



Previsão da Dispersão de Poluentes no Túnel Rebouças com o Auxílio de CFD

João Victor Barbosa Alves

Projeto de Final de Curso

Orientadores

Prof. Ricardo de Andrade Medronho, PhD

Prof.^a Aline Sarmiento Procópio, D.Sc

Agosto de 2009

**Previsão da Dispersão de Poluentes no Túnel Rebouças com o
Auxílio de CFD**

João Victor Barbosa Alves

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:

Alvio Figueredo Cardero, Msc

José Claudino Souza Almeida, M.Sc

Amaro Gomes Barreto Jr. - D.Sc

Orientado por:

Ricardo de Andrade Medronho, Ph.D

Aline Sarmento Procópio, D.Sc

Rio de Janeiro, RJ - Brasil

Agosto de 2009

Alves, João Victor Barbosa.

Previsão da Dispersão de Poluentes no Túnel Rebouças com o Auxílio de CFD / João Victor Barbosa Alves. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2009.

ix, 63 p.; il.

(Monografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2009.

Orientadores: Ricardo de Andrade Medronho, Aline Sarmiento Procópio.

1. Dispersão. 2. CFD. 3. Túnel Rebouças. 4. Monografia. (Graduação – UFRJ/EQ). 5. Ricardo de Andrade Medronho, PhD; Aline Sarmiento Procópio, DSc.

Dedico mais esta conquista a todos os meus familiares que me apoiaram tanto para que eu estivesse vivendo este momento. Em especial, à minha mãe Marisa, minha tia Marinalva, às minhas primas Patrícia e Cátia, ao meu irmão e amigo Alex, ao meu grande amor Giselle. E também à minha querida avó que não está mais presente fisicamente, porém o seu amor sempre estará.

“O rio atinge seus objetivos porque aprendeu a contornar obstáculos”

Lao-Tse

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família por todo amor, apoio, compreensão e por entender as minhas ausências, necessárias para a construção deste sonho.

Agradeço aos meus orientadores, Aline Sarmiento Procópio e Ricardo de Andrade Medronho por toda a motivação, inspiração, incentivo e conhecimentos divididos comigo.

Aos Srs. Rui Ribeiro Filho e Ricardo Motta, Diretores da 2º Divisão de Vias Especiais - Túnel Rebouças. Em especial ao Ricardo Motta por todo o suporte, atenção e paciência, que foram de grande valia para a elaboração deste projeto.

Agradeço à ESCOLA DE QUÍMICA da UFRJ e aos seus professores, que me ensinaram não apenas calcular, projetar equipamentos e processos, me ensinaram a ser um profissional, com ética, responsabilidade, postura e com um imenso amor por esta carreira de Engenharia Química. Este local para mim é sagrado, onde entrei com um sonho e saio com uma formação sólida e com uma extrema vontade de “fazer a diferença”.

E agradeço especialmente ao Medronho, que para mim é um exemplo a ser seguido como profissional e por sua paixão por ensinar e passar conhecimento. Foram nas suas aulas de OPERAÇÕES UNITÁRIAS I que comecei a me sentir engenheiro. Obrigado pela confiança, carinho e respeito.

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

PREVISÃO DA DISPERSÃO DE POLUENTES NO TÚNEL REBOUÇAS COM O AUXÍLIO DE CFD

João Victor Barbosa Alves

Agosto, 2009

Orientadores: Prof. Ricardo de Andrade Medronho, PhD
Aline Sarmiento Procópio, D.Sc

A qualidade do ar em ambientes confinados onde existem fontes de poluentes é motivo de preocupação no que se refere à saúde humana. Em áreas urbanas os veículos automotores contribuem significativamente para a poluição atmosférica com emissão de diversos poluentes tais como material particulado, monóxido de carbono e de gases precursores do ozônio, como os óxidos de nitrogênio e compostos orgânicos voláteis.

O presente trabalho teve por objetivo estudar a dispersão, em ambientes confinados, de poluentes oriundos da emissão veicular. O Túnel Rebouças foi escolhido como túnel-modelo, tendo-se empregado a Fluidodinâmica computacional (CFD) para as simulações numéricas. Os softwares utilizados para construir a geometria e a malha foram o Design Modeler e o CFX-Mesh e Icem, respectivamente, ambos da Ansys Co. As simulações foram conduzidas no CFX, também da Ansys. Os fatores de emissão veicular utilizados nas simulações foram obtidos de um estudo anterior realizado no Túnel Rebouças, no Rio de Janeiro.

Os resultados finais mostram um perfil linear de concentração de CO, nas várias situações de tráfego no Túnel Rebouças (tráfego rápido, normal, lento, muito lento e congestionado), empregando-se ou não ventilação forçada. O uso dos ventiladores para controlar o teor de CO no interior do túnel se mostrou de grande importância. Por exemplo, a uma velocidade de aproximadamente 12 km/h, há um aumento de mais de 5 vezes na concentração de CO, ao se reduzir a potência dos ventiladores de 85% para 15%.

Foram obtidas equações capazes de prever a concentração de CO (equação 5.1) no ponto de amostragem, localizado a 1500 m da entrada da galeria L1 do Túnel Rebouças, assim como a concentração média de CO (equações 5.2 e 5.3) em qualquer plano transversal ao longo desta galeria, ambas em função das condições do tráfego e da potência empregada nos ventiladores. Este ponto de amostragem, efetivamente existente no túnel, mostrou-se adequado uma vez que os valores simulados obtidos neste ponto são praticamente iguais ao valor médio da concentração de CO na área transversal.

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

POLLUTANT DISPERSION FORECAST INSIDE THE REBOUÇAS TUNNEL USING CFD

João Victor Barbosa Alves

August, 2009

Supervisors: Ricardo de Andrade Medronho, PhD
Aline Sarmiento Procópio, DSc

The air quality in confined places where there is source of pollutants is a concern regarding humans' health. Automotive vehicles are a significant source of air pollution in urban areas, emitting to the atmosphere particulate matter and gases as carbon monoxide and ozone precursors (nitrogen oxides and volatile organic compounds).

The main objective of this work was to use computational fluid dynamics (CFD) to numerically simulate the dispersion of vehicular pollutants in confined places. The Rebouças tunnel located in Rio de Janeiro was selected as case study. The tunnel geometry and mesh were built using the software Design Modeler and CFX-Mesh or ICEM, from Ansys Co., respectively. The CFX, also from Ansys, was employed for the numeric simulations. Car emission factors were obtained from a study accomplished by Rebouças tunnel personnel.

The final results show the pollutant concentration profiles for different traffic conditions inside the Rebouças tunnel (fast, normal, slow, very slow and traffic jam), using different levels of ventilation. It is very important using fans to control the CO concentration inside the tunnel. For instance, at a 12 km/h velocity, if the fans power decrease from 85% to 15%, there is an increase of more than 5 times in the concentration of CO.

Equations were obtained for predicting CO concentration (equation 5.1) at a given point (point of sampling placed at 1500 m from the entrance of L1 gallery from Rebouças tunnel), and the CO average concentration (equations 5.2 and 5.3) at any point along the L1 gallery. Those equations are function of traffic conditions and fan power. The sampling point that effectively exists in the tunnel proved to be an appropriate point for measurements because the simulated values of CO concentration obtained at this point are practically the same of the CO average concentration in the transversal area.

Índice

1. Introdução.....	2
1.1 Objetivo do Trabalho.....	3
1.2 Estudos sobre Poluição em Túneis.....	4
1.3 Programas de diminuição de emissão de poluentes.....	5
2. A Poluição em Túneis.....	8
2.1 Descrição dos principais poluentes emitidos por veículos automotores.....	8
2.1.1 Material Particulado (MP) e Partículas Inaláveis (PI).....	8
2.1.2 Dióxido de Enxofre (SO ₂).....	8
2.1.3 Monóxido de carbono (CO):.....	9
2.1.4 Óxidos de nitrogênio (NO _x):.....	9
2.1.5 Ozônio (O ₃).....	9
2.1.6 Hidrocarbonetos Totais.....	9
2.2. Efeitos da exposição a Monóxido de Carbono.....	10
2.3 Túneis.....	14
2.3.1 Histórico do Túnel Rebouças.....	14
2.3.2 Sistemas de Ventilação em Túneis.....	15
3. Fluidodinâmica Computacional (CFD).....	17
3.1 Introdução.....	17
3.2 Etapas para a Solução Numérica.....	18
3.3 Malha.....	20
3.4 Método dos Volumes Finitos (MVF).....	21
3.5. Modelagem Matemática.....	22
3.5.1 Equações de Transporte.....	22
4. Materiais e Métodos.....	23
4.1 Computador e Pacote Computacional Utilizados.....	23
4.2 Variáveis de Interesse.....	23
4.3 Planejamento de Experimentos.....	23
4.4 Dados experimentais de Concentração de CO e Números de Carros.....	24
4.5 Fator de emissão.....	27
4.6 Geometrias e Malhas Utilizadas.....	27
4.7 Parâmetros de Simulação.....	33
5. Resultados e Discussão.....	37
5.1 Resultados das Simulações Numéricas.....	37
5.2 Resultados do Planejamento de Experimentos.....	39
5.3 Perfis de Concentração.....	43
6. Conclusões.....	56
7. Sugestões para Trabalhos Futuros.....	58
8. Referências Bibliográficas.....	59

1. Introdução

A poluição da atmosfera pode ocorrer naturalmente, por exemplo, em erupções vulcânicas, em tempestades de areia e em queimadas naturais. Entretanto, ela vem se intensificando devido às mudanças provocadas pelos seres humanos, principalmente, devido à industrialização, que teve como marco inicial a revolução industrial em meados do século XVIII, e o conseqüente crescimento das cidades.

Em meados do século passado, a poluição concentrada nas cidades tinha a sua origem atribuída as atividades industriais. Os países estavam em uma grande disputa por crescimento econômico sem se atentar para a importância do meio ambiente. Com o passar do tempo, foram surgindo pressões ambientais por parte da população das cidades e o surgimento de órgãos reguladores dos governos que começaram a criar leis, regulamentações e limites de valores para os poluentes emitidos, fazendo pressão para que as indústrias se modernizassem para atender estes limites.

Com o crescimento das regiões metropolitanas e, conseqüentemente, o rápido crescimento da frota veicular, gerou-se um aumento significativo na contribuição dessa fonte na degradação da qualidade do ar. Os centros urbanos concentram as principais vias de tráfego, túneis e os maiores fluxos de veículos de uma dada região, onde ocorrem os grandes congestionamentos que contribuem ainda mais para o aumento da emissão de poluentes do ar. Segundo o inventário das fontes de emissões realizado na Região Metropolitana do Rio de Janeiro, mostrou que as fontes móveis, responde por 77% do total de emissões da região enquanto as fontes fixas contribuem com 22%. Em relação à taxa de emissão por tipologia, as indústrias petroquímicas respondem por respectivamente, 90% do total das emissões de hidrocarbonetos e 21% do total dos óxidos de nitrogênio, (FEEMA, 2007).

Devido às conseqüências causadas ao meio ambiente, à saúde humana e a sua frequência de ocorrência, é possível considerar que os principais poluentes que afetam a qualidade do ar são: dióxido de enxofre (SO₂), material particulado (MP), monóxido de carbono (CO), ozônio (O₃), hidrocarbonetos totais (HC) e óxidos de nitrogênio (NO_x).

Embora se tenha diferentes poluentes emitidos durante a combustão em veículos automotores, este estudo irá se concentrar na dispersão de monóxido de carbono (CO) e os seus efeitos nocivos à saúde humana no interior de túneis.

O monóxido de carbono, mesmo em baixas concentrações, estará presente nas reações de combustão devido à queima incompleta dos combustíveis, quando o oxigênio está em

quantidade insuficiente na reação e também devido à rápida reação nos motores dos veículos. Os veículos produzidos atualmente possuem um conversor catalítico no seu sistema de exaustão para diminuir a quantidade CO emitida.

Um dos principais fatores que tornam o monóxido de carbono nocivo a saúde, quando respirado, é a sua combinação com a hemoglobina do sangue. Esta associação dá origem a carboxihemoglobina (COHb), que provoca uma redução na quantidade de oxigênio presente no sangue devido a redução da absorção de oxigênio, provocando insuficiência respiratória. Isto ocorre porque a afinidade da hemoglobina é de aproximadamente 250 vezes maior com o monóxido de carbono em relação ao oxigênio. Os problemas relativos à saúde humana se tornam ainda mais sérios quando o monóxido de carbono é emitido em ambientes confinados como garagens e túneis, podendo atingir valores muito maiores que os valores estabelecidos como padrões Nacionais de Qualidade do Ar (Resolução CONAMA nº 3 de 28/06/90).

Por este estudo tratar de um problema que envolve inúmeras variáveis complexas tais como a geometria do túnel, quantidade e localização dos ventiladores e carros, utilização ou não de ventilação forçada, modelos de mistura e de turbulência, entre outros, se torna muito difícil a obtenção de soluções analíticas para este problema. Além disso, seria muito caro a medição dos poluentes ao longo de todo o túnel para avaliar a dispersão do poluente. Com isso, este trabalho propõe, com o auxílio da fluidodinâmica computacional (CFD), avaliar a dispersão do monóxido de carbono para várias situações (tráfego rápido, normal, lento, muito lento e congestionado) ao longo do túnel Rebouças.

1.1 Objetivo do Trabalho

O presente trabalho tem por objetivo estudar a dispersão, em ambientes confinados, de monóxido de carbono oriundo da emissão veicular. O Túnel Rebouças foi escolhido como túnel-modelo, tendo-se empregado a Fluidodinâmica computacional (CFD) para as simulações numéricas. Foram utilizados dados experimentais de um estudo realizado no túnel Rebouças, Almeida (2002). Com isso, pretende-se obter um modelo de dispersão do monóxido de carbono e avaliar o quanto esta variável é influenciada pela quantidade de carros e pela convecção forçada gerada pelos ventiladores, através de planejamento de experimentos. Além disso, serão usados os dados do estudo citado anteriormente para comparar com os resultados obtidos no presente trabalho.

1.2 Estudos sobre Poluição em Túneis

Devido aos problemas de poluição atmosférica nas grandes cidades e à grande contribuição das emissões de poluentes oriundos da emissão veicular, nas últimas décadas começaram a aumentar os estudos de medição de poluentes feitos em túneis urbanos, principalmente no Brasil que privilegia o transporte rodoviário nos transportes urbanos. Segundo Almeida (2004), Os estudos feitos no interior de túneis funcionam como um verdadeiro simulador de emissões veiculares, onde estão presentes prioritariamente os poluentes primários emitidos diretamente pelas fontes (veículos), sendo possível por estarem em ambiente confinado e sem a influência da radiação solar.

Desta forma é possível avaliar como alguns fatores como modificações nos combustíveis, modernização dos veículos, sistema de ventilação dos túneis, quantidade de veículos e condições de trânsito afetam na concentração e dispersão de poluentes em túneis, além de servirem como fonte de dados para serem aplicados na previsão de poluentes em vias urbanas.

Na Tabela 1.1 são mostrados alguns trabalhos envolvendo medições monóxido de carbono no interior de túneis urbanos.

Tabela 1.1: Estudos de medição de monóxido de carbono e outros poluentes realizados recentemente.

Túnel	Autor	Ano
Jânio Quadros, SP	Martins, Andrade et al.	2006
Maria Maluf, SP	Martins, Andrade et al.	2006
Jânio Quadros, SP	Sanchez-Ccoyllo et al.	2002
Maria Maluf, SP	Sanchez-Ccoyllo et al.	2002
Caldecott, CA, EUA	Kean et al.	2000
Caldecott , CA, EUA	Kirchstetter et al.	1999
Callahan, MA, EUA	Sagebiel et al.	1999
Deck Park, AZ, EUA	Sagebiel, Gertler et al.	1997
Lincoln, NY, EUA	Gertler et al.	1997
Sepulveda, CA, EUA	Sagebiel, Gertler et al.	1997
Sherman Way, CA, EUA	Sagebiel, Gertler et al.	1997
Fort Mc Henry, MD, EUA	Pierson et al.	1996
Tuscarora, PA, EUA	Pierson et al.	1996

Existem alguns estudos na literatura que utilizam fluidodinâmica computacional aplicados a problemas em túneis, porém a maioria trata de incêndios em túneis ou dispersão de poluentes, tendo o túnel como uma fonte de poluição para a cidade. Dentre os estudos envolvendo dispersão de monóxido de carbono em túneis que utilizam CFD, pode-se citar o

trabalho de BARMPAS (2007) que estudou o escoamento ao redor de carros e seu efeito na dispersão de poluentes emitidos no tráfego no interior de um túnel e CHUNG (2006) que fez um estudo numérico e experimental sobre a dispersão de poluentes no interior de um túnel.

Além desses foi feito um estudo aplicado no túnel Rebouças utilizando um método matemático feito para prever poluição em ruas de cidades com obstáculos, como grandes prédios, “*street canyon*”.

1.3 Programas de diminuição de emissão de poluentes

Em 1986 foi criado o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores chamado de PROCONVE, instituído pela Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA 18/86 e pela Lei 8723, de outubro de 1993. Resoluções adicionais estabeleceram diretrizes, prazos e padrões legais de emissão admissíveis para as diferentes categorias de veículos e motores, nacionais e importados (LIMA, 2001)

O PROCONVE tem como principal meta a “redução da poluição atmosférica através do estabelecimento de limites de emissão veicular, induzindo o desenvolvimento tecnológico dos fabricantes e determinando que os veículos e motores atendam aos limites de emissões, em ensaios padronizados e com combustível de referência” (IBAMA, 2000).

Este programa propiciou que o País, além da capacidade técnica para que os veículos se adequassem aos limites mais restritivos de emissões, tivesse um avanço técnico tanto com relação a estudos e testes de laboratórios, quanto da parte da produção dos veículos pelas montadoras (LIMA, 2001).

Parte significativa dos benefícios do PROCONVE somente será verificada no médio prazo, quando os veículos da fase pré 1989 saírem de circulação como resultado do sucateamento natural. Estes veículos, considerando cenários futuros para 2010, apesar de representarem 13,6% do total da frota projetada, serão responsáveis por 69% de emissões de CO, 64,7% de HC e 33,3 % de NO_x nesse mesmo ano (LIMA, 2001).

A Tabela 1.2 mostra os limites máximos de emissão para veículos leves novos em diferentes anos de atuação do PROCONVE.

Tabela 1.2: Limites máximos de emissão para veículos leves novos¹.

ANO	CO (g/km)	HC (g/km)	NO _x (g/km)	RCHO ² (g/km)	EVAP. ³ (g/teste) ⁴	CÁRTER
PRÉ - 80	54	4,7	1,2	0,05	*	*
89 - 91	24	2,1	2	--	6	nula
92 - 96 ⁶	24	2,1	2	0,15	6	nula
92 - 93	12	1,2	1,4	0,15	6	nula
mar/94 ³	12	1,2	1,4	0,15	6	nula
jan/97	2	0,3	0,6	0,03	6	nula
mai/03	2	0,3	0,6	0,03	2	nula
jan/05 (40%)	2	0,164	0,25 ⁶	0,03	2	nula
jan/06 (70 %)	2	ou	ou	0,03		nula
jan/09 (100%)	2	0,30 ⁵	0,60 ⁷	0,03	2	nula
jan/09	2	0,05 ⁴	0,12	0,02	2	nula
jan/09	2	ou	ou	0,02	2	nula
jan/09	2	0,30 ⁵	0,25 ⁷	0,02	2	nula

Fonte: CETESB, 2003

1 - Medições de acordo com a NBR6601 (US-FTP75), e conforme as Resoluções CONAMA n° 15/95 e n° 315/02.

2 - Aldeídos totais de acordo com a NBR 12026.

3 - Apenas para veículos do ciclo Otto, exceto a GNV.

4 - Hidrocarbonetos não metano (NMHC).

5 - Hidrocarbonetos totais somente para veículos a GNV, que também atendem ao item (4).

6 - Apenas para veículos do ciclo Otto, inclusive a GNV.

7 - Apenas para veículos do ciclo diesel

* - Valor não encontrado na literatura

O IBAMA, através da resolução CONAMA nº 3 de 28/06/90, estabeleceu padrões nacionais de qualidade do ar para os principais poluentes atmosféricos. Estes padrões definem os limites máximos de concentração destes poluentes a fim de se garantir a saúde da população (Tabela 1.3).

Tabela 1.3: Padrões nacionais de qualidade do ar (CONAMA Nº 03/90)

Poluentes	Período Considerado	Faixas de concentração					
		Boa	Regular	Inadequada	Má	Péssima	Crítica
SO ₂	Valor médio diário (µ/m ³)	Até 80	81 a 365	366 a 800	801 a 1600	1601 a 2100	Acima de 2100
PTS	Valor médio diário (µ/m ³)	Até 80	81 a 240	241 a 375	376 a 625	626 a 875	Acima de 875
PI	Valor médio diário (µ/m ³)	Até 50	51 a 150	151 a 250	251 a 420	421 a 500	Acima de 500
CO	Valor médio 8 h (ppm)	Até 5000	5001 a 10000	10001 a 17000	17001 a 34000	34001 a 46000	Acima de 46000
O ₃	Valor médio 1 h (ppm)	Até 80	81 a 160	161 a 200	201 a 800	801 a 1000	Acima de 1000
NO ₂	Valor médio 1 h (ppm)	Até 100	101 a 320	321 a 1130	1131 a 2260	2261 a 3000	Acima de 3000

2. A Poluição em Túneis

2.1 Descrição dos principais poluentes emitidos por veículos automotores

2.1.1 Material Particulado (MP) e Partículas Inaláveis (PI)

É um conjunto de poluentes constituídos de poeiras, fumaças e todo o tipo de material sólido e líquido, com exceção de água pura, que se mantém suspenso na atmosfera por causa de seu pequeno tamanho. Material Particulado total em suspensão na atmosfera (MP) é a denominação dada às partículas que possuem diâmetro médio menor que 50 μm e partículas (PI) são aquelas cujo diâmetro médio menor que 10 μm . As partículas inaláveis podem ainda ser classificadas como partículas inaláveis finas (menor que 2,5 μm) e partículas inaláveis grossas (2,5 a 10 μm). As partículas finas, devido ao seu tamanho diminuto, podem atingir os alvéolos pulmonares, já as grossas ficam retidas na parte superior do sistema respiratório. (CETESB, 2009).

Esse poluente resulta da queima incompleta de combustíveis e de seus aditivos, de processos industriais e do desgaste de pneus e freios. Em geral são provenientes da fumaça emitida pelos veículos movidos a óleo diesel; da fumaça expelida pelas chaminés das indústrias ou pelas queimadas; da poeira depositada nas ruas e dos resíduos de processos industriais que utilizam material granulado; de obras viárias ou que movimentam terra, areia, etc.

Entre os sintomas relacionados com a inalação das PI estão as alergias, asma e bronquite crônica. Causa também irritação nos olhos e garganta, reduzindo a resistência às infecções. (CETESB, 2008).

2.1.2 Dióxido de Enxofre (SO₂)

É formado devido à queima de combustíveis fósseis que contenham compostos de enxofre em sua composição, tais como carvão mineral, óleo combustível e óleo diesel. Tem como fontes principais os automóveis e termoelétricas.

Possui ação irritante nas vias respiratórias, o que provoca tosse e até falta de ar. Agravando os sintomas de asma e da bronquite crônica. Afeta, ainda, outros órgãos sensoriais (FEEMA, 2007).

2.1.3 Monóxido de carbono (CO):

Os efeitos do CO serão detalhados no item 2.2.

2.1.4 Óxidos de nitrogênio (NOx):

As principais fontes de monóxido de nitrogênio (NO) são os motores dos automóveis, sendo que as usinas termoelétricas e as indústrias que utilizam combustíveis fósseis contribuem em menor escala.

O monóxido de nitrogênio se oxida quase que instantaneamente em condições ambiente, formando o dióxido de nitrogênio (NO₂). O óxido de nitrogênio é capaz de produzir irritação dos olhos e nariz, além de provocar enfisema pulmonar (CETESB, 2002).

2.1.5 Ozônio (O₃)

O ozônio é classificado como poluente secundário, formado através de reações fotoquímicas na atmosfera envolvendo, por exemplo, hidrocarbonetos liberados na combustão de gasolina, diesel e outros combustíveis. Quanto maior a luminosidade, maior a porcentagem de quebra de moléculas na atmosfera. Essas moléculas, combinadas com o óxido de nitrogênio, formam o ozônio, considerado como o principal produto do ciclo fotoquímico.

Por ser um gás extremamente tóxico, pode causar sérios efeitos mesmo em baixa concentração. Provoca irritação dos olhos, nariz e garganta, envelhecimento precoce da pele, náusea, dor de cabeça, tosse, fadiga, aumento do muco, diminuição da resistência orgânica às infecções e agravamento de doenças respiratórias. Estes efeitos podem ser maiores quando se pratica exercícios aeróbicos próximo a regiões com engarrafamentos e em dias ensolarados, devido à maior quantidade de combustíveis evaporado, causando dificuldades respiratórias. (CETESB, 2002)

2.1.6 Hidrocarbonetos Totais

São gases e vapores resultantes da queima incompleta e evaporação de combustíveis e de outros produtos voláteis. Diversos hidrocarbonetos como o benzeno são cancerígenos e mutagênicos, não havendo uma concentração ambiente totalmente segura.

Participam ativamente das reações de formação do “*smog*” fotoquímico que, além da geração de oxidantes, como ozônio, reduz a visibilidade ambiente. São irritantes dos olhos, nariz, pele e trato respiratório superior. (CETESB,2002)

2.2. Efeitos da exposição a Monóxido de Carbono

O monóxido de carbono é um gás incolor e inodoro que tem a sua formação originada da queima incompleta de compostos orgânicos. Os efeitos da exposição de seres humanos a este composto estão associados à capacidade de transporte de oxigênio no sangue.

Os sintomas de intoxicação são: 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 (CETESB, 2002).

Um grande problema do contato com monóxido de carbono presente no ar é que este se combina preferencialmente com a hemoglobina para produzir carboxihemoglobina (COHb), o que resulta na redução da quantidade de oxigênio presente no sangue arterial. Esta ligação é reversível, porém muito mais estável quando comparada à associação hemoglobina-oxigênio. Tem uma velocidade de dissociação 1500 vezes mais lenta do que a da oxihemoglobina, com uma afinidade 200 a 300 vezes maior pela molécula de heme. O resultado final é que surge uma molécula de hemoglobina inadequada para liberar oxigênio para os tecidos (módulo IX Envenenamento por Produtos Químicos Industriais - <http://lct.nutes.ufrj.br/toxicologia/mIX.gas.htm#sobe>).

Por estar associado à combustão incompleta, presente na queima de combustíveis fósseis pelos carros, este composto é seriamente monitorado, pois a poluição está muito próxima às fontes geradoras, que são os carros nos trânsitos das grandes cidades.

O teor normal de carboxihemoglobina (COHb), no sangue venoso se situa entre 0,4% a 0,8% e provem do metabolismo. Um aumento deste teor que, do ponto de vista médico, seria insignificante, mesmo para pessoas com problemas é, segundo estudos atuais, de 3 % de COHb. (NORMA VDI – 2053, 1995)

Portanto, é possível suportar por 30 minutos uma carga máxima de CoHb de 3% no sangue das pessoas que estejam em garagens e túneis. Isto não se aplica a locais onde pessoas estejam trabalhando. (NORMA VDI – 2053, 1995)

As relações entre concentração de CO absorvido pelo sangue *versus* tempo de atividade para diferente intensidade de atividade estão representadas na Figura 2.1 a 2.3.

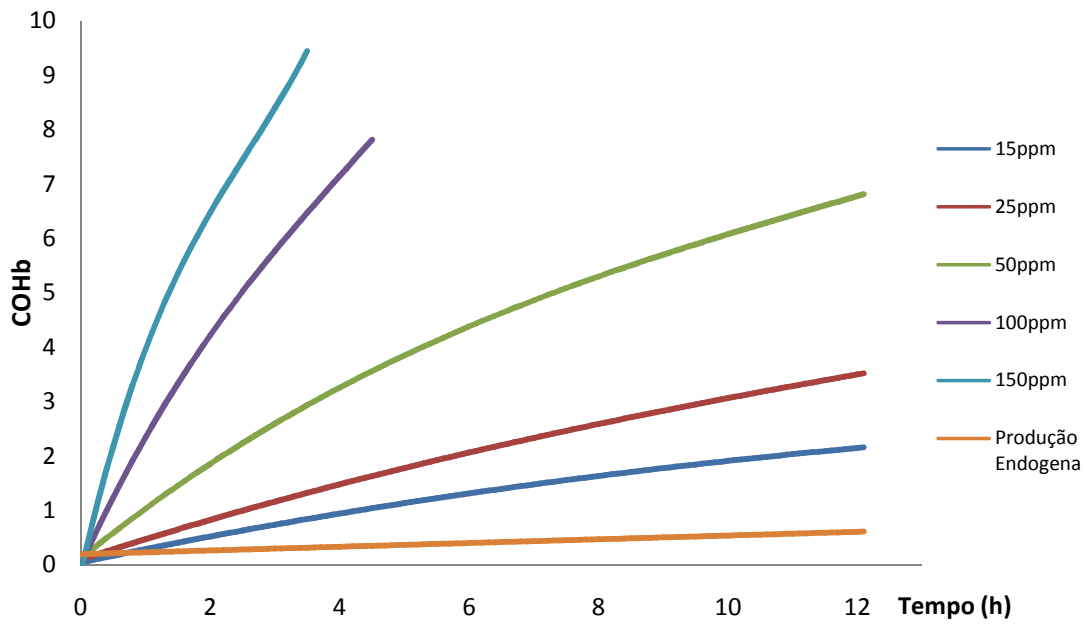


Figura 2.1: Absorção de CO pelo sangue por pessoa em repouso, a 70bpm (adaptado de VDI,1995)

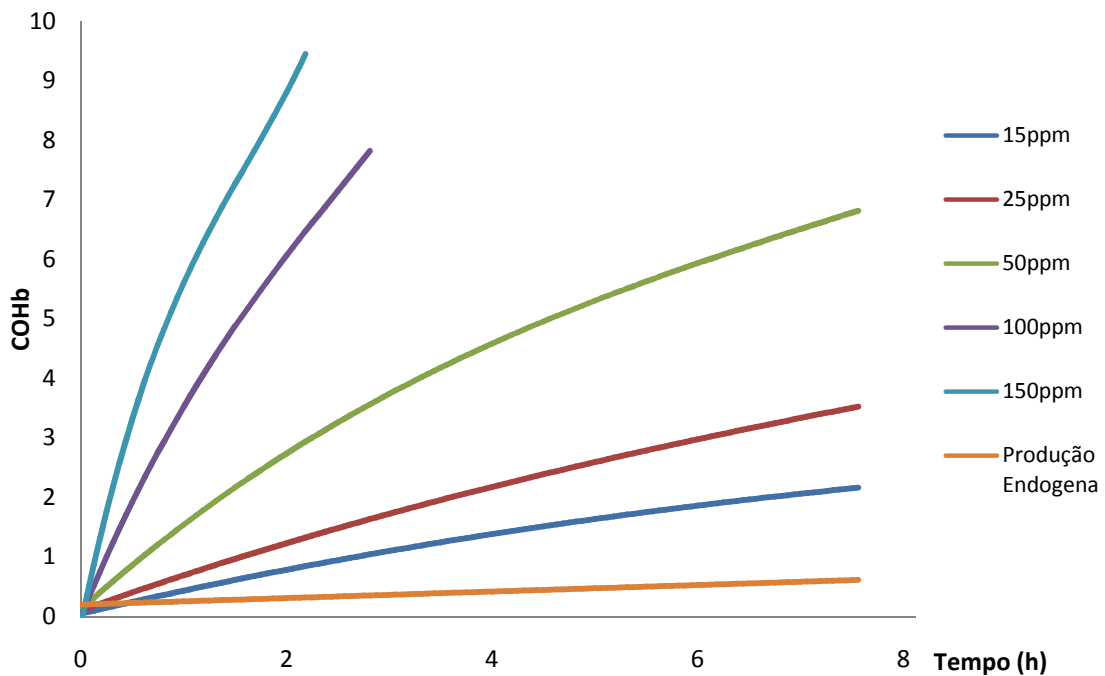


Figura 2.2: Absorção de CO pelo sangue para pessoa em atividade leve em um túnel a 80bpm (adaptado de VDI, 1995)

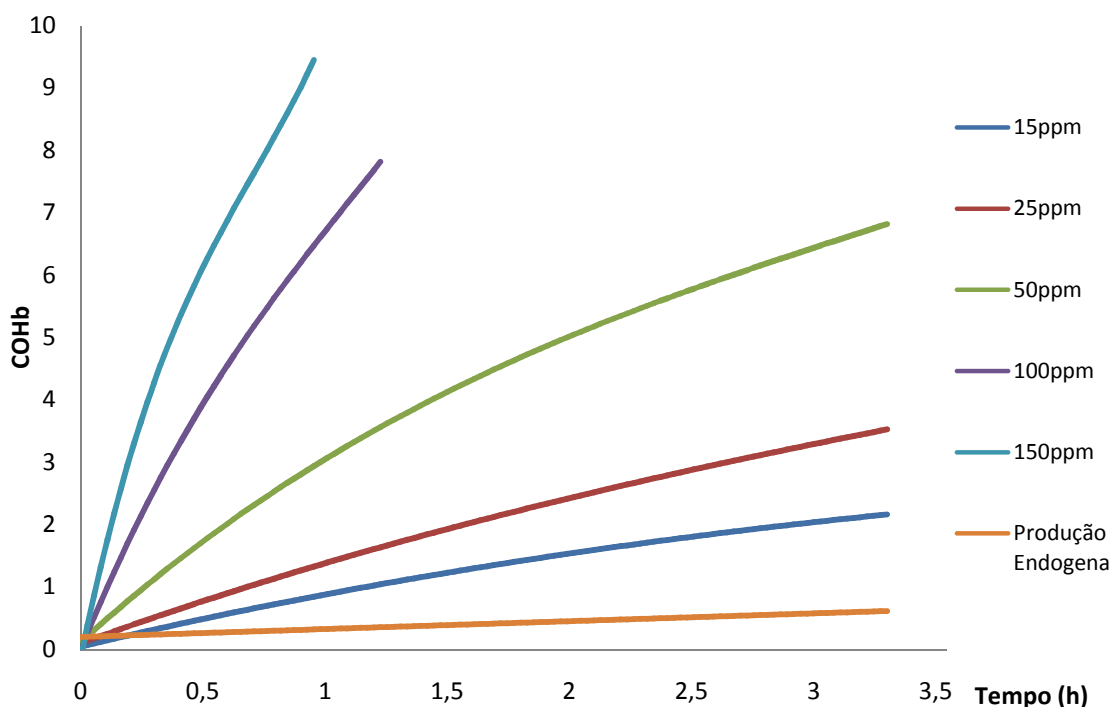


Figura 2.3: Absorção de CO pelo sangue para pessoa em atividade severa a 135bpm (adaptado de VDI, 1995)

O valor de 3 % de CoHb no sangue ocorrem nos túneis aproximadamente sob as seguintes condições, sob atividade leve, (NORMA VDI – 2053, 1995):

- 10 minutos de respiração a 400 ppm
- 30 minutos de respiração a 150 ppm
- 60 minutos de respiração a 80 ppm

Desta forma, em um túnel, o valor de 150ppm de CO não pode ocorrer por mais de meia hora e a ultrapassagem de um valor limite de 250 ppm de CO por mais de 1 minuto deve ocasionar o disparo de sinais de alarme. (NORMA VDI – 2053, 1995)

A Tabela 2.1 mostra alguns valores admissíveis de concentração de CO em túneis urbanos.

Tabela 2.1: Valores admissíveis de concentração de CO em túneis urbanos

Condições de Trânsito	Co (ppm)
Fluxo máximo	150
Ocorrência diária de engarrafamento em uma ou mais pistas. Tráfego lento	150
Engarrafamento excepcional. Parada completa	250

Os efeitos causados em diferentes níveis de COHb podem ser observados na Tabela 2.2, já o grau de intoxicação e seus respectivos sintomas podem ser vistos na Tabela 2.3.

Tabela 2.2: Concentração de CO no ambiente e no sangue e seus efeitos (Peres, 2005)

Quantidade aproximada de CO (ppm) no ambiente		% COHb	EFEITOS
1 h	8 h		
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 hemopoéticas
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, dispnéia 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 caçaca intensas
1430-1710	390-470	50-60	Sincope, convulsões e coma
1710-2000	470-550	60-70	Coma, atividade cardíaca e respiração debilitada, as vezes fatal
2000-2280	550-630	70-80	Falência respiratória e morte.

Tabela2.3: Grau Clínico de Intoxicação por monóxido de carbono (Peres, 2005)

Grau Clínico de Intoxicação	Especificação dos Sintomas
I– Suave	Dor de cabeça, vômitos, taquicardia; sem distúrbios da consciência
II– Moderado	Distúrbios ou perda da consciência sem outros sintomas neurológicos, taquicardia; reflexos nociceptivos (de defesa) ainda intactos
III – Severo	Perda da consciência, tonus muscular intenso, sintomas neurológicos patológicos, taquicardia e taquipnéia; distúrbios circulatórios e respiratórios não observados.
IV – Muito Severo	Perda da consciência, sinais clínicos de danos no sistema nervoso e distúrbios circulatórios e respiratórios

2.3 Túneis

2.3.1 Histórico do Túnel Rebouças

O Túnel Rebouças foi inaugurado em 03 de outubro de 1967, ligando as zonas Norte e Sul, e foi projetado, originalmente, para um volume de tráfego de 76 mil veículos/dia, com duas faixas de rolamento e acostamento. Ele possui 2.040 metros de galeria contínua da Lagoa até o Cosme Velho (L1 e L2) e mais 780 metros na galeria do Cosme Velho até o Rio Comprido (R1 e R2), totalizando 2.820 metros (Figura 2.4). Atualmente o volume diário é de 190 mil veículos/dia, em três faixas de rolamento sem acostamento.

Do ano de 1967 até novembro de 1994, o Túnel Rebouças esteve sob a jurisdição da Fundação do Departamento de Estrada e Rodagens do Estado do Rio de Janeiro (Fundação DER-RJ). No mês de dezembro de 1994, a Administração do Túnel Rebouças passou a ser em regime de cogestão entre a Prefeitura e a FUNDERJ, sendo que, a partir do mês de janeiro de 1995, passou a ser de responsabilidade exclusiva da Prefeitura. O sistema de monitoramento das galerias por câmeras foi implantado em dezembro de 2000. Este sistema funciona com 32 câmeras, sendo 16 em cada uma das galerias, e funcionam 24 horas, gravando tudo o que acontece no interior das galerias (CVE, 2009).

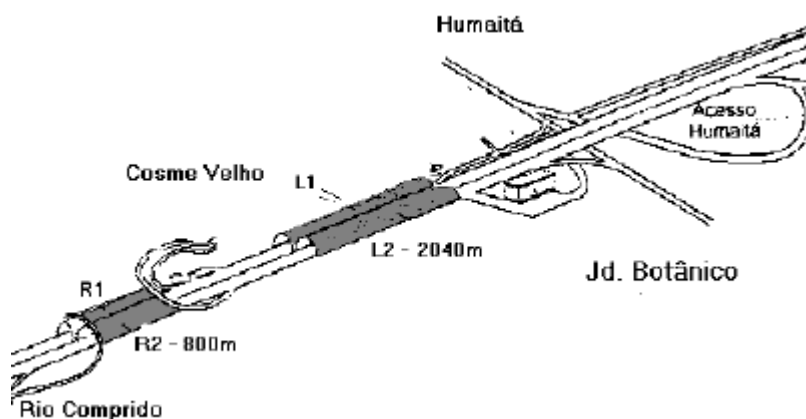


Figura 2.4: Túnel Rebouças com suas galerias R1 e L1, no sentido Rio Comprido-Jardim Botânico. e galerias R2 e L2 no sentido inverso.

O controle de monóxido de carbono no interior das galerias é executado e controlado 24 horas por dia, visando sempre, que os usuários tenham uma qualidade do ar dentro dos limites aceitáveis. Além disso, há um controle eletrônico de contagem de veículos que circulam pelas galerias em ambos os sentidos (CVE, 2009).

2.3.2 Sistemas de Ventilação em Túneis

Por questões de espaço, o sistema de ventilação utilizado em túneis é instalado nas paredes, podendo ser na parte superior ou nas laterais, isto irá depender da geometria do túnel. Quando este possui tráfego de veículos altos ou o teto é baixo, pode-se utilizar os ventiladores presos às paredes laterais. No entanto, quando o túnel é usado somente por veículos baixos ou quando o seu teto é muito alto, os ventiladores podem ficar no teto.

Uma boa ventilação é um dos fatores mais importantes a se garantir quando se trata de túneis. Os sistemas de ventilação empregados podem ser divididos em três tipos, sendo eles o sistema longitudinal, transversal e semi-transversal. O sistema longitudinal é equipado de uma série de ventiladores ou turbo ventiladores ao longo do túnel. Neste sistema os ventiladores próximos da entrada sugam o ar fresco e empurram-no para frente, conduzindo os poluentes para fora do ambiente. Isto sempre é feito com os ventiladores empurrando o ar no sentido do trânsito dos carros (Figura 2.5). O sistema transversal compreende a dois sistemas de escoamento diferentes: um inserindo ar fresco no ambiente e outro retirando o ar com poluente do local (Figura 2.6), ambos são instalados no decorrer do túnel. O sistema semi-transversal é a combinação dos dois sistemas apresentados (Figura 2.7). (CHEN, 2000).

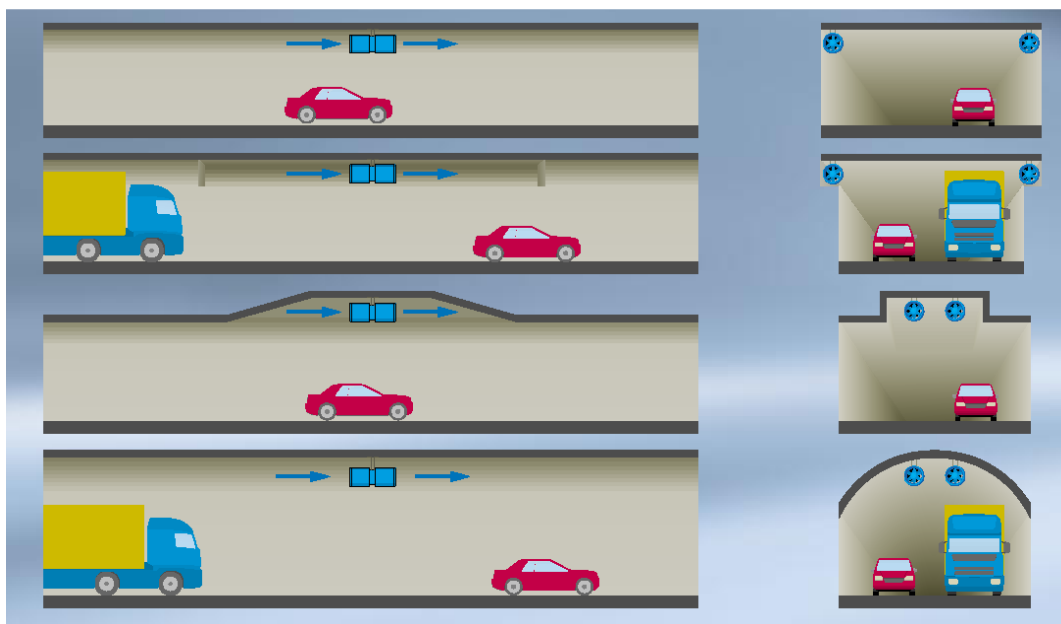


Figura 2.5: Sistema de Ventilação Longitudinal.

O sistema longitudinal tem sido muito utilizado em túneis, pois o efeito pistão causado pelo movimento dos carros ajuda o sistema de ventilação na retirada dos poluentes enclausurados. Devido à experiência com incêndios em túneis e pesquisas realizadas, os

resultados mostram que o controle de poluentes em túneis que utilizam sistemas longitudinais é mais efetivo, apresentando maior facilidade no controle de poluentes (CHEN, 2000).

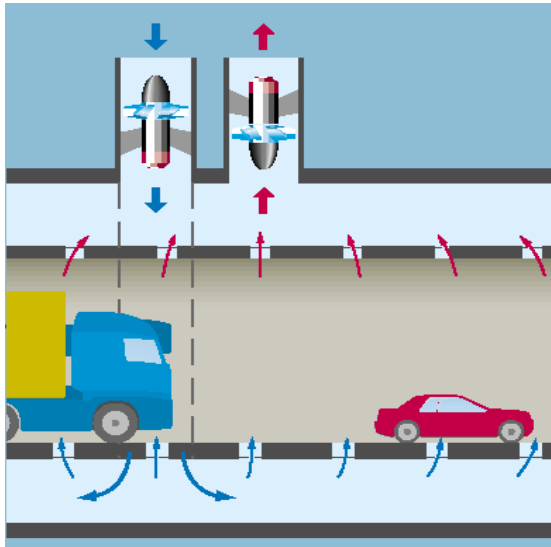


Figura 2.6: Sistema de Ventilação Transversal.

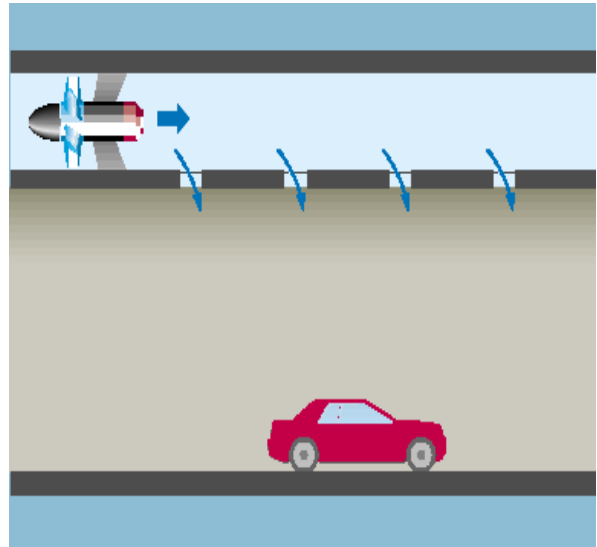


Figura 2.7: Sistema de Ventilação Semi-transversal .

3. Fluidodinâmica Computacional (CFD)

3.1 Introdução

A fluidodinâmica computacional é o estudo, através de métodos computacionais, dos fenômenos de transporte de fluidos que envolvem escoamento de fluidos, transferência de calor, transporte de massa e dispersão de substâncias. CFD pode ser aplicado a escoamentos internos ou externos, misturadores, reatores, bombas, turbinas, trocadores de calor, dentre outros.

Projetos envolvendo o uso de solução numérica como, por exemplo, através de CFD, em momento algum retiram a importância da análise teórica simplificada e muito menos da necessidade de realização de procedimentos experimentais. A abordagem teórica, muitas das vezes, é aplicada para a resolução de problemas nos quais são adotadas algumas hipóteses simplificadoras. A abordagem teórica pode ser bem empregada na solução de problemas simples. Na verdade, em geral, é preferível usá-la nestes casos, ao invés de ferramentas computacionais. A solução analítica simplificada pode também ser empregada como condição inicial para a resolução de problemas mais complexos, utilizando a técnica de CFD. Já os resultados experimentais servem para a validação dos modelos numéricos, assim como, para a elaboração de novos modelos.

Como se trata de um processo computacional, uma vantagem do CFD é que quando os resultados não condizem com os obtidos experimentalmente, é possível modificar os parâmetros dos modelos empregados, melhor ajustar as condições de contorno, geometria, assim como, alguns modelos de transferência de calor e turbulência.

Uma comparação entre as três técnicas de solução de um problema de engenharia é mostrada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Comparação entre as técnicas de solução (Fortuna, 2000).

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

Na Figura 3.1 é possível observar um procedimento para obtenção de uma solução de problema através de técnica de fluidodinâmica computacional. A comparação dos resultados numéricos com os resultados analíticos das equações diferenciais, se existirem, ou com outros resultados numéricos, caracteriza a validação numérica. Por outro lado, a comparação dos resultados numéricos com os resultados experimentais identifica a validação física. Assim, sempre que erros forem detectados deve-se conferir os procedimentos utilizados (Maliska, 2004).

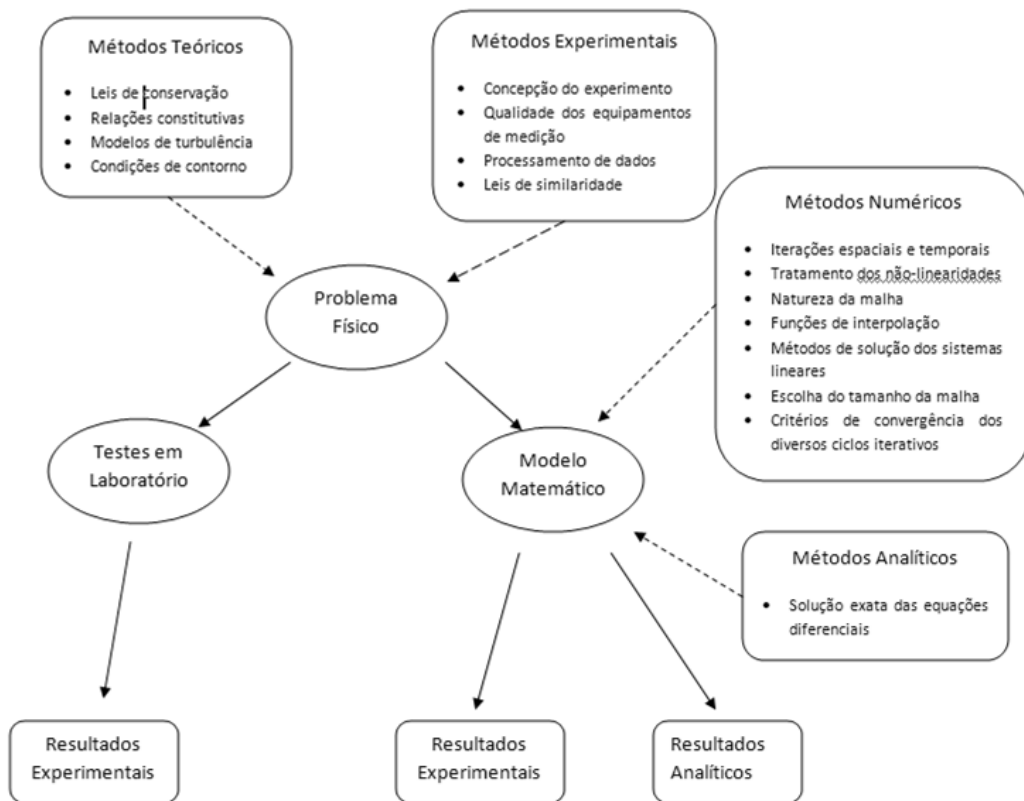


Figura 3.1: Tipos de solução de um problema físico (Maliska, 2004).

3.2 Etapas para a Solução Numérica

Ao se iniciar um projeto de CFD, deve-se avaliar o problema para sabermos quais são as variáveis mais importantes no processo e quais podem ser simplificadas ou até mesmo descartadas frente a outras envolvidas. Nesta etapa, deve-se determinar quais grandezas físicas atuam e como elas afetam o problema.

O problema físico será modelado matematicamente, sendo expresso na forma das leis de conservação de momento, massa e energia. Esses modelos irão explicar o sistema

estudado, além de prever seu comportamento em diferentes situações. Após a modelagem matemática deve-se definir a região de aplicação e validade das equações, isto é, deve-se estabelecer o domínio.

Para tratar o modelo computacionalmente é necessário expressar de forma adequada as equações e a região (domínio) em que elas são válidas. Como não é possível obter-se soluções numéricas sobre uma região contínua, devido aos infinitos pontos da mesma, inicialmente o domínio é discretizado, isto é, este é dividido em um número finito de elementos. Somente nesses pontos as soluções serão obtidas. Ao conjunto de pontos discretos dá-se o nome de malha. A distribuição adequada dos pontos no domínio é fundamental para se obter uma solução numérica representativa do escoamento. Em seguida, os termos que aparecem nas equações são escritos em função dos valores das incógnitas em pontos discretos adjacentes. O resultado é um conjunto de equações algébricas, geralmente lineares, que podem ou não estar acopladas. Nessa etapa, introduzem-se as condições de contorno do problema, que juntamente com os parâmetros do escoamento, especificam o problema a ser tratado (FORTUNA, 2000).

Dessa forma, pode-se concluir que, quanto maior for o número de pontos discretos, mais fina será a malha e, conseqüentemente, mais fiel ao modelo será o resultado numérico obtido. Paralelamente, estar-se-á aumentando o esforço computacional e com isso se terá simulações muito mais demoradas. Na verdade, existe um número mínimo de pontos (nós) a partir do qual a malha deixa de influenciar os resultados. Para se encontrar este número mínimo, é necessário proceder-se a um teste de malha, tomando-se por base, idealmente, algum resultado experimental conhecido.

Na Figura 3.2 são mostradas as etapas para a obtenção da solução numérica.

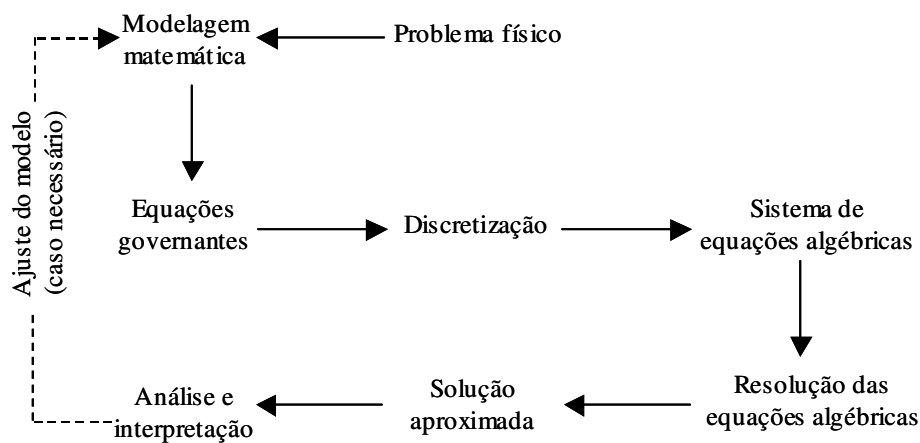


Figura 3.2: Etapas para a obtenção da solução numérica de um problema de fluidos (Fortuna, 2000)

3.3 Malha

A malha é o conjunto de sub-regiões, ou elementos, em que se divide o domínio geométrico do problema. As equações são resolvidas gerando variáveis com valores discretos, em cada elemento, e a solução de um elemento é utilizada como condição de contorno para o elemento adjacente. Devido a isso, deve-se ter uma malha apropriada, com refinamento em regiões onde estão presentes os maiores gradientes das variações, para que se possa captar essas variações (como ocorre em regiões próximas à parede) (CARNEIRO, 2006)

A malha utilizada dependerá da geometria a ser utilizada, assim como, das condições do escoamento, dos fenômenos de transporte envolvidos no projeto e da precisão do resultado a ser obtido. Pode-se dividir as malhas em estruturadas, não-estruturadas e híbridas.

As malhas estruturadas apresentam uma regularidade na distribuição espacial de seus pontos, malhas desse tipo possuem sempre o mesmo número de vizinhos, geralmente malhas hexaédricas. Outra característica desse tipo de malha é que, se traçarmos retas que toquem essas células, essas serão sempre coincidentes com as fronteiras do domínio. Dependendo do ângulo de inclinação dessas retas, podemos classificar uma malha estruturada uniforme (ou ortogonal), como é o caso da Figura 3.3 ou como estruturada não-uniforme (ou com ortogonalidade variável), caso da Figura 3.4.

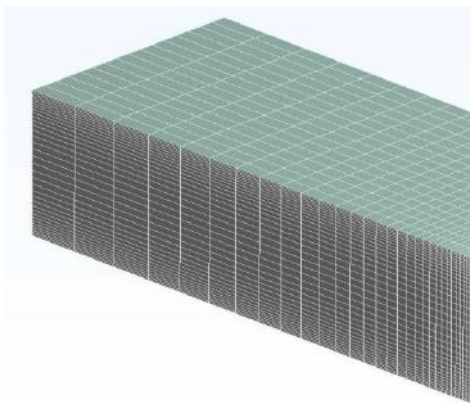


Figura 3.3: Malha Estruturada Uniforme

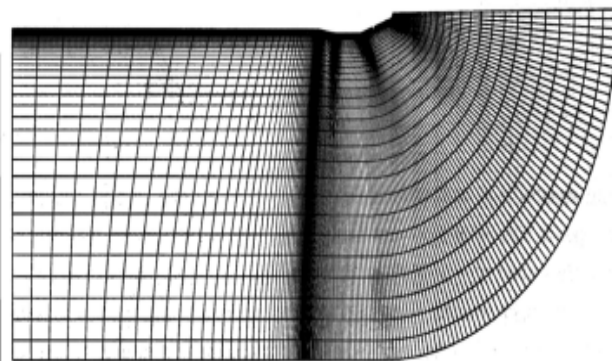


Figura 3.4: Malha Estruturada Não-Uniforme

Diferentemente das malhas estruturadas, as células que fazem parte de uma malha não-estruturada não contém o mesmo número de vizinhos. Além disso, as células podem assumir diferentes formatos (Figura 3.5) como triângulos, tetraedros, prismas, etc. A geração

de malhas desse tipo é muito mais complicada, porém a utilização deste tipo de malha possui uma série de vantagens para geometrias complexas, Figura 3.6.

Dada malha pode empregar ambos os tipos, sendo chamada de híbrida. É possível, por exemplo, empregar malha estruturada locais importantes do escoamento, para refinamento, e malha não estruturada para o resto da geometria, Figura 3.7.

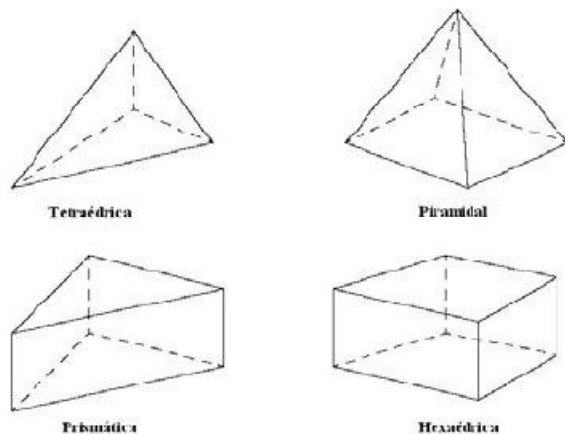


Figura 3.5: Tipos de elementos de malha

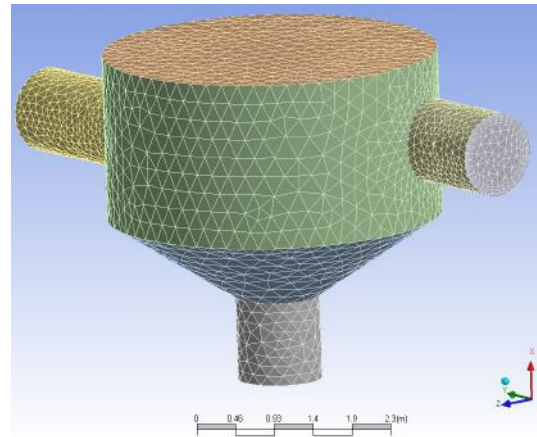


Figura 3.6: Malha Não-Estruturada

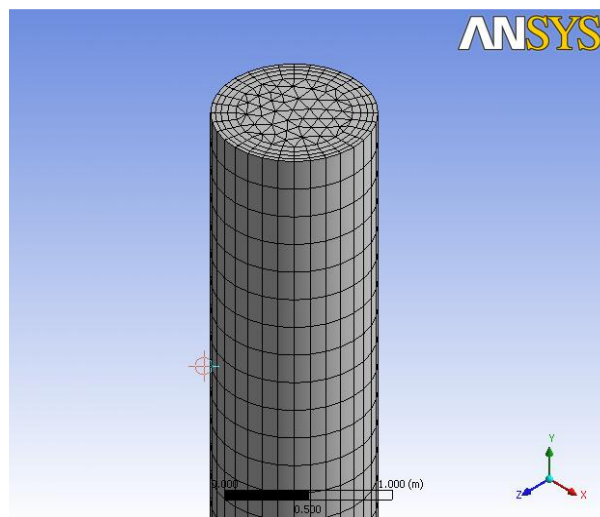


Figura 3.7: Malha Híbrida

3.4 Método dos Volumes Finitos (MVF)

O método de volumes finitos é por vezes confundido com o método das diferenças finitas, apesar de terem formulações bem diferentes, pois, em vários casos, as equações discretizadas obtidas por ambos os métodos são semelhantes. Enquanto o método de

diferenças finitas tem uma dedução puramente matemática, a partir das aproximações de derivadas usando séries de Taylor, a formulação do método de volumes finitos tem base física, a partir da integração das equações diferenciais parciais em uma região ou volume (Pinto e Lage, 2001). A sua desvantagem em relação ao método das diferenças finitas é que para sistemas com escoamento tridimensional é necessário o uso de interpolação e integração, ao passo que no método de diferenças finitas é necessário somente interpolação. Praticamente todos os principais pacotes de CFD hoje disponíveis no mercado para a solução de problemas de escoamento de fluidos com transferência de calor empregam o MVF (MALISKA, 2004).

3.5. Modelagem Matemática

3.5.1 Equações de Transporte

As equações de conservação usadas neste trabalho para representar o escoamento de ar e poluentes dentro do túnel Rebouças podem ser escritas como se segue, assumindo-se algumas aproximações.

Equação instantânea da continuidade: é a equação que descreve a variação da densidade do fluido. Considerando-se nulos os termos de geração, ela pode ser escrita de forma mais concisa em notação vetorial como:

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

Onde o termo da esquerda representa a taxa de aumento da massa por unidade de volume e o segundo a taxa líquida de adição de massa por unidade de volume, devido à por convecção.

- equação do movimento: é a equação que descreve a conservação do momento.

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

Onde, $\boldsymbol{\tau}$ 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.

4. Materiais e Métodos

4.1 Computador e Pacote Computacional Utilizados

As simulações foram conduzidas em um microcomputador com processador intel core 2 duo de 2, 67 GHz, 2 GB de memória RAM, memória física de 250 GB. A malha foi elaborada em um computador com processador intel quad-core de 2,33 GHz, 4 GB de memória RAM e 800 GB de memória física. Os softwares utilizados foram o Design Modeler, para a construção da geometria, o ICEM, para a confecção da malha, e o CFX , para a modelagem, solução do problema numérico e visualização dos resultados. Todos estes programas são da ANSYS, Inc.

4.2 Variáveis de Interesse

Nas simulações realizadas as variáveis de interesse foram a distribuição de monóxido de carbono (CO) e a sua concentração no ponto de medição experimental do túnel Rebouças, que se encontra a uma distância de 1500 m da entrada, no sentido Lagoa - Cosme Velho, na galeria L1. (ver Figura.2.4)

4.3 Planejamento de Experimentos

A metodologia do planejamento fatorial, associada à análise de superfícies de respostas, é uma ferramenta fundamentada na teoria estatística, que fornece informações seguras sobre o processo, minimizando o empirismo que envolve técnicas de tentativa e erro (Box *at al*, 1978).

O planejamento de experimentos consiste no estudo dos métodos da amostragem e dos problemas correlatos que surgem (Spiegel, 1982). Seu princípio básico permite variar de uma só vez todos os níveis de todas as variáveis, discretas ou contínuas (chamadas de fatores), de maneira programada e racional. O planejamento de experimentos permite o estudo de numerosos fatores, mantendo-se o número de ensaios em níveis razoáveis. O experimentador pode reduzir o tempo de trabalho, diminuindo o número de pontos de experiência por fator, sem ser obrigado a limitar o número de fatores, como ocorre no método clássico da experimentação.

Ao utilizar esta técnica neste estudo, pretendem-se obter a concentração do monóxido de carbono em diferentes condições de tráfego, grau de utilização dos ventiladores e turbo

ventiladores no Túnel, que são os fatores que podem influenciar na variação da concentração do CO.

O planejamento de experimentos empregado utilizou o método de superfície de resposta com três pontos centrais, dois fatores e um modelo cúbico com 10.

O monóxido de carbono como foi escolhido substância indicadora das condições de poluição do túnel devido aos seus valores de concentração, medidos no interior do Rebouças, que são da ordem de dezena de ppm. Os demais poluentes gasosos apresentam concentrações menores que o CO, da ordem de ppb. Outro fator que influenciou na escolha do CO, é que este é usado como condição de alarme pelos controladores do túnel Rebouças. Isto é, os operadores ligam os ventiladores e turbo ventiladores quando o teor de CO atinge o valor de 100 ppm.

Na Tabela 4.1, são apresentados as condições do planejamento de experimentos. A faixa de velocidades empregada foi de 0 a 80 km/h e de utilização dos ventiladores, de 0 a 1 (0 a 100%).

Tabela 4.1: Planejamento de experimentos para o Túnel Rebouças através do método de superfície de resposta.

Experimento	Velocidade dos Carros (km/s)	Utilização dos Ventiladores
1	0,00	0,5000
2	40,00	0,0000
3	80,00	0,5000
4	40,00	1,0000
5	68,29	0,8536
6	68,29	0,1464
7	11,71	0,8536
8	11,71	0,1464
9	40,00	0,5000
10	40,00	0,5000
11	40,00	0,5000
12	0,00	1,0000

4.4 Dados experimentais de Concentração de CO e Números de Carros

A Figura 4.4 mostra a concentração de monóxido de carbono medida no interior da galeria L1 do túnel Rebouças a uma distância de 1500 m da entrada, no período de 24 h, (ALMEIDA, 2004).

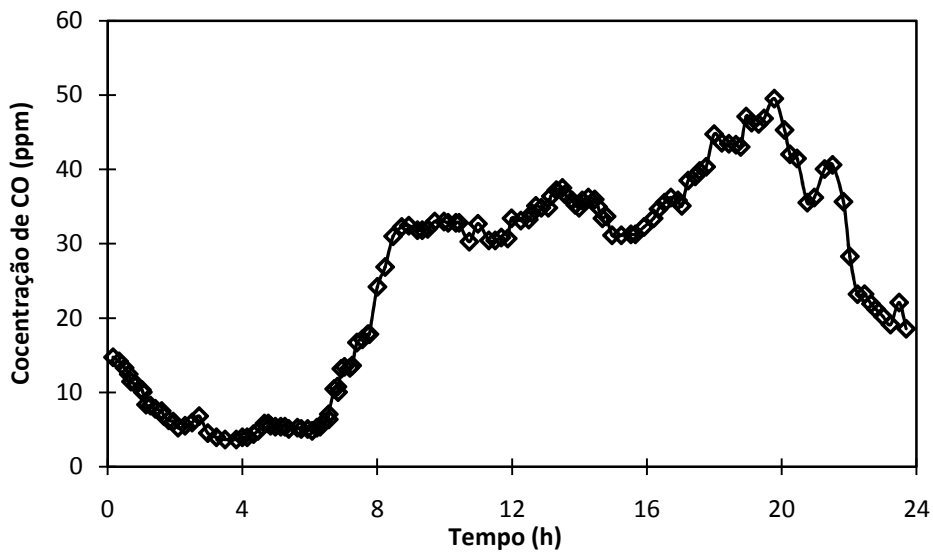


Figura 4.4: Concentração de monóxido de carbono no interior do Túnel Rebouças, em função do horário

Como número de carros se mantém praticamente constante no período de 7 às 19 horas e seu valor é de aproximadamente de 6.000 carros/h (Figura 4.5), foram feitos cálculos para prever o número de carros presentes no túnel em diferentes condições de velocidade, com base nas equações a seguir. Para a condição de engarrafamento no túnel (velocidade igual a zero), foi estimada uma distância de 1 metro entre os carros, no sentido longitudinal.

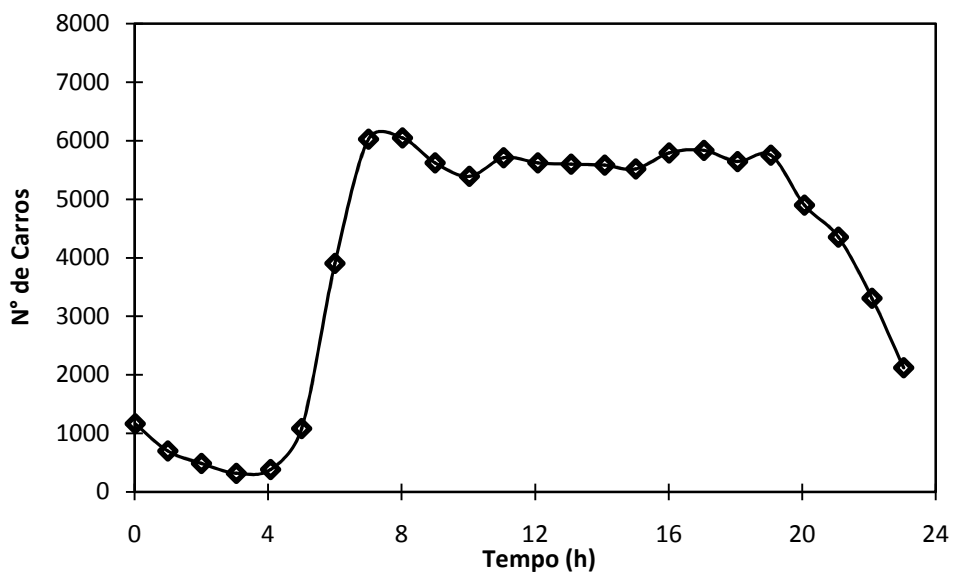


Figura 4.5: Fluxo veicular registrado no interior do Túnel Rebouças, em função do horário.

$$N_C = \frac{F_C}{v_c} L_T; \text{ para } v_c > 0 \quad (4.1)$$

$$N_C = \frac{L_T \cdot N_f}{(L_C + e)}; \text{ para } v_c = 0 \quad (4.2)$$

Onde,

N_C = Número de carros presente no túnel, a dada velocidade.

F_C = Fluxo de carros no túnel em dado instante (carros/h).

L_T = Comprimento da galeria L1 do túnel Rebouças (m).

v_c = Velocidade dos carros (m/h)

L_C = Comprimento dos carros.

N_f = Número de faixas no túnel.

e = Distância média entre os carros, a $v_c=0$.

A Tabela 4.2 mostra o valor empregado neste trabalho para as variáveis das equações (4.1) e (4.2).

Tabela 4.2: Valores das constantes apresentadas nas equações 4.1 e 4.2

Variáveis	Valor
F_C	6.000 carros/h
L_T	2.040 m
v_c	0-11,71-40-68,29-80 km/h
N_f	3
L_C	3,6 m/carro
e	1,0 m

Na Tabela 4.3 são apresentados os números de carros calculados através das equações 4.1 e 4.2.

Tabela 4.3: Número de carros presente no túnel para as velocidades obtidas no planejamento de experimentos

Velocidade dos Carros (km/h)	Nº Carros
0,00	1329
11,71	1045
40,00	306
68,29	179
80,00	153

4.5 Fator de emissão

A combustão completa de hidrocarbonetos puros gera H₂O e CO₂. Contudo, as condições para a combustão completa quase nunca são verificadas, ocorrendo a queima parcial do combustível e ainda reações indesejáveis. Nesta situação, são produzidos alguns subprodutos, sendo alguns deles poluentes perigosos.

A emissão de poluentes oriundos de carros é influenciada por uma série de fatores como nível de aceleração, combustível utilizado, quilometragem do carro, ano de fabricação (diminuição dos limites emissão por exigência do governo), dentre outros.

Através da utilização de simuladores de tráfego na quantificação de emissões veiculares, Jacontino (2005) fez um estudo aplicado a condições de transito e perfis de aceleração de carros. Desta forma, ele empregou dados de taxa de emissão em condições de velocidade constante, aceleração e desaceleração. Estes valores foram utilizados no presente trabalho para variar a taxa de emissão do monóxido de carbono em diferentes velocidades dos carros. (Tabela 4.4). É importante resaltar que os dados da Tabela 4.4 são referentes à gasolina. Conseqüentemente, todos os resultados obtidos neste trabalho se referem a este combustível somente.

Tabela 4.4: Taxas de emissão para automóveis em velocidade constante utilizando gasolina como combustível (Liu 2005).

Fator de Emissão (g/s)	Velocidade (Km/h)								
	0	10	20	30	40	50	60	70	80 ^a
CO	0,060	0,060	0,091	0,130	0,129	0,090	0,110	0,177	0,291

a – O último valor, 80Km/h, foi obtido por interpolação dos três valores anteriores.

4.6 Geometrias e Malhas Utilizadas

Para realização das simulações do Túnel Rebouças, foi utilizado o seu tamanho em escala real. Porém, ao ser feito o desenho da geometria houve a necessidade de utilizar uma escala de 1:5, pois os programas de desenho como CAD e o Workbench possuem limitação de comprimento de, aproximadamente, 500 m da origem. Como o Rebouças possui um comprimento de 2.040m na galeria L1, justifica-se este procedimento. Sendo assim, ao se inserir as condições de contorno no CFX-PRE, antes das simulações, foi feita a modificação para a escala real.

Na Figura 4.6, são apresentadas as dimensões da seção transversal do túnel Rebouças em escala real.

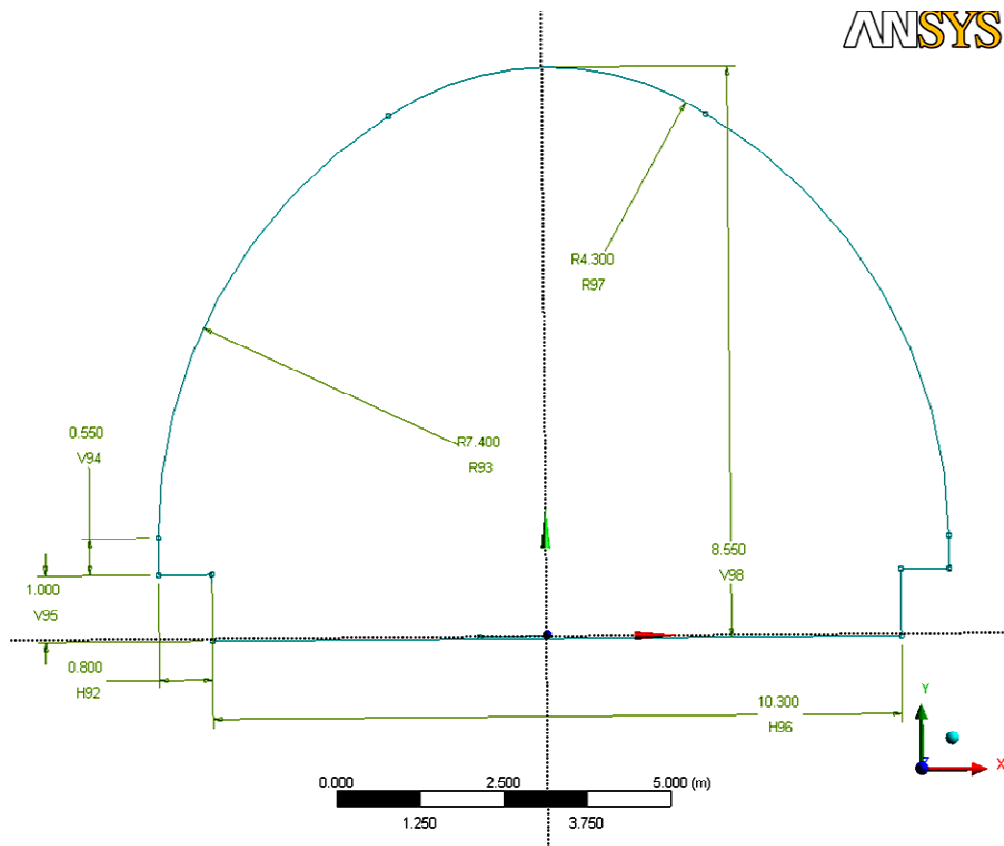


Figura 4.6: Dimensões da face transversal do túnel Rebouças

A Tabela 4.5 mostra as dimensões principais da galeria L1 do Túnel Rebouças.

Tabela 4.5: Proporções geométricas (em m) do Túnel Rebouças

Geometria	Dimensão
Comprimento	2.040 m
Largura	11,90 m
Altura dos ventiladores	7,80 m
Altura Central	8,60 m
Diâmetro dos Ventiladores	1,33 m
Diâmetro dos Turbo ventiladores	1,25 m
Área de cada fonte de emissão de poluente	0,25 m ²

No CFX, os carros em movimento foram considerados como paredes móveis. São, três faixas no chão com 2,5 m de largura cada, onde os carros se encontram. Estas faixas se prolongam da entrada até a saída do túnel. Entre as três faixas com carros que se movem, denominadas “faixas móveis”, foram criadas duas faixas, denominadas “faixas fixas” (a faixa fixa é a colorida de verde na Figura 4.7). Nestas faixas fixas, foram impressas pequenas faces, com $0,25 \text{ m}^2$ de área, ao longo do túnel para representar a fonte de poluentes.

O túnel Rebouças possui uma inclinação no sentido Lagoa - Cosme Velho na galeria L1, de 40m de diferença entre saída e entrada.

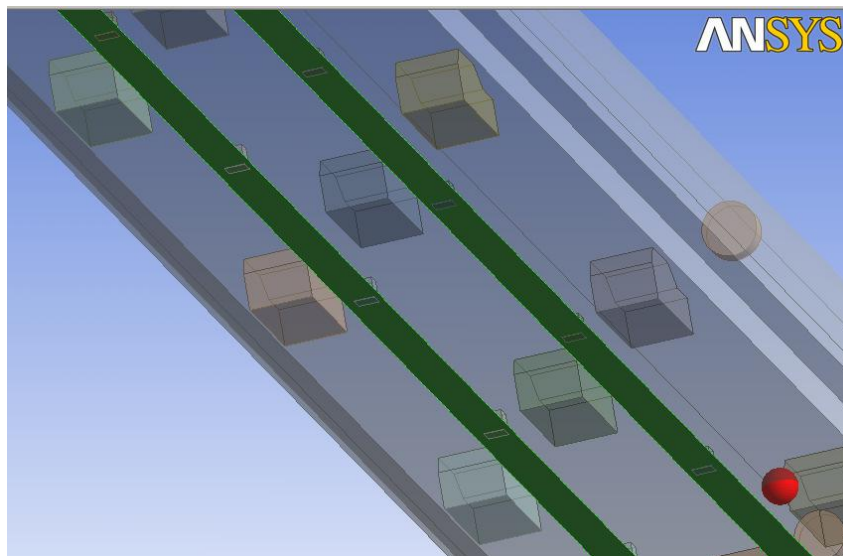


Figura 4.7: Faixas fixas na cor verde com pequenos quadrados atuando como fontes de emissão dos poluentes.

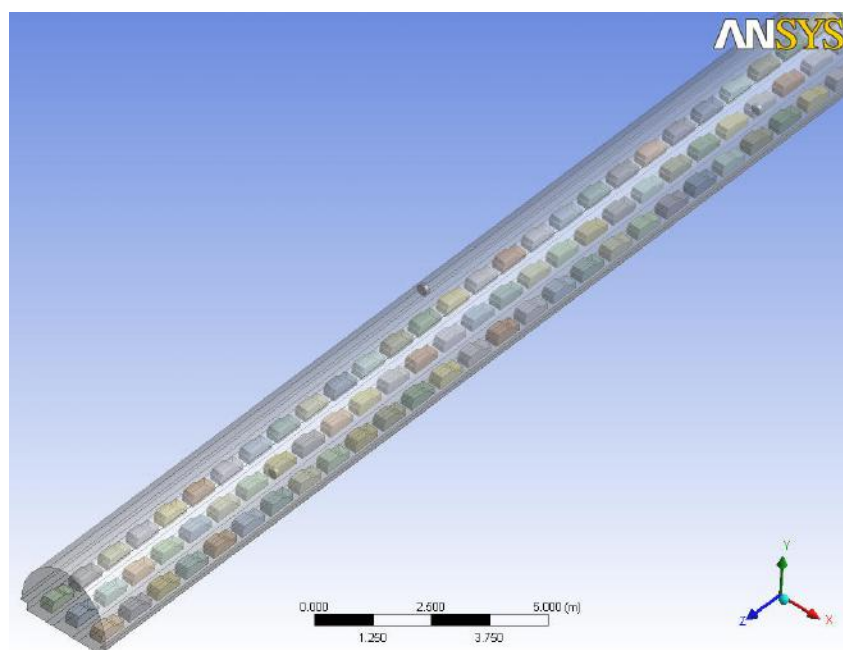


Figura 4.8: Geometria do Túnel Rebouças com carros parados.

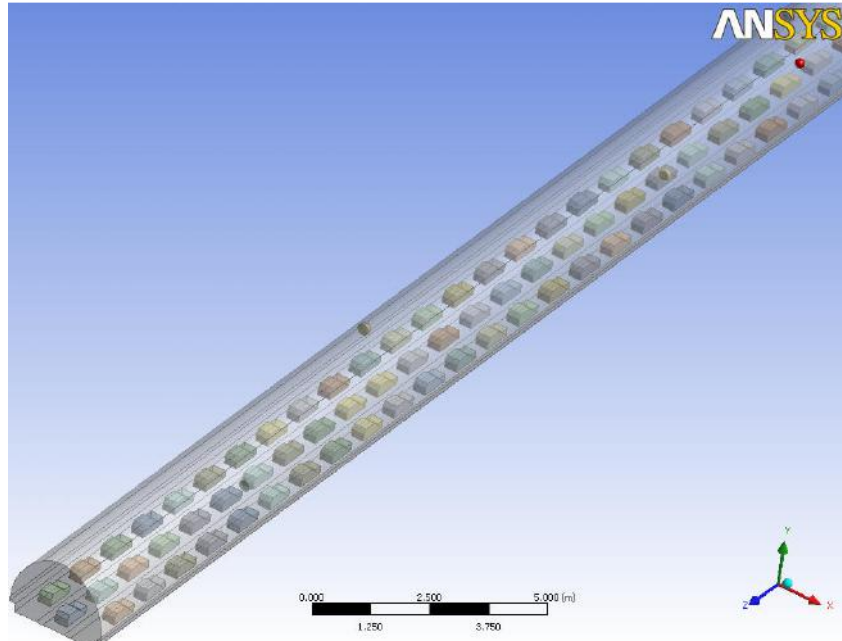


Figura 4.9: Geometria do Túnel Rebouças com carros a 12 Km/h.

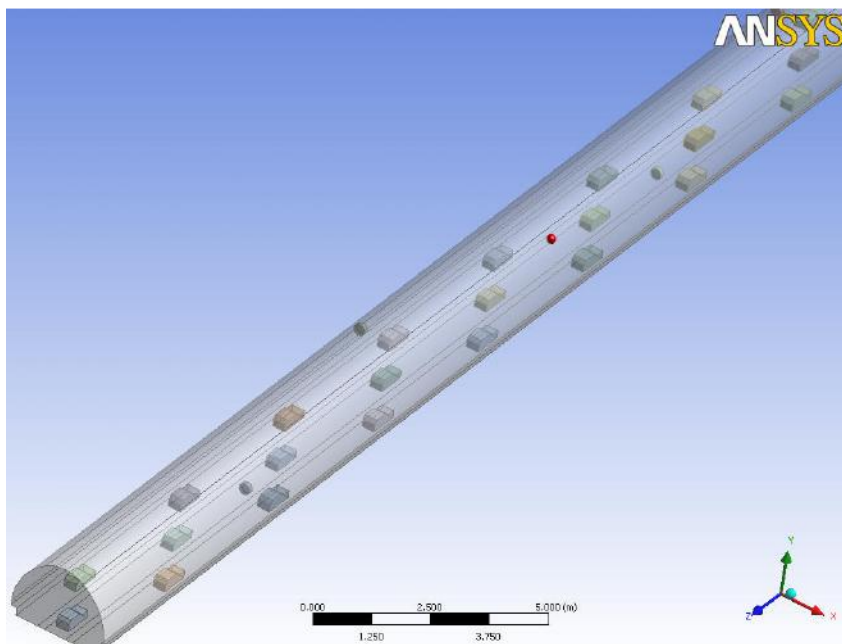


Figura 4.10: Geometria do Túnel Rebouças com carros a 40Km/h.

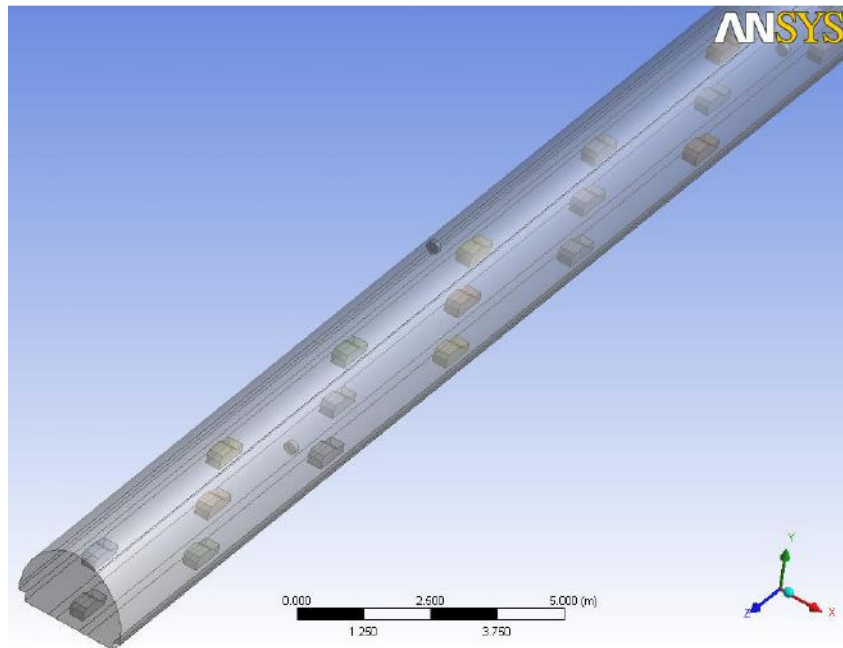


Figura 4.11: Geometria do Túnel Reboças com carros a 60 Km/h.

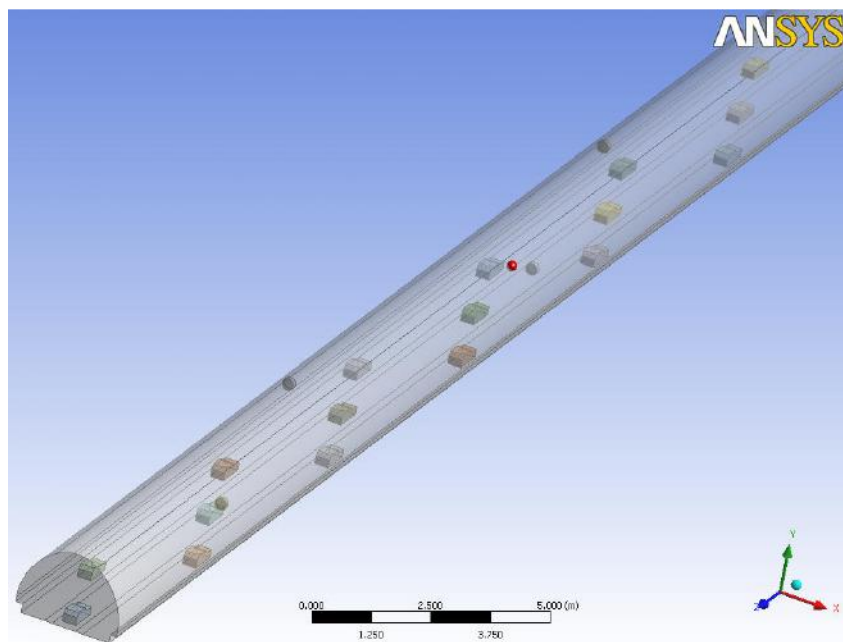


Figura 4.12: Geometria do Túnel Reboças com carros a 68 Km/h.

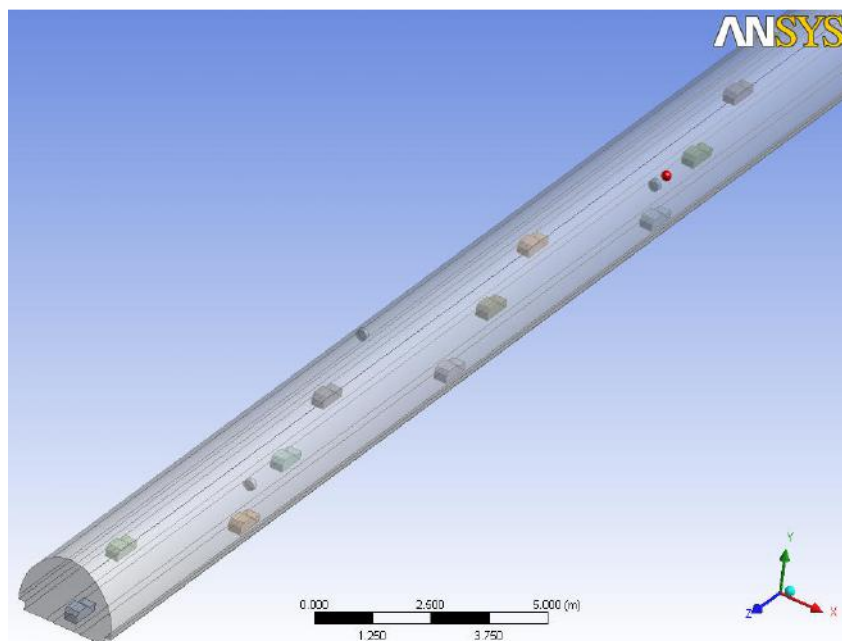


Figura 4.13: Geometria do Túnel Rebouças com carros a 80Km/h.

A malha utilizada é composta por elementos tetraédricos puros. Todas as simulações possuem tamanho de elementos iguais em cada uma das partes presentes na geometria. Ou seja, todos os carros de todas as simulações possuem o mesmo refinamento. Com isso, as malhas terão tamanhos diferentes devido à quantidade de carros presente na geometria, já que os demais objetos, tais como ventiladores, entrada, saída são iguais para todas as geometrias.

Desta forma, foram criadas malhas para cada velocidade dos carros que foram chamadas de C_12, C_40, C_68, C_80 e Parado. A Figura 4.5 apresenta a malha C_40, sendo as demais semelhantes a esta.

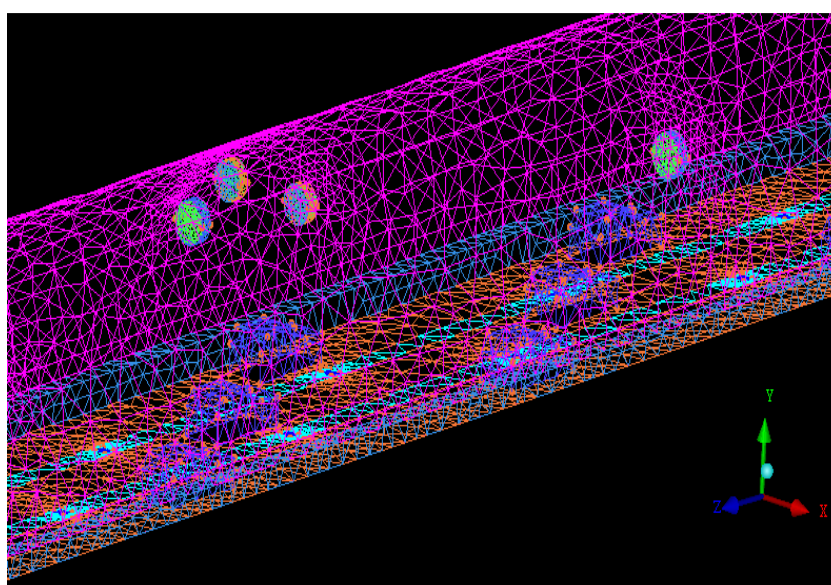


Figura 4.5: Malha da Simulação com Carros a 40 Km/h.

Na Tabela 4.6 são apresentados o número de nós e elementos para cada uma das malhas utilizada nos experimentos

Tabela 4.6: Composição da malha para as geometrias dos experimentos.

Geometria	Nº de Carros	Malha	
		Nós	Elementos
Parado	1329	614.790	3.565.429
C_12	1045	562.687	3.257.604
C_40	306	365.028	2.093.887
C_68	179	319.033	1.826.283
C_80	153	303.241	1.735.295

4.7 Parâmetros de Simulação

4.7.1 Parâmetros Constantes

Todas as simulações foram feitas com uma mistura de composição variável de dois fluidos diferentes (ar e CO). Nas regiões de *entrada do túnel* e de *fonte de poluentes*, as composições utilizadas foram somente ar e somente CO respectivamente uma vez que na entrada principal do domínio só existe ar e na entrada de poluente foi considerado, por simplificação, que só existe monóxido de carbono. Na saída do túnel, foi empregada condição de saída (*outlet*), a pressão atmosférica.

Como o túnel possui vários ventiladores e turbo ventiladores distribuídos ao longo do seu comprimento e a concentração de poluente varia com a posição, não foi possível inserir diretamente, como condição de contorno, as frações mássicas, de CO e ar nas entradas e saídas dos ventiladores. A solução para contornar este problema foi utilizar a opção *gradiente zero*, disponível no CFX. Esta opção permite a utilização da composição próxima à face normal dos ventiladores como valor para condição de contorno. Esta estratégia foi importante para garantir o balanço de massa para cada componente desta região.

Os parâmetros que foram mantidos constantes em todas as simulações são mostrados na Tabela 4.7 e 4.8.

Tabela 4.7: Parâmetros fixos utilizados nas simulações.

Parâmetro	Valor
Pressão de Referência	1,0 atm
Condição de Contorno: entrada	Pressão total (somente ar)
Condição de Contorno: saída	0,0 atm
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
Condições iniciais do fluido no domínio	Ar: 1 CO: 0
Critério de convergência	MAX (Resíduo máximo)
Resíduo máximo permitido	1×10^{-9}

Tabela 4.8: Composições utilizadas nas entradas e saídas das simulações.

Localização	Composição	
	Ar	Poluente
Entrada do Túnel	1	0
Fontes de Poluente	0	1
Sucção dos Ventiladores	Gradiente Zero	
Descarga dos Ventiladores	Gradiente Zero	
Sucção dos Turbo Ventiladores	Gradiente Zero	
Descarga dos Turbo ventiladores	Gradiente Zero	
Saída do Túnel	Outlet	

4.7.2 Parâmetros Variáveis

De acordo com o planejamento de experimentos, trabalhou-se com duas variáveis básicas, *número de carros e utilização dos ventiladores*. A velocidade dos carros influencia diretamente na geometria e nas condições de contorno das simulações (*velocidade e de emissão do CO*), pois através dela é que sabemos quantos carros estão presentes no túnel, através da Equação 4.1 e 4.2.

Com relação à utilização dos ventiladores, devido à dificuldade em se trabalhar com os ventiladores e turbo-ventiladores como unidades diferentes, adotou-se, como simplificação, usar, para os dois tipos sempre a mesma porcentagem de utilização dos ventiladores, por exemplo, considerou-se o valor igual a 100% quando ambos estiverem no máximo (24 m/s e 34 m/s, respectivamente) e igual a zero quando estiverem desligados.

Como mencionado anteriormente, as fontes de poluentes são quadrados igualmente distribuídos ao longo do túnel, na mesma quantidade de veículos, sobre duas *faixas fixas* entre os carros (Figura 4.6). Optou-se por inserir a entrada de poluente como velocidade, na condição de contorno. Estas fontes não foram posicionadas nos carros devido à dificuldade de se fazer a malha nas dimensões dos escapamentos, pois como o tamanho destes eram muito menores que os demais elementos, seria necessário um alto grau de refinamento, o que iria aumentar muito o tamanho da malha. O outro motivo dos poluentes não saírem dos carros é que foi adotada a condição de *velocidade de parede* nas condições de contorno dos carros, esta opção não permitia inserir uma entrada de poluente nesta mesma região.

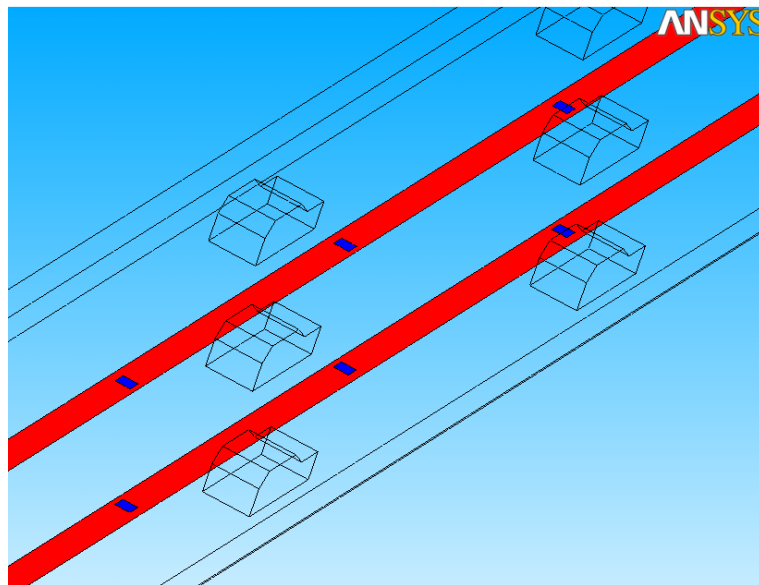


Figura 4.6: Localização das fontes de poluentes (quadrados em azul) e as duas faixas fixas.

A equação abaixo foi empregada no cálculo da emissão de poluente por cada carro, a dada velocidade.

$$v_{CO} = \frac{Q_{CO}}{\rho_{CO} \cdot A_{fonte}} \quad 4.3$$

Onde,

v_{CO} = velocidade do poluente;

Q_{CO} = Emissão de poluente (kg/s);

ρ_{CO} = densidade do poluente = 1,45 kg/m³;

A_{fonte} = área do quadrado de saída do poluente (m²);

A Tabela 4.9 complementa a Tabela 4.1, do planejamento de experimentos.

Tabela 4.9: Parâmetros específicos utilizados nas simulações.

Experimento	Velocidade dos Carros (km/h)	Utilização dos Ventiladores (%)	Nº Carros	Fator de emissão por carro (g/s)	Emissão total (g/s)	Velocidade dos poluentes (m/s)
1	0,00	50,00	1329	0,060	79,7	2,0961E-04
2	40,00	0,00	306	0,129	39,5	4,5066E-04
3	80,00	50,00	153	0,291	44,5	1,0166E-03
4	40,00	100,00	306	0,129	39,5	4,5066E-04
5	68,29	85,36	179	0,165	29,5	5,7642E-04
6	68,29	14,64	179	0,165	29,5	5,7642E-04
7	11,71	85,36	1045	0,0669	69,9	2,3364E-04
8	11,71	14,64	1045	0,0669	69,9	2,3364E-04
9	40,00	50,00	306	0,129	39,5	4,5066E-04
10	40,00	50,00	306	0,129	39,5	4,5066E-04
11	40,00	50,00	306	0,129	39,5	4,5066E-04
12	0,00	100,00	1329	0,060	79,7	2,0961E-04

5. Resultados e Discussão

5.1 Resultados das Simulações Numéricas

Após a realização das simulações do planejamento de experimentos, foi possível observar uma não adequação do modelo proposto aos resultados obtidos. Isso se deveu a uma má escolha de uma das variáveis, qual seja, a velocidade dos carros. Esta variável influencia diretamente duas outras na composição dos experimentos, o número de carros no túnel e a emissão por carro (Figuras 5.1 e 5.2, respectivamente). Com isso, foi necessária a utilização de uma nova variável. Após alguns testes, concluiu-se que o número de carros era a variável mais adequada para o bom equacionamento do problema.

Os resultados obtidos mostram uma dependência linear da concentração de CO com a posição, no interior do túnel. Desta forma, foi inserida uma nova variável de resposta ao resultado do planejamento, com a finalidade de obter-se o coeficiente angular da reta que descreve a variação da concentração de CO com a posição no túnel. Através desta variável obtém-se a equação da reta, que possibilita compor um modelo que descreva a concentração do monóxido de carbono em todo o túnel, não se restringindo ao ponto de medição a 1500 m (ver equações 5.2 e 5.3).

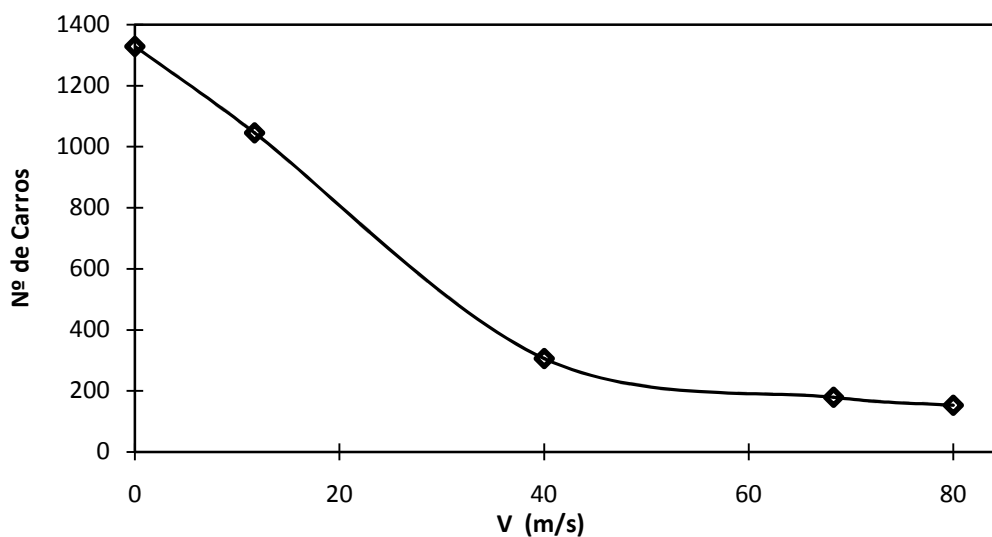


Figura 5.1: Nº de carros em função da velocidade, obtidos através da equação 4.1 e 4.2.

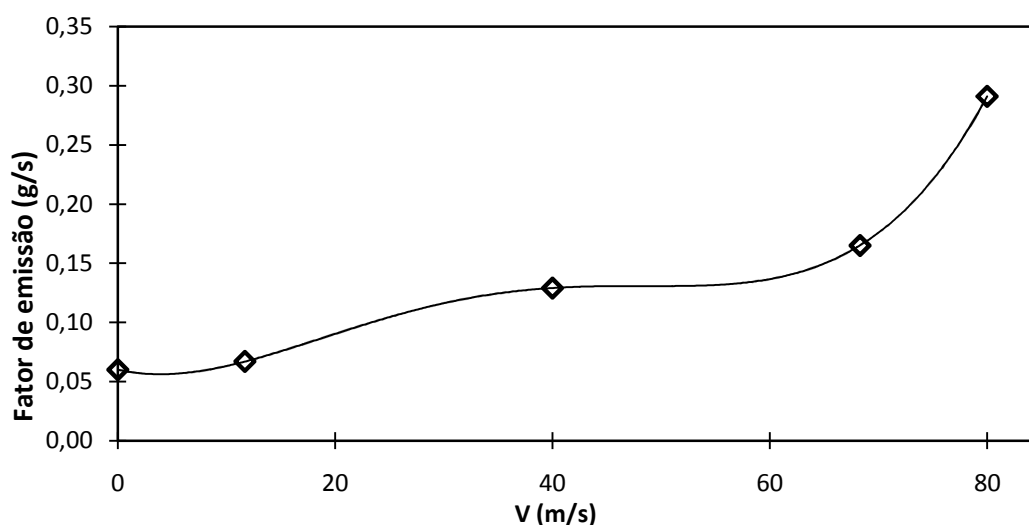


Figura 5.2: Emissão por carro (g/s) em função da velocidade (m/s).

A Tabela 5.1 mostra a concentração de CO obtida nas simulações numéricas, a 1500 m da entrada no sentido Lagoa/ Cosme Velho a uma altura de 2 metros na parede esquerda do Túnel Rebouças. É possível observar, nesta Tabela, a influência dos ventiladores na dispersão dos poluentes no interior do túnel. Avaliando-se os experimentos 5 e 6, onde os carros estão a uma velocidade de aproximadamente 68 km/h, observa-se um aumento de 139% na concentração de monóxido de carbono ao se passar de uma utilização de ventiladores de 85% para 15%. Já quando temos os carros a uma velocidade de aproximadamente de 12 km/h, nos experimentos 7 e 8, verifica-se um aumento de mais de 5 vezes na concentração de CO, ao se baixar a utilização dos ventiladores de 85% para 15% aproximadamente.

Nas simulações, encontrou-se uma concentração média de CO, na área transversal, linear com a distância, a partir da entrada do túnel, e passando pela origem, isto é, concentração média de CO na entrada igual a zero.

Os valores do coeficiente angular destas retas, para cada situação simulada, são também apresentados na Tabela 5.1

Tabela 5.1: Concentração de CO obtida nas simulações numéricas, a 1500 metros da entrada no sentido lagoa / Cosme Velho a uma altura de 2 metros na parede esquerda do Túnel Rebouças e coeficiente angular da curva de concentração de CO em função da posição longitudinal no túnel

Experimento	Velocidade dos Carros (km/h)	Utilização dos Ventiladores (%)	Nº de Carros	Concentração de CO (ppm)	Coeficiente angular da curva de [CO] (ppm/m)
1	0,00	50,00	1329	182	0,1209
2	40,00	0,00	306	165	0,1096
3	80,00	50,00	153	55	0,0364
4	40,00	100,00	306	35	0,0232
5	68,29	85,36	179	26	0,0173
6	68,29	14,64	179	62	0,0413
7	11,71	85,36	1045	94	0,0624
8	11,71	14,64	1045	517	0,3441
9	40,00	50,00	306	67	0,0446
10	40,00	50,00	306	67	0,0446
11	40,00	50,00	306	67	0,0446
12	0	100,00	1329	91	0,0602

b- Medição feita a 1500 da entrada no sentido lagoa / Cosme Velho a uma altura de 2 metros na parede esquerda do Túnel Rebouças

5.2 Resultados do Planejamento de Experimentos

A análise estatística dos dados simulados forneceu os resultados mostrados nas Tabelas 5.2 a 5.5 e nas Equações 5.1 e 5.2 para as respostas *concentração do CO* e *Coeficiente angular da curva de concentração de CO*. É possível observar que todos os termos relativos ao modelo apresentaram valores de “Prob > F” inferiores a 0,05, indicando que os termos e os modelos são estatisticamente significativos (Tabelas 5.3 e 5.5).

O coeficiente de determinação (R^2) obtido foi de 0,999999966, e o coeficiente de determinação ajustado (R_{ajus}^2) foi de 0,999999814 para a equação (5.1). Já para a equação (5.2), o coeficiente de determinação (R^2) obtido foi de 0,999999991, e o coeficiente de determinação ajustado (R_{ajus}^2) foi de 0,999999952.

$$C_{CO,x=1500} = b0 + b1.f_{UV} + b2.N_C + b3.f_{UV}^2 + b4.N_C^2 + b5.f_{UV}.N_C + b6.f_{UV}^3 + b7.N_C^3 + b8.f_{UV}^2.N_C + b9.f_{UV}.N_C^2 \quad (5.1)$$

$$\alpha = b0 + b1.f_{UV} + b2.N_C + b3.f_{UV}^2 + b4.N_C^2 + b5.f_{UV}.N_C + b6.f_{UV}^3 + b7.N_C^3 + b8.f_{UV}^2.N_C + b9.f_{UV}.N_C^2 \quad (5.2)$$

Onde,

$C_{CO, X=1500}$ = Concentração de monóxido de carbono em ppm medida a 1500 m da entrada do túnel ppm.

f_{UV} = Fração da utilização dos ventiladores.

N_C = Número de carros no túnel.

α = Coeficiente angular da curva de [CO] em (ppm/m).

Tabela 5.2: Resultados estatísticos do planejamento de experimentos dos parâmetros codificados para a concentração de CO (ppm) como resposta.

Parâmetro	Valor ajustado	-95%	95%	VIF
b0	85,67825	84,03568	87,32081	
b1	-65,991	-69,3045	-62,6776	875,5805
b2	31,0989	29,18663	33,01118	417,0533
b3	237,7498	235,4823	240,0172	159,8258
b4	32,48285	30,74129	34,22441	41,54817
b5	-264,325	-266,213	-262,438	184,4709
b6	-96,4679	-98,843	-94,0927	312,6495
b7	32,429	30,58608	34,27191	267,9254
b8	277,178	274,2307	280,1253	368,4152
b9	-179,263	-183,573	-174,952	729,8895

Tabela 5.3: Análise de variância (ANOVA) para o modelo de superfície de resposta com equação cúbica para concentração de CO como resposta.

Parâmetro	Soma de Quadrados	GL	Média Quadrática	F	Prob > F	Significância
Modelo	196932,1	9	21881,34	6569743	< 0.0001	Significativo
A	24,45672	1	24,45672	7342,985	0.0001	Significativo
B	16,30749	1	16,30749	4896,229	0.0002	Significativo
A2	677,8959	1	677,8959	203534,2	< 0.0001	Significativo
B2	21,45009	1	21,45009	6440,264	0.0002	Significativo
AB	1209,126	1	1209,126	363033	< 0.0001	Significativo
A3	101,711	1	101,711	30538,13	< 0.0001	Significativo
B3	19,0922	1	19,0922	5732,319	0.0002	Significativo
A2B	545,3326	1	545,3326	163732,9	< 0.0001	Significativo
AB2	106,6333	1	106,6333	32016,01	< 0.0001	Significativo
Erro Puro	0,006661	2	0,003331			-
Cor Total	196932,1	11				-

Tabela 5.4: Resultados estatísticos do Planejamento de Experimentos dos parâmetros codificados para o Coeficiente angular da curva de concentração de CO como resposta.

Parâmetro	Valor ajustado	-95%	95%	VIF
b0	5,7892E-02	5,7336E-02	5,8448E-02	
b1	-4,6742E-02	-4,7864E-02	-4,5620E-02	875,58
b2	2,2389E-02	2,1741E-02	2,3037E-02	417,05
b3	1,5667E-01	1,5590E-01	1,5744E-01	159,83
b4	2,0735E-02	2,0145E-02	2,1325E-02	41,55
b5	-1,7467E-01	-1,7531E-01	-1,7403E-01	184,47
b6	-6,2152E-02	-6,2957E-02	-6,1348E-02	312,65
b7	1,9872E-02	1,9247E-02	2,0496E-02	267,93
b8	1,8231E-01	1,8131E-01	1,8331E-01	368,42
b9	-1,1610E-01	-1,1756E-01	-1,1464E-01	729,89

Tabela 5.5: Análise de variância (ANOVA) para o modelo de superfície de resposta com equação cúbica para o Coeficiente angular da curva de concentração de CO como resposta.

Parâmetro	Soma de Quadrados	GL	Média Quadrática	F	Prob > F	Significância
Modelo	8,7308E-02	9	9,7009E-03	25384695,36	< 0.0001	Significativo
A	1,2270E-05	1	1,2270E-05	32107,19	< 0.0001	Significativo
B	8,4521E-06	1	8,4521E-06	22116,90	< 0.0001	Significativo
A2	2,9438E-04	1	2,9438E-04	770300,98	< 0.0001	Significativo
B2	8,7404E-06	1	8,7404E-06	22871,26	< 0.0001	Significativo
AB	5,2798E-04	1	5,2798E-04	1381574,54	< 0.0001	Significativo
A3	4,2220E-05	1	4,2220E-05	110477,52	< 0.0001	Significativo
B3	7,1690E-06	1	7,1690E-06	18759,39	< 0.0001	Significativo
A2B	2,3592E-04	1	2,3592E-04	617342,60	< 0.0001	Significativo
Erro Puro	4,4730E-05	1	4,4730E-05	117046,39	< 0.0001	Significativo
Cor Total	7,6431E-10	2	3,8216E-10			

Na Tabela 5.6 são apresentados os valores dos coeficientes das equações (5.1) e (5.2), parâmetros para o modelo não codificado para as respostas concentração de CO e coeficiente angular da curva de concentração de CO.

Tabela 5.6: Coeficientes das equações (5.1) e (5.2).

Parâmetro	Equação (5.1)	Equação (5.2)
b0	3,5666E+01	2,2923E-02
b1	-1,6776E+02	-1,0263E-01
b2	3,2895E-01	2,1965E-04
b3	7,1141E+02	4,5352E-01
b4	2,5783E-04	1,7849E-07
b5	-1,2478E+00	-8,3898E-04
b6	-7,7174E+02	-4,9722E-01
b7	1,5951E-07	9,7747E-11
b8	1,8856E+00	1,2402E-03
b9	-1,0370E-03	-6,7161E-07

Com os resultados obtidos é possível observar que todos os termos do modelo apresentaram um alto grau de ajuste, demonstrando significância estatística. Em função disto e dos valores de R^2 , R_{adj}^2 obtidos terem sido muito próximos a 1, considerou-se os modelos descritos pelas equações 5.1 e 5.2, com os coeficientes apresentados na Tabela 5.2 como adequados.

Os resultados obtidos no planejamento de experimentos que resultaram nas equações 5.1 e 5.2 são mostrados Figura 5.3 e 5.4 para *concentração de CO* e para o *Coefficiente angular da curva de concentração de CO*, respectivamente.

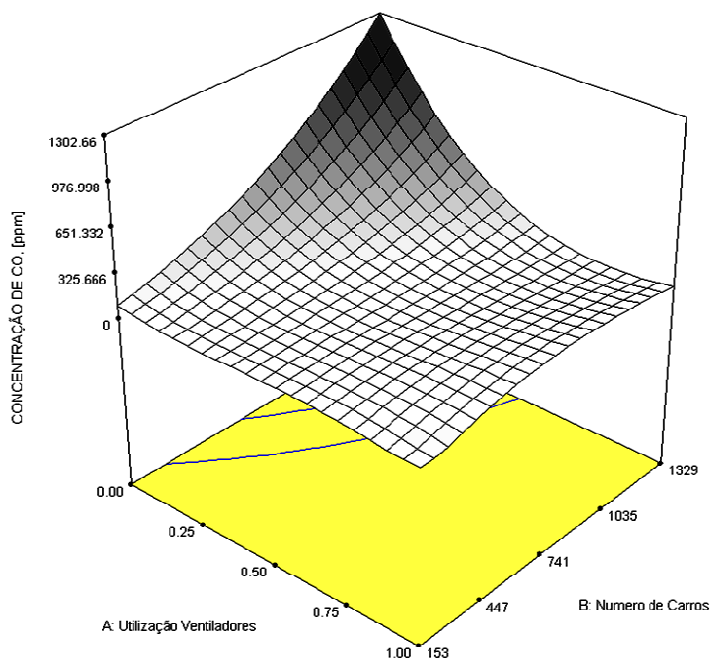


Figura 5.3: Concentração média de CO a 1500 m da entrada do túnel em função do número de carros e da utilização dos ventiladores

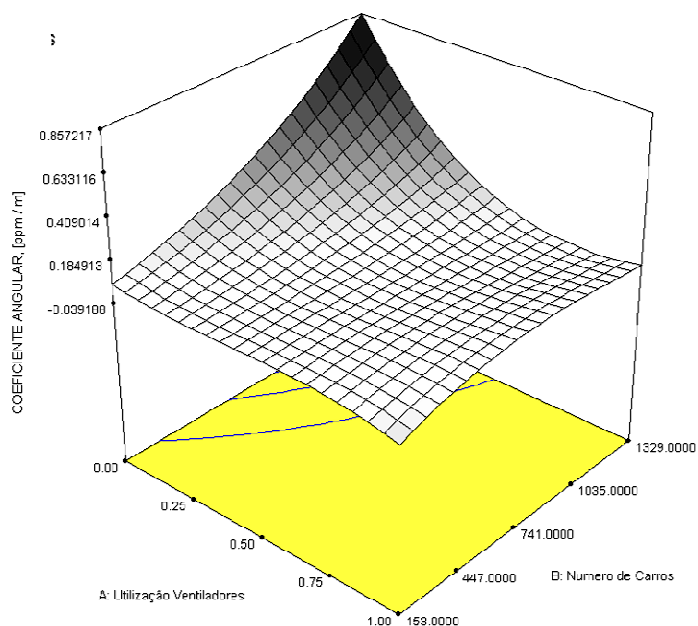


Figura 5.4: Coeficiente angular da curva de concentração de CO em função do número de carros e da utilização dos ventiladores.

Como esperado, as Figuras 5.3 e 5.4 têm o mesmo formato, por serem resposta das mesmas variáveis e serem linearmente dependentes, já que a curva de concentração do CO é linear com a posição do túnel.

5.3 Perfis de Concentração

Como mencionado anteriormente, a concentração do CO em (ppm), resposta do planejamento de experimentos, foi obtida através do cálculo feito a 1500 da entrada no sentido lagoa / Cosme Velho a uma altura de 2 metros na parede esquerda do Túnel Rebouças. Este ponto de medição é o mesmo em que o CO foi medido experimentalmente no trabalho de ALMEIDA (2004), no túnel Rebouças. É interessante notar que o valor da concentração de CO neste ponto é praticamente igual ao valor médio na área transversal (Tabela 5.7). Como existe um gradiente de concentração na área (por exemplo, para o experimento 8, a concentração de monóxido de carbono varia de 503 a 621 ppm, como mostrado na Figura 5.5, pode-se concluir que o ponto de medição experimental de CO existente no túnel Rebouças é bastante adequado (Figura 5.5).

Tabela 5.7 Comparação da concentração do monóxido de carbono medido no ponto e na média da seção transversal.

Experimentos	Concentração do CO (ppm)		
	No ponto	Na seção transversal	diferença (%)
1	182	184	0,99
2	165	165	0,11
3	55	55	0,10
4	35	35	0,29
5	26	26	0,94
6	62	62	0,62
7	94	94	0,32
8	517	520	0,54
9	67	67	0,23
10	67	67	0,17
11	67	67	0,19
12	91	91	0,84

Comparando-se os valores da Tabela 5.7 com os experimentais dados na Figura 4.4, entre 7 e 19 h, pode-se perceber que os valores simulados, considerando-se $50\% < f_{UV} < 100\%$, situam-se na mesma faixa dos medidos experimentalmente.

Para que seja possível uma previsão da concentração de monóxido de carbono ao longo do túnel, e não apenas no ponto a 1500 m, foi adicionada aos resultados a resposta *coeficiente angular da curva de concentração de CO*. A utilização desta foi possível devido a uma dependência linear da concentração de monóxido de carbono com a posição longitudinal do túnel.

A equação abaixo fornece a concentração média de CO (C_{CO}) no plano transversal, para qualquer distância (X) a partir da entrada do túnel. Os valores de α podem ser calculados através da equação (5.2) para qualquer número de carros (N_C) e velocidade (v_C), respeitando os limites ($132 < N_C < 1329$) e $0 < v_C < 80$ km/h) empregados neste trabalho. O coeficiente linear desta reta é zero, pois foi considerado que o ar que entra no túnel está isento de CO.

$$C_{CO} = \alpha * X \quad (5.3)$$

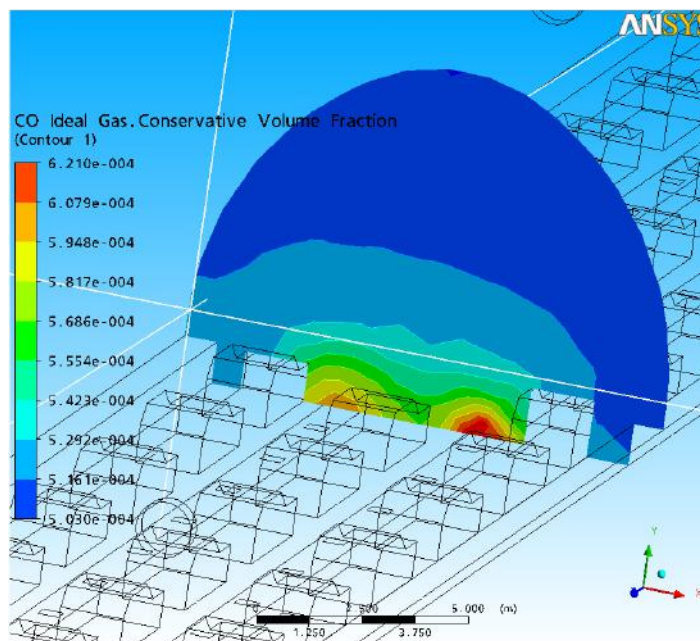
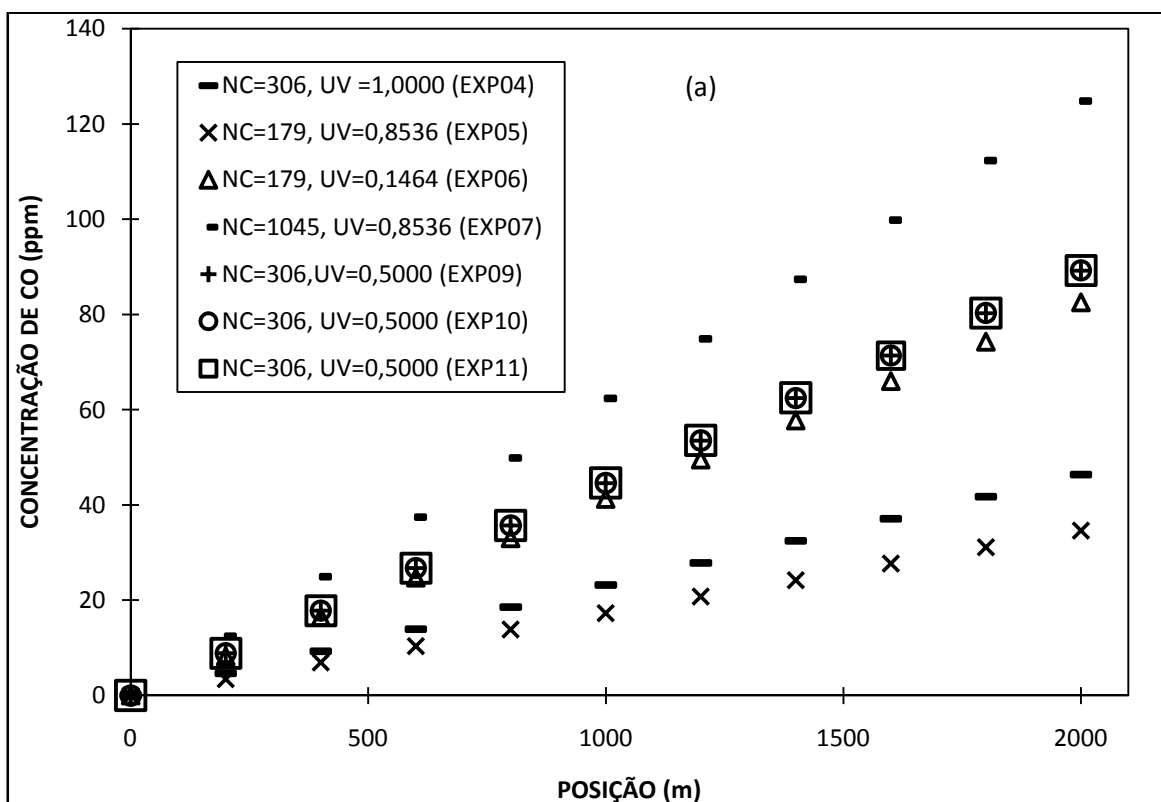


Figura 5.5: Gradiente de concentração de CO no plano da seção transversal ao túnel a 1500 m da entrada.

Na Figura 5.6 é apresentada a concentração de monóxido de carbono no interior do túnel Rebouças em função da distância X.



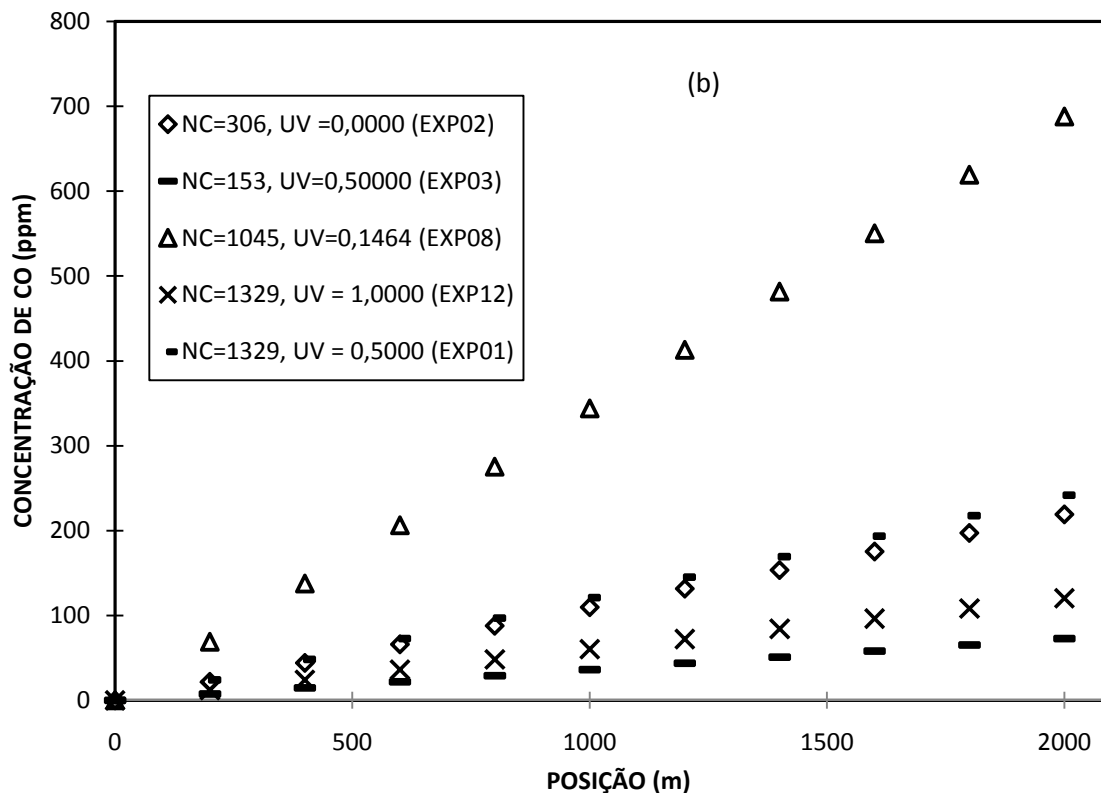


Figura 5.6: Distribuição da concentração de monóxido de carbono, no estado estacionário, ao longo do túnel para as condições apresentadas, onde N_c é o número de carros e UV é a fração de utilização de ventiladores. A figura foi dividida em a e b para melhor apresentação dos resultados, face à grande variação na concentração de CO.

Nas Figuras 5.8-5.18 são mostradas as concentrações de monóxido de carbono no interior do túnel Rebouças para os casos previstos no planejamento de experimentos. As Figuras 5.16-5.18 são repetições no ponto central do planejamento de experimentos. A fim de permitir uma comparação entre estas figuras, estipulou-se a faixa de $50 < C_{CO} < 150$ ppm. Escolheu-se 150 ppm como máximo porque, segundo a Figura 5.19, nesta concentração a concentração de COHb atinge o valor crítico de 3% entre 20 minutos e 1 hora, dependendo da atividade física em desenvolvimento. O valor médio da faixa (100 ppm) foi adotado por ser o valor limite para o qual os ventiladores são ligados, na sua potência máxima, no túnel Rebouças.

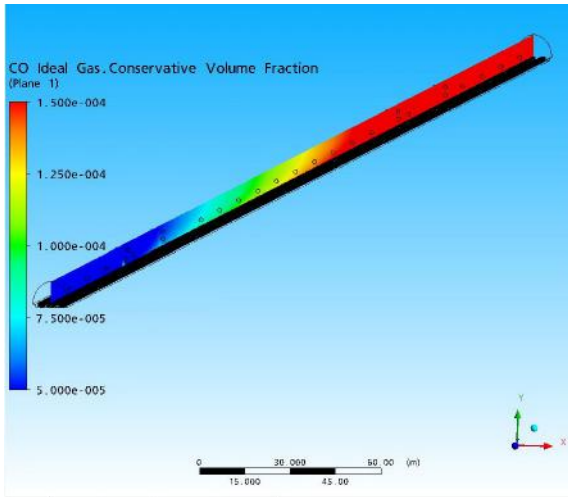


Figura 5.7: Distribuição da concentração para $N_C=1329$, $f_{UV} = 0,5000$ (EXP01)

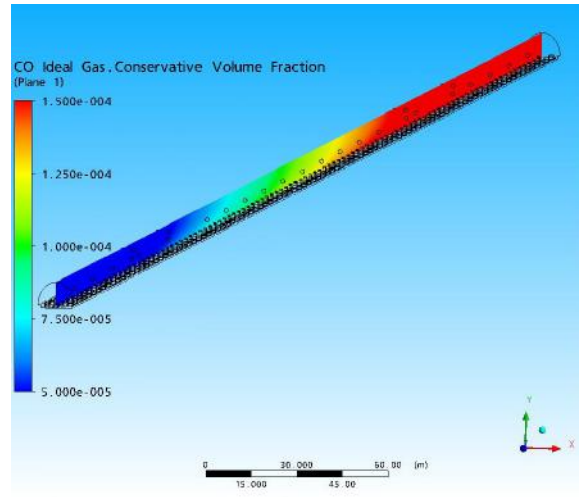


Figura 5.8: Distribuição da concentração para $N_C=306$, $f_{UV} = 0,0000$ (EXP02)

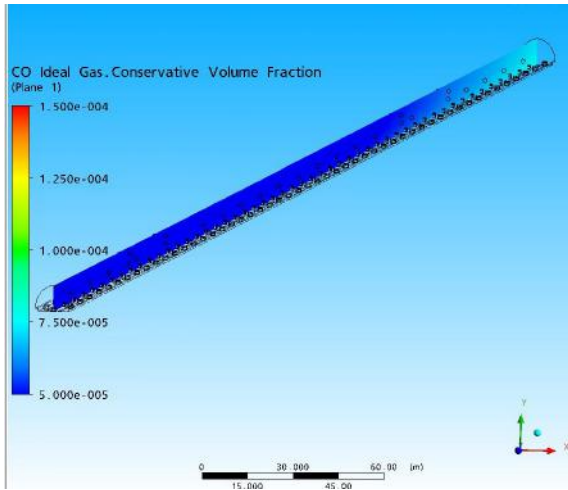


Figura 5.9: Distribuição da concentração para $N_C=153$, $f_{UV}=0,50000$ (EXP03)

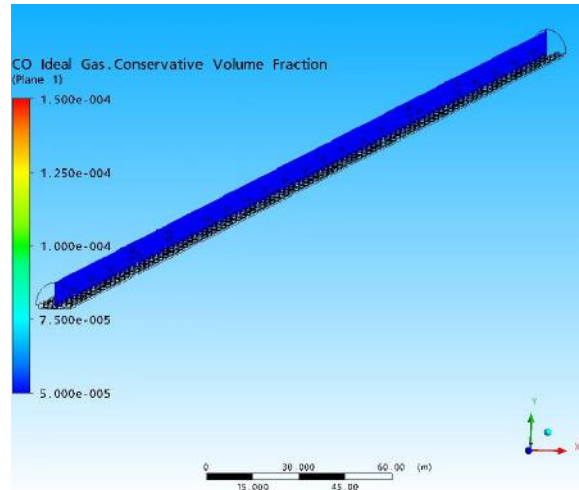


Figura 5.10: Distribuição da concentração para $N_C=306$, $f_{UV} = 0,10000$ (EXP04)

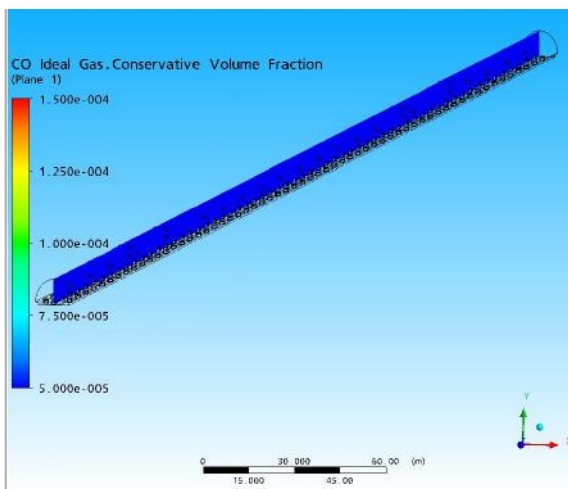


Figura 5.11: Distribuição da concentração para $N_C=179$, $f_{UV}=0,8536$ (EXP05)

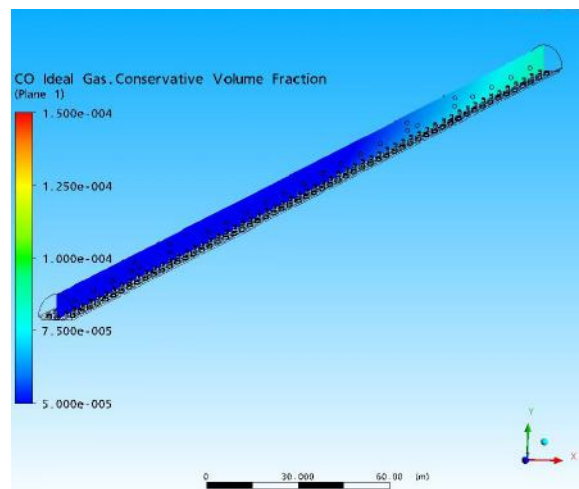


Figura 5.12: Distribuição da concentração para $N_C=179$, $f_{UV}=0,1464$ (EXP06)

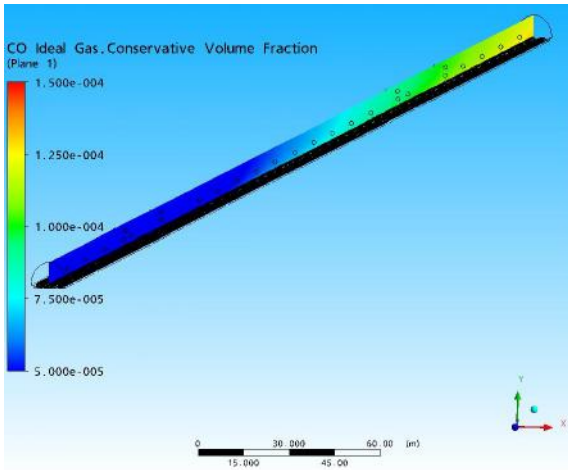


Figura 5.13: Distribuição da concentração para $N_C=1045$, $f_{UV}=0,8536$ (EXP07)

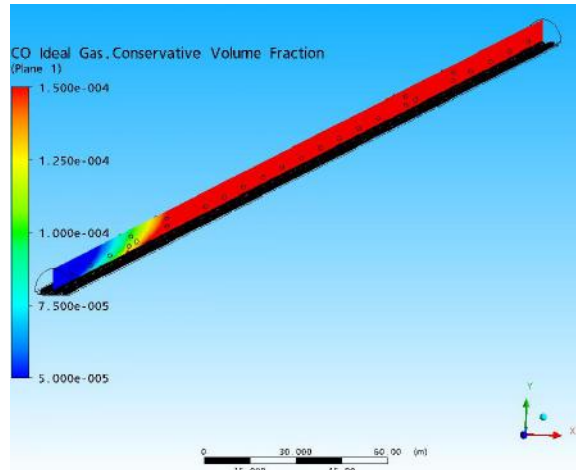


Figura 5.14: Distribuição da concentração para $N_C=1045$, $f_{UV}=0,1464$ (EXP08)

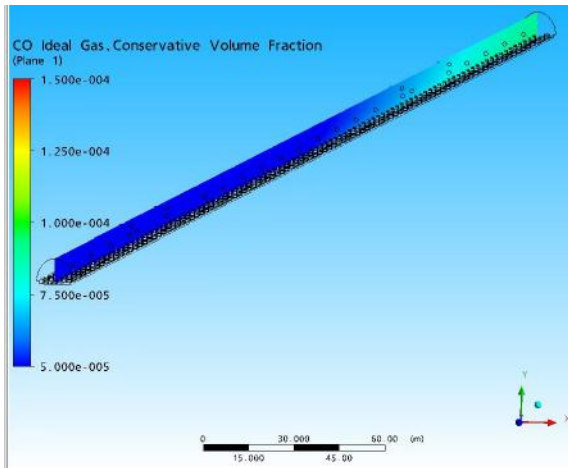


Figura 5.15: Distribuição da concentração para $N_C=306$, $f_{UV}=0,5000$ (EXP09)

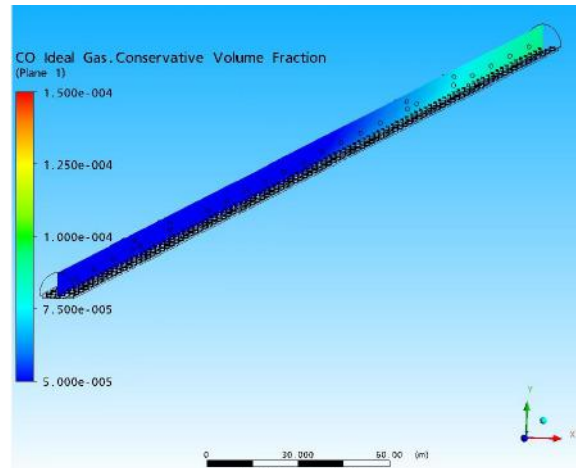


Figura 5.16: Distribuição da concentração $N_C=306$, $f_{UV}=0,5000$ (EXP10)

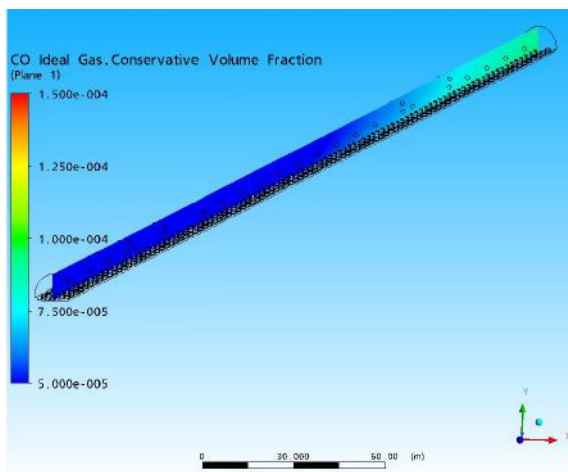


Figura 5.17: Distribuição da concentração para $N_C=306$, $f_{UV}=0,5000$ (EXP11)

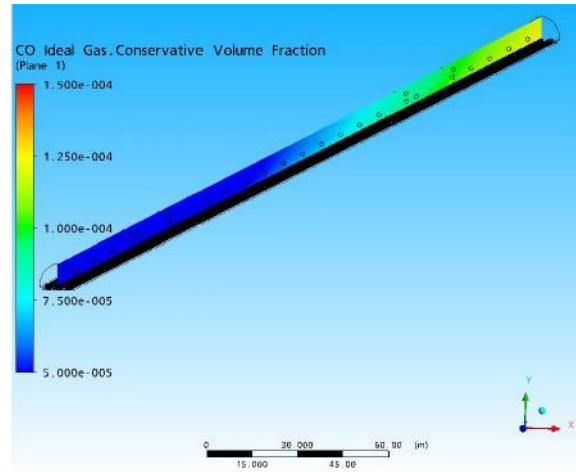


Figura 5.18: Distribuição da concentração para $N_C=1329$, $f_{UV}=1,0000$ (EXP12)

Nas figuras 5.7 a 5.18, as regiões em vermelho mostram as regiões críticas com relação a concentração de CO. Nestas condições, a entrada de novos carros, no Rebouças deveria ser interrompida.

5.2.2 Tempo Máximo de Exposição

Ao se avaliar a norma VDI – 2053 (1995), é possível avaliar o tempo de exposição máximo que uma pessoa, suporta sem sofrer sérios danos, em diferentes intensidades de atividades físicas e em função da concentração de CO. Na Figura 5.20 são apresentados os tempos de exposição necessário para atingir a concentração de 3% COHb no sangue.

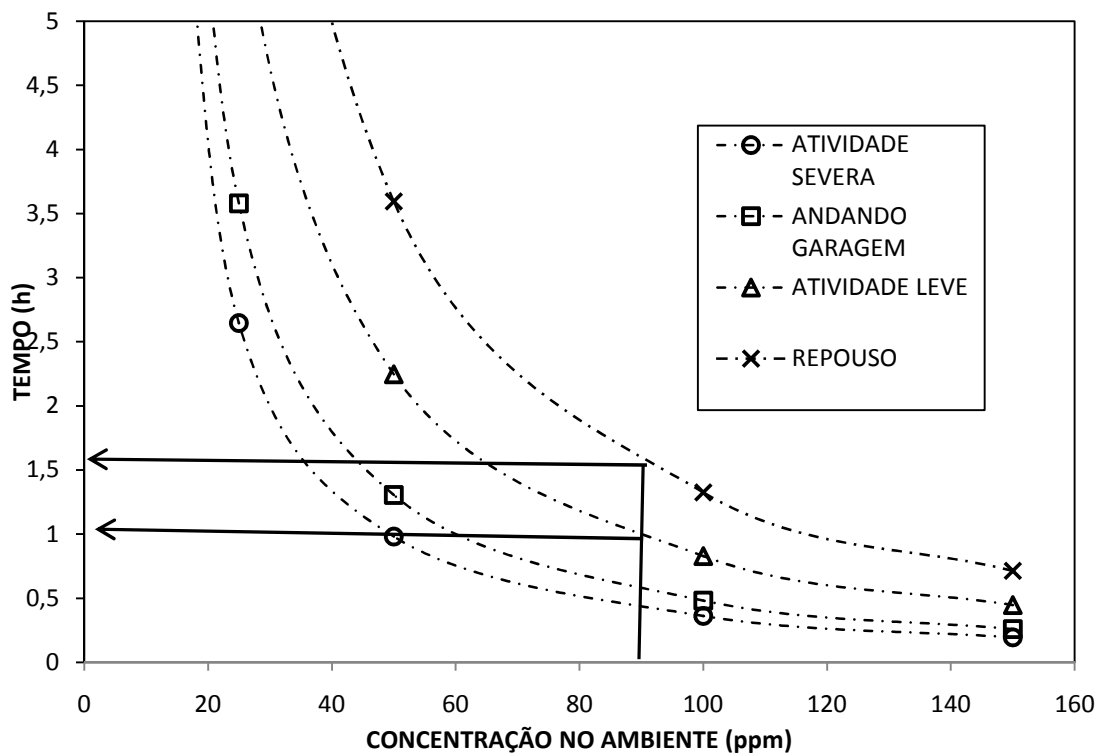


Figura 5.19: Tempo de exposição a diferentes ambientes e condições de esforço físico, para se chegar a 3% COHb no sangue.

Através da Figura 5.19 observa-se que na situação de parada total no túnel com ventiladores a 100% de utilização, onde obteve-se concentração CO igual a 91 ppm (experimento 12), o tempo de exposição para se chegar a 3% de COHb no sangue, para pessoas em repouso, será de 1h e 37 min. Já para o caso de pessoas em atividade leve, este tempo seria de 1h aproximadamente.

5.2.3 Perfis de Velocidade

Um dos fatores fundamentais para a adequação destas simulações foi a utilização da *pressão total* como condição de contorno na entrada do túnel. Nas primeiras simulações a entrada do túnel tinha como condição de contorno a velocidade do ar, e sendo desta forma, estava mascarando a atuação adequada dos ventiladores e do efeito pistão dos carros na sucção de ar nesta região. Isto porque o balanço material tinha que fechar baseado na velocidade de ar na entrada, não importando, neste caso, a velocidade dos carros ou a potência dos ventiladores.

Com a modificação da condição de contorno para pressão total observou-se diferentes velocidades de entrada para cada uma das simulações, sendo que estas dependem diretamente das variáveis *utilização dos ventiladores (%)* e da *velocidade dos carros* (Tabela 5.7).

Tabela 5.7: Influência da utilização dos ventiladores e da velocidade dos carros na velocidade do ar na entrada do túnel.

Experimento	Utilização dos ventiladores (%)	Velocidade dos carros (m/s)	Velocidade de ar na entrada (m/s)
1	50,00	0,0000	3,5127
2	0,00	40,0000	1,9197
3	50,00	80,0000	6,5598
4	14,64	68,2885	3,8417
5	100,00	40,0000	9,1597
6	85,36	68,2885	9,1562
7	50,00	40,0000	4,7508
8	14,64	11,7115	1,0850
9	50,00	40,0000	4,7508
10	50,00	40,0000	4,7508
11	85,36	11,7115	5,9920
12	100,00	0,0000	7,0612

O movimento dos carros promove um aumento de momento do fluido ao seu redor, carreando ar limpo da entrada do túnel e empurrando os poluentes no sentido do movimento dos carros, este fenômeno é freqüentemente chamado de efeito pistão. Segundo Chen *et al.* (1998) *apud* Chung e Chung (2006) também verificaram que este efeito é influenciado pelo fluxo e velocidade dos carros para uma dada geometria.

O efeito pistão nas regiões muito próximas ao chão do túnel possui uma aproximação em seu valor. Esta aproximação se deve ao fato de ter sido utilizado, como condição de contorno, velocidade tanto nos carros quanto nas *faixas móveis*. Com isso, o chão do túnel simulado não respeita a condição de aderência nesta região móvel, que está se movimentando

na mesma velocidade dos carros (Figura 4.6). No entanto, Chen *et al.* (1998) *apud* Chung e Chung (2006), o efeito pistão dos carros provoca um movimento do ar de aproximadamente a mesma velocidade dos carros a uma distância de $0,0625H$ a partir do chão, onde H é a altura do túnel.

É possível observar o efeito pistão através das Figuras 5.22-5.26, onde são comparadas as simulações com o mesmo número de carros para duas situações, carros parados e em movimento, mostrando o aumento da velocidade dos fluidos em regiões próximas a altura dos carros. A altura, eixo vertical, é diferente para cada uma das distâncias devido à inclinação de 40 m que existe no túnel.

Na Figura 5.21 são mostradas as linhas de medição da velocidade superficial do ar para as distâncias 0 m, 500 m, 1000 m, 1500 m e 2040 m da entrada do túnel, linhas estas que foram empregadas na construção das Figuras 5.22 a 5.26.

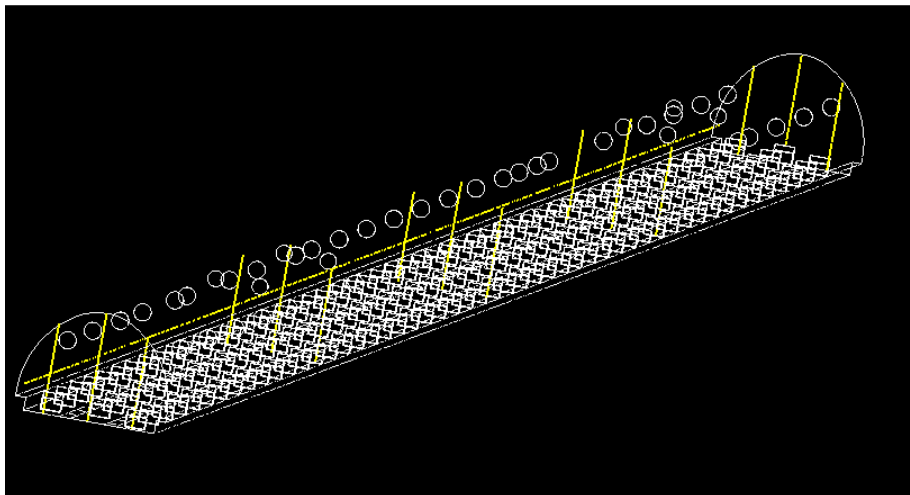


Figura 5.21: Linhas de medição da velocidade superficial média do ar (entre as 3 barras) para as condições simuladas 1 (Carros parados e ventiladores a 50% da capacidade) e 3 (Carros a 80km/h e ventiladores a 50% da capacidade).

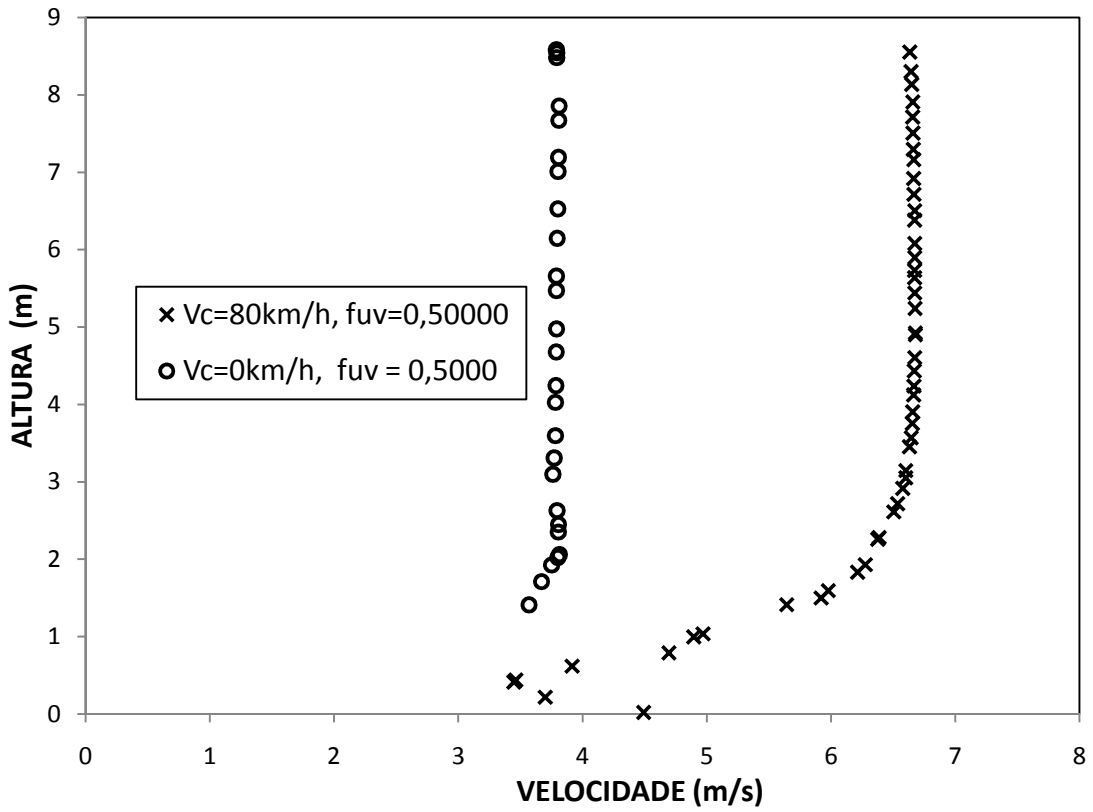


Figura 5.22: Distribuição da velocidade superficial média do ar para $V_C = 80 \text{ km/h}$ e $V_C = 0 \text{ km/h}$ com $f_{UV} = 0,500$ na entrada do túnel.

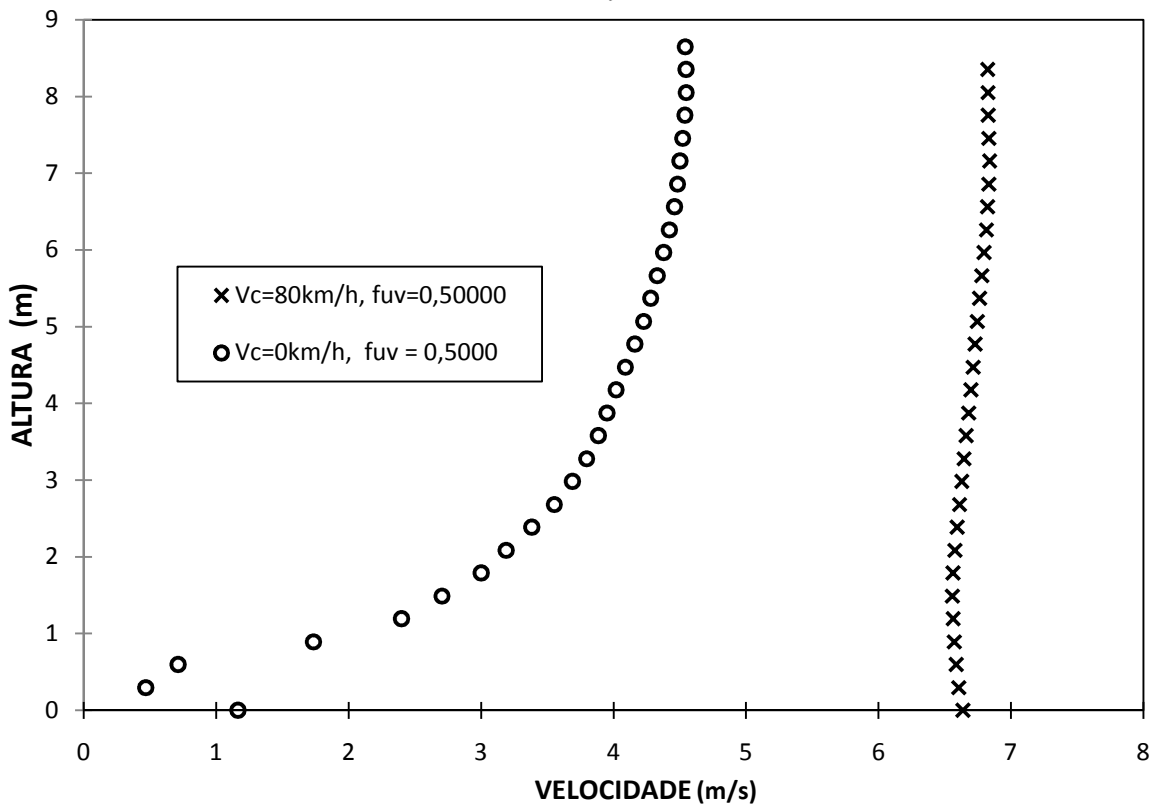


Figura 5.23: Distribuição da velocidade superficial média do ar para $V_C = 80 \text{ km/h}$ e $V_C = 0 \text{ km/h}$ com $f_{UV} = 0,500$ a 500 m da entrada.

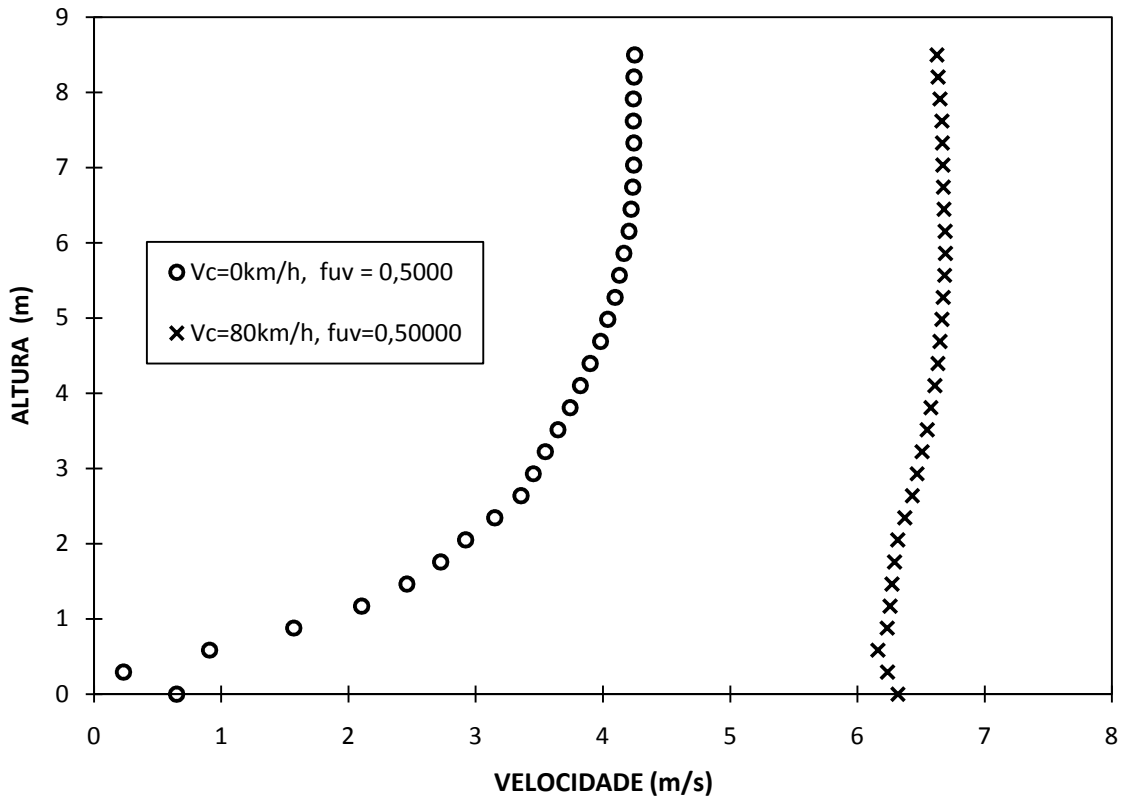


Figura 5.24: Distribuição da velocidade superficial média do ar para $V_C = 80$ km/h e $V_C = 0$ km/h com $f_{UV} = 0,500$ a 1000 m da entrada.

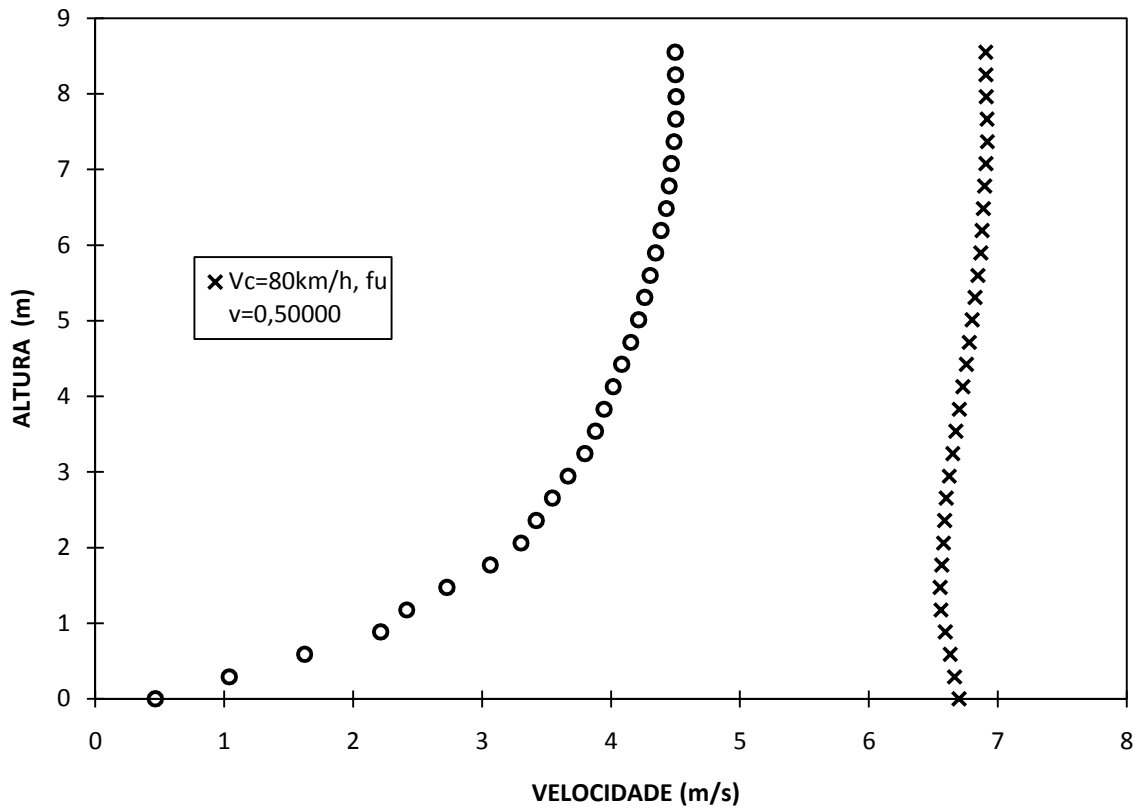


Figura 5.25 Distribuição da velocidade superficial média do ar para $V_C = 80$ km/h e $V_C = 0$ km/h com $f_{UV} = 0,500$ a 1500 m da entrada.

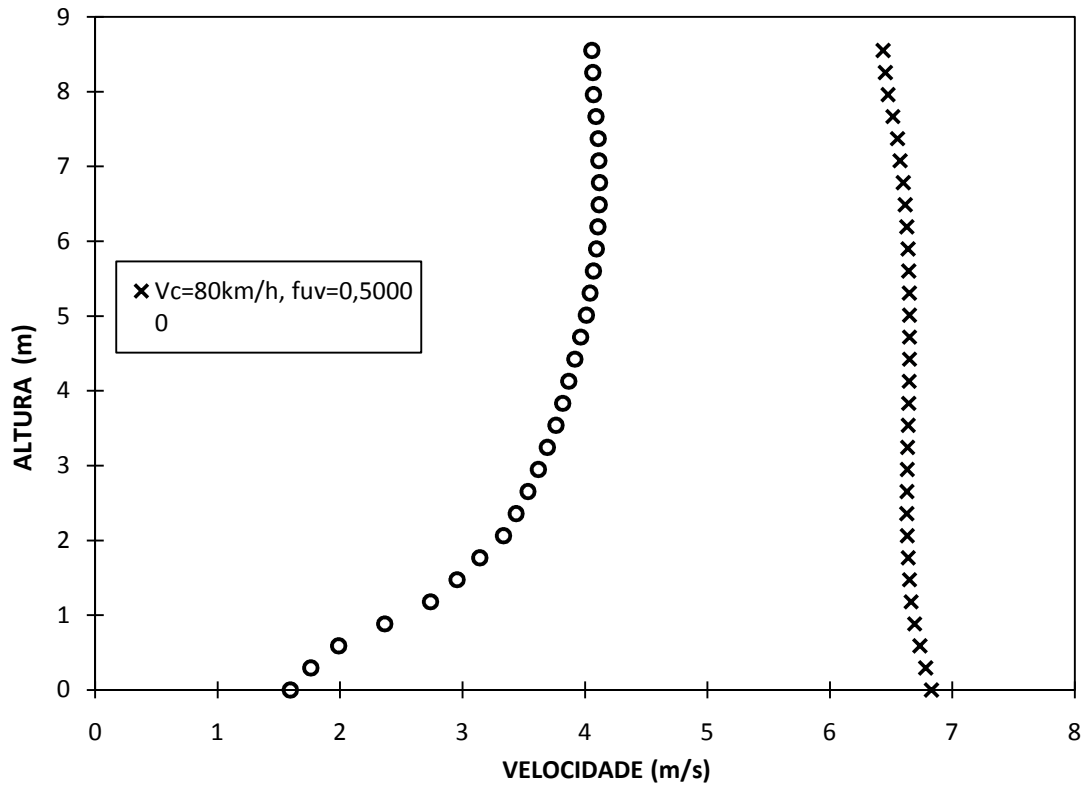


Figura 5.26: Distribuição da velocidade superficial média do ar para $V_C = 80$ km/h e $V_C = 0$ km/h com $f_{UV} = 0,500$ na saída do túnel.

As Figuras 5.22 a 5.26 mostram claramente a grande influência do efeito pistão, provocados pela velocidade dos carros, no perfil de velocidades do ar.

A Figura 5.27 mostra os vetores velocidade do ar, na forma normalizada, ou seja, o tamanho dos vetores são iguais entre si e a sua magnitude é mostrada apenas através das suas cores.

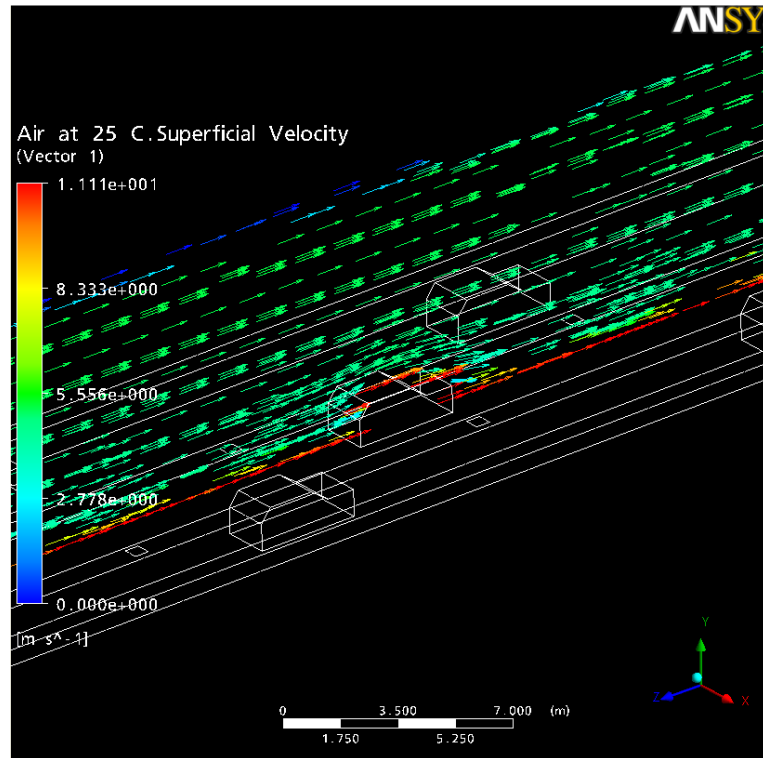


Figura 5.27: Velocidade do ar na forma de vetores normalizados em um plano longitudinal ao túnel.

6. Conclusões

Com base nos resultados encontrados no presente trabalho, pode-se chegar às seguintes conclusões:

- A variável mais adequada para modelar-se a concentração de monóxido de carbono é o número de carros existente dentro do túnel, em dado instante, e não a velocidade dos carros.
- As concentrações de CO obtidas por simulação numérica, para potência dos ventiladores entre 50% e 100%, se situaram na mesma faixa dos valores experimentais medidos no Túnel Rebouças, entre 7h e 19h.
- Foi confirmada a grande importância dos ventiladores para controlar o teor de CO no interior do túnel. Por exemplo, a uma velocidade de aproximadamente 12 km/h, há um aumento de mais de 5 vezes na concentração de CO, ao se reduzir a potência dos ventiladores de 85% para 15%.
- As concentrações de CO crescem linearmente da entrada para o final do túnel.
- As equações obtidas neste trabalho são capazes de prever a concentração de CO (equação 5.1) no ponto de amostragem, localizado a 1500 m da entrada da galeria L1 do Túnel Rebouças, e a concentração média de CO (equações 5.2 e 5.3) em qualquer plano transversal ao longo da galeria L1 do túnel, ambas em função das condições do tráfego e da potência empregada nos ventiladores.
- O ponto de amostragem hoje existente no Túnel Rebouças, localizado a 1500 m da entrada da galeria L1, está bem posicionado, já que os valores de concentração de CO medidos são praticamente idênticos ao valor médio desta variável na área transversal.
- A concentração de CO simulada atingiu valor acima da condição de alarme adotada no túnel Rebouças (100 ppm) apenas para três das condições simuladas, a saber, carros parados com utilização de 50% da capacidade dos ventiladores, ventiladores

desligados com carros a 40 km/h e fluxo lento (12 km/h) com os ventiladores operando a 15 % de sua capacidade.

- A concentração de CO prevista pela equação (5.1) situou-se na faixa 0-50 ppm para velocidades dos carros entre 37 e 80 km/h e ventiladores de 70-100 % de utilização.
- Quando ocorrerem grandes congestionamentos, com parada praticamente total dos carros no túnel, será necessário a utilização da ventilação máxima, bem como impedir a entrada de mais veículos. Como nesta condição (velocidade zero e 100% de potência dos ventiladores) a concentração simulada é de 91 ppm, o tempo de exposição máxima será de 1h37min em repouso, de 1h em atividade leve ou 36min andando (Figura 5.20).

7. Sugestões para Trabalhos Futuros

- Realizar novos estudos com a matriz de combustíveis utilizados no Brasil: álcool, gasolina, GNV, biodiesel e combinações (gasolina + álcool);
- Simular incêndios no túnel Rebouças;
- Realizar novas simulações para os casos críticos, concentração de CO acima de 100 ppm, com aumentos graduais do *fator de utilização* dos ventiladores em simulação transiente, para avaliar o tempo de resposta.
- Realizar simulações transientes para os casos com concentração de CO abaixo da concentração crítica com reduções graduais nos ventiladores, a fim de simular pane nos mesmos.
- Inserir os demais poluentes nas novas simulações (NO_x, SO₂, CO, MP, HC)
- Refazer o presente estudo para a galeria L2.
- Aplicar a mesma metodologia em outros túneis.

8. Referências Bibliográficas

Almeida, J.C.S. (2004), Estudo do Comportamento dos Poluentes em Ambientes Confinados: o Caso do Túnel Rebouças, IQ/UFRJ, Rio de Janeiro, 105p.

Baklanov, A. (2000), Application of CFD Methods for Modelling in Air Pollution Problems: Possibilities and Gaps, Environmental Monitoring and Assessment, 65, 181–189.

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.

Bellasio, R. (1997), Modelling Traffic air Pollution in Road Tunnels, Atmospheric Environment, 31, 1539-1551.

Bettelini, M. CFD for Tunnel Safety, FLUENT Users' Meeting, Bingen, 17-18 Sept. 2001,

CFX Manual, Ansys Inc. 2008.

Chancelier, J.P, Cohen, G.C. e Henniart, J.B. (2004), Control of pollutant concentrations in a Road tunnel using electric fans, Intemational Symposium on Computer Aided Control Systems Design , Taipei, Taiwan.

Chen, F. (2000), Smoke propagation in road tunnels Institute of Applied Mechanics, American Society of Mechanical Engineers, Appl Mech Rev, 53, 207-218.

Chen, K.S., Chung, C.Y., Wang, S.W., (2002), Measurement and Three-Dimensional Modeling of Airflow and Pollutant Dispersion in an Undersea Traffic Tunnel, Journal of the Air & Waste Management Association, 52, 349-363

Chen, T.Y., Lee, Y.T., Hsu, C.C. (1998), Investigations of piston-effect and jet fan-effect in model vehicle tunnels, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 73, 99-110.

Colberg, C.A., Tona, B., Catone, G., Sangiorgio, C., Stahel, W.A., *et al.*. (2005), Statistical analysis of the vehicle pollutant emissions derived from several European Road tunnel studies, Atmospheric Environment, 39, 2499-2511.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (CETESB). (2008), Material particulado inalável fino (mp_{2,5}) e grosso (mp_{2,5} – 10) na atmosfera da região metropolitana de são paulo (2000 – 2006).

CVE, Coordenadoria de Vias Especiais. Rio de Janeiro. Secretaria de Municipal de Transportes. Disponível em: http://www.rio.rj.gov.br/smtu/smtr/hp_cve_reboucas.htm. Acesso em: 21/04/2009.

Feema. (2007), Relatório Anual de Qualidade do Ar. Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente. Rio de Janeiro.

Fernícola, A.G.G., Lima, E.R. (1979), Avaliação do grau de exposição de amostras populacionais de São Paulo ao monóxido de carbono, Rev. Saúde Pública, v.13 n.2 São Paulo.

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

Gertler, A.W., Sagebiel, J.C., Wittorff, D.N., Pierson, W.R., Dippel, W.A., Freeman, D., Sheetz, L. (1997), Vehicle emissions in urban tunnels. Desert Research Institute, Reno, NV. Report to the Coordinating Research Council, Atlanta, GA.

Hall, R.C. (2001), Modelling of dense gas dispersion in tunnels, WS Atkins Consultants Limited, for the Health and Safety Executive, UK.

Hu, L.H., Peng, W., Huo, R. (2008), Critical wind velocity for arresting upwind gas and smoke dispersion induced by near-wall fire in a road tunnel, Journal of Hazardous Materials, 150, 68–75.

Jachic, J. (2001), Poluição do monóxido de carbono em ambiente fechado, Tuiuti: Ciência e Cultura, FACET 03, 25, 19-42.

Jachic, J. VI-002 – (2002), Simulação da poluição do monóxido de carbono em ambiente fechado, VI Simpósio Ítalo Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental.

Jacondino, G.B. (2005), Quantificação das emissões veiculares através do uso de simuladores de tráfego, Dissertação de Mestrado, PPGEP/UFRGS, Porto Alegre, 127p.

Kean, A.J., Harley, R.A., Kendall, G.R. (2003), Effects of Vehicle Speed and Engine Load on Motor Vehicle Emissions, Environmental science & technology, 37, 3739-3746.

Kean, A.J., Harley, R.A., Littlejohn, D., Kendall, G.R. (2000), On-road measurement of ammonia and other motor vehicle exhaust emissions. Environmental Science and Technology 34, 3535–3539.

Kirchstetter, T.W., Harley, R.A., Kreisberg, N.M., Stolzenburg, M.R., Hering, S.V. (1999), On-road measurement of .one particle and nitrogen oxide emissions from light- and heavy-duty motor vehicles. Atmospheric Environment, 33, 2955–2968.

Kristensson, A., Johansson, C., Westerholm, R., Swietlicki, E., Gidhagen, L., *et al.* (2004), Real-world traffic emission factors of gases and particles measured in a road tunnel in Stockholm, Sweden, Atmospheric Environment, 38, 657–673.

Lacerda, A., Leroux, T., Morata, T. (2005), Efeitos ototóxicos da exposição ao monóxido de carbono: uma revisão. Pró-Fono Revista de Atualização Científica, 17, 403-412, Barueri.

Lacey, M.E.Q., Lisboa, H.M. Estudo em túnel viário para realização do inventário de emissões de poluentes atmosféricos por fonte veicular, 24º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental.

Leal, G.C.S.G, Farias, M.S.S, Araujo, A.F. (2008), O processo de industrialização e seus impactos no meio ambiente urbano. QUALIT@S Revista Eletrônica. ISSN 1677-4280, v7.n.1.

Lemos, C.F, Mattos, L.F, Cálculo de concentração média de monóxido de carbono (CO) através do Modelo Matemático, em ruas cercadas de prédios (Street Canyon) como exemplos: Av. Paulista (SP), Av. Rio Branco (RJ) e o Estudo em especial do Túnel Rebouças no Rio de Janeiro, Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos CPTEC Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE Cachoeira Paulista – SP Brasil,

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

MALISKA, C. R., Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional: Fundamentos, Coordenadas Generalizadas, LTC Editora, 1995.

Martins, L.D., Andrade, M.D., Freitas, E.D., Pretto, A., Gatti, L.V., et al. (2006), Emission Factors for Gas-Powered Vehicles Traveling Through Road Tunnels in São Paulo, Brazil, *Environmental Science & Technology*, 40, 6722-6729.

McGaughey, G.R., Desai, N.R., Allen, D.T., Seila, R.L., Lonneman W.A., *et al.* (2004), Analysis of motor vehicle emissions in a Houston tunnel during the Texas Air Quality Study 2000, *Atmospheric Environment*, 38, 3363–3372.

Mendes, F.E. (2004), Avaliação de programas de controle de poluição atmosférica por veículos leves no Brasil, Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 179p.

Ministério do Meio Ambiente. Avaliação do proconve Programa de controle Da poluição do ar por Veículos automotores. Laboratório Interdisciplinar de Meio Ambiente - COPPE/UFRJ

Moreira, A., Claudino, J., Minho, A., Neves, L., Moreira, L. (2006), Continuous Monitoring of Vehicular Emissions from the Active Fleet in Rebouças Tunnel: A Long-term Study, Rio Oil & Gas Expo and Conference 2006, Rio de Janeiro

Oettl,D., Sturm, P.J., Bacher, M., Pretterhofer, G. e Almbauer, R.A. (2002), A simple model for the dispersion of pollutants from a road tunnel portal, *Atmospheric Environment*, 36, 2943–2953.

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

Pierson, W.R., Gertler, A.W., Robinson, N.F., Sagebiel, J.C., Zielinska, B., Bishop, G.A., Stedman, D.H., Zweidinger, R.B., Ray, W.D. (1996), Real-world automotive emissions - summary of recent tunnel studies in the fort McHenry and Tuscarora Mountain tunnels. *Atmospheric Environment*, 12, 2233–2256.

Pinto, J. C., Lage, P. L. C., Métodos Numéricos em Problemas de Engenharia Química, e-papers, Rio de Janeiro, 2001.

Pospisil, J., Katolicky, J., Jicha, M. (2004), A comparison of measurements and CFD model predictions for pollutant dispersion in cities, *Science of the Total Environment* 334– 335, 185–195,

Sagebiel, J.C., Zielinska, B., Pierson, W.R., Gertler, A.W. (1996), Real-world emissions and calculated reactivities of organic species from motor vehicles. *Atmospheric Environment*, 30, 2287–2296.

Sánchez-Ccoyllo, O.R., Ynoue, R.Y., Martins, L.D., Astolfo, R. et al.. (2008), Vehicular particulate matter emissions in road tunnels in Sao Paulo, Brazil, *Environmental Monitoring and Assessment*, 149, 241-249.

Sawyer, R.F., Harley, R.A., Cadle, S.H., Norbeck, J.M., Slott, R., Bravo, H.A. (2000), Mobile sources critical review. *Atmospheric Environment* 34, 2161–2181.

Silva, M.G. (2007), Análise da Qualidade do Ar com base no fluxo de Veículos e variáveis climáticas: o caso da cidade de Uberlândia – MG. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil/Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 107p.

Szwarcfiter, L. (2004), Opções para o aprimoramento do controle de emissões de poluentes atmosféricos por veículos leves no Brasil: uma avaliação do potencial de programas de inspeção e manutenção e de renovação acelerada da frota. Dissertação de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, p.261.

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

Venetsanos, A.G., Vlachogiannis, D., Papadopoulos, A., Bartzis, J.G., Andronopoulos, S. (2002), Studies on pollutant dispersion from moving vehicles, *Water, Air, and Soil Pollution: Focus*, 325-337.