

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

VIVIAN MACHADO

ESTUDO NUMÉRICO DA DISPERSÃO DE POLUENTE VEICULAR
EM UMA MICRORREGIÃO URBANA

DISSERTAÇÃO

PONTA GROSSA

2019

VIVIAN MACHADO

**ESTUDO NUMÉRICO DA DISPERSÃO DE POLUENTE VEICULAR
EM UMA MICRORREGIÃO URBANA**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestra em Engenharia Mecânica, do Departamento Acadêmico de Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Área de concentração: Térmica e Fluidos.

Orientadora: Profa. Dra. Yara de Souza Tadano

Coorientador: Prof. Dr. Thiago Antonini Alves

PONTA GROSSA

2019

Ficha catalográfica elaborada pelo Departamento de Biblioteca
da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Ponta Grossa
n.61/19

M149 Machado, Vivian

Estudo numérico da dispersão de poluente veicular em uma microrregião
urbana. / Vivian Machado. 2019.
103 f.; il. 30 cm

Orientadora: Profa. Dra. Yara de Souza Tadano
Coorientador: Prof. Dr. Thiago Antonini Alves

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do
Paraná, Ponta Grossa, 2019.

1. Poluentes. 2. Ar - Poluição. 3. Monóxido de carbono. 4. Simulação
(Computadores). 5. Fluidodinâmica computacional. I. Tadano, Yara de Souza. II.
Alves, Thiago Antonini. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. IV. Título.

CDD 620.1

FOLHA DE APROVAÇÃO

Título de Dissertação Nº 30/2019

**“ESTUDO NUMÉRICO DA DISPERSÃO DE POLUENTE VEICULAR EM UMA
MICRORREGIÃO URBANA”**

por

Vivian Machado

Esta dissertação foi apresentada às 14 horas de **18 de junho de 2019**, na Sala de Seminários do DAMEC – J1-114, como requisito parcial para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA, com Área de Concentração em Térmica e Fluidos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora, composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho APROVADO.

**Prof. Dr. Ricardo Henrique Moreton
Godoi (UTFPR)**

**Prof^a. Dr^a. Giane Gonçalves Lenzi
(UTFPR)**

**Prof. Dr. Luiz Eduardo Melo Lima
(UTFPR)**

**Prof^a. Dr^a. Yara de Souza Tadano
(UTFPR) – Orientadora e presidente da
banca**



Visto do Coordenador:

Prof. Dr. Gerson Henrique dos Santos
Coordenador do PPGEM
UTFPR – Câmpus Ponta Grossa

- A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Programa -

Dedico este trabalho ao meu marido Cornélio, meus pais Paulo e Viviane e meu irmão Paulo.

AGRADECIMENTOS

Acima de tudo, agradeço a Deus nosso criador e ao seu filho Jesus mentor supremo, que todos os dias nos proporcionam o sopro da vida e saúde para que possamos ir além dos nossos sonhos ou planos.

Agradeço ao meu marido Cornélio, pela paciência, amor e zelo, não somente durante o período de mestrado como também durante toda minha caminhada acadêmica, sempre entendendo minhas limitações e me incentivado a acreditar que eu era capaz.

Aos meus pais Paulo José Machado e Viviane Damaris de Souza Machado pelo carinho e amor incondicional a mim dedicados, e a todos os esforços imensuráveis que já fizeram pela minha vida, para que hoje eu pudesse ser quem eu sou. Agradeço também ao meu irmão Paulo, que na sua maneira singular, esteve ao meu lado me ouvindo e sendo um dos principais motivos para eu sempre seguir em frente.

À minha orientadora Yara de Souza Tadano por todas as palavras de incentivo, pelos conhecimentos à mim repartidos, pela paciência em ouvir minhas queixas sem nunca lhe faltarem palavras positivas, de afeto e conselhos valiosos.

Ao meu coorientador Thiago Antonini Alves, que desde a graduação acreditou em mim e esteve disposto a me auxiliar no meu desenvolvimento acadêmico e profissional.

Ao Henrique Tadano Antonini Alves que muitas vezes acompanhou nossas reuniões e atividades, alegrando os momentos com sua pureza e sorrisos de criança.

Aos meus amigos mais que especiais, que mesmo distantes estão sempre em meu coração: Ana Carolina Stella Santos, Bruno Alessandro Pacher, Camila Almeida Martins, Jessica Lopes Fontoura, Jessica Emanuelle de Souza Batista, Maysa Grein, Rafael Carvalho e Wellington Uczak de Góes.

Aos grandes Mestres do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica: Anderson Geraldo Marena Pukasiewicz, Ângelo Marcelo Tusset, Luciano Augusto Lourenço, Luiz Eduardo Melo Lima, Jhon Jairo Ramirez Behainne.

Aos meus colegas de curso, que embarcaram comigo na jornada rumo ao título de Mestre: Bianca Marin, Douglas Pereira Vasconcelos, Felipe Mercês Biglia,

Larissa Krambeck, Marcelo Correa Machado Filho, Marina Borsuk Fogaça, Matheus Henrique Zanardini, Roberto Sihnel, Victor Camilo Levartoski Maschietto e Wagner Barth Lenz.

Aos alunos do Laboratório de Dispersão de Poluentes Atmosféricos (LABDIPA) pelo auxílio nas contagens dos veículos.

Ao Programa de Pós-Graduação (Mestrado) em Engenharia Mecânica (PPGEM) e ao Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *Câmpus* Ponta Grossa.

Ao CNPq e CAPES pelo auxílio financeiro.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) de Ponta Grossa, pela oportunidade de estudar no *câmpus* mais bonito e acolhedor.

A todos aqueles que de alguma forma, contribuíram para a realização da minha pesquisa e estiveram ao meu lado: o meu MUITO OBRIGADA!

“O coração do ser humano traça o seu caminho, mas o Senhor lhe dirige os passos.”

Provérbios 16:9

RESUMO

MACHADO, Vivian. **Estudo numérico da dispersão de poluente veicular em uma microrregião urbana**. 2019. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2019.

A industrialização e o crescimento exponencial da população são diariamente acompanhados por impactos significativos no meio ambiente, bem estar e saúde humana. Atuando como grandes contribuintes, os poluentes emitidos por veículos automotores estão presentes na atmosfera, se dispersando e agindo como vilões invisíveis. Neste contexto, o estudo da dispersão dos poluentes atmosféricos auxilia na criação de soluções que possam melhorar qualidade de vida da população. No Brasil, pesquisas relacionadas ao tema ainda são poucas, e dados de monitoramento da qualidade do ar não são registrados com frequência. Visando ampliar o entendimento da dispersão de poluentes atmosféricos em Ponta Grossa, cidade que ocupa quinto lugar em números de automóveis no Paraná, esta pesquisa se apresenta como pioneiro no estudo da dispersão do monóxido de carbono (CO), em uma microrregião urbana no centro da cidade, além de contemplar uma projeção de cenário futuro considerando a troca da frota de ônibus atual para elétricos. No local simulado há uma grande circulação de pedestres e uma estação de monitoramento da qualidade do ar. A vazão mássica de CO nas vias simuladas foi calculada baseada em fatores de emissões da literatura e na contagem manual do fluxo de veículos no local. As simulações foram realizadas utilizando uma ferramenta de fluidodinâmica computacional (CFD), o *software* comercial ANSYS/Fluent™ 19.1. Com os resultados, foi possível obter visualizações das condições fluidodinâmicas no local, demonstrando possíveis acúmulos de poluentes devido a recirculações e características do vento na região. Os resultados de concentração do CO apresentam valores em torno de 15 ppm, considerando uma altura de 1,5 m em relação ao solo, superiores ao valor de 9 ppm, considerado limite de acordo com os padrões da qualidade do ar nacionais. Na projeção do cenário futuro, com a substituição de todos os ônibus convencionais que circulam no local para ônibus elétricos, foi obtida uma redução de até 8,5% nas emissões de CO, o que implica na possível melhoria da qualidade do ar respirado pela população local.

Palavras-chave: Poluentes atmosféricos. Monóxido de carbono. Simulação numérica. Dinâmica dos fluidos Computacional.

ABSTRACT

MACHADO, Vivian. **Numerical study of vehicular pollutant dispersion in an urban microregion**. 2019. 103 p. Thesis (Master's Degree in Mechanical Engineering) - Federal University of Technology – Paraná, Ponta Grossa, 2019.

Industrialization and the exponential population growth are daily accompanied by significant impacts on the environment, well-being and human health. Acting as major contributors, pollutants emitted by motor vehicles are present in the atmosphere, dispersing and acting as invisible villains. In this context, the study of air pollutants dispersion helps to create solutions that can improve the population's life quality. In Brazil, there are still few researches related to the subject, and air quality monitoring data are not frequently obtained. Aiming to broaden the understanding of atmospheric pollutants dispersion at Ponta Grossa, city that occupies 5th place in car numbers at Paraná state, this research presents itself as a pioneer in the study of carbon monoxide (CO) at an urban micro region downtown. Also contemplating a projection of future scenario considering the exchange of current buses fleet to electric ones. At the simulated site there is a large circulation of pedestrians and an air quality monitoring station. The CO mass flow in the simulated routes was calculated based on literature emission factors and the manual counting of the vehicles flow in the site. The simulations were performed using a computational fluid dynamics (CFD) tool, commercial software ANSYS/Fluent™19.1. With the results, it was possible to obtain visualizations of the fluid dynamics conditions in the place, demonstrating possible pollutants accumulations due to recirculation region and wind characteristics. The results of CO concentration are around 15 ppm, considering 1.5 m of height in relation to the ground level, above 9 ppm, considered the limit according to the national air quality standards. In the future scenario projection, with the change of all conventional buses that circulate in the place to electric buses, a reduction of up to 8.5% in CO emissions was obtained, which reflects in the improvement of the air quality to the local population.

Keywords: Atmospheric pollutants. Carbon monoxide. Numerical simulation. Computational fluid dynamics (CFD).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Escalas climáticas e camadas atmosféricas urbanas.	30
Figura 2 - Métodos e modelos de turbulência aplicados em escoamentos viscosos em CFD.	36
Figura 3 - Etapas de pré-processamento para o processo de simulação numérica em CFD.	50
Figura 4 - Etapas de processamento para o processo de simulação numérica em CFD.	51
Figura 5 - Etapas de cálculo e pós-processamento para o processo de simulação numérica em CFD.	52
Figura 6 - Região de Ponta Grossa utilizada para análise de dispersão de poluentes.	60
Figura 7 - Perfil de concentração no plano xy para emissões de CO_2	65
Figura 8 - Perfil de concentração no plano yz para diferentes distâncias em x	66
Figura 9 - Representação da configuração dos prédios utilizados na simulação.	67
Figura 10 - Comparação do perfil de velocidade na dimensão vertical em $x = 0$	69
Figura 11 - Comparação dos contornos de fração volumétrica de CO_2 , em 0,2 segundo nos planos vertical $x = 0$ m e horizontal $z = 0,025$ m.	70
Figura 12 - Comparação dos contornos de fração volumétrica de CO_2 , em 3,0 segundo nos planos vertical $x = 0$ m e horizontal $z = 0,025$ m.	71
Figura 13 - Rosa dos ventos de Ponta Grossa/PR, nos anos de 2017 e 2018.	72
Figura 14 - Rosa dos ventos na localização da estação de monitoramento.	72
Figura 15 - Dimensões do domínio simulado.	75
Figura 16 - Vista superior do volume de controle, com distâncias em função de H e identificação das fontes de emissões.	76
Figura 17 - Diferentes malhas computacionais utilizadas no estudo de independência.	78
Figura 18 - Detalhamento da malha nas regiões próximas à parede.	80
Figura 19 - Visão geral dos vetores de velocidade no plano (x,y) do domínio computacional.	81
Figura 20 - Campo de magnitude de velocidade no plano $(x,y,0)$ do domínio computacional.	82
Figura 21 - Perfil de velocidade em diferentes linhas do domínio, no plano $(x,y,0)$	82
Figura 22 - Vista superior dos vetores de velocidade no plano $(x,1.5,z)$	83

Figura 23 - Representação da recirculação na área próxima à entrada do <i>shopping</i> (Rua Ermelino de Leão).....	84
Figura 24 - Representação da recirculação na Rua Benjamin Constant.....	84
Figura 25 - Distribuição de concentração de CO no plano (x,1.5,z).....	85
Figura 26 - Distribuição de concentração de CO no plano yz, na região próxima à estação de monitoramento.....	86
Figura 27 - Distribuição de concentração de CO no plano yz, na região próxima à entrada do terminal de ônibus.....	87
Figura 28 - Distribuição de concentração de CO no plano xy, na Rua Benjamin Constant.....	88
Figura 29 - Campo de concentração de CO variando de 0 a 20 ppm, no plano xy, z = 1,5m: a) cenário com ônibus convencionais e b) cenário com ônibus elétricos.....	89

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Padrões de concentração de CO em ppm, no período de referência de 8h, em diferentes países do mundo.	27
Gráfico 2 - Emissões relativas por tipo de fonte na Região Metropolitana de São Paulo.	27
Gráfico 3 - Fração volumétrica de CO ₂ na dimensão vertical z, considerando y = 0.	68
Gráfico 4 - Perfil de velocidade polinomial do vento na cidade de Ponta Grossa/PR.	73
Gráfico 5 - Comparação entre os valores de velocidade considerando as três malhas computacionais testadas.	79
Gráfico 6 - Análise de elementos da malha computacional considerando a qualidade ortogonal.	80
Gráfico 7 - Comparação da concentração de CO, para o cenário atual e com uso de ônibus elétricos.	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Padrões Nacionais de qualidade do ar.....	25
Tabela 2 - Níveis de Atenção, Alerta e Emergência para poluentes e suas concentrações.....	26
Tabela 3 - Inventário de emissões veiculares na cidade de Ponta Grossa, no ano de 2011.	28
Tabela 4 - Condições de estabilidade atmosférica e suas características.	33
Tabela 5 - Fatores de emissão de CO, NO ₂ e CH ₄	59
Tabela 6 - Número de veículos trafegando por hora nas vias estudadas.	74
Tabela 7 - Fluxo mássico de CO nas vias simuladas.....	74

SIGLAS E ACRÔNIMOS

CAD	Desenho Auxiliado por Computador, do inglês <i>Computer Aided Design</i>
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CFD	Dinâmica dos Fluidos Computacional, do inglês <i>Computational Fluid Dynamics</i>
CLP	Camada Limite Planetária
CO	Monóxido de Carbono
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
DNS	Simulação Numérica Direta, do inglês <i>Direct Numerical Simulation</i>
IAP	Instituto Ambiental do Paraná
IBAMA	Instituto Brasileiro de Meio Ambiente
LES	Simulação de Grande Escalas, do inglês <i>Large Eddy Simulation</i>
MP	Material Particulado
NMHC	Hidrocarbonetos Não Metano, do inglês <i>Non-Methane Hydrocarbons</i>
PBL	Camada Limite Planetária, do inglês <i>Planetary Boundary Layer</i>
PPM	Partes por milhão
PROCONVE	Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores
PROMOT	Programa de Controle de Poluição do Ar por Motociclos e Similares
PTS	Partículas Totais em Suspensão
RANS	<i>Navier-Stokes</i> com Médias de <i>Reynolds</i> , do inglês <i>Reynolds-Averaged Navier-Stokes</i>
RCHO	Compostos Aldeídos
RNG	Grupo de Renormalização, do inglês <i>Re-Normalization Group</i>
SIMEPAR	Sistema Meteorológico do Paraná
SUV	Veículo Utilitário Esportivo, do inglês <i>Sport Utility Vehicle</i>
UBL	Camada Limite Urbana, do inglês <i>Urban Boundary Layer</i>
UCL	Camada no Nível de Cobertura, do inglês <i>Urban Canopy Layer</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Latinas

c	Concentração das espécies químicas	[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
c_p	Calor específico a pressão constante	[$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$]
F_{ei}	Fator de emissão poluente i correspondente ao veículo j	[g/km]
F_{rj}	Número de veículos j de uma categoria r	
g	Aceleração da gravidade	[m/s^2]
G_b	Geração de energia cinética devido a flutuações	
G_k	Produção de energia cinética turbulenta	
h	Entalpia específica	[J/kg]
k	Energia cinética turbulenta	[m^2/s^2]
L	Distância percorrida	[km]
m_l	Fração mássica da espécie l	
Pr	Número de <i>Prandtl</i>	
Pr_t	Número de <i>Prandtl</i> turbulento	
S	Termo fonte	
Sc	Número de <i>Schmidt</i>	
Sc_t	Número de <i>Schmidt</i> turbulento	
t	Tempo	[s]
u^+	Velocidade adimensionalizada	
u_i	Componente de velocidade na direção i	[m/s]
u_p	Velocidade tangencial	[m/s]
x_i	Componente x na direção i	[m]
z^+	Distância adimensionalizada	

Letras Gregas

β	Coeficiente de expansão térmica	[$1/\text{K}$]
σ_k	Número de <i>Prandtl</i> para a energia cinética turbulenta	
σ_ε	Número de <i>Prandtl</i> para a difusão turbulenta	

δ_{ij}	Delta de <i>Kronecker</i>	
ΔB	Fator de rugosidade adimensionalizado	
ε	Taxa de dissipação de energia turbulenta	[m ² /s ³]
μ	Viscosidade dinâmica do fluido	[Pa.s]
μ_t	Viscosidade turbulenta do fluido	[Pa.s]
ρ	Massa específica do fluido	[kg/m ³]
τ'_{ij}	Tensor de tensões de <i>Reynolds</i>	

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
1.1 OBJETIVOS.....	20
1.1.1 Objetivo Geral.....	20
1.1.2 Objetivos Específicos.....	20
1.2 JUSTIFICATIVA.....	20
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	21
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1 POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA E SAÚDE HUMANA	23
2.2 QUALIDADE DO AR.....	24
2.3 USO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS.....	29
2.4 MECANISMOS E CONCEITOS DA DISPERSÃO DOS POLUENTES NA ATMOSFERA.....	29
2.4.1 Escalas Atmosféricas.....	30
2.4.2 Camadas Verticais Atmosféricas	31
2.4.3 Turbulência Atmosférica	32
2.4.4 Estabilidade Atmosférica	32
2.5 MODELOS MATEMÁTICOS PARA A DISPERSÃO DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS.....	33
2.5.1 Modelos Eulerianos	34
2.5.2 Modelo Lagrangeano.....	34
2.6 APLICAÇÃO DE CFD NA DISPERSÃO DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS .	35
2.6.1 Método RANS.....	37
2.6.2 Método LES	37
2.6.3 Método DNS	37
2.7 MODELAGEM MATEMÁTICA	38
2.7.1 Equações de Conservação da Massa, <i>Momentum</i> e Navier- Stokes	38
2.7.2 Equação de Conservação da Energia	39
2.7.3 Equação de Transporte das Espécies Químicas	40
2.8 REVISÃO DA LITERATURA.....	40
3 METODOLOGIA	42
3.1 SOLUÇÃO NUMÉRICA.....	48
3.1.1 Método dos Volumes Finitos.....	48
3.1.2 Metodologia para Execução da Simulação Numérica	49

3.2 CONSIDERAÇÕES PARA RESOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES GOVERNANTES.....	52
3.2.1 Turbulência.....	53
3.2.2 Modelagem do escoamento Próximo à Parede.....	55
3.3 MÉTODOS DE SOLUÇÃO.....	56
3.3.1 Acoplamento da Pressão e Velocidade.....	56
3.3.2 Discretização espacial.....	56
3.3.3 Critério de Convergência.....	57
3.3.4 Domínio Computacional.....	57
3.3.5 Características Computacionais.....	58
3.4 EMISSÕES ATMOSFÉRICAS NA REGIÃO DE PONTA GROSSA.....	58
3.5 REGIÃO DE ESTUDO.....	60
3.6 INFLUÊNCIA DO VENTO NA DISPERSÃO DE POLUENTES.....	61
3.7 CONTAGEM DOS VEÍCULOS.....	62
4 RESULTADOS.....	57
4.1 VERIFICAÇÃO NUMÉRICA.....	63
4.1.1 Caso Bolognesi e Montelato (2011).....	63
4.1.2 Caso Tan et al. (2018).....	66
4.2 CARACTERÍSTICAS DOS VENTOS NA REGIÃO DE PONTA GROSSA/PR..	71
4.3 CÁLCULO DE EMISSÕES BASEADO NA CONTAGEM DE VEÍCULOS.....	74
4.4 CRIAÇÃO DA GEOMETRIA E CONDIÇÕES DE CONTORNO.....	75
4.5 TESTE DE MALHA COMPUTACIONAL.....	77
4.6 RESULTADOS DE ESCOAMENTO.....	81
4.7 RESULTADOS DE CONCENTRAÇÃO.....	85
4.8 CENÁRIO COM ÔNIBUS ELÉTRICO.....	88
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	85
5.1 CONCLUSÕES.....	91
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	92
5.3 TRABALHOS PUBLICADOS.....	86
REFERÊNCIAS.....	93
APÊNDICE A - FORMULÁRIO PARA CONTAGEM DE VEÍCULOS.....	100
APÊNDICE B - UDF CARACTERÍSTICA DO PERFIL DO VENTO EM PONTA GROSSA/PR.....	102

1 INTRODUÇÃO

O crescimento acelerado da população nas cidades de países emergentes, ocasionado pela industrialização, veio acompanhado de um aumento significativo no consumo de combustíveis fósseis e, conseqüente acréscimo na emissão de poluentes atmosféricos. Em contrapartida, o estudo da dispersão de poluentes e o monitoramento da qualidade do ar ainda caminham vagarosamente. No contexto de grandes centros, as emissões veiculares consistem nas principais fontes de poluição atmosférica (MORADPOUR; AFSHIN e FARHANIEH, 2016; GONZÁLES et al., 2017).

A poluição atmosférica representa uma preocupação para a população, não apenas em relação aos impactos ao meio ambiente, como também aos danos gerados diretamente à saúde humana, desde problemas respiratórios leves, como alergias, até casos graves de doenças degenerativas no sistema nervoso e lesões em órgãos vitais. Estima-se que 60% a 80% das mortes por doenças cardiovasculares têm relação com a poluição atmosférica (MORADPOUR; AFSHIN e FARHANIEH, 2016; BOURDREL et al., 2017).

Dados apresentados pela Organização Mundial de Saúde (OMS) são preocupantes em relação ao número de mortes com causas atribuídas à poluição atmosférica ambiental: mundialmente 3 milhões de pessoas morreram no ano de 2012 (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2016).

Para verificar se a qualidade do ar atende aos padrões aceitáveis e oferece riscos reduzidos à saúde humana, faz-se necessário o seu monitoramento, atividade realizada por meio de estações de monitoramento, estrategicamente localizadas em locais de alto fluxo de veículos ou regiões de elevada concentração de indústrias. De acordo com a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 491/2018, os índices que representam a qualidade do ar em locais monitorados devem estar disponíveis e acessíveis à população.

Além dos dados obtidos empiricamente, por meio das estações de monitoramento da qualidade do ar, outro instrumento técnico para a gestão ambiental são os modelos matemáticos. Com grande versatilidade, eles são capazes, com recursos computacionais, descrever, interpretar e controlar dados de

qualidade do ar, além de avaliar áreas de risco e, até mesmo, identificar fontes poluidoras (MOREIRA, 2009).

Dentre os meios de resolução computacional de modelos matemáticos para a obtenção de dados de emissão e dispersão de poluentes, destacam-se os modelos baseados em dinâmica dos fluidos computacional (CFD – do inglês *Computational Fluid Dynamics*). Esta importante ferramenta une a praticidade e a robustez dos métodos teóricos, com a possibilidade de fornecer informações sobre os escoamentos e dispersões, da mesma forma que os métodos experimentais, com o diferencial de utilização de poucos recursos físicos e baixo custo. Devido ao avanço da tecnologia e evolução na capacidade de processamento dos computadores, os modelos baseados em CFD têm sido cada vez mais utilizados (PFLUCK, 2010; TOMINAGA e STATHOPOULOS, 2016).

Conhecer o comportamento dos poluentes proporciona meios para criação de alternativas que possam melhorar a saúde da população, auxiliando no estabelecimento de padrões regionais de qualidade do ar mais adequados com a realidade dos locais, implantação e otimização de redes de monitoramento e criações de políticas que ajudem no combate à poluição atmosférica.

A região de Ponta Grossa possui um lugar de destaque na lista de grandes cidades do Paraná, ocupando o lugar de quinta cidade com maior frota de veículos: cerca de 120.000 automóveis, 1.200 ônibus e 11.600 caminhões, segundo dados do IBGE (2016). A cidade possui uma estação de monitoramento da qualidade do ar sob responsabilidade do Instituto Ambiental do Paraná (IAP), que apresenta irregularidades no funcionamento, impossibilitando o acesso aos dados coletados (KOSSOSKI, 2018).

Considerando a grande contribuição dos poluentes veiculares e, com o intuito de aprimorar o entendimento da qualidade do ar em Ponta Grossa, a microrregião onde está localizada a estação de monitoramento da qualidade do ar foi escolhida para realização de um estudo numérico pioneiro sobre a dispersão de poluentes atmosféricos em Ponta Grossa.

A eletrificação da frota urbana pode se apresentar como uma alternativa para a redução da emissão de poluentes e melhoria na qualidade do ar e saúde pública, uma vez que a frota atual é em sua grande maioria abastecida por diesel (SLOWIK, 2018). Com a versatilidade do uso de um modelo CFD, foi possível neste trabalho

analisar um cenário futuro para a cidade de Ponta Grossa, utilizando ônibus elétricos.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Este trabalho apresenta como objetivo geral utilizar uma modelagem numérica, com o auxílio do *software* comercial *ANSYS/Fluent*TM19.1 (ferramenta de CFD) para realização do primeiro estudo da dispersão de monóxido de carbono (CO), como poluente veicular, em uma microrregião urbana localizada em Ponta Grossa/PR.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Validar o método numérico, com a reprodução de casos da literatura em que o CFD é utilizado na dispersão de poluentes.
- Construir uma geometria e um domínio computacional com características representativas da microrregião onde atualmente está localizada a estação de monitoramento da qualidade do ar.
- Realizar as simulações numéricas e obter os resultados das características fluidodinâmicas de valores de concentração de CO, utilizando o *software* comercial *ANSYS/Fluent*TM19.1.
- Simular e comparar um cenário futuro, considerando a substituição de toda a frota de ônibus diesel circulando na região, para ônibus elétricos não emissores de CO.

1.2 JUSTIFICATIVA

O conhecimento da qualidade do ar nos centros urbanos possibilita a criação de alternativas e soluções para melhoria na qualidade de vida da população, podendo também ser utilizada como base para a otimização dos programas de controle de emissões existentes.

Considerando dados do Ministério do Meio Ambiente (2014), o número de estações de monitoramento da qualidade do ar em funcionamento no país ainda é restrito, assim sendo, o uso de simulações em CFD se apresenta como uma alternativa, capaz de avaliar a dispersão de poluentes, além de possibilitar a criação de diferentes cenários, como alterações de configuração urbana e uso de diferentes tecnologias e combustíveis (PFLUCK, 2010).

Na literatura aberta não foram encontrados trabalhos que demonstrem o comportamento dos poluentes na cidade de Ponta Grossa, assim sendo, realizar uma pesquisa pioneira possibilita um melhor entendimento da qualidade do ar na microrregião onde é localizada a estação de monitoramento. Devido ao dinamismo da ferramenta CDF, é possível também projetar um cenário futuro, como o uso de ônibus elétricos, avaliando suas consequências na melhoria da qualidade do ar na região.

A escolha do monóxido de carbono como poluente simulado está associada à sua grande contribuição nas emissões oriundas de veículos automotores, seu comportamento inerte e sua toxicidade para o ser humano, devido à alta afinidade com a hemoglobina (SLOWIK, 2018).

A possibilidade de reprodução da metodologia utilizada, em locais onde não há monitoramento da qualidade do ar, se apresenta como uma alternativa para o melhor entendimento dos níveis de poluição em qualquer local.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O Capítulo 2 é constituído da fundamentação teórica, apresentando os principais conceitos e temas relacionados à pesquisa, juntamente com uma revisão de trabalhos na área e suas principais contribuições.

No Capítulo 3 é apresentada uma sistemática da metodologia empregada no trabalho, partindo do método utilizado para resolução numérica do problema e assuntos relacionados, informações sobre a região de estudo, forma de estudo das características locais que influenciam na dispersão de poluentes e metodologia para obtenção dos dados de entrada da simulação.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados da validação numérica, com a reprodução de casos da literatura, os cálculos de emissões, a reprodução do local simulado por meio da geometria do domínio, os testes de malha e os resultados

relacionados ao perfil do escoamento e concentração considerando o cenário de ônibus convencionais e frota elétrica.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

No Apêndice A estão exemplificadas as ferramentas utilizadas na contagem dos veículos e o Apêndice B apresenta a programação utilizada para caracterizar o perfil do vento na simulação.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta o embasamento teórico, para a definição dos conceitos e ferramentas utilizados no alcance dos objetivos propostos para esta dissertação. Conceitos importantes relacionados à emissão de poluentes atmosféricos, o ambiente urbano, fenômenos físicos e interação entre as partes, são expostos de maneira sucinta. Uma revisão da literatura, contendo trabalhos relevantes é apresentada no final do capítulo.

2.1 POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA E SAÚDE HUMANA

Um clássico exemplo dos danos causados pela poluição atmosférica na população é o caso da “*Big Smoke*”, que ocorreu em Londres no ano de 1952. Após períodos de guerra, durante cinco dias, Londres sofreu com uma severa onda de poluição e a cidade toda foi tomada por um grande nevoeiro. A névoa foi gerada pela queima excessiva de carvão de baixa qualidade, rico em enxofre. A inversão térmica, que intensificou o fenômeno, ocorreu devido à densa massa de ar frio presente na atmosfera, gerando o acúmulo de partículas de carvão queimado. Acredita-se que o nevoeiro tenha matado mais de 12.000 pessoas e deixado milhares de doentes. As mortes ocorreram por infecções no trato respiratório, pela obstrução das vias respiratórias superiores devido a secreções acumuladas, broncopneumonia e bronquite (DAVIS et al., 2002).

Hoje em dia, mais de meio século após este grande desastre ambiental, a poluição se faz presente de forma mais sutil, porém não menos perigosa, em nosso cotidiano. Desde então, foram necessárias inúmeras mudanças e medidas para melhorar a qualidade do ar, dentre elas, o estabelecimento de regulamentações para níveis de emissões veiculares e a exigência do uso de filtros e sistemas de pós-tratamento em chaminés de fábricas e em sistemas de escape automotivos.

A poluição do ar se apresenta como um dos maiores desafios confrontantes entre desenvolvimento de grandes cidades e sustentabilidade, devido principalmente ao aumento no número de veículos em circulação e à industrialização.

Segundo Oke (1987), existem dois fatores que determinam o montante de poluição em uma determinada localização: a natureza da emissão e o estado da

atmosfera. Assim sendo, a qualidade do ar não depende somente da fonte poluidora, mas é influenciada também pela condição meteorológica, que definem uma maior ou menor concentração.

De acordo com dados da Organização Mundial de Saúde (OMS), 92% da população mundial vive em locais onde os níveis de qualidade do ar ultrapassam os estabelecidos. (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2016). Estima-se que a poluição foi responsável pela morte prematura de 9 milhões de pessoas em 2015 (16% do valor total de mortes em geral no mundo), sendo mais mortífera que doenças graves como AIDS, tuberculose e malária (LANDRIGAN, et al., 2018).

Produzido pela queima incompleta dos combustíveis fósseis, o monóxido de carbono (CO), quando inalado pelo nosso organismo, cerca de 80-90% liga-se rapidamente a hemoglobina do sangue, devido sua alta afinidade, de 200 a 250 vezes maior que como oxigênio. A formação da carboxiemoglobina reduz a capacidade de transporte de oxigênio do sangue e prejudica a sua liberação para os tecidos, causando hipóxia tecidual e prejudicando os tecidos com maior consumo de oxigênio como os do cérebro, coração e músculo esquelético. Dependendo do nível de exposição ao monóxido de carbono, os danos podem ser desde dificuldades na visão, tonturas, retardamento de reflexos e até mesmo a morte mesmo em baixas concentrações (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2000).

Estudos realizados por Liu et al. (2018) em 272 cidades da China, demonstram associações significativas da exposição de curto prazo de monóxido de carbono ambiente e a mortalidade por doenças cardiovasculares na China. Resultados similares foram apresentados por Samoli et al., (2007), que estudou 19 cidades europeias e concluiu que o aumento de 1 mg/m³ (aproximadamente 1ppm) na concentração média de CO em 2 dias, foi associada a 1,25% no aumento das mortes por doenças cardiovasculares.

2.2 QUALIDADE DO AR

No ano de 2000, a OMS publicou um guia no qual são apresentados valores de referência, indicando os limites de concentração de poluentes, que quando ultrapassados causam efeitos nocivos à saúde humana, bem-estar, à fauna e à flora. No ano de 2005 o guia foi atualizado com valores limite para Material Particulado

(MP), Ozônio (O₃), Dióxido de Enxofre (SO₂), Dióxido de Nitrogênio (NO₂). Os valores guia recomendados devem ser atendidos pelos países, de acordo com suas especificidades, políticas de qualidade do ar e de gestões políticas.

No Brasil, os padrões de qualidade do ar eram estabelecidos pela resolução do CONAMA n°3/1990, que apresentava valores de três a quatro vezes mais permissivos do que os valores indicados pela OMS (INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE, 2012).

Em novembro de 2018, entrou em vigor a Resolução CONAMA n° 491/2018, que revogou e substituiu a Resolução CONAMA n°3/1990, e incluiu padrões para emissões de MP. A partir da sua publicação, os Padrões de Qualidade do ar Intermediários PI-1 entram em vigor nacionalmente para os poluentes legislados, com exceção ao Monóxido de Carbono (CO), Partículas Totais em Suspensão (PTS) e Chumbo (Pb) os quais devem seguir os padrões de qualidade do ar final (PF), conforme exemplificado na Tabela 1.

Tabela 1 - Padrões Nacionais de qualidade do ar.

Poluente Atmosférico	Período de Referência	PI-1	PI-2	PI-3	PF	
		µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	µg/m ³	ppm
Material Particulado - MP ₁₀	24 horas	120	100	75	50	-
	Anual ¹	40	35	30	20	-
Material Particulado - MP _{2,5}	24 horas	60	50	37	25	-
	Anual ¹	20	17	15	10	-
Dióxido de Enxofre - SO ₂	24 horas	125	50	30	20	-
	Anual ¹	40	30	20	-	-
Dióxido de Nitrogênio - NO ₂	1 hora ²	260	240	220	200	-
	Anual ¹	60	50	45	40	-
Ozônio - O ₃	8 horas ³	140	130	120	100	-
Fumaça	24 horas	120	100	75	50	-
	Anual ¹	40	35	30	20	-
Monóxido de Carbono - CO	8 horas ³	-	-	-	-	9
Partículas Totais em Suspensão - PTS	24 horas	-	-	-	240	-
	Anual ⁴	-	-	-	80	-
Chumbo - Pb ⁵	Anual ¹	-	-	-	0,5	-

¹ - média aritmética anual

² - média horária

³ - máxima média móvel obtida no dia

⁴ - média geométrica anual

⁵ - medido nas partículas totais em suspensão

Fonte: CONAMA (2018).

Para os demais Padrões de Qualidade do Ar Intermediários (PI-2 e PI-3) e Final (PF), apresentados na Tabela 1, terão adoção futura, levando em consideração os Planos de Controle de Emissões Atmosféricas e os Relatórios de Avaliação da Qualidade do Ar, que devem ser elaborados pelos órgãos estaduais e distrital de meio ambiente em até 3 anos após publicação da Resolução. Os padrões finais (PF) estabelecidos pela nova Resolução são baseados nos de referência da OMS.

Com a atualização da Resolução, são publicados também padrões nacionais de níveis de atenção, alerta e emergência para concentrações de poluentes, conforme demonstrado na Tabela 2.

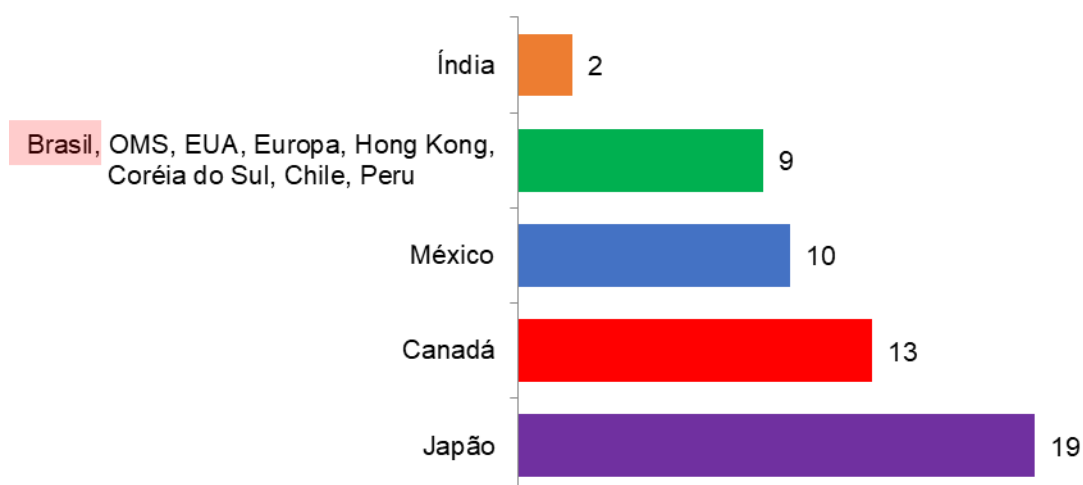
Tabela 2 - Níveis de Atenção, Alerta e Emergência para poluentes e suas concentrações.

Nível	Poluentes de Concentrações					
	SO ₂ µg/m ³ (média de 24h)	Material Particulado		CO ppm (média móvel de 8h)	O ₃ µg/m ³ (média móvel de 8h)	NO ₂ µg/m ³ (média de 1h)
		MP ₁₀ µg/m ³ (média de 24h)	MP _{2,5} µg/m ³ (média de 24h)			
Atenção	800	250	125	15	200	1.130
Alerta	1.600	420	210	30	400	2.260
Emergência	2.100	500	250	40	600	3.000

Fonte: CONAMA (2018).

Tomando como exemplo o CO, com o auxílio do Gráfico 1, é possível observar que há uma grande discrepância entre os padrões estabelecidos nos países ao redor do mundo. A Índia apresenta o padrão mais rigoroso, enquanto no Japão o limite ultrapassa em 10 vezes o menor valor padrão. O Brasil segue os padrões da OMS, juntamente com os EUA e Europa.

Gráfico 1 - Padrões de concentração de CO em ppm, no período de referência de 8h, em diferentes países do mundo.

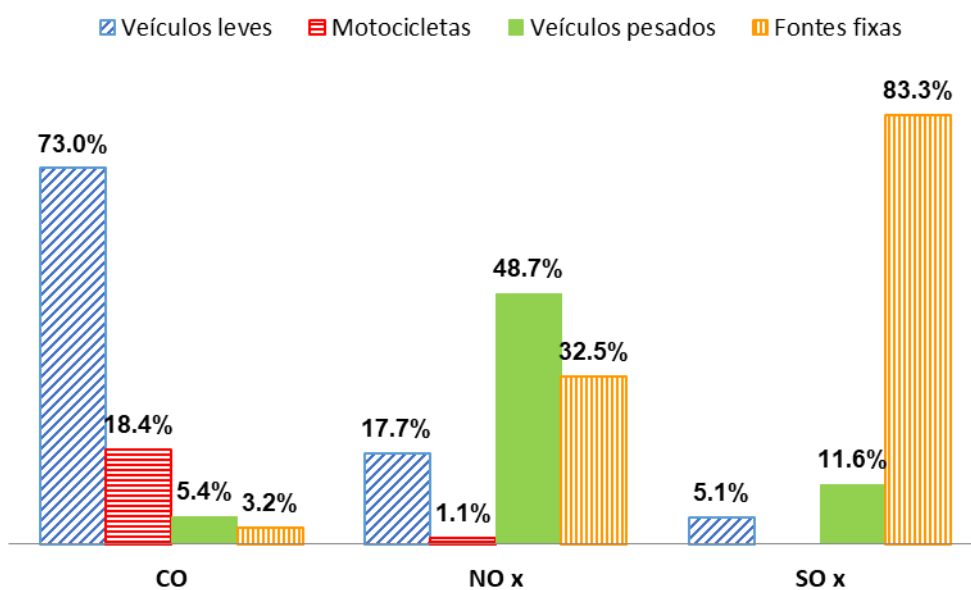


Fonte: Adaptado de Instituto de Energia e Meio Ambiente (2012).

No contexto da poluição veicular, as contribuições dos poluentes variam de acordo com o tipo de veículo em circulação, sendo possível observar no

Gráfico 2, considerando a região metropolitana de São Paulo com frota de 11,5 milhões de veículos (CETESB, 2018).

Gráfico 2 - Emissões relativas por tipo de fonte na Região Metropolitana de São Paulo.



Fonte: Adaptado de CETESB (2018).

Grauer (2013) apresentou um Inventário Estadual de Emissões de Poluentes Atmosféricos, visando de propor uma revisão e ampliação na rede de monitoramento do estado do Paraná. Estimativas, considerando a frota de veículos existentes no ano de 2011, foram utilizadas como base para a criação do inventário. Dados de emissões veiculares dos principais poluentes, em toneladas por ano, foram levantados para as dez maiores cidades do Paraná. Ponta Grossa é a 4ª cidade em número de população do estado, e seus dados são apresentados na Tabela 3, onde o valor da contribuição de toneladas por ano de CO é o maior em comparação com os demais poluentes.

Tabela 3 - Inventário de emissões veiculares na cidade de Ponta Grossa, no ano de 2011.

CO (ton/ano)	NO _x (ton/ano)	RCHO (ton/ano)	NMHC (ton/ano)	CH ₄ (ton/ano)	MP (ton/ano)	SO _x (ton/ano)
15568	1146	66	5239	45	165	321

Fonte: Adaptado de Grauer (2013).

Além das emissões provenientes dos veículos automotores, existem também as emissões advindas das indústrias. O material particulado e o dióxido de enxofre presentes na atmosfera, podem ser de fontes tanto veiculares como industriais, já o monóxido de carbono e os óxidos de nitrogênio, em sua grande maioria, são resultantes da queima de combustíveis fósseis nos motores dos automóveis.

Como uma das conclusões do inventário, Grauer (2013) salienta a importância da instalação de mais estações de monitoramento da qualidade do ar no Paraná, incluindo na cidade de Ponta Grossa.

No ano de 2017, iniciaram-se as atividades de uma estação de monitoramento da qualidade do ar na região central de Ponta Grossa, no Parque Ambiental. Por motivos técnicos, até o término deste trabalho, não foi possível a obtenção dos dados da referente estação.

Além dos dados advindos das estações de monitoramento, outras ferramentas podem ser utilizadas, visando de se obter a distribuição de poluentes atmosféricos. Abordagens matemáticas, com a aplicação de métodos numéricos disponíveis na literatura e modelos baseados em fluidodinâmica computacional, são alternativas que não necessitam de grande infraestrutura para obtenção de dados.

2.3 USO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS

O uso de veículos elétricos não apenas no Brasil, como no mundo não é uma novidade. No passado, se apresentaram como grande alternativa, porém por razões políticas e econômicas foram sendo esquecidos (BARAN e LEGEY, 2011).

Juntamente com a necessidade de criação de alternativas para melhorar a qualidade do ar, e a liberdade em relação à dependência do petróleo, os carros elétricos vêm ganhando espaço e mercado. A eletrificação das frotas se apresenta como grande alternativa, incentivada através de políticas públicas, visando à redução do impacto ambiental e qualidade de vida da população.

Atualmente, no Brasil, já existem legislações de incentivo a comercialização de veículos elétricos no país. No estado do Paraná, o atual governador assinou, em 21 de março de 2019, um projeto de lei que propõe zerar a alíquota de IPVA, que atualmente é de 3,5%, e também apresentou uma proposta para isentar o ICMS para aquisição de veículos elétricos no estado (PARANÁ, 2019).

Mesmo com incentivos, a adesão da população a carros elétricos ainda caminha a passos curtos, e o crescimento violento da frota de veículos no país é pauta para discussão em muitas agendas públicas. Uma oportunidade eficiente de redução do número de veículos em circulação é o incentivo ao uso e modernização do transporte público (PEREIRA, BRANCHI e FERREIRA, 2019).

No contexto do uso de ônibus elétricos no transporte público, o Brasil atualmente dispõe de capacidade para fabricação local de ônibus híbridos, por meio das empresas Volvo e Eletra, e também ônibus 100% elétricos, produzidos pelas empresas Eletra e BYD. Outra vantagem são os financiamentos disponíveis no Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Sustentável (BNDES), para comercialização de veículos que não têm como combustível principal, o Diesel (VAZ, BARROS e CASTRO, 2015).

2.4 MECANISMOS E CONCEITOS DA DISPERSÃO DOS POLUENTES NA ATMOSFERA

Para a aplicação de modelos matemáticos ou utilização de fluidodinâmica computacional, é de suma importância o conhecimento detalhado dos fenômenos

físicos, químicos e mecanismos que regem a dispersão dos poluentes atmosféricos, as condições de contorno ocasionadas pelas características da atmosfera e os principais parâmetros influenciadores como condições climáticas, direção do vento e obstáculos presentes no ambiente simulado.

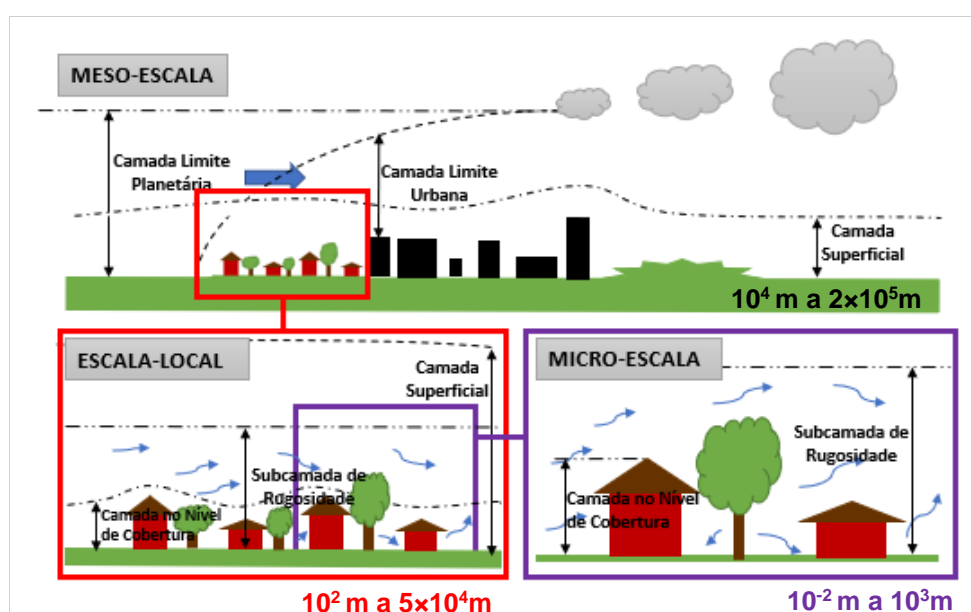
2.4.1 Escalas Atmosféricas

Como critério de classificação para análise de fenômenos atmosféricos, Oke (1987) estabelece escalas horizontais. Estas escalas delimitam uma espécie de “volume de controle” para avaliar quais fenômenos e características são mais relevantes em cada região. A Figura 1 demonstra as escalas e as distâncias que as delimitam, como sendo:

- Micro-escala: 10^{-2} m a 10^3 m;
- Escala-local: 10^2 m a 5×10^4 m;
- Meso-escala: 10^4 m a 2×10^5 m;
- Macro-escala: 10^5 m a 10^8 m.

Fenômenos de dispersão de poluentes são comumente analisados utilizando micro-escalas, devido à possibilidade de se obter dados relacionados ao fluxo de dispersão de forma completa (TOMINAGA e STATHOPOULOS, 2016).

Figura 1 - Escalas climáticas e camadas atmosféricas urbanas.



Fonte: Adaptado de Oke (2006).

Na Figura 1 também é possível observar as delimitações atmosféricas verticais, que por definição, são denominadas como: Camada Limite Planetária (CLP) ou Camada Atmosférica (em inglês *Planetary Boundary Layer* - PBL), Camada Limite Urbana (do inglês *Urban Boundary Layer* - UBL), Camada Superficial, Subcamada de Rugosidade e Camada no Nível de Cobertura (em inglês *Urban Canopy Layer* - UCL).

Contidas na dimensão da micro-escala, regiões que se estendem a distâncias de até 1 km podem ser denominadas de microrregiões. Em ambientes urbanos, podem ser representadas pela existência de construções comerciais, casas e prédios.

Por atuarem como barreiras para a difusão dos poluentes atmosféricos, as construções impedem a dispersão dos poluentes para camadas superiores à UCL, gerando assim, variações locais de temperatura, concentrações elevadas, alterações no escoamento do vento e, principalmente, piorando a qualidade do ar (GARCIA et al., 2013).

2.4.2 Camadas Verticais Atmosféricas

A camada atmosférica mais próxima à superfície terrestre é denominada de troposfera e se estende até uma altura de 11 km em relação ao nível do mar, tendo como principal característica, a ocorrência de fenômenos climáticos em seu interior.

A troposfera por sua vez, pode ser dividida em duas camadas: Camada Limite Planetária (CLP) e atmosfera livre. A CLP é caracterizada por ser a região da troposfera que sofre influência direta da superfície terrestre, permitindo assim, que ocorram mudanças de temperatura e condições climáticas em intervalos de tempo de horas (STULL, 2012). Em alturas que compreendem a atmosfera livre (acima de 10% da altura total da CLP), as mudanças de temperatura são sutis e o regime pode ser considerado como laminar.

A altura da CLP não é constante com o decorrer do tempo, variando de acordo com altitude da região e hora do dia, podendo chegar a valores entre 100 m e 3000 m. As maiores dimensões ocorrem durante o dia e em zonas tropicais, devido à incidência do sol, causando uma transferência de calor (convecção) ascendente para a parte mais fria da atmosfera (OKE, 1987). É também na CLP onde são realizadas as análises do clima urbano.

A Camada Limite Urbana se apresenta como a camada de ar acima das coberturas dos prédios, está diretamente influenciada pela área urbana e possui propriedades mais homogêneas em relação às camadas inferiores. A Camada Superficial é a região mais baixa da CLP, caracterizada pela existência de turbulência, grandes gradientes de velocidade e concentração de poluentes. A Subcamada de Rugosidade apresenta escoamento de ar altamente irregular (turbulência), devido aos elementos rugosos presentes no solo (obstáculos). A Camada no Nível de Cobertura é definida como a extensão do solo até o nível da cobertura dos prédios (OKE, 2006).

2.4.3 Turbulência Atmosférica

A região da CLP apresenta características de escoamento de ar específicas que influenciam fortemente as modelagens matemáticas da dispersão de poluentes atmosféricos. Segundo Stull (2012), o fenômeno de transporte de poluentes é movido na CLP em escala horizontal pelos ventos e, em escala vertical pela turbulência. Os ventos, geralmente na ordem de 2 m/s à 10 m/s, são responsáveis pela advecção, que ocasiona o transporte rápido dos poluentes.

Escoamentos turbulentos são caracterizados pela presença de vórtices de diferentes tamanhos, que podem ser ocasionados por efeitos térmicos (forças de empuxo) e por arrasto de atrito (tensão de cisalhamento) do ar com o solo ou obstáculos presentes no meio. Pfluck (2010) apresenta a velocidade de atrito em função da velocidade do vento e da rugosidade da superfície, como sendo o parâmetro dominante da turbulência quando ocasionada pela tensão de cisalhamento. Quando a força dominante na geração da turbulência é a força de empuxo, o principal parâmetro de caracterização é o gradiente vertical de temperatura, que tem como consequência as condições de estabilidade atmosférica.

2.4.4 Estabilidade Atmosférica

Condição presente na atmosfera, a estabilidade caracteriza a existência de movimentos ascendentes e descendentes, ocasionados pela diferença de temperatura entre parcelas de ar localizadas em diferentes alturas (TADANO, 2012).

As medições de temperatura em diferentes pontos da atmosfera não é uma tarefa fácil. Portanto, Pasquill (1961) desenvolveu um sistema de classificação de estabilidade atmosférica, baseado na velocidade do vento a 10 metros do solo, condições de incidência solar (para o dia) e cobertura de nuvens (para a noite), conforme apresentado na Tabela 4. As letras indicam as classificações: A (extremamente instável), B (moderadamente instável), C (fracamente instável), D (neutra), E (fracamente estável) e F (moderadamente estável).

Tabela 4 - Condições de estabilidade atmosférica e suas características.

Velocidade do vento a 10 m do solo (m.s ⁻¹)	Incidência de Radiação Solar (W/m ²)			Fração de Cobertura de Nuvens à noite	
	> 700	350 a 700	< 350	> 50%	< 50%
<2	A	A-B	B		
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

Fonte: Pfluck (2010).

Quando a incidência solar é muito elevada, a absorção por meio da superfície terrestre aumenta, e o escoamento entre superfície e o ar adjacente ocasiona maior força de empuxo. No período noturno, a cobertura das nuvens impede que o calor presente na superfície terrestre atinja as camadas mais elevadas, dificultando a troca térmica e intensificando a turbulência.

2.5 MODELOS MATEMÁTICOS PARA A DISPERSÃO DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS

A literatura apresenta dois tipos principais de modelos matemáticos: os Eulerianos e os Lagrangeanos. Segundo Seinfeld e Pandis (2006), a principal diferença entre os dois modelos estão em relação ao referencial. Na abordagem Euleriana, o comportamento das espécies é avaliado em relação a um sistema fixo, e na abordagem Lagrangeana, o referencial é um fluido em movimento.

2.5.1 Modelos Eulerianos

Os modelos Eulerianos são de natureza determinística, ou seja, apresentam a concentração de substâncias em um volume especificado. Este modelo baseia-se na concentração de cada espécie de poluente presente no fluido, em cada instante, satisfazendo a equação da continuidade em um elemento de volume (SEINFELD e PANDIS, 2006), conforme apresentado na Equação (1).

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_j} = - \frac{\partial (\bar{u}'_j \bar{c}'_j)}{\partial x_j} + \bar{S}' \quad (1)$$

sendo que, \bar{c} é a concentração média do poluente em questão, t é a variável tempo, \bar{u}_j é a componente da velocidade média do fluido de transporte, \bar{S}' são os termos fontes ou sumidouros e $\bar{u}'_j \bar{c}'_j$ são os fluxos turbulentos de concentração.

Segundo Seinfeld e Pandis (2006), os modelos Eulerianos possuem estatísticas de fácil medição e apresentam expressões diretamente aplicáveis, quando são considerados os fenômenos de reações químicas.

Uma solução analítica para o modelo Euleriano é apresentada pelo modelo Gaussiano. Também conhecido como *Modelo de Pluma Gaussiano*, ele é largamente utilizado na modelagem da dispersão de poluentes. Segundo Mello (2010), a relação entre a taxa de emissão e a concentração em um determinado ponto no espaço é obtida analiticamente e não requer grandes recursos computacionais.

Os modelos envolvendo plumas gaussianas são obtidos da equação de advecção-difusão em situações idealizadas, nas quais as concentrações são obtidas a partir de soluções analíticas de equações de conservação da massa (TADANO, 2012).

2.5.2 Modelo Lagrangeano

O modelo Lagrangeano apresenta natureza probabilística, isto é, prediz as probabilidades de que uma determinada partícula esteja localizada em uma dada posição. Baseiam-se no comportamento de partículas representativas, ou seja, uma

quantidade de fluido grande se comparado a uma molécula, porém pequena o suficiente para seguir o fluido pontualmente (SEINFELD e PANDIS, 2006).

A equação Lagrangeana para a dispersão de uma espécie de poluente é dada pela Equação (2):

$$C(x,t) = \int \int_0^t P(x,t|x',t') S(x',t') dx' dt' \quad (2)$$

sendo que, $C(x,t)$ representa a concentração média, x é o vetor posição, t é o tempo $S(x',t')$ é o termo fonte e $P(x,t|x',t')$ é a Função Densidade de Probabilidade (FDP), que representa a probabilidade de uma partícula que estava anteriormente na posição x' no tempo t' alcançar x em t .

Em suma, o modelo Lagrangeano trata a fase fluida como sendo contínua e a fase secundária particulada, como simples partículas.

2.6 APLICAÇÃO DE CFD NA DISPERSÃO DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS

Uma ferramenta alternativa para auxiliar a obtenção de dados referentes à dispersão dos poluentes na atmosfera são os modelos baseados em fluidodinâmica computacional, que podem ser resolvidos com métodos numéricos, como por exemplo, o método dos volumes de controle. O uso de CFD apresenta cada vez mais robustez, devido ao grande avanço da tecnologia de processamento dos computadores e surgimento de modelagens adequadas para diversas aplicações.

Para a realização de simulações em CFD confiáveis, é necessário o conhecimento dos fenômenos que governam os mecanismos de dispersão de poluentes, bem como as simplificações e considerações a serem realizadas. A validação com a reprodução de casos clássicos apresentados na literatura, e comparações com dados experimentais confiáveis é necessária para garantir a obtenção de soluções fidedignas.

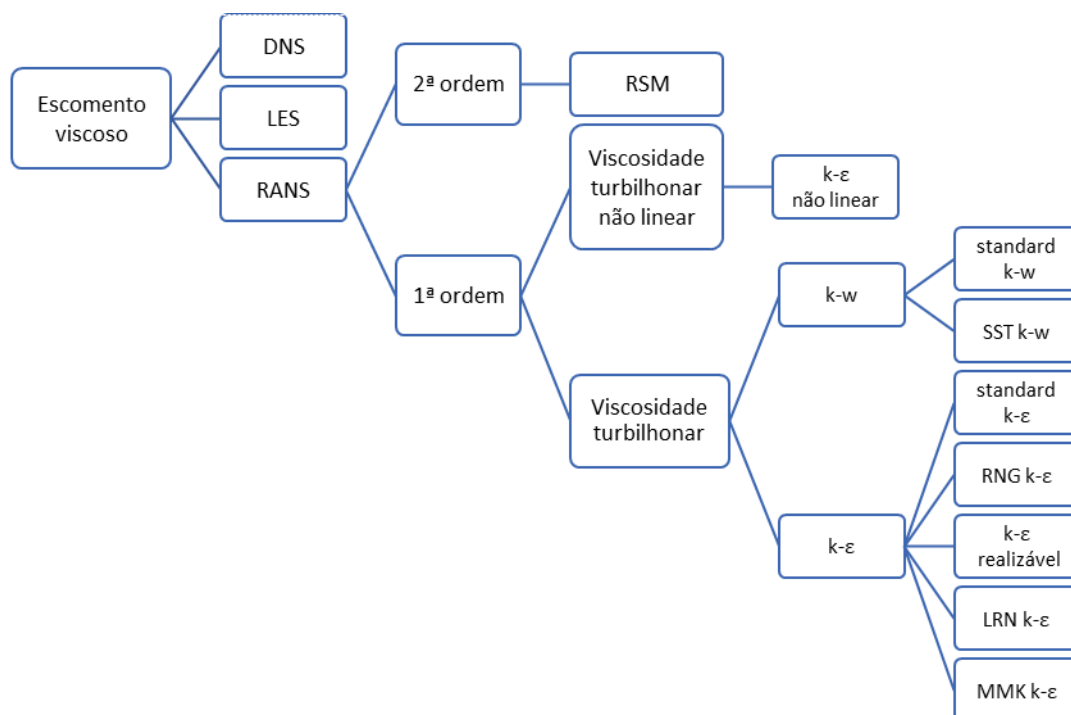
Rivera (2016) salienta as limitações relacionados ao uso de técnicas de CFD, que por razões de otimização de tempo de processamento, normalmente utiliza de modelos reduzidos, com escalas de tempo pequenas e condições de

contorno simplificadas. Outro ponto, que pode distanciar a fluidodinâmica computacional da obtenção de dados reais, é a consideração do fenômeno de turbulência.

Condição importante nas simulações em CFD aplicada à dissipação de poluentes atmosféricos, o comportamento relacionado à turbulência é encontrado em regiões mais baixas da atmosfera, devido principalmente, à interação com a superfície terrestre (ALEMAK, 2017).

Existem três métodos principais para a resolução de problemas envolvendo turbulência: *Reynolds Averaged Navier-Stokes* (RANS) ou Navier-Stokes com Médias de Reynolds, *Large Edge Simulation* (LES) ou Simulações de Grandes Escalas e *Direct Numerical Simulation* (DNS) ou Simulação Numérica Direta. A Figura 2 apresenta os principais métodos utilizados em análises CFD, bem como os modelos empregados para modelagem de turbulência.

Figura 2 - Métodos e modelos de turbulência aplicados em escoamentos viscosos em CFD.



Fonte: Adaptada de Fontanella (2014).

Os tópicos a seguir apresentam um breve resumo das particularidades dos modelos centrais RANS, LES e DNS.

2.6.1 Método RANS

É capaz de modelar toda a faixa do espectro de energia, e conseqüentemente, toda a escala de turbulência, utilizando as equações da continuidade e de *Navier-Stokes*, bem como da conservação da energia, obtidas a partir dos processos de média de *Reynolds* (MADALOZZO et al., 2014).

A utilização deste método implica na introdução de um termo denominado Tensão de *Reynolds*, que está relacionado com a influência das flutuações turbulentas no escoamento.

Para resolução do termo de Tensão de *Reynolds*, um dos modelos mais utilizados na literatura é o *standard k-ε* (*k-ε* padrão) e suas derivações, onde *k* se apresenta como a energia cinética turbulenta e ε como a taxa de dissipação de energia cinética turbulenta.

2.6.2 Método LES

Introduzido para suprir as limitações em relação ao método RANS, e adotando a utilização de uma técnica de rastreamento dos vórtices em grande escala, além da utilização de filtros para avaliação do tamanho de cada vórtice, aceitando os maiores e desconsiderando os menores.

O método LES demanda maior capacidade computacional em relação ao RANS e pode ser aplicado em geometrias mais complexas (ZHONG et al., 2016).

2.6.3 Método DNS

As simulações numéricas diretas, ou *Direct Numerical Simulation* (DNS), utilizam o método de solução aplicando as equações instantâneas de *Navier-Stokes*, independentemente do regime do escoamento e das escalas de turbulência. Segundo Madalozzo (2012), as dimensões da malha utilizada estão diretamente relacionadas ao número de *Reynolds*, implicando assim, em grandes refinamentos para elevados números de *Reynolds*. A utilização do Método DNS permite a resolução de todos os vórtices que compõem o escoamento turbulento, uma vez que utiliza elementos finitos de escala muito reduzida. Sua aplicação encontra-se muito limitada devido ao alto requerimento computacional e tempo de processamento.

2.7 MODELAGEM MATEMÁTICA

A fluidodinâmica é conduzida por equações advindas das leis de conservação: massa, *momentum* e energia. Segundo Rivera (2016), casos envolvendo a simulação de escoamentos atmosféricos acarreta a modificação das equações clássicas utilizadas na mecânica dos fluidos, a fim de melhor reproduzir as condições presentes nos escoamentos atmosféricos.

Nas subseções a seguir, são apresentadas as equações governantes que devem ser solucionadas para a obtenção de análises de dispersão de poluentes atmosféricos. Seinfeld e Pandis (2006) apresentam a dedução detalhada destas equações.

2.7.1 Equações de Conservação da Massa, *Momentum* e Navier- Stokes

Aplicada em um elemento, ou volume, diferencial do fluido, a conservação da massa resulta da diferença entre a taxa de entrada e saída de massa, representada pela Equação (3).

$$\frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (3)$$

sendo que, u_j são as componentes de velocidade na direção j e ρ é a massa específica do fluido.

A conservação de *momentum* linear aplicada a um elemento fluido, pode ser representada conforme Equação (4).

$$\rho \left(\frac{\partial u_j u_j}{\partial x_j} \right) = \rho g_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} \quad (4)$$

sendo que, u_j são as componentes de velocidade na direção j , g_i é a aceleração da gravidade na direção i , p é a pressão termodinâmica e tensor σ_{ij} de tensões viscosas.

Partindo da equação de conservação do *momentum* linear (Equação 4), juntamente com a equação constitutiva do tensor de tensões viscosas para um fluido *Newtoniano*, obtém-se a equação de *Navier-Stokes* na forma apresentada na Equação (5):

$$\rho \left(\frac{\partial u_j u_i}{\partial x_j} \right) = \rho g_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right] \quad (5)$$

sendo que, μ é a viscosidade dinâmica e δ_{ij} é o operador delta de *Kronecker*.

2.7.2 Equação de Conservação da Energia

Considerando regime permanente, desprezando geração de calor e desconsiderando os efeitos de dissipação viscosa, da conservação da energia é dada pela Equação (6):

$$\frac{\partial(\rho u_i h)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial h}{\partial x_i} \right] + u_i \frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (6)$$

sendo que, Pr_t o número de *Prandtl* turbulento e h é a entalpia, que pode ser calculada a partir da Equação (7):

$$h = \int_{T_{ref}}^T c_p dT \quad (7)$$

sendo que, c_p é o calor específico do fluido, T é a temperatura e T_{ref} é a temperatura de referência.

2.7.3 Equação de Transporte das Espécies Químicas

Para execução do cálculo da fração mássica local de cada espécie que se dispersa (m_l), na modelagem da conservação das espécies químicas, é utilizada a Equação (8), aplicada ao número l de espécies em regime permanente.

$$\frac{\partial(\rho u_j m_l)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu}{Sc} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \frac{\partial m_l}{\partial x_j} \right] + S \quad (8)$$

em que o termo fonte S , é representativo da fonte emissora da espécie l . O parâmetro Sc é o número de *Schmidt*, que pode ser definido como a razão entre a viscosidade cinemática e a difusividade mássica. O parâmetro Sc_t , por sua vez, é o número de *Schmidt* turbulento, que representa a razão entre o transporte de massa advindo da turbulência do sistema e da transferência de massa difusiva.

2.8 REVISÃO DA LITERATURA

Pioneiros nas pesquisas relacionadas à dispersão de poluentes atmosféricos com ferramentas numéricas, Brock e Hewson (1963), desenvolveram soluções para a equação da difusão envolvendo um ponto de emissões contínuo (pluma) e no alto, utilizando apenas um computador analógico.

Preocupado com os efeitos da poluição do ar, alguns anos depois, Georgii (1969) apresentou estudos da dispersão de poluentes em cidades da Alemanha. Ele realizou prospecções futuras relacionadas ao aumento no número de veículos nos 50 anos seguintes, ao crescimento das cidades e à criação de obstáculos (prédios), como sendo os responsáveis pela geração e acúmulo dos poluentes, ocasionando sérios problemas à saúde humana no futuro.

O futuro do qual Georgii (1969) escrevia chegou, e atualmente, as cidades estão repletas de veículos automotores e enormes arranha-céus, que funcionam como barreiras à dispersão dos poluentes atmosféricos. Contudo, devido ao avanço da tecnologia e da velocidade de processamento dos computadores, as

investigações na área de dispersão de poluentes atmosféricos podem ser realizadas com precisões cada vez maiores.

Para determinação dos campos de concentração de poluentes lançados na atmosfera, Boçon (1998) estudou um modelo matemático baseado no método dos volumes finitos em coordenadas curvilíneas generalizadas para solução das equações da concentração de poluentes em microescala atmosférica. O modelo incorporou fenômenos relevantes como a estabilidade atmosférica, altura da camada limite e rugosidade do terreno. O modelo de turbulência utilizado o modelo RANS, o RANS $k-\varepsilon$ padrão, em que foi simulada a dispersão de uma pluma na camada limite atmosférica. A remoção de poluentes da atmosfera foi considerada, porém não simulada. O processo de deposição úmida ou lavagem foi tratado como um processo reversível. Segundo Boçon (1998), as reações químicas envolvendo o transporte de poluentes devem ser consideradas apenas se o tempo de simulação for longo o suficiente para que ocorram mudanças significativas nas concentrações. Casos clássicos de mecânica dos fluidos computacional, testes em túnel de vento e um experimento de campo realizado em uma montanha no estado de Idaho – EUA foram utilizados como validação para o modelo criado. Os resultados finais obtidos foram pouco satisfatórios, principalmente devido aos efeitos turbulentos do fenômeno e às instabilidades atmosféricas.

Holmes e Morawska (2006) realizaram uma revisão dos modelos atmosféricos e suas aplicações na dispersão de poluentes. Entre os modelos estudados, os modelos de Fluidodinâmica Computacional foram capazes de prover análises complexas, baseadas na resolução das equações RANS utilizando métodos de diferenças finitas ou volumes finitos. O modelo de turbulência $k-\varepsilon$ padrão é apresentado como o mais utilizado.

Para auxiliar no desenvolvimento de pesquisas relacionadas a simulações fluidodinâmicas em meios urbanos, Franke et al. (2007) apresentaram um guia com boas práticas para garantir a qualidade e melhorar os modelos de microescala, utilizados com o auxílio de ferramentas CFD. O referente trabalho apresenta indicações para a escolha de tamanho de domínio computacional, métodos de resolução, procedimentos e considerações para reduzir possíveis erros e incertezas gerados.

Considerando as reações que ocorrem após a dispersão de emissões veiculares na atmosfera, Karim e Nolan (2008) simularam um modelo utilizando

dióxido de nitrogênio (NO_2) como gás de escape, modelo de turbulência $k-\varepsilon$ padrão e modelo de *Arrhenius* para a cinética das reações químicas. As simulações compreenderam o período de um dia, e o local simulado foi uma cidade do Reino Unido. Os dados obtidos foram comparados com valores experimentais coletados, obtendo boa correlação. O ponto principal do referente trabalho foi a capacidade de modelar reações químicas com o uso do software comercial *ANSYS/FluentTM*.

Um modelo utilizando a ferramenta CFD *ANSYS/CFXTM* foi desenvolvido por Pfluck (2010), o qual prediz a dispersão de poluentes partindo de uma fonte pontual. O modelo de turbulência utilizado foi o $k-\varepsilon$ RNG (*Re-Normalization Group*) e foi utilizada uma equação de transporte de poluentes genéricos. A verificação foi feita com a comparação com dados do Experimento de Copenhagen, realizado na cidade de Copenhagen (Dinamarca) em 1978, e que fornece informações a respeito de uma dispersão de gás, e é muito utilizado pela comunidade científica para verificação de dados de dispersão de poluentes. O modelo desenvolvido apresentou desempenho inferior em relação aos demais apresentados na literatura. Casos envolvendo alta turbulência apresentaram o pior desempenho.

Considerando os efeitos térmicos na dispersão de poluentes em zonas urbanas, Madalozzo (2012) utilizou um modelo baseado em CFD para escoamentos incompressíveis, não isotérmicos e com transporte de massa. A metodologia de resolução numérica das equações utilizou o método dos elementos finitos e a tratativa da turbulência foi realizada por meio de um método LES. A validação do código numérico foi obtida por meio da reprodução de casos clássicos de dinâmica dos fluidos e aplicações típicas da área de dispersão de poluentes. Para os casos clássicos, a reprodução dos dados ocorreu de forma satisfatória. Nas modelagens envolvendo viscosidade turbulenta dinâmica, o modelo apresentou grande instabilidade, principalmente devido aos efeitos térmicos, porém para o caso bidimensional envolvendo um *canyon* urbano com razão de aspecto unitária, o modelo de turbulência clássico apresentou bons resultados. Outra conclusão obtida está relacionada à instabilidade do modelo, quando existe semelhança de magnitude entre a convecção natural e a forçada. Neste caso, a aplicação do método RANS de turbulência seria mais adequada, conforme o que é apresentado na literatura.

Analisando a influência da mudança virtual dos prédios em um *canyon* urbano na cidade de Aveiro, em Portugal, Garcia et al. (2013) avaliaram a dispersão de material particulado (MP_{10}). O software de CFD *ANSYS/FluentTM* e o Modelo

Euleriano foram utilizados, considerando condições de regime permanente e modelo de turbulência $k-\varepsilon$ RNG. As conclusões geradas confirmaram a influência da geometria de *canyons* urbanos na concentração de material particulado, sendo que a existência de intervalos entre os prédios melhorou os níveis de poluentes.

Um exemplo de validação de simulações CFD de dispersão de poluentes é apresentado por Allegrini, Dorer e Carmeliet (2013), em que medições experimentais em um túnel de vento foram utilizadas em comparação aos dados obtidos por simulações numéricas. O modelo utilizado apresentou uma geometria retangular com escoamento perpendicular à direção da cavidade. A rugosidade das superfícies foi desconsiderada, uma vez que não foi reproduzida no túnel de vento utilizado. As simulações foram realizadas com o software *ANSYS/FluentTM* e utilizando uma geometria 2D e modelo de turbulência $k-\varepsilon$ padrão e, ainda, diferentes abordagens para interações com as paredes. Os autores apresentaram a abordagem de funções de parede em não equilíbrio (do inglês *non-equilibrium wall functions*), mais coerentes para utilização, ou seja, o uso de um perfil de velocidades em decréscimo próximo às paredes em direção ao escoamento.

Ng e Chau (2013) avaliaram o impacto das configurações prediais de *canyons* urbanos na exposição das pessoas aos poluentes. Diferentes configurações de razão de aspecto foram simuladas e subgrupos de pessoas com diferentes tempos de exposição foram considerados. O modelo em CFD utilizado foi construído baseado na modelagem turbulenta $k-\varepsilon$ padrão, utilizando o software *ANSYS/FluentTM*. As conclusões obtidas indicaram que prédios sem nenhum recuo em relação às calçadas, ou configurações sem espaçamento entre prédios levam a uma maior exposição da população aos poluentes.

Dando continuidade aos seus estudos, no âmbito da influência das diferentes geometrias dos *canyons*, Madalozzo et al. (2014) desenvolveram estudos relacionados a diferentes aplicações em *canyons* bi e tridimensionais, sob diferentes condições. Eles utilizaram o método de elementos finitos, reproduzindo a turbulência com o método LES. Foi constatado que o uso de modelos bidimensionais é justificado apenas para representação de escoamentos em *canyons* com comprimentos infinitos. Embora os esforços para execução das simulações sejam reduzidos, alguns fenômenos relacionados ao escoamento, como vórtices, circulações e efeitos associados à interfaces e vértices não puderam ser

observados. Levando assim, à conclusão de que, análises confiáveis requerem modelos tridimensionais.

No contexto de dispersão de gases e utilizando *software open source* (de código aberto), Fiates (2015) desenvolveu uma metodologia utilizando OpenFOAM (*Open Field Operation and Manipulation*) para a simulação da dispersão de um gás. O *software* utilizado é de código aberto e não possui interface gráfica. Uma customização do método utilizado para cálculo da solução foi realizada, sem alteração do código fonte original do programa. A verificação do uso do OpenFOAM foi realizada com simulações no *software* comercial ANSYS/CFXTM e comparação com dados experimentais. O cenário simulado foi a dispersão de um gás inflamável em forma de nuvem. O trabalho apresentou, de forma detalhada, os procedimentos utilizados nos *softwares*. Os resultados obtidos com o OpenFOAM apresentaram boa confiabilidade, incentivando assim, a disseminação de *softwares* livres.

Uma revisão contendo importantes conclusões para estudos numéricos e experimentais na área de dispersão de poluentes em ambiente urbano foi realizada por Lateb et al. (2015). As emissões advindas de fontes pontuais localizadas no topo de prédios urbanos e a interação com as geometrias ao redor foi o foco dos trabalhos analisados. Temas como; camadas limites atmosféricas, fluidodinâmica ao redor de obstáculos, foram abordados e embasados com uma série de referências bibliográficas. O trabalho identificou erros que podem gerar resultados incoerentes e apresentou guias desenvolvidos para estabelecimento de metodologias de validação de simulações numéricas.

Com o intuito de esclarecer os principais questionamentos em relação à dispersão de poluente, Tominaga e Stathopoulos (2016) deram prosseguimento em suas pesquisas, com um trabalho levantando dez questões relacionadas ao tema. As modelagens apresentadas podem ser categorizadas como: medições em campo, experimentos em laboratório (túnel de vento/água), modelos semi-empíricos e modelos de fluidodinâmica computacional. O tipo de dispersão em questão foi a de poluentes de campo próximo (*near-field pollutant dispersion*), que é caracterizada pela interação de uma fonte de emissão pontual em formato de pluma e obstáculos ao seu redor. As questões relacionadas à modelagem com CFD apontam temas como a utilização de modelos de turbulência corretos e considerações em relação à interação do escoamento de ar com as paredes dos obstáculos. Outro tema importante, abordado nos questionamentos, foi a validação dos modelos CFD. Os

autores apresentaram uma lista de trabalhos, que podem servir como base para legitimar os dados obtidos por meio das simulações fluidodinâmicas computacionais.

Rivera (2016) avaliou a dispersão de poluentes atmosféricos em uma microrregião da cidade do Rio de Janeiro. Baseado em dados obtidos através de uma estação de monitoramento localizada na região da Tijuca, a concentração e dispersão dos poluentes: monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrogênio (NO₂) e dióxido de enxofre (SO₂), provenientes de fontes veiculares, foram simulados numericamente pelo *software* comercial *ANSYS/Fluent*TM17.1. O modelo utilizou a formulação turbulenta $k-\varepsilon$ padrão. O estudo avaliou a interação da turbulência ocasionada pela movimentação dos veículos com as plumas de dispersão e determinou o número de Schmidt mais adequado para a confiabilidade do modelo. Uma boa concordância foi obtida entre os dados simulados e os provenientes da estação de monitoramento.

A modelagem da turbulência se apresenta como tema chave e, na maioria das vezes, dificultador das simulações da dispersão de poluentes em CFD. Kim et al. (2016) desenvolveram pesquisas relacionadas à turbulência ocasionada pela movimentação dos veículos. O *software* utilizado para as modelagens numéricas foi o *ANSYS/Fluent*TM e o objetivo principal foi avaliar a interação entre densidade de tráfego, tipo de veículo e energia cinética turbulenta. Como resultado, equações que permitem a estimativa da geração global de energia cinética turbulenta, em função do número e tipo de veículos, foram desenvolvidas.

Como referência, Santiago et al. (2017) avaliaram a estimativa da distribuição de poluentes em uma região urbana real. Foi apresentada a dificuldade na obtenção de mapas de concentração realísticos, principalmente devido à heterogeneidade espacial dos poluentes. O local de estudo contempla a região central da cidade de Madri (Espanha), com intenso tráfego de veículos e também grandes áreas verdes. Para a simulação, foi utilizado um perfil de velocidade logarítmico e o método RANS. As emissões foram modeladas a partir de um termo fonte, inserido na equação de transporte de espécies. O poluente avaliado foi o NO₂. O regime transiente foi empregado e uma variação de 16 cenários, considerando diferentes direções do vento e variações de intensidade de tráfego, de acordo com a hora do dia foi considerada. A simulação desconsiderou efeitos térmicos e reações químicas e, como validação, utilizou dados de um sistema de monitoramento passivo instalado na região, em diferentes períodos do ano. Como resultado, foram

obtidas boas correlações com uma amostragem experimental, comprovando a eficiência do modelo utilizado, porém, em regiões de geometria complexa como túneis, entroncamento de Ruas e congestionamentos; não apresentaram boa representatividade, comparado aos dados experimentais.

Tan et al. (2018) realizaram simulações do transporte e dispersão de uma pluma de dióxido de carbono ao longo de Ruas e intersecções de uma cidade hipotética. O modelo $k-\omega$ SST (*Shear Stress Transport*) foi empregado e a resolução das equações de conservação foi realizada com o *software ANSYS/FluentTM*. A comparação com dados experimentais de um túnel de vento apresentou boa concordância. O regime considerado foi transiente (variando de 0 a 15 segundos), possibilitando a observação de dois diferentes estágios de processo de dispersão. A ação do perfil do vento e da gravidade influenciou diretamente os padrões de distribuição, bem como a alteração da velocidade e da taxa de liberação do gás.

Analisando a descarga de CO acumulado no Túnel *Niayesh*, no norte da cidade de Teerã, Rafief e Sturm (2018) utilizam um modelo Lagrangiano composto pelo Modelo Graz Lagrangeano (GRAL) e Modelo Graz de Mesoescala (GRAMM) desenvolvido para condições específicas de dispersão em túneis e locais com baixa velocidade do vento. Para obtenção dos resultados, foram consideradas fontes pontuais nos portais de entrada do túnel, além de parâmetros como velocidade, direção do vento e classe de estabilidade analisados em um período de um ano. Os valores de concentração de CO foram medidos experimentalmente em diferentes distâncias (10, 20 e 50 metros) e alturas (5 e 10 metros), em relação aos portais do túnel. Os valores experimentais foram comparados com os dados modelados, apresentando boa concordância e variações de aproximadamente 2 ppm.

Gómez-Pérez e Espinosa (2018) realizam a avaliação da dispersão de poluentes na cidade de Medellín, Colômbia. A simulação visou avaliar uma zona com alto fluxo de veículos e identificar os locais de maior concentração de poluentes. O *software ANSYS/FluentTM18.2* foi utilizado nas simulações numéricas, considerando o modelo $k-\omega$, o algoritmo SIMPLE e escala residual de 0,001. Os poluentes simulados foram CO₂, CO e NO, e foi possível obter concentrações médias de 0,8 mol/m³ para CO₂, 0,02 mol/m³ para CO e 0,0047 mol/m³ para NO. Os valores

apresentados não foram validados experimentalmente, demonstrando apenas os pontos de maior concentração no cenário simulado.

Gallagher e Lago (2018) avaliam o impacto das configurações urbanas de carros estacionados na dispersão do monóxido de carbono. Três cenários com diferentes simplificações de geometria para automóveis, e um cenário sem automóveis foram comparados. O software *ANSYS/FluentTM 6.3* foi utilizado, aplicando o método LES. Taxas de emissão de 1×10^{-5} kg/s de CO foram utilizadas como parâmetros de entrada no nível do solo. O estudo demonstrou a importância do detalhamento das geometrias na influência da dispersão dos poluentes, uma vez que os automóveis se apresentam como barreiras. Diferenças de 25% nas concentrações foram encontradas, considerando geometrias mais detalhadas em comparação aos carros representados apenas por blocos retangulares.

3 METODOLOGIA

O procedimento para a realização das análises numéricas da dispersão dos poluentes atmosféricos, os métodos de solução e considerações envolvidas, a definição das Ruas e Avenidas analisadas e a metodologia para obtenção dos dados de entrada são apresentadas neste capítulo.

3.1 SOLUÇÃO NUMÉRICA

No que diz respeito ao processo de discretização das equações governantes, três principais vertentes, mais utilizadas para a solução numérica de problemas de engenharia são: elementos finitos, diferenças finitas e volumes finitos. A principal diferença entre estes métodos está na forma com a qual as variáveis de fluxo são aproximadas e discretizadas. O método dos elementos finitos é melhor aplicado em simulações envolvendo a mecânica dos sólidos.

O método dos volumes finitos, que foi inicialmente desenvolvido como uma formulação derivada do método de diferenças finitas, atualmente, é o mais empregado em simulações fluidodinâmicas, em *softwares* comerciais como *ANSYS/FluentTM*, *ANSYS/CFXTM*, *PhoenicsTM* e o *software* livre *OpenFOAM*.

3.1.1 Método dos Volumes Finitos

Neste trabalho, a simulação numérica da dispersão de poluentes atmosféricos foi realizada utilizando o Método dos Volumes de Controle ou Método dos Volumes Finitos (*FVM - Finite Volume Method*) (PATANKAR, 1980). Este método foi empregado utilizando o *software* comercial *ANSYS/FluentTM* 19.1.

O Método dos Volumes Finitos consiste, primeiramente, na divisão do domínio de cálculo em vários volumes de controle infinitesimais. Para se obter as equações que são resolvidas interativamente, é necessário partir das equações diferenciais governantes de forma conservativa e integrá-las dentro do volume de controle elementar no espaço e no tempo (MALISKA, 1995).

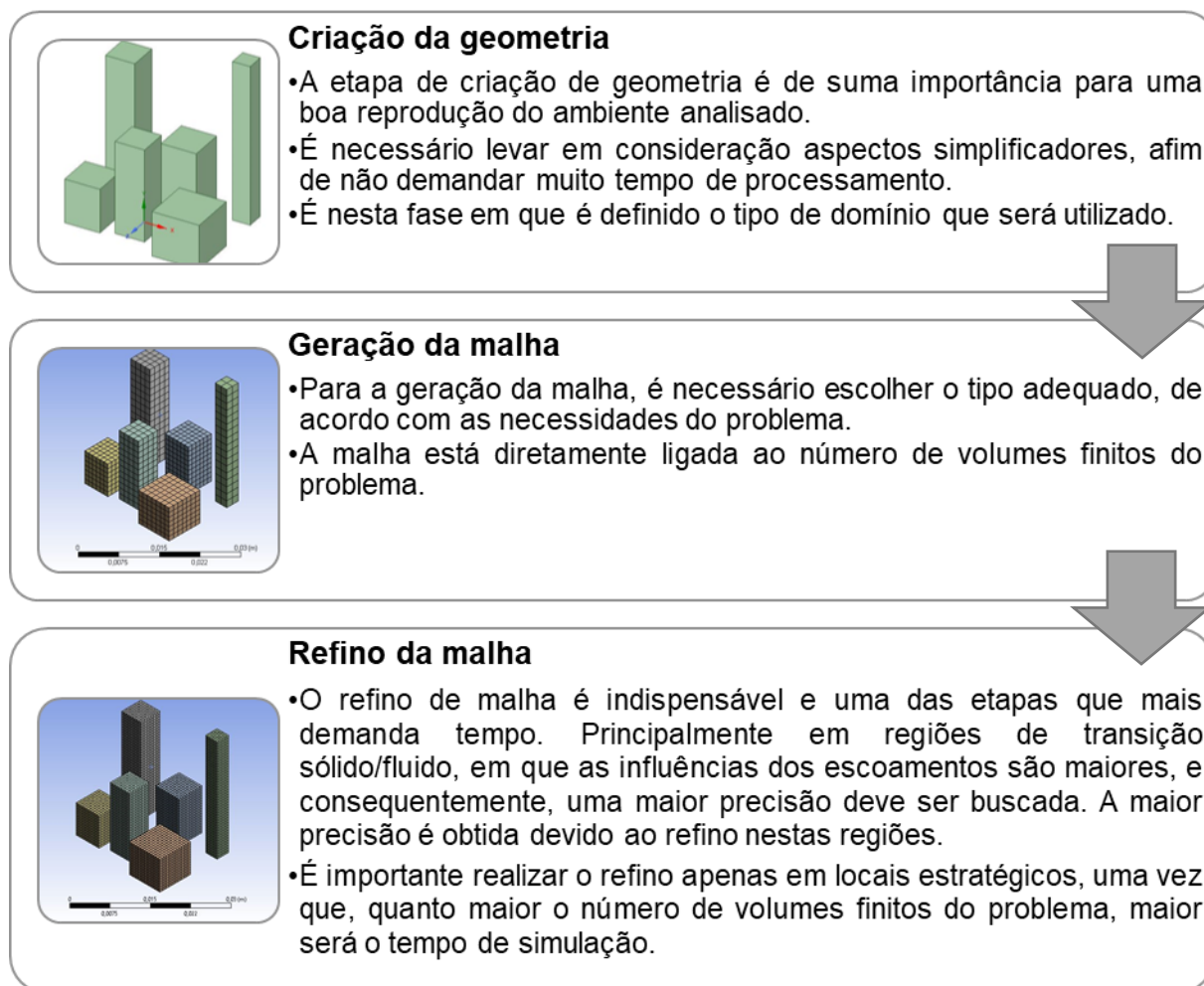
Conforme apresentado por Vardoulakiset et al. (2003), a modelagem CFD é baseada na resolução numérica de equações governantes da mecânica dos fluidos (equação da continuidade, equações de *Navier-Stokes*) e equações de dispersão (equação de concentração de substâncias), em que as equações de estado são obtidas através de considerações de equilíbrio termodinâmico e fluidos newtonianos.

3.1.2 Metodologia para Execução da Simulação Numérica

Para resolução de problemas numericamente, com o auxílio de *softwares* de CFD, é necessário seguir uma sequência de procedimentos que, quando executados de maneira correta contribuem positivamente para a obtenção de dados confiáveis.

A fase de pré-processamento, detalhada na Figura 3 é realizada geralmente em *softwares* auxiliares, como para a criação de geometria, em que são utilizados *softwares* de CAD (*Computer Aided Design*), ou os já contidos no pacote *ANSYSTM*: *Space Claim* e *Design Modeler*. A etapa de criação e refino de malha, utilizando as ferramentas disponíveis no *ANSYSTM* podem ser executadas com o auxílio de dois programas diferentes: *ICEM* e *ANSYS/Fluent/MeshingTM*. A escolha do programa a ser utilizado depende da afinidade do usuário.

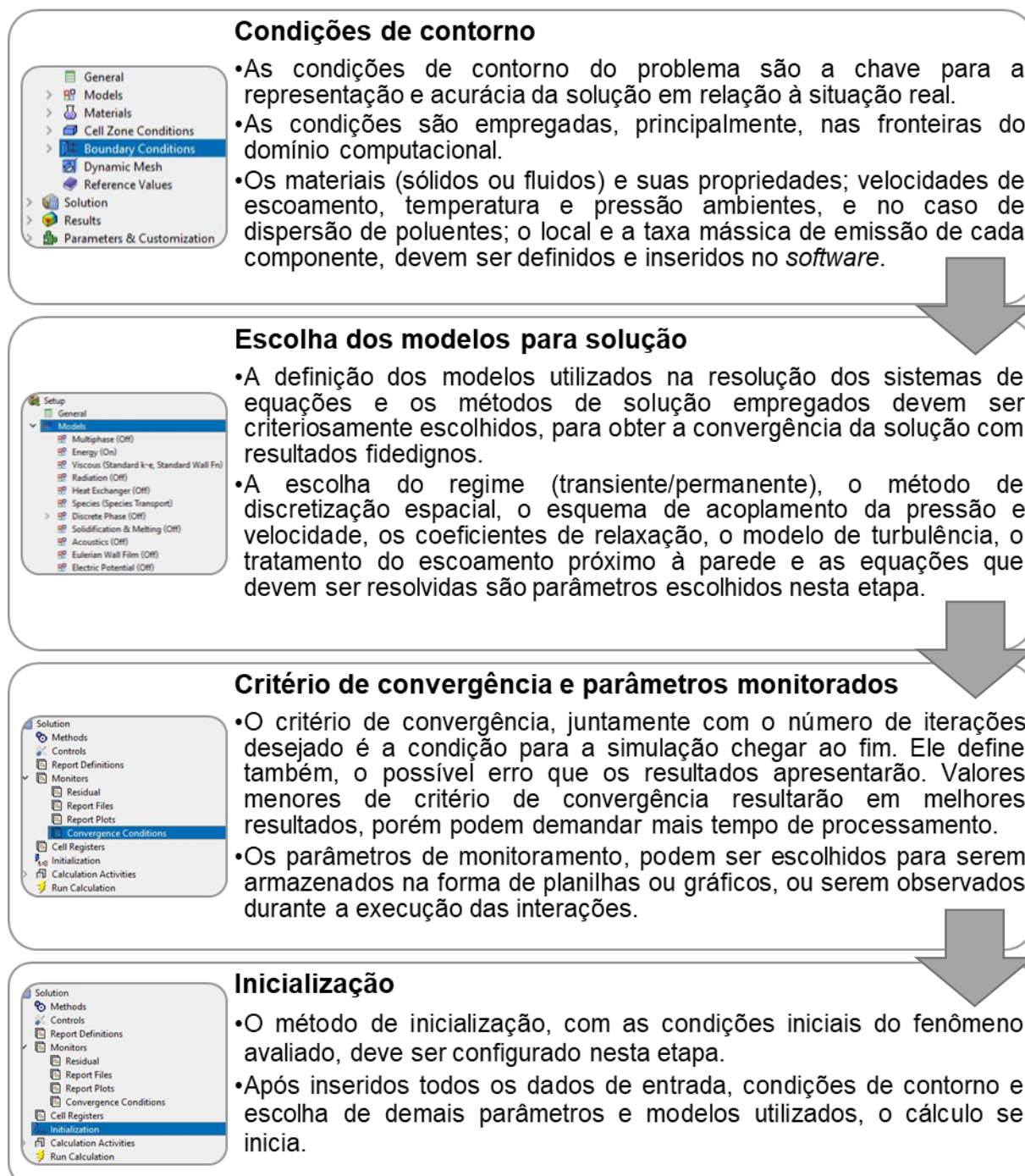
Figura 3 - Etapas de pré-processamento para o processo de simulação numérica em CFD.



Fonte: Autoria Própria.

A fase de processamento, detalhada na Figura 4, demonstra as etapas mais importante da simulação numérica, que são executadas no próprio *ANSYS/Fluent™* e devem ser cuidadosamente avaliadas e estudadas. Trabalhos como os apresentados por Holmes (2006), Franke et al. (2007), Tominaga (2013) e Ai e Mak (2017) apresentam orientações e exemplos práticos utilizados em casos de simulações CFD de dispersão de poluentes.

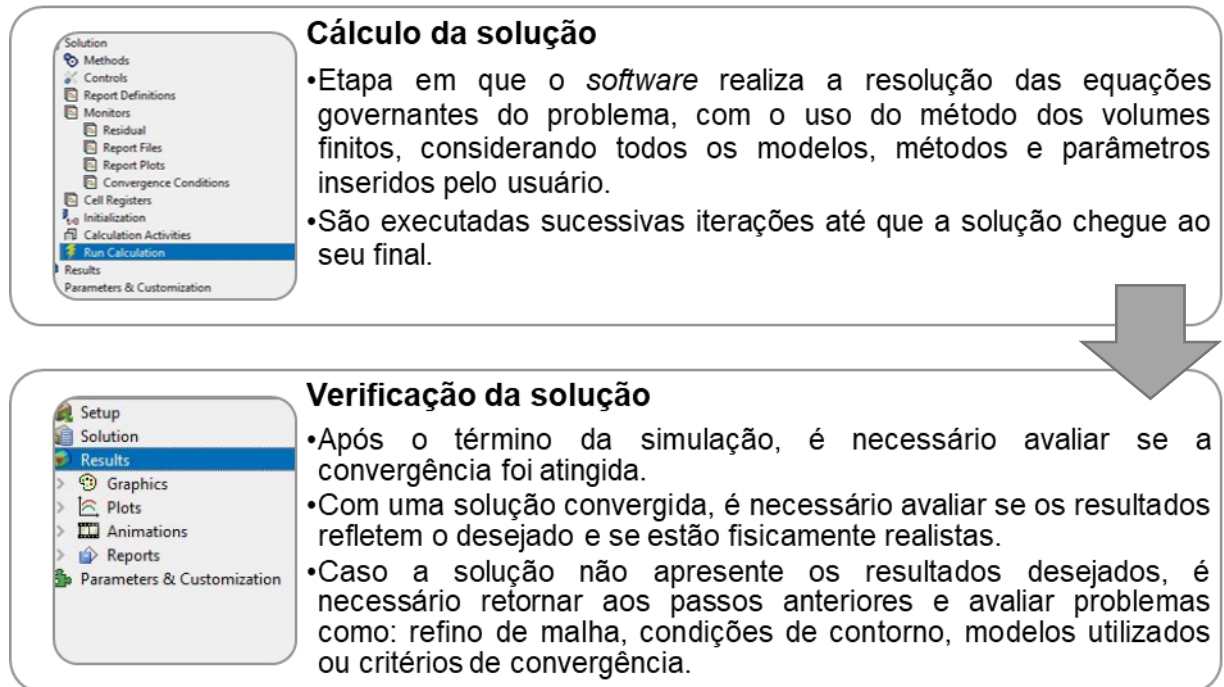
Figura 4 - Etapas de processamento para o processo de simulação numérica em CFD.



Fonte: Autoria Própria.

A última fase, representada na Figura 5, fornece os dados desejados para a solução do problema, esta fase inclui o pós-processamento dos dados, que pode ser realizado por meio do próprio *ANSYS/FluentTM*, o qual disponibiliza um recurso para pós-processamento, ou em uma ferramenta do *ANSYSTM* denominada *CFD-Post*.

Figura 5 - Etapas de cálculo e pós-processamento para o processo de simulação numérica em CFD.



Fonte: Autoria Própria.

3.2 CONSIDERAÇÕES PARA RESOLUÇÃO DAS EQUAÇÕES GOVERNANTES

Os parâmetros de entrada das soluções numéricas são decisivos para a obtenção de resultados confiáveis. Modelos e considerações devem ser empregados de acordo com os fenômenos que governam o problema e suas características.

O fenômeno de turbulência apresenta considerável complexidade, por este motivo, modelos devem ser empregados e sua confiabilidade está diretamente ligada ao refinamento da malha. Sua utilização deve ser cuidadosa, visando soluções confiáveis. Mais informações e aplicações de diferentes modelos de turbulência podem ser encontrados em Franke et al. (2007).

No tratamento do escoamento próximo às paredes, na região denominada como sub-camada laminar, os valores de viscosidade turbulenta são muito pequenos comparados à viscosidade absoluta, alterando as características do escoamento, necessitando do uso de funções de parede (RIVERA, 2016).

3.2.1 Turbulência

Em decorrência das características fluidodinâmicas presentes na CLP, modelos de turbulência devem ser utilizados. A turbulência próxima ao solo, é ocasionada principalmente pelos obstáculos presentes nas Ruas e Avenidas e, pela movimentação dos veículos nas vias.

A aplicação de um modelo de turbulência ideal está relacionada principalmente à precisão e simplicidade, ou seja, à obtenção de resultados confiáveis com otimização da capacidade computacional (tempo de simulação).

Com base nos estudos apresentados na literatura, aplicados à dispersão de poluentes, um método RANS foi escolhido para ser empregado, juntamente com o modelo de turbulência $k-\varepsilon$ padrão, proposto por Launder e Spalding (1974).

Em geral, modelos de turbulência são empregados para resolver o termo resultante das flutuações em virtude da modificação da equação de *Navier-Stokes* obtidas pelo método RANS. O termo resultante é denominado tensor de tensões de *Reynolds* e pode ser representado pela Equação (9):

$$\tau'_{ij} = \rho \overline{u'_i u'_j} \quad (9)$$

sendo que a barra indica o valor médio do produto das flutuações (indicado pelos apóstrofes) das componentes de velocidade em relação à média da velocidade.

No modelo $k-\varepsilon$, a energia cinética turbulenta k e a taxa de dissipação ε , são obtidos a partir das equações de transporte definidas nas Equações (10) e (11).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (11)$$

sendo que, ρ é a massa específica do fluido, μ é a viscosidade dinâmica e G_k representa a produção de energia cinética turbulenta devido ao gradiente de velocidade, sendo calculado pela Equação (12):

$$G_k = \overline{\rho u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (12)$$

O termo G_b está relacionado à geração de energia cinética devido ao empuxo, sendo definido pela Equação (13):

$$G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (13)$$

sendo que, Pr_t é o número de *Prandtl* turbulento (utilizado comumente como 0,85), g_i é a aceleração da gravidade na direção i e β como coeficiente de expansão térmica. Para gases ideais, a Equação (13) se resume a:

$$G_b = -g_i \frac{\mu_t}{\rho Pr_t} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \quad (14)$$

O fator Y_M , da Equação (10), representa os efeitos da compressibilidade. Ele pode ser desconsiderado quando a modelagem considera fluidos incompressíveis ou calculado com o uso da Equação (15), sendo que a é a velocidade do som:

$$Y_M = 2\rho\varepsilon \frac{k}{a^2} \quad (15)$$

O valor de μ_t que representa a viscosidade turbulenta é calculado a partir da Equação (16):

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (16)$$

A constante C_{μ} é utilizada como 0,09, e as demais constantes apresentadas nas Equações (10) e (11) são: $C_{1\varepsilon} = 1,44$, $C_{2\varepsilon} = 1,92$. Os números de *Prandtl* para k e ε são: $\sigma_k = 1,0$ e $\sigma_{\varepsilon} = 1,3$. Por fim, os valores de S_k e S_{ε} são relativos à termos fontes definidos pelo usuário (ANSYS, 2017).

3.2.2 Modelagem do Escoamento Próximo à Parede

Ao utilizar o modelo $k-\varepsilon$, é necessário optar por métodos de solução que consideram as características diferenciadas, presentes nos escoamentos próximos às paredes, em relação ao restante do domínio fluido.

A modelagem de escoamentos próximos às paredes está diretamente relacionada à constância das simulações numéricas, uma vez que o contato com obstáculos (paredes) são os principais geradores de vorticidade e turbulência.

Segundo Ravier (2016), os modelos utilizados para a viscosidade turbulenta são válidos apenas para regiões distantes das paredes. Em regiões próximas à parede, a velocidade tangencial (u_p) pode ser relacionada por meio da relação logarítmica denominada lei de parede.

A lei de parede é uma relação semi-empírica e pode ser representada pela Equação (17):

$$u^+ = \frac{1}{k} \ln(Ez^+) - \Delta B \quad (17)$$

sendo que, u^+ corresponde à velocidade adimensionalizada (u_p/u^*), z^+ a distância adimensionalizada ($\rho u^* z_p / \mu$), onde z_p corresponde à distância entre a parede e o primeiro nó adjacente da malha. O termo E se apresenta como uma constante empírica (valor utilizado = 9,81). A variável ΔB está relacionada com um fator adimensionalizado de rugosidade, e pode variar de acordo com o regime considerado (ANSYS, 2017).

A condição de tratamento próxima a parede, utilizada foi a condição padrão, ou “*Standard Wall Function*” (LAUNDER E SPALDING, 1974).

3.3 MÉTODOS DE SOLUÇÃO

O *software* utilizado apresenta várias técnicas e modelos numéricos para resolução das equações governantes e dos parâmetros envolvendo o problema simulado. Baseado na literatura e em testes realizados para cada caso específico, é necessário escolher uma configuração com os melhores parâmetros que se adequam às necessidades.

3.3.1 Acoplamento da Pressão e Velocidade

O método de acoplamento pressão-velocidade, utilizado para a resolução das equações do *momentum* e conservação da massa, estabelece correções entre um campo de velocidades estimado e valores de correção de pressão, que inicialmente não satisfazem à equação da continuidade.

O *software* utilizado apresenta quatro algoritmos para a resolução do acoplamento, que são: SIMPLE, SIMPLEC, PISO e *Coupled*. Devido à sua robustez, o método SIMPLE (*Semi Implicit Method for Pressure-Linker Equations*) de Patankar (1980) foi escolhido.

3.3.2 Discretização espacial

Contido nos métodos de solução do problema, a discretização espacial, envolve os esquemas utilizados para interpolação dos termos das equações de conservação.

Segundo Rivera (2016), o Esquema *Upwind* de segunda ordem, aplicado no termo convectivo, resulta em valores mais precisos, em contrapartida, a convergência da solução é mais lenta. Para o termo difusivo, o Método dos Mínimos Quadrados é o método padrão e, que demanda menor esforço computacional. Para a pressão, o Esquema Linear auxilia a convergência e a obtenção de resultados fisicamente realísticos.

3.3.3 Critério de Convergência

A solução de equações algébricas por meio de métodos numéricos, necessita da execução de sucessivas iterações. Um valor inicial é atribuído às variáveis, que são recalculadas a cada iteração, até que a diferença entre duas sucessivas soluções seja a mínima possível, tendendo a zero. Esta diferença entre duas iterações é chamada de resíduo.

Segundo orientações de Franke (2007), escalas residuais inferiores a 10^{-5} são aplicáveis, porém, estudos de convergência direcionados a cada problema específico, são aconselhados. O estudo resulta em uma série de simulações, em que os valores de resíduo são diminuídos gradativamente (partindo de 10^{-3}), até que a diferença entre os resultados das simulações seja suficientemente pequena. Este procedimento busca a otimização de tempo e capacidade computacional para a obtenção de resultados confiáveis.

A utilização de coeficientes de relaxação, para controle da variação das equações durante a solução, foi de grande importância para garantir a convergência e atingimento dos valores de resíduo utilizados: 10^{-5} para continuidade, 10^{-6} para velocidade e energia cinética turbulenta (k) e 10^{-7} para energia e taxa de dissipação de energia turbulenta (ε).

3.3.4 Domínio Computacional

O tamanho do domínio computacional está relacionado à geometria da região estudada, à escala atmosférica considerada e, principalmente, ao tempo de processamento. Domínios computacionais muito grandes demandam grande poder computacional e tempos de simulação elevados.

Para que a solução consiga convergir em intervalos de tempo aceitáveis, é necessário a utilização de dimensões otimizadas e refinamentos localizados.

As simulações realizadas no presente trabalho contemplam uma microrregião (em escala real, inferior a 10 km) com formato do domínio retangular.

Para domínios envolvendo áreas urbanas com múltiplas construções, dimensões verticais de 5 vezes a altura da maior construção devem ser utilizadas, a fim de prevenir a aceleração artificial do fluido nas regiões superiores. As distâncias

horizontais recomendadas são inferiores a 5 vezes a altura do maior prédio e recomenda-se a realização de testes com diferentes valores, para a obtenção do melhor parâmetro para cada caso específico (FRANKE et al., 2007).

3.3.5 Características Computacionais

A análise numérica será executada no Laboratório de Pesquisa em Emissão e Dispersão de Poluentes Atmosféricos, vinculado ao Programa de Pós-Graduação (Mestrado) em Engenharia Mecânica do Departamento Acadêmico de Mecânica da UTFPR/Câmpus Ponta Grossa. O computador utilizado nas simulações contém processador *Intel Core™ i7* 3,6GHz, 16GB de memória RAM e placa de vídeo de 4GB e uma licença acadêmica do software *ANSYS/Fluent™19.1*.

3.4 EMISSÕES ATMOSFÉRICAS NA REGIÃO DE PONTA GROSSA

As fontes poluidoras podem ser classificadas como fontes fixas ou fontes móveis. Um exemplo de fonte fixa são as indústrias, e de fontes móveis são os veículos automotores.

Com o auxílio de um inventário estadual de emissões atmosféricas, desenvolvido por Grauer (2013), é possível obter dados relacionados às emissões dos principais poluentes atmosféricos, advindos de fontes fixas e móveis no estado do Paraná.

A metodologia empregada para o cálculo das estimativas de emissões veiculares foi a mesma adotada por Grauer (2013), a qual se baseia nas proposições realizadas no Inventário Nacional (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2014). Os valores encontrados para as emissões veiculares foram utilizados como parâmetros de entrada nas simulações numéricas utilizando linhas de emissões criadas no *software*.

A quantidade (em gramas) de emissão de um determinado poluente i (E_i), é calculada pela Equação (18):

$$E_i = F_{ij} F_{ei} L \quad (18)$$

sendo que, F_{ij} é o número de veículos totais de uma determinada categoria, L é a distância percorrida (em km) e F_{ei} é o fator de emissão referente ao poluente i , considerando a categoria de veículo j . Os valores dos fatores de emissão utilizados para cada categoria de veículo são dependentes do ano de fabricação.

Uma vez que não é possível prever com exatidão o ano de fabricação dos veículos apenas pelo exame visual, como critério de simplificação em casos em que não é possível a obtenção de dados detalhados da frota, pode-se utilizar fatores de emissão alternativos. Pesquisas realizadas por Cancelli e Dias (2011) apresentam os fatores de emissões simplificados (g/km) divididos por categoria de veículo, que podem ser observados na Tabela 5.

Tabela 5 - Fatores de emissão de CO, NO₂ e CH₄.

	CO (g/km)	NO ₂ (g/km)	CH ₄ (g/km)
Automóveis e veículos comerciais leves	1,2	0,4	0,15
Motocicletas	3,0	0,15	0,1
Caminhões leves, médios e pesados	1,0	0,4	-
Ônibus urbano e rodoviário	1,1	0,5	-

Fonte: Adaptada de Cancelli e Dias (2011).

Os fatores médios, apresentados por Cancelli e Dias (2011), foram estimados baseados nas médias dos fatores de emissão apresentados no Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários (2011). O uso dos fatores de forma simplificada, desconsidera as diferenças relacionadas ao ano de fabricação do veículo, o que interferem diretamente no valor das emissões, uma vez que as novas tecnologias do setor automotivo, prezam o controle e redução das emissões.

A fim de se obterem dados mais realistas, seria necessário um trabalho de criação de inventário dos veículos circulando atualmente na cidade de Ponta Grossa/PR de acordo com ano de fabricação.

3.5 REGIÃO DE ESTUDO

A região de estudo compreende uma micro-escala urbana localizada no centro da cidade de Ponta Grossa/PR, incluindo as Ruas e Avenidas que ladeiam ao Complexo Ambiental Gov. Manoel Ribas (Parque Ambiental), onde está presente uma estação de monitoramento da qualidade do ar do Instituto Ambiental do Paraná (IAP).

A Figura 6 apresenta a localização da região simulada (retângulo tracejado), a posição da estação de monitoramento (estrela amarela), o *shopping center* (círculo laranja), o terminal de ônibus (triângulo verde) e as Ruas e Avenida foco de estudo (linhas vermelhas).

Figura 6 - Região de Ponta Grossa utilizada para análise de dispersão de poluentes.



Fonte: Adaptada de Google Maps (2019).

As Ruas e Avenida de estudo, foram divididas em duas seções, sendo V1 e V2 referentes à Avenida Vicente Machado, B1 e B2 à Rua Benjamin Constant e E1 e E2 à Rua Ermelino de Leão.

O Complexo Ambiental Gov. Manoel Ribas é o único parque localizado no centro da cidade, sendo muito procurado para práticas esportivas e caminhadas, além de serem realizados eventos culturais e feiras, com frequência. A existência do

terminal de ônibus e do maior *shopping center* da cidade, atraem muitos pedestres para as proximidades.

3.6 INFLUÊNCIA DO VENTO NA DISPERSÃO DE POLUENTES

Segundo Oke (1998), as características relacionadas ao vento influenciam diretamente no conforto dos pedestres, uma vez que afetam as sensações de calor e transporte de poluentes, podendo gerar regiões com altas concentrações bloqueadas pelos obstáculos presentes no ambiente urbano, como construções, muros e prédios. As características da dispersão são fortemente influenciadas pela magnitude do vento, condição atmosférica e natureza da superfície; como mares, zonas rurais ou cidades.

Uma análise de direção preferencial do vento, nos anos de 2017 e 2018, auxiliou no embasamento para a determinação das Ruas e Avenidas consideradas no presente estudo (MACHADO, ALVES e TADANO, 2019). Os dados de direção e velocidade do vento foram obtidos por intermédio do Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR), de acordo com o padrão da Organização Mundial de Meteorologia (OMM). O estudo foi realizado com o auxílio do software *WR-PLOT*, o qual permite a criação da rosa dos ventos.

Para a caracterização do perfil do vento, os dados das medições realizadas a uma distância de 10 metros do nível do solo foram convertidos para uma altura de 2 metros acima do solo, utilizando uma relação desenvolvida a partir de dados empíricos e aproximações, conhecida como perfil de velocidade de lei de potência, ou *power law*, representada na Equação (19), conforme Seinfeld e Pandis (2016).

$$u_x(z) = u_x(z_r) \left(\frac{z}{z_r} \right)^\alpha \quad (19)$$

sendo que, $u_x(z)$ é o valor da velocidade do vento em uma altura z , $u_x(z_r)$ é a velocidade na altura de referência z_r (para este estudo foi utilizado o valor de 10 metros). O expoente α , é determinado pelas condições atmosféricas e pela rugosidade específica do terreno, podendo ser menor ou igual à unidade.

A variação do valor de α ocorre de forma crescente, com o aumento da rugosidade do terreno e da estabilidade atmosférica. Em condições próximas a de atmosfera neutra, os valores de α são de aproximadamente 0,15 para zonas de rugosidade extremamente baixa (oceanos e campos abertos) e 0,4 para zonas urbanas desenvolvidas (ARYA, 1999).

3.7 CONTAGEM DOS VEÍCULOS

A contagem de veículos foi realizada baseada na metodologia utilizada pelo DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte) e detalhada no manual de estudos de tráfego DNIT (2006).

Para o processo de contagem foi utilizado um aplicativo, para celular, de contagem chamado *MultiCounter™*, que foi a base para o preenchimento de uma ficha padrão de transcrição dos dados (APÊNDICE A).

4 RESULTADOS

Esta seção apresenta a exposição e discussão sobre os resultados desenvolvidos durante a execução desta Dissertação de Mestrado.

Os resultados permeiam desde a verificação numérica, análise das características do vento na região, resultados de contagem de veículos, cálculos de emissões de poluentes, até os resultados finais de análises fluidodinâmicas, resultados de concentração de poluentes e a comparação com um cenário futuro com a troca de todos os ônibus presentes na região para ônibus elétricos.

4.1 VERIFICAÇÃO NUMÉRICA

As reproduções de dois casos da literatura foram desenvolvidas para verificação dos métodos numéricos adotados neste trabalho.

O primeiro caso a ser reproduzido foi a dispersão de poluentes atmosféricos provenientes de emissões industriais, em que Bolognesi e Montelato (2011) realizaram a caracterização da dispersão de um gás composto por monóxido de carbono, sendo emitido por uma chaminé, utilizando a versão *FLAIR* do *Software PhoenixTM*.

O segundo caso utilizado para verificação, baseia-se no trabalho de Tan et al. (2018), o qual apresenta a simulação do processo de dispersão de uma pluma de dióxido de carbono (CO_2) em um arranjo de prédios, em regime transiente e utiliza a comparação com dados obtidos em um túnel de vento. O *software* utilizado foi o *ANSYS/FluentTM*.

4.1.1 Caso Bolognesi e Montelato (2011).

As condições de contorno adotadas para reprodução do trabalho apresentado por Bolognesi e Montelato (2011), bem como dimensões do domínio, utilizadas na simulação foram:

- Condição de não-deslizamento no solo, pois ele está parado e não deve haver escoamento do fluido em contato com o solo.

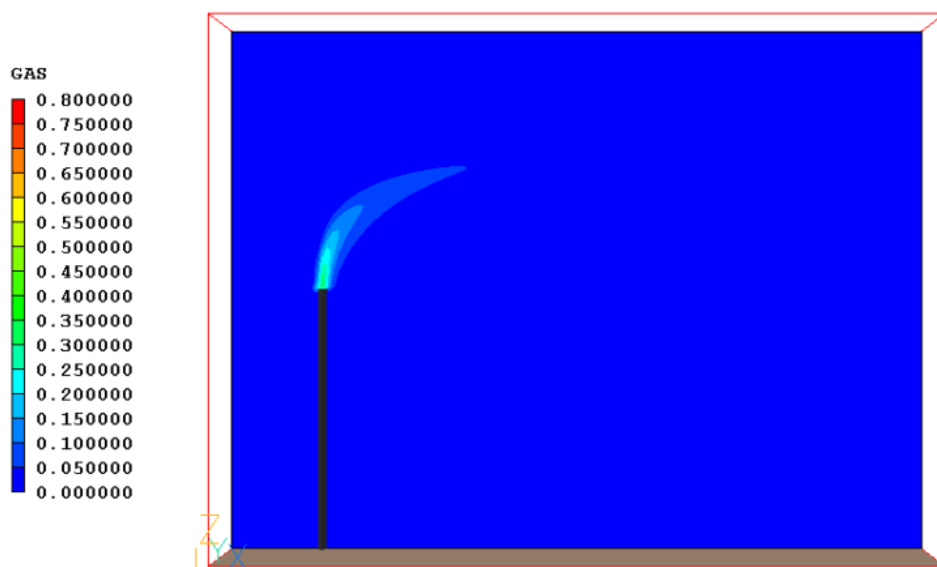
- A chaminé foi representada como uma estrutura sólida de superfície lisa, sem escoamento interno e apresentando dimensões aproximadas de uma chaminé real, ou seja, 1,0 m de diâmetro e 30,0 m de altura.
- O domínio para análise do fenômeno da dispersão possui dimensões retangulares com 80 m (largura) × 20 m (profundidade) × 60 m (altura).
- A velocidade de emissão no topo da chaminé é de 20 m/s e a concentração de poluentes é de 44% (9,71 kg/s).
- O vento é aplicado na direção e sentido do eixo x, com o módulo de 3,0 m/s.
- Condições internas no domínio de 1 atm de pressão e 20°C de temperatura.

Para comparação com os resultados apresentados por Bolognesi e Montelato (2011), simulações utilizando o software *ANSYS/FluentTM19.1* foram realizadas e, além dos parâmetros citados, devido ao método de solução, foram imputadas as seguintes condições:

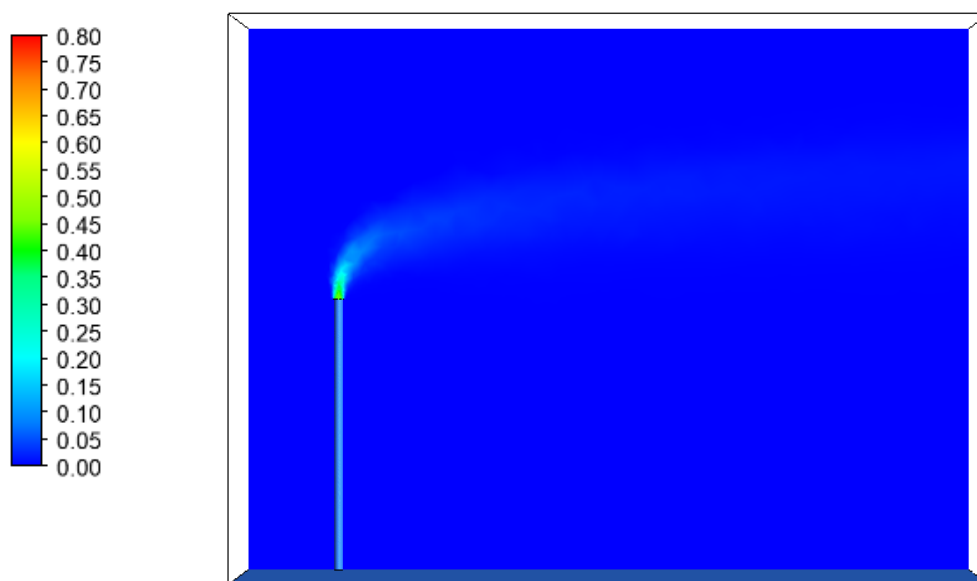
- Modelo de turbulência $k - \varepsilon$ padrão.
- Coeficientes de relaxação com o valor igual a 0,7 para a pressão e 0,5 para as três componentes da velocidade.

A Figura 7 apresenta o perfil de concentração de emissões de CO₂ no plano xy, simulado por Bolognesi e Montelato (2011) (Figura 7a) e reproduzido para verificação (Figura 7b). É observada boa concordância entre eles, apresentando um comportamento de pluma muito semelhante em ambos os casos, com diferenças de visualização devido ao uso de *softwares* e configurações de malhas diferentes.

Figura 7 - Perfil de concentração no plano xy para emissões de CO₂.



a) Bolognesi e Montelato (2011)

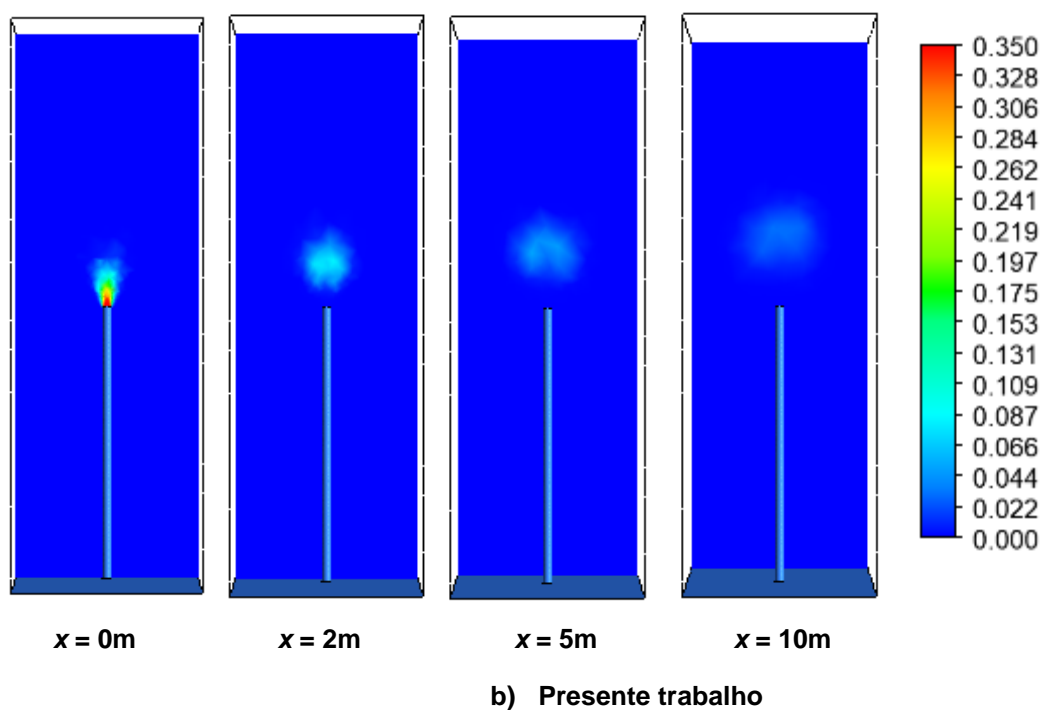
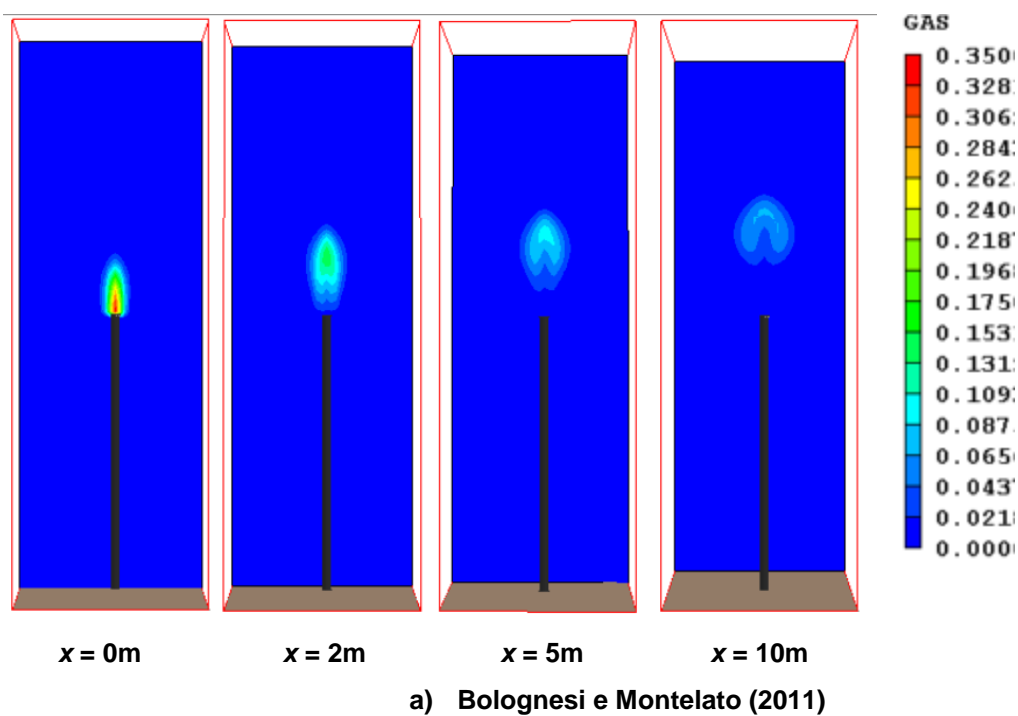


b) Presente trabalho

Na Figura 8, é apresentada a comparação do perfil de concentração, considerando o plano yz em diferentes distâncias em relação ao eixo x, variando desde o centro da chaminé até a distância de 10 m.

A Figura 8a apresenta o resultado de Bolognesi e Montelato (2011) e a Figura 8b, o resultado reproduzido para verificação. Como anteriormente, foi observada boa concordância entre eles.

Figura 8 - Perfil de concentração no plano yz para diferentes distâncias em x.



4.1.2 Caso Tan et al. (2018)

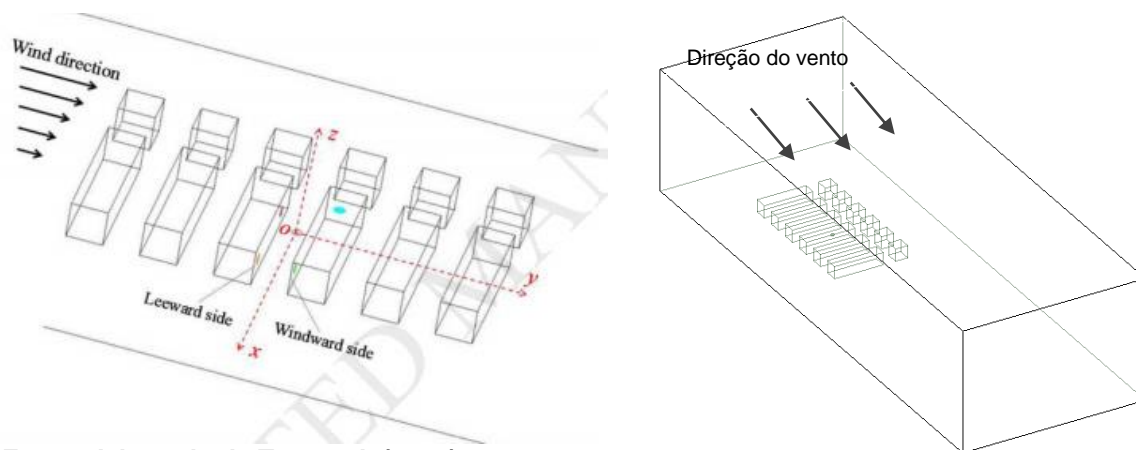
Para reprodução do caso de Tan et al. (2018), considerando a dispersão da pluma de CO_2 , foram utilizadas as seguintes condições de contorno e parâmetros:

- Modelo de turbulência $k-\omega$ SST.

- Método de acoplamento pressão-velocidade: SIMPLEC.
- Condições de temperatura de 17,8°C e umidade relativa de 43,1% no domínio.
- Velocidade de entrada de CO₂ de 0,5628 m/s a 99,9% de concentração.
- CO₂ e ar foram considerados como fluidos incompressíveis.
- Rugosidade do solo de 10⁻⁵ m.
- Perfil de velocidade logarítmico com expoente 0,308.
- Altura dos prédios de 0,05 m e larguras de 0,2 e 0,05 m.
- Energia cinética turbulenta de 0,0027m²/s² e taxa de dissipação de 0,2891 s⁻¹, considerando o ponto z = 0,05 m (altura do prédio).
- Raio de 0,0065 m de entrada do CO₂.
- Regime transiente com passo de tempo de 0,001 s.

A Figura 9 apresenta a configuração do arranjo de prédios utilizada na simulação. Para a comparação, foi criada uma geometria e um volume de controle iguais aos utilizados por Tan et al. (2018).

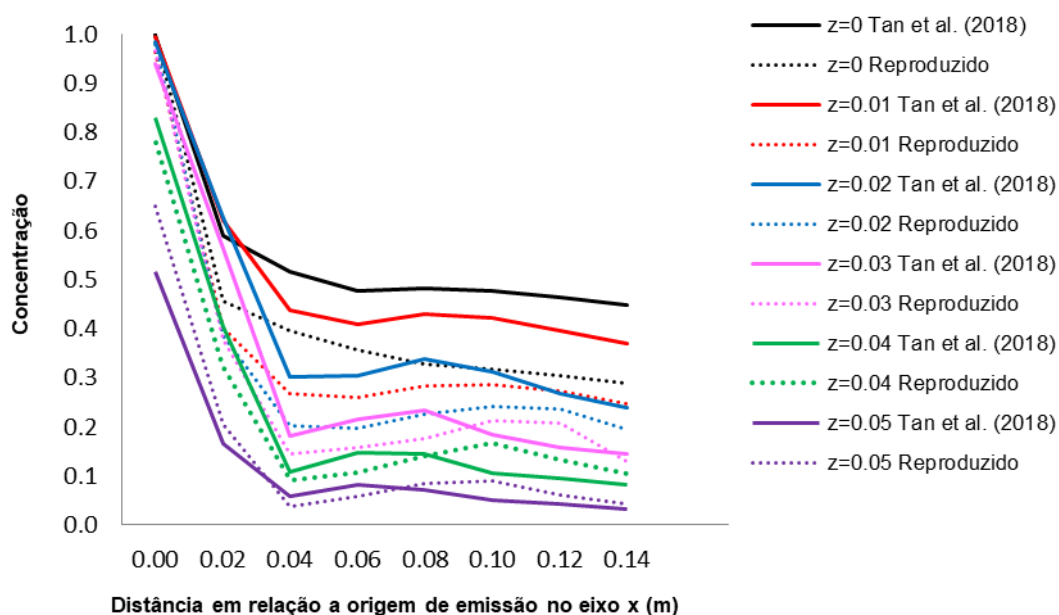
Figura 9 - Representação da configuração dos prédios utilizados na simulação.



Fonte: Adaptada de Tan et al. (2018).

Os valores de concentrações, no tempo de 15 segundos, na linha central em $y = 0$ (a partir da origem do ponto de emissão, considerando variações verticais na direção z), apresentados por Tan et al. (2018), em forma gráfica, são apresentados no Gráfico 3 .

Gráfico 3 - Fração volumétrica de CO₂ na dimensão vertical z, considerando y = 0.

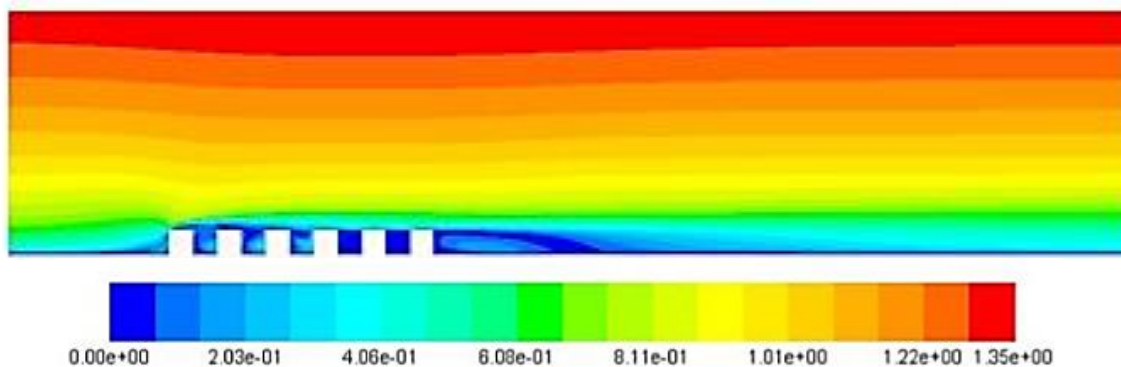


Fonte: Adaptado de Tan et al. (2018).

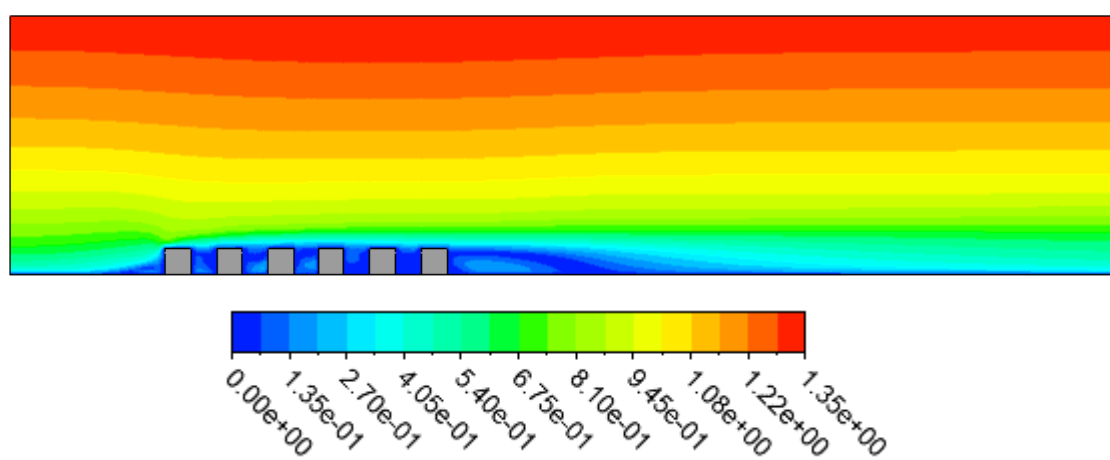
É possível observar que, quanto mais distante do ponto de emissão (origem $x = 0$), mais consideráveis são as diferenças entre a reprodução e as simulações de Tan et al. (2018), uma vez que, foi realizado um maior refino de malha nas regiões próximas à fonte de emissão. As diferenças aumentam também em relação ao avanço no sentido do eixo z, pois as condições próximas ao solo (região de parede) não são apresentadas explicitamente e, portanto, não puderam ser reproduzidas na íntegra e comparadas quantitativamente.

Para a simulação da dispersão de poluentes, um ponto importante é a fluidodinâmica do fenômeno, a qual influencia diretamente na concentração de poluentes em diferentes pontos. Visando representar fielmente as características presentes na camada limite atmosférica, é necessário imputar nas condições de entrada do domínio, perfis de velocidade do vento. A verificação desta condição de contorno, utilizada por Tan et al. (2018), é apresentada na Figura 10, em que a comparação do perfil de velocidade logarítmico é validada, demonstrando o correto uso da configuração para condição de contorno de velocidade do vento na entrada do domínio.

Figura 10 - Comparação do perfil de velocidade na dimensão vertical em $x = 0$.



a) Tan et al. 2018

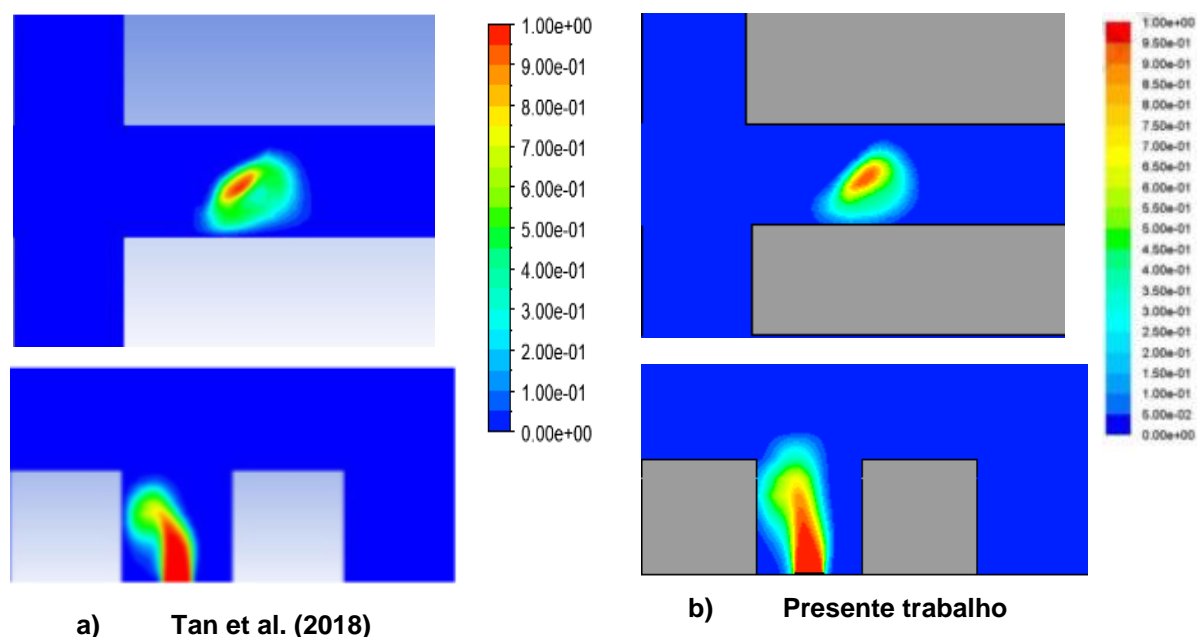


b) Presente trabalho

Para representação do perfil de velocidades, foi utilizada uma UDF (*User Defined Function*), ou seja, um código criado capaz de gerar dinamicamente um perfil vertical de variação da velocidade do vento na entrada do domínio. Os valores de variação da energia cinética turbulenta e da taxa de dissipação, também foram imputados na simulação utilizando uma UDF, utilizando as funções apresentadas em Tan et al. (2018).

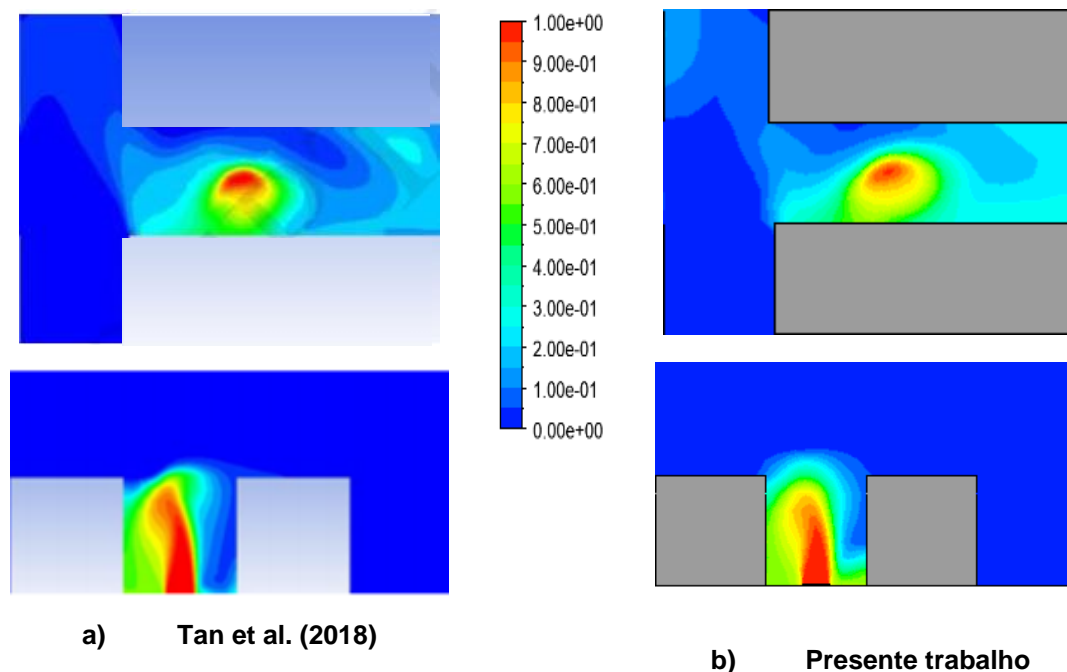
A comparação dos padrões de dispersão tanto horizontal, quanto vertical, é representada considerando o tempo de 0,2 segundos, na Figura 11. Nesta fase inicial, a diluição do CO_2 é limitada pela altura do bloco e não se estende para as Ruas perpendiculares.

Figura 11 - Comparação dos contornos de fração volumétrica de CO₂, em 0,2 segundo nos planos vertical $x = 0$ m e horizontal $z = 0,025$ m.



A comparação da dispersão no tempo de 3 segundos é apresentada na Figura 12. Após a passagem de 3 segundos, a pluma de CO₂ apresenta maior dispersão horizontal, fato que permite o aumento da concentração na Rua perpendicular ao escoamento. Ao ultrapassar o obstáculo limitante, que é a altura do prédio, a pluma entra em contato direto com o vento, e uma maior interação proporciona a distribuição dos poluentes para outras áreas, anteriormente não atingidas.

Figura 12 - Comparação dos contornos de fração volumétrica de CO₂, em 3,0 segundo nos planos vertical $x = 0$ m e horizontal $z = 0,025$ m.



O comportamento da pluma de CO₂ ao longo do regime transiente pode ser separado em dois momentos principais: as frações de segundo iniciais, quando a pluma não sofre influência direta do perfil de entrada do vento, pois está compreendida entre a barreira de prédios e, o momento em que a pluma ultrapassa a altura dos prédios e passa a sofrer influência direta do perfil do vento.

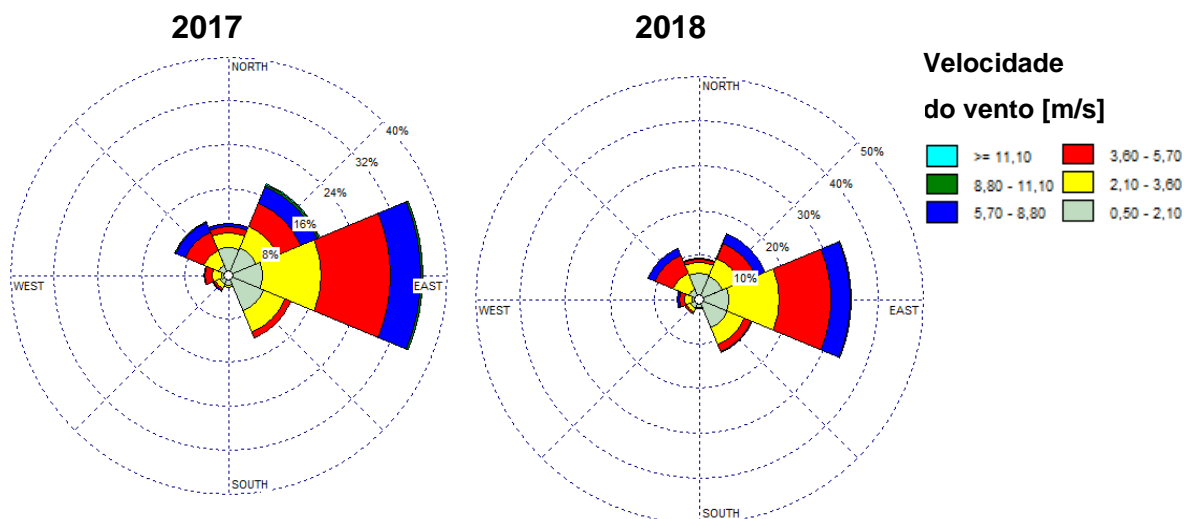
Nas comparações apresentadas nas Figura 11 e 13, foi possível observar algumas diferenças em relação ao trabalho de Tan et al. (2018) e a sua reprodução, que são justificadas principalmente pelas diferenças de malhas utilizadas nos casos.

4.2 CARACTERÍSTICAS DOS VENTOS NA REGIÃO DE PONTA GROSSA/PR

A partir dos dados gerados com o software *WR-PLOTView*TM, a direção predominante dos ventos em Ponta Grossa é apresentada na Figura 13, soprando do Leste (90°), com ventos provenientes principalmente da Rua Ermelindo de Leão, que apresenta elevado tráfego de automóveis. Os ventos que sopram do oeste (270°), embora não apresentem grande intensidade ou frequência, são os que dispersam os poluentes da Avenida Dr. Vicente Machado, que apresenta elevado

tráfego de automóveis e, principalmente ônibus urbanos, advindos do terminal central localizado na imediação.

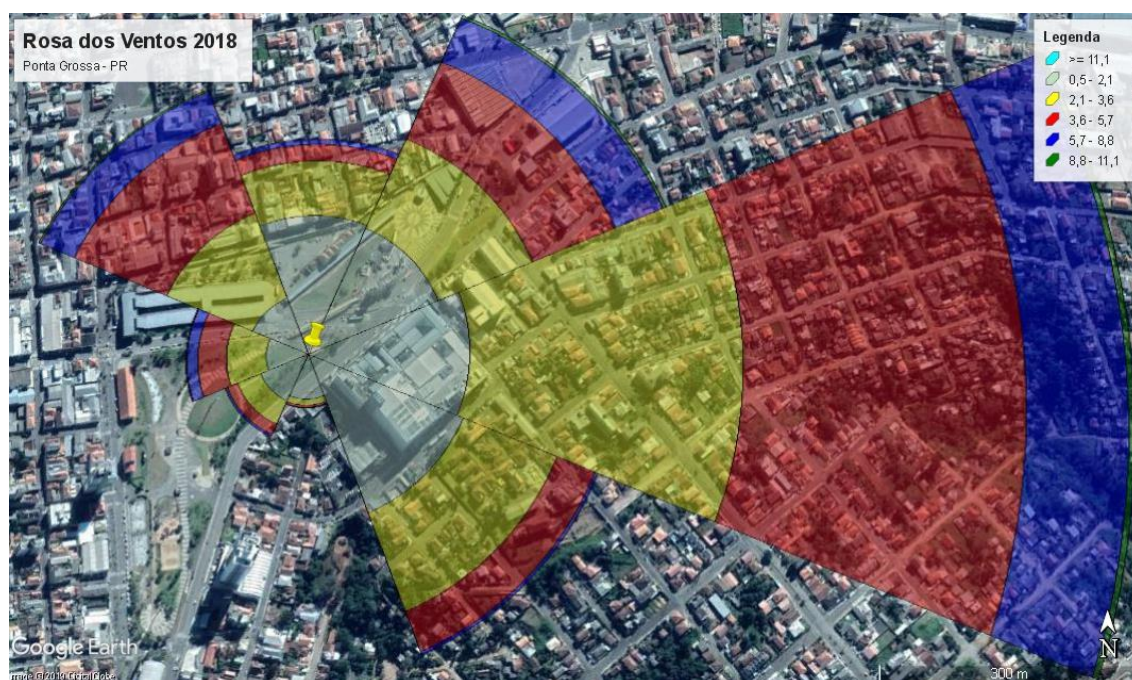
Figura 13 - Rosa dos ventos de Ponta Grossa/PR, nos anos de 2017 e 2018.



Fonte: Autoria Própria.

Para facilitar a visualização da direção predominante do vento na região de estudo, a Figura 14 apresenta a rosa dos ventos no mapa da região estudada, obtido no Google Earth (2017).

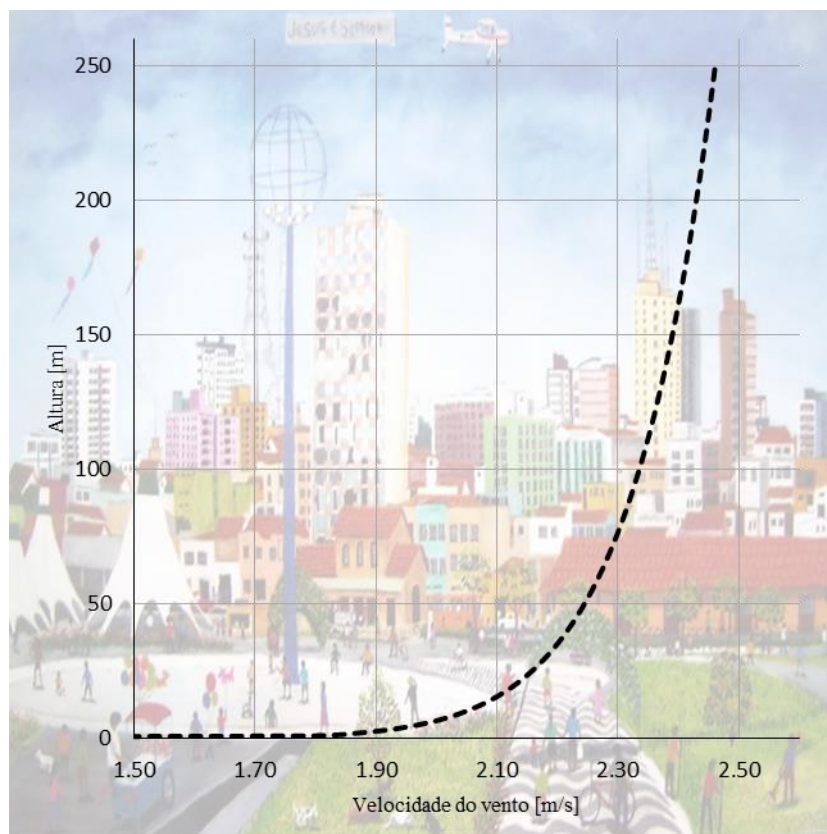
Figura 14 - Rosa dos ventos na localização da estação de monitoramento.



Fonte: Adaptada de Google Earth (2017).

Considerando condições de atmosfera neutra, que possibilitam a dispersão de poluentes, altura de camada limite planetária de 250 metros, rugosidade equivalente à de uma região urbana (0,4) e aplicando a equação do perfil de velocidade de lei de potência (Equação (19)), foi possível obter o perfil representado no Gráfico 4.

Gráfico 4 - Perfil de velocidade polinomial do vento na cidade de Ponta Grossa/PR.



Fonte: Autoria Própria.

A utilização do perfil de velocidade do vento na simulação numérica é realizada a partir da criação de uma UDF, baseada em todos os dados de velocidade e direção coletados e apresentados nesta seção.

A UDF a ser utilizada para a simulação do perfil de velocidade do vento na cidade de Ponta Grossa/PR encontra-se descrita no APÊNDICE B.

4.3 CÁLCULO DE EMISSÕES BASEADO NA CONTAGEM DE VEÍCULOS

Nas vias escolhidas para estudo, não há um sistema de monitoramento automatizado para a contagem de veículos. Desta maneira, a contagem foi realizada de forma manual, em dia de semana do mês de dezembro de 2018. Foram realizadas contagens nos principais horários de pico do dia: intervalo de 12h às 13h e 18h às 19h. Os valores compilados e representados em frequência horária são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Número de veículos trafegando por hora nas vias estudadas.

		# caminhões	# ônibus	# carros	# motos
Av. Vicente Machado	V1	0	176	548	28
	V2	4	60	592	120
Rua Ermelino de Leão	E1	16	4	1236	156
	E2	28	28	836	96
Rua Benjamin Constant	B1	8	4	452	64
	B2	8	36	340	68

Fonte: Autoria Própria.

A partir de cálculos utilizando os valores contidos na Tabela 5 para fatores de emissão de CO (1,2 g/km para veículos leves, 3,0 g/km para motocicletas, 1 g/km para caminhões leves e 1,1 g/km para ônibus) e dados de contagem de veículos trafegando nas vias analisadas, apresentados na Tabela 6, foi estimada a vazão mássica de CO, para utilização como parâmetro de entrada nas simulações numéricas. Como critério de simplificação, todos os veículos automotores de pequeno porte (carros) e motocicletas foram considerados usuários de gasolina como combustível. Já os automóveis de médio porte (SUV - *Sport Utility Vehicle* e Caminhonetes) e ônibus, como usuários de combustível Diesel. Os valores de fluxo mássico de CO nas vias simuladas são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Fluxo mássico de CO nas vias simuladas.

	Total (g/hora)	Total (kg/hora)	Total (kg/s)
V1	$2,75 \times 10^2$	$2,75 \times 10^{-1}$	$7,63 \times 10^{-5}$
V2	$3,52 \times 10^2$	$3,52 \times 10^{-1}$	$9,78 \times 10^{-5}$
E1	$2,77 \times 10^2$	$2,77 \times 10^{-1}$	$7,70 \times 10^{-5}$
E2	$1,41 \times 10^2$	$1,41 \times 10^{-1}$	$3,91 \times 10^{-5}$
B1	$7,47 \times 10^1$	$7,47 \times 10^{-2}$	$2,07 \times 10^{-5}$
B2	$6,60 \times 10^1$	$6,60 \times 10^{-2}$	$1,83 \times 10^{-5}$

Fonte: Autoria Própria.

Outro fator considerado como parâmetro de entrada para as emissões é o valor da constituição aproximada de CO nos gases de escape. Para veículos à gasolina, o valor utilizado foi de 923 ppm e, para veículos diesel, 1000 ppm (RIVERA, 2016).

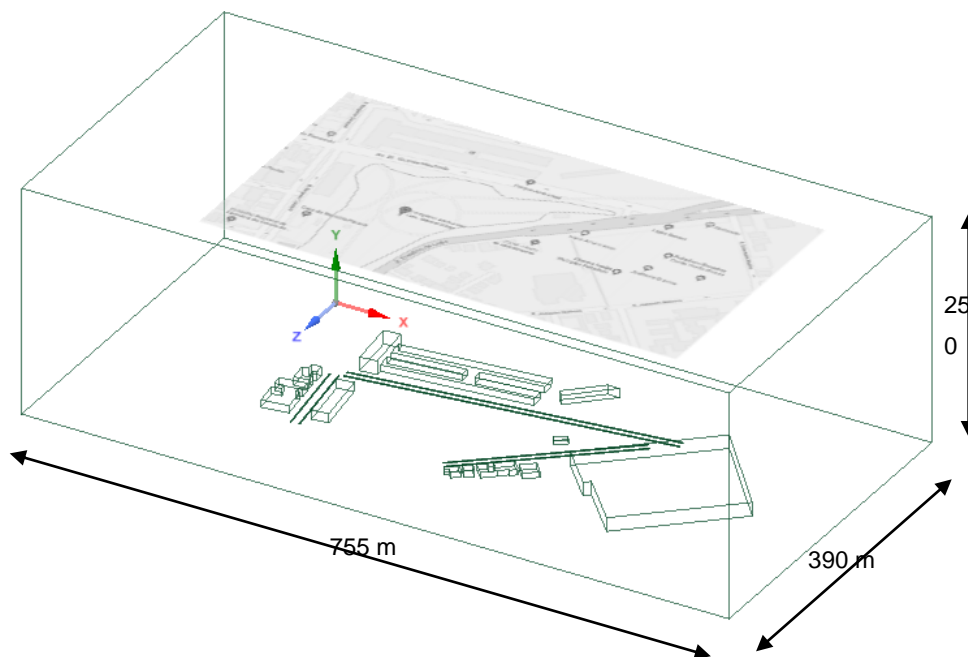
4.4 CRIAÇÃO DA GEOMETRIA E CONDIÇÕES DE CONTORNO

A região de estudo foi reproduzida geometricamente, com o uso do software *ANSYS/DesignModeler™*, para ser utilizada nas simulações do *ANSYS/Fluent™*.

A geometria foi criada com o auxílio do *Google Maps™*, em que o mapa do local de estudo foi copiado em escala, para garantir que as dimensões das construções simuladas fossem condizentes com as reais.

Simplificações na geometria dos telhados foram realizadas, para redução da complexidade e esforço computacional. As dimensões do domínio estão expostas na Figura 15, em que o valor da altura foi considerado de 250 metros, conforme apresentado por Lena e Desiato (1999), para alturas de Camada Limite Planetária em condições neutras.

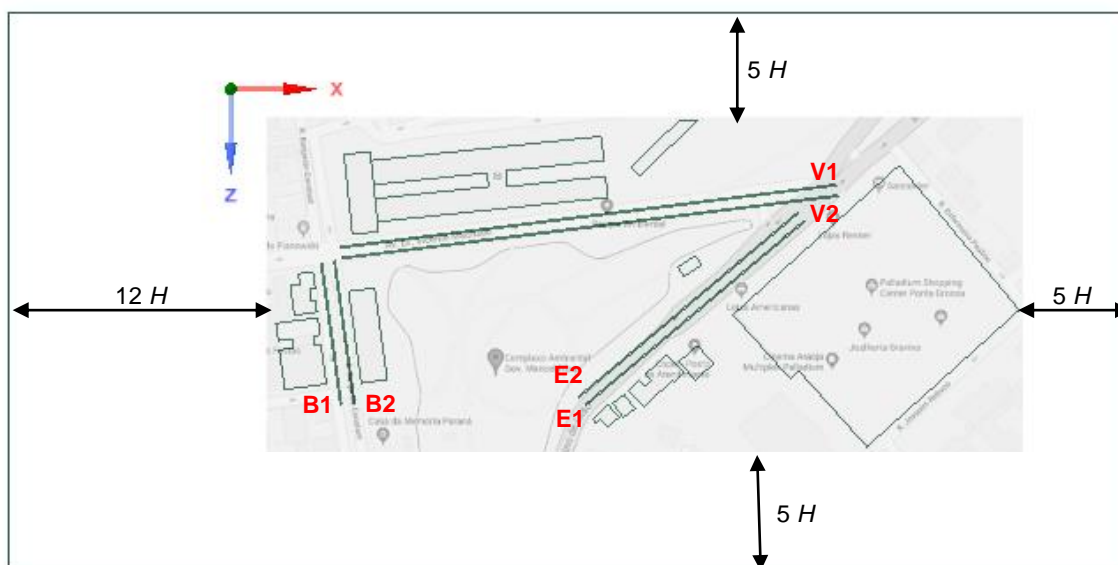
Figura 15 - Dimensões do domínio simulado.



Fonte: Autoria Própria.

As distâncias da representação da microrregião em relação às paredes do domínio são representadas em função de H (altura do maior prédio do domínio: 15 metros). Assim sendo, o domínio utilizado compreende as seguintes distâncias: $5H$ na entrada do domínio, $12H$ na saída e $5H$ nas laterais, conforme Figura 16.

Figura 16 - Vista superior do volume de controle, com distâncias em função de H e identificação das fontes de emissões.



Fonte: Autoria Própria.

Na Figura 16 é possível observar a representação das fontes de emissões nas Ruas e Avenida simuladas (V1, V2, B1, B2, E1 e E2). Constituídas de paralelepípedos contendo 0,4 metros de altura, 1 metro de largura e comprimento variável, as fontes de emissão nesta configuração auxiliam na representação implícita da energia cinética turbulenta ocasionada pela movimentação dos veículos (AMORIN, 2003).

Um resumo com as condições de contorno aplicadas no domínio e considerações utilizadas no *software*, para execução das simulações, são apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1 - Condições de contorno e consideração aplicadas à simulação.

Parâmetro	Configuração
Entrada do domínio (vento)	Perfil de velocidade Lei de Potência (UDF)
Entrada do CO (fontes de emissão)	Fluxo mássico
Saída do domínio	Abertura (<i>Outflow</i>)
Solo do domínio	Condição de parede (rugosidade 0,05 m)
Topo do domínio	Simetria
Laterais do domínio	Simetria
Paredes dos prédios	Condição de parede (rugosidade 0,05 m)
Temperatura Ambiente	300 K
Regime de simulação	Permanente
Modelo de turbulência	k- ϵ padrão
Condição próxima à parede	<i>Standart wall function</i>
Acoplamento Pressão-Velocidade	Método SIMPLE
Discretização espacial	Esquema <i>Upwind</i> de 2ª ordem (Termo convectivo) Método dos Mínimos Quadrados (Termo difusivo)

Fonte: Autoria Própria.

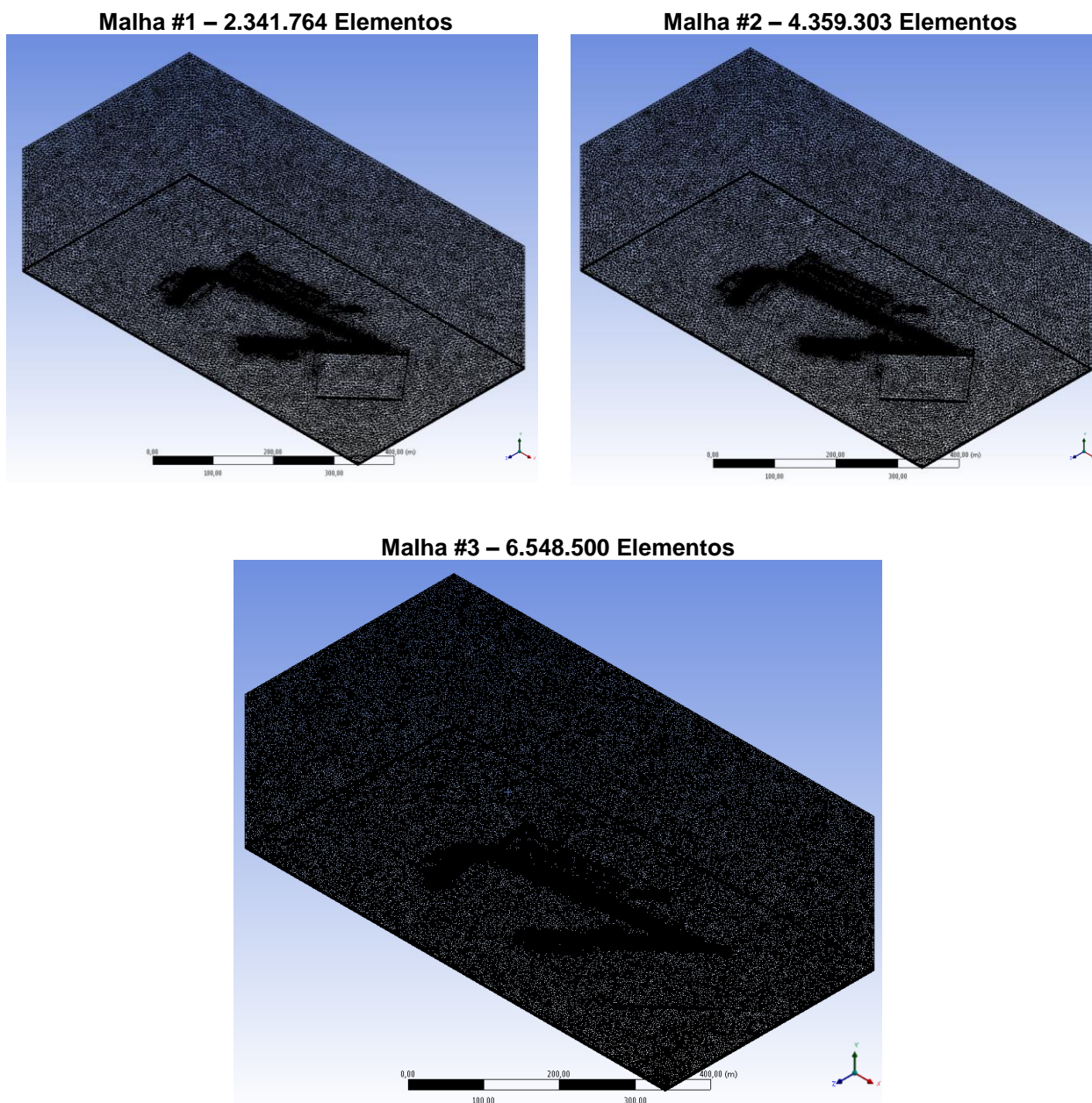
4.5 TESTE DE MALHA COMPUTACIONAL

Para garantir a independência dos resultados em relação à malha computacional utilizada e minimizar os erros provenientes das soluções numéricas, um estudo com diferentes refinamentos de malha foi realizado.

As malhas computacionais foram geradas no software *ANSYS/Meshing™*, em que além da criação das malhas, são também criadas as seleções nomeadas (*Named Selection*), que são os locais onde as condições de contorno devem ser atribuídas.

Uma série de testes com alterações de parâmetros foi realizada, para escolha de três malhas computacionais tetraédricas, com elementos prismáticos nas regiões próximas ao solo. Distintas entre si, em relação ao número de elementos e refinamentos, as três malhas estudadas são apresentadas na Figura 17.

Figura 17 - Diferentes malhas computacionais utilizadas no estudo de independência.



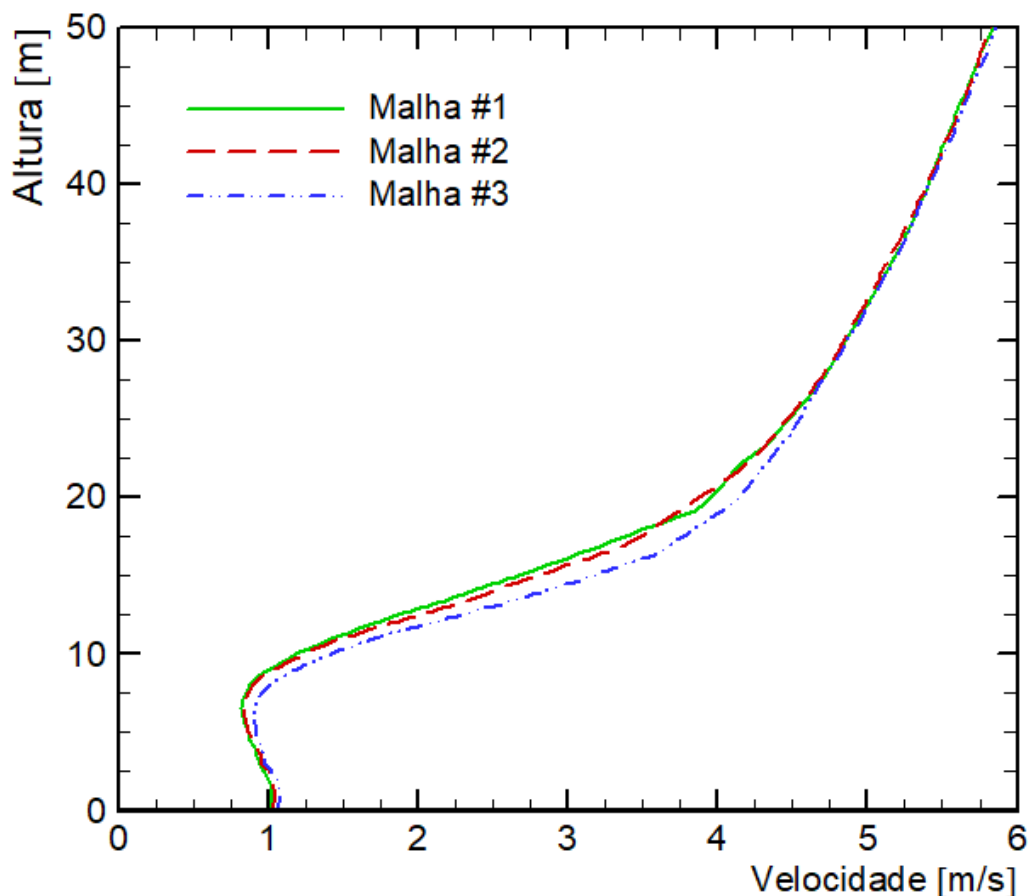
Fonte: Autoria Própria.

Para quantificar a dependência da variação da solução em relação ao refino de malha computacional utilizado, o perfil de velocidade em um ponto do domínio, variando de acordo com o distanciamento do solo, foi analisado para três malhas distintas.

Conforme apresentado no Gráfico 5, as diferenças entre a utilização das diferentes malhas, não ultrapassou 14%, levando assim, à escolha da malha #3 para

resolução do problema, contendo 6.548.500 elementos e tempo de resolução de aproximadamente 23 horas.

Gráfico 5 - Comparação entre os valores de velocidade considerando as três malhas computacionais testadas.

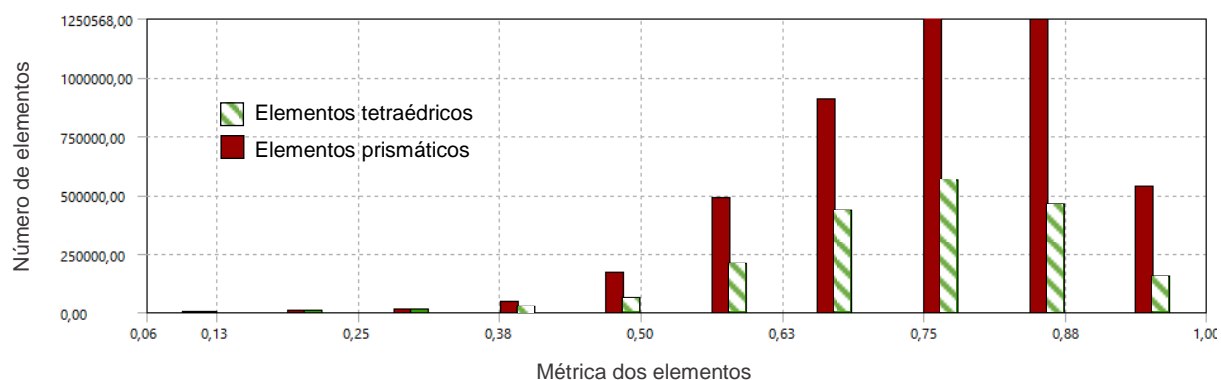


Fonte: Autoria Própria.

Para garantir a qualidade da malha computacional utilizada, o espectro de métrica ortogonal foi utilizado, avaliando os elementos em uma escala de 0-1: sendo 0,20 até 0,69 boa qualidade; 0,70 até 0,95 muito boa e, 0,95 até 1,00 excelente.

A análise fornecida pelo *software ANSYS/Meshing™* é apresentada no Gráfico 6. A grande maioria dos elementos se encontra na faixa acima dos 0,65, demonstrando a boa qualidade da malha computacional, tanto para os elementos tetraédricos quanto prismáticos.

Gráfico 6 - Análise de elementos da malha computacional considerando a qualidade ortogonal.

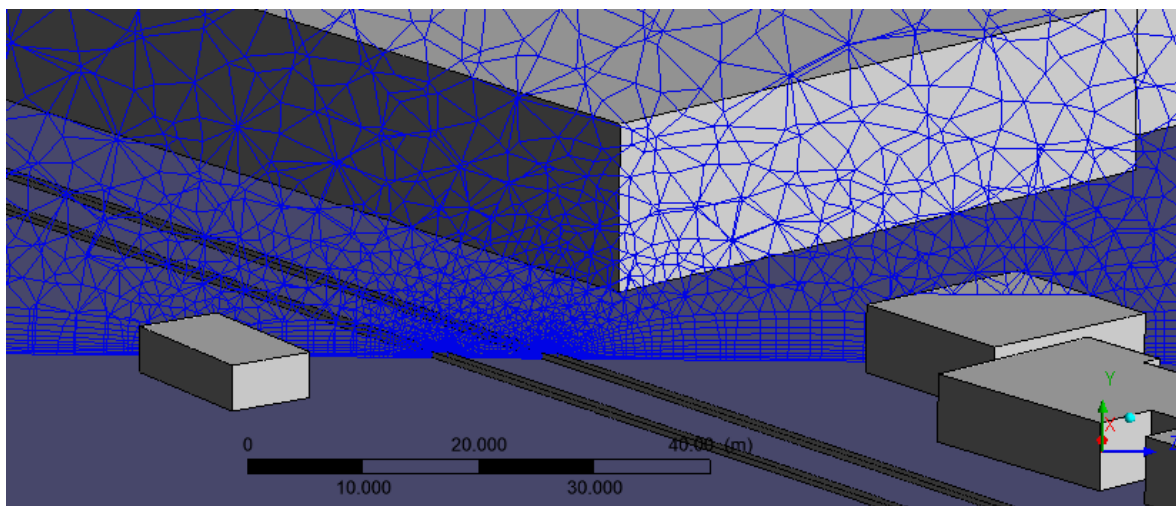


Fonte: Autoria Própria.

O tratamento de refino, na região próxima ao solo e próximas aos obstáculos, é fundamental para a qualidade da solução, uma vez que nestas regiões são encontrados os maiores gradientes das variáveis primitivas envolvidas no problema.

Na Figura 18, é possível observar as regiões próximas às fontes de emissões, que possuem um refino ainda maior em seu entorno, bem como as regiões próximas aos prédios e ao solo.

Figura 18 - Detalhamento da malha nas regiões próximas à parede.



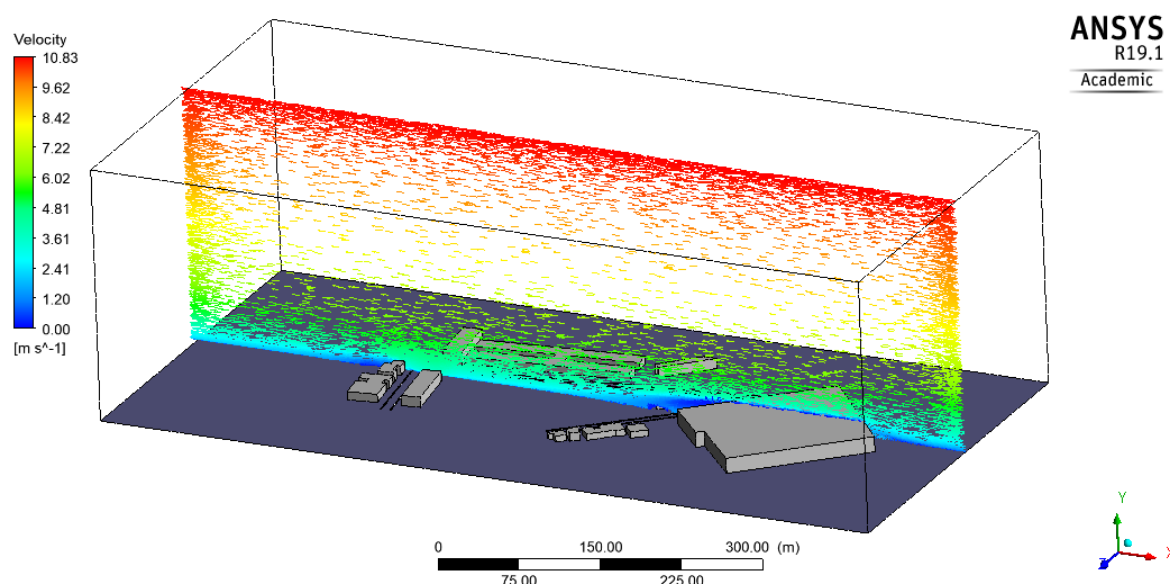
Fonte: Autoria Própria.

4.6 RESULTADOS DE ESCOAMENTO

A influência direta das características do escoamento, no comportamento da dispersão de poluentes, pode ser observada nesta seção. Considerando a direção preferencial do vento, analisando os anos de 2017 e 2018, o escoamento é representado no sentido negativo de x , soprando de leste para oeste.

Na Figura 19, é possível observar os vetores de velocidade no plano central do domínio (x,y) . A alteração da velocidade considerando diferentes alturas é claramente observada pela diferença de cores aplicadas nos vetores.

Figura 19 - Visão geral dos vetores de velocidade no plano (x,y) do domínio computacional.

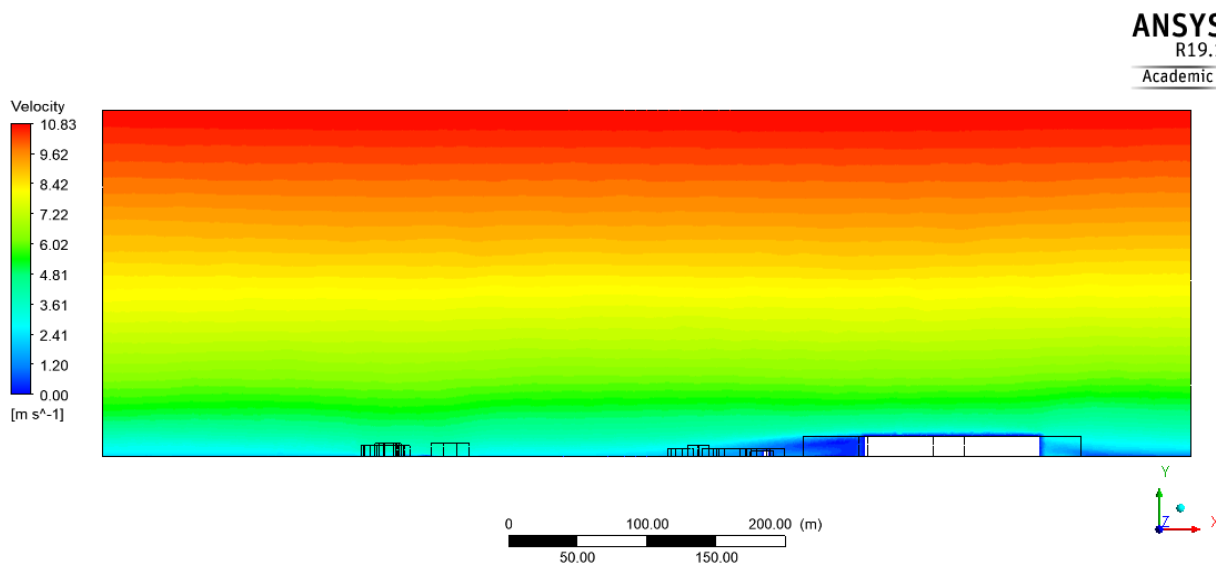


Fonte: Autoria Própria.

A influência dos prédios, agindo como obstáculos para o escoamento do vento, também pode ser observada nas regiões de menor velocidade (regiões representadas em azul) à jusante dos prédios.

A variação da velocidade em relação à altura do domínio, utilizada com o auxílio da UDF apresentada no Apêndice B, é exposta nas Figura 20 e Figura 21.

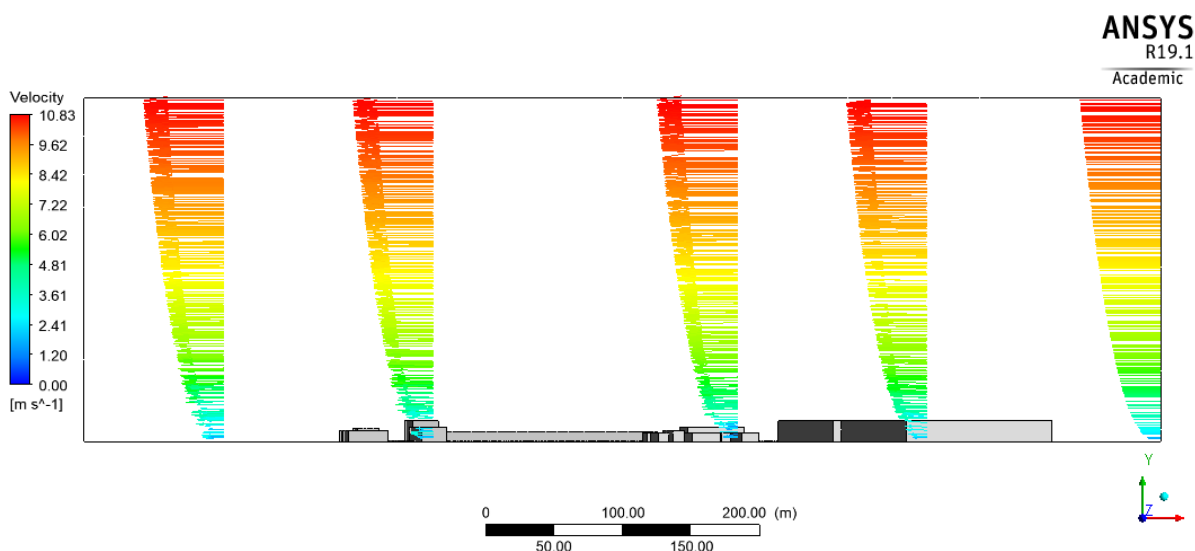
Figura 20 - Campo de magnitude de velocidade no plano $(x,y,0)$ do domínio computacional.



Fonte: Autoria Própria.

Para a criação da Figura 21, os vetores de velocidade com diferentes módulos foram representados em linhas verticais, alocadas em diferentes pontos do plano central xy do domínio.

Figura 21 - Perfil de velocidade em diferentes linhas do domínio, no plano $(x,y,0)$.

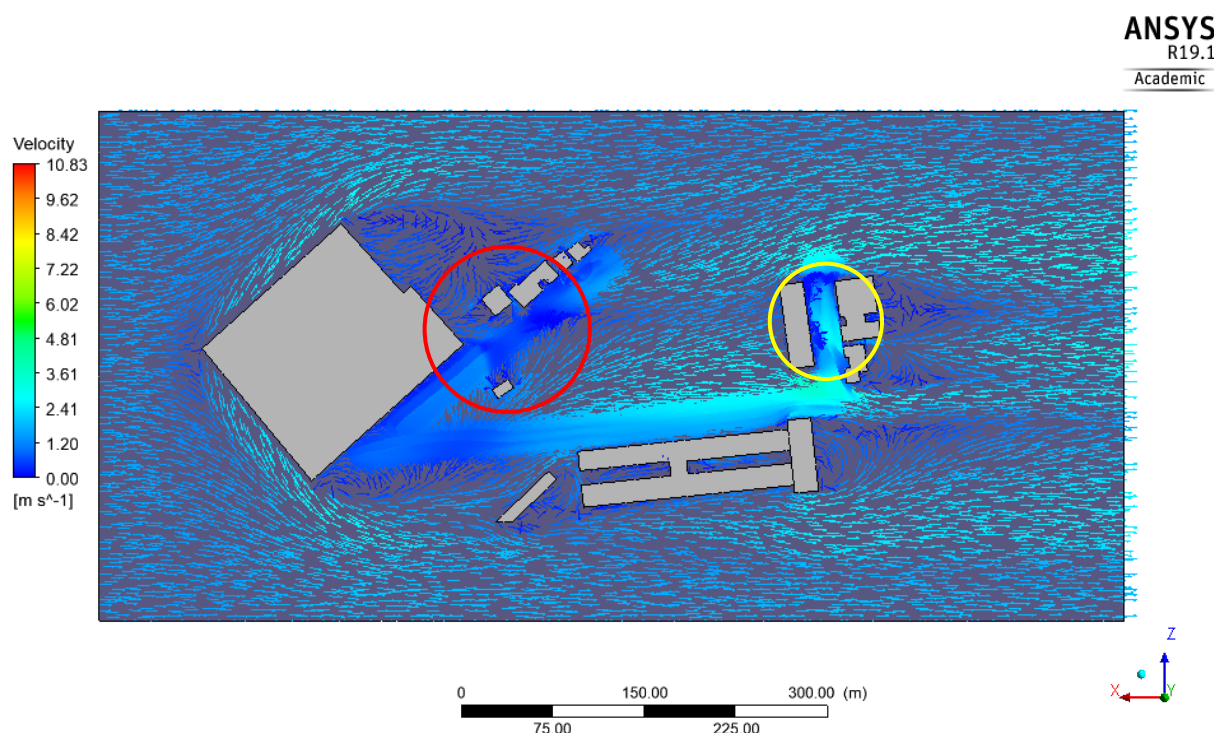


Fonte: Autoria Própria.

Na Figura 22 é apresentada a vista superior dos vetores de velocidade, no plano xz , considerando uma altura de 1,5 m em relação ao nível do solo. Este valor de altura é utilizado por estar diretamente relacionado ao conforto e bem estar das pessoas ao caminharem pelas Ruas (FRANK et al., 2007).

Os círculos apresentados na Figura 22 são apresentados em detalhes na Figura 23 (círculo em vermelho) e na Figura 24 (círculo em amarelo). Eles demonstram as regiões onde há recirculação, que por sua vez, são locais de possível acúmulo de poluentes.

Figura 22 - Vista superior dos vetores de velocidade no plano (x,1.5,z).



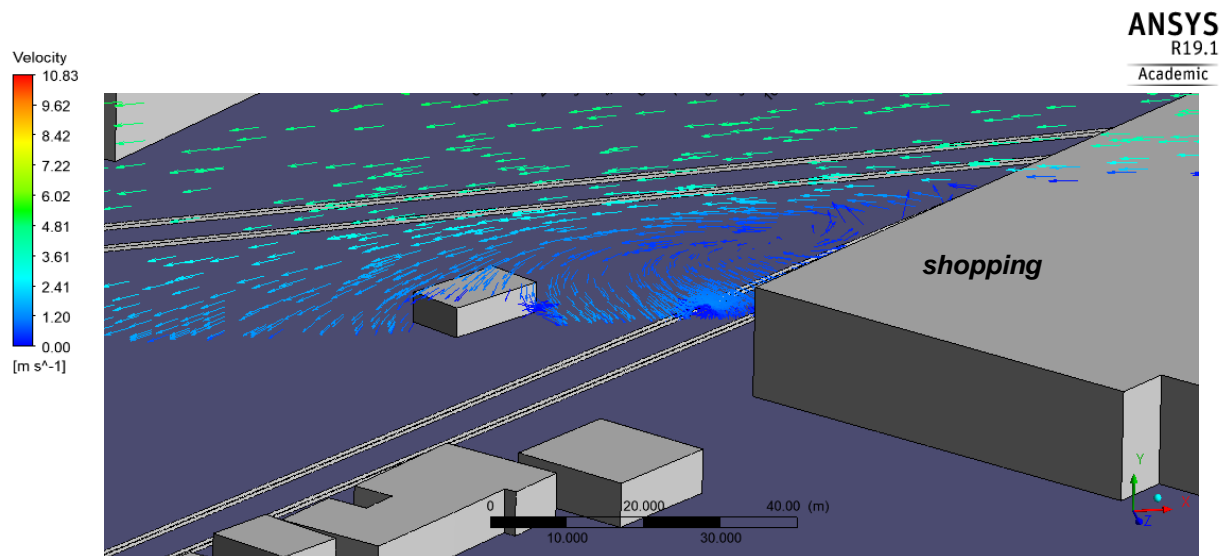
Fonte: Autoria Própria.

A ausência de recirculações na saída do domínio, ou áreas próximas às paredes laterais, é uma maneira de comprovar a não influência do domínio no escoamento e a utilização correta de valores de distanciamento em relação aos prédios.

Na Avenida Vicente Machado, devido ao seu paralelismo em relação à direção preferencial do vento, não são visíveis zonas de recirculações ao longo de seu comprimento longitudinal.

O comportamento na Rua Ermelino de Leão é representado na Figura 23, onde a recirculação ocorre próximo ao acesso para o estacionamento do *shopping center*, demonstrando assim, uma possível dispersão dos poluentes para o interior do local e contribuição no aumento do nível de CO no seu interior.

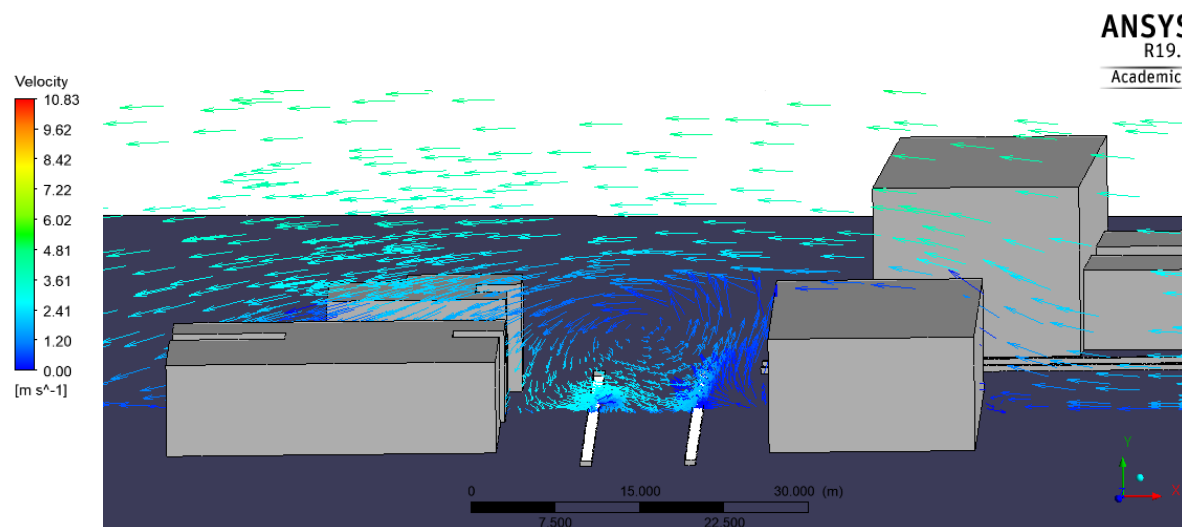
Figura 23 - Representação da recirculação na área próxima à entrada do *shopping* (Rua Ermelino de Leão).



Fonte: Autoria Própria.

A Rua Benjamin Constant é ladeada por prédios em suas duas vias, o que favorece a existência de recirculações, gerando uma maior dificuldade na dispersão de poluentes. Na Figura 24, é possível observar os vetores de velocidade que vêm da direção leste, e os vetores de velocidade advindos das fontes de emissões, que são consequência do fluxo mássico de CO, parâmetro de entrada utilizado na simulação.

Figura 24 - Representação da recirculação na Rua Benjamin Constant.

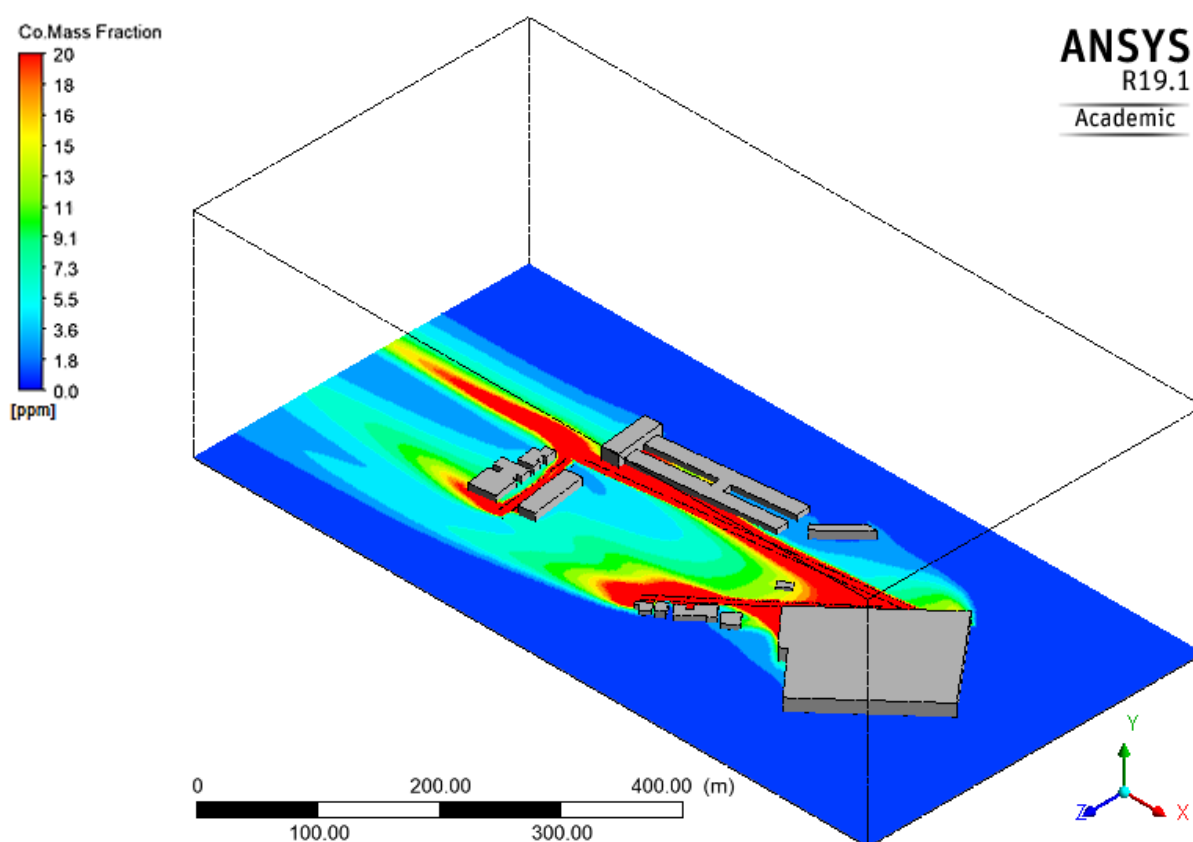


Fonte: Autoria Própria.

4.7 RESULTADOS DE CONCENTRAÇÃO

Os campos de concentração de CO são apresentados nesta seção. Na Figura 25, é possível observar os pontos de maior concentração de poluentes (em vermelho) e a dispersão em diferentes pontos do domínio. O plano representado compreende as coordenadas x,y com altura de 1,5 metros em relação ao nível do solo.

Figura 25 - Distribuição de concentração de CO no plano $(x,1.5,z)$.



Fonte: Autoria Própria.

As laterais do domínio não interferem na dissipação do CO, demonstrando que as dimensões utilizadas estão corretas. As zonas de maior concentração de poluentes são próximas às fontes de emissões e se dissipam de acordo com a direção preferencial do vento (direção leste). As regiões de acúmulo apresentadas condizem com as áreas de recirculação.

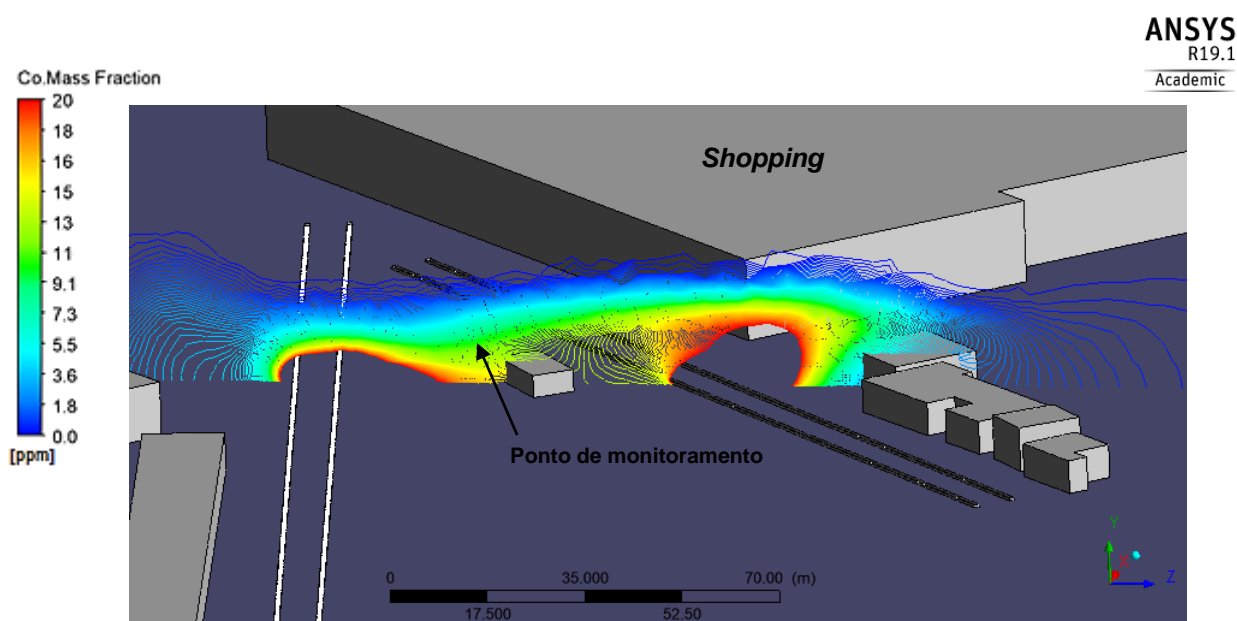
Apesar de não ter sido considerada a circulação dos ônibus no interior do terminal, é importante ressaltar que a poluição proveniente do terminal não se

dispersará predominantemente para o parque ambiental, devido à direção preferencial do vento ser de leste para oeste. Isto indica que a localização do terminal de ônibus em relação ao parque ambiental é a melhor possível, para garantir a qualidade de vida da população que utiliza o parque ao redor para lazer e atividades físicas.

Na Figura 26, um plano semelhante ao apresentado na Figura 23 (região de recirculação na área próxima à entrada do shopping) é demonstrado. Esta região é onde atualmente se encontra localizada uma estação de monitoramento da qualidade do ar, de responsabilidade do Instituto Ambiental do Paraná (IAP).

O ponto escolhido para medição da concentração de CO é o ponto aproximado do local da estação, em uma altura de 1,5 metros em relação ao solo. O valor de 14,4 ppm foi encontrado, se apresentando acima dos padrões estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 491/2018, que atualmente é de 9 ppm, e se enquadrando no nível estabelecido como de atenção.

Figura 26 - Distribuição de concentração de CO no plano yz, na região próxima à estação de monitoramento.



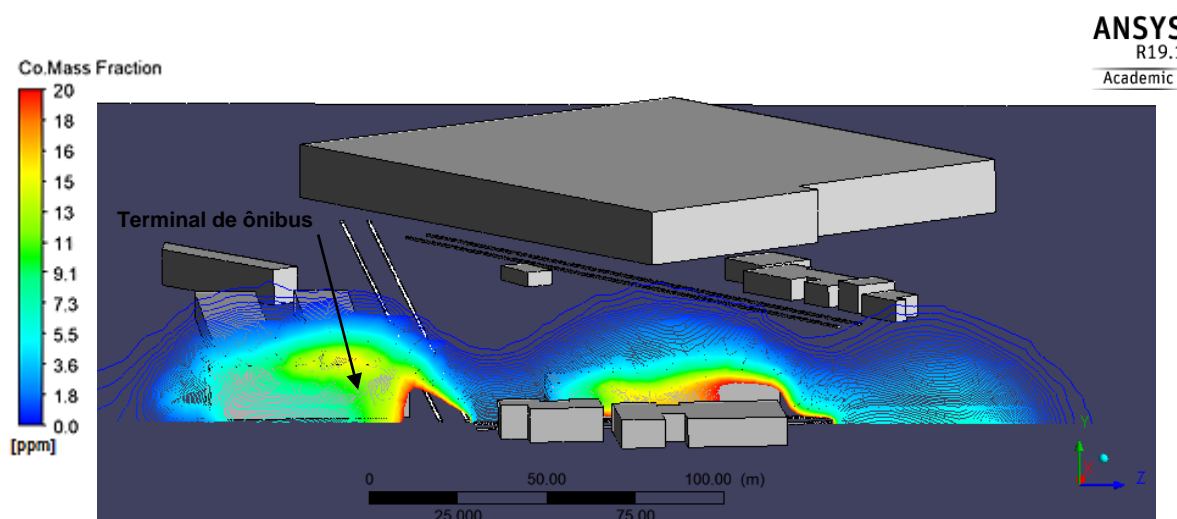
Fonte: Autoria Própria.

Tomando como parâmetro, dados apresentados em relatórios da CETESB (2017), os valores de concentração de CO obtidos de grandes centros metropolitanos da região de São Paulo (em torno de 5 ppm), é possível observar uma superestimação do caso simulado para a região de Ponta Grossa. Um dos

principais fatores impactantes na superestimação são as simplificações de relevo da região, onde atualmente há desníveis em relação à Avenida Vicente Machado e Rua Benjamin Constant.

A Figura 27 apresenta o perfil de concentração de CO em um plano perpendicular à Avenida Vicente Machado e paralelo à Rua Benjamin Constant, com localização próxima à entrada do terminal de ônibus. É possível observar que a dissipação ocorre no sentido negativo de z, em que os poluentes são levados para a região de entrada do terminal, onde se concentra um elevado número de pessoas todos os dias.

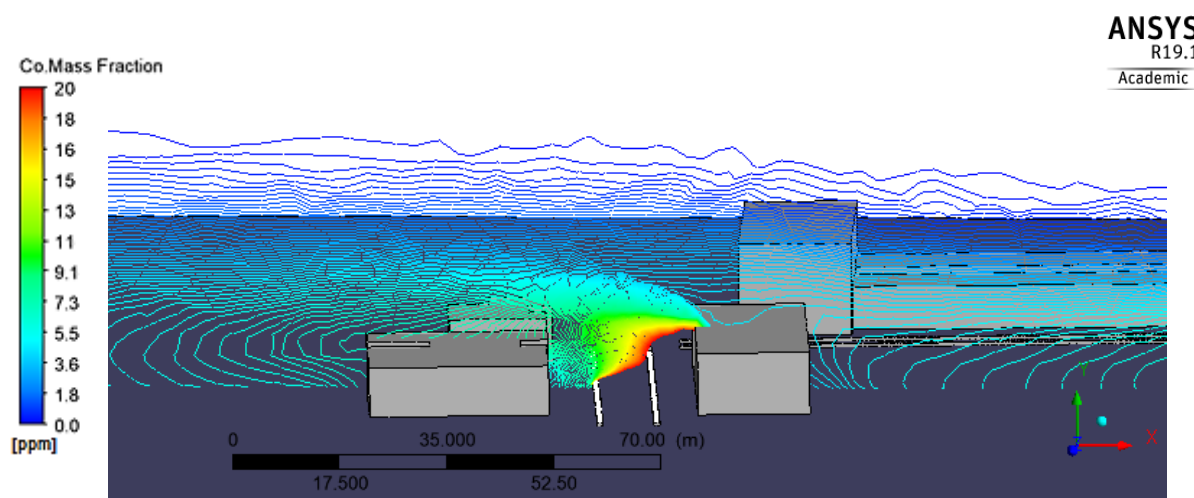
Figura 27 - Distribuição de concentração de CO no plano yz, na região próxima à entrada do terminal de ônibus.



Fonte: Autoria Própria.

A Figura 28 apresenta o perfil de concentrações na Rua Benjamin Constant. Em comparação com a Figura 24 (região de recirculação), é possível concluir que nas regiões em que as representações dos vetores velocidade têm menor módulo, o acúmulo de poluentes é maior, e a direção de dissipação dos poluentes no sentido positivo do eixo x é justificada pelas recirculações representadas pela direção dos vetores (Figura 24).

Figura 28 - Distribuição de concentração de CO no plano xy, na Rua Benjamin Constant.



Fonte: Autoria Própria.

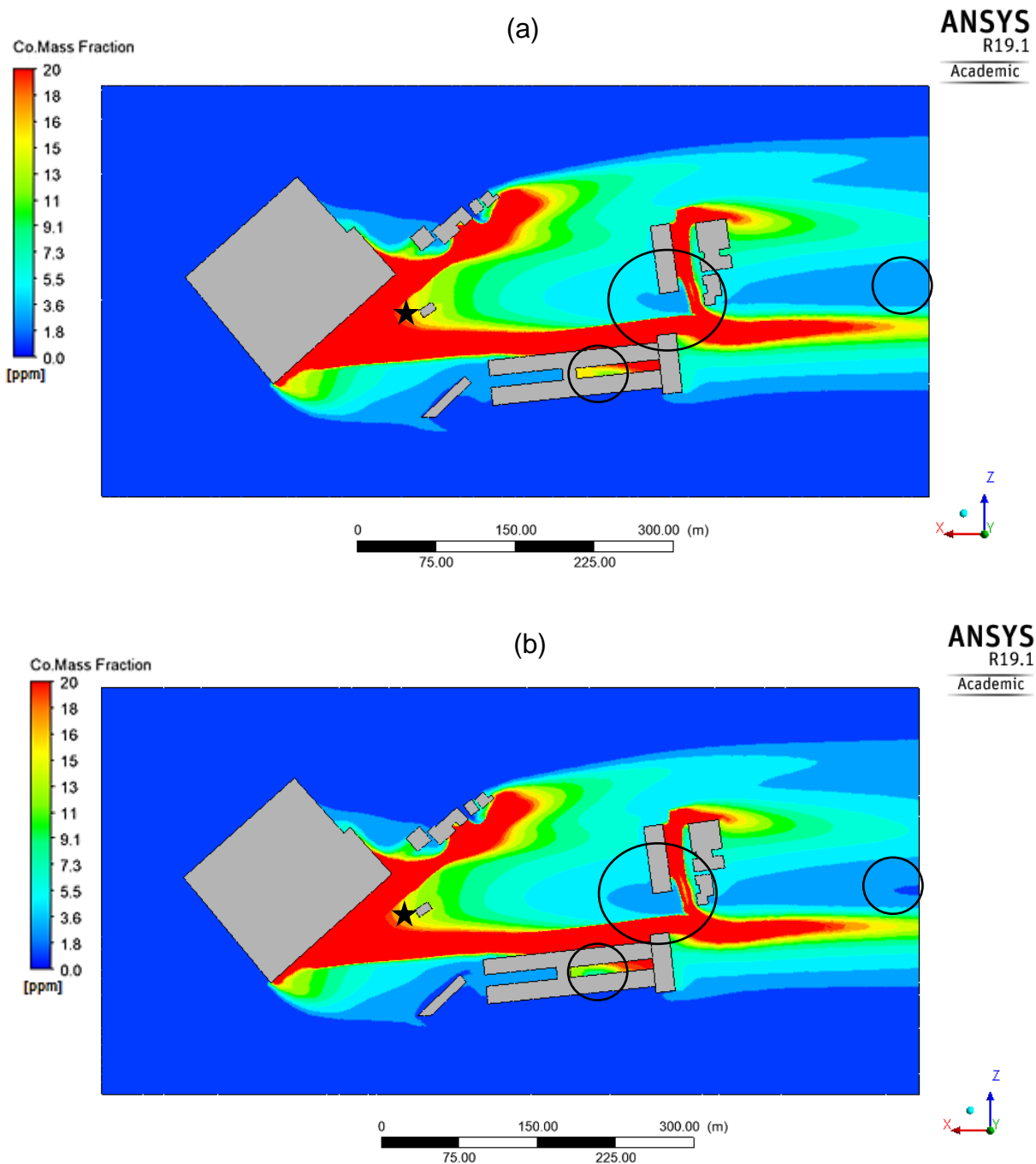
Os dados de concentração obtidos através do *software* são passíveis de comparação com dados de concentração real de CO, medidos em estação de monitoramento, possibilitando assim a obtenção de um valor de erro aproximado com a uso da metodologia aplicada. Devido a não obtenção dos dados da estação presente no local, esta comparação não foi realizada.

4.8 CENÁRIO COM ÔNIBUS ELÉTRICO

Um cenário futuro foi criado, visando avaliar a contribuição da troca de toda a frota de ônibus da região simulada, por ônibus elétricos, a fim de reduzir a emissão de poluentes no local.

A Figura 29 apresenta a comparação entre a simulação considerando o cenário atual (a), e considerando o uso da frota de ônibus elétricos (b). Visualmente, as diferenças são sutis, porém com significância em relação à redução na concentração de CO. As áreas circuladas auxiliam na verificação das diferenças e, o local escolhido para a medição da concentração de CO, onde atualmente está instalada a estação de monitoramento da qualidade do ar, é representado por uma estrela na cor preta.

Figura 29 - Campo de concentração de CO variando de 0 a 20 ppm, no plano xy , $z = 1,5\text{m}$: a) cenário com ônibus convencionais e b) cenário com ônibus elétricos.

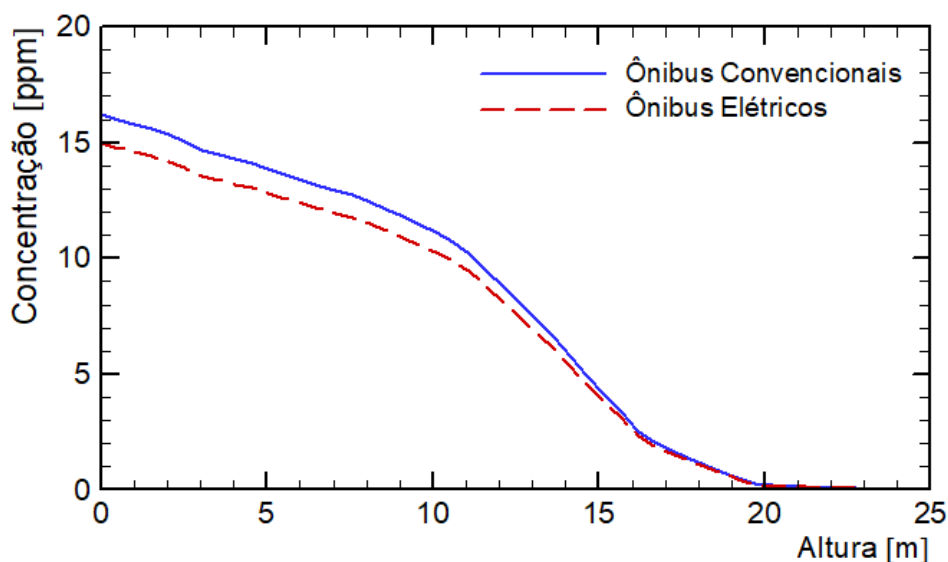


Fonte: Autoria Própria.

No ponto de medição do domínio, em uma altura de 1,5 m em relação ao solo, a diferença de concentração de CO, considerando o cenário com ônibus convencionais e com ônibus elétricos é de 1,2 ppm (8,3%).

A representação gráfica da diferença de concentração de CO nos dois cenários, variando em relação à altura é apresentada no Gráfico 7. As diferenças máximas de concentração nos dois cenários chegam a 8,5%, ou seja, 1,3 ppm.

Gráfico 7 - Comparação da concentração de CO, para o cenário atual e com uso de ônibus elétricos.



Fonte: Autoria Própria.

É possível observar que, quanto mais distante do solo, mais próximos são os valores para os dois casos, pois com maiores velocidades e menores obstáculos, o CO se dispersa mais rapidamente e as concentrações são bem menores.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo, são apresentadas as conclusões após a elaboração desta dissertação e sugestões para trabalhos futuros.

5.1 CONCLUSÕES

Pioneiro na área de dispersão de poluentes em Ponta Grossa/PR, este trabalho surge como incentivo para novas pesquisas científicas sobre dispersão de poluentes no Brasil e apresenta um melhor entendimento de como a dispersão do CO se comporta em uma das regiões mais movimentadas da cidade.

O uso da ferramenta CFD *ANSYS/Fluent™* para análise da dispersão de poluentes, atende às expectativas para obtenção de resultados e apresenta, dentre suas vantagens, a versatilidade de alterações de cenários, considerando diferentes casos. As principais dificuldades em relação ao uso do *software* comercial estão na complexidade de seu funcionamento e considerações que devem ser imputadas durante a simulação.

O resultado obtido para a concentração de CO no ponto de medição escolhido no domínio (local da estação de monitoramento) foi de 14,4 ppm, que é superior ao parâmetro limite definido pela Resolução CONAMA nº 491/2018 de 9 ppm.

O cenário da utilização de ônibus elétricos apresentando uma redução de aproximadamente 1,3 ppm na concentração de CO no local, demonstra vantagem principalmente em relação à melhoria na qualidade de vida da população, uma vez que o local estudado é utilizado para realização de práticas esportivas e apresenta elevado fluxo de pedestres.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para outros trabalhos, são levantados os seguintes tópicos:

- Comparar os dados simulados numericamente com dados provenientes de estações de monitoramento da qualidade do ar.
- Reproduzir a metodologia utilizada para outros poluentes veiculares.
- Utilizar de diferentes modelos de turbulência para resolução do problema.
- Realizar cálculos mais precisos para parâmetros de entrada, utilizando fatores de emissões que considerem as diferenças de ano de fabricação dos veículos.
- Considerar o relevo do local na simulação.
- Criar e utilizar um inventário dos veículos circulando atualmente na cidade de Ponta Grossa/PR, de acordo com ano de fabricação.
- Considerar fontes móveis (carros em movimento) e a variação do tráfego ao longo do dia, através de uma simulação em regime transiente.
- Reproduzir o caso simulado em um túnel de vento.

5.3 TRABALHOS PUBLICADOS

MACHADO, V. ; ALVES, T. A.; TADANO, Y. S. . Numerical Evaluation of Carbon Monoxide Dispersion in a Generic Urban Canyon. **Mecânica Computacional**, v. XXXVI, p. 2223, 2018.

MACHADO, V. ; ALVES, T. A. ; TADANO, Y. S. . Caracterização da Direção e da Velocidade do Vento na Cidade de Ponta Grossa/PR. **Coletânea Brasileira de Engenharia de Produção**. 1ed.Itajubá: Stellata Editora, 2019, v. 4, p. 295-309.

MACHADO, V. ; ALVES, T. A. ; TADANO, Y. S. . Caracterização da Direção e da Velocidade do Vento na Cidade de Ponta Grossa/PR. **Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção**, 2018, Ponta Grossa, PR. Anais do CONBREPRO 2018, 2018. v. 2018. p. x-x.

MACHADO, V. ; ALVES, T. A. ; TADANO, Y. S. . Numerical Evaluation of Carbon Monoxide Dispersion in a Generic Urban Canyon. **XI Congresso Argentino de Mecânica Computacional**, 2018, Tucumán. Anais do MECOM 2018, #5797, 2018. v. 2018.

MACHADO, V. ; ALVES, T. A. ; TADANO, Y. S. Estudo da dispersão de monóxido de carbono em uma microrregião urbana. **XIV Congresso Ibero-Americano de Engenharia Mecânica**, 2019, Cartagena.

REFERÊNCIAS

- AI, Z. T.; MAK, C. M. CFD simulation of flow in a long street canyon under a perpendicular wind direction: Evaluation of three computational settings. **Building and Environment**, v. 114, p. 293–306, 2017.
- ALLEGRI, J.; DORER, V.; CARMELIET, J. Buoyant flows in street canyons: Validation of CFD simulations with wind tunnel measurements. **Building and Environment**, v. 72, p. 63-74, 2014.
- AMORIM, J. H. **Modelação do escoamento e da dispersão de poluentes atmosféricos em áreas urbanas**. 2003. Tese de Doutorado em Poluição Atmosférica, Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro.
- ANSYS. ANSYS Documentation. **ANSYS Workbench Help**. 2017.
- ARYA, S. PAL. Air pollution meteorology and dispersion. New York: **Oxford University Press**. 1999.
- ASSIMAKOPOULOS, V. D.; APSIMON, H. M.; MOUSSIOPOULOS, N. A numerical study of atmospheric pollutant dispersion in different two-dimensional street canyon configurations. **Atmospheric environment**, v. 37, p. 4037–4049, 2003.
- BARAN, R.; LEGEY, L.F. L. Veículos elétricos: história e perspectivas no Brasil. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 33, p. 207-224, mar. 2011., 2011.
- BAKLANOV, A. Application of CFD Methods for modelling air pollution problems: possibilities and gaps. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 65, p181-189, 2000.
- BOLOGNESI B.; MONTELATO, F. **Estudo de Dispersão de Poluentes Atmosféricos Usando CFD. Trabalho de Conclusão de Curso**, 2011. 6 p. TCC(Graduação) – Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Química, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.
- BOÇON, F. T. **Modelagem matemática do escoamento e da dispersão de poluentes na microescala atmosférica**, 1998. 307 p. Tese (Doutorado) – Curso de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.
- BOURDREL, T.; BIND, M. A.; BÉJOC, Y.; MOREL, O.; ARGACHA, J. F. Cardiovascular effects of air pollution. **Archives of Cardiovascular Diseases**, 2017.
- BROCK, F. V.; HEWSON, E. W. Analog Computing Techniques Applied to Atmospheric Diffusion: Continous Point Source. **Journal of applied Meteorology**, v. 2, p. 129–144, 1963.

BRUSCA, S.; FAMOSO, F.; LANZAFAME, R.; MAURO, S.; MESSINA, M.; STRANO, S. PM 10 Dispersion Modeling by Means of CFD 3D and Eulerian–Lagrangian Models: Analysis and Comparison with Experiments. **Energy Procedia**, v. 101, p. 329-336, 2015.

CANCELLI, D. M.; DIAS, N. L. BRevê: an objective approach to calculate emission rates for the Brazilian vehicle fleet characteristics. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 19, n. SPE, p. 13-20, 2014.

CETESB- Companhia Ambiental do Estado de São Paulo - **Relatório de Qualidade do Ar Ano 2016**, 2017. Disponível em: <<http://cetesb.sp.gov.br/ar/publicacoes-relatorios/>>. Acesso em: 20 de ago. 2017.

CETESB- Companhia Ambiental do Estado de São Paulo - **Qualidade do Ar no estado de São Paulo 2017**, 2018. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/ar/wp-content/uploads/sites/28/2018/05/relatorio-qualidade-ar-2017.pdf>>. Acesso em: 20 de jan. 2019.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. **Resolução nº 03, de 28 de junho de 1990**. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar, previstos no PRONAR. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/>>. Acesso em: 04 mai. 2017.

_____. **Resolução nº 18, de 06 de maio de 1986**. Dispõe sobre a criação do Programa de Controle de Poluição do Ar por veículos Automotores – PROCONVE. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/>>. Acesso em: 04 mai. 2017.

_____. **Resolução nº 491, de 19 de novembro de 2018**. Dispõe sobre Padrões de qualidade do ar. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=740>>. Acesso em: 02 fev. 2019.

DAVIS, D. L.; BELL, M. L.; FLETCHER, T. A look back at the London smog of 1952 and the half-century since. **Environmental health perspectives**, v. 110, n. 12, p. A734, 2002.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). Ministério dos Transportes (Org.). **Manual de estudos de tráfego**. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 2006.

FRANKE, J.; HELLSTEN, A.; SCHLÜNZEN, H.; CARISSIMO, B. Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment. **Meteorological Inst.**, 2007.

FIATES, J. **Desenvolvimento de uma metodologia para simulação de dispersão de gás inflamável por meio de CFD utilizando OPENFOAM**. 2015. 148 p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2015.

FONTANELLA, C. R. de F. **Análise numérica do escoamento turbulento em área urbana empregando simulação de grande escala**. 2014. 128 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do sul, Porto Alegre, 2014.

GALLAGHER, J.; LAGO, C. How parked cars affect pollutant dispersion at street level in an urban street canyon? A CFD modelling exercise assessing geometrical detailing and pollutant decay rates. **Science of the Total Environment**, v. 651, p. 2410-2418, 2019.

GARCIA, J.; CERDEIRA, R.; TAVARES, N. Influence of virtual changes in building configurations of a real street canyon on the dispersion of PM10. **Urban Climate**, v. 5, p. 68–81, 2013.

GEORGII, H. W. The Effects of Air Pollution on Urban Canyons. **Bulletin of the World Health Organization**, , n. 5, p. 624–635, 1969.

GRAUER, A. **Inventário estadual de emissões atmosféricas de poluentes (MP, CO, NOx, SOx) e proposta para revisão e ampliação da rede de monitoramento da qualidade do ar do estado do Paraná**. Curitiba, 2013. 160 p. Disponível em: <http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/Monitoramento/INVENTARIO/INVENTARIO_ESTADUAL_DE_EMITSOES_ATM_versaofinal.pdf>. Acesso em: 15 set. 2017.

GOOGLE. **Google Maps**.2017. Ponta Grossa/PR, Brasil. Disponível em:<<https://www.google.com.br/maps>>. Acesso em: 10 out. 2017.

GÓMEZ-PÉREZ, C. A. ESPINOSA, J. Evaluation of pollutants dispersion in an urban traffic scenario in Medellín. MOVICI-MOYCOT 2018: **Joint Conference for Urban Mobility in the Smart City**. IET, 2018. p. 1-5.

GONZÁLEZ, C. M.; GÓMES, C.D.; ROJAS, N.Y.; ACEVEDO, H.; ARISTIZÁBAL, B. H. Relative impact of on-road vehicular and point-source industrial emissions of air pollutants in a medium-sized Andean city. **Atmospheric Environment**, v. 152, p. 279-289, 2017.

HOLMES, N. S.; MORAWSKA, L. A review of dispersion modelling and its application to the dispersion of particles: an overview of different dispersion models available. **Atmospheric environment**, v. 40, n. 30, p. 5902-5928, 2006.

IBGE (Brasil). **Infográficos: Frota Nacional de Veículos**. 2016. Departamento Nacional de Trânsito. Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/painel/frota.php?codmun=411990>>. Acesso em: 19 jun. 2017.

INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE (Brasil). **1º Diagnóstico de Rede de Monitoramento da qualidade do ar no Brasil**. 2014. Disponível em: <http://www.forumclima.pr.gov.br/arquivos/File/Rosana/Diagnostico_Qualidade_do_Ar_Versao_Final_Std.pdf>. Acesso em: 23 jul. 2017.

_____. **Padrões de qualidade do ar: Experiência comparada Brasil, EUA e União Europeia.** 2012. Disponível em: <<https://iema-site-staging.s3.amazonaws.com/padroes-final01.pdf>>. Acesso em: 10 jan. 2019.

KARIM, A. A.; NOLAN, P. F. Modelling reacting localized air pollution using Computational Fluid Dynamics (CFD). **Atmospheric environment**, v. 45, n. 4, p. 889-895, 2011.

KIM, Y.; HUANG, L.; GONG, S.; JIA, C.Q. A new approach to quantifying vehicle induced turbulence for complex traffic scenarios. **Chinese Journal of Chemical Engineering**, v. 24, n. 1, p. 71-78, 2016

KOSSOSKI, D. "IAP reconhece falhas em controle de poluição do ar". **Diário dos Campos.** Ponta Grossa, p. 1-1. 04 jul. 2018. Disponível em: <<https://www.diariodoscamos.com.br/noticia/iap-reconhece-falhas-em-controle-de-poluicao-do-ar>>. Acesso em: 08 out. 2018

LAUNDER, B. E.; SPALDING, D. B. The numerical computation of turbulent flows. **Computer methods in applied mechanics and engineering**, v. 3, n. 2, p. 269-289, 1974.

LATEB, M.; MNOREY, R. N.; YATAGHENE, M.; FELLOUAH H.; SALEH, F.; BOUFADEL, M. C. On the use of numerical modelling for near-field pollutant dispersion in urban environments– A review. **Environmental Pollution**, v. 208, p. 271-283, 2016.

LENA, F.; DESIATO, F. Intercomparison of nocturnal mixing height estimate methods for urban air pollution modelling. **Atmospheric Environment**, v. 33, n. 15, p. 2385-2393, 1999.

LIU, C.; YIN, P.; CHEN, R.; MENG X; WANG L.; et al.. Ambient carbon monoxide and cardiovascular mortality: a nationwide time-series analysis in 272 cities in China. **The Lancet Planetary Health**, v. 2, n. 1, p. e12-e18, 2018.

LANDRIGAN, P. J.; et al. The Lancet Commission on pollution and health. **The Lancet**, v. 391, n. 10119, p. 462-512, 2018.

MACHADO, V.; ALVES, T. A.; TADANO, Y. S. Caracterização da direção e da velocidade do vento na cidade de Ponta Grossa/Pr. **Coletânea Brasileira Engenharia de Produção**, .v. 3, cap. 19, p. 295 a 309, 2019.

MADALOZZO, D. M. S. **Simulação Numérica da Dispersão de Poluentes em Zonas Urbanas Considerando Efeitos Térmicos.** 2012. 183p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

_____. BRAUN, A. L.; AWRUCH, A. M.; MORSCH, I. B. Numerical simulation of pollutant dispersion in street canyons: Geometric and thermal effects. **Applied Mathematical Modelling**, v. 38, n. 24, p. 5883–5909, 2014.

MALISKA, C.R. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional – Fundamentos e Coordenadas Generalizadas**. Laboratório de Simulação Numérica em Mecânica dos Fluidos e Transferência de Calor – SINMEC – Departamento de Engenharia Mecânica, UFSC. LTC, 1995.

MARQUES FILHO, E. P. **Investigação da Camada Limite Planetária Convectiva com Modelo LES Aplicado à Dispersão de Poluentes por**. 2004. 128 p. Tese (Doutorado) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

MARTÍNEZ, A. P.; ROMIEU, I. **Introducion al Monitoreo Atmosférico**. 1997.

MELLO, K. B. **Simulação da Dispersão de Poluentes na Camada Limite Planetária através da solução da equação de Langevin pelo método de decomposição**. 2010. 80 p. Tese (Doutorado) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (Brasil). **Proconve: Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores**. 2010. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/163/_arquivos/proconve_163.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2017.

_____. **Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários: Relatório Final. 2014**. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/wwwanp/images/Emissoes-Atmosfericas-1Inventariodeemissoes.pdf>>. Acesso em: 10 set. 2017.

MORADPOUR, M.; AFSHIN, H.; FARHANIEH, B. A numerical investigation of reactive air pollutant dispersion in urban street canyons with tree planting. **Atmospheric Pollution Research**, p. 1–14, 2016.

MOREIRA, D. M.; VILHENA, M. T.; BUSKE, D.; TIRABASSI, T. The state-of-art of the GILTT method to simulate pollutant dispersion in the atmosphere. **Atmospheric Research**, v. 92, n. 1, p. 1-17, 2009.

NG, W.; CHAU, C. A modeling investigation of the impact of street and building configurations on personal air pollutant exposure in isolated deep urban canyons. **Science of the Total Environment**, v. 468, p. 429-448, 2014.

OKE, T. R. **Boundary Layer Climates**. 2º ed. Routledge, Taylor & Francis e-Library, 1987.

_____. **Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites**. Vancouver, Canadá, 2006.

PARANÁ. Secretaria da Fazenda - Estado do Paraná. **Governador anuncia isenção de impostos para carros elétricos**. 2019. Disponível em: <<http://www.fazenda.pr.gov.br/modules/noticias/article.php?storyid=943&tit=Governador-anuncia-isencao-de-impostos-para-carros-eletricos>>. Acesso em: 01 abr. 2019.

PEREIRA, R. C.; BRANCHI, B. A.; FERREIRA, D. H. L. Avaliação de custos completos: combustíveis para o transporte coletivo urbano de Campinas/SP. **Revista Tecnologia e Sociedade**, v. 15, n. 36, 2019.

PATANKAR, S.V. **Numerical Heat Transfer and Fluid Flow**. New York: Taylor and Francis Group, 1980.

PFLUCK, C. E. de F. **Simulação Fluidodinâmica da Dispersão de Poluentes na Atmosfera**. 2010. 142 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

PREFEITURA MUNICIPAL DE PONTA GROSSA. **Geoprocessamento Corporativo**. 2018. Disponível em: <<http://geoweb.pontagrossa.pr.gov.br/>>. Acesso em: 05 jul. 2018.

RAFIEI, M.; STURM, P. J. Modeling of carbon monoxide dispersion around the urban tunnel portals. **Global Journal of Environmental Science and Management**, v. 4, n. 3, p. 359-372, 2018.

RIVERA, J. A. **Simulação da dispersão de poluentes na atmosféricos numa microrregião do Município do Rio de Janeiro em escala real**. 2016. 135 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

SAMOLI, E.; TOULOUMI, G.; SCHWARTZ, J.; et al. Short-term effects of carbon monoxide on mortality: an analysis within the APHEA project. **Environmental Health Perspect**, v. 115, n. 11, p. 1578-1583, 2007.

SANTIAGO, J. L.; BORGE, R.; MARTIN, F. PAZ, D.; MARTILLI, A.; LUMRERAS, J.; SANCHEZ, B. Evaluation of a CFD-based approach to estimate pollutant distribution within a real urban canopy by means of passive samplers. **Science of The Total Environment**, v. 576, p. 46-58, 2017.

SEINDELD, J. H., PANDIS, S. N. **Atmospheric Chemistry and Physics – From Air Pollution to Climate Change**. New York: John Wiley & Sons, 2006.

SLOWIK, P. et al. **Avaliação Internacional de Políticas Públicas para Eletromobilidade em Frotas Urbanas**. 2018. Elaborado por International Council on Clean Transportation (ICCT) sob demanda da GIZ (Agência Alemã de Cooperação Internacional) e do Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços (MDIC). Disponível em: <http://www.promobe.com.br/wp-content/uploads/2018/12/ICCT_Brazil-Electromobility-PT-20122018.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2019

STULL, R. B. **An introduction to boundary layer meteorology**. Springer Science & Business Media, 2012.

TAN, W., LI, C., WANG, K., ZHU, G., et al. Dispersion of carbon dioxide plume in street canyons. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 116, p. 235-242, 2018.

TADANO, Y. de S. **Simulação da dispersão dos poluentes atmosféricos para aplicação em análise de impacto**. 2012. 197 p. Tese (Doutorado) – Comissão de Pós Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

TOMINAGA, Y.; STATHOPOULOS, T. CFD simulation of near-field pollutant dispersion in the urban environment: A review of current modeling techniques. **Atmospheric Environment**, v. 79, p. 716-730, 2013.

_____. Ten questions concerning modeling of near-field pollutant dispersion in the built environment. **Building and Environment**, v. 105, p. 390-402, 2016.

VARDOULAKIS, S., FISHER, B. E. A., PERICLEOUS, K., GONZALES-FLESCA, N. Modelling air quality in street canyons : A review. **Atmospheric Environment**. v. 37, p. 155–182, 2003.

VAZ, L. F. H.; BARROS, D. C.; CASTRO, B. H. R. de. Veículos híbridos e elétricos: sugestões de políticas públicas para o segmento. **BNDES Setorial**: Automotivo, Brasília, v. 41, p.295-344, 2015.

VORMITTAG, E. M. P. A. A. V., COSTA R. R., BRAGA, A. A., MIRANDA M., NASCIMENTO N. C. N., SALDIVA, P. H. N. Monitoramento da qualidade do ar no Brasil. **Ministério do Meio Ambiente**. São Paulo, 2014.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **Air Quality Guideline for Europe**. 2000. Disponível em: <http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0005/74732/E71922.pdf>. Acesso em: 25 fev. 2019.

_____. **Ambient air pollution: a global assessment of exposure and burden of disease**. 2016. Disponível em: <<https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/250141/9789241511353-eng.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 15 fev. 2019.

ZHONG, J.; CAI, X. M.; BLOSS, W. J. Coupling dynamics and chemistry in the air pollution modelling of street canyons: A review. **Environmental Pollution**, v. 214, p. 690–704, 2016

APÊNDICE A - Formulário para contagem de veículos

O processo de contagem da quantidade de veículos, que circula em uma Rua ou Avenida em um período de tempo, usualmente utiliza de contadores e uma prancheta, na qual está uma ficha para transcrição dos dados.

A ficha apresentada na Figura A1 é uma adaptação da apresentada pelo DNIT (2006), e foi utilizada para a anotação do total de carros que trafega em cada intervalo de tempo.

Figura A1 - Formulário adaptado para a contagem de veículos

Nome da Rua					
Data		Horário de início (h)		Horário final (h)	
Intervalos de tempo (h)					
Automóveis					
Caminhões					
Ônibus					
Motocicletas					

Fonte: Adaptada de DNIT (2016).

A contagem de veículos seguiu intervalos de 5 minutos, em que o registro por sentido de fluxo foi utilizado para a extrapolação para valores horários.

As contagens de diferentes tipos de veículos foram realizadas com o aplicativo *Multi Counter*, que permite a contagem múltipla de diferentes grupos conforme mostrado na Figura A2.

Figura A2 - Tela do aplicativo de contagem



APÊNDICE B - UDF característica do perfil do vento em Ponta Grossa/PR

Código da UDF inserido no software ANSYS/Fluent™ 19.1 para obtenção do perfil do vento.

```
/**UDF perfil do vento em Ponta Grossa/PR**/  
#include "udf.h"  
DEFINE_PROFILE(inlet, thread, index)  
{ real x[ND_ND];  
  real y;  
  face_t f;  
  begin_f_loop(f, thread)  
  {  
    F_CENTROID(x, f, thread);  
    y = x[1];  
    F_PROFILE(f, thread, index) = 2.99 * pow ((y/10),0.4);  
  }  
  end_f_loop(f, thread)  
}
```