação. De maneira padrão, foi produzida uma camada limite bem desenvolvida a montante do modelo com uma espessura de aproximadamente 1 m, um comprimento de rugosidade da superfície de 1,5 mm (equivalente a 0,3 m na escala total) e uma velocidade de fricção normalizada, $u_*/U_{ref}=0,057$. Todos os testes preliminares foram realizados usando uma velocidade de referência medida acima da camada limite de 2,5 m/s (medida a 1 m de altura). O número de Reynolds embasado na altura média do edifício para as condições experimentais foi de aproximadamente $1,7 \times 10^4$.

A técnica de anemometria Doppler a laser (LDA) foi utilizada por Carpentieri e outros (2015) para medir o fluxo de vento nos pontos selecionados para estudo nos modelos SimpleC e SimpleV. Para emprego desta técnica, o laboratório do EnFlo está equipado com um sistema de detecção de heteródina óptica. Um gerador de neblina ultrassônica é usado para produzir partículas de tamanho adequado para as medições LDA (gotículas de tamanho 2 *mm*), as quais são sopradas para distante da superfície por um ventilador. O tipo de fluido usado (uma mistura de água e açúcar) tem um alto índice de refração, para garantir que a dispersão da luz tenha uma boa visibilidade.

Avaliaram-se os perfis de fluxo médio vertical e de turbulência, a partir de medições das componentes x e y da velocidade média, respectivamente U e V, e componentes das flutuações da velocidade, respectivamente u e v, feitas utilizando um sistema LDA de dois componentes. Dois arranjos espaciais diferentes da grade de medição foram testados: a primeira grade foi focada na interseção central, enquanto a segunda grade cobriu uma área mais ampla com uma resolução espacial mais baixa.

As medições foram realizadas com uma velocidade do vento de referência de 2,5 m/s para as 3 direções do vento consideradas em Carpentieri e outros (2015) ao rotacionar o modelo em 0° , 90° e 45° , em que para a rotação 0° a direção do vento é ao longo do eixo x e para a rotação 90° a direção do vento é ao longo do eixo y. As medições ocorreram durante um período de um minuto (tempo médio de um minuto) como feito em experimentos anteriores para o modelo DAPPLE (CARPENTIERI et al., 2009). Para arranjo espacial de alta resolução (grade de medição focada na interseção central) as medições de perfis verticais foram até aproximadamente 3Hb. Já para o arranjo espacial de menor resolução (grade de medição cobrindo uma área mais ampla) os perfis verticais foram medidos até aproximadamente 6Hb. Ambos os modelos SimpleC e SimpleV foram testados (CARPENTIERI et al., 2015).

O perfil vertical de velocidade de entrada (componente x da velocidade, U,) resultante das medições realizadas (Figura 7) foi utilizado como condição de contorno para as simulações numéricas.

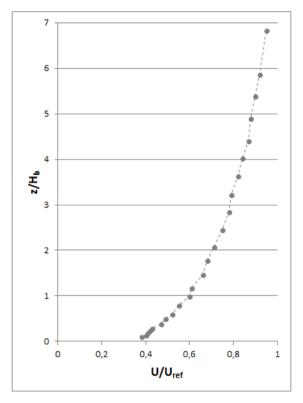


Figura 7 - Perfil vertical de velocidade de entrada (componente x da velocidade), medições em túnel de vento

4.3 DESCRIÇÃO DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

Neste trabalho, foram realizadas simulações numéricas com CFD para os modelos SimpleC e SimpleV e para o modelo DAPPLE, considerando duas diferentes direções do vento (0º e 90º).

O tamanho do domínio computacional foi determinado de acordo com as diretrizes existentes para realizar simulações de fluxos atmosféricos em áreas urbanas, para escala local e na vizinhança (FRANKE et al., 2007; TOMINAGA et al., 2008).

Geralmente o domínio computacional contém apenas uma fração da área urbana, logo, o posicionamento dos limites do mesmo influencia nos resultados das simulações. Essa influência pode levar a erros se a escolha não for adequada.

As condições de contorno determinadas para os limites do domínio computacional representam a influência do entorno que foi cortado pelos mesmos. A solução no interior do domínio computacional é em grande parte determinada pelas condições de contorno, entretanto, muitas vezes estas não são totalmente conhecidas, com

adoção de condições de contorno aproximadas. Assim, os limites do domínio computacional devem estar longe o suficiente da região de interesse para que a solução não seja afetada.

Franke e outros (2007) recomendam para simulações que devem ser comparadas com medições de túnel de vento, utilizar a seção transversal do túnel de vento como domínio computacional, ou seja, o domínio computacional deve ter a mesma extensão lateral que a do túnel de vento, além também da mesma altura. Dessa forma, é replicada a geometria da seção do túnel de vento com precisão.

Para uma altura do túnel de vento muito maior que 6*Hmáx* (altura máxima), pode ser testada uma altura menor do domínio computacional (FRANKE et al., 2007). Tominaga e outros (2008) sugerem que a altura do domínio computacional deve ser ajustada para corresponder à altura da camada limite.

Novamente, se a distância das paredes laterais do túnel de vento do conjunto de prédios for muito maior que 5*Hmáx*, então uma menor extensão lateral do domínio computacional pode ser testada (FRANKE et al., 2007).

No que diz respeito à extensão longitudinal do domínio computacional na direção do fluxo, Franke e outros (2007) recomendam utilizar no mínimo 5*Hmáx* para a região na frente do conjunto de prédios (fluxo de aproximação) e, no mínimo 15*Hmáx* para a região atrás do conjunto de prédios (região de esteira turbulenta).

Como em Carpentieri e outros (2015), para os dois casos (0° e 90°) e para o modelo DAPPLE, a distância longitudinal do limite de entrada para a primeira linha de prédios foi correspondente a 5*Hb*, enquanto a distância a favor do vento da última linha de prédios para o limite de saída foi definida como 15*Hb*.

Os limites laterais foram determinados de forma equivalente à configuração do túnel de vento para os modelos SimpleC e SimpleV e para o modelo DAPPLE apenas na direção 0º, já para o modelo DAPPLE na direção 90º, foi preciso expandir os limites laterais. Em todos os casos, como em Carpentieri e outros (2015), o limite superior foi determinado como sendo 6,86*Hb*.

Neste trabalho, a condição de entrada foi determinada de acordo com as medições do túnel de vento mencionadas no item 4.2. No limite de saída foi considerada a condição de pressão manométrica nula, limite aberto. Nas superfícies sólidas, chão e paredes dos prédios, foi considerada a condição de não deslizamento (*no-slip*),

onde as componentes da velocidade são nulas, e de superfície lisa. No topo do domínio foi considerada a condição de cisalhamento livre (*free-slip*). Nos limites laterais para os dois casos (0° e 90°) foi considerada a condição de cisalhamento livre (*free-slip*), essa condição permite que o fluido deslize livremente.

Para simulações RANS de fluxo estacionário, Franke e outros (2007) afirmam que as condições de pressão manométrica nula são normalmente aplicadas para o limite de saída. Com uma condição de contorno de saída, as derivadas de todas as variáveis de fluxo deixam de serem calculadas, correspondendo a um fluxo totalmente desenvolvido. Essas condições de contorno permitem que o fluido entre no domínio através do limite de saída, o que deve ser evitado, segundo Casey e Wintergerste (2000), pois pode afetar negativamente a convergência da solução ou até mesmo permitir que nenhuma solução convergente seja alcançada. Portanto, o limite de saída deve estar idealmente longe o suficiente do conjunto de prédios para não haver nenhum fluido entrando no domínio computacional através deste limite (FRANKE et al., 2007).

Todas as simulações numéricas foram realizadas empregando o software comercial FLUENT 14.5 (ANSYS Inc.). Para solução do escoamento utilizou-se o método *upwind* de segunda ordem.

Neste trabalho considera-se o fluido newtoniano e incompressível e a atmosfera neutra, em que as simulações foram definidas para um escoamento permanente. As equações de Médias de Reynolds (RANS) foram utilizadas para simular fluxos atmosféricos ao longo da área de estudo e foram resolvidas pelo método dos volumes finitos, descrito por Patankar (1980). Para os modelos SimpleC e SimpleV, foram investigados três modelos de turbulência para o tensor das tensões de Reynolds: Modelo RSM, Modelo $k-\mathcal{E}$ e Modelo $k-\omega$ SST. Após selecionado o modelo de turbulência mais adequado, foi utilizado apenas este para simulações no modelo DAPPLE.

Em todos os casos, as equações foram resolvidas usando o algoritmo SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation). Este algoritmo é baseado na relação conhecida como acoplamento pressão-velocidade, para qual há a hipótese de que a velocidade fornecida pela solução da equação de conservação da quantidade de movimento somente irá satisfazer a equação de conservação de

massa se o campo de pressão estiver correto, e para isso deve-se corrigir tanto a velocidade como a pressão (COSTA, 2016).

A solução das simulações numéricas foi considerada convergida quando os resíduos estavam em 10^{-4} para todas as variáveis. Frank e outros (2007) relatam que os resíduos indicam até que ponto a solução atual está distante da solução exata do sistema algébrico de equações dentro de cada célula.

A malha gerada para os modelos de turbulência $k-\omega SST$ e RSM contém aproximadamente 5,5 milhões de nós, sendo que para este modelo foi necessária uma distância não-dimensional y^+ menor que 5. Para o modelo de turbulência $k-\varepsilon$ foi gerada uma malha com aproximadamente 5,6 milhões de nós, e definida uma distância não-dimensional y+ como menor que 11. Estas malhas foram determinadas para ambos os modelos SimpleC e SimpleV. Para o modelo DAPPLE, foi gerada uma malha para o modelo de turbulência $k-\omega SST$ com aproximadamente 6,3 milhões de nós. O número de células superficiais na seção da rua principal paralela ao eixo y é 11, sendo 8 células nas seções das ruas menores (ruas secundárias) e 22 na seção da rua principal paralela ao eixo x.

5 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados das simulações numéricas para o escoamento em um meio urbano. Os resultados estão divididos em quatro seções principais. A seção 5.1 apresenta a validação das simulações numéricas. A seção 5.2 apresenta os resultados para as simulações em um conjunto de prédio de alturas uniformes. A seção 5.3 apresenta os resultados para as simulações em um conjunto de prédios de alturas variáveis. A seção 5.4 discutirá a influência da morfologia urbana no escoamento.

5.1 COMPARAÇÃO COM DADOS DE TÚNEL DE VENTO

O primeiro passo na análise dos dados obtidos neste trabalho é avaliar a acurácia do modelo numérico, através da comparação dos resultados com os dados experimentais. Nesta seção é apresentada a comparação entre as simulações numéricas realizadas para os modelos SimpleC e SimpleV, utilizando diferentes

modelos de turbulência, com resultados obtidos em experimento de túnel realizado por Carpentieri e outros (2015).

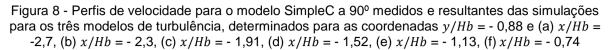
Para validação utilizou-se as medições do arranjo espacial de alta resolução, com grade de medição focada na interseção central.

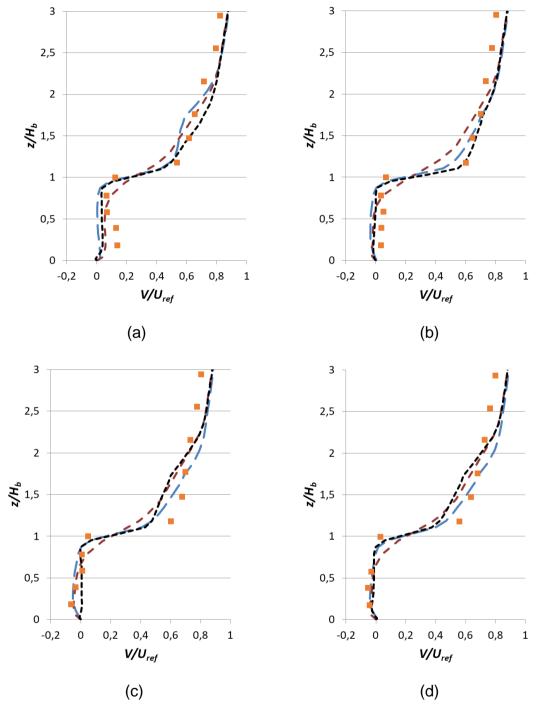
O desempenho de diferentes modelos de turbulência, isto é, os modelos k-epsilon $(k - \mathcal{E})$, k-omega SST $(k - \omega SST)$ e RSM, foram testados na simulação numérica.

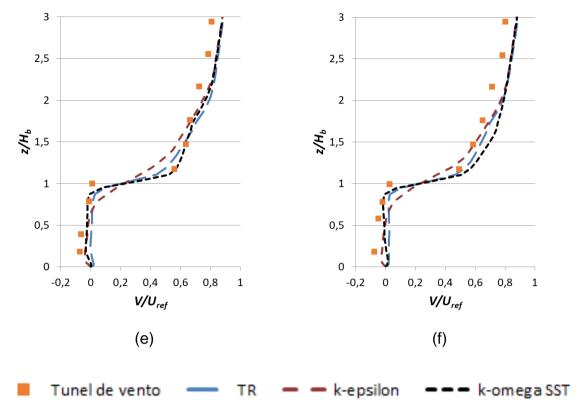
Dados dos experimentos realizados no túnel de vento em 0º infelizmente não estão disponíveis para os casos estudados por Carpentieri e outros (2015) e, portanto, a validação foi conduzida através da análise de semelhança entre os dados experimentais e os das simulações numéricas na direção do vento 90º.

A Figura 8 e a Figura 9 mostram perfis verticais da velocidade horizontal média resultantes dos experimentos de túnel de vento e das simulações feitas para os três modelos de turbulência, determinados para seis diferentes posições, com a coordenada y fixa em y/Hb=-0.88 e as coordenadas x variando em (a) x/Hb=-2.70; (b) x/Hb=-2.30; (c) x/Hb=-1.91; (d) x/Hb=-1.52; (e) x/Hb=-1.13; (f) x/Hb=-0.74. Dadas às limitações conhecidas de simulações RANS de fluxos estacionários as figuras mostram um acordo global justo entre os resultados das simulações e as medições do túnel de vento, com os melhores ajustes fornecidos pelo modelo $k-\omega$ *SST*, para ambos os modelos.

O modelo $k-\omega$ SST ganhou popularidade nos últimos anos principalmente porque seu desempenho é muito melhor do que os modelos $k-\mathcal{E}$ para fluxos de camada limite. Para separação, transição, baixos efeitos de Re e impacto, o modelo $k-\omega$ SST é mais preciso do que modelos $k-\mathcal{E}$, pois é mais exato e robusto para uma ampla gama de fluxos de camada limite com gradiente de pressão (ANSYS Inc). Com isso, os resultados indicam que as simulações numéricas são capazes de reproduzir com precisão os valores experimentais de velocidade nas fachadas dos prédios.





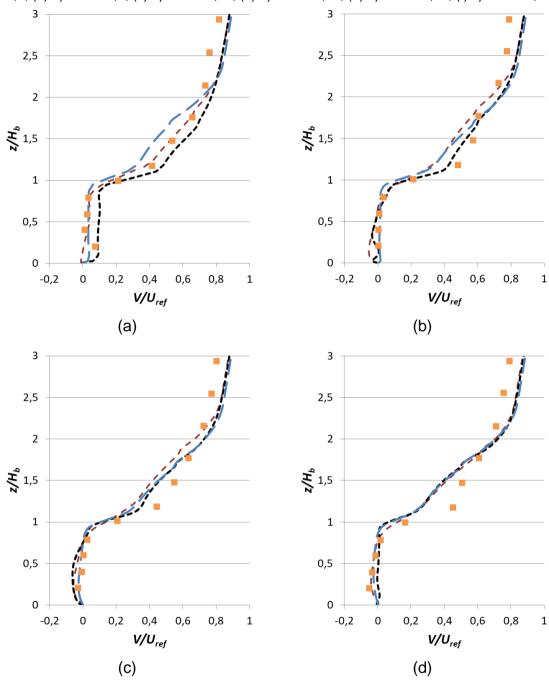


O número de Reynolds resultante baseado na altura média do edifício para as simulações numéricas dos modelos SimpleC e SimpleV foi aproximadamente Re = 6563,92 e Re = 7960,38, respectivamente. Embora o número de Reynolds seja muito pequeno em comparação com os típicos números de Reynolds encontrados nos fluxos atmosféricos reais, evidências de medições em túneis de vento (CASTRO; ROBINS, 1977) e simulações de grande escala (XIE; CASTRO, 2006) sugerem que a dependência do número de Reynolds de fluxos sobre obstáculos como a geometria deste estudo é fraca. Cheng e Castro (2002) encontraram pouca variação no coeficiente de arrasto para os valores de Re entre 5000 e 12000.

Dado o bom desempenho demonstrado de simulações RANS CFD 3D para fluxos permanentes com modelos do tipo $k-\omega$ SST para a velocidade média do vento e a concordância satisfatória no presente estudo de validação com o modelo $k-\omega$ SST, foi decidido realizar as simulações numéricas com este modelo de turbulência para análise dos fluxos atmosféricos nas áreas estudadas.

Na Figura 10 se encontram as malhas dos três modelos simulados: (a) SimpleC, (b) SimpleV e (c) DAPPLE. Foi realizado um refinamento local da malha perto dos prédios, na parte inferior do domínio.

Figura 9 - Perfis de velocidade para o modelo SimpleV a 90° medidos e resultantes das simulações para os três modelos de turbulência, determinados para as coordenadas y/Hb = -0.88 e (a) x/Hb = -2.7, (b) x/Hb = -2.3, (c) x/Hb = -1.91, (d) x/Hb = -1.52, (e) x/Hb = -1.13, (f) x/Hb = -0.74



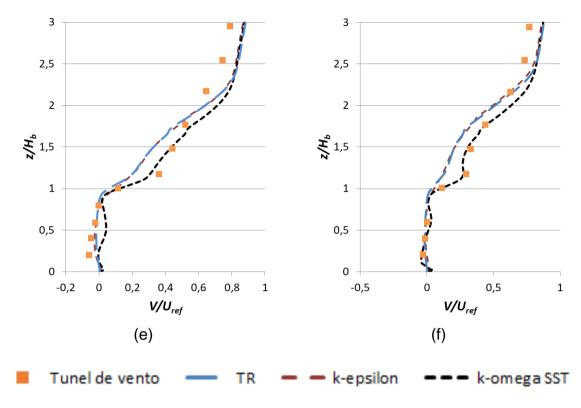
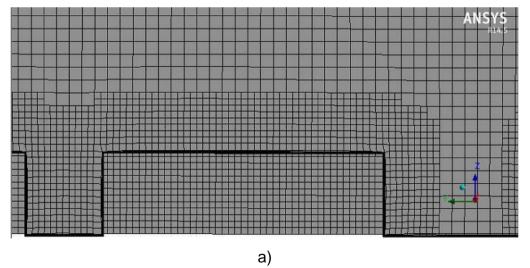
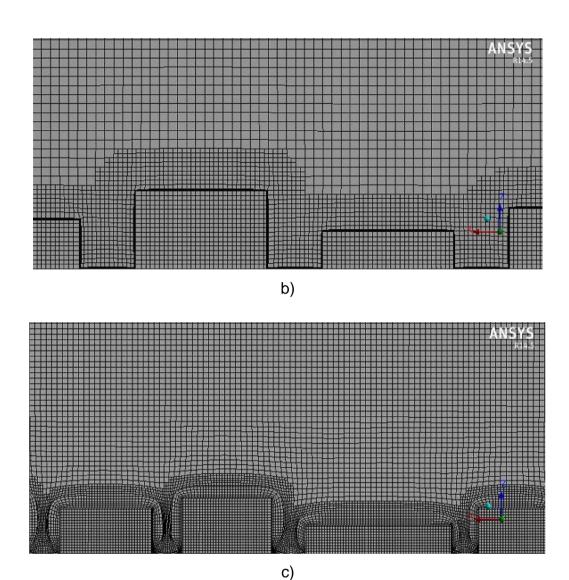


Figura 10 - Malha Computacional dos modelos: (a) Simplec, (b) SimpleV e (c) DAPPLE





Fonte: Autoria própria.

5.2 ANÁLISE DO ESCOAMENTO EM UM CONJUNTO DE PRÉDIOS DE ALTURAS UNIFORMES

Nesta seção serão apresentados os resultados da simulação numérica RANS com o modelo de turbulência $k-\omega$ SST para o modelo SimpleC, considerando duas direções do vento (0º e 90º).

A finalidade principal é analisar o escoamento do ar através de um conjunto de prédios alinhados, de alturas uniformes. Primeiramente serão abordados os resultados para direção do vento 0°, e por fim, para direção do vento 90°, com uma comparação para estas duas diferentes direções do vento.

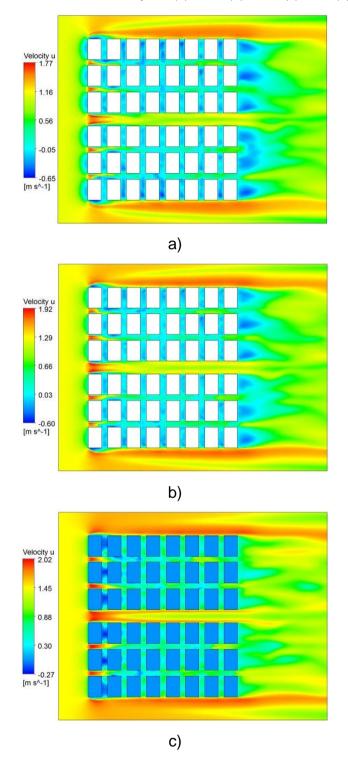
Como já mencionado no item 4.3, foi considerada uma atmosfera com estabilidade neutra. Segundo Stull (1988), a estabilidade neutra requer que não haja convecção além de uma taxa de variação vertical adiabática. O principal mecanismo que modifica o escoamento ao redor do prédio é devido às tensões de cisalhamento atribuídas pelas paredes.

A Figura 11 apresenta a distribuição da velocidade para direção do vento 0° no plano horizontal xy em quatro diferentes alturas, Hb/4, Hb/2, Hb e 2Hb. Na Figura 12 pode-se visualizar as linhas de corrente do escoamento médio para direção do vento 0° no plano horizontal xy para as mesmas alturas.

A condição de entrada do estudo é o perfil de velocidade medido em túnel de vento, assim, há uma introdução de fluxo na área de estudo, na direção do vento selecionada, como pode ser observado na Figura 11 e na Figura 12. Esta situação é muitas vezes diferente da situação real, em que o escoamento é influenciado por configurações existentes ao entorno da área de estudo.

Para análise do escoamento do ar ao longo do modelo SimpleC no plano horizontal xy, o foco se dará para as alturas Hb/2 e Hb uma vez que existe uma influência considerável do chão no escoamento para a altura Hb/4, e para a altura 2Hb há um escoamento livre, apresentando pequenas perturbações remanescentes. Segundo Costa (2016), no escoamento menos turbulento, há um comportamento de maneira suave, como se uma camada de fluido deslizasse suavemente sobre a outra. Neste os efeitos viscosos são significativos e conseguem suprimir as instabilidades do escoamento, já para o escoamento com tensões cisalhantes consideráveis, o escoamento é caracterizado por vórtices turbulentos.

Figura 11 - Distribuição da velocidade ao longo do modelo SimpleC para direção do vento 0º no plano horizontal xy em (a) Hb/4, (b) Hb/2, (c) Hb e (d) 2Hb



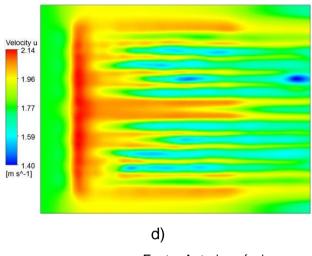
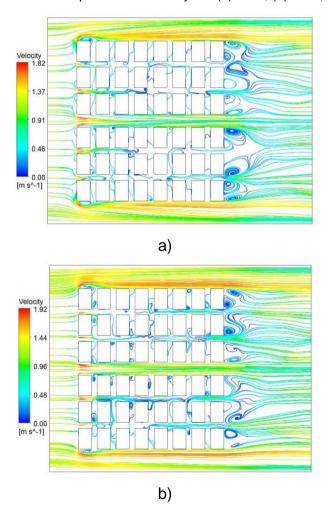
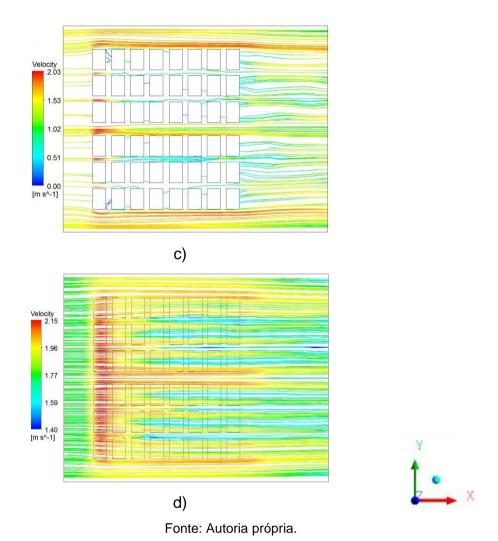




Figura 12 - Linhas de corrente do escoamento médio ao longo do modelo SimpleC para a direção do vento 0º no plano horizontal xy em (a) Hb/4, (b) Hb/2, (c) Hb e (d) 2Hb





Observando-se as letras (b) e (c) na Figura 11 e na Figura 12 pode-se notar que os resultados obtidos foram de acordo com os esperados. Estruturas do escoamento de ar ao redor dos prédios serão relatadas a seguir, além das características do mesmo nas ruas entre os prédios.

O escoamento na camada limite atmosférica se desenvolve em geral em regime turbulento, principalmente os escoamentos ao redor de obstáculos, uma vez que na região próxima aos obstáculos, as tensões cisalhantes passam a ser mais evidentes, por conta do gradiente da velocidade formado no contato do fluido com as superfícies. Segundo Foken (2008), o meio onde vive a humanidade funciona como uma fonte de fricção que causa modificações no campo do vento. De acordo com Santos (2004), a rugosidade formada pela superfície das massas edificadas altera significativamente o fluxo de ar, pois modifica seu movimento natural laminar para um movimento turbilhonar através do efeito de fricção que exerce sobre o ar em movimento.

O escoamento incidente é separado pela presença de prédios, o fluxo é desacelerado ao atingir os prédios, com regiões de velocidades reduzidas. Neste ponto ocorre a chamada região de estagnação determinada por altos valores de pressão estática (COSTA, 2016). O fluxo desacelerado é separado e segue para as laterais, ruas adjacentes aos prédios, e para o teto. Nas entradas das ruas, pode-se perceber que há um aumento da velocidade devido à canalização. A velocidade diminui ao longo das ruas na direção longitudinal pelo atrito entre o ar em movimento e as laterais dos prédios, surgindo as tensões cisalhantes responsáveis pela dissipação de energia cinética que pode ser convertida em calor. A rua principal com uma maior largura, permite um fluxo com maiores velocidades. Da mesma forma, o cisalhamento do vento junto à superfície superior faz com que haja dissipação de energia cinética, caracterizando um fluxo com velocidades reduzidas na região logo acima dos prédios. Portanto, temos um escoamento livre acima dos prédios predominantemente laminar e um fluxo inferior (abaixo do topo dos prédios) predominantemente turbulento.

Para os prédios nas extremidades da primeira fileira (posição considerando o fluxo de aproximação), notam-se recirculações evidentes nas suas laterais externas, decorrente das estruturas turbulentas formadas, direcionando o fluxo para as laterais e para o teto, como visto na letra (b) da Figura 12. Assim, no teto e nas laterais dos prédios ocorrem regiões de velocidades negativas (sentido contrário à direção principal do escoamento).

O escoamento observado nas laterais do conjunto de prédios é acelerado pois não há obstáculos (Figura 11 e Figura 12), alcançando altas velocidades.

Nos planos elaborados para a altura Hb/2, letra (b) da Figura 11 e da Figura 12, nota-se que há pouco fluxo direcionado proveniente da rua principal de maior largura para as ruas transversais secundárias e, também para a rua principal de menor largura. E podem ser observadas zonas de recirculações entre os prédios. Nestas regiões as velocidades agem no sentido contrário à direção principal do escoamento, caracterizadas por velocidades longitudinais negativas. A direção do vento é perpendicular as ruas em que ocorrem recirculações, o que cria zonas de baixa velocidade que propiciam a formação de vórtices nas mesmas.

Nos planos elaborados para a altura Hb, letra (c) da Figura 11 e da Figura 12, podese notar um fluxo mais laminar, atentando-se às recirculações presentes na rua entre as duas primeiras fileiras de prédios. Na letra (c) da Figura 11, os prédios estão todos na coloração que a escala de velocidade determina como aproximadamente nula nesta altura, devido a condição de contorno de não deslizamento nas paredes sólidas.

Na Figura 14 observa-se a distribuição da velocidade para direção do vento 0º no plano vertical xz para uma região previamente escolhida (Figura 13). Na Figura 15 se encontra o campo de vetores de velocidade para a direção do vento 0º no plano vertical xz na mesma região.

Figura 13 - Localização no plano horizontal *xy* selecionada para análise do escoamento para direção de vento 0º no modelo SimpleC

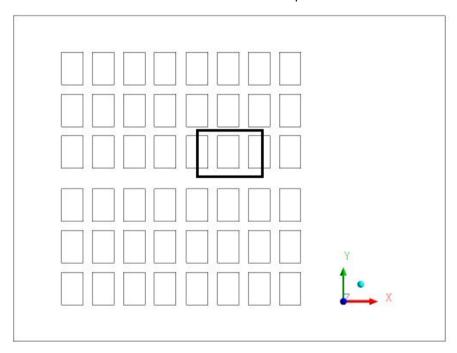
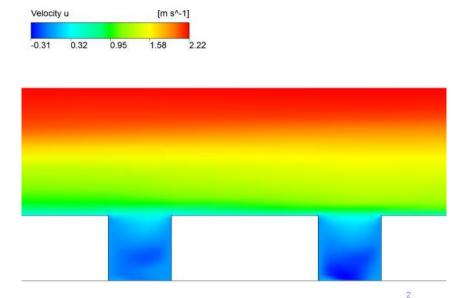
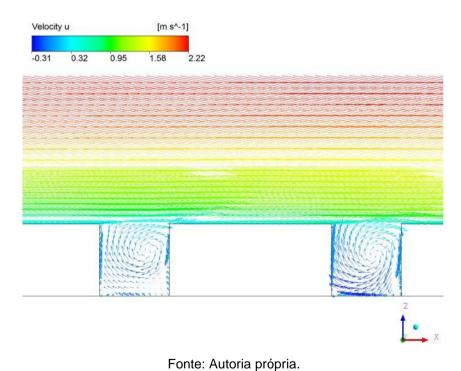


Figura 14 - Distribuição da velocidade para direção do vento 0º no plano vertical xz no modelo SimpleC



Fonte: Autoria própria.

Figura 15 - Campo de velocidade para direção do vento 0º no plano vertical xz no modelo SimpleC



A Figura 15 mostra seções transversais típicas de um cânion urbano com razão de aspecto de aproximadamente 1 e direção do vento perpendicular às ruas. Ocorre a formação de um vórtice característico entre os prédios, sendo esta estrutura

responsável pelo principal mecanismo de dispersão de poluentes dentro do cânion urbano (Oke, 1988).

Desde a parede posterior dos prédios, segundo Murakami (1993), há uma cavidade de recirculação, limitada pela conhecida linha de recolamento (*reattachment*) que define o limite onde as perturbações ao escoamento impostas pela presença do prédio deixam de ser relevantes, o escoamento passa a se movimentar todo no mesmo sentido. A medida que o fluxo se afasta dos prédios da última fileira, observa-se que ele tende a recuperar suas características iniciais, entretanto, ainda persistem alguns efeitos das perturbações, com velocidades inferiores da velocidade média na direção principal em relação ao escoamento isento de perturbações e maior intensidade de turbulência. Esta região mais afastada do prédio é conhecida como esteira turbulenta (MURAKAMI, 1993).

Para a classificação de uma matriz de obstáculos determinada por Oke (1988) em função da geometria do prédio (L/H) e da razão de aspecto (H/W), sendo H a altura do prédio, L a largura do prédio e W a largura da rua, ambos considerando a direção do vento incidente como perpendicular ao prédio, temos que o escoamento visualizado na Figura 15 é tipo skimming. Neste escoamento aparece uma recirculação entre os prédios, tornando-o dissociado do escoamento acima dos prédios (CEZANA, 2015).

Segundo Grimmond e Oke (1999), para valores do índice λ_P maiores que 0,5, a largura da rua não é suficiente para estimular o desenvolvimento do escoamento do tipo interferência de esteira. Para os modelos SimpleC e SimpleV, o valor obtido para o índice λ_P foi igual a 0,54, e pode ser visualizado na Figura 15 que não há um fluxo descendente formado na face do prédio a jusante perturbando a esteira do prédio a montante, portanto, pode-se notar que o escoamento do tipo interferência de esteira não está presente.

Garbero e outros (2010) mostraram em seu estudo que os processos de dispersão em dosséis urbanos dependem das propriedades geométricas da matriz além também da direção do vento incidente.

A interação entre o escoamento externo e o escoamento dentro do cânion é uma questão que tem sido bastante estudada. Para Goulart (2012), há a saída de massa de poluente do interior de um dossel urbano e posterior reentrada. De acordo com

Liu e outros (2005), há uma redução do fluxo vertical de poluente de dentro do cânion para fora à medida que a razão de aspecto aumenta.

A Figura 16 apresenta a distribuição da velocidade para direção do vento 90° no plano horizontal xy em quatro diferentes alturas, Hb/4, Hb/2, Hb e 2Hb. Na Figura 17 pode-se visualizar as linhas de corrente do escoamento médio para direção do vento 90° no plano horizontal xy nas mesmas alturas.

Observando-se as letras (b) e (c) na Figura 16 e na Figura 17 pode-se notar que as estruturas do escoamento de ar ao redor dos prédios apresentadas anteriormente para a direção do vento 0º podem ser visualizadas também nestas figuras, com algumas discrepâncias que serão destacadas a seguir.

Nos planos elaborados para a altura Hb/2 (Figura 17), nota-se que há um fluxo considerável direcionado para a rua principal de maior largura, diferente do observado para o fluxo direcionado às ruas secundárias. Como visto para a direção do vento 0° , também há zonas de recirculações entre os prédios. Uma vez que a direção do vento é perpendicular as ruas, zonas de baixa velocidade são encontradas, as quais propiciam a formação de vórtices nas mesmas.

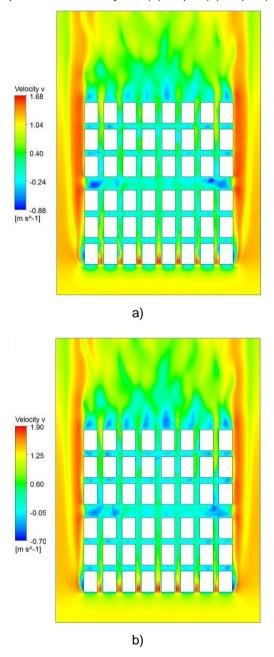
Nas entradas das ruas (Figura 16 e Figura 17), pode-se perceber que há um aumento da velocidade devido à canalização. A rua principal de menor largura, exibe um fluxo com menores velocidades, se aproximando dos valores obtidos para os fluxos ao longo das ruas secundárias na direção longitudinal, quando comparado com o observado para a direção de 0°, sendo este fato explicado pela diferença na largura das ruas principais.

Branford e outros (2011) deliberaram a partir dos resultados obtidos acerca da relação existente entra a densidade da área frontal (λ_F) com a velocidade dentro de um conjunto de prédios. Afirmaram que a densidade da área frontal do conjunto de prédios, quando torna-se maior devido a variações na direção do vento, acarreta em valores de velocidade mais baixos dentro do conjunto de prédios.

Para os modelos SimpleC e SimpleV, o valor obtido para o índice λ_F foi 0,24 para a direção do vento 0°, e 0,16 para a direção do vento 90°. Pode-se constatar que há velocidades mais baixas para a direção do vento 0° com um maior valor de densidade da área frontal, ao comparar as distribuições da velocidade no plano

horizontal *xy* para direção do vento 90°, letra (b) da Figura 16, e para direção do vento 0°, letra (b) da Figura 11.

Figura 16 - Distribuição da velocidade ao longo do modelo SimpleC para direção do vento 90° no plano horizontal xy em (a) Hb/4, (b) Hb/2, (c) Hb e (d) 2Hb



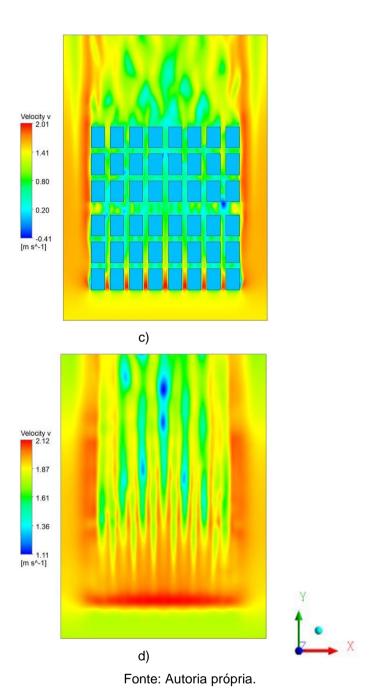
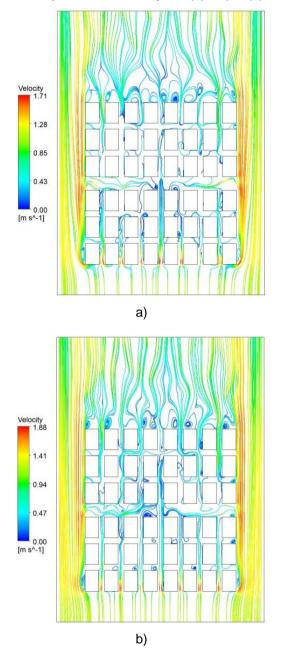
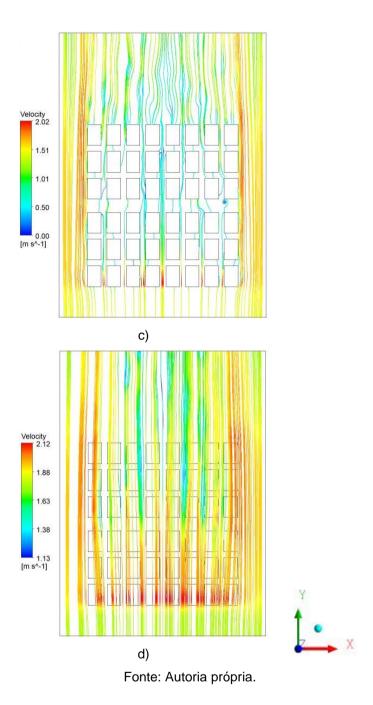


Figura 17 - Linhas de corrente do escoamento médio ao longo do modelo SimpleC para a direção do vento $90^{\rm o}$ no plano horizontal xy em (a) Hb/4, (b) Hb/2, (c) Hb e (d) 2Hb





Na Figura 19 observa-se o campo de vetores de velocidade para direção do vento 90º no plano vertical *yz* para uma região previamente escolhida (Figura 18). Na Figura 20 se encontra a distribuição da velocidade para a direção do vento 90º no plano vertical *yz* na mesma região.

Observando-se as letras (b) e (c) da Figura 19 e da Figura 20 pode-se perceber que o comportamento do fluido é semelhante ao apresentado anteriormente para a direção do vento 0°, letras (b) e (c) da Figura 14 e da Figura 15, em que há a formação de um vórtice entre os prédios característico para seções transversais

típicas de um cânion urbano com razão de aspecto de aproximadamente 1 e direção do vento perpendicular às ruas (CEZANA, 2015).

O escoamento observado na Figura 20 é tipo skimming de acordo com a classificação para uma matriz de obstáculos determinada por Oke (1988). Pode, também, ser visualizado na Figura 20 que não há fluxo descendente estabelecido na face do prédio a jusante perturbando a esteira do prédio a montante, podendo-se concluir que o escoamento do tipo interferência de esteira não se apresenta.

Figura 18 - Localização no plano horizontal xy selecionada para análise do escoamento para direção de vento 90º no modelo SimpleC

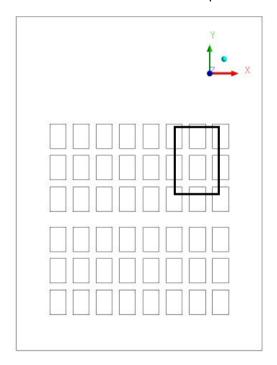


Figura 19 - Distribuição da velocidade para direção do vento 90º no plano vertical yz no modelo SimpleC

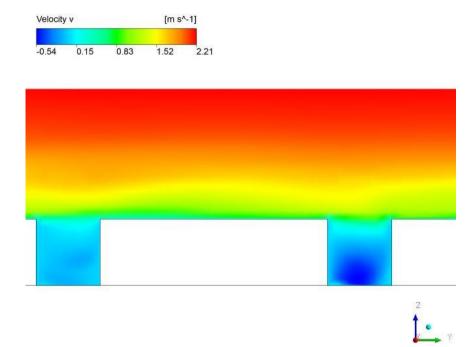
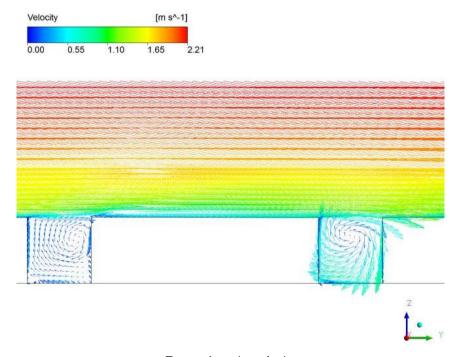


Figura 20 - Campo de velocidade para direção do vento 90º no plano vertical yz no modelo SimpleC



5.3 ANÁLISE DO ESCOAMENTO EM UM CONJUNTO DE PRÉDIO DE ALTURAS VARIÁVEIS

Nesta seção serão apresentados os resultados da simulação numérica RANS com o modelo de turbulência $k - \omega SST$ para o modelo SimpleV, considerando duas direções do vento (0º e 90º).

A finalidade principal é analisar o escoamento do ar através de um conjunto de prédios alinhados, de alturas diferentes. Primeiramente serão abordados os resultados para direção do vento 0°, e por fim, para direção do vento 90°, com uma comparação para estas duas diferentes direções principais do vento.

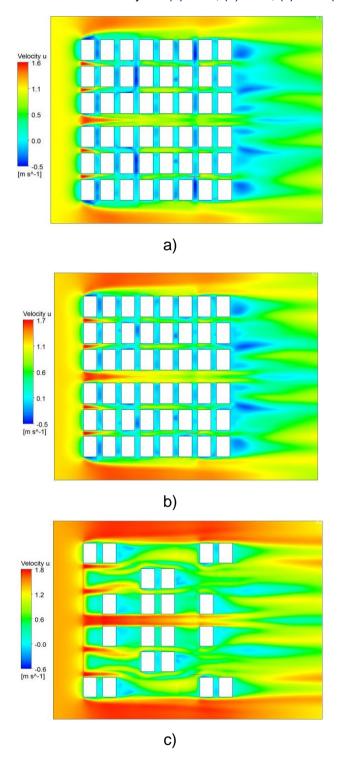
A Figura 21 apresenta a distribuição da velocidade para direção do vento 0º no plano horizontal xy em quatro diferentes alturas, Hb/4, Hb/2, Hb e 2Hb. Na Figura 22 podese visualizar as linhas de corrente do escoamento médio para direção do vento 0º no plano horizontal xy nas mesmas alturas.

Como já citado no item 4.3, a condição de entrada do estudo é o perfil de velocidade medido em túnel de vento, assim, há uma introdução de fluxo na área de estudo, na direção do vento selecionada, como pode ser observado na Figura 21 e na Figura 22. Esta situação é muitas vezes diferente da situação real, em que o escoamento é influenciado por configurações existentes ao entorno da área de estudo.

Assim como feito para o modelo SimpleC, na análise do escoamento do ar ao longo do modelo SimpleV no plano horizontal xy, o foco se dará para as alturas Hb/2 e Hb uma vez que existe uma influência considerável do chão no escoamento para a altura Hb/4, e para a altura 2Hb há um escoamento livre, apresentando pequenas perturbações remanescentes.

Observando-se as letras (b) e (c) na Figura 21 e na Figura 22 pode-se notar que os resultados obtidos foram de acordo com os esperados. Estruturas do escoamento de ar ao redor dos prédios serão relatadas a seguir, além das características do mesmo nas ruas entre os prédios.

Figura 21 - Distribuição da velocidade ao longo do modelo SimpleV para direção do vento 0º no plano horizontal xy em (a) Hb/4, (b) Hb/2, (c) Hb e (d) 2Hb



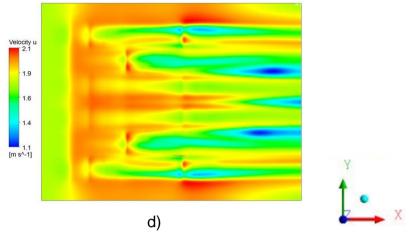
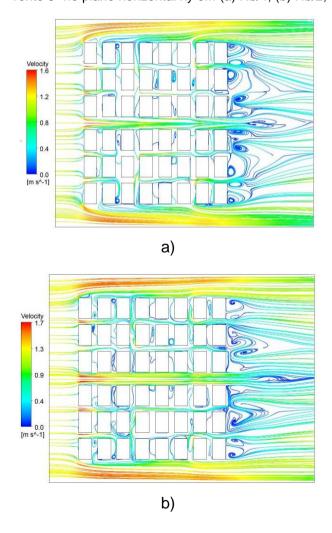
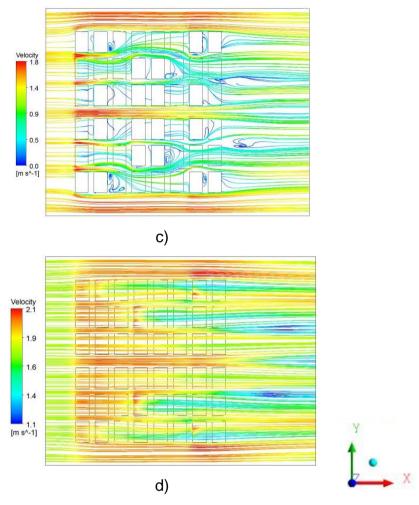


Figura 22 - Linhas de corrente do escoamento médio ao longo do modelo SimpleV para a direção do vento 0º no plano horizontal xy em (a) Hb/4, (b) Hb/2, (c) Hb e (d) 2Hb





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. Todavia destacam-se algumas características.

O fluxo de aproximação é separado pela presença de prédios, sendo desacelerado ao atingir os prédios, com regiões de velocidades reduzidas. O fluxo desacelerado e separado segue para as laterais, ruas adjacentes aos prédios, e para o teto. Nas entradas das ruas, pode-se perceber que há um aumento da velocidade devido à canalização. A velocidade diminui ao longo das ruas na direção longitudinal pelo atrito entre o ar em movimento e as superfícies dos prédios, surgindo as tensões cisalhantes responsáveis pela dissipação de energia cinética que é convertida em calor. A rua principal com uma maior largura, permite um fluxo com maiores velocidades.

Nos planos elaborados para a altura Hb (Figura 21) podem-se notar nas regiões acima dos prédios mais baixos que a altura de referência (102 mm) que há a desaceleração do fluxo, isso ocorre devido ao cisalhamento do vento junto a superfície superior dos prédios. Nas letras (b) e (c) da Figura 21 e da Figura 22, observa-se regiões de estagnação formadas pela presença de prédios mais altos que a altura de referência onde o escoamento incidente é separado pela presença de prédios e o fluxo é desacelerado ao atingir os prédios, com regiões de velocidades reduzidas.

Na Figura 22 (b) observam-se intensas zonas de recirculação. Algumas zonas originam-se no canto de um prédio, outras atrás e na frente dos prédios. Também pode-se observar zonas de recirculação nas regiões entre os prédios.

Por outro lado, na Figura 22 (c) as zonas de recirculação observadas estão localizadas nas regiões próximas aos prédios mais altos, ou seja, nas proximidades dos prédios de altura 165 mm. Isso mostra que os prédios de menores alturas não têm mais tanta influência sobre o escoamento a uma altura de Hb = 102mm, fazendo com que o escoamento acima deles seja menos perturbado.

Pode-se observar regiões em que a presença dos prédios é "notada" pelo escoamento mesmo acima de suas alturas (Figura 22 (b) e (c)), uma vez que prédios mais altos tendem a apresentar zonas de recirculação mais claramente marcadas.

O escoamento observado nas laterais do conjunto de prédios é acelerado pois não há obstáculos (Figura 21 e Figura 22), alcançando altas velocidades.

A maior densidade das linhas de corrente entre prédios de maior altura (Figura 22 (c)) 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 (CEZANA, 2015).

A medida que o fluxo se afasta dos prédios da última fileira (letras (b) e (c) da Figura 21 e da Figura 22), observa-se que ele tende a recuperar suas características iniciais, entretanto, ainda persistem alguns efeitos das perturbações, com velocidades inferiores da velocidade média na direção principal em relação ao escoamento isento de perturbações e maior intensidade de turbulência. Esta região mais afastada do prédio é conhecida como esteira turbulenta (MURAKAMI, 1993).

Na Figura 24 observa-se distribuição da velocidade para direção do vento 0º no plano vertical xz para uma região previamente escolhida (Figura 23). Na Figura 25 se encontra o campo de vetores de velocidade para a direção do vento 0º no plano vertical xz na mesma região.

São observadas regiões de recirculação na vizinhança dos prédios (Figura 25). Destacam-se as intensas recirculações na vizinhança do prédio mais alto da vista.

Pode-se observar que no escoamento da Figura 25 aparece uma recirculação entre os prédios, tornando-o dissociado do escoamento acima dos prédios. Esta estrutura é comum em escoamentos em cânions urbanos. Ainda na mesma figura, observa-se a desaceleração do fluxo de ar sobre o prédio mais baixo e o choque e consequente desaceleração do mesmo ao encontrar um prédio mais alto, ocasionando uma zona de recirculação mais intensa. No nível do teto do prédio mais alto nota-se um movimento ascendente de parte do fluxo.

Figura 23 - Localização no plano horizontal xy selecionada para análise do escoamento para direção de vento 0º no modelo SimpleV

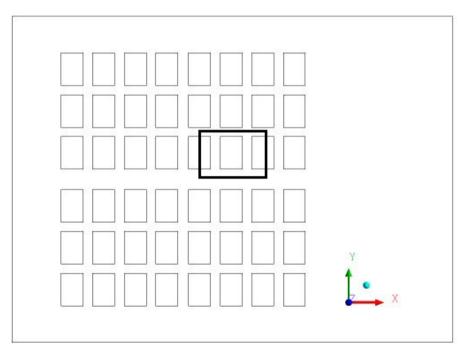


Figura 24- Distribuição da velocidade para direção do vento 0º no plano vertical xz no modelo SimpleV

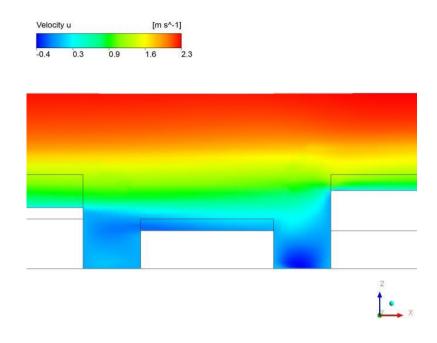
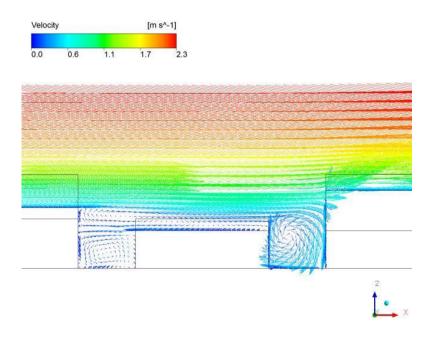


Figura 25 - Campo de velocidade para direção do vento 0º no plano vertical xz no modelo SimpleV



Fonte: Autoria própria.

A Figura 26 apresenta a distribuição da velocidade para direção do vento 90° no plano horizontal xy em quatro diferentes alturas, Hb/4, Hb/2, Hb e 2Hb. Na Figura 27

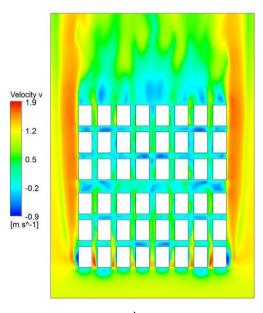
pode-se visualizar as linhas de corrente do escoamento médio para direção do vento 90º no plano horizontal *xy* nas mesmas alturas.

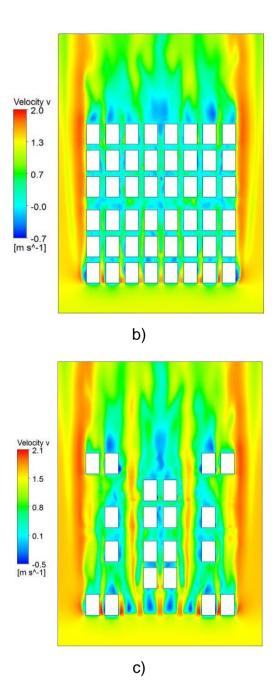
Observando-se as letras (b) e (c) na Figura 26 e na Figura 27 pode-se notar que as estruturas do escoamento de ar ao redor dos prédios apresentadas anteriormente para a direção do vento 0º podem ser visualizadas também nestas figuras, com algumas discrepâncias que serão destacadas a seguir.

Nas entradas das ruas, pode-se perceber que há um aumento da velocidade devido à canalização. A rua principal de menor largura, exibe um fluxo com menores velocidades, se aproximando dos valores obtidos para os fluxos ao longo das ruas secundárias na direção longitudinal, quando comparado com o observado para a direção de 0º, sendo este fato explicado pela diferença na largura das ruas principais.

Percebe-se, na letra (c) da Figura 26 e da Figura 27, o aumento da velocidade ao longo da direção longitudinal na região sobre os prédios de menores alturas entre duas fileiras de prédios de maiores alturas, devido ao efeito de canalização e, também, ao fato de que os prédios de menores alturas não têm mais tanta influência sobre o escoamento a uma altura de Hb = 102mm.

Figura 26 - Distribuição da velocidade ao longo do modelo SimpleV para direção do vento 90º no plano horizontal xy em (a) Hb/4, (b) Hb/2, (c) Hb e (d) 2Hb





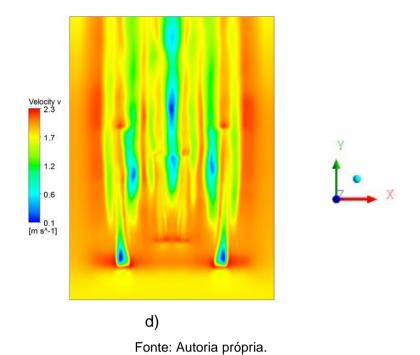
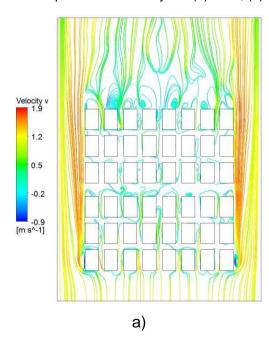
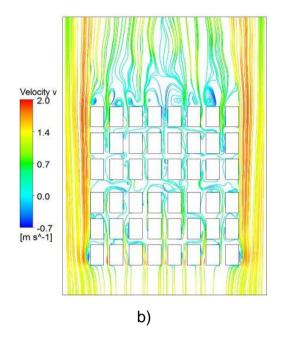
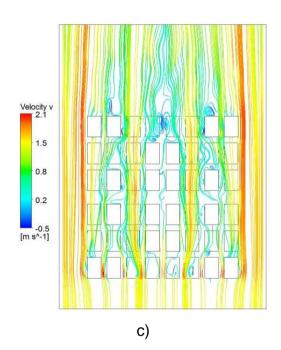
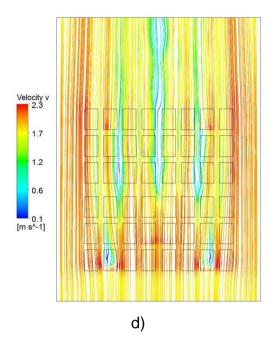


Figura 27 - Linhas de corrente do escoamento médio ao longo do modelo SimpleV para a direção do vento 90º no plano horizontal xy em (a) Hb/4, (b) Hb/2, (c) Hb e (d) 2Hb











Na Figura 29 se encontra a distribuição da velocidade para a direção do vento 90º no plano vertical *yz* para uma região previamente escolhida (Figura 28). Na Figura 30 observa-se o campo de vetores de velocidade para direção do vento 90º no plano vertical *yz* na mesma região.

Observando-se as letras (b) e (c) da Figura 29 e da Figura 30 pode-se perceber que o comportamento do fluido é semelhante ao apresentado anteriormente para a direção do vento 0º, letras (b) e (c) da Figura 24 e da Figura 25, em que nota-se a desaceleração do fluxo de ar sobre o prédio mais baixo e, ao atingir o prédio mais alto, há uma consequente desaceleração ocasionando uma zona de recirculação mais intensa.

Figura 28 - Localização no plano horizontal xy selecionada para análise do escoamento para direção de vento 90º no modelo SimpleV

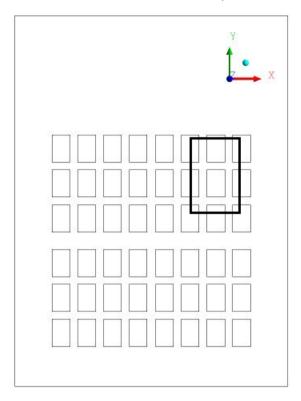
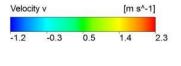
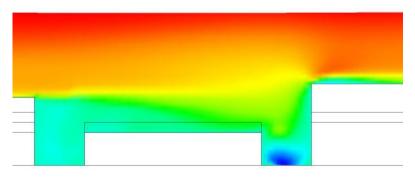


Figura 29 - Distribuição da velocidade para direção do vento 90º no plano vertical yz no modelo SimpleV







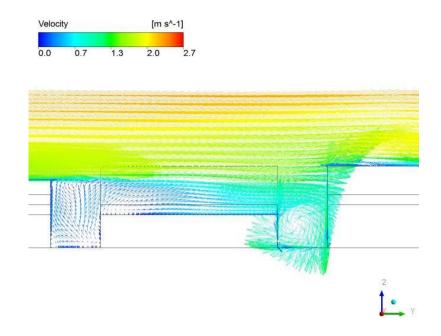


Figura 30 - Campo de velocidade para direção do vento 90º no plano vertical yz no modelo SimpleV

5.4 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA MORFOLOGIA URBANA NO ESCOAMENTO

Nesta seção serão apresentados os resultados da simulação numérica RANS com o modelo de turbulência $k-\omega$ SST para o modelo DAPPLE, considerando duas direções do vento (0º e 90º) e serão comparados os resultados das simulações para os três modelos (SimpleC, SimpleV e DAPPLE) também nas duas direções.

Primeiramente serão brevemente abordados os resultados da simulação para o modelo DAPPLE para direção do vento 0º e 90º, onde na Figura 31 e na Figura 33 são apresentas a distribuição da velocidade para direção do vento 0º e 90º, respectivamente, no plano horizontal xy em quatro diferentes alturas, Hb/4, Hb/2, Hb e 2Hb. E na Figura 32 e Figura 34 pode-se visualizar as linhas de corrente do escoamento médio para a direção do vento 0º e 90º, respectivamente, para as mesmas alturas.

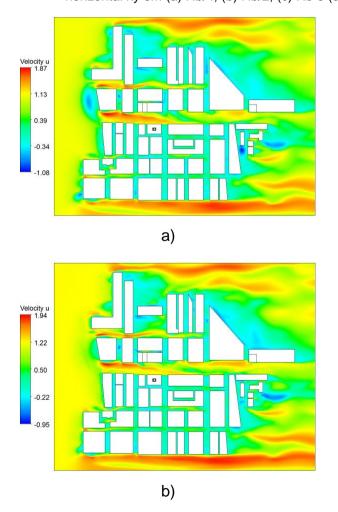
Analisando as Figuras de 31 a 34 pode-se notar que os resultados obtidos foram de acordo com os esperados, em que, o escoamento dentro da matriz de prédios de

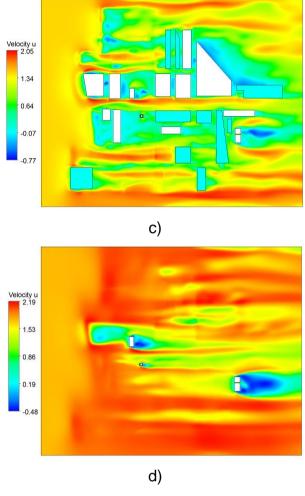
geometrias mais realistas é mais complexo, não sendo possível destacar um padrão comum.

Notam-se zonas de intensa recirculação em ambas as direções do vento, com baixas velocidades, principalmente em regiões a jusante de prédios com grandes escalas. Ainda nas mesmas figuras, é possível perceber algumas regiões com altas velocidades, ocasionadas pela canalização e, também da condição de contorno aplicada às laterais dos domínios que permite que o fluido deslize livremente.

Na direção do vento a 0º (direção paralela ao eixo x) notam-se velocidades mais altas na rua principal quando comparado a rua principal na direção do vento a 90º (direção paralela ao eixo y), isto ocorre devido a rua do primeiro caso ser mais larga que a rua do segundo caso. Este fato pôde ser observado em todos os modelos simulados.

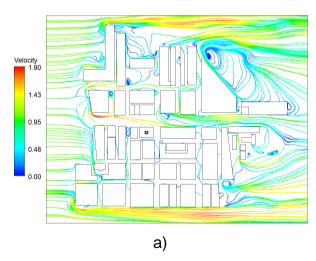
Figura 31- Distribuição da velocidade ao longo do modelo DAPPLE para direção do vento 0º no plano horizontal xy em (a) Hb/4, (b) Hb/2, (c) Hb e (d) 2Hb





Y . X

Figura 32 - Linhas de corrente do escoamento médio ao longo do modelo DAPPLE para a direção do vento 0º no plano horizontal xy em (a) Hb/4, (b) Hb/2, (c) Hb e (d) 2Hb



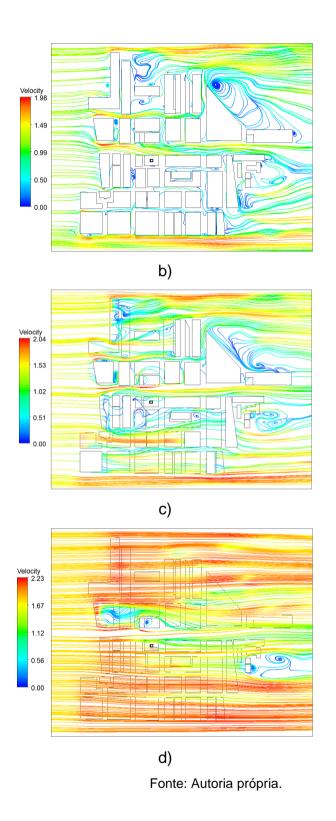
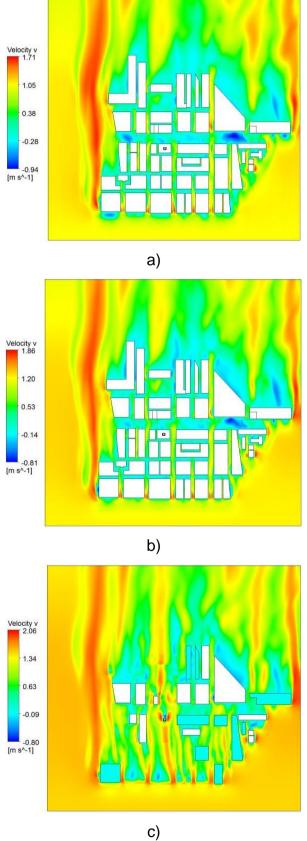




Figura 33 - Distribuição da velocidade ao longo do modelo DAPPLE para direção do vento 90º no plano horizontal xy em (a) Hb/4, (b) Hb/2, (c) Hb e (d) 2Hb



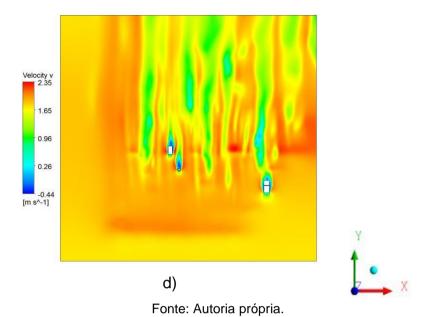
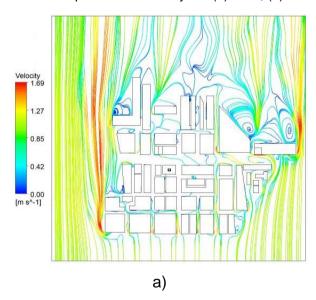
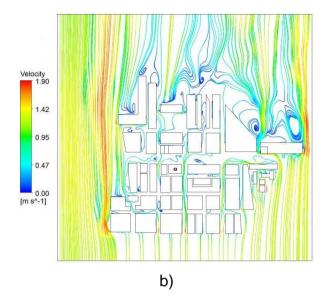
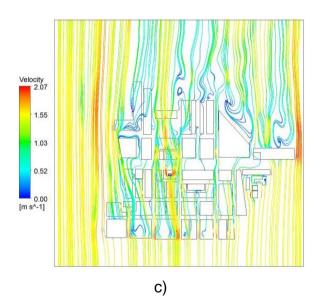
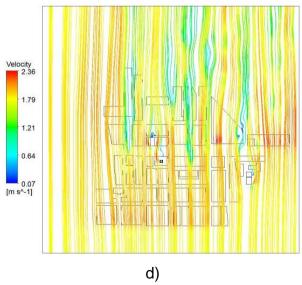


Figura 34- Linhas de corrente do escoamento médio ao longo do modelo DAPPLE para a direção do vento 90º no plano horizontal xy em (a) Hb/4, (b) Hb/2, (c) Hb e (d) 2Hb













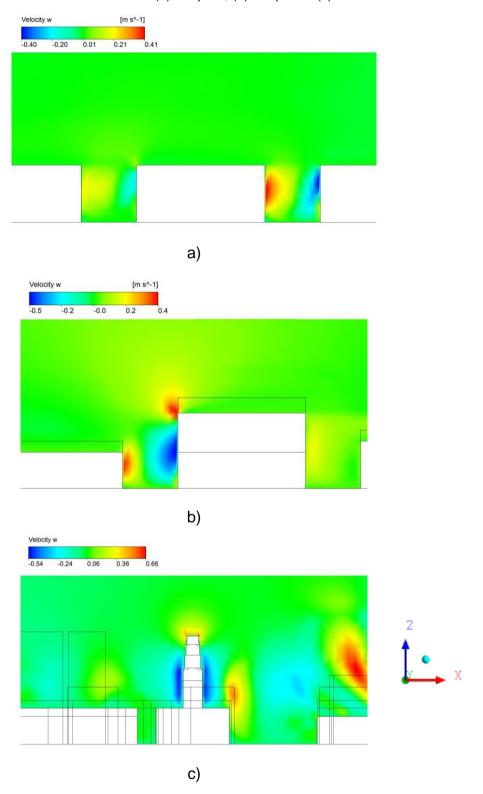
Em seguida serão apresentadas a distribuição da velocidade vertical (velocidade w) para direção do vento 0º e 90º nos planos verticais xz e yz dos três modelos (SimpleC, SimpleV e DAPPLE) (Figura 35 e Figura 36).

As Figuras 35 e 36 foram retiradas em regiões semelhantes aos três modelos, com foco em locais com prédio mais altos, no caso dos modelos SimpleV e DAPPLE, para ambas as direções do vento.

Analisando a Figura 35 e a Figura 36 é possível visualizar que o maior impacto da variação da altura dos prédios se nota na velocidade vertical, com regiões distinguidas de aumento ou diminuição da velocidade. Este fato pode ser observado quando comparamos a distribuição da velocidade vertical do SimpleC (Figura 35 (a) e Figura 36 (a)) com o SimpleV (Figura 35 (b) e Figura 36 (b)) em que se nota velocidades maiores ao subir o prédio mais alto, e velocidades menores na zona de recirculação.

Este comportamento visto nos perfis do modelo SimpleV pode ser confirmado ao observar também a distribuição da velocidade vertical do modelo DAPPLE (Figura 35 (c) e Figura 36 (c)), em que se nota velocidades mais altas novamente acima de estruturas de maior altura, em ambas as direções do vento.

Figura 35 - Distribuição da velocidade vertical no para direção do vento 0º no plano vertical xz nos modelos (a) SimpleC, (b) SimpleV e (c) DAPPLE



Velocity w a) Velocity w [m s^-1] b) Velocity w c)

Figura 36- Distribuição da velocidade vertical para direção do vento 90º no plano vertical yz nos modelos (a) SimpleC, (b) SimpleV e (c) DAPPLE

Nas Figura 38, 39, 40 e 41 são apresentados e comparados a distribuição e o campo de vetores de velocidade para a direção do vento 0º no plano vertical xz dos três

modelos (SimpleC, SimpleV e DAPPLE) em duas regiões previamente escolhidas (Figura 38). Na Figura 43, 44, 45 e 46 são apresentados e comparados a distribuição e o campo de vetores de velocidade para direção do vento 90º no plano vertical *xz* dos três modelos, em duas regiões previamente escolhidas (Figura 43).

As regiões previamente escolhidas (Figura 37 e Figura 42) foram eleitas devido à presença de duas torres no complexo urbano do modelo DAPPLE, onde o Local 1 apresenta uma torre alta e mais larga enquanto no Local 2 há uma torre mais alta e estreita. Foram optadas por regiões com torres para demonstrar mais claramente a diferença do modelo DAPPLE quando comparado aos modelos SimpleC e SimpleV.

Segundo Carpentieri e outros (2015), geralmente, os resultados do modelo SimpleV nas direções do vento de 0º e 90º são bastante semelhantes aos do modelo SimpleC. A variabilidade da altura do edifício induz mais variabilidade nos perfis de velocidade média, especialmente em cânions urbanos que são perpendiculares ao fluxo de aproximação, também porque a camada cisalhante é maior no modelo SimpleV. No entanto, uma clara diferença é visível nas regiões de turbulência. Os valores de turbulência do vento mostram níveis diferentes abaixo e acima do nível do teto, apresentando valores dentro do dossel muito menores do que acima. Um escoamento mais turbulento, com maior número de vórtices e estruturas tridimensionais pode ser observado aproximadamente no nível do teto em ambos os modelos, mas no caso SimpleV os perfis de turbulência são mais complexos, com múltiplas turbulências, geralmente mais fracas, devido à influência de prédios a montante, de altura variável. Isto é particularmente evidente para o modelo SimpleV a direções do vento 90º, onde os prédios a montante dos "blocos de interseção" são significativamente mais altos do que os quatro prédios em torno do cruzamento principal.

Analisando as Figuras 38, 39, 40 e 41 nota-se que no modelo SimpleC, o escoamento observado é tipo skimming de acordo com a classificação para uma matriz de obstáculos determinada por Oke (1988) com seções transversais típicas de um cânion urbano com razão de aspecto de aproximadamente 1 e direção do vento perpendicular às ruas. Este comportamento pode ser observado em ambos locais de análise (Local 1 e Local 2).

No modelo SimpleV, pode-se observar que no escoamento aparece uma recirculação entre os prédios, tornando-o dissociado do escoamento acima dos

prédios. Esta estrutura é comum em escoamentos em cânions urbanos e, também ocorre no modelo SimpleC. Ainda no Modelo SimpleV, observa-se a desaceleração do fluxo de ar sobre o prédio mais baixo e o choque e consequente desaceleração do mesmo ao encontrar um prédio mais alto, ocasionando uma zona de recirculação mais intensa. Isto ocorre em ambos locais de análise (Local 1 e Local 2).

No modelo DAPPLE, na região atrás das torres mais altas nota-se um movimento ascendente, que fará o papel de uma chaminé, ou seja, caso existisse algum poluente na região, o movimento 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 (CEZANA, 2015). Este comportamento é comum em estruturas mais altas que a média da região. O escoamento passa por cima da estrutura e desce ligeiramente afastado. A jusante do prédio o escoamento sobe com velocidade alta, típico do efeito chaminé e a pressão atrás do prédio é baixa.

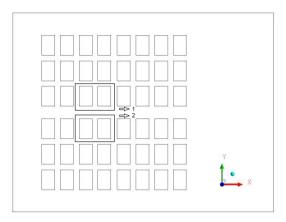
Pode-se observar para o modelo DAPPLE que o escoamento apresenta fenômenos de natureza complexa, com regiões de intensa recirculação e movimentos turbulentos, altamente tridimensionais e anisotrópicos.

Ao comparar a Figura 38 e a Figura 39 com a Figuras 40 e a Figura 41, nota-se pouca diferença no comportamento do escoamento para os dois locais previamente escolhidos, principalmente nos modelos SimpleC e SimpleV. No caso do DAPPLE, há uma maior discrepância na região das torres, pois a torre presente no Local 1 possui maior área frontal, que leva a menores velocidades devido ao choque do fluxo com a mesma.

Por fim, é possível visualizar também parte do impacto da variação de altura dos prédios na velocidade, como já havia sido destacado na velocidade vertical anteriormente (Figura 35 e Figura 36).

Segundo Carpentieri e outros (2015) os perfis de vento dos modelos às direções 0° e 90° parecem estar mais correlacionados com características geométricas do que com a densidade da área frontal, como era de se esperar, por não haver diferença significativa de valores (0,24 e 0,16, respectivamente), com isso, não são observadas discrepâncias significantes nos planos xz de distribuição e campo de vetores de velocidade entre as direções do vento 0° e 90°.

Figura 37 - Localização no plano horizontal xy selecionada para análise do escoamento para direção de vento 0º nos modelos SimpleC, SimpleV e DAPPLE (Local 1 e Local 2 apontados nas figuras)



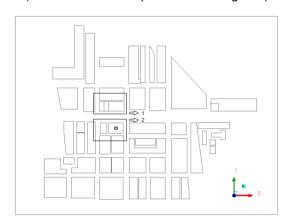
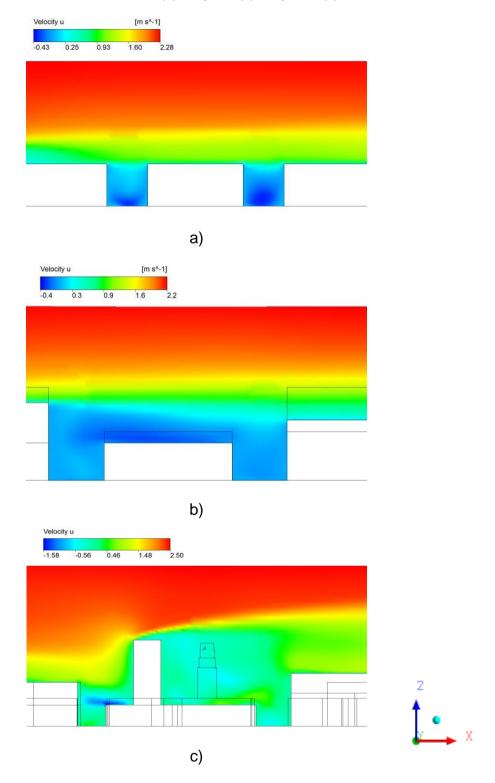


Figura 38 - Distribuição da velocidade no Local 1 para direção do vento 0º no plano vertical xz nos modelos (a) SimpleC, (b) SimpleV e (c) DAPPLE



a)

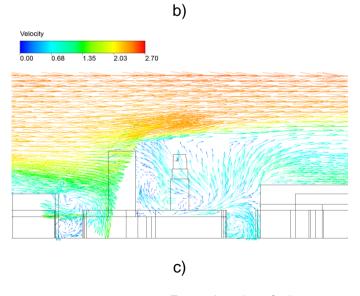
Velocity [m s^-1]

0.0 0.6 1.1 1.7 2.2

Figura 39 - Campo de velocidade no Local 1 para direção do vento 0º no plano vertical xz nos modelos (a) SimpleC, (b) SimpleV e (c) DAPPLE

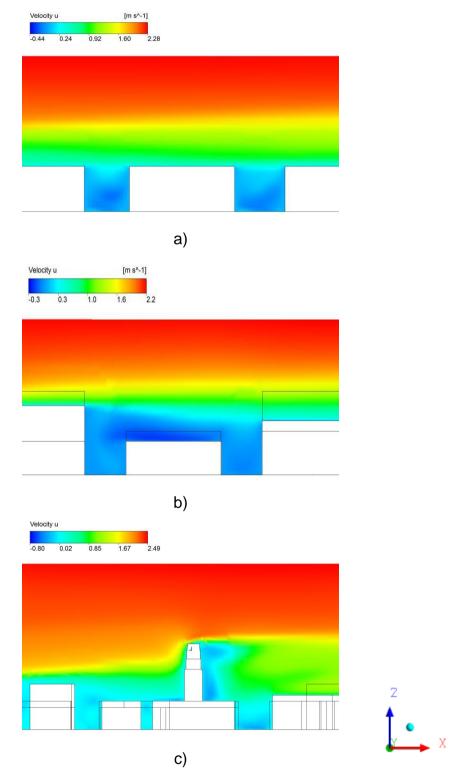
Velocity u

[m s^-1]



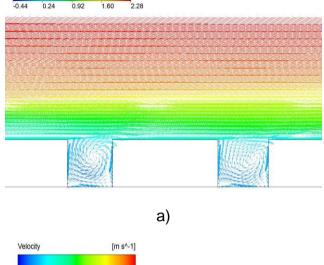
× X

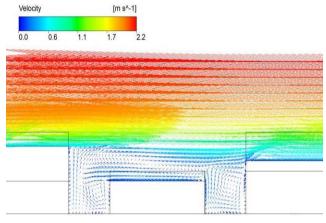
Figura 40 - Distribuição da velocidade no Local 2 para direção do vento 0º no plano vertical xz nos modelos (a) SimpleC, (b) SimpleV e (c) DAPPLE



Velocity u

Figura 41 - Campo de velocidade no Local 2 para direção do vento 0º no plano vertical xz nos modelos (a) SimpleC, (b) SimpleV e (c) DAPPLE





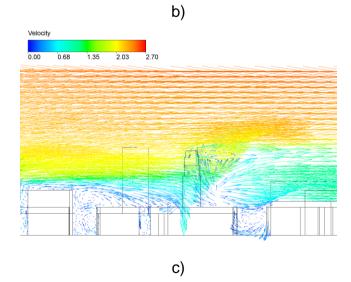
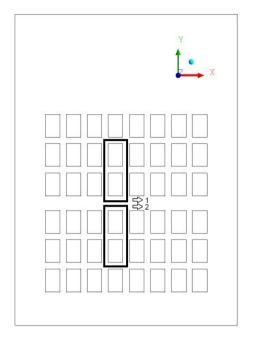


Figura 42 - Localização no plano horizontal xy selecionada para análise do escoamento para direção de vento 90º nos modelos SimpleC, SimpleV e DAPPLE (Local 1 e Local 2 apontados nas figuras)



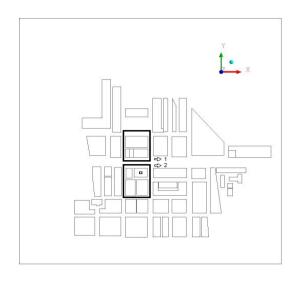


Figura 43 - Distribuição da velocidade no Local 1 para direção do vento 90º no plano vertical yz nos modelos (a) SimpleC, (b) SimpleV e (c) DAPPLE

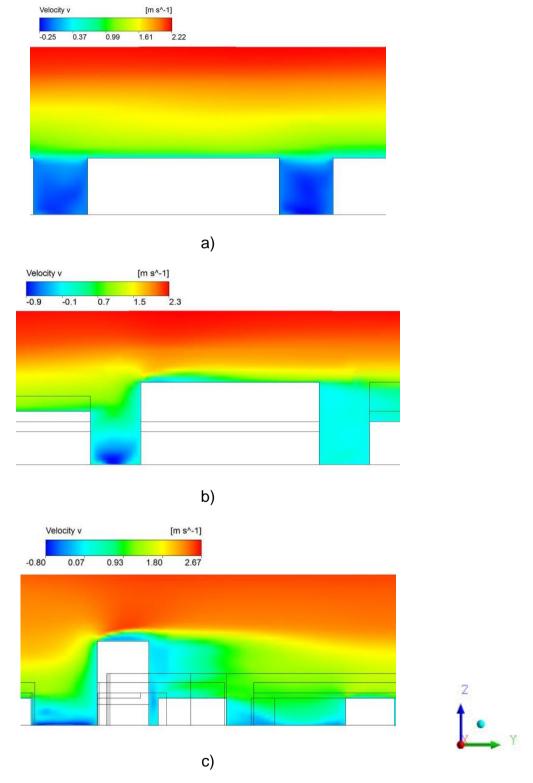


Figura 44 - Campo de velocidade no Local 1 para direção do vento 90º no plano vertical yz nos modelos (a) SimpleC, (b) SimpleV e (c) DAPPLE

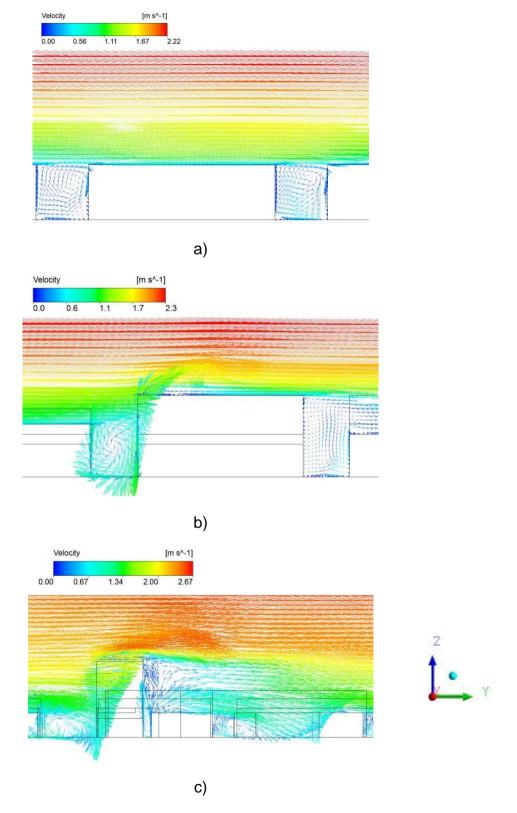


Figura 45 - Distribuição da velocidade no Local 2 para direção do vento 90º no plano vertical yz nos modelos (a) SimpleC, (b) SimpleV e (c) DAPPLE

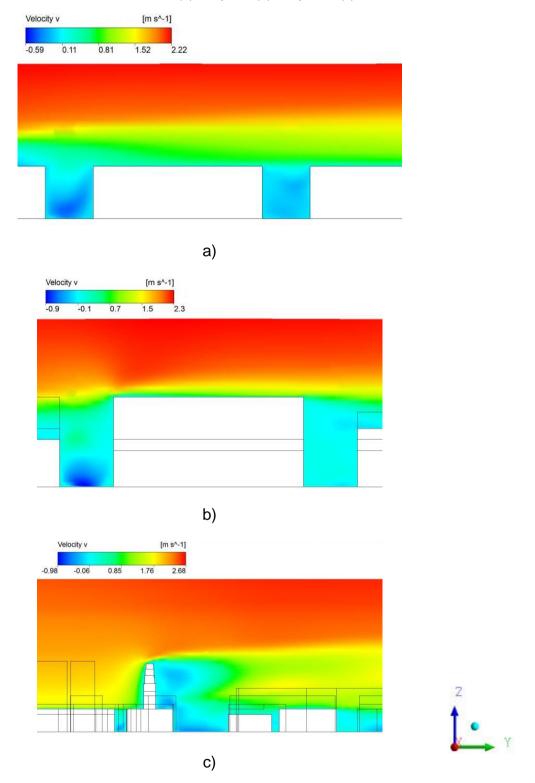
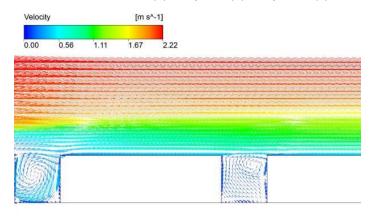
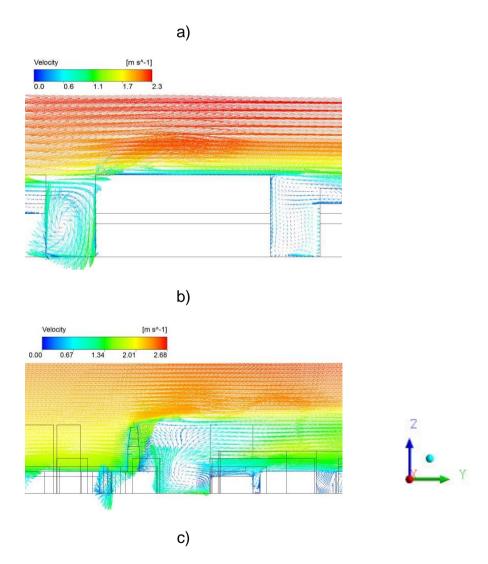


Figura 46 - Campo de velocidade no Local 2 para direção do vento 0º no plano vertical yz nos modelos (a) SimpleC, (b) SimpleV e (c) DAPPLE





6 CONCLUSÃO

Neste trabalho, apresentamos uma análise numérica do escoamento ao redor de um conjunto de prédios, observando a influência da direção do vento, das dimensões das ruas e da altura e geometria dos prédios.

Para isto, foi feita validação das simulações numéricas de modelos simplificados, com os dados experimentais de Carpentieri et. al. (2015). Apesar da conhecida limitação da abordagem de RANS, houve uma boa concordância geral entre os dados experimentais e os resultados numéricos dos casos de validação.

A partir dos casos simulados, um dos pontos que se esperava identificar era se as simulações em configurações urbanas idealizadas podem ser representativas das configurações de cidades existentes, a partir da análise do campo de vento dos cenários simulados. Buscou-se identificar os parâmetros urbanos de maior impacto no escoamento de ar.

Além da variabilidade da altura do prédio, outras características morfológicas provaram ser um fator significativo na modelagem do escoamento dentro e diretamente acima do conjunto urbano, como a razão de aspecto dos cânions urbanos, a densidade da área frontal do conjunto de prédios, o ângulo entre os cânions urbanos e o vento que se aproxima, e características geométricas locais como, por exemplo, a presença de edifícios muito mais altos imediatamente a montante da área estudada.

Foi possível verificar que o escoamento utilizando uma configuração mais realística é extremamente complexo. Não é possível identificar um padrão no escoamento para este caso. Foram vistas algumas poucas estruturas semelhantes entre o modelo DAPPLE e os modelos mais simples, SimpleC e SimpleV. Visto isso, se estudos analisando apenas regiões urbanas simplificadas perdurarem, serão verificados apenas mecanismos específicos, como o escoamento de encontro com prédios tendo desvios e recirculações a jusante desses prédios. Isto não representa uma área urbana diversificada como a do modelo DAPPLE, pois o escoamento nesta situação é muito mais complicado.

Os resultados obtidos neste estudo podem ser aperfeiçoados para melhor representar o escoamento do ar na atmosfera. Alguns fatores importantes acerca da modelagem realizada neste estudo podem ser abordados, como a aplicação de

outras metodologias além da RANS para o cálculo do escoamento nas regiões, como por exemplo, DNS e LES.

Recomenda-se também a aplicação de um poluente nas simulações de modo que possa ser analisado não só velocidade e direção do escoamento, mas também a concentração de possíveis poluentes, emitidos a partir de diferentes locais dentro e acima do conjunto urbano.

Por fim, há ainda a possibilidade de investigação do escoamento e da dispersão atmosférica em diferentes condições de estabilidade atmosférica e, também, a necessidade de estudos com enfoque em locais específicos do conjunto urbano realístico, como regiões de esteira, interseções e assim por diante.

7 REFERÊNCIAS

ARNOLD, S.J. et al. Introduction to the DAPPLE Air Pollution Project. **Science of the Total Environment**, v. 332, p. 139-153, 2004.

ARYA, Paul S. Introduction to micrometeorology. Elsevier, 2001.

ARYA, S. P. **Air Pollution, Meteorology and Dispersion.** Oxford University Press. New York: Oxford University Press, 1999.

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, 2004.

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

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

BLOCKEN, B.; JANSSEN, W. D.; VAN HOOFF, T. CFD simulation for pedestrian wind comfort and wind safety in urban areas: General decision framework and case study for the Eindhoven University campus. **Environmental Modelling & Software**, v. 30, p. 15-34, 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**, v. 139, n. 3, p. 367–394, 2011

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. tracer flux balance at an urban canyon intersection. **Boundary-layer Meteorology,** v. 135, n. 2, p.229-242, 13 fev. 2010.

CARPENTIERI, M.; HAYDEN, P.; ROBINS, A.G. Influence of urban morphology on air flow over building arrays. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 145, p. 61-74, 2015.

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.

- CASEY, M.; WINTERGERSTE, T. (Org.). **Best practice guidelines:** ERCOFTAC Special Interest Group on "Quality and Trust in Industrial CFD". 2000.
- CASTRO I. P.; ROBINS A. G. The flow around a surface-mounted cube in uniform and turbulent streams. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 97, n. 2, p. 307-335, 1977.
- CATON, F.; BRITTER, R. E.; DALZIEL, S. Dispersion mechanisms in a street canyon. **Atmospheric Environment**, v. 37, n. 5, p. 693–702, 2003.
- CEZANA, F. C. Estudo da transferência de massa de poluente no topo de um dossel urbano. 2015. Dissertação (Doutorado em Engenharia Ambiental) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2015.
- CEZANA, F. C. Simulação numérica da dispersão de poluentes ao redor de um obstáculo cúbico isolado sob diferentes condições de estabilidade da atmosfera. 2007. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo.
- CHENG, H.; CASTRO, I. P. Near wall flow over urban-like roughness. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 102, n. 2, p. 229–259, 2002.
- CHO, Chung-Ki et al. Mechanical flexibility of transparent PEDOT: PSS electrodes prepared by gravure printing for flexible organic solar cells. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 95, n. 12, p. 3269-3275, 2011.
- CHOU, P. Y. On velocity correlations and the solutions of the equations of turbulent fluctuation. **Quarterly of Applied Mathematics**, v. 3, n. 1, p. 38-54, 1945.
- COCEAL, O. et al. Structure of turbulent flow over regular arrays of cubical roughness. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 589, p. 375–409, 2007.
- COSTA, I. B. Avaliação de desempenho do modelo de turbulência $\mathbf{k} \boldsymbol{\omega}$ SST para dispersão de poluentes ao redor de obstáculo cúbico em diferentes condições de estabilidade atmosférica. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2016.
- 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.
- FLUENT v.6.3.26, Ansys 2006. Manual do usuário.
- FOKEN, T. The energy balance closure problem: an overview. **Ecological Applications**, vol. 18, pg. 1351-1367, 2008.
- FRANKE, J.; HELLSTEN, A.; SCHLÜNZEN, H.; CARISSIMO, B. (Org.). **Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment:** COST Action 732 Quality Assurance and Improvement of Microscale Meteorological Models. 2007.

- FURIERI, B. et al. Experimental surface flow visualization and numerical investigation of flow structure around an oblong stockpile. **Environmental fluid mechanics**, v. 12, n. 6, p. 533-553, 2012.
- 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, 2010.
- GOULART, E.V. **Flow and dispersion over urban areas**. 2012. Dissertação (Doutorado em Ciências Exatas e da Terra) Programa de Pós-Graduação em Ciências Exatas e da Terra, Universidade de Reading, UK.
- GRIMMOND, C. S. B.; OKE, T. R. Aerodynamic Properties of Urban Areas Derived from Analysis of Surface Form. **Journal of Applied Meteorology**, 1999.
- HAMLYN, 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.
- HARMS, F. et al. Validating LES-based flow and dispersion models. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 99, n. 4, p. 289-295, 2011.
- HINZE, J. O. Turbulence. 2nd. New York: McGraw-Hill, 1975.
- JONES, W. P.; LAUNDER, B. E. The prediction of laminarization with a two-equation model of turbulence. **International journal of heat and mass transfer**, v. 15, n. 2, p. 301-314, 1972.
- 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-e 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.
- KITAGAWA, Y. K. L. Avaliação de desempenho dos esquemas de camada limite planetária do modelo WRF para a região metropolitana de Salvador BA. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2018.
- KLEIN, P. M.; YOUNG, D. T. Concentration fluctuations in a downtown urban area. Part I: analysis of Joint Urban 2003 full-scale fast-response measurements. **Environmental fluid mechanics**, v. 11, n. 1, p. 23-42, 2011.
- LAUNDER, B. E.; SHARMA, B. I. Application of the energy-dissipation model of turbulence to the calculation of flow near a spinning disc. **Letters in heat and mass transfer**, v. 1, n. 2, p. 131-137, 1974.

- LIN, M. et al. Quantitative ventilation assessments of idealized urban canopy layers with various urban layouts and the same building packing density. **Building and Environment**, v. 79, p. 152-167, 2014.
- 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, 2005.
- LIU, Chung-Ho; 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. Modelling the mean velocity profile in the urban canopy layer. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 97, n. 1, p. 25-45, 2000.
- 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.
- MENTER, F. R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. **American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal**, v. 32, n. 8, p. 1598-1605, 1994.
- MURAKAMI, S. Comparison of various turbulence models applied to a bluff body. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 46, p. 21-36, 1993.
- 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.
- PANOFSKY, H. A.; DUTTON, J. A. Atmospheric turbulence: models and methods for engineering aplications. New York: John Wiley & Sons, 1984.
- PATANKAR, S. **Numerical Heat Transfer and Fluid Flow.** 2nd ed. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1980.
- QUAN, Y. et al. Interference effect of a surrounding building group on wind loads on flat roof of low-rise building: Part I, Distribution of local wind pressure coefficient. **Wind Engineers, JAWE**, v. 32, p. 211-2, 2007.

- RAMPONI, R. et al. CFD simulation of outdoor ventilation of generic urban configurations with different urban densities and equal and unequal street widths. **Building and Environment**, v. 92, p. 152-166, 2015.
- RODI, W. DNS and LES of some engineering flows. **Fluid dynamics research**, v. 38, n. 2-3, p. 145-173, 2006.
- RONG, L.; NIELSEN, P. V.; ZHANG, G. Experimental and numerical study on effects of air flow and aqueous ammonium solution temperature on ammonia mass transfer coefficient. **Journal of the Air & Waste Management Association**, v. 60, p. 419-428, 2010.
- ROTTA, J. C. Statistische theorie nichthomogener turbulenz. **Zeitschrift für Physik**, v. 129, n. 6, p. 547-572, 1951.
- 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.
- SANTOS, J.; REIS, N.; GRIFFITHS, R.; MAVROIDIS, I. Numerical simulation of flow and dispersion around an isolated cubical building: The effect of the atmospheric stratification. **Atmospheric Environment**, n. 43, p. 5484-5492. 2009.
- SANTOS, R. M. Morfologia urbana e conforto térmico. In: 2º SEMINÁRIO DE INTEGRAÇÃO, São Paulo, 2004.
- SCAPERDAS A.; ROBINS A.G.; COLVILE R.N. Flow visualisation and tracer dispersion experiments at street canyon intersections. **International Journal of Environment and Pollution**, v. 14, p. 526-537, 2000.
- SCHATZMANN, M.; LEITL, B. Issues with validation of urban flow and dispersion CFD models. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 99, n. 4, p. 169-186, 2011.
- SEINFELD, J. H.; PANDIS, S. N. Chemistry of the atmospheric aqueous phase. **Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change**, v. 337407, 1998.
- SILVA, F. T. Conforto térmico do transeunte: a porosidade urbana como condicionante da ventilação. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2014.
- SILVEIRA NETO, A. (Org.). Fundamentos da turbulência nos fluidos. In: III ESCOLA DE PRIMAVERA TRANSIÇÃO E TURBULÊNCIA, Florianópolis: UFSC, 2002, v. 1, p. 1-52.

- STULL, R. B. **An introduction to boundary layer meteorology**. Kluwer Academic Publishers, Doordrecht, 1988.
- 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.
- TOMINAGA, Y.; MOCHIDA, A.; YOSHIE, R.; KATAOKA, H.; NOZU, T.; YOSHIKAWA, M.; SHIRASAWA, T. AlJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 96, p. 1749-1761, 2008.
- VALGER, S. A.; FEDOROVA, N. N.; FEDOROV, A. V. Structure of turbulent separated flow in the neighborhood of a plate-mounted prism of square section. **Termophysics and Aeromechanics**, v. 22, n.1, p. 29-41, 2015.
- XIE, Z.; CASTRO, I. P. LES and RANS for turbulent flow over arrays of wall-mounted obstacles. **Flow, Turbulence and Combustion**, v. 76, 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, 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.