



Simulação Numérica da Distribuição de Concentração de Monóxido de Carbono no Túnel Santa Bárbara

Letícia Protector

Projeto de Final de Curso

Orientadores

Prof. Ricardo de Andrade Medronho, PhD

João Victor Barbosa Alves, Eng.


Fevereiro de 2011

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA DISTRIBUIÇÃO DE CONCENTRAÇÃO DE MONÓXIDO DE CARBONO NO TÚNEL SANTA BÁRBARA

Letícia Protector

Projeto de Final de Curso submetido ao Corpo Docente do Programa Escola de Química, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Químico.

Aprovado por:



Eduardo Rangel Braga, M.Sc

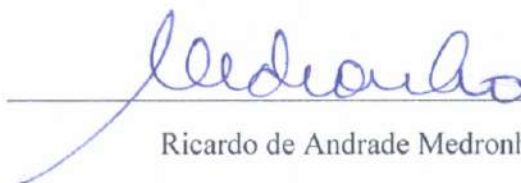


Lidia Yokoyama, D.Sc



Luiz Fernando Lopes Rodrigues Silva, D.Sc

Orientado por:



Ricardo de Andrade Medronho, Ph.D



João Victor Barbosa Alves, Eng.

Rio de Janeiro, RJ - Brasil

Fevereiro de 2011

Protector, Letícia.

Simulação numérica da distribuição de concentração de monóxido de carbono no Túnel Santa Bárbara / Letícia Protector. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2011.

ix, 78 p.; il.

(Monografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2011.

Orientadores: Ricardo de Andrade Medronho e João Victor Barbosa Alves.

1. Dispersão. 2. CFD. 3. Túnel Santa Bárbara. 4. Monografia. (Graduação – UFRJ/EQ). 5. Ricardo de Andrade Medronho, PhD; João Victor Barbosa Alves, Eng.

A meus pais, por todo o apoio e compreensão

“No meio da dificuldade encontra-se a oportunidade.”

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

Agradeço a meus pais, Eliane e Ricardo, e a meu irmão, Renan, por toda a dedicação e contribuição para a minha formação como pessoa e como profissional. Agradeço por compreenderem minhas ausências, comemorarem minhas vitórias e me acalmarem em momentos de preocupação que me acompanharam nesses cinco anos.

Agradeço a todos os meus amigos que aprenderam que fazer engenharia não é fácil e entenderam os momentos que eu precisei sumir!

Agradeço aos amigos do quarteto fantástico (Alan Barbagelata El-Assad, João Correa Lima Neto e Pedro Santiago) que, muito mais do que colegas de faculdade, tornaram-se irmãos e grandes amigos.

Agradeço aos meus orientadores, João Victor Barbosa Alves e Ricardo de Andrade Medronho, por todo o apoio dado, pelos conhecimentos compartilhados e conselhos que contribuíram para este trabalho.

A todos do LabCFD, por toda a paciência, dedicação e descontração.

Aos Srs. Rui Ribeiro Filho e Ricardo Motta, diretores da 2º Divisão de Vias Especiais - Túnel Rebouças, pela atenção, paciência e pelas informações fornecidas. Agradeço também a Debora Lipster Hanower pelo auxílio dado.

Resumo do Projeto Final apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Engenheiro Químico.

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA DISTRIBUIÇÃO DE CONCENTRAÇÃO DE MONÓXIDO DE CARBONO NO TÚNEL SANTA BÁRBARA

Letícia Protector

Fevereiro, 2011

Orientadores: Prof. Ricardo de Andrade Medronho, PhD

João Victor Barbosa Alves, Eng.

A qualidade do ar é uma preocupação nas grandes cidades, especialmente devido aos veículos automotores. Estes contribuem significativamente para a poluição atmosférica por emitirem diversos poluentes como monóxido de carbono, material particulado, óxidos de nitrogênio e compostos orgânicos voláteis. Em ambientes confinados, como túneis e garagens, deve haver controle dos poluentes por causa dos riscos à saúde humana.

Ainda que vários poluentes sejam emitidos pelos veículos automotores, este estudo avaliou apenas a dispersão de monóxido de carbono no interior do Túnel Santa Bárbara, localizado na cidade do Rio de Janeiro. Para as simulações numéricas, foi utilizada a Fluidodinâmica Computacional (CFD). A geometria e a malha foram feitas nos softwares Design Modeler e ICEM e as simulações foram realizadas no CFX, todos da Ansys.

Foram comparadas as condições atuais do túnel, que funciona com galerias separadas, e uma situação do túnel sem a parede divisória. Para o primeiro caso, foi observado um aumento linear da concentração de CO ao longo do túnel e as menores concentrações foram obtidas para a maior velocidade de ar fornecida pelos ventiladores. O movimento dos carros gera um efeito pistão que contribui para a remoção dos poluentes, possibilitando que, ainda que os ventiladores estejam desligados, a concentração de CO não atinja níveis preocupantes.

O túnel sem parede divisória com os ventiladores desligados gera um grande acúmulo de poluentes na região central do túnel, devido a uma recirculação de ar existente nesta região provocada pelo movimento dos carros trafegando em sentidos opostos. Com os ventiladores funcionando por todo o período avaliado (8 às 20 h) e soprando ar em uma mesma direção, o túnel poderia operar sem a parede divisória.

Abstract of a Final Project presented to Escola de Química/UFRJ as partial fulfillment of the requirements for the degree of Chemical Engineer.

NUMERICAL SIMULATION OF DISTRIBUTION OF CARBON MONOXIDE CONCENTRATION IN THE SANTA BÁRBARA TUNNEL

Letícia Protector

February, 2011

Supervisors: Ricardo de Andrade Medronho, PhD

João Victor Barbosa Alves, Eng.

Air quality is a concern in large cities, especially due to vehicles. These contribute significantly to air pollution because the emission of pollutants like carbon monoxide, particulate matter, nitrogen oxides and volatile organic compounds. In confined spaces such as tunnels and garages, control of pollutants should exist because of the risks to human health.

Although many pollutants are emitted by vehicles, this study will evaluate the dispersion of carbon monoxide inside the Santa Barbara tunnel, in Rio de Janeiro. Computational Fluid Dynamics (CFD) was used for the numerical simulations. The geometry and mesh were built in Design Modeler and ICEM softwares and simulations were performed in CFX, all from Ansys.

Comparisons between the current condition of the tunnel, which runs through separate galleries, and a situation of the tunnel without the dividing wall were performed. For the first case, there was a linear increase of CO concentration along the tunnel and the lowest concentrations were obtained for the higher speed of the air supplied by the fans. The cars movement cause a piston effect that contributes to pollutants removal, allowing that the CO concentration does not reach alarming levels, even when the fans are turned off.

The tunnel without the dividing wall with fans off leads to a pollutants accumulation in the central region of the tunnel due to an air recirculation provoked by the cars moving in opposite directions. With the fans operating throughout the study period (8 to 20 h) and blowing air in the same direction, the tunnel could operate without the dividing wall.

SUMÁRIO

1. Introdução	1
1.1. Objetivo do trabalho	2
1.2. Outros estudos sobre poluição em túneis	3
2. A Poluição em Túneis	5
2.1. A poluição atmosférica	5
2.1.1. Dióxido de enxofre (SO ₂).....	6
2.1.2. Partículas em suspensão e partículas inaláveis (PI)	7
2.1.3. Monóxido de carbono (CO)	8
2.1.4. Ozônio (O ₃)	8
2.1.5. Hidrocarbonetos totais (HC)	9
2.1.6. Óxidos de nitrogênio (NO _x)	9
2.2. Fontes de emissão	9
2.2.1. As fontes móveis	11
2.2.2. Emissões veiculares.....	13
2.3. Padrões de Qualidade do Ar	15
2.4. O problema do monóxido de carbono	18
2.5. O Túnel Santa Bárbara	21
2.6. Sistemas de ventilação em túneis	22
3. Fluidodinâmica Computacional (CFD)	26
3.1. Etapas para a solução numérica	28
3.2. Malha	31
3.3. Métodos de discretização	36
3.4. Modelagem matemática	37
4. Materiais e Métodos	38
4.1. Computador e pacote computacionais	38
4.2. Dados experimentais do fluxo de veículos	38
4.3. Fator de emissão	41
4.4. Geometria e malhas utilizadas	43
4.5. Parâmetros de simulação	46
4.6. Teste de malha	47
5. Resultados e Discussão	53
5.1. Metade do túnel	53
5.2. Túnel inteiro	62
6. Conclusões	75
Referências Bibliográficas	76

1. Introdução

A qualidade do ar se tornou uma preocupação tanto nos países industrializados quanto nos em desenvolvimento. Entre as principais causas de danos ao meio ambiente está a utilização de diversas formas de energia pelo homem, principalmente as fontes fósseis de geração de energia. Ainda que outras fontes estejam ampliando seu uso, os combustíveis fósseis são muito utilizados para diferentes fins, como transporte, geração de energia elétrica e indústria.

O crescimento urbano e industrial está ligado ao aumento da demanda de energia. O número de veículos automotores é um grande causador da poluição atmosférica, que deve ser, na medida do possível, controlada.

Nas últimas décadas, surgiram regulações e limites de valores para os poluentes emitidos, visando controlar as emissões principalmente por parte de indústrias e veículos. As regiões metropolitanas são os locais que concentram esses emissores e atenção especial deve ser dada à frota veicular, especialmente devido aos congestionamentos que contribuem para o aumento da emissão de poluentes no ar.

Os principais poluentes, considerando a maior frequência de ocorrência e os efeitos causados ao meio ambiente, são dióxido de enxofre (SO_2), partículas totais em suspensão (PTS), partículas inaláveis (PI), monóxido de carbono (CO), ozônio (O_3), hidrocarbonetos totais (HC) e óxidos de nitrogênio (NO_x).

Ainda que vários poluentes sejam emitidos pelos veículos automotores, este trabalho avaliará apenas a dispersão de monóxido de carbono no interior de túneis e seus efeitos nocivos à saúde humana.

Esse poluente é formado na queima incompleta de combustíveis, devido à rápida reação de combustão nos motores e por o oxigênio estar presente em quantidade insuficiente na reação. As pressões ambientais e as novas normas levaram as montadoras de veículos a instalar um conversor catalítico no sistema de exaustão, de modo a diminuir a quantidade de CO emitida.

Os efeitos do monóxido de carbono à saúde está ligado à combinação desse poluente com a hemoglobina do sangue, formando a carboxihemoglobina. Como a

afinidade da hemoglobina é muito maior pelo monóxido de carbono do que pelo oxigênio, ocorre redução da absorção de oxigênio, provocando insuficiência respiratória e outros efeitos mais graves.

Pela possibilidade de causar graves consequências, a dispersão de monóxido de carbono em ambientes confinados como garagem e túneis deve ser estudada, pois existe a possibilidade de serem atingidos valores superiores aos padrões de segurança.

Dessa forma, este trabalho pretende avaliar a dispersão de monóxido de carbono no Túnel Santa Bárbara, na cidade do Rio de Janeiro. Há uma grande dificuldade de obter soluções analíticas para esse problema, devido a variáveis complexas como a geometria do túnel, a quantidade e localização de ventiladores e carros, a utilização ou não de ventilação forçada, modelos de turbulência e mistura, entre outros, além da dificuldade de medir os poluentes ao longo de todo o túnel. Para contornar essas dificuldades, o estudo usará Fluidodinâmica Computacional (em inglês: Computational Fluid Dynamics – CFD) para realizar simulações numéricas.

1.1. Objetivo do trabalho

O objetivo deste trabalho é avaliar a dispersão de monóxido de carbono emitido por fontes móveis em túneis, que são um tipo de ambiente confinado. O Túnel Santa Bárbara foi usado como modelo e as fontes móveis foram representadas por carros de passeio. Foram realizadas simulações numéricas usando Fluidodinâmica Computacional (CFD), com base nos dados fornecidos pela Coordenadoria de Vias Especiais (CVE), que administra o túnel.

Será realizada uma comparação em relação ao uso dos ventiladores, baseado na velocidade do ar, e entre a situação atual e a anterior, quando não havia um septo divisor entre as galerias do túnel. Pretende-se obter a distribuição de concentração de monóxido de carbono, visando fundamentar a comparação.

Por uma questão de ausência de dados para reproduzir o Túnel Santa Bárbara antes da obra que construiu o septo divisor, a simulação envolvendo o túnel completo será uma avaliação da condição de ausência de parede divisória considerando as características atuais do túnel.

1.2. Outros estudos sobre poluição em túneis

O grande peso das emissões de poluentes por fontes veiculares e a preocupação com a poluição atmosférica nas últimas décadas motivaram o aumento da quantidade de estudos sobre poluentes em túneis urbanos.

Estudos realizados no interior de túneis funcionam como verdadeiros simuladores de emissões veiculares, por serem locais onde estão presentes os poluentes primários emitidos diretamente pelos veículos em um ambiente confinado e sem a influência da radiação solar. Assim, é possível avaliar os efeitos da modificação de combustíveis, modernização de veículos, sistemas de ventilação dos túneis, quantidade de veículos e condições de trânsito em relação à dispersão de poluentes no túnel (ALVES, 2009).

Na Tabela 1 podem ser vistos alguns trabalhos recentes a respeito de poluentes no interior de túneis urbanos.

Tabela 1 - Alguns estudos envolvendo poluentes em túneis

Túnel	Autor	Ano
Não identificado, Lisboa, Portugal	Almeida <i>et al.</i>	2011
Melbourne City Link, Austrália	Bari e Naser	2010
Rebouças, RJ	Alves	2009
Shing Mun, Hong Kong	Ho <i>et al.</i>	2009
Não identificado, Taiwan	Hung-Lung <i>et al.</i>	2007
Jânio Quadros, SP	Martins, Andrade <i>et al.</i>	2006
Maria Maluf, SP	Martins, Andrade <i>et al.</i>	2006
Jânio Quadros, SP	Sanchez-Ccoyllo <i>et al.</i>	2002
Maria Maluf, SP	Sanchez-Ccoyllo <i>et al.</i>	2002
Caldecott, CA, EUA	Kean <i>et al.</i>	2000
Caldecott , CA, EUA	Kirchstetter <i>et al.</i>	1999

A maior parte dos estudos na literatura a respeito de túneis e fluidodinâmica computacional envolve incêndios ou dispersão de poluentes. Dentre eles, podem ser citados BARI e NASER (2010) que estudaram, usando CFD, o escoamento de ar e os

níveis de poluição em condição de engarrafamento no túnel Melbourne City Link, pois consideraram que em condições normais o efeito pistão, que é o deslocamento de ar causado pelo movimento dos veículos, é capaz de dispersar os poluentes.

Outros estudos considerados de importância que envolveram CFD foram o de BARMAS (2007), CHUNG (2006) e ALVES (2009). O primeiro avaliou o escoamento ao redor de carros e seu efeito na dispersão de poluentes emitidos no interior de um túnel, enquanto o segundo realizou um estudo numérico e experimental sobre a dispersão de poluentes em túneis. O estudo de ALVES (2009) foi o primeiro encontrado que considera o movimento dos carros quando os mesmos estão presentes na simulação.

2. A Poluição em Túneis

2.1. A poluição atmosférica

A poluição atmosférica está relacionada à introdução na atmosfera pelo homem, direta ou indiretamente, de substâncias ou energias que ocasionem conseqüências prejudiciais, de forma a colocar em perigo a saúde humana, causar danos aos recursos biológicos e aos sistemas ecológicos ou perturbar as outras utilizações legítimas do meio ambiente (INEA, 2009).

A Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA n° 03 define como poluente atmosférico qualquer forma de matéria ou energia com intensidade e em quantidade, concentração, tempo ou características em desacordo com os níveis estabelecidos pela legislação e que tornem ou possam tornar o ar:

- Impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde;
- Inconveniente ao bem estar público;
- Danoso aos materiais, à fauna e à flora;
- Prejudicial à segurança, ao uso e ao gozo da propriedade e às atividades normais da comunidade.

Os poluentes podem ser classificados, de acordo com sua origem, em primários e secundários. Os poluentes primários são liberados diretamente pelas fontes de emissão, enquanto os secundários são formados na atmosfera como produtos de alguma reação, como é o caso do ozônio troposférico. Nesse caso, um poluente presente na atmosfera reage com outra substância, que pode ser outro poluente ou algum componente natural da atmosfera (INEA, 2009).

Quanto ao estado, os poluentes podem ser classificados como gasosos ou partículas. Os primeiros comportam-se como o ar e não tendem a se depositar depois de difundidos. Já os poluentes particulados são névoas de compostos inorgânicos e orgânicos sólidos com diâmetro aerodinâmico equivalente inferior a 100 µm e que permanecem em suspensão por um período mais longo quanto menores forem as partículas (INEA, 2009).

Os principais grupos de poluentes são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Principais poluentes por tipo (CETESB, 2010)

Tipo de poluente	Exemplos
Compostos de Enxofre	SO ₂ , SO ₃ , compostos de enxofre reduzido (H ₂ S, mercaptanas, dissulfeto de carbono, entre outros), sulfatos
Compostos de Nitrogênio	NO, NO ₂ , NH ₃ , HNO ₃ , nitratos
Compostos Orgânicos	Hidrocarbonetos, álcoois, aldeídos, cetonas, ácidos orgânicos
Monóxido de Carbono	CO
Compostos Halogenados	HCl, HF, cloretos, fluoretos
Material Particulado	Mistura de compostos no estado sólido ou líquido
Ozônio	O ₃ , formaldeído, acroleína, PAN

As medições são realizadas para um grupo específico de poluentes, tanto pela maior frequência de ocorrência, quanto pelos efeitos causados ao meio ambiente. Esses poluentes são dióxido de enxofre (SO₂), partículas totais em suspensão (PTS), partículas inaláveis (PI), monóxido de carbono (CO), ozônio (O₃), hidrocarbonetos totais (HC) e óxidos de nitrogênio (NO_x).

De modo geral, os efeitos dos gases poluentes na saúde humana estão ligados à capacidade de se dissolverem nas paredes do aparelho respiratório.

2.1.1. Dióxido de enxofre (SO₂)

Esse poluente é emitido através da queima de combustíveis fósseis que contenham enxofre, como óleo combustível, carvão mineral e óleo diesel. Seus efeitos estão relacionados à irritação nas vias respiratórias, provocando tosse e falta de ar, além de agravar os sintomas de doenças respiratórias pré-existentes, como asma e bronquite crônica. Outros órgãos sensoriais também podem ser afetados (INEA, 2009).

É um dos principais formadores da chuva ácida. A reação com outras substâncias presentes no ar forma partículas de sulfato que contribuem para a redução da visibilidade na atmosfera (CETESB, 2010).

2.1.2. Partículas em suspensão e partículas inaláveis (PI)

O material particulado é um conjunto de poluentes formado por poeiras, fumaças e todo tipo de material sólido e líquido, com exceção de água pura, que se mantém suspenso na atmosfera por causa de seu pequeno tamanho. O tamanho das partículas está diretamente relacionado ao potencial para causar problemas à saúde, quanto menores as partículas maiores são os efeitos provocados (CETESB, 2010).

Pode ser classificado como:

- Partículas Totais em Suspensão (PTS)

São aquelas cujo diâmetro aerodinâmico¹ é menor que 50 μm . Uma parte é inalável e pode causar problemas à saúde, enquanto a outra parte interfere na qualidade de vida da população, por afetar as condições estéticas do ambiente.

- Partículas Inaláveis (MP₁₀)

São aquelas cujo diâmetro aerodinâmico é menor que 10 μm . Podem ser classificadas ainda como partículas inaláveis finas (MP_{2,5}, ou seja, menores que 2,5 μm) e partículas inaláveis grossas (2,5 a 10 μm).

O material fino pode atingir os alvéolos pulmonares graças ao seu pequeno tamanho, enquanto o grosso fica retido na parte superior do sistema respiratório. Desse modo, as partículas finas afetam mais a saúde do ser humano.

- Fumaça (FMC)

A fumaça está associada ao material particulado suspenso na atmosfera proveniente dos processos de combustão. Além dos prejuízos à saúde, pode reduzir a visibilidade na atmosfera.

O material particulado é gerado através da combustão incompleta proveniente da indústria, de motores à combustão, queimadas e poeiras diversas, como a ressuspensão de poeira do solo. Também pode ser formado na atmosfera a partir de gases como SO₂,

¹ O diâmetro aerodinâmico corresponde ao diâmetro de uma esfera hipotética de densidade unitária que tem a mesma velocidade terminal de sedimentação da partícula no ar, independente do seu tamanho geométrico, forma e densidade real.

NO_x e compostos orgânicos voláteis (COVs), transformando-se em partículas como resultado de reações químicas no ar (CETESB, 2010).

De modo geral, as partículas inaláveis interferem no sistema respiratório, podendo afetar os pulmões e todo o organismo. Estão relacionados os casos de alergia, asma e bronquite crônica. Causa também irritação nos olhos e na garganta.

A poeira em suspensão no ar afeta a capacidade do sistema respiratório remover as partículas do ar inalado, que acabam retidas nos pulmões. Os efeitos dos gases presentes no ar também são potencializados.

2.1.3. Monóxido de carbono (CO)

É um gás incolor e inodoro resultante da combustão incompleta de materiais de origem orgânica, como derivados de petróleo e carvão. Em grandes cidades, que são áreas de grande circulação de veículos, esse poluente pode ser encontrado em grandes concentrações.

Os efeitos da exposição ao monóxido de carbono estão associados à redução da capacidade de transporte de oxigênio pelo sangue, provocando dificuldades respiratórias e até asfixia. A pessoa exposta pode ter seus reflexos diminuídos, o que se configura como causa adicional de acidentes de trânsito em locais com altos índices de poluentes. Os efeitos serão detalhados no item 2.4.

2.1.4. Ozônio (O₃)

O ozônio não é emitido diretamente pelas fontes, mas gerado na atmosfera. É um poluente secundário formado através da reação entre compostos orgânicos voláteis e óxidos de nitrogênio, na presença de luz solar (INEA, 2009).

Forma a névoa fotoquímica (*smog* fotoquímico) e causa diminuição da visibilidade, além de danos à saúde e à vegetação. É um gás extremamente tóxico e pode causar sérios efeitos mesmo em baixas concentrações. Provoca irritação nos olhos e nas vias respiratórias, agravando doenças como asma e bronquite, reduzindo as funções pulmonares. Está ligado também ao envelhecimento precoce da pele, náusea, dor de cabeça, tosse, fadiga, aumento do muco e diminuição da resistência às infecções (ALVES, 2009).

Quando localizado na estratosfera, formando a camada de ozônio, este poluente tem a importante função de proteger o planeta como um filtro contra os raios ultravioleta emitidos pelo Sol.

2.1.5. Hidrocarbonetos totais (HC)

São gases e vapores resultantes da queima incompleta e evaporação de combustíveis e outros produtos voláteis. Não há concentração ambiente totalmente segura, visto que diversos hidrocarbonetos são cancerígenos e mutagênicos (CETESB, 2010).

Participam das reações de formação do *smog* fotoquímico e são oxidantes dos olhos, nariz, pele e trato respiratório superior.

2.1.6. Óxidos de nitrogênio (NO_x)

Sua emissão está ligada à queima de combustíveis em altas temperaturas em veículos, aviões, fornos e incineradores. Em grandes cidades, os principais emissores são os veículos automotores. Sob ação de luz solar, o NO se transforma em NO₂ e tem papel importante para a formação de oxidantes fotoquímicos como o ozônio (CETESB, 2010).

Por sua baixa solubilidade, o dióxido de nitrogênio é capaz de penetrar profundamente no sistema respiratório, podendo dar origem a compostos cancerígenos. É irritante, podendo causar sintomas semelhantes à enfisema pulmonar. Em altas concentrações, esses óxidos podem levar a problemas respiratórios e edema pulmonar.

2.2. Fontes de emissão

Há três grandes classes de fontes de poluentes do ar: as fontes estacionárias, móveis e naturais. As fontes estacionárias são representadas por dois grandes grupos. Um envolve atividades pouco representativas nas áreas urbanas, como queimadas e queima de combustíveis nas padarias, hotéis e hospitais, que são considerados fontes de poluição não industriais, enquanto o outro grupo é formado por atividades individualmente significativas devido à variedade ou intensidade de poluentes emitidos, como é o caso da poluição industrial (INEA, 2009).

Já as fontes móveis são compostas pelos meios de transporte aéreo, marítimo e terrestre. Deve ser dado destaque especial aos veículos automotores, pois constituem fontes de destaque nas áreas urbanas devido ao seu número e concentração.

As fontes naturais são os processos naturais de emissão de poluentes, como a atividade de vulcões, do mar, da poeira cósmica, do arraste eólico, entre outros (INEA, 2009).

Na Tabela 3, podem ser observados os principais poluentes emitidos pelas diversas fontes.

Tabela 3 - As principais substâncias poluentes por fonte de emissão (INEA, 2009)

	Fontes	Poluentes
Fontes Estacionárias	Combustão	Material particulado, SO ₂ , SO ₃ , CO, hidrocarbonetos, NO _x
	Processo industrial	Material particulado (fumos, poeiras, névoas), gases: SO ₂ , SO ₃ , HCl, hidrocarbonetos, mercaptanas, HF, H ₂ S, NO _x
	Queima de resíduo sólido	Material particulado, Gases - SO ₂ , SO ₃ , HCl, NO _x
	Outros	Hidrocarbonetos, material particulado
Fontes Móveis	Veículos a gasolina/diesel/álcool, aviões, motocicletas, barcos, locomotivas, etc.	Material particulado, CO, NO _x hidrocarbonetos, aldeídos, SO ₂ , ácidos orgânicos
	Fontes Naturais	Material particulado (poeiras), gases - SO ₂ , H ₂ S, CO, NO, NO ₂ , hidrocarbonetos
	Reações químicas na atmosfera	Poluentes secundários - O ₃ , aldeídos, ácidos orgânicos, nitratos orgânicos, aerossol fotoquímicos, etc.

De modo geral, as atividades normais de indústrias, termelétricas, construção civil e pelo tráfego de veículos geram emissão de partículas ou gases que contribuem para a alteração da qualidade do ar (INEA, 2009).

Permanentemente, ocorrem diversas reações químicas na atmosfera. Ela absorve uma grande variedade de sólidos, gases e líquidos provenientes de diversas fontes, que

podem se dispersar, reagir entre si ou com outras substâncias já presentes na atmosfera. Essas substâncias ou o produto de suas reações encontram seu destino em um sorvedouro, que pode ser o oceano, ou encontram um receptor, como o homem, animais, plantas e materiais.

A concentração real de poluentes no ar está relacionada aos mecanismos de dispersão, produção e remoção. Normalmente, a própria atmosfera dispersa o poluente, misturando-o eficientemente em um grande volume de ar, contribuindo para que a poluição se mantenha em níveis aceitáveis. A topografia local e as condições meteorológicas influenciam nas velocidades de dispersão. Como exemplo, o processo de precipitação é um dos mais eficientes mecanismos de remoção de gases e material particulado da atmosfera (INEA, 2009).

Dessa forma, a qualidade do ar é definida pela interação entre as fontes de poluição e a atmosfera. As condições meteorológicas determinam a diluição dos poluentes, ainda que as emissões se mantenham constantes. É comum que a qualidade do ar seja pior durante o inverno, pois as condições meteorológicas são mais desfavoráveis à dispersão de poluentes.

2.2.1. As fontes móveis

As fontes móveis constituem fontes de destaque nas áreas urbanas, pelo seu número e distribuição espacial. A Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente (FEEMA), atual Instituto Estadual do Ambiente (INEA), realizou um estudo que resultou no Inventário de Emissões Veiculares, que podem ser vistos nas Tabelas 4 e 5.

Tabela 4 - Taxas de emissão por tipo de fonte no Rio de Janeiro, em 1000 t/ano (INEA, 2009)

Tipo de fonte	MP₁₀	SO₂	NO_x	CO	HC
Fixas	10,6	55,8	30,3	6,3	25,9
Móveis	7,8	7,5	60,2	314,7	53,4
Total	18,4	63,3	90,5	321,0	79,3

Tabela 5 - Percentual de emissões das principais vias de tráfego (INEA, 2009)

Nome da via	MP ₁₀ (%)	SO ₂ (%)	NO _x (%)	CO (%)	HC (%)
Av. Brasil	22,9	30,0	33,4	25,3	25,2
Av. das Américas	5,7	9,6	7,9	12,2	12,3
Rod. Pres. Dutra	5,5	2,9	3,4	2,6	2,2
Linha Vermelha	3,1	3,4	3,8	2,8	2,8
Rod. Washington					
Luís	2,9	3,9	4,2	3,5	3,5
Ponte Rio-Niterói	1,9	3,2	2,7	3,9	3,9
Av. Ayrton Sena	*	2,2	1,8	2,9	2,9
Linha Amarela	*	1,9	1,9	2,5	2,5
Demais Vias	58,0	42,9	40,9	44,3	44,7

* Percentual incluído nas demais vias de tráfego

A contribuição de material particulado inalável e dióxido de enxofre provém em sua maioria das fontes fixas, enquanto hidrocarbonetos, óxidos de nitrogênio e monóxido de carbono são emitidos principalmente pelas fontes móveis. É importante observar que 98% do CO emitido é proveniente das vias de tráfego. A contribuição global de poluentes pode ser avaliada na Figura 1.

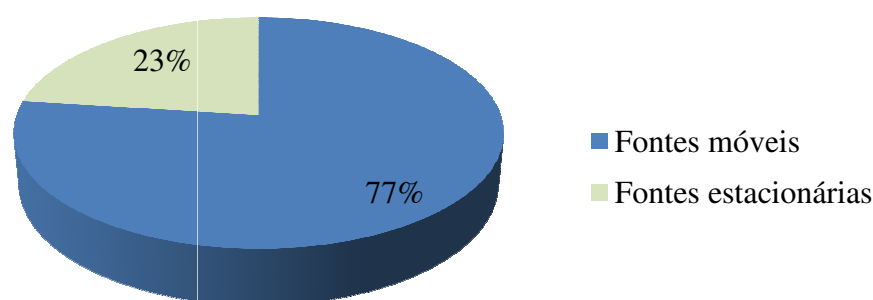


Figura 1 - A contribuição das fontes emissoras do Rio de Janeiro (INEA, 2009)

O inventário que gerou esses dados não contemplou as fontes naturais nem as vias não pavimentadas, que contribuem significativamente para a emissão de material

particulado. O percentual de contribuição das fontes provavelmente seria alterado se essas emissões fossem consideradas (INEA, 2009).

2.2.2. Emissões veiculares

Nos meios de transporte, os derivados de petróleo, como gasolina e diesel, continuam sendo os combustíveis mais utilizados, apesar de no Brasil o álcool etílico ser muito usado sozinho e misturado à gasolina. Recentemente, o uso de gás natural veicular também foi expandido. Na Figura 2, pode ser avaliada a divisão da frota veicular por combustível, com base nos dados de dezembro de 2010 do DETRAN-RJ. Por ser predominante, neste trabalho será considerado apenas o uso de gasolina como combustível.

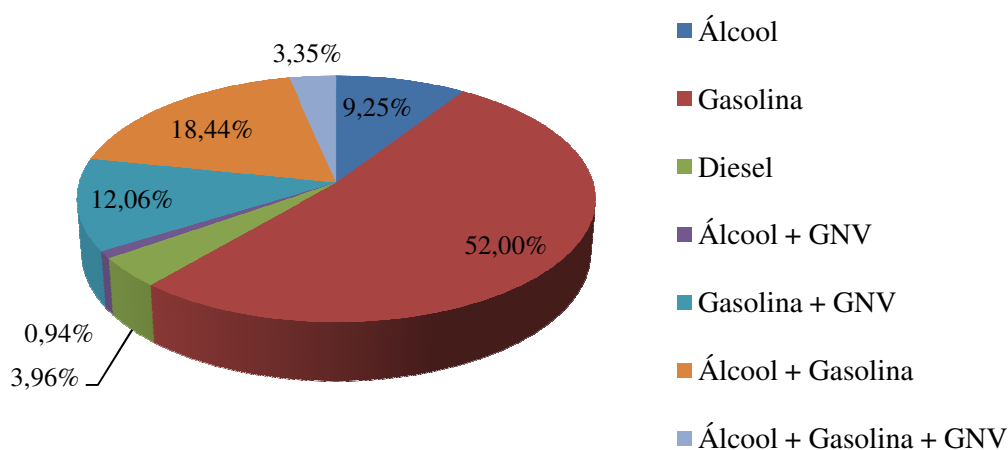


Figura 2 - Composição da frota da cidade do Rio de Janeiro por combustível (adaptado de DETRAN-RJ)

Os principais produtos da combustão em veículos são o dióxido de carbono (CO_2), água (H_2O), monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos não ou parcialmente oxidados (HC), aldeídos (R-CHO), óxidos de nitrogênio (NO_x), óxidos de enxofre (SO_x) e material particulado (MP).

O avanço do desenvolvimento urbano levou ao aumento no número de veículos e, conseqüentemente, ao aumento da emissão de gases poluentes. Isso gerou a

necessidade de adoção de políticas públicas de médio e longo prazo, inclusive com controle de emissões para a redução das concentrações de poluentes na atmosfera.

Com o passar do tempo, foram impostos limites mais restritivos, o que impulsionou soluções tecnológicas para os veículos, como a utilização de sistemas de controle de emissão pós-escapamento (catalisadores). Graças ao uso desses sistemas, houve redução nas emissões de alguns dos principais poluentes atmosféricos, como monóxido de carbono, hidrocarbonetos e NO_x. Os dois últimos são os principais precursores do ozônio troposférico, por isso a redução de suas emissões tem grande efeito na redução desse tipo de poluente.

Na década de 70, a CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo) detectou altos níveis de CO na cidade de São Paulo devido às emissões dos carros movidos a gasolina. Isso motivou o desenvolvimento de estudos para avaliar as emissões veiculares provenientes da mistura de etanol e gasolina, que concluiu que ela contribuía para a diminuição da emissão de CO. Nos anos 80, com a adição de etanol à gasolina em substituição ao chumbo tetraetila, os veículos deixaram de emitir chumbo, levando à redução desse poluente na atmosfera.

A Resolução n° 18/86 do CONAMA, que depois foi complementada por outras Resoluções, estabeleceu o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE, com o objetivo de controlar a poluição causada por veículos automotores. Dentre as metas estabelecidas, foi incluído o desenvolvimento e a implantação do Programa de Inspeção e Manutenção de Veículos em Uso (INEA, 2009).

Esses programas foram implementados em diversos países com o objetivo de reduzir as emissões de poluentes através da verificação se os sistemas de controle de emissões veiculares estão funcionando corretamente, já que eles se deterioram ao longo do tempo. São eficientes para manter as emissões aprovadas dentro dos padrões estabelecidos, vinculadas ao licenciamento do veículo.

O Estado do Rio de Janeiro é pioneiro no Programa de Inspeção e Manutenção, que teve início em julho de 1997 e é executado através de um convênio de cooperação técnica entre o INEA e o DETRAN-RJ. Isso dá motivação para que seja realizada a

manutenção correta dos veículos e desencoraja a adulteração dos dispositivos de controle de emissões, como os catalisadores.

A vistoria anual é obrigatória para todos os veículos do Estado e é verificada se a condição dos mesmos está de acordo com as normas estabelecidas de segurança e emissão de gases poluentes. No quesito segurança, são avaliadas se as resoluções do Conselho Nacional de Trânsito (CONATRAN) estão sendo atendidas, enquanto no aspecto da emissão de poluentes são verificados se os gases oriundos da combustão do motor estão de acordo com a Resolução CONAMA nº 418 (INEA, 2009).

A implantação dos Programas de Inspeção e Manutenção pelo Governo do Estado do Rio de Janeiro contribuiu para a redução de emissões ao longo do tempo, além de permitir que sejam adquiridas informações sobre a liberação de poluentes pelos veículos automotores.

2.3. Padrões de Qualidade do Ar

O nível de poluição do ar é medido através da quantificação das substâncias poluentes presentes nesse ar. Foi estabelecido um grupo de poluentes, já citados anteriormente e consagrados universalmente, que são utilizados como indicadores da qualidade do ar (INEA, 2009).

Para o diagnóstico da qualidade do ar, é realizada uma comparação entre as concentrações medidas e os padrões estabelecidos. É importante ressaltar que a concentração de poluentes está fortemente relacionada às condições meteorológicas. Altos índices de poluição estão relacionados a parâmetros como ventos fracos, chuvas, instabilidade do ar e inversões térmicas a baixa altitude. Este fenômeno é comum no inverno, quando as noites são frias e a temperatura tende a se elevar rapidamente durante o dia, provocando alteração no resfriamento natural do ar e na capacidade de dispersão dos poluentes (CETESB, 2010).

Por exemplo, a direção e a velocidade dos ventos possibilitam o transporte e a dispersão dos poluentes atmosféricos, determinando sua trajetória e alcances possíveis. Em situações de calmaria ocorre a estagnação do ar, levando ao aumento nas

concentrações de poluentes. Em túneis, é importante cuidar para que essa estagnação não esteja presente.

Por definição, um padrão de qualidade do ar são limites máximos de concentração de um componente atmosférico que não produzem efeitos que interferem na saúde humana e no meio ambiente. São baseados em estudos científicos e fixados em níveis que proporcionam uma margem de segurança adequada.

Os padrões nacionais, apresentados na Tabela 6, foram estabelecidos pelo IBAMA (Instituto Brasileiro de Meio Ambiente) e aprovados pelo CONAMA, através da Resolução CONAMA n° 03/90.

Tabela 6 - Padrões de qualidade do ar estabelecidos na Resolução CONAMA n° 03/90 (adaptado de INEA, 2009)

Poluentes	Tempo de amostragem	Padrão Primário	Padrão Secundário
PTS	24 horas (1)	240 µg/m ³	150 µg/m ³
	MGA (2)	80 µg/m ³	60 µg/m ³
SO ₂	24 horas (1)	365 µg/m ³	100 µg/m ³
	MAA (3)	80 µg/m ³	40 µg/m ³
CO	1 hora (1)	400 µg/m ³	40.000 µg/m ³
		35 ppm	35 ppm
	8 horas (1)	10.000 µg/m ³	10.000 µg/m ³
		9 ppm	9 ppm
O ₃	1 hora (1)	160 µg/m ³	160 µg/m ³
Fumaça	24 horas (1)	150 µg/m ³	100 µg/m ³
	MAA (3)	60 µg/m ³	40 µg/m ³
PM ₁₀	24 horas (1)	150 µg/m ³	150 µg/m ³
	MAA (3)	50 µg/m ³	50 µg/m ³
NO ₂	1 hora (1)	320 µg/m ³	190 µg/m ³
	MAA (3)	100 µg/m ³	100 µg/m ³

(1) Não deve ser excedido mais que uma vez ao ano

(2) Média Geométrica Anual

(3) Média Aritmética Anual

Há dois tipos de padrões de qualidade do ar. Os padrões primários estabelecem concentrações de poluentes que, ao serem ultrapassadas, podem afetar a saúde da população. São níveis máximos toleráveis de concentração de poluentes atmosféricos, devem ser considerados metas de curto e médio prazo (CETESB, 2010).

Já os padrões secundários de qualidade do ar determinam as concentrações dos poluentes atmosféricos abaixo das quais se prevê o mínimo efeito adverso sobre o bem estar da população e mínimos danos à fauna e à flora, aos materiais e ao meio ambiente em geral. Podem ser entendidos como níveis desejados de concentração de poluentes, uma meta de longo prazo (INEA, 2009).

Os padrões secundários funcionam como uma base para políticas de prevenção à degradação da qualidade do ar e devem ser aplicados em áreas dedicadas à preservação, como parques nacionais, áreas de proteção ambiental, entre outros. Pelo menos em curto prazo, não se aplicam às áreas de desenvolvimento (INEA, 2009).

A mesma Resolução do CONAMA que fixa os padrões também estabelece critérios para caracterizar a ocorrência de situações críticas de poluição do ar, definindo-as em estado de Atenção, Alerta e Emergência. Além de atingir os níveis de concentração, devem estar previstas condições meteorológicas desfavoráveis à dispersão dos poluentes (CETESB, 2010). Na Tabela 7, estão representados os critérios para classificação.

Tabela 7 - Critérios para classificação de episódios agudos de poluição do ar (INEA, 2009)

Parâmetros	Período	Concentrações limite		
		Atenção	Alerta	Emergência
SO ₂ (µg/m ³)	24 horas	800	1.600	2.100
PTS (µg/m ³)	24 horas	375	625	875
CO (ppm)	8 horas	15	30	40
O ₃ (µg/m ³)	1 hora	400	800	1.000
PI (µg/m ³)	24 horas	250	420	500
Fumaça (µg/m ³)	24 horas	250	420	500
NO ₂ (µg/m ³)	1 hora	1.130	2.260	3.000

2.4. O problema do monóxido de carbono

Como já foi citado, o monóxido de carbono é um gás incolor e inodoro originado da queima incompleta de compostos orgânicos. Como os efeitos à saúde humana estão relacionados à capacidade de transporte de oxigênio no sangue, é considerado um asfixiante químico, que é uma classificação para substâncias que impedem a utilização bioquímica do oxigênio.

Os sintomas dependem da concentração inalada e da duração da exposição, mas o principal efeito é a sensação de sufocamento. Em casos de intoxicação, são comuns os sintomas de desconforto físico, náuseas, dor de cabeça, tontura, perda de concentração e, dependendo da intensidade da exposição, pode levar à morte em poucas horas ou minutos.

Esses danos ocorrem devido à grande redução da respiração celular e podem incluir problemas no sistema nervoso, colapso cardiovascular, insuficiência renal, coma, entre outros efeitos. Podem ser ocasionadas mudanças na temperatura corporal e na pressão sanguínea, dificuldade respiratória, desorientação, alucinações, tremor, perda da audição, distúrbios na visão, palpitações cardíacas, fraqueza, confusão mental, convulsões e inconsciência (ITG, fonte: internet).

A ação tóxica é causada pela combinação preferencial do CO presente no ar com a hemoglobina do sangue, formando a carboxihemoglobina (COHb). Apesar dessa ligação ser reversível, é muito mais estável que a associação hemoglobina-oxigênio. A afinidade do monóxido com a hemoglobina é 210 vezes maior que a do oxigênio, o que impede a formação de oxihemoglobina, já que apenas um pouco de CO reage com grande quantidade de hemoglobina. A velocidade de dissociação é 1500 vezes mais lenta que a da oxihemoglobina. Esses fatores levam a uma molécula de hemoglobina inadequada para a liberação de oxigênio para os tecidos, contribuindo para a asfixia química (Núcleo de Estudos de Saúde Coletiva da UFRJ, 2006).

O sistema nervoso central responde à falta de oxigênio no sangue aumentando o esforço respiratório e a ventilação, o que leva o pulmão a captar mais monóxido de carbono e, conseqüentemente, a elevar os níveis de carboxihemoglobina.

Há um grande perigo envolvido na exposição de mulheres grávidas ao monóxido de carbono, pois a hemoglobina fetal se liga de forma ainda mais ávida que a hemoglobina. Há risco de anomalia ou morte fetal mesmo nas exposições maternas a níveis moderados ou baixos desse poluente.

Os efeitos gerais da exposição ao monóxido de carbono e sua ligação com a hemoglobina podem ser avaliados na Tabela 8.

Tabela 8 - Concentração de CO no ambiente e seus efeitos (PERES, 2005 *apud* ALVES, 2009)

Quantidade aproximada de CO (ppm) no ambiente		% COHb	Efeitos
1h	8h		
0	0	0,3-0,7	Padrão fisiológico em não fumantes
55-80	15-18	2,5-3	Diminuição da função cardíaca em indivíduos debilitados, alterações na corrente sanguínea e após prolongada exposição, respostas homopoéticas
110-170	30-45	4-6	Diminuição da capacidade visual, redução da vigilância e decréscimos na capacidade máxima de trabalho
280-575	75-155	10-20	Fraca dor de cabeça, cansaço, dispinéia em esforço, vasodilatação cutânea e problemas psicomotores gerais
575-860	155-235	20-30	Dores de cabeça intensas e náuseas
860-1155	235-310	30-40	Fraqueza muscular, náuseas, vômitos, visão obscura e dores de cabeça intensas
1430-1710	390-470	50-60	Síncope, convulsão e coma
1710-2000	470-550	60-70	Coma, atividade cardíaca e respiração debilitada, às vezes fatal
2000-2280	550-630	70-80	Falência respiratória e morte

O teor normal de COHb no sangue venoso está entre 0,4 e 0,8% e é proveniente do próprio metabolismo. Do ponto de vista médico, um aumento nesse teor que não

causaria efeitos, mesmo para pessoas com problemas de saúde, corresponderia a 3% de COHb (NORMA VDI – 2053,1995).

É possível suportar por 30 minutos uma carga máxima de 3% de COHb no sangue das pessoas que estejam em garagens e túneis, porém isso não se aplica a locais de trabalho.

Sob atividade leve, esse teor de COHb é atingido nos túneis aproximadamente sob as seguintes condições:

- 10 minutos de respiração a 400 ppm;
- 30 minutos de respiração a 150 ppm;
- 60 minutos de respiração a 80 ppm (NORMA VDI – 2053,1995).

Isso significa que, em um túnel, o monóxido de carbono não pode ter uma concentração de 150 ppm por mais de 30 minutos, para que não afete as pessoas que ali trafegam. Ao ultrapassar o limite de 250 ppm de CO por mais de um minuto, devem soar alarmes (NORMA VDI – 2053,1995).

Considerando que a concentração de COHb no sangue não deve ser superior a 3%, é importante avaliar o tempo de exposição máximo que uma pessoa pode suportar. Como ele é influenciado pela atividade física (atividade cardíaca e respiratória), na Figura 3 pode ser vista uma relação entre o tempo máximo suportável e a concentração de CO no ambiente.

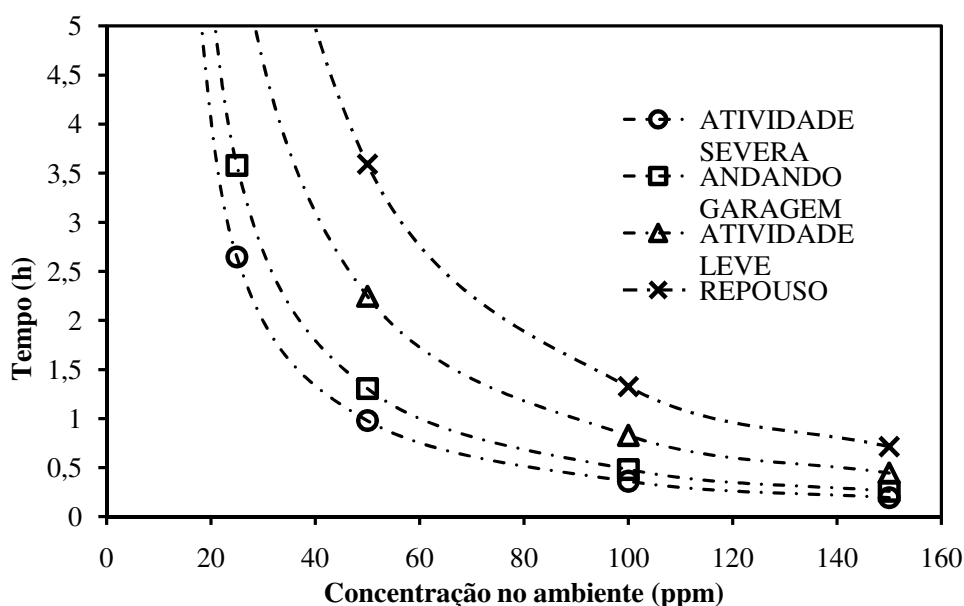


Figura 3 - Tempo de exposição para atingir 3% de COHb no sangue em diferentes ambientes e condições de esforço físico (ALVES, 2009)

Devido aos efeitos causados por sua exposição e a grande emissão de monóxido de carbono por veículos automotores, o monitoramento desse poluente deve ser constante, especialmente em túneis e ambientes confinados.

2.5. O Túnel Santa Bárbara

O Túnel Santa Bárbara liga os bairros do Catumbi e Laranjeiras e foi o primeiro túnel a ser operado na cidade do Rio de Janeiro (Figura 4). Inaugurado no dia 29 de junho de 1963, seu projeto original envolvia uma pista e um acostamento em cada sentido, sem mureta divisória, mas depois as duas pistas passaram a ser utilizadas.

Por só possuir uma única galeria, o aumento do tráfego de veículos transformou o túnel em um dos mais poluídos do mundo, já que o movimento dos carros, em mão dupla, dificultava a saída dos poluentes por promoverem recirculação do ar no interior do túnel. Este efeito fazia com que os poluentes ficassem mais confinados em relação ao que normalmente ocorre em túneis de mão única, tendo como consequência a elevação da concentração dos poluentes.

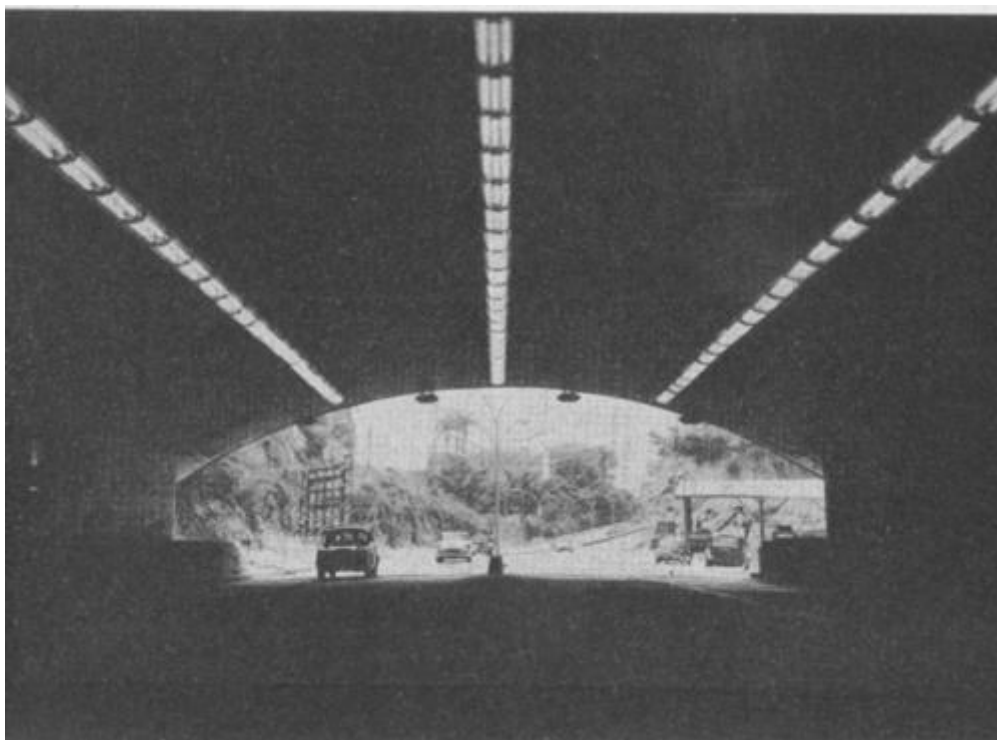


Figura 4 - Túnel Santa Bárbara na época da inauguração (Foi um Rio que passou, 2008)

O sistema de ventilação era ineficaz e muitas vezes era necessária a interdição de um dos sentidos do túnel, visando dispersar os poluentes. Em cada extremidade do túnel havia uma casa de máquinas, onde existiam quatro ventiladores centrífugos com a função de levar ar do exterior para o interior do túnel, aproveitando-se de aberturas no teto falso.

Com o aumento da rigidez das normas em relação à concentração de CO permitida no interior de ambientes confinados, em 1992 foi construído o septo divisor e instalado o sistema de ventilação forçada nas duas galerias.

As galerias possuem 1.357 m de comprimento e 17,5 m de largura, com quatro faixas de rolamento. São 40 ventiladores de cada lado, arranjados em pares. A velocidade máxima permitida é 80 km/h e, além de veículos de passeio, há tráfego de ônibus e caminhões.

A estatística mais recente da Prefeitura do Rio de Janeiro em relação ao volume de tráfego em dias úteis cita 101.350 veículos.

É realizado um controle do monóxido de carbono no interior das galerias, com o objetivo de que a qualidade do ar esteja dentro dos limites aceitáveis. Há dois sensores de medição de CO em cada galeria, localizados a 450 m e 900 m de cada entrada.

2.6. Sistemas de ventilação em túneis

Túneis são construídos devido à topografia do local ou para reduzir congestionamentos em uma determinada área. A qualidade do ar em túneis é facilmente deteriorada se os poluentes emitidos pelos veículos não forem eficientemente diluídos, já que túneis são ambientes confinados ou parcialmente confinados. A situação é pior em engarrafamentos, porque ocorre a associação de mais poluentes emitidos com veículos em baixa velocidade, causando o acúmulo de poluentes (CHUNG e CHUNG, 2006).

Um sistema de ventilação adequado é essencial para manter os poluentes em níveis seguros. O monóxido de carbono é o poluente que tipicamente vem sendo monitorado como indicador da qualidade do ar, dando suporte ao projeto e à operação

desses sistemas. Recentemente, passaram a ser consideradas também as concentrações de NO_x e de material particulado (CHUNG e CHUNG, 2006).

Em túneis com fluxo de veículos em apenas uma direção, ventiladores e o efeito pistão de veículos em movimento são os principais mecanismos de transporte dos gases emitidos para a saída do túnel e de diluição das elevadas concentrações (CHUNG e CHUNG, 2006).

Em túneis curtos, de até 300 m de comprimento, normalmente apenas o fluxo de ar induzido pelo movimento dos veículos é suficiente para promover a entrada de ar limpo e a saída do ar poluído. Por outro lado, em túneis longos, sistemas de ventilação mecânica e de exaustão são necessários, pois apenas o efeito pistão não é capaz de manter os gases tóxicos em níveis aceitáveis (BARI e NASER, 2010)

Os ventiladores utilizados em túneis são instalados nas paredes, tanto na parte superior quanto nas laterais, por uma questão de espaço. Quando há tráfego de veículos altos ou o teto é baixo, o sistema de ventilação é preso às paredes laterais. Em situação oposta, com teto alto ou apenas veículos baixos, os ventiladores podem ficar no teto (ALVES, 2009).

No caso do Túnel Santa Bárbara, os ventiladores estão localizados na parede lateral e em pares, como alternativa para possibilitar o uso de equipamentos menores. Como o projeto do túnel não incluía esses ventiladores e há tráfego de veículos altos, como caminhões, não há altura o suficiente para a instalação dos ventiladores nos mesmos moldes do Túnel Rebouças: maiores (cerca de 1,2 m de diâmetro) e presos no teto.

Há três tipos de sistemas de ventilação normalmente empregados, que são o sistema longitudinal, transversal e semi-transversal. O sistema longitudinal é equipado de uma série de ventiladores do tipo *jet fan* (Figura 5) ao longo do túnel, que conduzem o ar no sentido dos carros, como pode ser visto na Figura 6. Os ventiladores próximos a entrada sugam o ar fresco e empurram-no para frente, levando os poluentes para fora do ambiente (CHEN, 2000).



Figura 5 - Ventilador do tipo *jet fan*

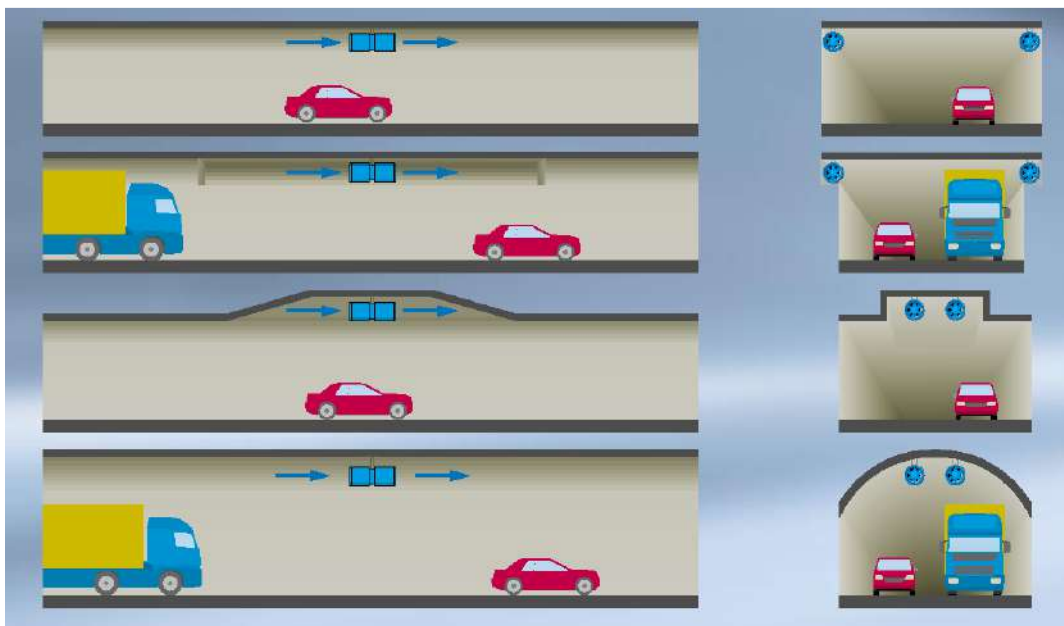


Figura 6 - Sistema de ventilação longitudinal (ALVES, 2009)

O sistema transversal reúne dois mecanismos independentes instalados ao longo do túnel, um fornece ar limpo e o outro extrai o ar poluído, como pode ser visto na Figura 7. Na Figura 8 é apresentado o sistema semi-transversal, que é a combinação dos dois sistemas apresentados (CHEN, 2000).

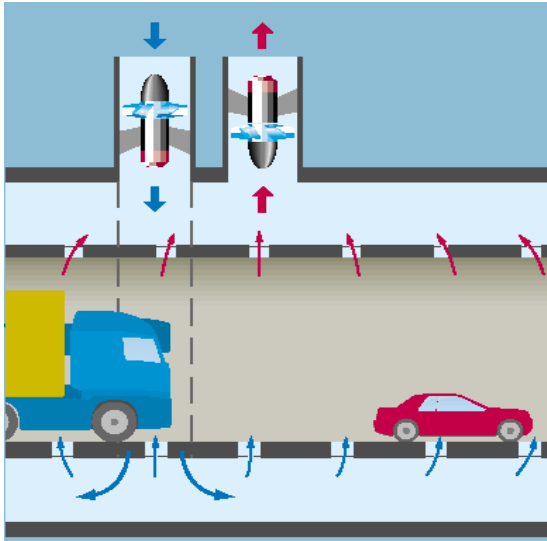


Figura 7 - Sistema de ventilação transversal
(ALVES, 2009)

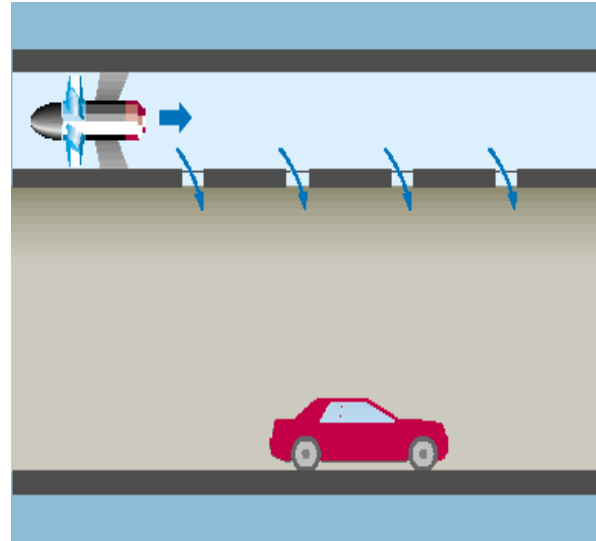


Figura 8 - Sistema de semi-ventilação transversal
(ALVES, 2009)

O sistema longitudinal tem sido um dos mais utilizados em túneis, porque o efeito pistão proporciona uma força extra que empurra o ar ao longo do túnel, auxiliando na retirada dos poluentes enclausurados. Além disso, o desenvolvimento de novas tecnologias para ventiladores de alto desempenho trouxe economia e alta eficiência para suprir e controlar ar limpo. Experimentos com incêndios em túneis e outros estudos mostraram que o controle de poluentes em túneis que utilizam esse sistema é mais efetivo, apresentando maior facilidade no controle de poluentes (CHEN, 2000). O trabalho de ALVES (2009) também mostrou as vantagens proporcionadas pelo efeito pistão no Túnel Rebouças, que emprega o sistema longitudinal.

3. Fluidodinâmica Computacional (CFD)

O desenvolvimento de computadores de alta velocidade e de grande capacidade de armazenamento permite o uso de técnicas numéricas para a solução de problemas complexos da engenharia. Além da relativa simplicidade de aplicação, a versatilidade e generalidade dos métodos numéricos para a simulação de problemas são alguns fatores que motivam o uso da fluidodinâmica computacional (MALISKA, 2004).

A fluidodinâmica computacional é uma ferramenta usada para simular o comportamento de sistemas que envolvam escoamento de fluidos, transferência de calor, dispersão de substâncias e outros processos físicos relacionados, através da solução de equações de fenômenos de transporte por métodos computacionais. CFD pode ser aplicado a escoamentos internos ou externos, reatores, bombas, trocadores de calor, turbinas, misturadores, separadores, entre outros sistemas. São usadas técnicas matemáticas, numéricas e computacionais para obter, visualizar e interpretar soluções para as equações de conservação de grandezas físicas de interesse de um dado escoamento.

Os avanços no desenvolvimento de computadores mais potentes, junto com a possibilidade de manipulação interativa de modelos 3D, tornaram o processo de utilizar um modelo em CFD e a análise de resultados menos trabalhosa e mais eficiente. São usados algoritmos que permitem uma solução robusta do escoamento em um tempo razoável (MALISKA, 2004).

A análise de um problema genérico pode envolver ferramentas como métodos analíticos, numéricos ou a experimentação em laboratório. Os dois primeiros pertencem aos métodos teóricos, já que pretendem resolver as equações diferenciais que formam o modelo matemático.

Os métodos analíticos podem ser aplicados a problemas com hipóteses simplificadas as quais desviam o problema do fenômeno físico real, o que implica em geometrias e condições de contorno simples. Apesar de seu caráter simplificado, as soluções analíticas não devem ser descartadas. Elas são importantes para validar casos limites de modelos numéricos e auxiliar no desenvolvimento de modelos numéricos mais robustos.

Os experimentos em laboratório têm como vantagem utilizar a configuração real, porém, além do alto custo, muitas vezes não é possível realizar experimentos por uma questão de segurança ou pela dificuldade de reprodução das condições reais. Em casos onde não há modelos matemáticos estabelecidos ou a geometria é muito complexa, a experimentação pode ser a única alternativa.

Já a simulação numérica praticamente não apresenta restrições. Podem ser resolvidos problemas complexos com condições de contorno gerais, que utilizem geometrias complexas e com produção de resultados com relativa rapidez.

Caso os resultados obtidos através de uma simulação numérica em CFD não estejam condizentes com resultados experimentais, é possível modificar os parâmetros dos modelos empregados, ajustar as condições de contorno, geometria e alguns modelos de turbulência e transferência de calor. Isso figura como uma vantagem do método, é a facilidade de modificação (ALVES, 2009).

Tabela 9 - Resumo das técnicas de solução de problemas (FORTUNA, 2000 *apud* ALVES, 2009)

Técnica	Vantagens	Desvantagens
Experimental	Mais realista	Equipamento exigido Problemas de escala Dificuldades de medição Custo operacional
Analítica	Mais geral Fórmula fechada	Restrita a geometrias e processos físicos simples Geralmente restrita a problemas lineares
Numérica	Não há restrição à linearidade Geometrias e processos complicados Evolução temporal do processo	Erros de truncamento Prescrição das condições de contorno apropriadas Custos computacionais

CFD é muito utilizado para simular escoamentos turbulentos, mas a maior parte das soluções para esse tipo de escoamento utiliza modelos de turbulência aproximados, que simplificam características reais do mesmo ou que dependem de dados empíricos

para a obtenção de constantes. Desse modo, podem ser gerados erros quando o modelo utilizado não for adequado para o caso.

Quando ocorrem diferenças entre os resultados obtidos e os dados reais a fonte desta discrepância pode ser oriunda das hipóteses feitas nas equações diferenciais originais, aproximações inerentes ao processo de discretização ou a erros gerados pelos métodos iterativos usados. Esses erros podem levar a pouca ou nenhuma representatividade da solução, ao compará-la com o fenômeno físico. Tão importante quanto a solução propriamente dita é sua correta visualização e interpretação.

Há dois tipos de erros que podem estar presentes na solução numérica, quando ela é comparada com a realidade. O primeiro destes são os erros numéricos, resultantes da má solução das equações diferenciais, que são detectados através da comparação com outras soluções, analíticas ou numéricas. Esta é a validação numérica de uma solução e define a qualidade de um método numérico. O segundo tipo de erro são os causados pelo uso de equações diferenciais que não representam bem o fenômeno. São detectados através da validação física, que constitui a verificação da fidelidade do modelo matemático para o problema físico, muitas vezes a partir de dados experimentais.

Dessa forma, a ferramenta numérica utilizada será adequada e confiável se o método numérico resolver corretamente as equações diferenciais de um modelo matemático que seja fiel ao fenômeno físico.

3.1. Etapas para a solução numérica

O uso de CFD para resolver problemas físicos através da aplicação de modelos numéricos envolve as etapas mostradas na Figura 9.

O primeiro passo consiste na modelagem do problema físico, determinando as grandezas que atuam sobre o sistema e como o afetam. Deve ser feita uma avaliação para determinar quais são as variáveis mais relevantes no processo e quais podem ser simplificadas ou descartadas frente a outras. Além disso, é importante determinar os limites de estudo do problema físico.

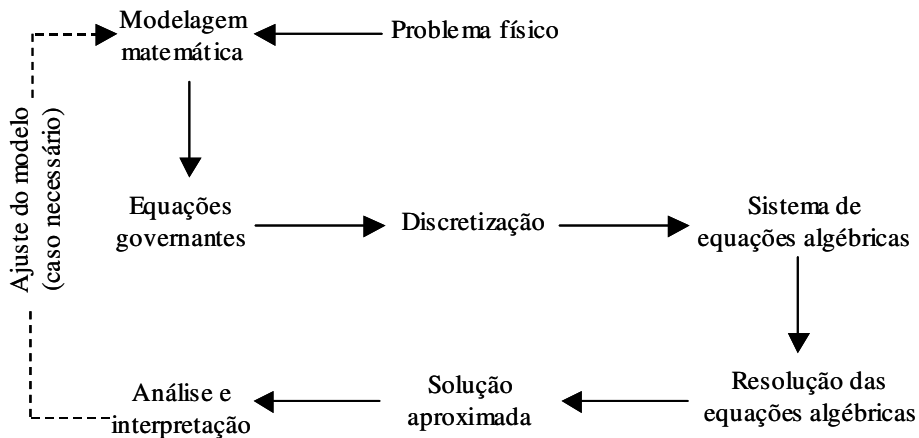


Figura 9 - Etapas para a resolução de problemas em CFD (FORTUNA, 2000 *apud* ALVES, 2009)

O segundo passo envolve a modelagem matemática, através das leis de conservação de quantidade de movimento, massa e energia. Esses modelos irão explicar o sistema estudado, além de prever seu comportamento em diferentes situações. Depois disso, deve-se definir a região de aplicação e validade das equações, que é chamada de domínio.

A etapa de discretização do domínio consiste na divisão do mesmo em um número finito de pontos de aplicação das equações, para obtenção das soluções numéricas. Esses pontos também são chamados de nós. Isso é necessário porque não é possível obter soluções numéricas sobre uma região contínua, devido aos infinitos pontos da mesma. As soluções serão obtidas em sub-regiões dentro do domínio, que são chamadas de elementos. O conjunto de elementos forma a malha.

A distribuição adequada dos elementos no domínio é fundamental para que seja obtida uma solução numérica representativa do escoamento. Ou seja, é necessário garantir uma quantidade razoável de elementos nas regiões onde são encontrados os maiores gradientes das propriedades estudadas. Quanto maior for o número de pontos discretos, mais fina é a malha e mais fiel ao modelo será o resultado obtido. Por outro lado, o esforço computacional será aumentado e as simulações tornam-se mais demoradas. É necessário realizar um teste de malha para encontrar o número mínimo de pontos (nós) a partir do qual a malha não influencia mais nos resultados obtidos.

Com os nós estabelecidos, os termos das equações passam a ser definidos em função dos valores das incógnitas em pontos discretos adjacentes. Isso forma um conjunto de equações algébricas, que podem ou não estar acopladas. Agora devem ser

introduzidas as condições de contorno necessárias para a resolução das equações. Junto com os parâmetros do escoamento, essas condições especificam o problema.

Para facilitar a resolução e análise de problemas de escoamento de fluidos, alguns programas computacionais de CFD são subdivididos em cinco elementos principais: um gerador de geometria, um gerador de malha, um pré-processador, um processador (obtem a solução) e um pós-processador para visualização dos resultados.

No gerador de geometria é possível modelar diversos objetos no espaço tridimensional, de forma a definir um volume de controle finito (domínio) onde a solução do problema será buscada. O domínio será dividido em sub-regiões não sobrepostas, que são os elementos que formam a malha. Isso é feito no gerador de malha.

No pré-processador é feita a estruturação do problema, para que o processador (*solver*) possa utilizar as informações da modelagem para obter a solução. Essa delimitação da modelagem física do problema envolve os seguintes aspectos:

- Seleção dos fenômenos físicos e/ou químicos;
- Definição das propriedades dos fluidos, como viscosidade, densidade, condutividade térmica, entre outros;
- Especificação das condições de contorno apropriadas nos elementos da malha associados ao contorno do domínio.

Alguns pré-processadores contém um banco de dados com as propriedades físicas dos fluidos mais comuns e oferecem diversos modelos físicos e químicos, como modelos de turbulência, transferência de massa, reações químicas, entre outros, já implementados no código ou permitem o uso de novos modelos.

Entre os modelos de turbulência, um dos mais populares é o modelo $k-\epsilon$, que é a duas equações. O termo k corresponde à energia cinética turbulenta, enquanto o ϵ é a dissipação turbulenta. Os modelos de duas equações prevêm as propriedades de um escoamento turbulento sem ser necessário um conhecimento prévio da estrutura da turbulência, são os modelos completos mais simples que modelam a turbulência. A solução de duas equações de transporte permite que a velocidade turbulenta e a escala de comprimento sejam determinadas independentemente (ANSYS Fluent 12.0 Theory Guide).

O modelo k- ϵ é considerado robusto, econômico e com boa precisão para casos simples, o que envolve uma grande quantidade de escoamentos turbulentos. Entre as limitações do modelo que levam a resultados ruins, figuram escoamentos complexos com grande gradiente de pressão. Há forte perda de precisão em curvatura de linha de corrente, redemoinho e rotação, além de baixa precisão para vazamento de jatos (ANSYS Fluent 12.0 Theory Guide).

O *solver* é o principal elemento do pacote computacional e é onde as técnicas numéricas de solução são utilizadas para resolver apropriadamente o problema físico. Existem várias técnicas numéricas e suas diferenças estão associadas à forma com que as variáveis incógnitas são aproximadas e ao procedimento de discretização. Todas essas metodologias numéricas levam a sistemas de equações lineares com um grande número de equações, tornando necessária a abordagem numérica para a solução.

O pacote de pós-processamento possui ferramentas para visualização de campos escalares e vetoriais, incluindo gráficos de vetores, de contornos, sobre superfícies no espaço tridimensional e até a visualização de linhas de fluxo e de trajetórias de partículas.

Basicamente, o usuário de CFD está interessado em obter as distribuições de velocidades, pressões e temperaturas na região do escoamento. Isso é realizado no pós-processamento, além de ser possível utilizar ferramentas para cálculo de determinadas variáveis de interesse.

3.2. Malha

A malha é o conjunto de elementos em que se divide o domínio geométrico do problema. As equações são resolvidas em cada elemento gerando variáveis com valores discretos e a solução de um elemento é utilizada como condição de contorno para o elemento adjacente. Por esse motivo, é importante ter uma malha apropriada, com refinamento em regiões cujos gradientes de variação das variáveis são mais elevados, para que essas variações sejam percebidas. É o caso de regiões de parede.

A complexidade e a geometria do domínio influenciam no tipo de malha a ser usado. As malhas se dividem em estruturadas, não estruturadas e híbridas.

As malhas estruturadas possuem uma regularidade na distribuição espacial de seus pontos, que possuem sempre o mesmo número de vizinhos. Nessas malhas, se forem traçadas retas que toquem as células, elas serão sempre coincidentes com as fronteiras do domínio.

É importante ressaltar que não são todas as malhas que podem ser consideradas estruturadas apenas por sua aparência. A análise apenas visual da malha da Figura 10 nos faz concluir que é uma malha composta por elementos quadriláteros, não é possível classificá-la como estruturada.

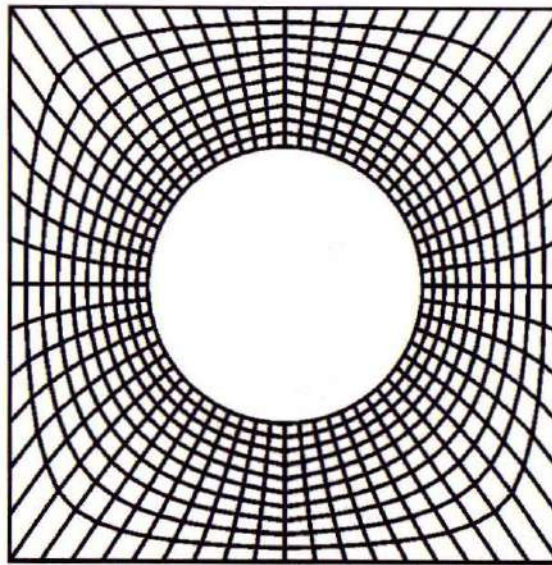


Figura 10 - Malha composta por elementos quadriláteros

Para que uma malha seja considerada estruturada, a numeração dos elementos deve seguir uma estrutura fixa de forma que o número de cada volume seja consecutivo ao seu vizinho, como pode ser visto na Figura 11. A primeira camada de volumes está numerada consecutivamente e assim por diante para as camadas mais internas. Todos os vizinhos de cada volume são conhecidos e obtidos de uma forma simples, como uma conta algébrica trivial. Conhecer os vizinhos por expressões simples traz vantagens na programação de um código, por facilitar o cálculo dos balanços, diminuir o número de acessos à memória e a própria quantidade de memória necessária, entre outros. Com essa característica, a malha da figura pode ser considerada estruturada composta por elementos quadriláteros.

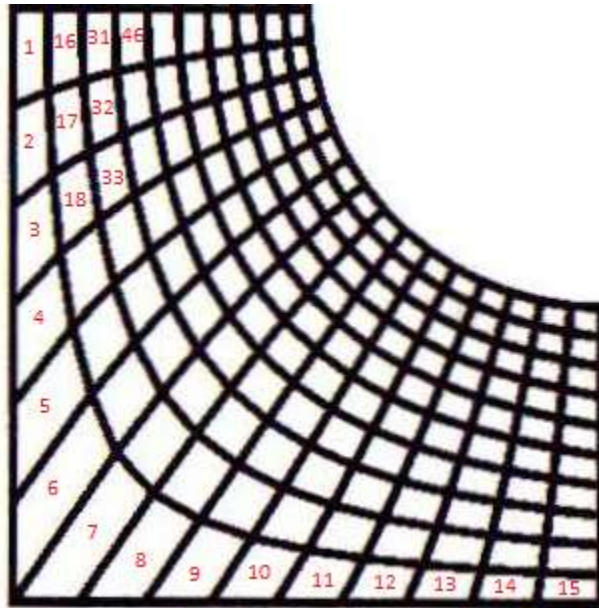


Figura 11 - Malha estruturada (AGUIRRE, 2010)

Dependendo do software e do método utilizado na geração da malha, a malha pode não ter a numeração que a identifique como uma malha estruturada, como na Figura 12.

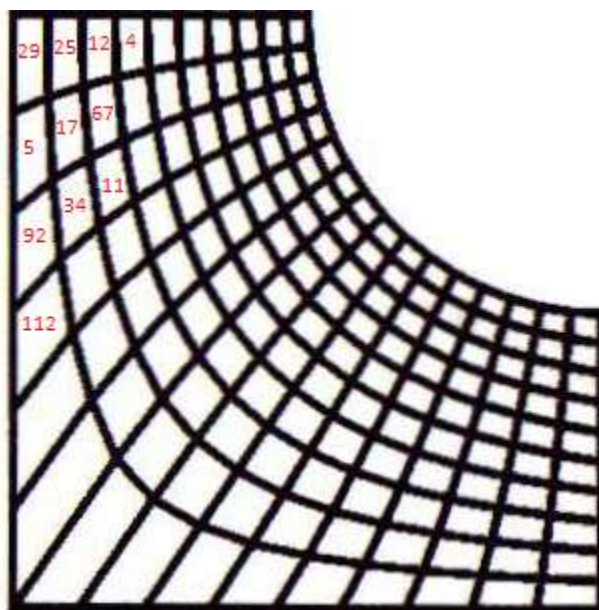


Figura 12 - Malha não estruturada (AGUIRRE, 2010)

Se os elementos estiverem numerados dessa forma, a malha não poderá ser considerada estruturada, apesar de aparentemente ser a mesma malha que a anterior. Não é possível conhecer os vizinhos de qualquer elemento através de uma simples conta algébrica, é necessário que existam matrizes ou vetores de conectividade, que são listas

indicando quem são os vizinhos de cada volume. A malha da Figura 12 é considerada, então, uma malha não estruturada composta por elementos quadriláteros.

O uso de malhas não estruturadas exige que a programação seja mais complexa, além de que a matriz de conectividade será acessada várias vezes, o que aumenta o número de operações na máquina. A alocação de memória também é prejudicada pela geração de vizinhos muito distantes e sem sequência. A grande vantagem de utilizar uma malha não estruturada é gerá-la com facilidade em geometrias complexas, situação em que fazer uma malha estruturada é muito complicado.

Assim, é evidente que uma malha composta por volumes quadriláteros ou hexaédricos não é necessariamente uma malha estruturada, da mesma forma que uma malha de elementos triangulares ou tetraédricos pode ser uma malha estruturada.

Dependendo do ângulo de inclinação das retas, a malha pode ser classificada como estruturada uniforme (Figura 13) ou como estruturada não-uniforme, como na Figura 14 (ALVES, 2009).

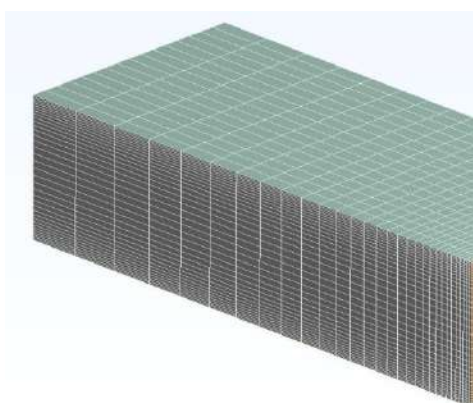


Figura 13 - Malha estruturada uniforme
(ALVES, 2009)

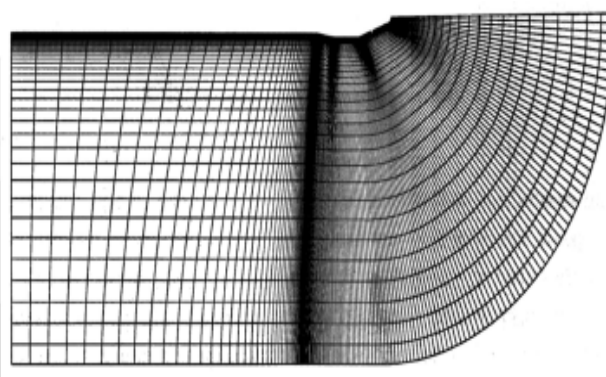


Figura 14 - Malha estruturada não-uniforme (ALVES, 2009)

As malhas estruturadas uniformes são muito utilizadas para geometrias simples, enquanto nas não-uniformes os pontos são espaçados conforme as necessidades do domínio, permitindo a aglutinação ou maior espaçamento em áreas específicas. Os pontos aglutinados estão nas áreas onde são esperadas grande variação espacial da solução, enquanto os pontos afastados estão em regiões nas quais há pequena variação espacial.

Já as malhas não estruturadas são caracterizadas pela ausência de regularidade na distribuição espacial dos pontos, como uma malha tetraédrica. As células não possuem o mesmo número de vizinhos e podem ter diferentes formatos, como triângulos, hexaedros, prismas, entre outros, como pode ser visto na Figura 15. Apesar de ser mais complicado de gerá-lo, esse tipo de malha é o mais utilizado para geometrias complexas, devido à sua maior flexibilidade de forma que os elementos podem assumir. Na Figura 16, pode ser vista uma malha não estruturada composta por elementos triangulares.

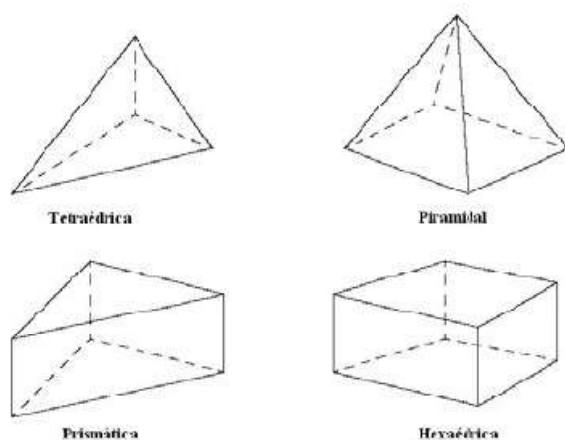


Figura 15 - Tipos de elementos de malha (ALVES, 2009)

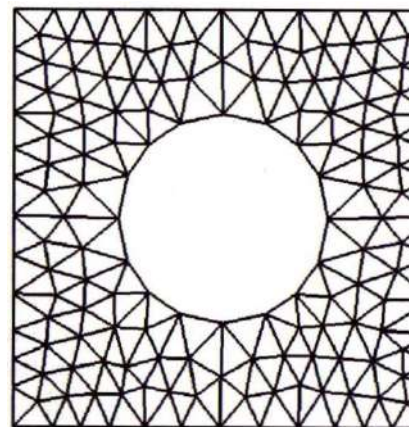


Figura 16 - Malha não estruturada (MALISKA, 2004)

Uma malha híbrida (Figura 17) pode empregar diferentes tipos de elementos, como hexaédricos e tetraédricos. Pode-se aplicar as malhas diferentes em locais importantes do escoamento, de forma a refiná-lo.

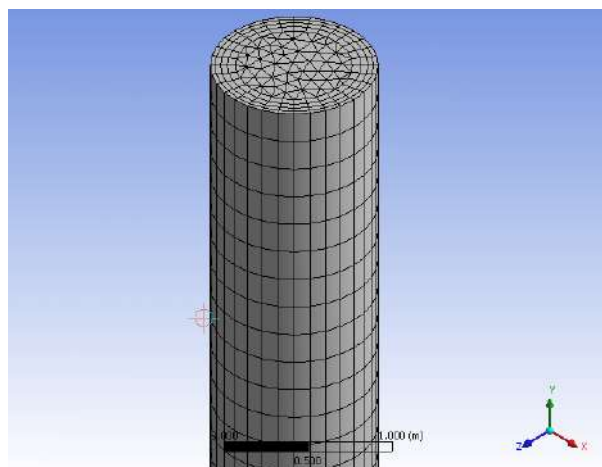


Figura 17 - Malha híbrida (ALVES, 2009)

Vale lembrar que a precisão da solução do problema em CFD depende do número de elementos e de sua distribuição na malha. É necessário balancear a precisão da solução através do refinamento da malha com o custo computacional de obter a solução no *hardware* disponível.

3.3. Métodos de discretização

Enquanto os métodos analíticos fornecem uma solução exata e fechada para as equações diferenciais e um número infinito de pontos, os métodos numéricos resolvem essas derivadas para um número finito de pontos, substituindo-as por expressões algébricas e aplicando-as para cada elemento de volume. A Figura 18 exemplifica a tarefa do método numérico, que é transformar uma equação diferencial, definida no domínio D, em um sistema de equações algébricas, através da substituição dos valores discretos da função nas derivadas. A transformação das derivadas em termos que contém a função é a integração da equação diferencial e a maneira de realizá-la define o tipo de método numérico.

Os métodos tradicionais para a solução numérica de equações diferenciais são os Métodos de Diferenças Finitas (MDF), de Volumes Finitos (MVF) e de Elementos Finitos (MEF). O MVF geralmente é utilizado em pacotes comerciais e nele são utilizadas equações aproximadas obtidas através de balanços de conservação no volume elementar. Essa preferência ocorre devido à robustez, determinada pelas características conservativas do método (MALISKA, 2004).

Em escoamento de fluidos, é importante atender aos princípios de conservação em nível discreto, para que não haja a possibilidade de existência, no interior do domínio de cálculo, de gerações/sumidouros de quantidades, como massa, quantidade de movimento e energia. Esse requisito é atendido pelo MVF. Se a conservação das propriedades é satisfeita apenas via condições de contorno, dentro do domínio podem existir gerações/sumidouros que modificam o perfil da solução na região.

Como no MVF os balanços de conservação devem ser atendidos nos volumes elementares, independente do tamanho da malha, todos os princípios de conservação podem ser conferidos em uma malha grosseira. Em outros métodos, a solução pode ser

conferida apenas com uma malha refinada, pois o conceito de volumes elementares não existe.

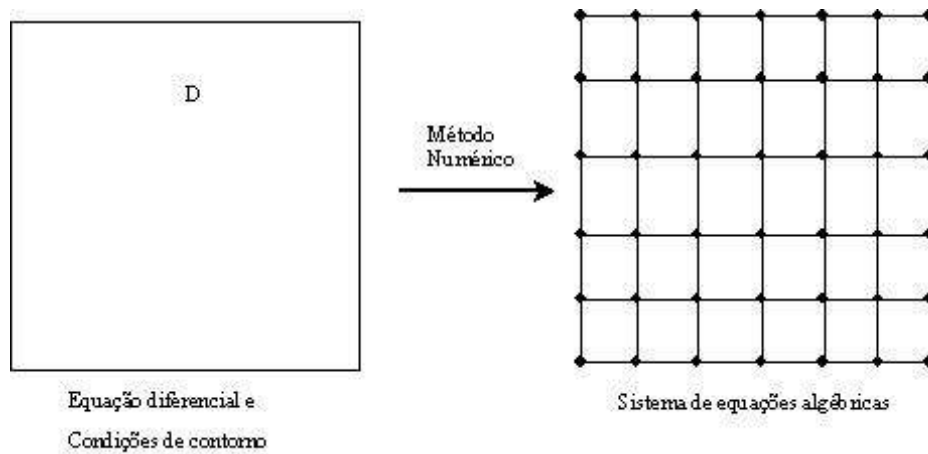


Figura 18 - A tarefa do método numérico (MALISKA, 2004)

3.4. Modelagem matemática

A modelagem matemática é usada para representar o problema físico, usando equações de conservação. Neste trabalho, será avaliado o escoamento de ar e poluentes dentro do Túnel Santa Bárbara e equações de transporte serão utilizadas, usando algumas aproximações.

A equação instantânea da continuidade representa a conservação de massa. Ela é definida, em notação vetorial, como:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) \quad (3.1)$$

O termo a esquerda representa a taxa de aumento de massa por unidade de volume, enquanto o termo da direita é a taxa líquida de adição de massa por unidade de volume, motivada pela convecção.

A equação do movimento é a equação que descreve a conservação da quantidade de movimento.

$$\rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -\nabla P - \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \rho \mathbf{g} \quad (3.2)$$

Nas equações acima, $\boldsymbol{\tau}$ é o tensor tensão, ρ é a densidade do fluido, \mathbf{v} é o vetor velocidade, P é a pressão e t é o tempo. O uso de **negrito** indica o caráter tensorial da variável ou do operador. No caso, foi usado escoamento incompressível e newtoniano.

4. Materiais e Métodos

4.1. Computador e pacote computacionais

Com exceção da maior malha simulada no teste de malha, as simulações para uma galeria do túnel foram realizadas em um microcomputador com processador Intel core i7 860 composto por quatro núcleos físicos e quatro virtuais, 2.8 GHz em cada núcleo, 4 GB de memória RAM e memória física de 500 GB. O sistema operacional utilizado foi Windows 7 64 bits.

A maior malha e o túnel inteiro, devido ao número de elementos, foram simulados no *cluster*, que possui 20 nós, totalizando 40 processadores Intel Xeon quad-core com 2.33 GHz, 4 GB de memória RAM e 250 GB de memória física. Contém ainda um nó principal com dois processadores Intel Xeon quad-core de 2.33 GHz com 8 GB de memória RAM e 146 SAS HD. Há um total de 168 núcleos com 1 GB de memória RAM cada e um armazenamento de 8 TB de memória física.

Os *softwares* utilizados são da ANSYS, Inc., como o Design Modeler para a construção da geometria, o ICEM para gerar a malha e o CFX para a modelagem, solução do problema e visualização dos resultados.

4.2. Dados experimentais do fluxo de veículos

Foram obtidos junto à CVE (Coordenadoria de Vias Especiais), responsável pela administração do Túnel Santa Bárbara, dados sobre a quantidade de veículos que passaram pelas galerias Laranjeiras/Catumbi e Catumbi/Laranjeiras no dia 24 de maio de 2002, que foi uma sexta-feira, e em qual faixa de velocidade. O número de veículos que passou pelo túnel em cada faixa horária pode ser avaliado na Figura 19.

Com base nos dados abaixo, foi calculado o fluxo de carros na faixa horária de interesse, de 8 às 20 horas. Esse período foi escolhido por possuir intenso tráfego e englobar horas de pico. Os resultados podem ser vistos na Figura 20.

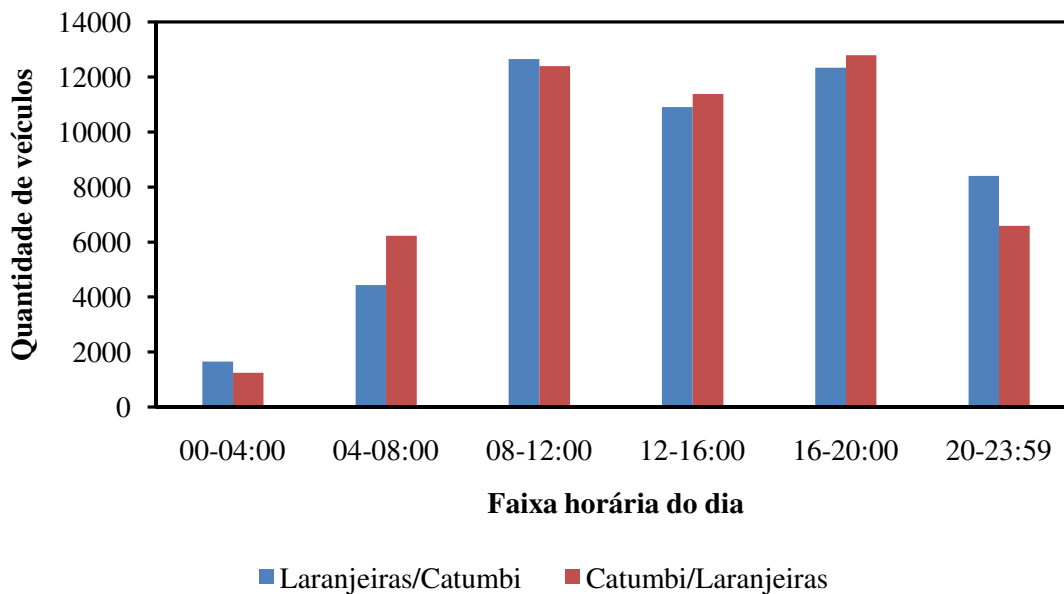


Figura 19 - Quantidade de veículos que passaram pelas galerias do túnel em diferentes faixas horárias no dia 24 de maio de 2002

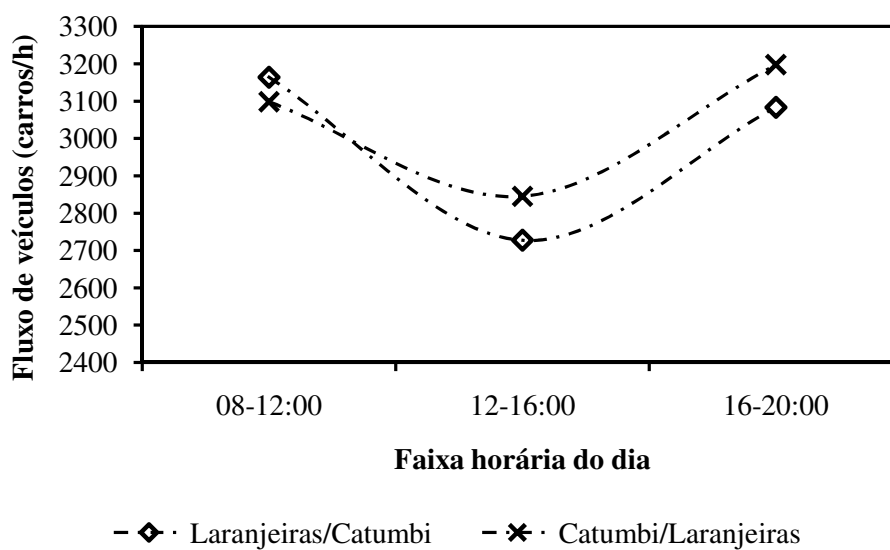


Figura 20 - Fluxo de veículos nas galerias do túnel Santa Bárbara de 8 às 20 horas do dia 24 de maio de 2002

Com os dados obtidos junto à administração do túnel, foi obtida uma distribuição de velocidades dos carros no período de interesse, visando obter a velocidade média. Os dados para a galeria Laranjeiras/Catumbi são apresentados na Figura 21, enquanto o sentido Catumbi/Laranjeiras pode ser avaliado na Figura 22.

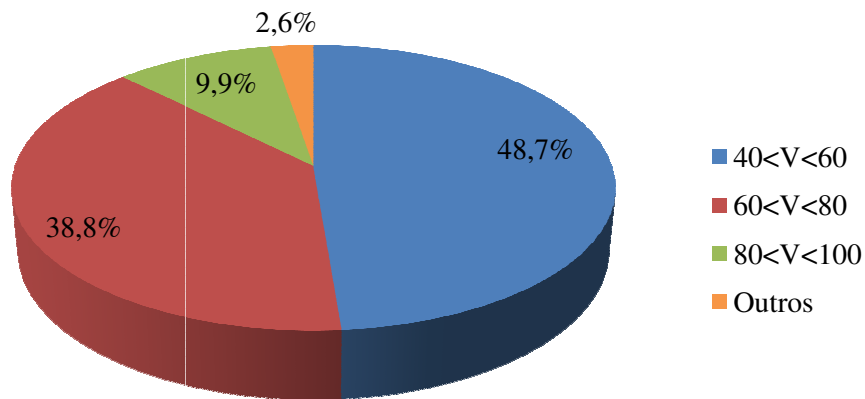


Figura 21 - Distribuição de velocidades (em km/h) na galeria Laranjeiras/Catumbi de 8 às 20 horas

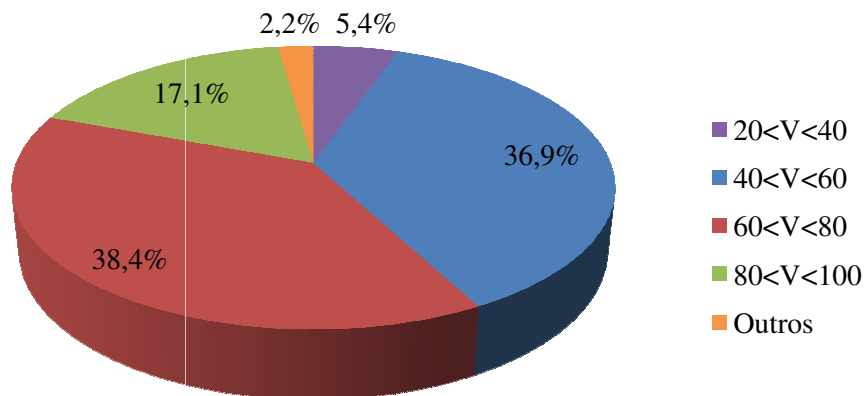


Figura 22 - Distribuição de velocidades (em km/h) na galeria Catumbi/Laranjeiras de 8 às 20 horas

Para fins de simulação, foram considerados apenas o tráfego de carros de passeio movidos a gasolina, pois os dados obtidos não eram agrupados por tipo de veículo. De acordo com ALVES (2009), o número de carros no interior do túnel na velocidade estabelecida foi calculado usando a seguinte equação:

$$— (4.1)$$

Em que:

N_C é o número de carros presentes no túnel;

F_C é o fluxo de carros no túnel em dado instante (carros/h);

v_C é a velocidade dos carros (km/h);

L_T é o comprimento do túnel (km) que, para o Túnel Santa Bárbara, é 1,357 km.

O uso da variável número de carros está baseado no princípio de que a quantidade de veículos no interior do túnel é constante, pois a mesma quantidade de carros que sai do túnel em determinado período de tempo é equivalente à quantidade que entra no mesmo intervalo de tempo, para que seja mantido o fluxo constante de carros.

Com as informações obtidas, foram realizados cálculos para obter o número de carros no interior do túnel para cada galeria, que estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Número de carros dentro do túnel calculados para o dia 24 de maio de 2002

Galeria	Fluxo de veículos (carros/h)	Velocidade média (km/h)	Número de carros
Laranjeiras/Catumbi	2992	61,4	66
Catumbi/Laranjeiras	3047	63,5	65

Com base nos resultados obtidos para cada galeria, foram considerados 65 veículos no interior do túnel na velocidade de 60 km/h, uma aproximação realizada por uma questão de simplicidade.

4.3. Fator de emissão

Todos os compostos emitidos pelos automóveis são gerados pela combustão de combustíveis fósseis e são considerados poluentes, por causarem a contaminação do ar. Muitas vezes a combustão ocorre de forma incompleta, produzindo compostos indesejados.

A emissão de poluentes depende de fatores como nível de aceleração dos veículos, combustível utilizado, quilometragem do carro, ano de fabricação, estado de conservação, uso de catalisadores, entre outros.

ALVES (2009) obteve taxas de emissão de monóxido de carbono para automóveis a velocidade constante, com base no estudo de JACONDINO (2005) para quantificar emissões veiculares usando simuladores de tráfego. Os dados obtidos (Tabela 11) consideram apenas gasolina como combustível e não consideram o perfil atual da frota brasileira.

Tabela 11 - Taxas de emissão para automóveis em velocidade constante usando gasolina como combustível (LIU, 2005 *apud* ALVES, 2009)

Velocidade (km/h)	0	10	20	30	40	50	60	70
Fator de emissão CO (g/s)	0,060	0,060	0,091	0,130	0,129	0,090	0,110	0,177

Para fins de simulação, será considerada a velocidade de emissão do poluente:

$$v_{CO} = \frac{Q_{CO}}{\rho_{CO} \cdot A_{fonte}} \quad (4.2)$$

Em que

v_{CO} é a velocidade de emissão do poluente;

Q_{CO} é a taxa de emissão do poluente (kg/s);

ρ_{CO} é a densidade do poluente. Para o CO, é 1,1449 kg/m³, conforme o banco de dados do CFX;

A_{fonte} é a área pela qual o poluente é emitido.

Em relação à concentração de monóxido de carbono no interior do túnel, foram obtidos dados de um medidor localizado a 900 m da entrada da galeria Laranjeiras-Catumbi no dia 23 de março de 2001, uma sexta-feira, que podem ser vistos na Figura 23. Não se sabe sobre a condição de uso dos ventiladores, especialmente porque não é comum que os mesmos permaneçam ligados constantemente.

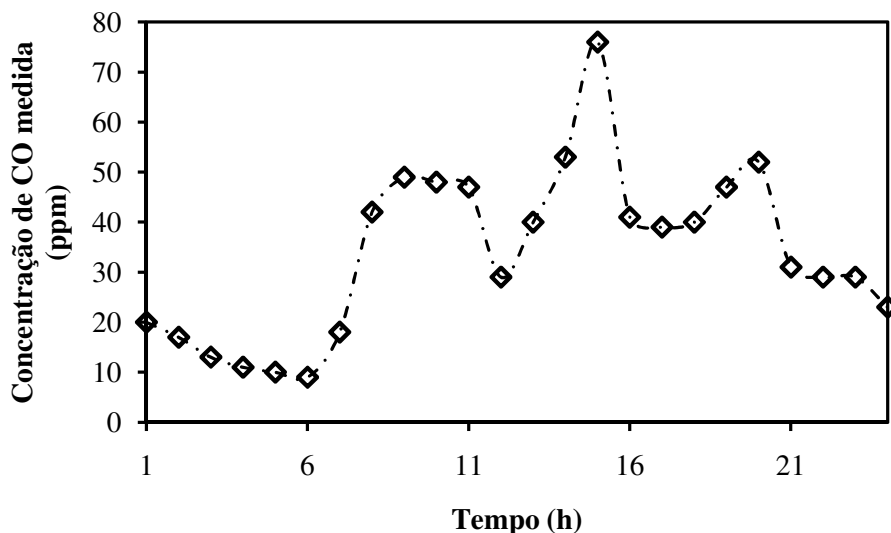


Figura 23 - Concentração de CO obtida pelo sensor localizado a 900 m da entrada do túnel ao longo do dia 23 de março de 2001

Com base no gráfico acima, foi obtida a média de 46 ppm de CO na faixa horária de interesse para este trabalho.

4.4. Geometria e malhas utilizadas

No pacote de geração da geometria (Design Modeler), o desenho do Túnel Santa Bárbara não pode ser feito em escala real, devido ao programa de desenho ter limitação de comprimento de cerca de 500 m da origem. Como o túnel tem comprimento de 1.357 m, foi utilizada uma escala de 1:4 para a geometria, que depois foi modificada para o tamanho real no CFX-Pre, quando foram inseridas as condições de contorno do problema. Nas figuras 24 e 25 pode ser vista a geometria utilizada para as simulações e na Tabela 12 as dimensões do túnel.

As pistas do lado direito mostradas na Figura 24 correspondem ao sentido Catumbi/Laranjeiras, enquanto as do lado esquerdo são a galeria Laranjeiras/Catumbi.

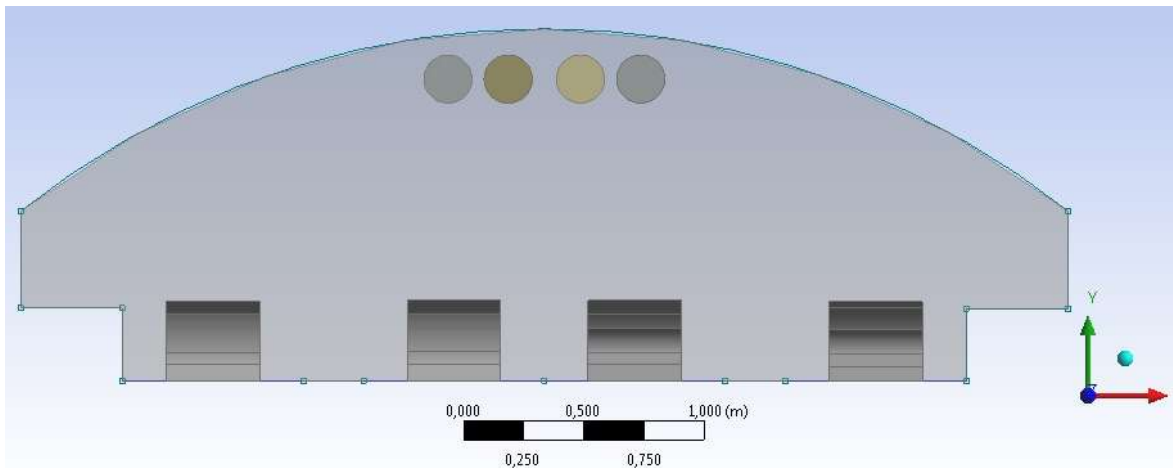


Figura 24 - Seção transversal do Túnel Santa Bárbara

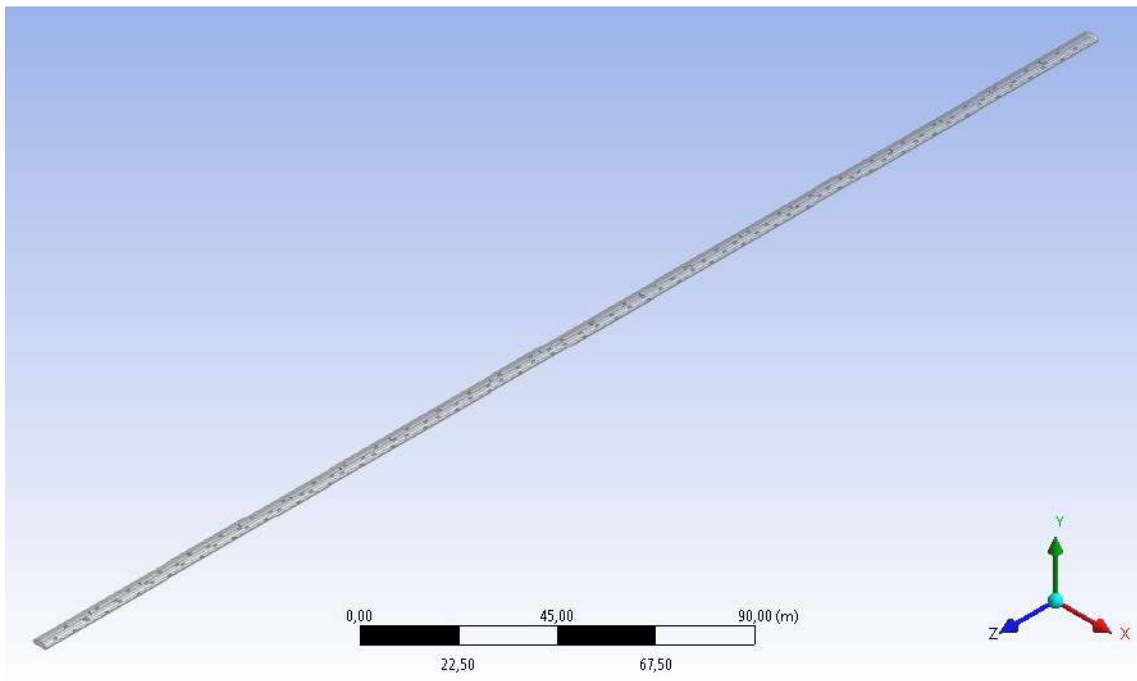


Figura 25 - Representação de todo o túnel em escala 1:4

Tabela 12 - Principais dimensões da geometria do Túnel Santa Bárbara

Variável	Dimensão
Comprimento	1.357 m
Largura total das faixas	14 m
Largura da “faixa móvel”	3 m
Altura máxima	5,83 m
Altura dos ventiladores	5,0 m
Diâmetro dos ventiladores	0,8 m
Área de cada fonte de emissão de CO	1 m ²

Os automóveis em movimento foram considerados como paredes móveis no CFX. Em cada galeria, são duas faixas com 3 m de largura nas quais estão representados os carros, igualmente espaçados. Este subdomínio foi chamado de “faixas móveis”. Entre essas faixas foi criada uma faixa fixa que contém quadrados de 1m^2 igualmente espaçados que representam a fonte de poluentes. O número de faces de emissão de poluentes é igual ao número de carros no túnel e a velocidade de CO que é emitida está ligada à velocidade dos automóveis, como já foi citado anteriormente.

Esse procedimento foi adotado devido à dificuldade de fazer a malha nos escapamentos dos automóveis. Como o tamanho deles seria muito menor que os outros elementos, um alto grau de refinamento da malha seria necessário, aumentando muito seu tamanho e o esforço computacional.

Na Figura 26, as faixas fixas estão representadas em verde e as faces que funcionam como fontes de poluentes estão em vermelho. Em azul, são destacados os carros e as faixas móveis, enquanto os ventiladores estão marcados na cor preta.

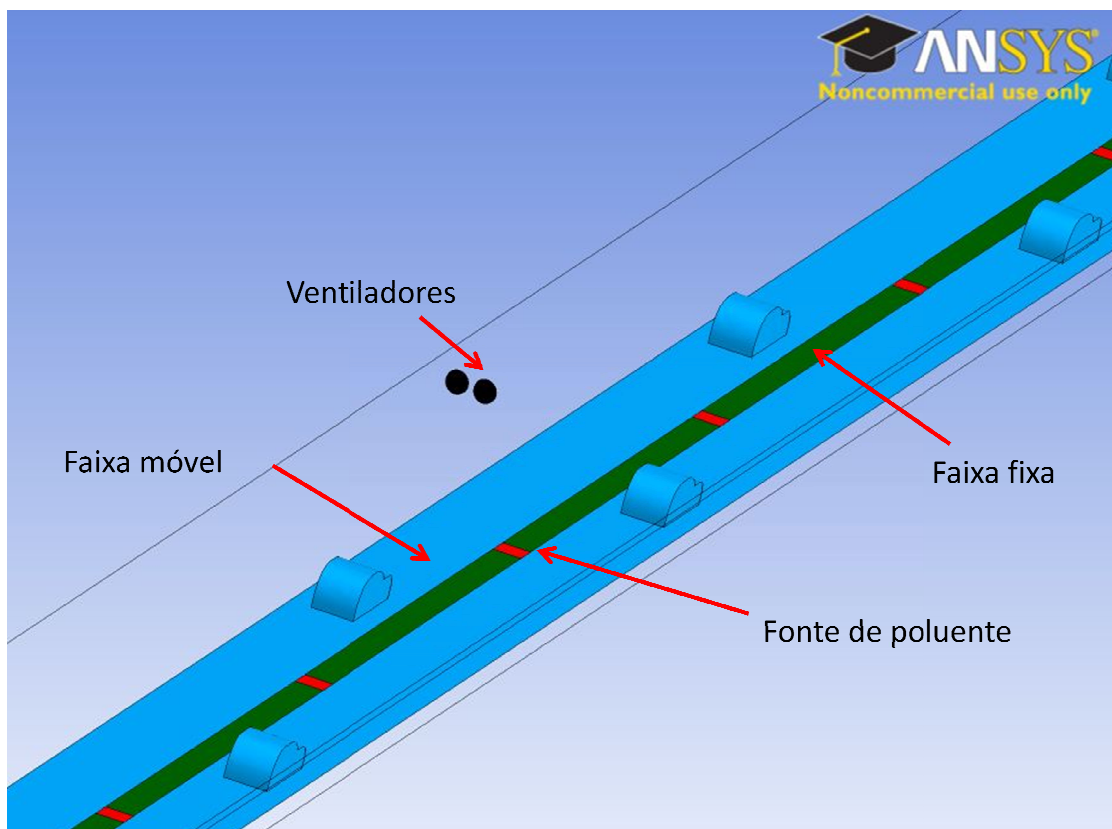


Figura 26 - Representação dos subdomínios

A malha foi gerada no ICEM, sendo composta por elementos tetraédricos. Foi realizado teste de malha para a geometria que representa apenas uma das galerias do túnel e os parâmetros usados para a geração da malha no ICEM foram replicados para gerar a malha do túnel completo, com as duas galerias. O teste de malha será mostrado no item 4.6.

4.5. Parâmetros de simulação

Os parâmetros foram utilizados no CFX-Pre para definir o problema e possibilitar a solução numérica do mesmo. O fluido considerado para o escoamento foi uma mistura de composição variável composta por ar e CO, com propriedades provenientes do banco de dados do programa.

Na entrada do túnel, foi considerada a condição *opening*, que possibilita a recirculação de fluido no subdomínio, e a presença apenas de ar, de forma a supor que ar limpo entre pelo túnel. Na fonte de poluentes foi considerado, por simplificação, apenas a entrada de CO, adotando-se a condição de entrada *inlet*.

Quando apenas metade do túnel foi simulada, foi usada condição de saída (*outlet*) a pressão atmosférica na saída do túnel. Nas simulações com as duas galerias, admitiu-se a saída com a mesma condição que a entrada (*opening*).

Para os ventiladores, foi definida a opção *gradiente zero* para a fração mássica, já que o túnel possui vários ventiladores igualmente distribuídos. Essa função é usada na condição de contorno das saídas dos ventiladores, pois é necessário informar a fração mássica do fluido que está entrando no domínio. Assim, como condição de contorno é considerada igual a fração mássica da região próxima à face normal dos ventiladores.

A concentração de poluente varia com a posição e, dessa forma, não é possível inserir diretamente os valores das frações mássicas de ar e CO. O uso dessa função no CFX foi importante para garantir o balanço de massa para cada componente desta região.

Tabela 13 - Parâmetros usados nas simulações

Parâmetro	Condição adotada
Pressão de referência	1 atm
Condição de contorno: Entrada	<i>Opening</i> , somente ar
Condição de contorno: Saída	Pressão relativa: 0 atm
Condição de contorno: Sucção dos ventiladores	<i>Outlet</i>
Condição de contorno: Descarga dos ventiladores	<i>Inlet</i> , Gradiente zero
Condições iniciais do fluido no domínio (frações mássicas)	Ar: 1 CO: 0
Velocidade dos carros (faixas móveis)	60 km/h
Velocidade de emissão do poluente	$9,61 \times 10^{-5}$ m/s
Velocidade do ar nos ventiladores	0 – 15,5 – 31 m/s
Modelo de turbulência	k-Epsilon
Modelo de mistura	Homogêneo (mistura ideal)
Tipo de simulação	Estacionária
Regime de escoamento	Subsônico
Escala de tempo do fluido	Automático
Critério de convergência	MAX (Resíduo máximo)
Resíduo máximo permitido	1×10^{-9}
Discretização no domínio	Upwind

A velocidade do ar nos ventiladores foi usada como variável, alternando entre a velocidade operacional fornecida pela CVE, a metade da mesma e ventiladores desligados.

4.6. Teste de malha

Foi realizado um teste de malha na geometria do túnel com apenas uma galeria com o objetivo de determinar a melhor malha a ser usada nas simulações, de forma a aliar a precisão requerida com o menor esforço computacional. As características das malhas testadas são apresentadas na Tabela 14.

Tabela 14 - Características das malhas usadas no teste de malha

	M1	M2	M3
Número de elementos	1.714.228	4.902.428	8.157.641
Número de nós	303.715	868.086	1.398.794

Nas figuras abaixo podem ser avaliadas as três malhas testadas em diferentes posições do túnel.

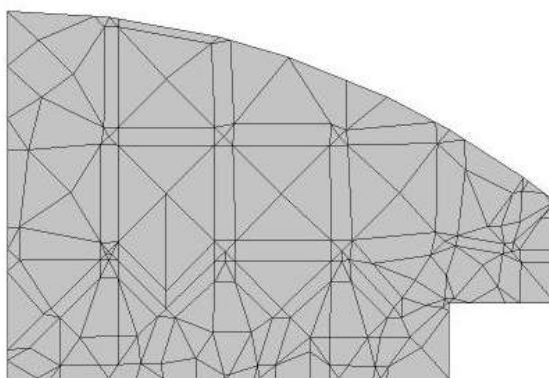


Figura 27 - Plano transversal da malha 1 a 271,4 m da entrada do túnel

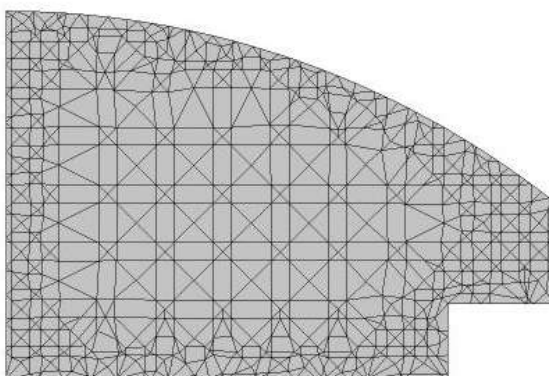


Figura 28 - Plano transversal da malha 2 a 271,4 m da entrada do túnel

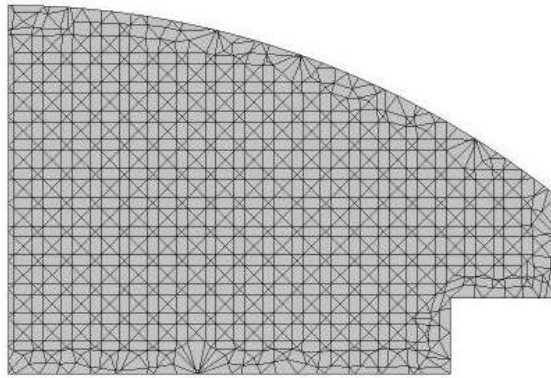


Figura 29 - Plano transversal da malha 3 a 271,4 m da entrada do túnel

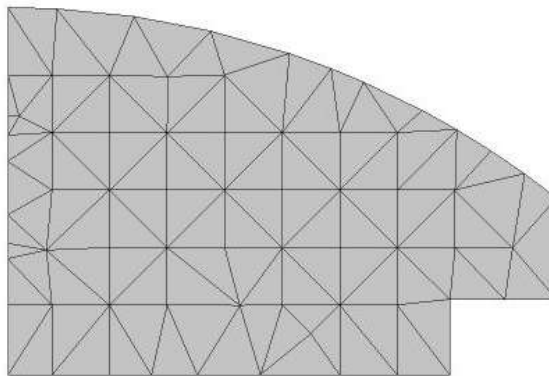


Figura 30 - Plano transversal da malha 1 na saída do túnel

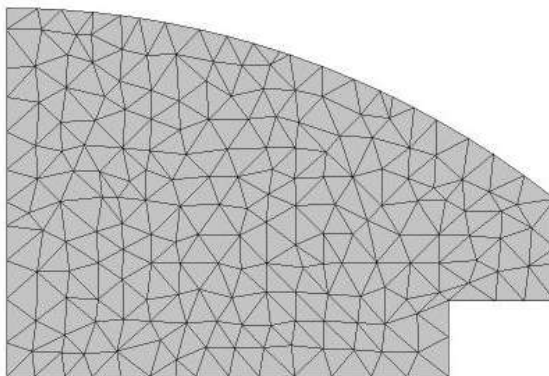


Figura 31 - Plano transversal da malha 2 na saída do túnel

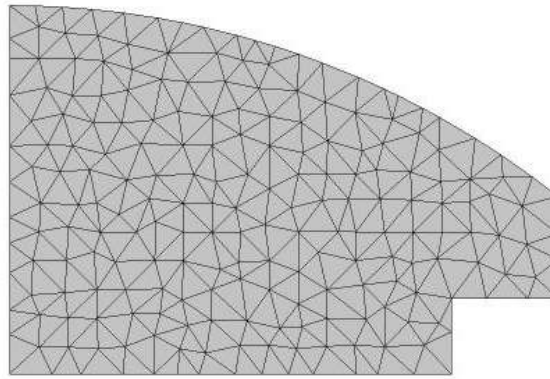


Figura 32 - Plano transversal da malha 3 na saída do túnel

Foram realizadas simulações com as três malhas, considerando a velocidade do ar como 31 m/s (100%). Com o auxílio das funções do CFX-Post, foram calculadas as concentrações médias em diferentes posições do túnel, mostradas na Tabela 15. Uma comparação entre os valores obtidos revela que praticamente não houve diferença na concentração média de CO.

Tabela 15 - Concentração média de monóxido de carbono em diferentes posições para as malhas testadas

Posição (m)	Concentração média de CO no plano transversal (ppm)		
	M1	M2	M3
271,4	2,6	2,7	2,7
542,8	5,5	5,5	5,5
814,2	8,6	8,6	8,6
1085,6	11,4	11,5	11,4
1357	14,3	14,3	14,2

Ao longo do túnel, o perfil de concentração obtido também foi semelhante para as três malhas, como pode ser visto na Figura 34. Esta figura foi obtida com base em uma reta ao longo do comprimento do túnel (Figura 33), situada a 0,325 m do centro do túnel e a uma altura de 2,5 m, que foi considerada como representativa da concentração média de CO.

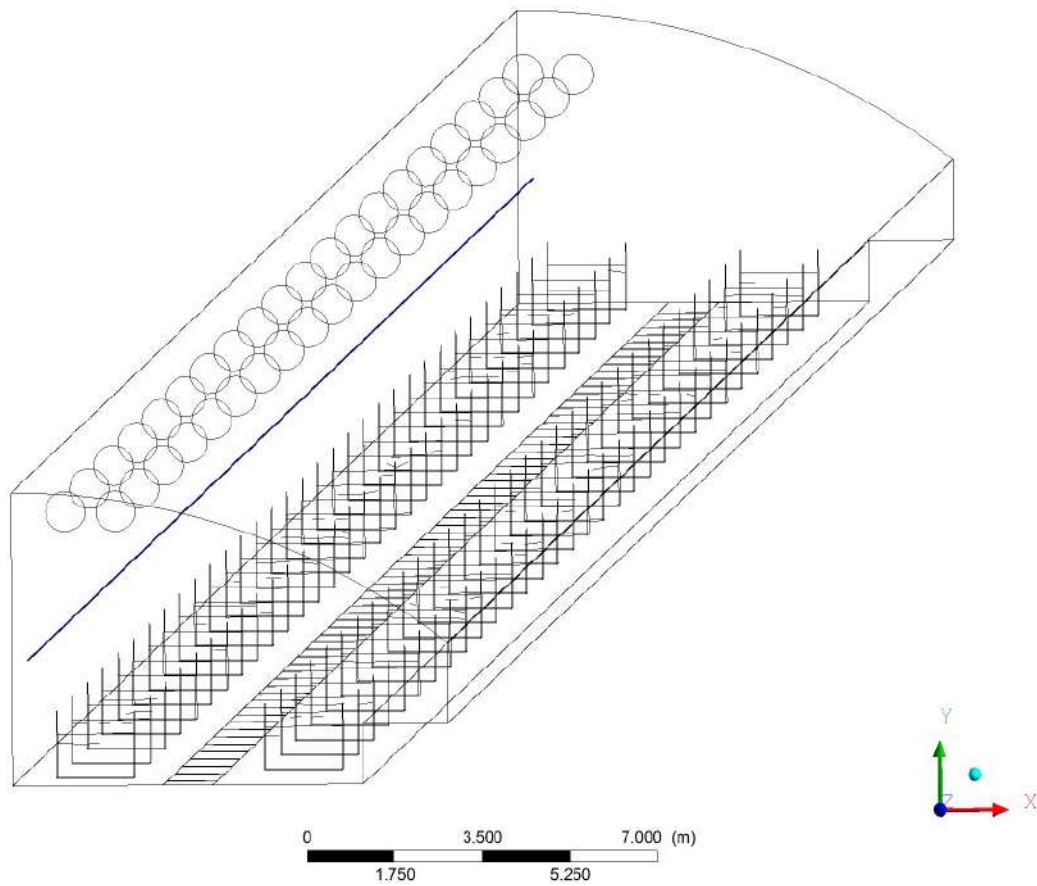


Figura 33 - Linha considerada como representativa da concentração média de CO

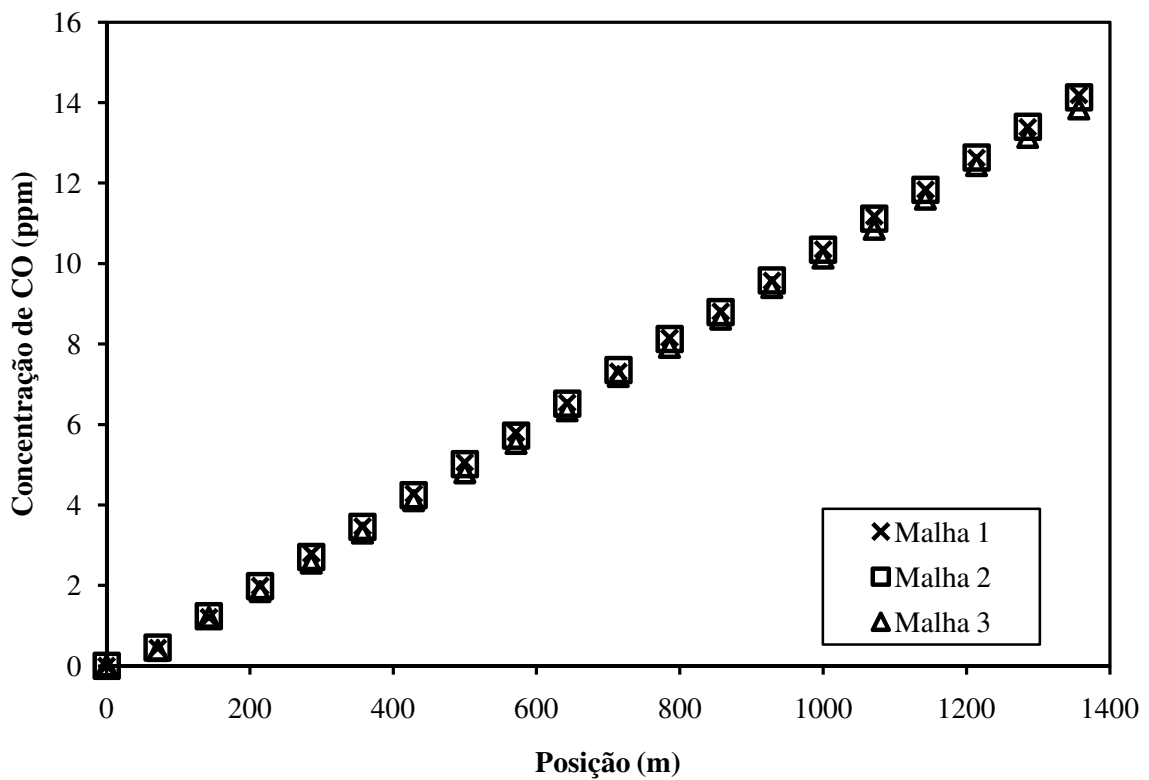


Figura 34 - Perfil de concentração de CO ao longo do túnel para as malhas testadas

A malha 2 foi a escolhida para ser usada nas simulações, apesar dos resultados apresentados na Tabela 15 serem semelhantes. Para tal decisão, levou-se em consideração que a malha 1 possui elementos muito grandes, o que implicaria em menor precisão na concentração de CO calculada em dado ponto do túnel.

As malhas usadas para as simulações apresentam as características da Tabela 16.

Tabela 16 - Propriedades das malhas utilizadas nas simulações

	Túnel inteiro	Metade do túnel
Número de elementos	7.254.546	4.902.428
Número de nós	1.439.114	868.086

Na figura abaixo podem ser vistos alguns detalhes da malha, como ventiladores, carro e fonte de poluente.

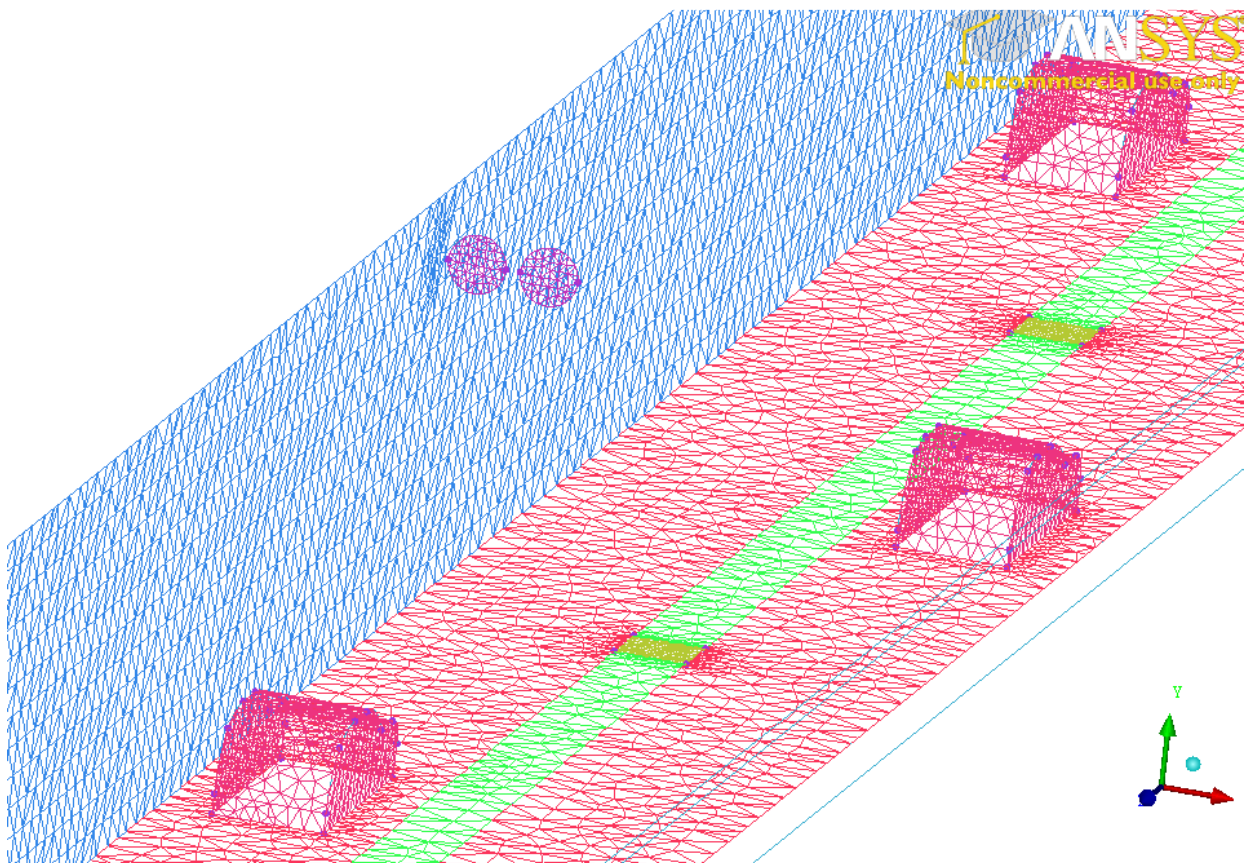


Figura 35 - Detalhe da malha usada para as simulações

5. Resultados e Discussão

Foram obtidos resultados referentes às simulações de apenas uma galeria do túnel (metade do túnel) e do túnel inteiro.

As concentrações de monóxido de carbono obtidas correspondem à função do CFX-Post correspondente à fração volumétrica de CO multiplicada por 10^6 , para que sejam obtidas em ppm.

5.1. Metade do túnel

As simulações realizadas usando diferentes velocidades do ar levaram a resultados que permitem avaliar a relevância da utilização de ventiladores. Deve-se ressaltar que o efeito pistão é um grande responsável pela dissipação de poluentes.

Foi observada uma dependência linear da concentração de monóxido de carbono com a posição no interior do túnel, como pode ser visto na Figura 36. Esta figura foi obtida com base na reta da Figura 33.

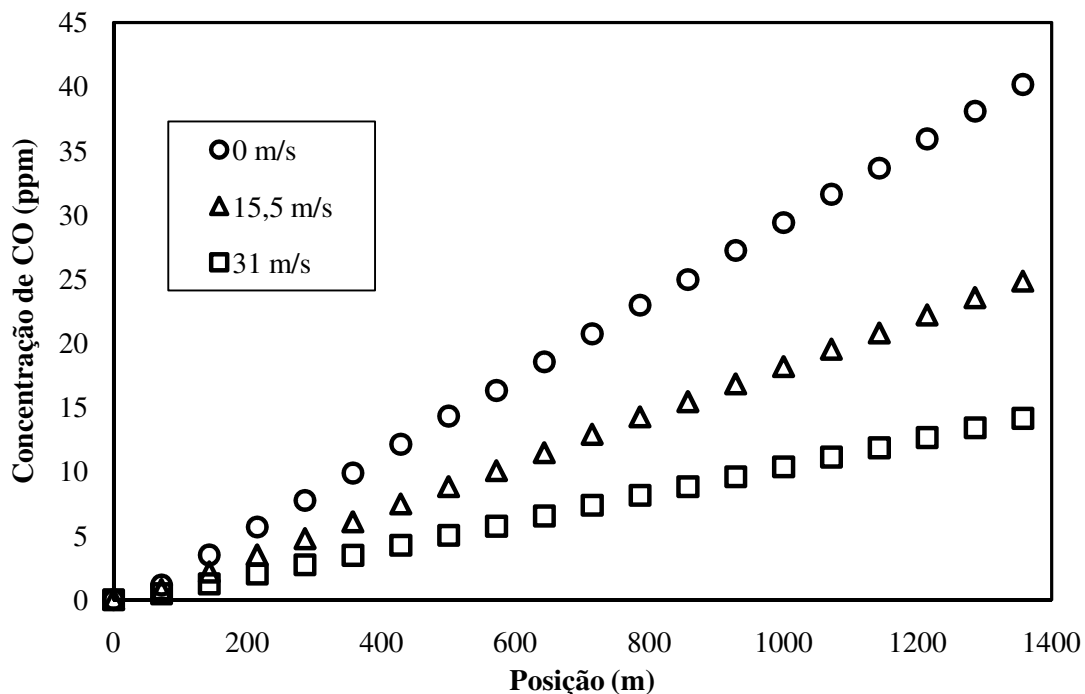


Figura 36 - Distribuição de concentração de monóxido de carbono ao longo de uma galeria do Túnel Santa Bárbara a diferentes velocidades do ar

Como esperado, quando os ventiladores estão ligados e fornecem uma velocidade do ar de 31 m/s, a dispersão de CO é maior, o que leva à menor concentração desse poluente na saída do túnel.

É interessante notar que, mesmo com os ventiladores desligados (condição de velocidade de 0 m/s), a concentração de monóxido de carbono no túnel não é suficientemente alta para causar efeitos na saúde humana. Isso ocorre devido à movimentação de veículos, a 60 km/h e em apenas um sentido, permitir que ar limpo entre e seja empurrado ao longo do túnel, removendo o poluente.

A Tabela 17 apresenta as diferentes concentrações médias de CO, em dado plano transversal, encontradas em função da velocidade do ar. Os resultados estão de acordo com o esperado, já que com o aumento da distância em relação à entrada do túnel, maior é a concentração de CO prevista e, quanto maior a velocidade do ar fornecida pelos ventiladores, menor é a concentração de CO.

Tabela 17 - Concentração média de CO, em planos transversais, em diferentes posições do túnel, como uma função da velocidade do ar

Posição (m)	Concentração de CO (ppm)		
	0 m/s	15,5 m/s	31 m/s
271,4	7,4	4,7	2,7
542,8	15,6	9,7	5,5
814,2	24,3	15,1	8,6
1085,6	32,4	20,1	11,5
1357	40,5	25,1	14,3

No ponto de medição do Túnel Santa Bárbara, a concentração média para o período de interesse é de 46 ppm, como foi visto na Figura 23. Para a simulação realizada com ventiladores desligados, foi obtida a concentração de 26,9 ppm, que difere do valor real.

Essa diferença está relacionada a aspectos como o uso do fator de emissão de um combustível com propriedades diferentes da gasolina brasileira, que é inferior e libera mais poluentes, a falta de conhecimento sobre a condição dos ventiladores nos dados de origem, entre outros.

Nas figuras a seguir pode ser avaliada a diferença no perfil de concentração de CO em diferentes posições do túnel. Para facilitar a comparação entre as imagens, foi utilizada a mesma escala de cores, que mostra sempre que o uso da velocidade do ar de 31 m/s levou às menores concentrações.

Como a fonte de poluente está localizada na parte inferior do túnel, foi esperado que a concentração fosse maior nesse local.

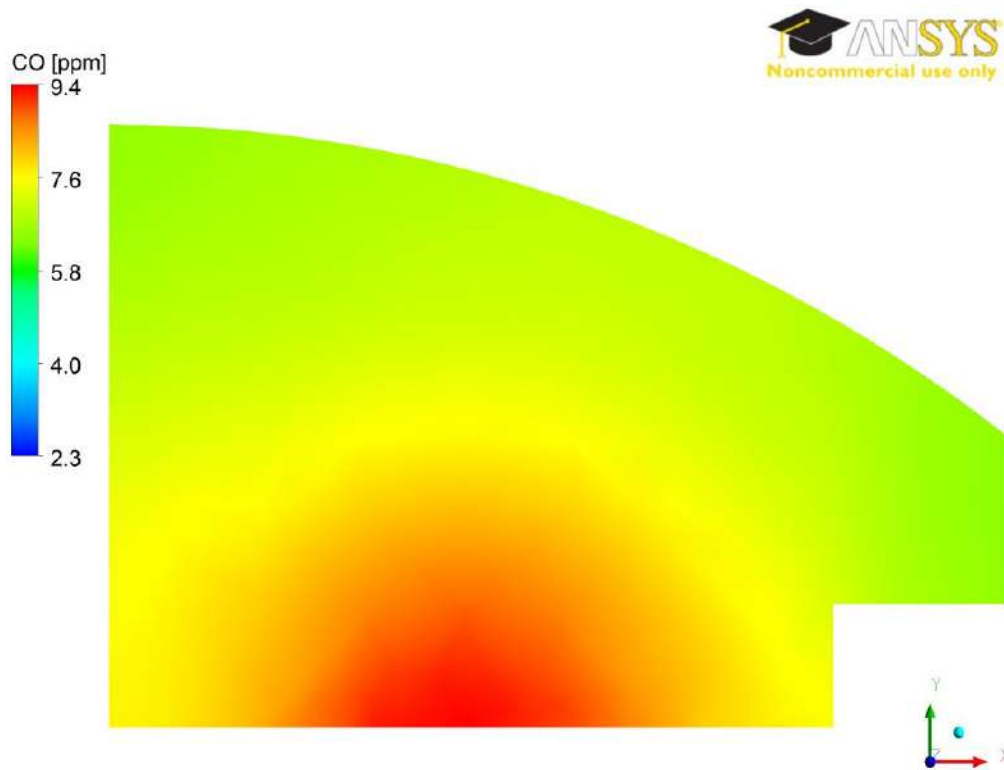


Figura 37 - Perfil de concentração de CO a 271,4 m da entrada com os ventiladores desligados

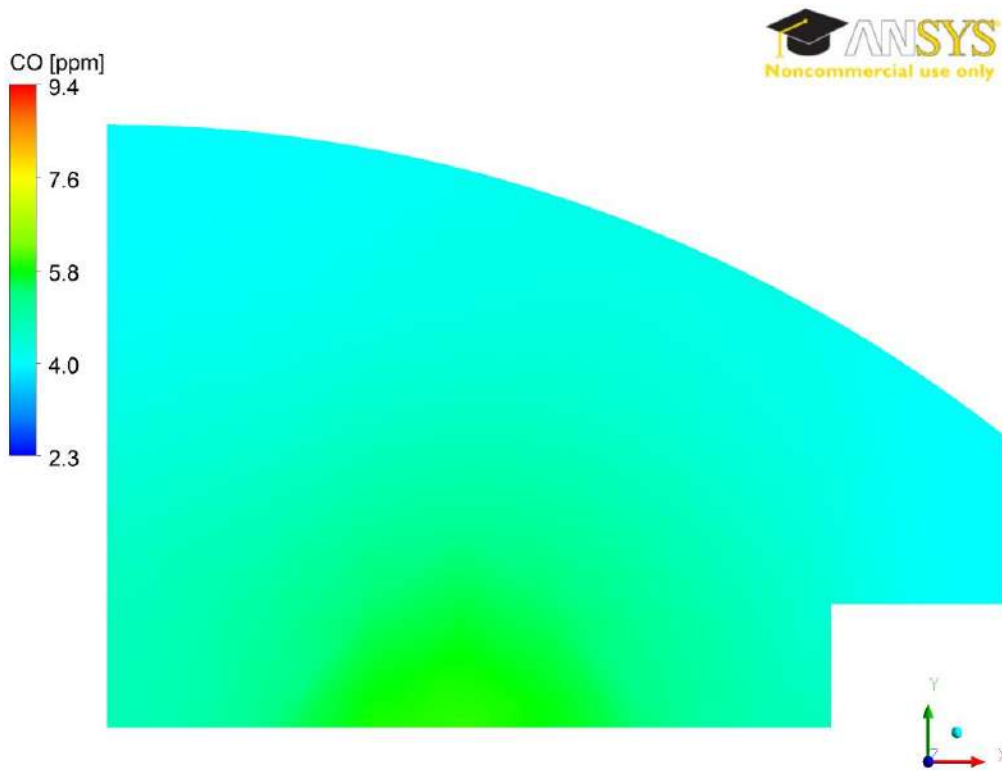


Figura 38 - Perfil de concentração de CO a 271,4 m da entrada com velocidade do ar de 15,5 m/s

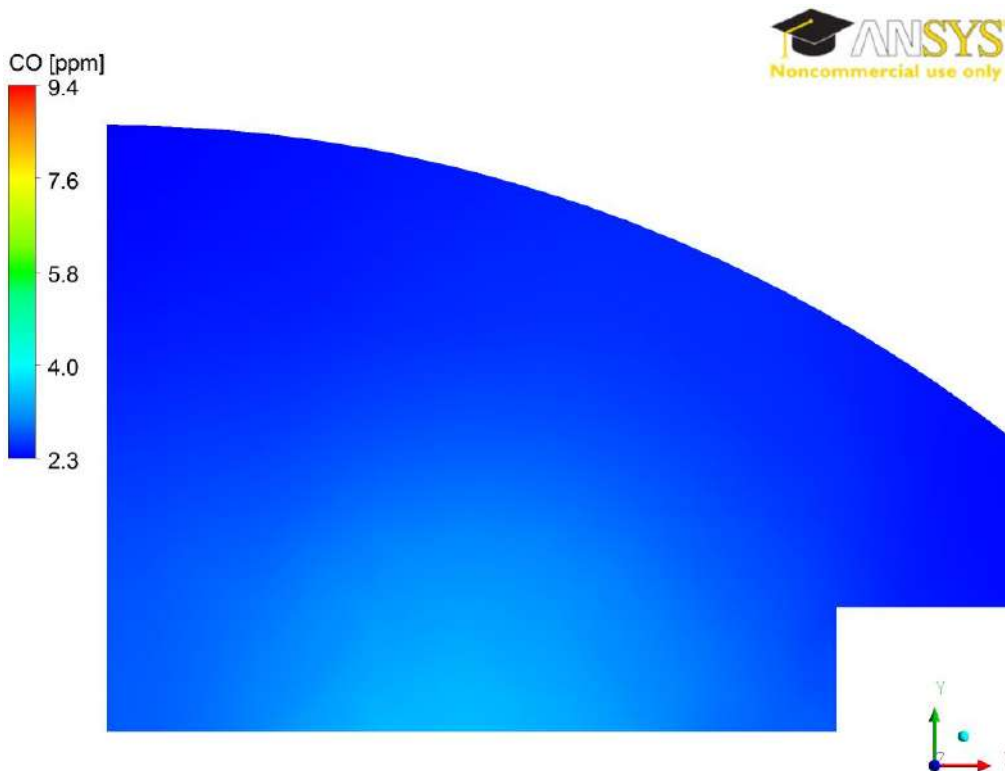


Figura 39 - Perfil de concentração de CO a 271,4 m da entrada com velocidade do ar de 31 m/s

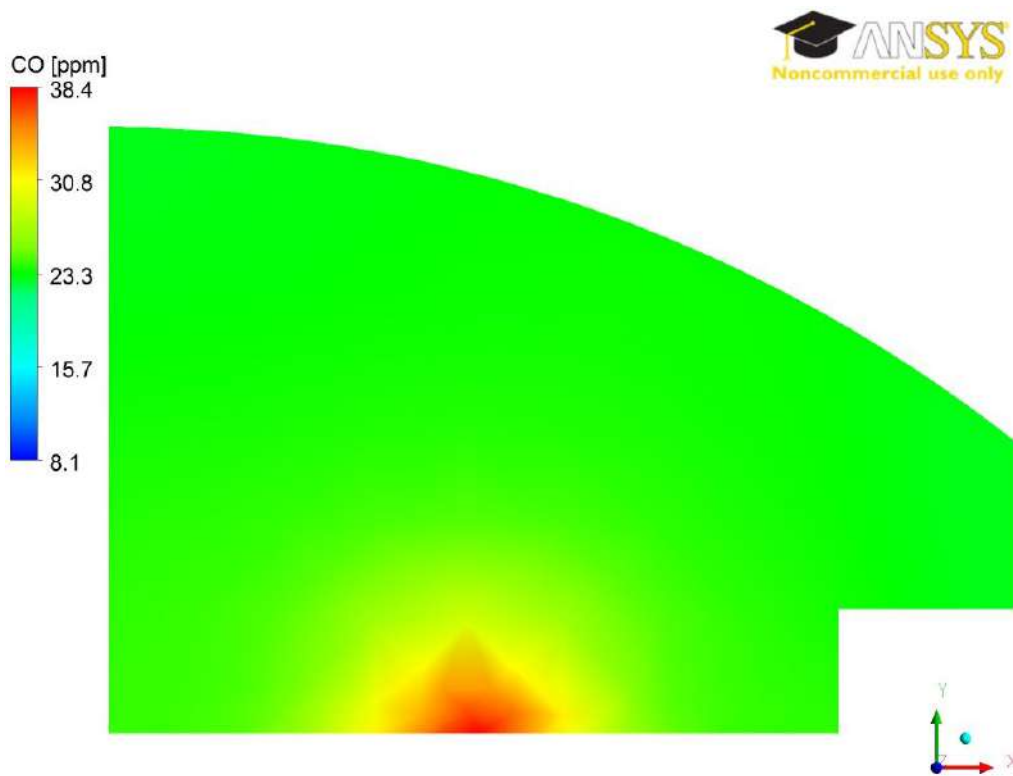


Figura 40 - Perfil de concentração de CO a 814,2 m da entrada com os ventiladores desligados

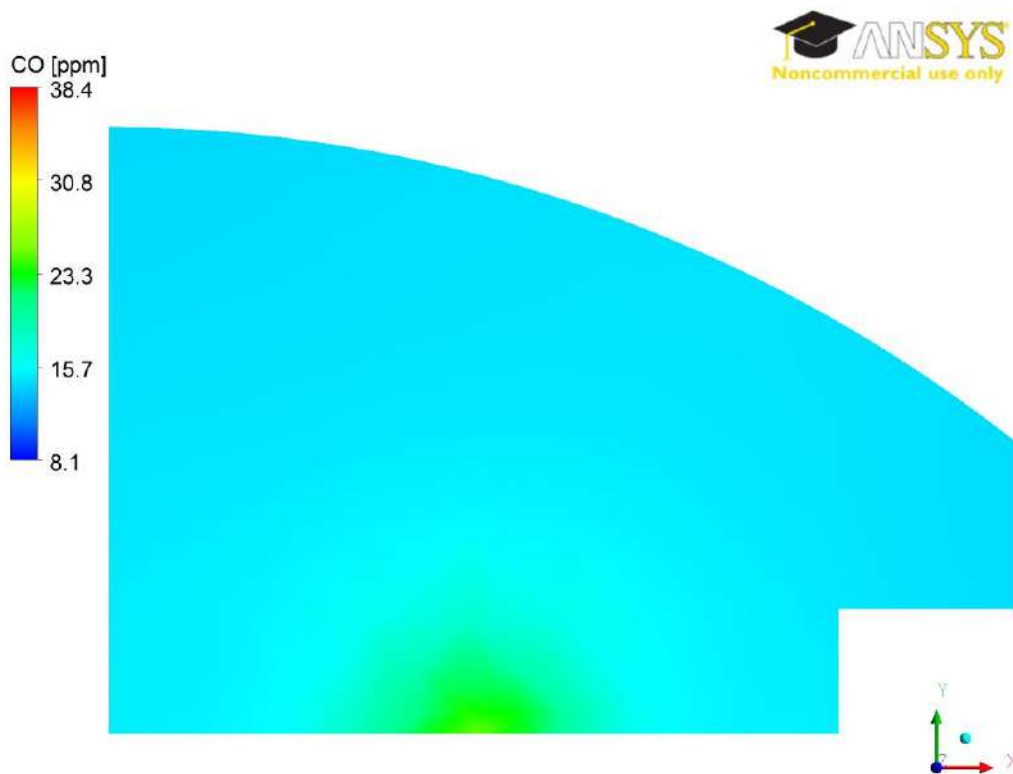


Figura 41 - Perfil de concentração de CO a 814,2 m da entrada com velocidade do ar de 15,5 m/s

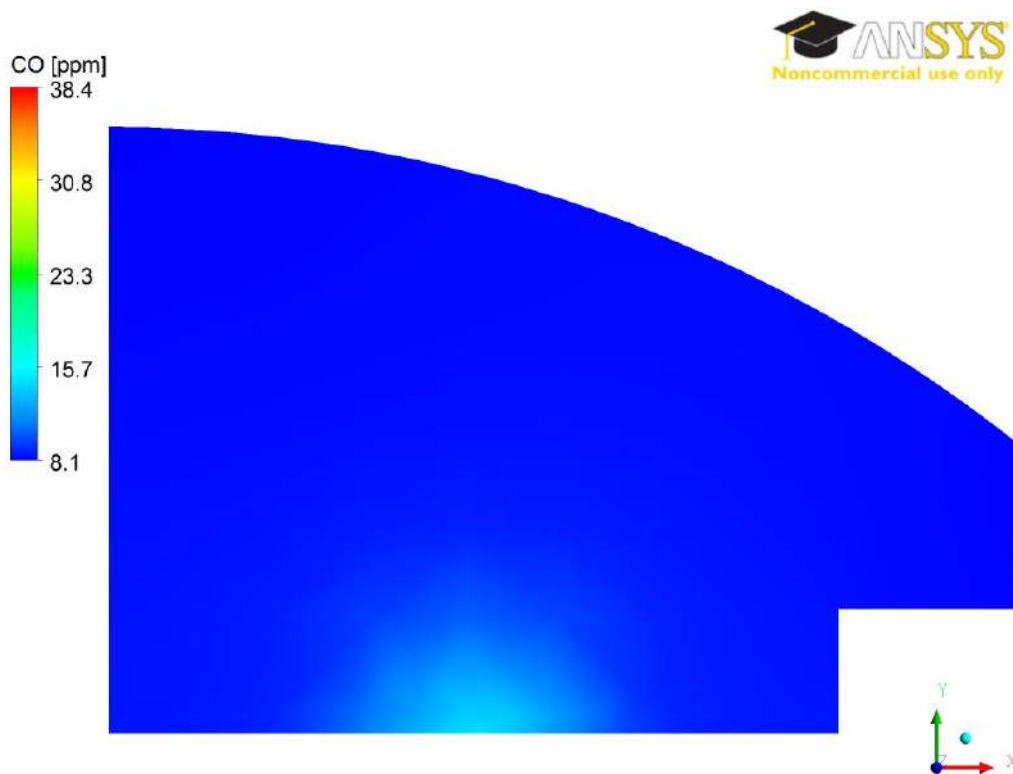


Figura 42 - Perfil de concentração de CO a 814,2 m da entrada com velocidade do ar de 31 m/s

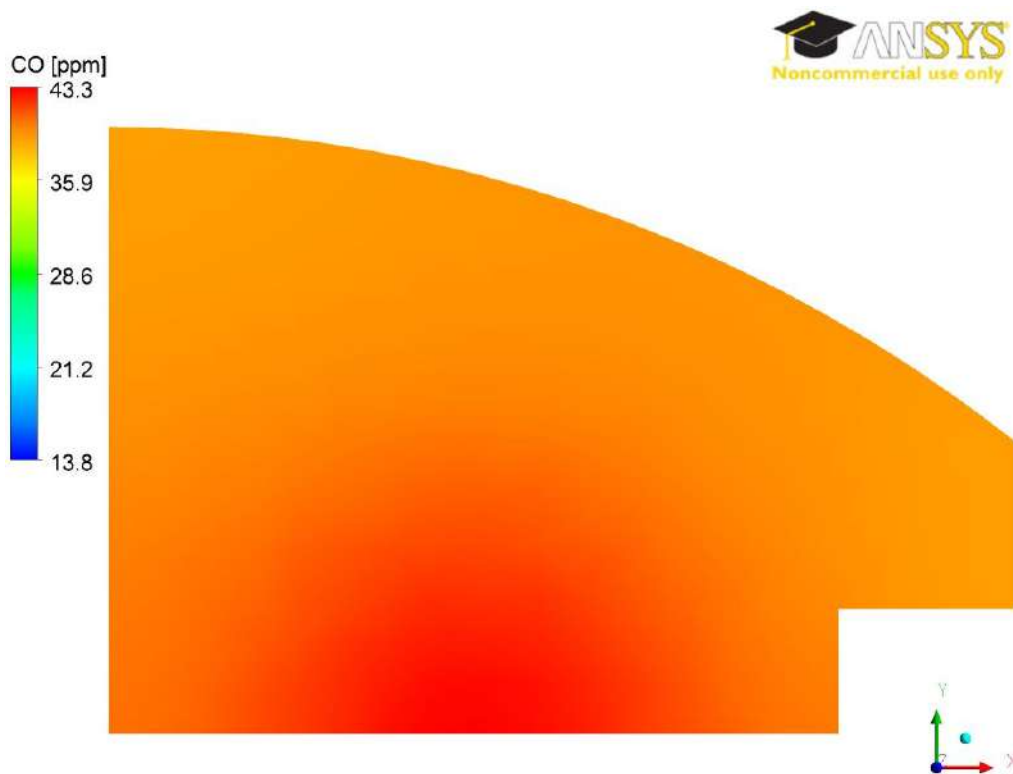


Figura 43 - Perfil de concentração de CO na saída com os ventiladores desligados

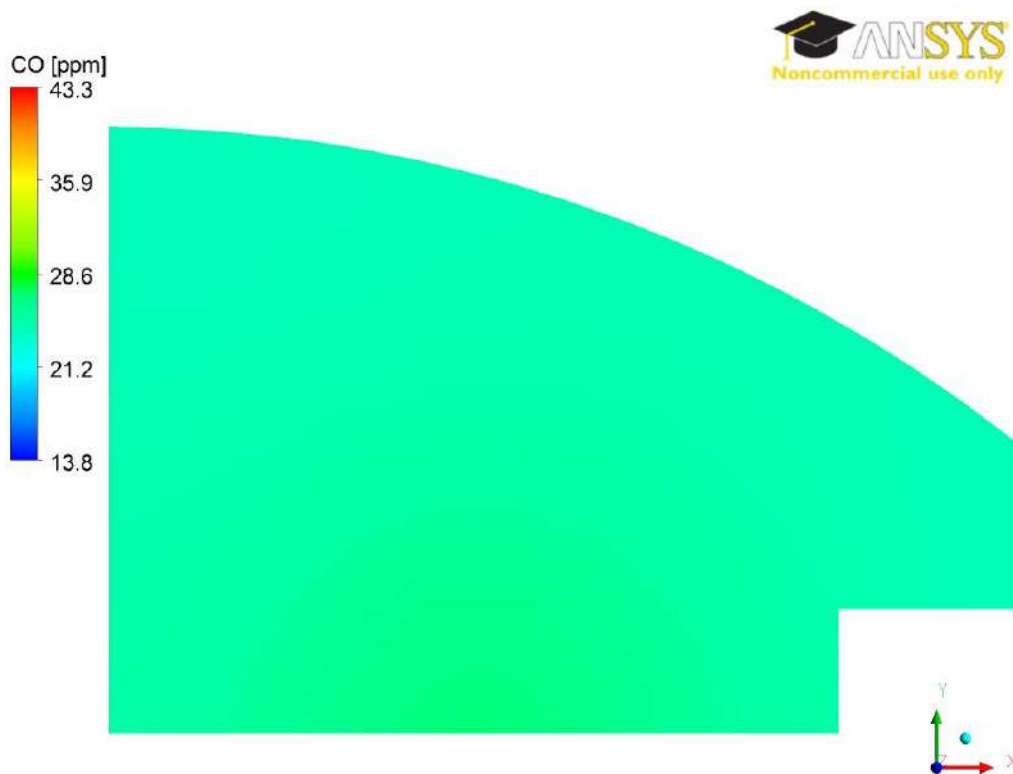


Figura 44 - Perfil de concentração de CO na saída com velocidade do ar de 15,5 m/s

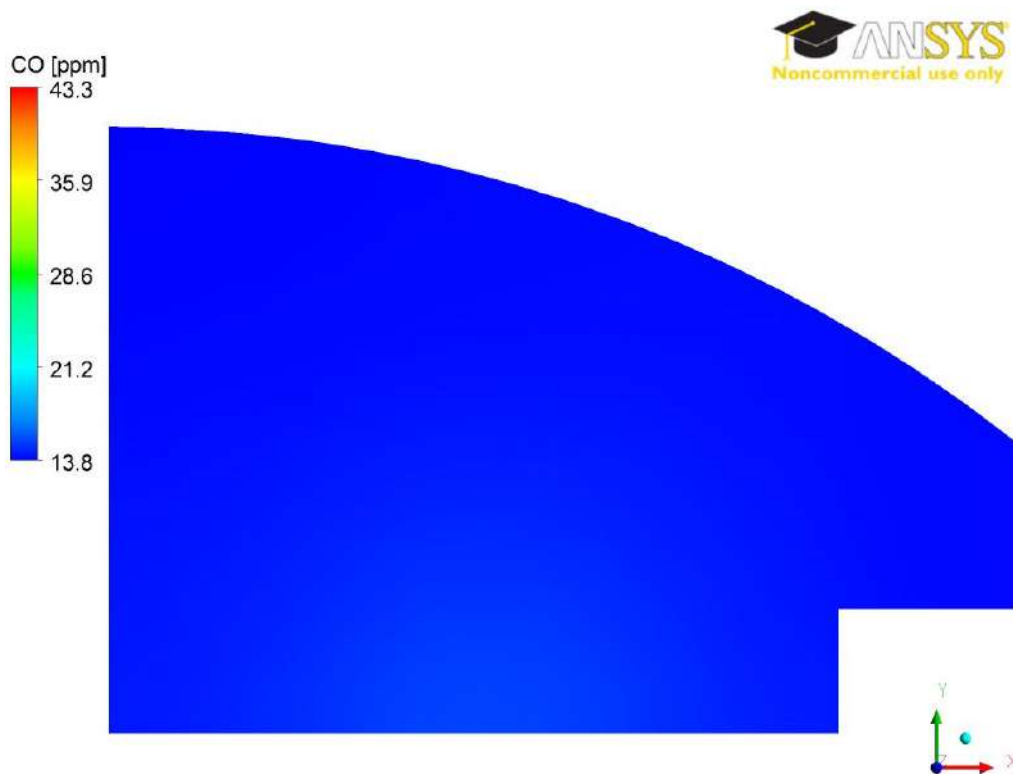


Figura 45 - Perfil de concentração de CO na saída com velocidade do ar de 31 m/s

A Figura 46 apresenta o perfil longitudinal de distribuição da concentração de CO nas diferentes velocidades do ar. Como pode ser observado, quando os ventiladores estão desligados há maior gradiente de concentração ao longo do túnel.

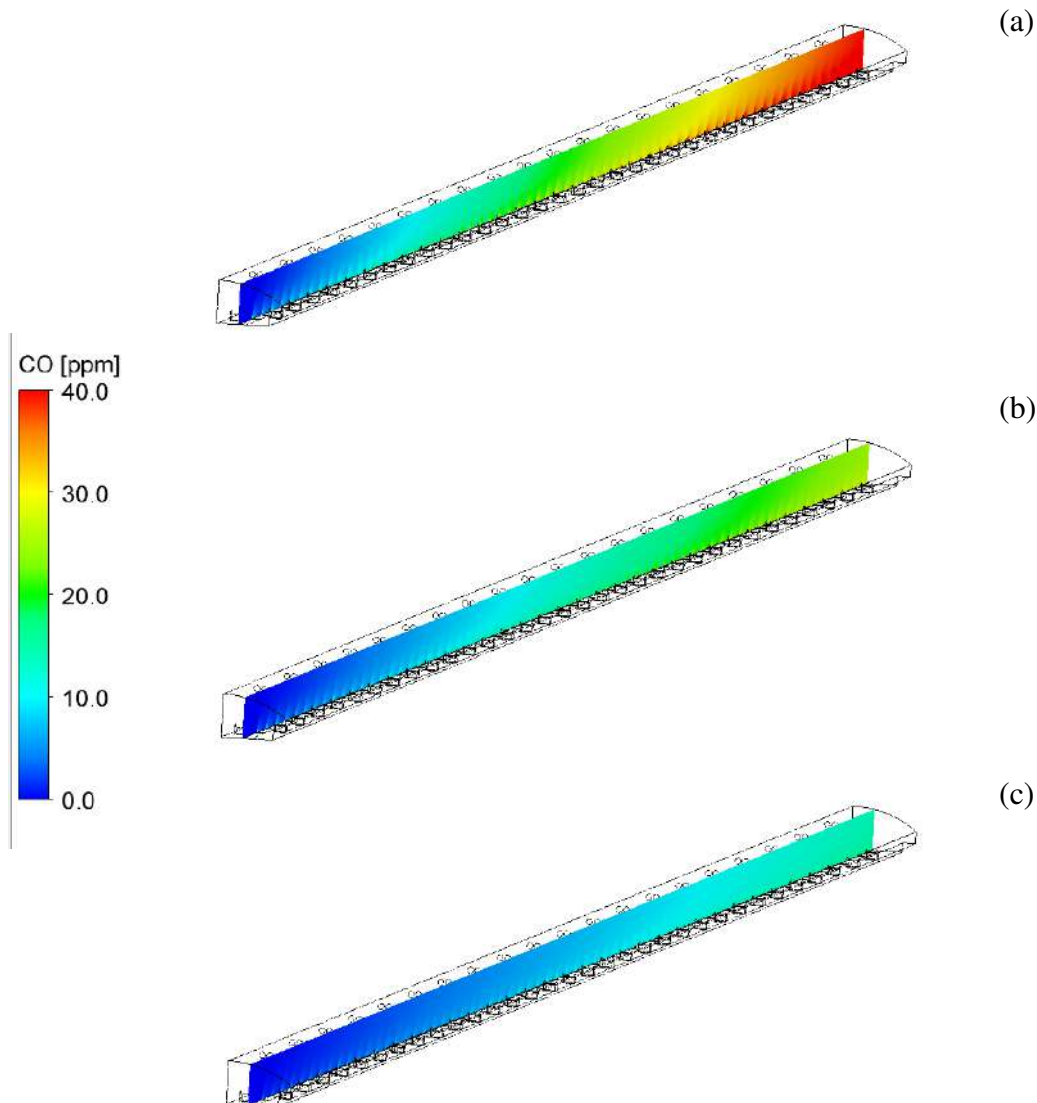


Figura 46 - Comparação entre a distribuição de concentração de monóxido de carbono ao longo do túnel. A figura (a) apresenta a situação de ventiladores desligados, enquanto a (b) e a (c) refletem velocidades do ar de 15,5 e 31 m/s, respectivamente.

A Tabela 18 apresenta a velocidade média do ar na entrada do túnel para as três velocidades de ar fornecidas pelos ventiladores. Na condição onde a ventilação forçada é nula é possível observar a consequência apenas do movimento dos carros.

Tabela 18 - Velocidade do ar na entrada do túnel nas simulações realizadas

Velocidade do ar fornecida pelos ventiladores (m/s)	Velocidade média do ar na entrada do túnel (m/s)
0	3,8
15,5	6,2
31	10,8

O perfil de velocidade do ar ao longo do eixo vertical do túnel também foi avaliado, como pode ser visto na Figura 48. A origem dos dados corresponde a uma reta situada a 1,5 m da parede e a 271,4 m da entrada, como na Figura 47.

Quando os ventiladores estão desligados, a maior velocidade do ar está na parte inferior do túnel, próxima às faixas, e é ocasionada pelo movimento dos veículos. Com os ventiladores operando, além da influência dos carros, a velocidade do ar é maior no topo de túnel, devido ao sistema de ventilação.

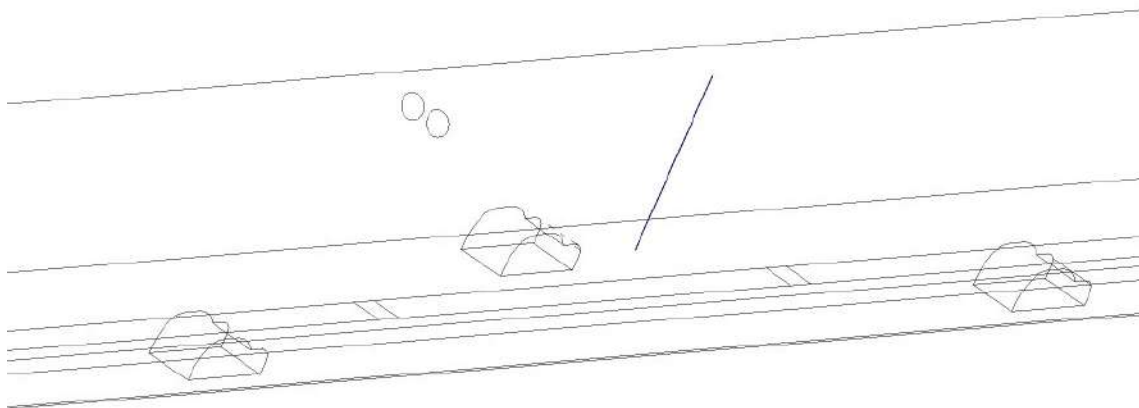


Figura 47 - Linha vertical usada para avaliar a velocidade do ar

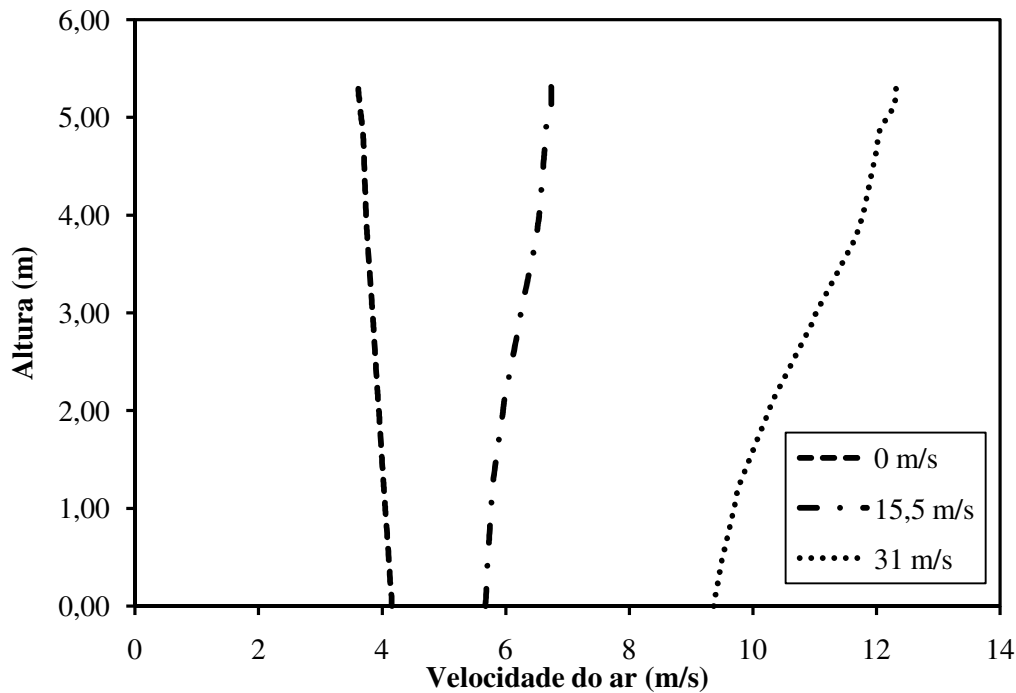


Figura 48 - A variação da velocidade do ar com a altura para as diferentes condições de velocidade do ar nos ventiladores

5.2. Túnel inteiro

As simulações para o túnel inteiro foram realizadas considerando que o túnel não possuísse o septo divisor construído na década de 90, usando as condições atuais de fluxo de veículos e velocidade média. Da mesma forma que as simulações para uma galeria, foi estudada a variação da velocidade do ar fornecida pelos ventiladores entre 0, 50 e 100% de utilização, o que corresponde às velocidades de 0; 15,5 e 31 m/s.

Vale ressaltar que optou-se por empregar os ventiladores soprando em um único sentido, de forma a existir um sentido preferencial de dispersão de poluentes. Avaliou-se que, ao se empregar os ventiladores de cada galeria soprando em direções opostas, isto provocaria uma grande recirculação, gerando uma concentração muito alta de poluentes.

Como já foi dito, ao avaliar um plano transversal mostrado neste trabalho, as pistas do lado direito correspondem ao sentido Catumbi/Laranjeiras.

A distribuição de concentração de CO ao longo do túnel pode ser avaliada na Figura 50. O gráfico foi gerado através de 25 pontos distribuídos ao longo do túnel em

uma linha horizontal localizada na mesma posição que a reta usada para as simulações anteriores. A reta avaliada situa-se a 0,325 m do centro do túnel e a uma altura de 2,5 m, como pode ser visto na Figura 49.

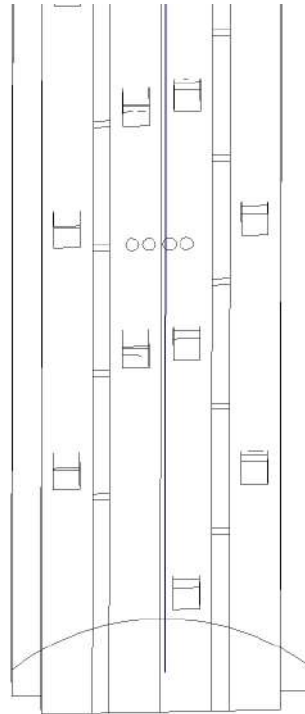


Figura 49 – Linha usada para avaliar a concentração de CO ao longo do túnel

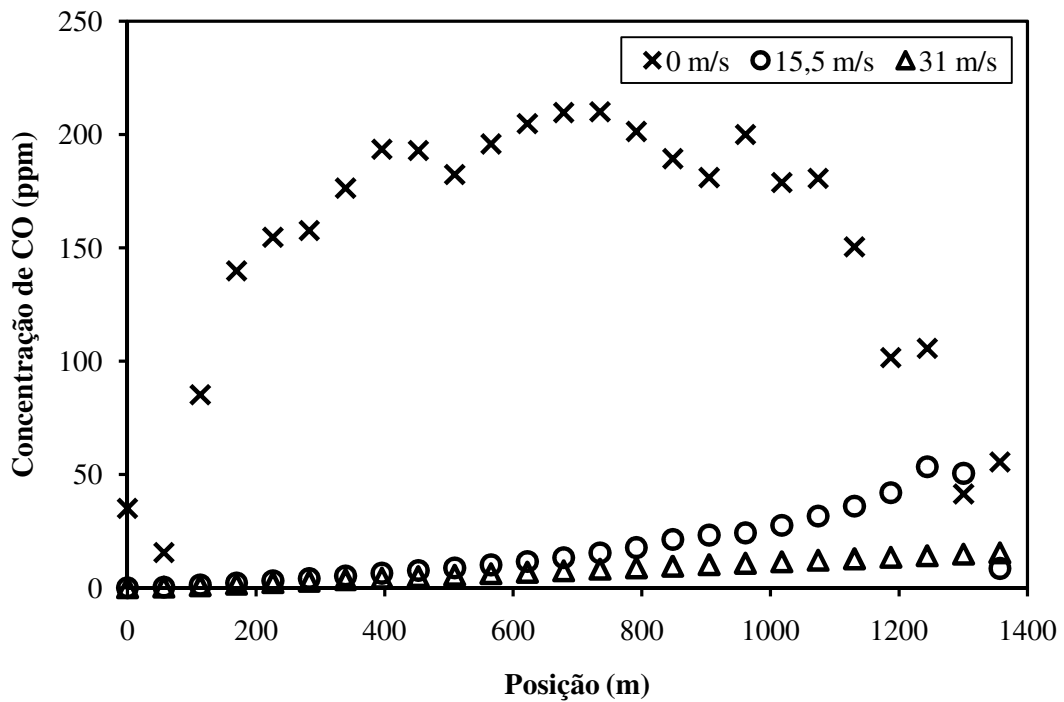


Figura 50 - Distribuição do perfil de concentração de CO ao longo do túnel

Na simulação com velocidade do ar de 0 m/s, ocorreram grandes oscilações devido à recirculação ocorrida, que será detalhada adiante (Figura 67). Como não há ventilação, a única fonte de quantidade de movimento é a velocidade dos carros, que se movem em sentidos opostos, o que gera uma recirculação do ar no túnel, dificultando a remoção do poluente. Por este motivo, a maior concentração de CO está localizada na região central do túnel.

A Tabela 19 mostra as concentrações médias de CO ao longo do túnel. Como já foi avaliado na figura acima, ocorre acúmulo de poluente no meio do túnel na situação sem ventilação mecânica, o que poderia afetar a saúde humana na exposição por determinado período de tempo.

Tabela 19 - Concentração média de CO, em planos transversais, em diferentes posições do túnel, como uma função da velocidade do ar.

Posição (m)	Concentração de CO (ppm)		
	0 m/s	15,5 m/s	31 m/s
0	38,8	0,0	0,0
271,4	154,3	4,2	2,9
542,8	200,4	10,0	6,1
814,2	204,3	19,2	9,3
1085,6	165,8	31,6	12,6
1357	50,3	24,2	15,6

Com os ventiladores fornecendo uma velocidade do ar de 15,5 m/s, no final do túnel o efeito de diluição é evidenciado, pois ocorre redução da concentração de CO pela entrada de ar limpo motivada pelo movimento dos carros no sentido oposto ao do carregamento de poluente

Usando a velocidade de 31 m/s, o movimento oposto de carros não afeta a dispersão de poluentes motivada pelo sistema de ventilação e a concentração de CO é baixa em todo o túnel. Para a linha avaliada, foi obtido um perfil característico ao caso de uma galeria com carros em apenas um sentido.

Nas figuras a seguir podem ser visualizadas as diferenças de distribuição de concentração em diferentes posições. É importante observar que foi utilizada escala

diferente para a situação sem ventilação, pois as concentrações maiores neste caso influenciam na interpretação dos outros resultados.

Nas figuras correspondentes às extremidades do túnel, a região azul representa ar limpo entrando, enquanto a outra metade corresponde à saída rica em poluente.

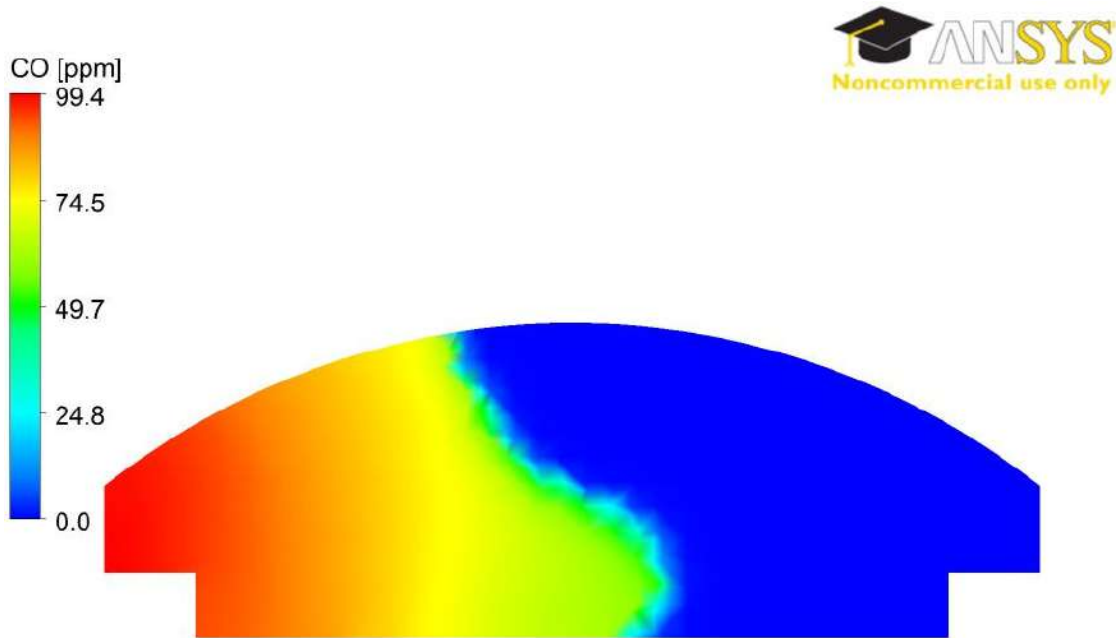


Figura 51 - Perfil de concentração de CO na entrada no sentido Catumbi/Laranjeiras com os ventiladores desligados

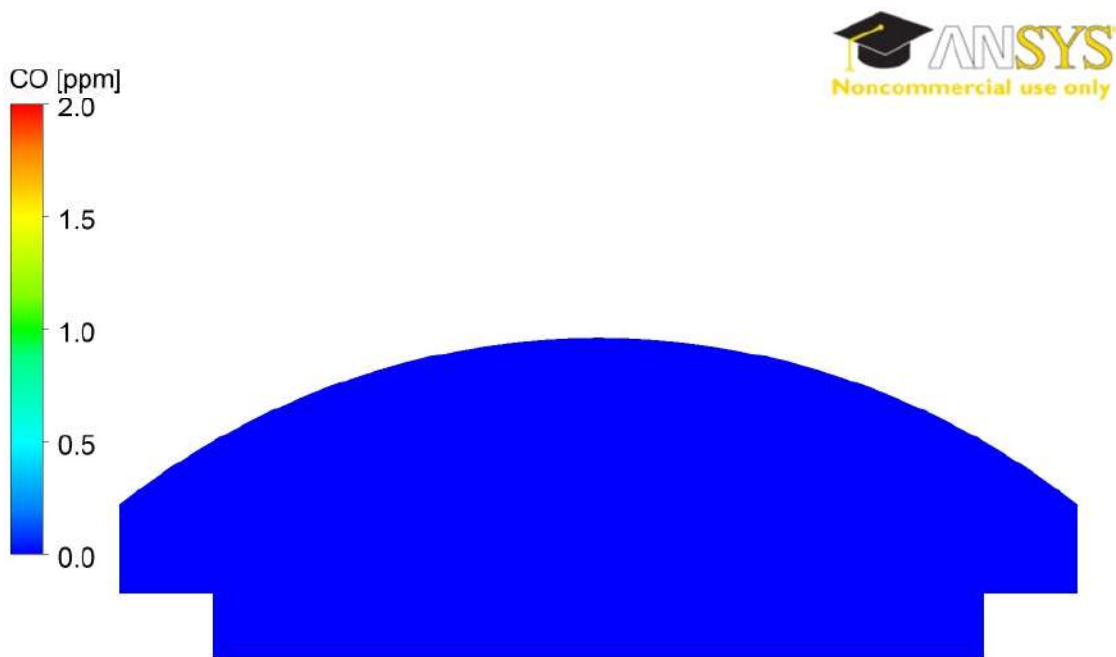


Figura 52 - Perfil de concentração de CO na entrada no sentido Catumbi/Laranjeiras com velocidade do ar de 15,5 m/s

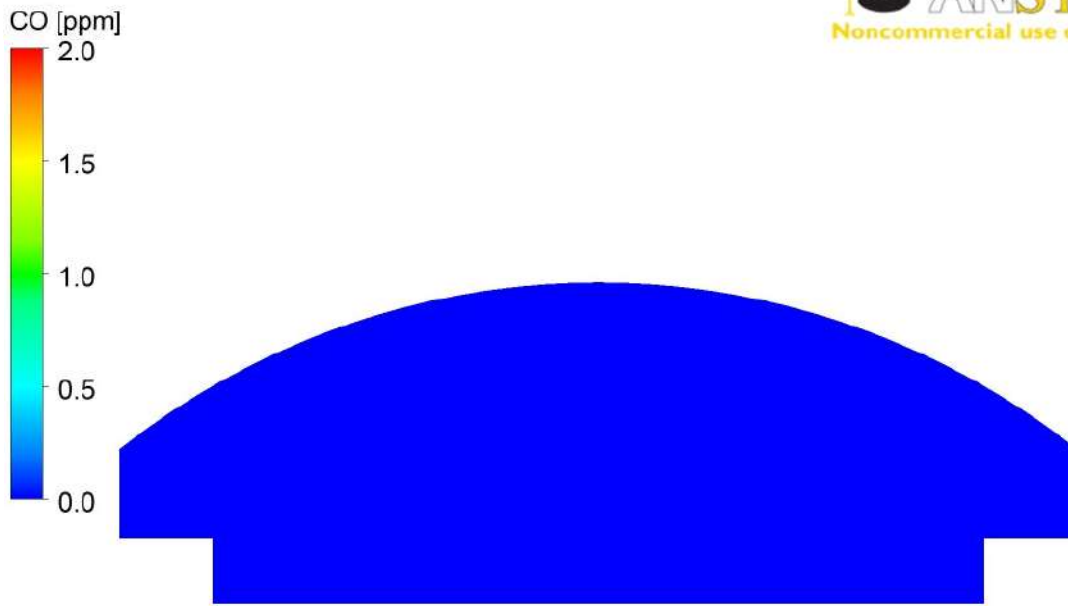


Figura 53 - Perfil de concentração de CO na entrada no sentido Catumbi/Laranjeiras com velocidade do ar de 31 m/s

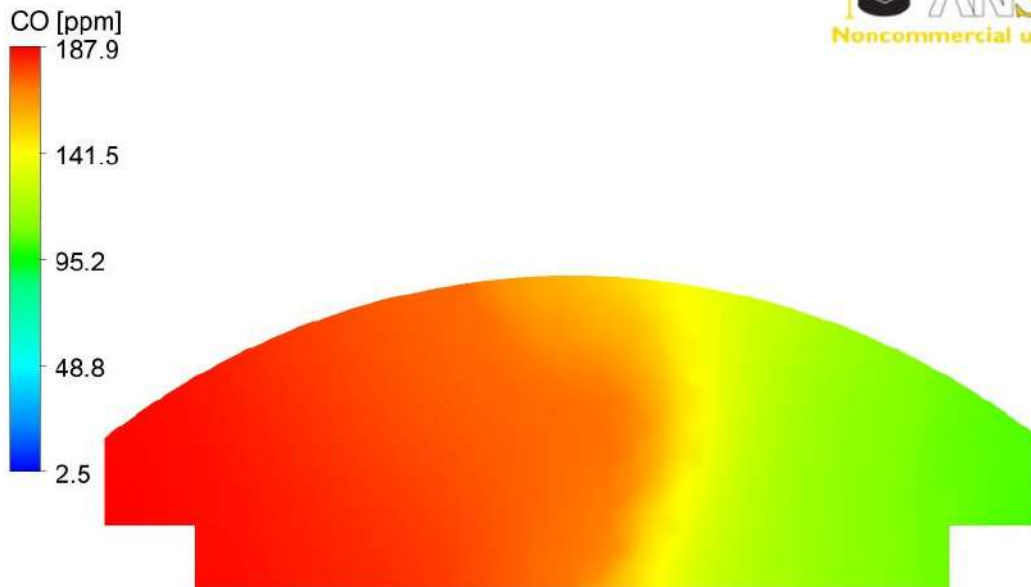
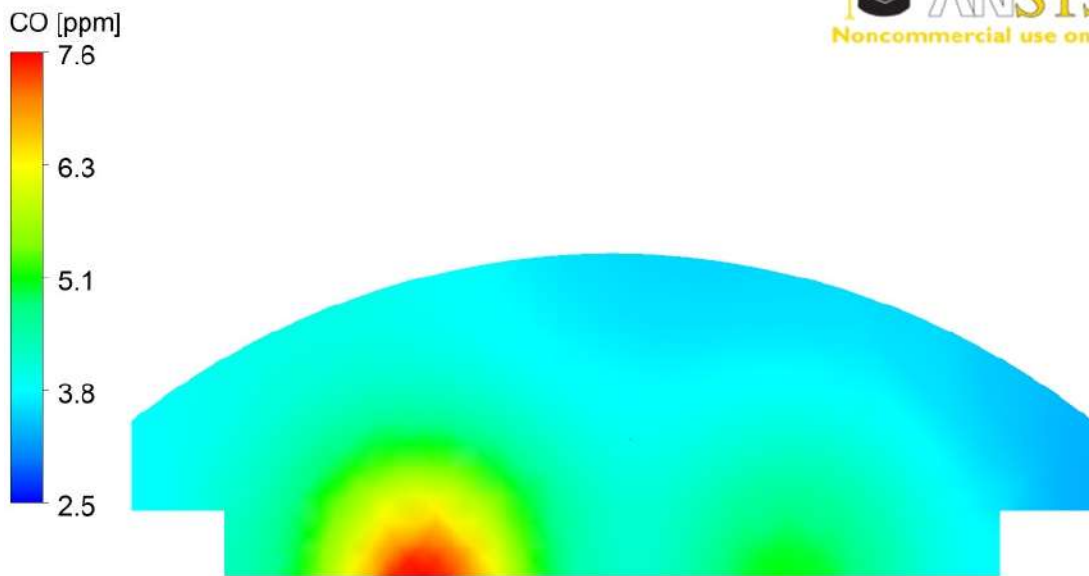


Figura 54 - Perfil de concentração de CO a 271,4 m da entrada no sentido Catumbi/Laranjeiras com os ventiladores desligados



com velocidade do ar de 15,5 m/s

Figura 55 - Perfil de concentração de CO a 271,4 m da entrada no sentido Catumbi/Laranjeiras com velocidade do ar de 31 m/s



Figura 56 - Perfil de concentração de CO a 814,2 m da entrada no sentido Catumbi/Laranjeiras com os ventiladores desligados

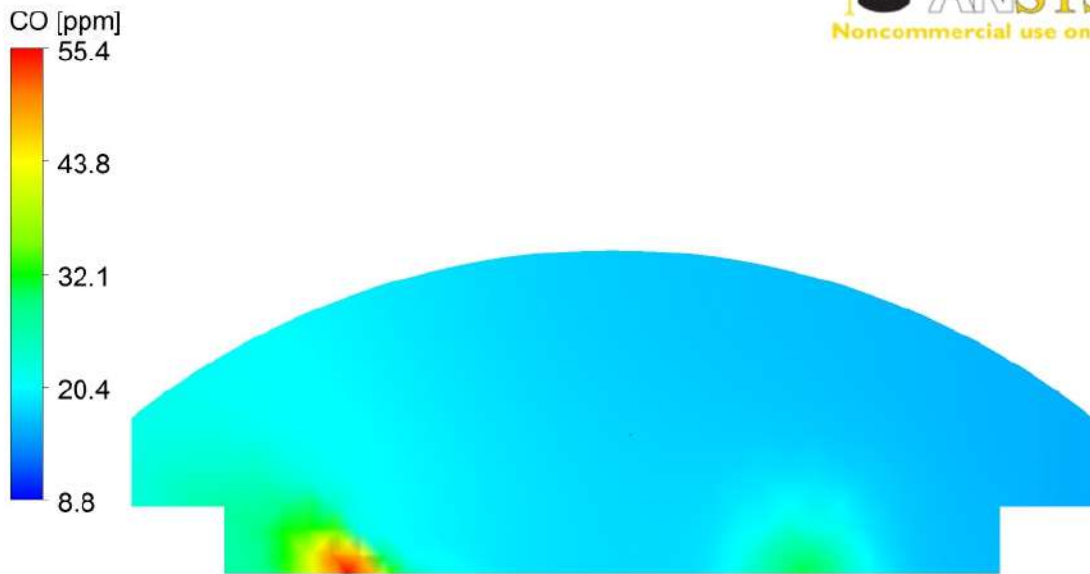


Figura 57 - Perfil de concentração de CO a 814,2 m da entrada no sentido Catumbi/Laranjeiras com velocidade do ar de 15,5 m/s

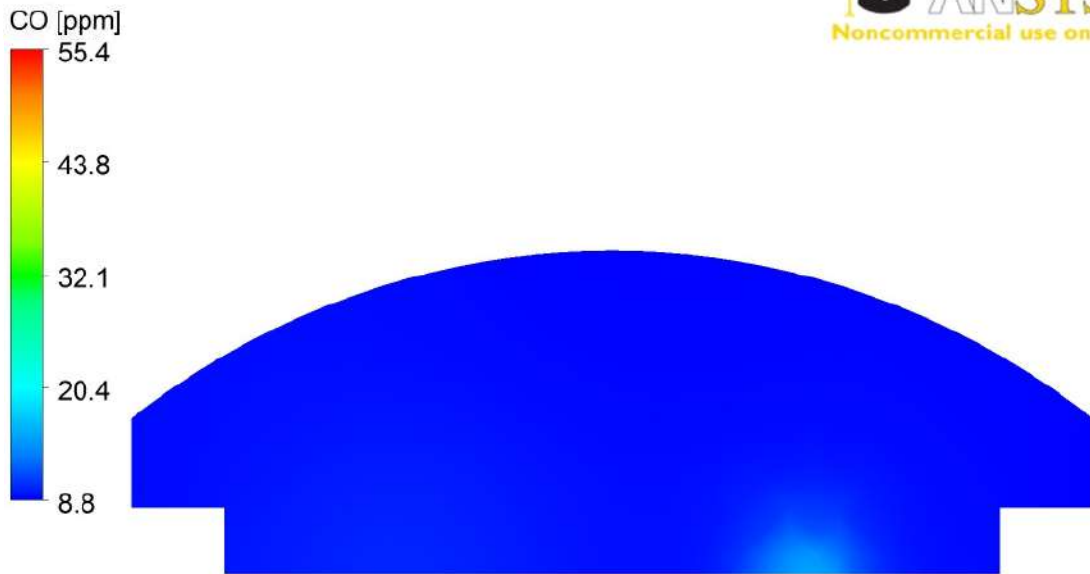


Figura 58 - Perfil de concentração de CO a 814,2 m da entrada no sentido Catumbi/Laranjeiras com velocidade do ar de 31 m/s

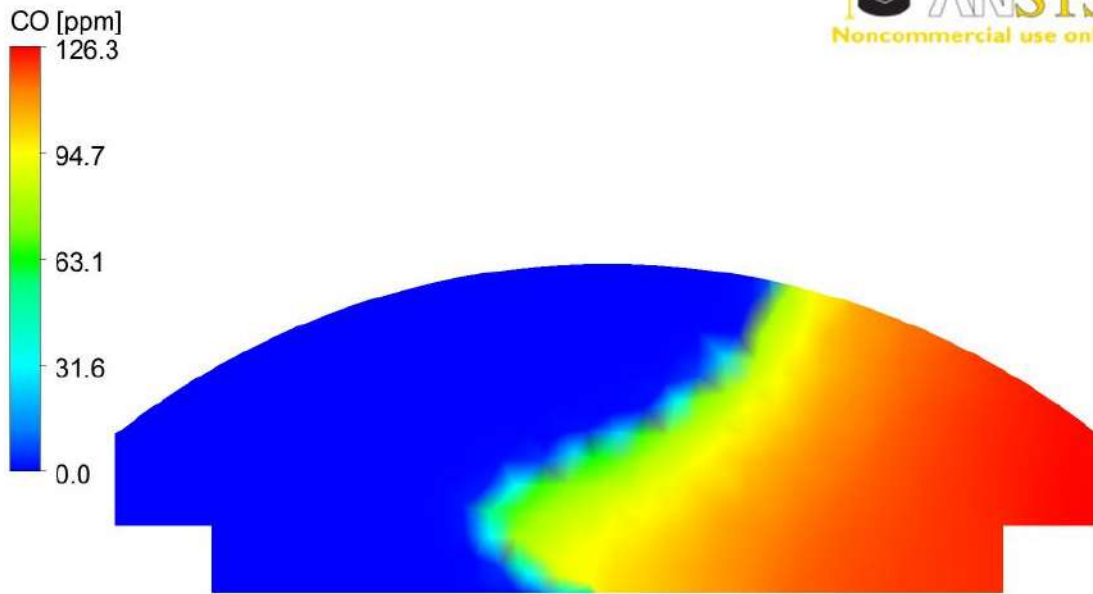


Figura 59 - Perfil de concentração de CO na saída no sentido Catumbi/Laranjeiras com os ventiladores desligados

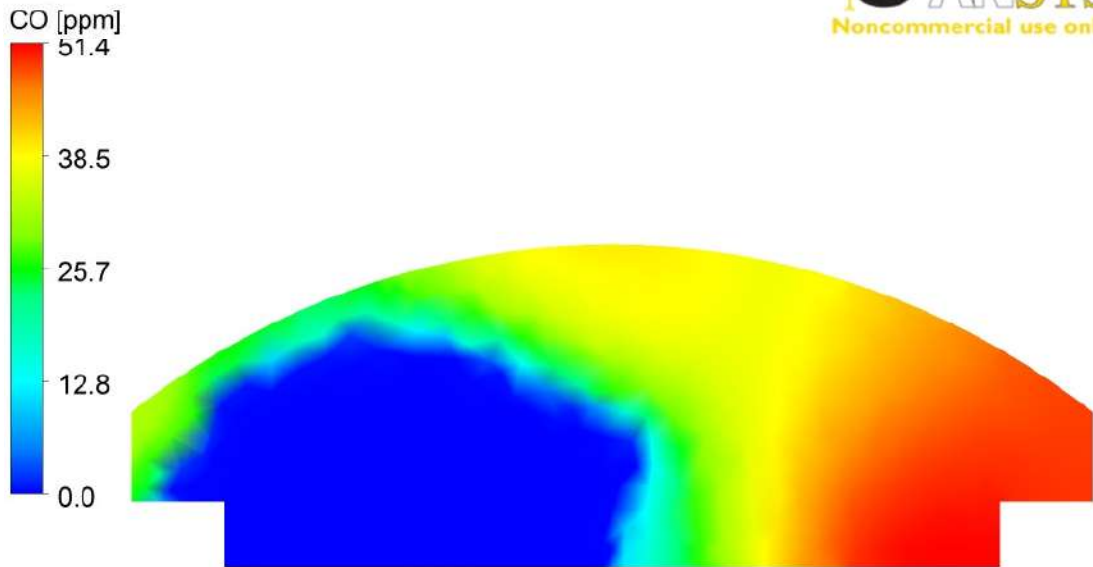


Figura 60 - Perfil de concentração de CO na saída no sentido Catumbi/Laranjeiras com velocidade do ar de 15,5 m/s

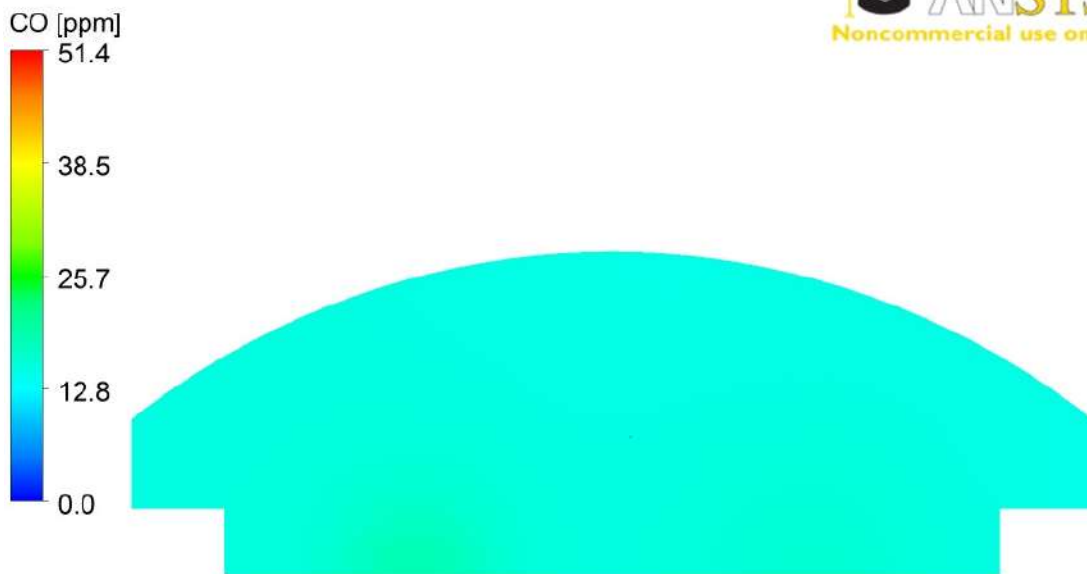


Figura 61 - Perfil de concentração de CO na saída com velocidade do ar de 31 m/s

Na Figura 62 é exibida a distribuição de concentração de monóxido de carbono ao longo do túnel sem ventilação mecânica. Pode ser observado o acúmulo de poluente na região central e concentrações mais baixas nas extremidades.

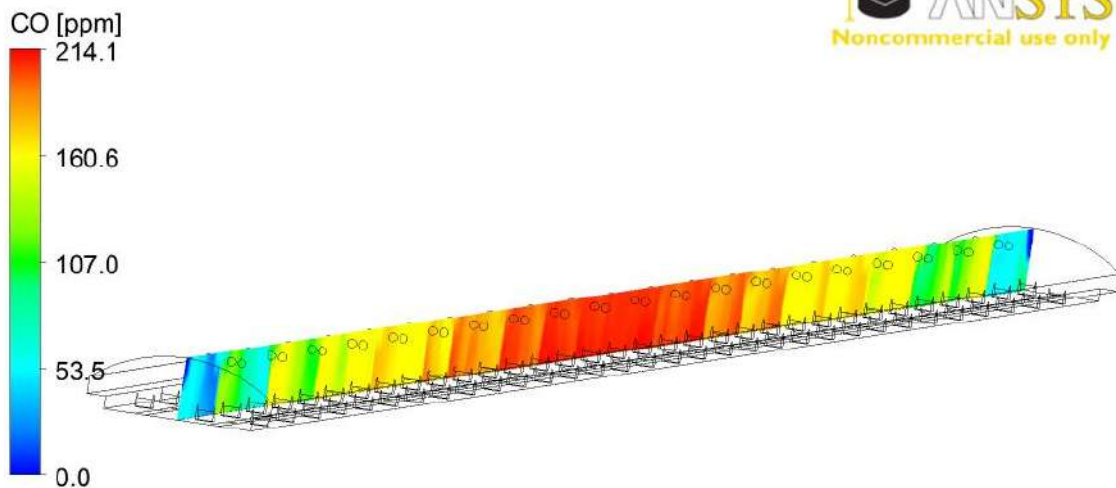


Figura 62 – Distribuição de concentração de CO ao longo do túnel sem a parede divisória com os ventiladores desligados

A Figura 63 apresenta a distribuição de concentração de CO para ventiladores fornecendo velocidade do ar de 15,5 m/s. Como já foi visto nos resultados já mostrados, a concentração do poluente aumenta ao longo do túnel, pois ele é empurrado para fora do mesmo

motivado pelos ventiladores. No final do túnel ocorre entrada de ar limpo e a concentração é menor.

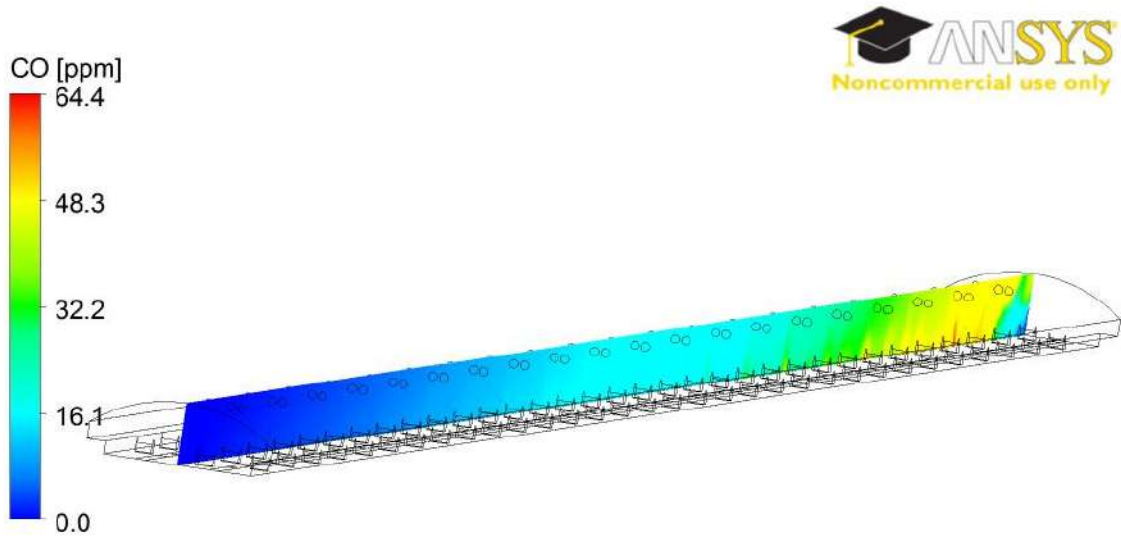


Figura 63 - Distribuição de concentração de CO ao longo do túnel sem a parede divisória com velocidade do ar de 15,5 m/s

Na Figura 64 é apresentada a distribuição de concentração de CO para velocidade do ar de 31 m/s, há um perfil de aumento da concentração ao longo do túnel.

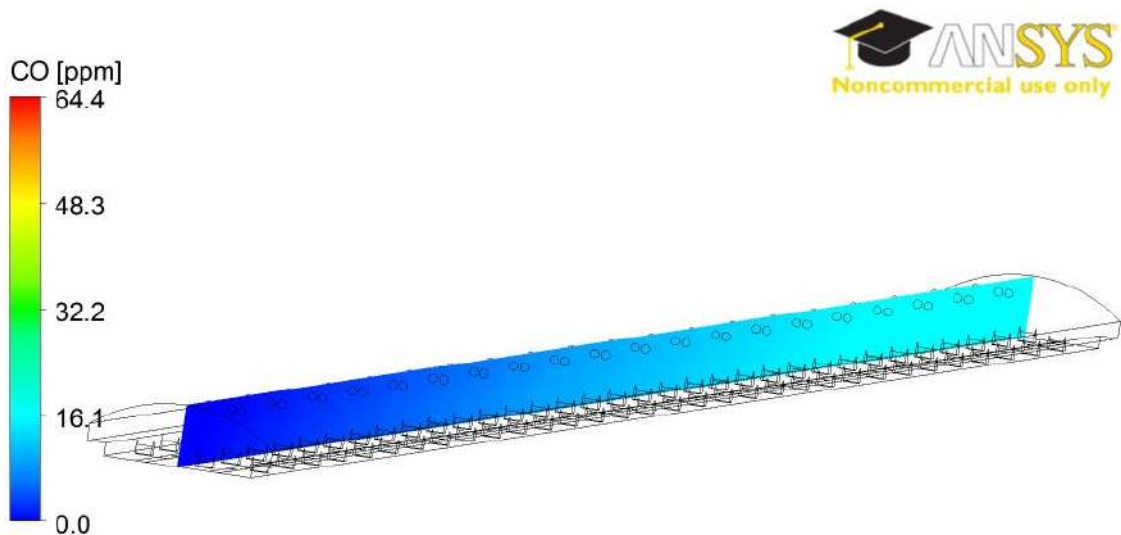


Figura 64 - Distribuição de concentração de CO ao longo do túnel sem a parede divisória com velocidade do ar de 31 m/s

A Figura 66 apresenta o perfil de velocidade do ar ao longo de uma reta vertical localizada a 1,5 m da origem e 271,4 m da entrada do sentido Catumbi/Laranjeiras, como na Figura 65.

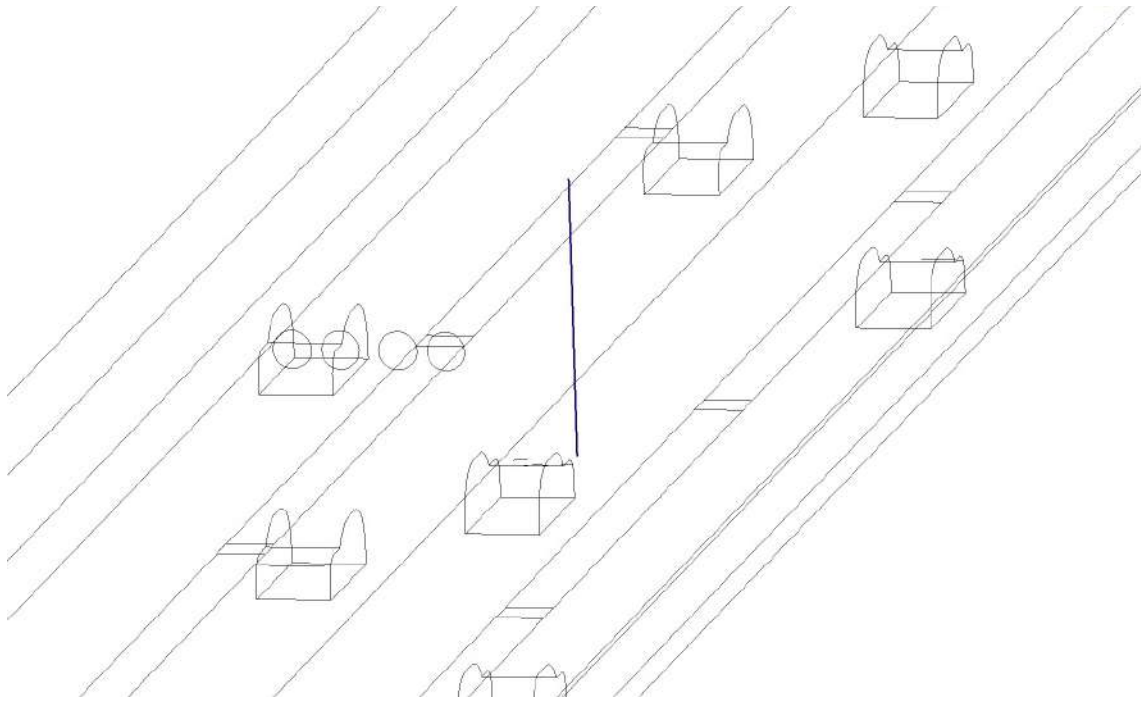


Figura 65 – Linha vertical usada para avaliar a velocidade do ar

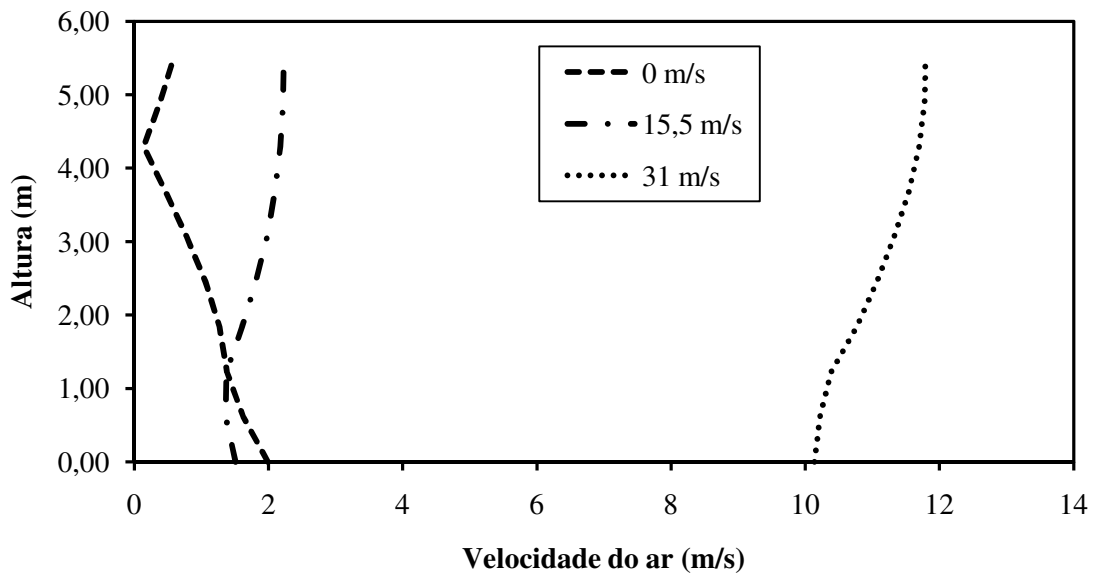


Figura 66 - A variação da velocidade do ar com a altura no túnel sem a parede divisória para as diferentes condições de velocidade do ar nos ventiladores

Com os ventiladores ligados e fornecendo uma velocidade do ar de 31 m/s, o perfil é semelhante à situação de apenas uma galeria, atingindo valores próximos na parte superior do túnel. Com uma velocidade de 15,5 m/s, apesar de apresentar o mesmo formato que na simulação da metade do túnel, os valores de velocidade do ar obtidos

são menores. Para o caso de ventiladores desligados, a velocidade do ar deve-se apenas ao movimento dos carros, o que justifica maiores velocidades na parte inferior do túnel.

Como já foi citado, ocorre recirculação no interior do túnel sem ventilação mecânica, como pode ser visto na Figura 67. Os vetores-velocidade de CO estão no sentido dos carros nas laterais, enquanto no meio do túnel pode ser vista a recirculação, que é responsável pelo acúmulo de poluente. Já a Figura 68 mostra que não há recirculação quando se empregada a velocidade de 31 m/s. Neste caso, os vetores estão alinhados no sentido dos ventiladores, indicando a remoção de poluente.

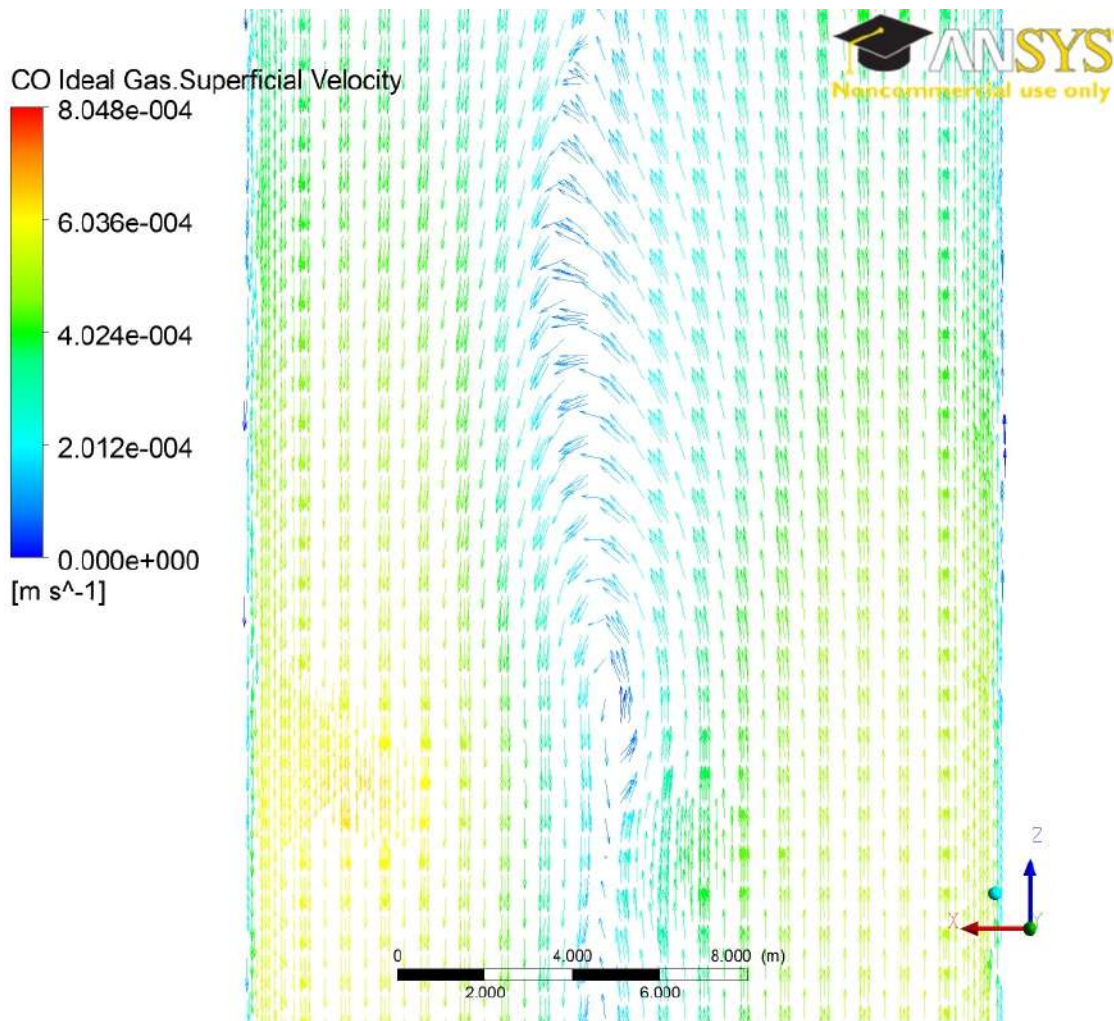


Figura 67 - A recirculação na situação de ventiladores desligados

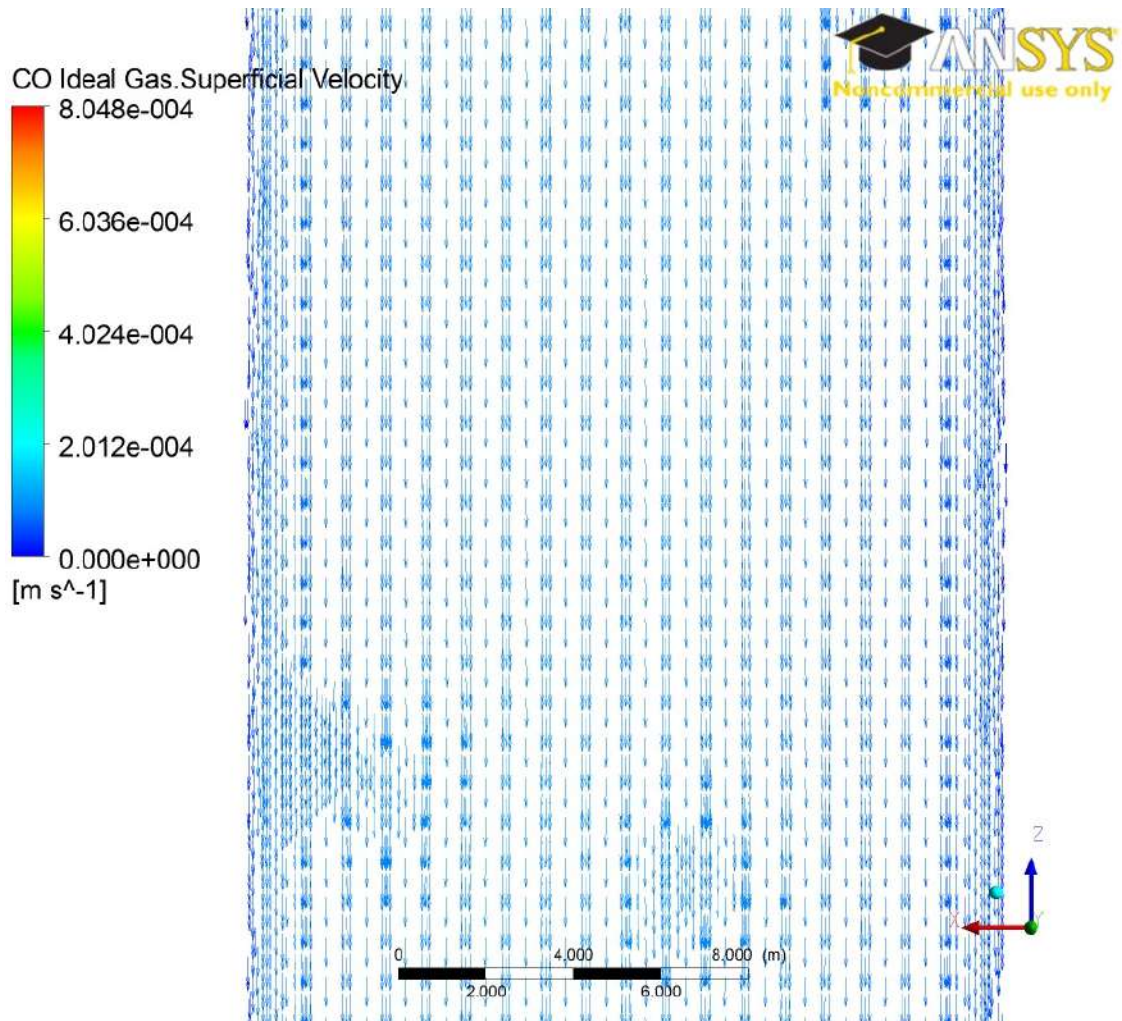


Figura 68 - Ausência de recirculação com ventiladores fornecendo 31 m/s de velocidade do ar

6. Conclusões

Com base nos resultados obtidos, pode-se chegar às seguintes conclusões:

- A 0,325 m do centro e 2,5 m de altura, as concentrações de CO crescem linearmente da entrada para a saída do túnel atual, com parede divisória entre as pistas. Quando o túnel inteiro foi simulado, sem a parede divisória, este perfil linear foi observado apenas para a maior velocidade do ar estudada (31 m/s).
- A simulação do túnel atual, com parede divisória, não gerou condições que possam causar danos à saúde humana. Isso permite dizer que o túnel pode operar com ventiladores desligados para a condição estudada (veículos a 60 km/h). Nada se pode afirmar sobre outras velocidades, em condições de engarrafamento, uma vez que não foram avaliadas nesse estudo.
- O túnel só poderia operar sem o septo divisor, no período considerado neste estudo (8 às 20 h), se os ventiladores operassem por todo o período, de modo a evitar o acúmulo de poluentes.

Sugestões para trabalhos futuros:

- Realizar simulações com outras velocidades, em condições de engarrafamento;
- Realizar novos estudos considerando a emissão do CO produzido a partir da matriz energética usada brasileira;
- Simular incêndios;
- Incluir novos poluentes, como NO_x, SO₂, MP e HC

Referências Bibliográficas

ALMEIDA, M.; CANHA, N.; FREITAS, M.C.; DUNG, H.M; DIONÍSIO, I. Air pollution at an urban traffic tunnel in Lisbon, Portugal – an INAA study, *Applied Radiation and Isotopes*, doi:10.1016/j.apradiso.2011.01.014.

AGUIRRE, João. Malhas estruturadas e não-estruturadas vs. malhas tetraédricas e hexaédricas, 01/09/2010. Disponível em <http://aguirreeng.blogspot.com/2010/09/malhas-estruturadas-e-nao-estruturadas.html>. Acesso em 30/01/2010.

ALVES, João Victor Barbosa. Previsão da dispersão de poluentes no Túnel Rebouças com o auxílio de CFD. Projeto de Final de Curso, EQ/UFRJ, Rio de Janeiro, 2009.

ANSYS Fluent 12.0 Theory Guide, 2009.

BARI, S.; NASER, J. Simulation of airflow and pollution levels caused by severe traffic jam in a road tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Australia, 25, p. 70–77, 2010.

BARMPAS, F., OSSANLIS, I., MOUSSIOPOULOS, N. Numerical study for the flow around moving cars and its effect on the dispersion of the traffic emitted pollutions within a Road tunnel. *11th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes*, 282-286, Thessaloniki, Greece.

CETESB, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Relatório de Qualidade do Ar no Estado de São Paulo 2009, 2010.

CFX Manual Release 12.1, Ansys Inc, 2009.

CHEN, Falin. Smoke propagation in Road tunnels. *Appl Mech Rev*, Taiwan, 53, no. 8, p. 207-218, 2000.

CHUNG, Chung-Yi; CHUNG, Pei-Ling. A numerical and experimental study of pollutant dispersion in a traffic tunnel. *Environ Monit Assess*, 130, p. 289-299, 2006.

CONAMA, Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resoluções 03/90, 18/86 e 418/09.

CVE, Coordenadoria de Vias Especiais. Secretaria Municipal de Transportes, Rio de Janeiro. Disponível em http://www0.rio.rj.gov.br/smtr/smtr/hp_cve_stabarbara.htm. Acesso em 15/01/2011.

DETRAN-RJ, Departamento de Trânsito do Estado do Rio de Janeiro. Disponível em <http://www.detrans.rj.gov.br>. Acesso em 20/01/2011.

Foi um Rio que passou. Túnel Santa Bárbara logo após a inauguração, 05/11/2008. Disponível em <http://www.rioquepassou.com.br/2008/11/05/tunel-santa-barbara-logo-apos-a-inauguracao/>. Acesso em 22/01/2011.

FORTUNA, A. O. Técnicas Computacionais para Dinâmica dos Fluidos: Conceitos Básicos e Aplicações, São Paulo: Ed. USP, 2000.

HO, K. F.; HO, Steven Sai Hang; LEE, S. C.; CHENG, Y.; CHOW, Judith C.; WATSON, John G.; LOUIE, P. K. K.; TIAN, Linwei. Emissions of gas- and particle-phase polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the Shing Mun Tunnel, Hong Kong. *Atmospheric Environment, China*, 43, p. 6343-6351, 2009.

HUNG-LUNG, Chiang; CHING-SHYUNG, Hwu; SHIH-YU, Chen; MING-CHING, Wu; SEN-YI, Ma; YAO-SHENG, Huang. Emission factors and characteristics of criteria pollutants and volatile organic compounds (VOCs) in a freeway tunnel study. *Science of the Total Environment*, Taiwan, 381, p. 200-211, 2007.

INEA, Instituto Estadual do Ambiente. Relatório Anual da Qualidade do Ar do Estado do Rio de Janeiro, 2009.

ITG, Instituto Tecnológico do Gás. Ficha técnica para o Monóxido de Carbono. Disponível em <http://nx13304a.hosting.net.vodafone.pt/html/monoxido.pdf>. Acesso em 20/01/2011.

KEAN, A.J., HARLEY, R.A., LITTLEJOHN, D., KENDALL, G.R. On-road measurement of ammonia and other motor vehicle exhaust emissions. *Environmental Science and Technology*, 34, P. 3535–3539, 2000.

KIRCHSTETTER, T.W., HARLEY, R.A., KREISBERG, N.M., STOLZENBURG, M.R., HERING, S.V. On-road measurement of .one particle and nitrogen oxide emissions from light- and heavy-duty motor vehicles. *Atmospheric Environment*, 33, p. 2955–2968, 1999.

JACONDINO, Gabriel Bittencourt. Quantificação das emissões veiculares através do uso de simuladores de tráfego, Dissertação de Mestrado, PPGEP/UFRGS, Porto Alegre, 127p, 2005.

LIU, R. DRACULA traffic simulation model: a user manual. Institute for Transportation Studies, University of Leeds, 2005.

MALISKA, Clovis R. Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional. 2ª Edição. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2004.

MARTINS, L.D., ANDRADE, M.D., FREITAS, E.D., PRETTO, A., GATTI, L.V., et al. Emission Factors for Gas-Powered Vehicles Traveling Through Road Tunnels in São Paulo, Brazil, *Environmental Science & Technology*, 40, P. 6722-6729, 2006.

Ministério do Meio Ambiente. Avaliação do PROCONVE, Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores. Laboratório Interdisciplinar de Meio Ambiente – COPPE/UFRJ

NORMA VDI 2053 Bl. 1. Air Treatment Systems for Garages and Tunnels Garrages, Verband Deutscher Ingenieure – VDI (Association of German Engineers), Düsseldorf, 1995.

Núcleo de Estudos de Saúde Coletiva da UFRJ. Curso de Toxicologia, módulo IX – Envenenamento por Produtos Químicos Industriais, 2006. Disponível em <http://lta.nutes.ufrj.br/toxicologia/mIX.gas.htm>. Acesso em 20/01/2011.

PERES, F.F. Meio Ambiente e Saúde: os efeitos fisiológicos da poluição do ar no desempenho físico - o caso do monóxido de carbono (CO), *Arquivos em Movimento*, Rio de Janeiro, 1, p. 55-63, 2005.

Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro, Secretaria Municipal de Transportes. Estatísticas de volume de tráfego. Disponível em <http://www.rio.rj.gov.br/web/smtr/exibeconteudo?article-id=149831>. Acesso em 22/01/2011.

SÁNCHEZ-CCOYLLO, O.R., YNOUE, R.Y., MARTINS, L.D., ASTOLFO, R. et al. Vehicular particulate matter emissions in road tunnels in Sao Paulo, Brazil, *Environmental Monitoring and Assessment*, 149, p. 241-249, 2008.