

NUMERICAL STUDY OF CARBON MONOXIDE DISPERSION IN AN URBAN MICRO REGION

Vivian Machado

Thiago Antonini Alves

Yara de Souza Tadano

vivian_machadoo@yahoo.com.br

antonini@utfpr.edu.br

yaratadano@utfpr.edu.br

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM)

Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC)

Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

Av. Monteiro Lobato, s/nº, km 4, CEP 84.016-210, Ponta Grossa/PR, Brasil.

Abstract. This paper presents the numerical study of the dispersion of carbon monoxide (CO) in an urban micro region, located in the city of Ponta Grossa/PR, Brazil. Three main roads are considered polluting sources: Vicente Machado Avenue, Ermelino de Leão Street, and Benjamin Constant Street. The mass flow of CO emission in the simulated routes was calculated based on emission factors and the counting of the vehicles (cars, buses, trucks, and motorcycles) in the place. The simulations were performed using ANSYS/Fluent™ 19.1 software. With the results it was possible to obtain visualizations of the fluid dynamics conditions in the place, behavior of the pollutants and possible regions of accumulation due to the recirculation. The pollutant concentration results presented values of 14.4 ppm, at the monitoring point considering a height of 1.5 m in relation to the soil level. The values obtained in the simulations presented concentrations higher than the 9 ppm limit established by the guidelines of the World Health Organization (WHO).

Keywords: Atmospheric pollutants, Carbon monoxide, Numerical simulation, Computational fluid dynamics

1 Introdução

Atuando como grandes contribuintes de problemas de saúde na população urbana, os poluentes emitidos por veículos automotores estão presentes em níveis preocupantes ao nosso redor (Organização Mundial de Saúde [1]). Produzido pela queima incompleta dos combustíveis fósseis, o monóxido de carbono (CO) quando inalado pelo organismo forma a carboxiemoglobina, que por sua vez reduz o transporte de oxigênio para as células (Bourdrel *et al.* [2]). Estudos apontam a grave associação da exposição ao CO presente no ambiente, mesmo que em concentrações reduzidas, e a mortalidade por doenças cardiovasculares (Samoli *et al.* [3] e Liu *et al.* [4]).

No Brasil, os padrões de qualidade do ar são estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 491/2018, a qual segue os mesmos parâmetros da Organização Mundial de Saúde, apresentando o padrão para níveis aceitáveis de CO de 9 ppm (Conselho Nacional de Meio Ambiente [5] e Organização Mundial de Saúde [6]). Para verificar se a qualidade do ar atende aos padrões aceitáveis e oferece riscos reduzidos à saúde humana, faz-se necessário o seu acompanhamento por meio de estações de monitoramento, que no Brasil ainda são em quantidades restritas (Ministério do Meio Ambiente [7]).

As simulações numéricas utilizando Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) se apresentam como uma alternativa capaz de avaliar a dispersão de poluentes e possibilitar o dinamismo da criação de diferentes cenários que possam melhorar a qualidade de vida da população (Pfluck [8]).

Neste contexto, no presente trabalho foi apresentado um estudo numérico da dispersão do monóxido de carbono (CO), em uma microrregião urbana, localizada na cidade de Ponta Grossa, estado do Paraná, nona cidade mais populosa da Região Sul do Brasil (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística [9]). Esta microrregião compreendeu as ruas e avenidas que ladeiam o Complexo Ambiental Governador Manoel Ribas e estão localizadas nas proximidades de um *Shopping Center* e de um Terminal de Ônibus, havendo assim alta circulação de pessoas e veículos (carros, ônibus, caminhões e motos). As simulações foram executadas utilizando o *software ANSYS/Fluent*TM v. 19.1 e com os resultados foi possível obter visualizações das condições fluidodinâmicas no local, comportamento do poluente e possíveis regiões de acúmulo devido à recirculações.

2 Metodologia

As simulações numéricas da dispersão do poluente atmosférico foram realizadas utilizando o Método dos Volumes de Controle ou Método dos Volumes Finitos (MVF) (Patankar [10]), aplicado através do *software* comercial *ANSYS/Fluent*TM 19.1, para resolução das equações da conservação da massa (Eq. (1)), do *momentum* (Eq. (2)), da energia (Eq. (3)) e do transporte das espécies químicas (Eq. (4)) (Seinfeld e Pandis [11]), considerando o regime permanente.

2.1 Equação da conservação da massa

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

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

2.2 Equação do *momentum*

$$\rho \left(\frac{\partial u_j u_i}{\partial x_j} \right) = \rho g_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

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 σ_{ij} é o tensor de tensões viscosas.

2.3 Equação da conservação da energia

$$\frac{\partial(\rho u_i h)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial h}{\partial x_i} \right] + u_i \frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (3)$$

sendo que, h é a entalpia, μ é a viscosidade dinâmica do fluido, μ_t é a viscosidade turbulenta do fluido, Pr é o número de *Prandtl* e Pr_t é o número de *Prandtl* turbulento.

2.4 Equação do transporte das espécies químicas

$$\frac{\partial(\rho u_i m_l)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\frac{\mu}{Sc} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \frac{\partial m_l}{\partial x_i} \right] + S \quad (4)$$

sendo que, m_l é a fração mássica local de cada espécie l que se dispersa, Sc é o número de *Schmidt*, Sc_t é o número de *Schmidt* turbulento e S é o termo fonte.

O Método de Turbulência utilizado foi o RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*) concomitantemente com o Modelo de Turbulência ($k - \varepsilon$) Padrão (Lauder e Spalding [12]). Para resolução do acoplamento da pressão e da velocidade foi utilizado o Método SIMPLE (*Semi Implicit Method for Pressure-Linker Equations*) (Patankar [10]).

2.5 Características do domínio e condições de contorno

O domínio simulado, que representa uma microrregião localizada na cidade de Ponta Grossa/PR, Brasil, foi reproduzido conforme apresentado na Fig. 1.

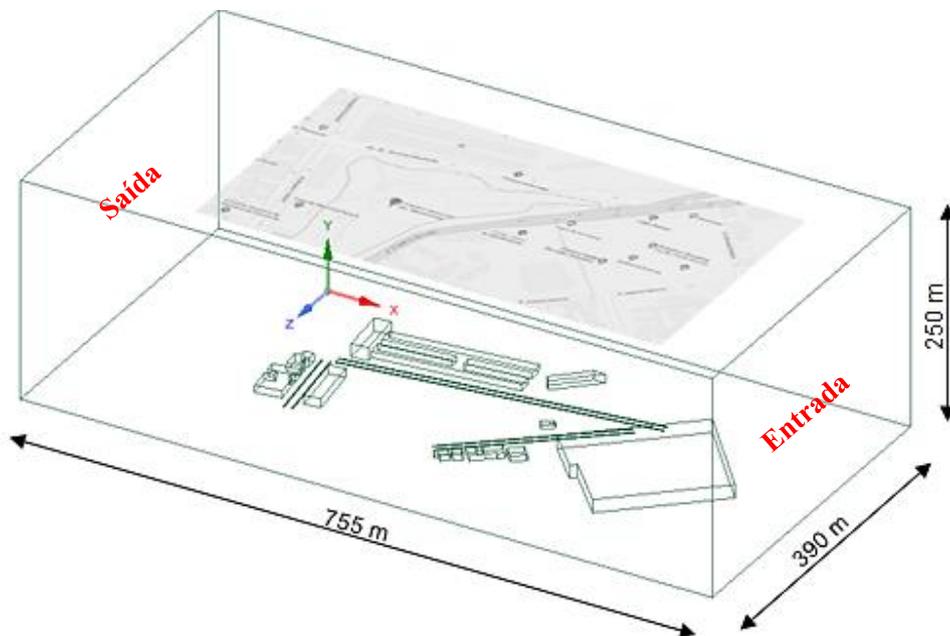


Figura 1. Dimensões do domínio computacional.

Foram avaliadas as emissões originárias de veículos automotores (carros, ônibus, caminhões e motos) em três vias principais: Avenida Vicente Machado (V1 e V2), Rua Ermelino de Leão (E1 e E2) e Rua Benjamin Constant (B1 e B2), as quais são representadas na Fig. 2, que contempla a demonstração das distâncias das geometrias da microrregião em relação às paredes do domínio, em função de H (altura do maior prédio do domínio: 15 metros) (Franke *et al.* [13]). A localização do *Shopping Center* (estrela vermelha), Terminal de ônibus (estrela amarela) e Complexo Ambiental Governador Manoel Ribas (estrela azul), também está representada na Fig. 2.

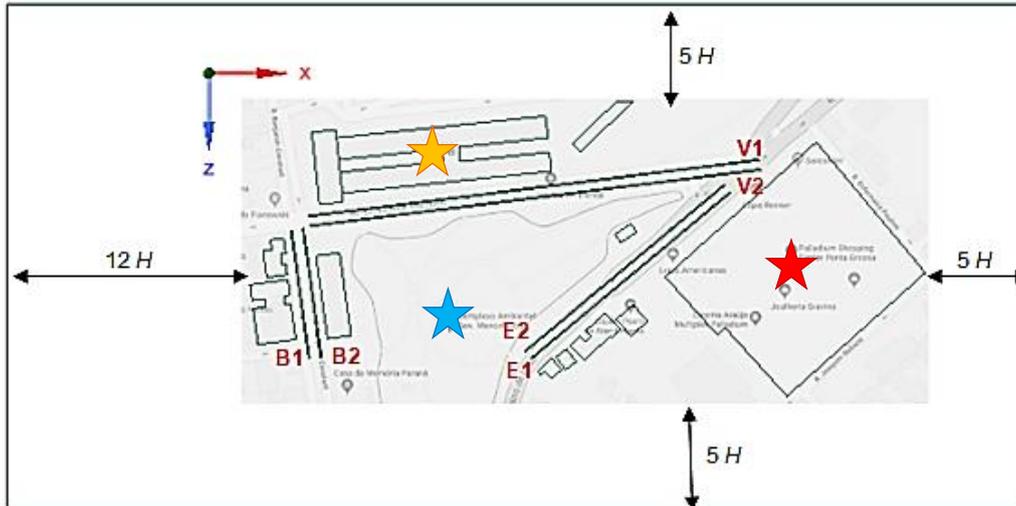


Figura 2. Vista superior do volume de controle, com distâncias em função de H e identificação das fontes de emissões.

A altura do domínio foi considerada como 250 metros, considerando a simulação de condições de atmosfera neutra (Lena e Desiato [14]). O perfil de velocidade do vento de lei de potência foi inserido na entrada do domínio com o uso de uma função definida pelo usuário (*UDF – User Defined Function*) e de acordo com a Eq. (5) (Machado *et al.* [15]).

$$u_x(z) = 2.99 \left(\frac{z}{10} \right)^{0.4} \quad (5)$$

As fontes de emissões foram inseridas no domínio a partir de linhas com 0,4 metros de altura, 1,0 metro de largura e comprimentos correspondentes ao tamanho das vias simuladas. Os valores de entrada do fluxo mássico (E_i), utilizados nas fontes de emissões foram calculados baseados na contagem de veículos no local e considerando os fatores de emissão da literatura (Cancelli e Dias [16] e Grauer [17]).

$$E_i = F_{rj} F_{ei} L \quad (6)$$

sendo que, F_{rj} é o número de veículos totais de uma determinada categoria, L é o tamanho da via e F_{ei} é o fator de emissão referente ao poluente i , considerando a categoria de veículo j .

Para simplificação, todos os carros e motos foram considerados como movidos à gasolina e caminhões e ônibus utilizando diesel. Um resumo dos parâmetros utilizados nos cálculos das fontes de emissão é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Dados para cálculo e emissões de CO nas vias simuladas.

		Veículos/ hora	Tamanho da via [m]	Emissões de CO [kg/s]
Av. Vicente Machado	V1	752	350	7.63×10^{-5}
	V2	776	350	9.78×10^{-5}
Rua Ermelino de Leão	E1	1412	100	7.70×10^{-5}
	E2	988	100	3.91×10^{-5}
Rua Benjamin Constant	B1	528	200	2.07×10^{-5}
	B2	452	200	1.83×10^{-5}

A malha computacional utilizada nas simulações numéricas é de característica mista, com 6.548.500 elementos, em sua maioria tetraédricos e elementos prismáticos nas regiões próximas ao solo. Um maior refino foi considerando em regiões de maior gradiente dos parâmetros simulados, como pode ser observado na Fig. 3.

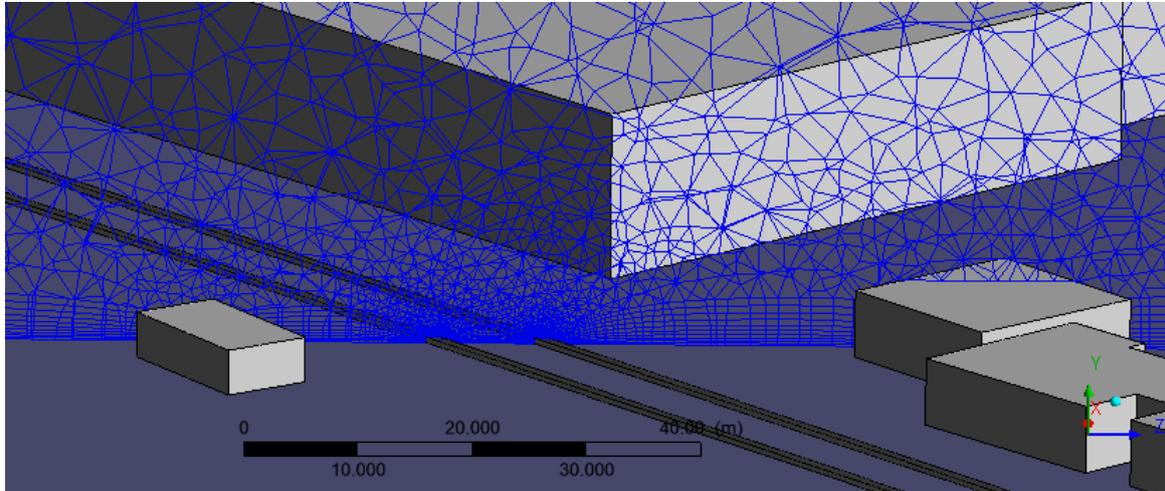


Figura 3. Detalhamento da malha computacional utilizada, com elementos tetraédricos e prismáticos.

As condições de contorno utilizadas na simulação são apresentadas resumidamente na Tabela 2.

Tabela 2. Condições de contorno utilizadas na 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

3 Resultados

Com influência direta no comportamento da dispersão de poluentes atmosféricos, o perfil de velocidade inserido na entrada do domínio, com o auxílio da UDF (*User Defined Function*), é representado na Fig. 4, demonstrando a variação de velocidade do vento em diferentes alturas do domínio computacional em questão.

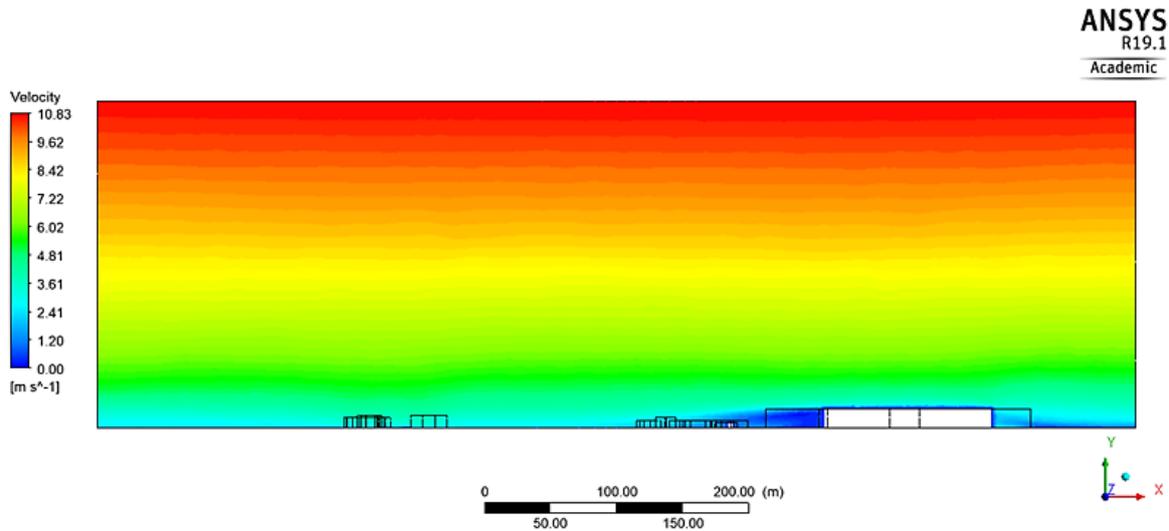


Figura 4. Campo de magnitude de velocidade no plano $(x,y,0)$ do domínio computacional.

Na Figura 5 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 (Franke *et al.* [13]). Os círculos vermelho e amarelo demonstram as regiões onde há maior recirculação, que por sua vez, são locais de possível acúmulo de poluentes.

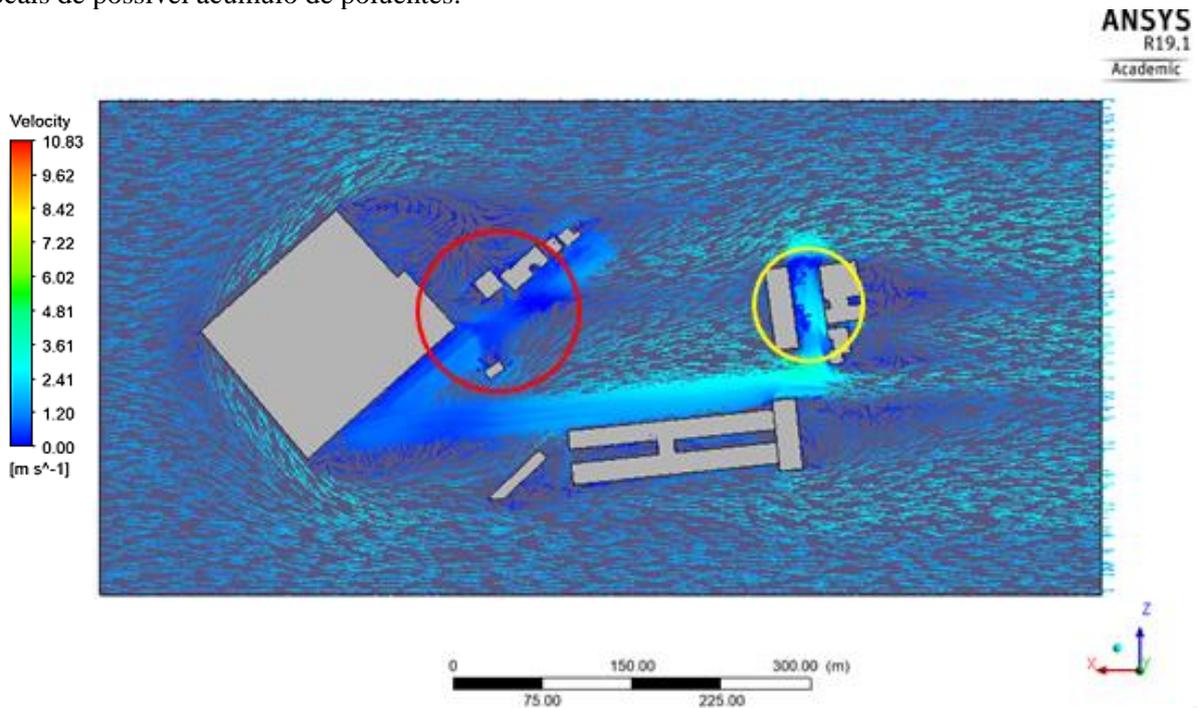


Figura 5. Vista superior dos vetores de velocidade no plano $(x,1.5,z)$.

O comportamento do poluente atmosférico na Rua Ermelino de Leão é representado na Fig. 6, onde a recirculação ocorre próximo ao acesso para o estacionamento do *Shopping*, demonstrando assim, uma possível dispersão do poluente para o interior do local e contribuição no aumento do nível de CO no seu interior.

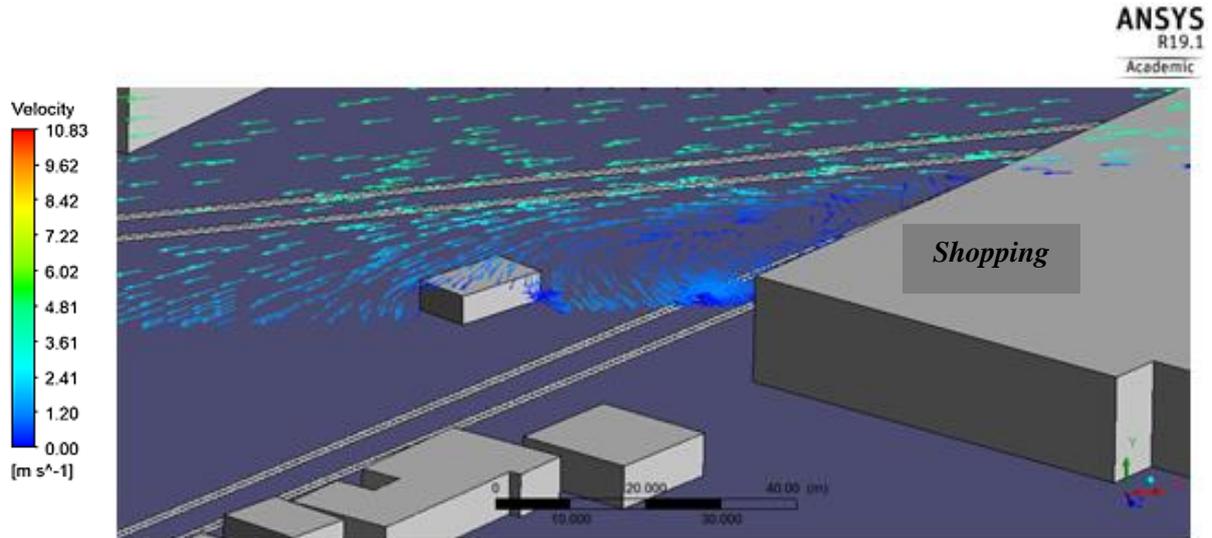


Figura 6. Recirculação na área próxima à entrada do shopping (Rua Ermelino de Leão).

A Rua Benjamin Constant, representada na Fig. 7, é ladeada por prédios em suas duas vias públicas, o que favorece a existência de recirculações, gerando uma maior dificuldade na dispersão de poluentes.

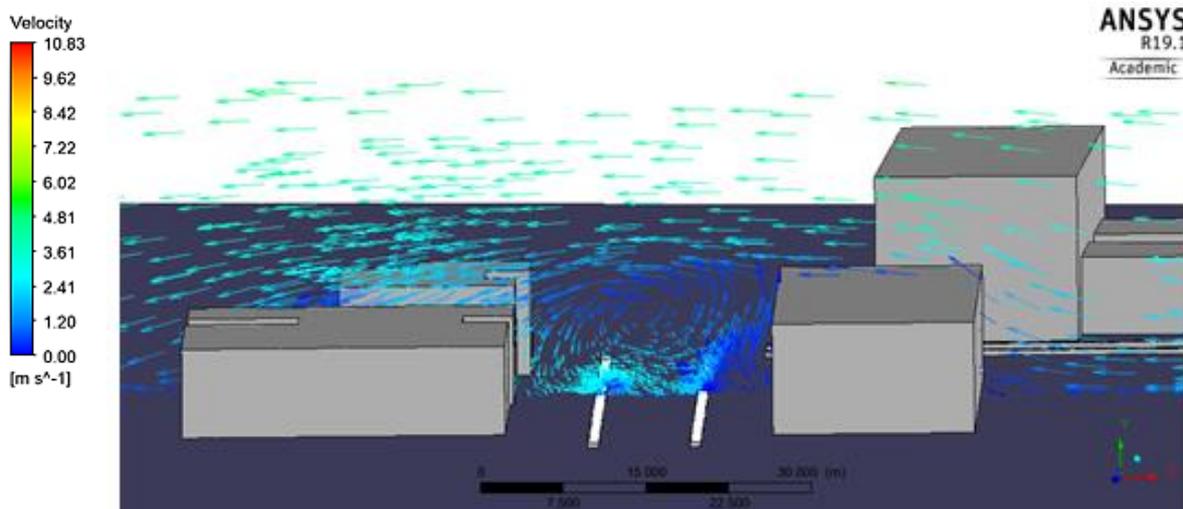


Figura 7. Representação da recirculação na Rua Benjamin Constant.

Na Figura 8 é possível observar os pontos de maior concentração do poluente atmosférico CO (em vermelho) e a dispersão em diferentes pontos do domínio. O plano representado compreende as coordenadas x e y com altura de 1,5 metros em relação ao nível do solo.

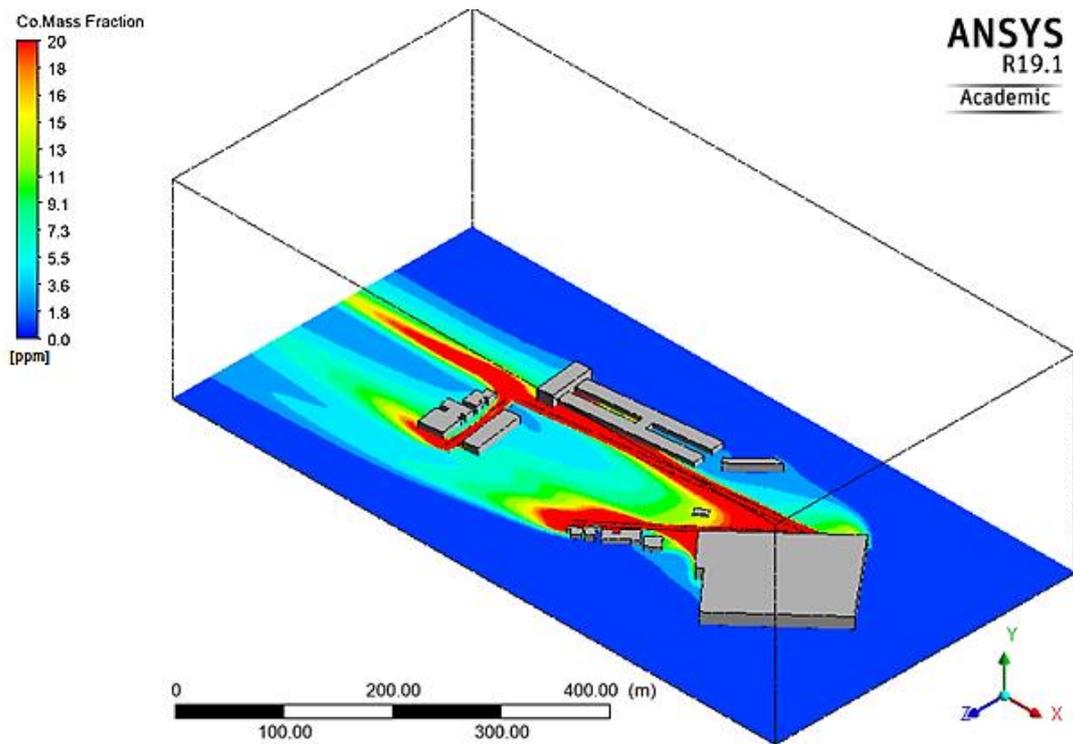


Figura 8. Distribuição de concentração de CO no plano $(x, 1.5, z)$.

Na Figura 9 um plano semelhante ao apresentado na Fig. 6 (região de recirculação na área próxima à entrada do *Shopping Center*) é demonstrado. Esta região é onde se encontra o ponto de monitoramento, em uma altura de 1,5 metros em relação ao solo. A concentração de 14,4 ppm de CO foi encontrada, se apresentando acima dos padrões estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 491/2018, que atualmente é de 9 ppm.

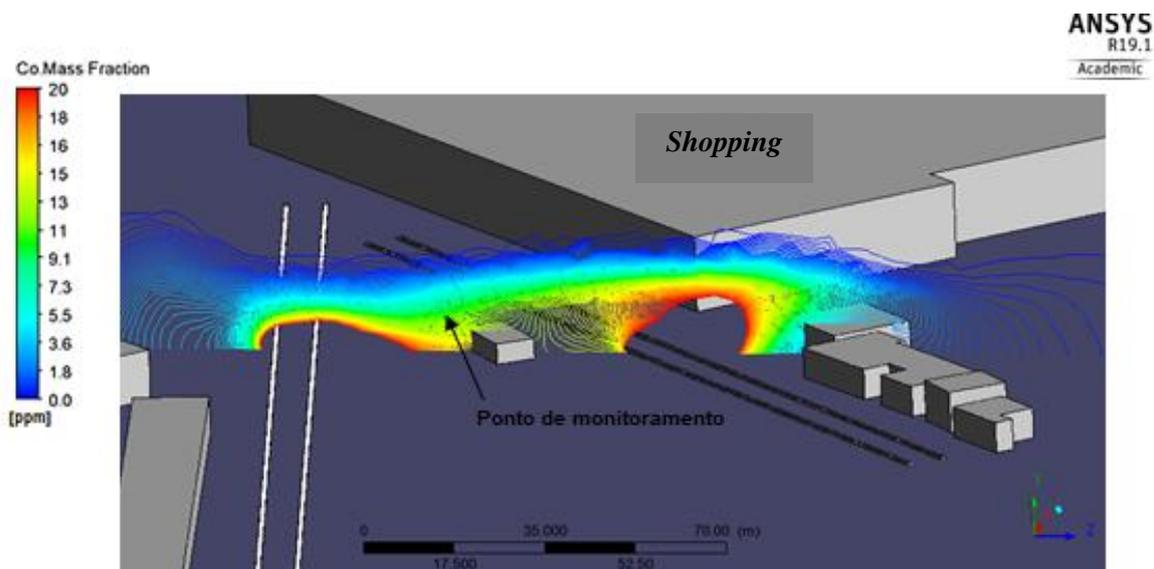


Figura 9. Distribuição de concentração de CO no plano yz , na região próxima à estação de monitoramento.

A Figura 10 apresenta o perfil de concentração de CO em um plano perpendicular à Avenida Vicente Machado e em paralelo à Rua Benjamin Constant, com localização próxima a entrada do terminal de ônibus. É possível observar que a dissipação ocorre no sentido negativo de z , em que o poluente é levado para a região de entrada do terminal, onde se concentra um elevado número de pessoas todos os dias.

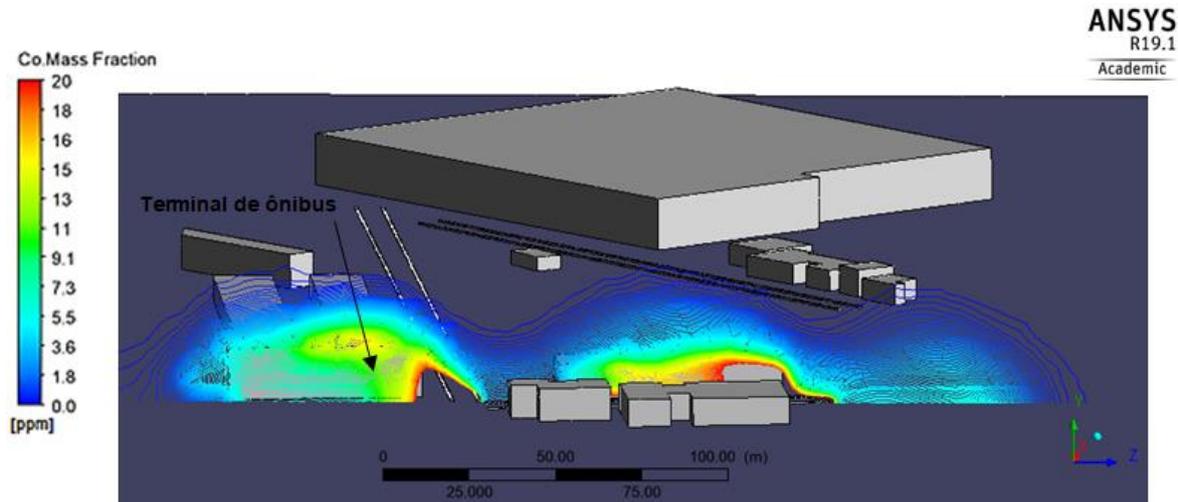


Figura 10. Distribuição de concentração de CO no plano yz , na região próxima à entrada do terminal de ônibus.

A Figura 11 apresenta o perfil de concentração na Rua Benjamin Constant. Em comparação com a Fig. 7 (região de recirculação), é possível concluir que a direção de dissipação do poluente atmosférico no sentido positivo do eixo x é justificada pelas recirculações existentes no local.

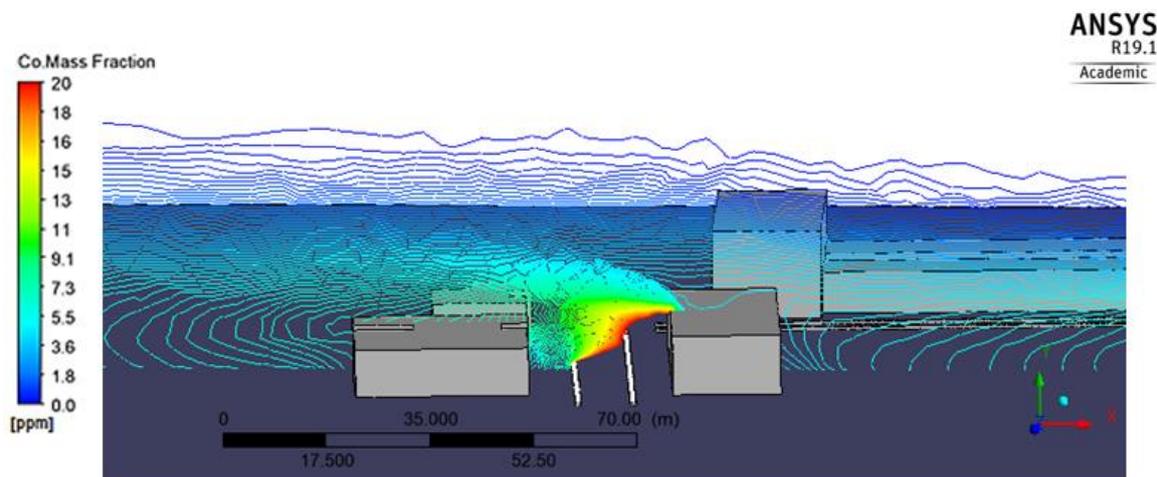


Figura 11. Distribuição de concentração de CO no plano xy , na Rua Benjamin Constant.

4 Conclusões

O uso da ferramenta CFD *ANSYS/Fluent™* para análise da dispersão de poluente atmosférico, atende às expectativas para obtenção de resultados e apresenta, dentre suas vantagens, a versatilidade de alterações de cenários, considerando diferentes casos. 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 melhor entendimento do comportamento dos poluentes proporciona visualizações claras e valores de concentrações em diferentes locais, proporcionando assim ideias para a criação de futuras alternativas de melhoria da qualidade de vida da população, em relação à melhoria da qualidade do ar.

Agradecimentos

Os autores externam agradecimentos à Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação (DIRPPG), ao Programa de Pós-Graduação (Mestrado) em Engenharia Mecânica (PPGEM) e ao Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR/Câmpus Ponta Grossa.

Referências

- [1] World Health Organization (WHO). 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>>.
- [2] T. Bourdrel, M. A. Bind, Y. Béjoc, O. Morel and J. F. Argacha. Cardiovascular effects of air pollution. *Archives of Cardiovascular Diseases*, vol. 110, n. 11, pp. 634–642, 2017.
- [3] E. Samoli, G. Touloumi, J. Schwartz, H. R. Anderson, C. Schindler, B. Forsberg, M. A. Vigotti, J. Vonk, M. Kosnik, J. Skorkovsky and K. Katsouyanni. Short-term effects of carbon monoxide on mortality: an analysis within the APHEA project. *Environmental Health Perspect*, vol. 115, n. 11, pp. 1578–1583, 2007.
- [4] C. Liu, P. Yin, R. Chen, X. Meng, L. Wang, Y. Niu, Z. Lin, Y. Liu, J. Liu, J. Qi, J. You, H. Kan, M. Zhou. Ambient carbon monoxide and cardiovascular mortality: a nationwide time-series analysis in 272 cities in China. *The Lancet Planetary Health*, vol. 2, n. 1, pp. e12–e18, 2018.
- [5] Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). 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>>.
- [6] 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>.
- [7] Ministério do Meio Ambiente (MMA). 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>>.
- [8] C. E. de F. Pfluck. Simulação Fluidodinâmica da Dispersão de Poluentes na Atmosfera. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.
- [9] Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Panorama. 2016. Departamento Nacional de Trânsito. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pr/ponta-grossa/panorama>>
- [10] S. V. Patankar. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. New York: Taylor and Francis Group, 1980.
- [11] J. H. Seinfeld and S. N. Pandis. *Atmospheric Chemistry and Physics – From Air Pollution to Climate Change*. New York: John Wiley & Sons, 2006.
- [12] B. E. Launder and D. B. Spalding. The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 3, n. 2, pp. 269–289, 1974.
- [13] J. Franke, A. Hellsten, H. Schlünzen and B. Carissimo. Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment. *Meteorological Inst.*, 2007.
- [14] F. Lena and F. Desiato. Intercomparison of nocturnal mixing height estimate methods for urban air pollution modelling. *Atmospheric Environment*, vol. 33, n. 15, pp. 2385–2393, 1999.
- [15] V. Machado, T. Antonini Alves and Y. S. Tadano. Caracterização da direção e da velocidade do vento na cidade de Ponta Grossa/PR. *Coletânea Brasileira Engenharia de Produção*. vol 3, cap. 19, pp. 295–309, 2019.
- [16] D. M. Cancelli and N. L. Dias. BRevê: an objective approach to calculate emission rates for the Brazilian vehicle fleet characteristics. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, vol. 19, n. SPE, pp. 13–20, 2014.
- [17] A. Grauer. 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.