



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

VICTÓRIA VENTURINI MARQUES

**ANÁLISE DO ESCOAMENTO EM AMBIENTES INTERNOS COM VARIAÇÃO DE
POSIÇÕES DE ENTRADA DE AR PARA OTIMIZAÇÃO DA VENTILAÇÃO**

VITÓRIA - ES
2020

VICTÓRIA VENTURINI MARQUES

**ANÁLISE DO ESCOAMENTO EM AMBIENTES INTERNOS COM VARIAÇÃO DE
POSIÇÕES DE ENTRADA DE AR PARA OTIMIZAÇÃO DA VENTILAÇÃO**

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Ambiental do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dra. Elisa Valentim Goullart.

Co-orientador: Msc. Vitor Ferreira Lavor.

VITÓRIA - ES

2020

AGRADECIMENTOS

Agradecer à vida pela oportunidade de estudar na Universidade Federal do Espírito Santo. Agradecer à minha mamãe por todo apoio/amor/prestígio ao longo de toda a minha história. Agradecer ao meu pai pelo seu carinho, ao Wilson, Izabel, e minha irmã Laura por sempre me alimentar e cuidar de mim.

Agradeço aos meus amigos da UFES: Ainõa, Bela, Deysi, Rafaela, Isabella, Danielsan, Clarice, Victória Gouvêa e Luiz. Tenho certeza que o nosso encontro foi um reencontro pois já nos conhecíamos. Um carinho especial ao Luiz Guilherme, meu parceiro, dupla e melhor ombro amigo em toda essa caminhada. E a Ainoã que foi parceira e amiga sempre me lembrando o quanto eu sou privilegiada e que só tenho a agradecer.

Agradeço ao NQualiar, onde pude desenvolver meus melhores projetos e me conhecer melhor, como aluna e pessoa. Um abraço especial ao meu coorientador e amigo Vitor Lavor, por toda dedicação e amor por mim, você é meu exemplo! Agradeço à Elisa por aceitar os meus temas loucos de TCC. Ao Neyval por sempre puxar minha orelha, o que me tornou uma pessoa melhor na saída dessa universidade.

Um agradecimento super especial à Ecosoft e aos meus amigos incentivadores: Julius, Flávio, Luana, Caio e Alinie.

Agradeço também uns dos meus amigos fora da universidade que sempre foram incentivadores dos meus sonhos: Ariane, Aline Bridi, Mércia, Hanna, Mariana Dorico, Juju Gobbo, Letícia, Raysa, Mariany, Fabrício (bibinho), Felipe Lucena (Lipito) e Isabela (M.A). E também muitos outros que fazem parte da minha vida.

E o meu último, mas não menos importante, agradecimento vai ao Rafael, meu amor, amigo e parceiro, pessoa que quero levar pra vida. Esse cara foi o amor da minha vida nesses 5 anos de curso e mesmo que daqui a 10 anos eu leia isso e ele não seja o amor da minha vida (espero que seja), tenho certeza que sempre vai estar em meu coração.

*“O trabalho duro ganha do talento
quando o talento não trabalha duro.”
Kevin Durant*

RESUMO

O presente estudo tem como objetivo geral a otimização da ventilação no interior de uma garagem base, com a variação das entradas, com o intuito de aumentar a movimentação do ar nesses ambientes e reduzir a possibilidade de acumulação de poluentes. A escolha da garagem base se baseou na obtenção de dados experimentais para utilização na validação do modelo numérico. Com o auxílio da ferramenta de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD), simulou-se o escoamento e a dispersão de monóxido de carbono (CO) para sete cenários com diferentes posicionamentos de aberturas de entrada de ar, pôde-se observar a redução das zonas de recirculação das simulações do escoamento, sendo essas zonas possíveis regiões de estagnação de poluentes. Além disso, nas simulações envolvendo dispersão foi possível visualizar a redução das concentrações do poluente (CO) de acordo com as variações das configurações das entradas de ar. As zonas de recirculação estão associadas, em sua maioria, a presença de obstáculos, por conta disso, simulou-se três cenários sem a presença dos veículos, podendo observar a sua influência no escoamento do ar. É importante salientar que a CFD é uma ferramenta que utiliza métodos numéricos (volumes finitos), resolvendo as equações governantes da mecânica dos fluidos: Equação da conservação da massa, equação da conservação do movimento e conservação da espécie química. As análises dos resultados das simulações numéricas ressaltaram que o posicionamento das e entradas de ar em um ambiente é mais importante que a quantidade dessas aberturas. Além disso, também foi possível concluir que o escoamento no interior de garagens está intimamente ligado à sua ocupação, ou seja, caso a garagem esteja com sua ocupação máxima, os veículos (obstáculos) influenciarão no escoamento e, conseqüentemente, nas regiões de estagnação do ambiente. Dessa forma, o estudo traz a ideia de que estudos para simular ventilação em ambientes internos, antes da sua construção, são possíveis e auxiliam nas tomadas de decisões.

Palavras Chaves: ventilação, garagem, dispersão, monóxido de carbono, CFD.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 OBJETIVOS	13
2.1 GERAL	13
2.2 ESPECÍFICOS	13
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1 SISTEMA DE VENTILAÇÃO	15
3.2 LEGISLAÇÃO PARA QUALIDADE DO AR INTERIOR.....	18
3.3 POSSÍVEIS POLUENTES EXISTENTES EM GARAGENS.....	21
3.4 MONÓXIDO DE CARBONO.....	23
3.4 ESTUDOS VINCULADOS AO ASSUNTO	25
4 METODOLOGIA	29
4.1 CASOS SIMULADOS.....	29
4.2 MODELAGEM MATEMÁTICA.....	32
4.2.1 EQUAÇÕES GOVERNANTES	32
4.2.2 DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL	33
4.2.3 TURBULÊNCIA	34
4.2.4 MODELO K- EPSILON	36
4.2.5 CONDIÇÃO DE CONTORNO	37
4.3 VALIDAÇÃO DO MODELO	39
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
5.1 TESTE DE MALHA.....	42
5.2 VALIDAÇÃO.....	44
5.3 ANÁLISE DO ESCOAMENTO.....	47
5.4 ANÁLISE DA DISPERSÃO DO MONÓXIDO DE CARBONO	55
5.5 INFLUÊNCIA DOS VEÍCULOS NO ESCOAMENTO	61
6 CONCLUSÕES	64
7 REFERÊNCIAS	66

Lista de Tabelas

Tabela 1: Apresentação de exigências internacionais sobre qualidade do ar em ambientes internos. (Fonte: ABREU, 2010).....	20
Tabela 2: Sequência de sintomas causados pela intoxicação por monóxido de carbono. (PROCKOP al et.,2007)	23
Tabela 3: Apresentação de Legislação de limites de exposição de monóxido de carbono em ambientes internos (Fonte: USEPA).	24
Tabela 4: Apresentação de limites de exposição para monóxido de carbono para diferentes escalas de tempo. (Fonte: OMS, 2000).....	24
Tabela 5: Coeficientes empíricas para o modelo κ - ϵ Padrão	37
Tabela 6: Perfis de velocidade experimentais das entradas A1 e A2 do estudo de validação (Fonte: ASIMAKOPOULOU et al, 2013).....	39

Lista de Figuras

Figura 1: Exemplificação dos tipos de ventilação natural. Fonte:BARRADAS(2016).....	17
Figura 2: Exemplificação do sistema de ventilação misto (natural+mecânico). Fonte:BARRADAS(2016).....	17
Figura 3: Poluentes emitidos por veículos. Fonte: Villar (2010) (Adaptado)	22
Figura 4: Representação dos possíveis caminhos que o vento percorre quando se varia as posições de aberturas. Fonte: Givoni (1976).....	27
Figura 5: Apresentação das dimensões da geometria utilizada no estudo. Fonte: Asimakopoulou et al (2013).....	29
Figura 6: Posicionamento das entradas de ar nos casos analisados.	31
Figura 7: Representação do espectro de turbulência .Fonte: ROSMAN(1989.).....	35
Figura 8: Apresentação dos posicionamentos das condições de contorno. (a) fonte de poluentes e (b) saídas de exaustão.	38
Figura 9: Geometria construída para utilização na modelagem CFD para a validação do modelo.....	40
Figura 10: Representação das malhas (a) Malha 1, (b) Malha 2 e (c) Malha 3.....	42
Figura 11: Representação do posicionamento de retirada do resultado do teste de malha.42	
Figura 12: Apresentação do resultado do teste de malha.....	43
Figura 13: Apresentação da garagem real utilizada para a análise de campo. Fonte: Asimakopoulou et al (2013).....	44
Figura 14: Locais de medição de monóxido de carbono (M1 e M2).	45

Figura 15: Apresentação dos resultados da validação do modelo, sendo (a) ponto M1 e (b) ponto M2.....	45
Figura 16: Representação do campo de velocidade do escoamento no interior da garagem analisada à 0,4 metros do solo.	48
Figura 17: Representação do campo de velocidade do escoamento no interior da garagem analisada à 2,8 metros do solo.	49
Figura 18: Exemplificação dos vetores ao redor dos obstáculos.	51
Figura 19: Pontos de análise dos gráficos verticais.....	52
Figura 20: Representação do perfil de velocidade vertical nos casos analisados.....	53
Figura 21: Entrada lateral no caso base.....	55
Figura 22: Distribuição de concentração normalizada do monóxido de carbono para a altura de 0,4m.....	57
Figura 23: Distribuição de concentração normalizada do monóxido de carbono para a altura de 2,8 m.....	58
Figura 24: Apresentação da velocidade para o Caso Base (a) com os veículos e (b) sem os veículos.....	62
Figura 25: Apresentação da velocidade para o Caso 7 (a) com os veículos e (b) sem os veículos.....	62
Figura 26: Apresentação da velocidade para o Caso 4 (a) com os veículos e (b) sem os veículos.....	62

1 INTRODUÇÃO

Quando se fala sobre contaminação do ar, há uma associação forte e imediata com fontes de poluição localizadas no exterior dos edifícios, como automóveis e fábricas, por isso é muito comum pensar que a qualidade do ar é um problema relacionado exclusivamente ao ar externo. Entretanto, a contaminação do ar ocorre tanto em ambientes exteriores quanto nos interiores das construções, podendo chegar a ser cinco vezes maior dentro das edificações do que ao ar livre, representando uma situação perigosa para saúde humana (GODISH, 2003).

Sabe-se que a forma como é construída uma edificação influencia diretamente na Qualidade do Ar Interno – QAI (LANGER; BEKÖ, 2013). Fatores como a idade do edifício, a compartimentação interna da construção, a localização e dimensão das aberturas e a eficiência dos sistemas de ventilação e renovação de ar exercem um papel importante na concentração e dispersão de poluentes no ambiente internos (SANTOS et al., 2011).

A qualidade do ar no ambiente interno pode ser melhorada de acordo com o tipo de ventilação empregada, incluindo a ventilação natural. A ventilação natural pode ser definida como o movimento do ar causado pela diferença de pressão e/ou diferença de temperatura entre duas aberturas. Possui como principal consequência a introdução de ar limpo em um determinado recinto ou espaço interno tendo em vista a remoção de poluentes do ar (SALES, 2016). Além disso, a utilização da ventilação natural também pode ser responsável pela entrada de poluentes do ambiente externo ao ambiente estudado (PINTO et al, 2005). Esse tipo de ventilação está sendo cada vez mais procurada e estudada por reduzir custos energéticos, aumentar a qualidade do ar interno do ambiente e, conseqüentemente, melhorar a saúde dos ocupantes (SALES, 2016).

Os gastos com climatização de ambientes internos são altos, seja no âmbito doméstico, comercial ou industrial. Na União Europeia o setor de construção é responsável por 40% do total de energia, sendo que metade da energia consumida pelos edifícios deve-se à utilização de aquecimento, ventilação e sistemas de ar condicionado (HAJDUKIEWICZ et al, 2013). Esses gastos são decorrentes da realidade da população passar maior parte do tempo inseridos em um ambiente fechado, seja no local de trabalho ou domiciliar. Essa realidade influencia significativamente a saúde das pessoas, pela baixa troca de ar que acontece nesses lugares, por falta de planejamento no âmbito de ventilação.

No caso deste trabalho, o ambiente interno analisado será uma garagem. O tempo em que as pessoas que utilizam esse serviço ficam nesses ambientes não é considerado alto, porém como há grande movimentação de veículos as concentrações de poluentes podem ser altas, vale dizer que além de usuários há trabalhadores que se mantêm muitas horas nesses ambientes, tornando as concentrações de poluentes um problema ocupacional também. Cabe ressaltar que a utilização das garagens atualmente se mostra necessária nos centros urbanos. Sabe-se que muitas pessoas optam pela utilização do transporte individual em detrimento do coletivo, seja porque as redes públicas são insuficientes ou por motivos pessoais, por conta disso há um aumento das garagens. Esta tendência impõe que o planejamento urbanístico preveja garagem em qualquer local na malha urbana onde circulem veículos automóveis, seja em zonas habitacionais ou nos centros (VILAR et al, 2010).

Além das diversas vantagens que uma garagem proporciona, como o aproveitamento da área útil de construção (pisos subterrâneos) e comodidade/segurança oferecida às pessoas que o utilizam, estes edifícios acarretam problemas, devido às suas características construtivas. Um dos grandes problemas é a aglomeração de gases provenientes da circulação dos veículos, os quais são extremamente prejudiciais para a saúde humana, em particular o Monóxido de Carbono (CUNHA, 2014).

Dessa forma, é importante salientar que os sistemas de ventilação em garagens têm como objetivo principal garantir a não acumulação de poluentes em concentrações perigosas em nenhuma região, sabendo que de acordo com a concentração e o tempo de exposição vinculado aos poluentes emitidos potencializa riscos graves a saúde dos ocupantes do ambiente (VILAR, 2010).

Sabe-se que o posicionamento adequado das entradas de ar e das aberturas de exaustão tem grande contribuição no aumento da qualidade do ar interno e reduz a quantidade de contaminantes e o consumo de energia utilizada (AMINIAN et al, 2018). Sendo assim, é importante desenvolver estudos com intuito de otimizar a ventilação natural como forma de melhoria da dispersão de poluentes, influenciando positivamente os índices de qualidade do ar e, conseqüentemente, a saúde das pessoas. Objetivando o uso de ventilação natural sempre que o ambiente analisado for propício para tal, sabendo que dependendo da geometria e localização a utilização da ventilação mecanizada é indispensável.

Os resultados foram gerados a partir de simulações de escoamento interno utilizando a ferramenta de Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD), tornando possível análise de diferentes cenários com variações nas posições de aberturas de entrada de ar. Esse tipo de

projeto possui aplicabilidade a fim de facilitar a visualização dessas mudanças físicas de maneira mais rápida e econômica antes da implementação do projeto.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

O objetivo geral da pesquisa é estudar ventilação no interior de uma garagem base, com a variação das entradas, com o intuito de aumentar a mistura nesses ambientes e reduzir a possibilidade de acumulação de poluentes.

2.2 ESPECÍFICOS

- Estudar o escoamento do ar no interior de uma garagem base por meio de dinâmica dos fluidos computacional;
- Estudar a dispersão do monóxido de carbono de uma garagem base por meio de dinâmica dos fluidos computacional;
- Avaliar a acurácia dos resultados numéricos baseado na comparação direta com os resultados experimentais de Asimakopoulou et al (2013);
- Investigar o padrão do escoamento interno com variações de entradas;
- Avaliar a influência dos carros, como obstáculos, no escoamento.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A qualidade do ar de interiores tornou-se um tema de pesquisa importante na literatura científica nos últimos 35 anos (PAGEL, 2015). Estudos têm demonstrado que o ar dentro das edificações é contaminado por uma variedade de poluentes que podem chegar a níveis de concentração cinco vezes maiores do que ao ar livre, gerando efeitos adversos à saúde que podem ser até mais danosos do que exposições em exteriores de cidades industrializadas (PAGEL, 2015). As exposições interiores variam de 8 horas diárias em edifícios de escritórios, comerciais e institucionais para 16 a 24 horas diárias em residências. Em contraste, a média de tempo que um indivíduo gasta no exterior é de aproximadamente 2 horas. Deste modo, períodos de exposições prolongadas geralmente ocorrem em meios construídos (GODISH, 2003).

Os efeitos causados pela respiração de um ar de baixa qualidade incluem um grande número de doenças, desde ocupacionais até cardiovasculares, assim como risco de câncer em ambientes específicos. Asma e rinite, por exemplo, são doenças inflamatórias as quais o processo é desenvolvido e mantido pela exposição a poluentes presentes no ambiente interno (BOECHAT, 2009). A Organização Mundial da Saúde estima que cerca de dois milhões de mortes anualmente no mundo são atribuídas à contaminação do ar de interiores (CARAZO FERNÁNDEZ et al., 2013).

Inicialmente o grande interesse pelo tema foi após a descoberta de que baixas taxas de troca de ar nestes ambientes ocasionam um aumento considerável na concentração de poluentes químicos e biológicos no ar interno. Um método possível para reduzir a probabilidade dessa intoxicação é o uso da ventilação natural, contribuindo também na redução de gastos econômicos e energéticos. Um dos recursos naturais mais eficazes quando se busca obter conforto ambiental e eficiência energética das edificações é a ventilação natural (LIPING e HIEN, 2007).

O emprego do fluxo normal do ar, com o propósito de se obter um condicionamento térmico do ambiente que propicie condições favoráveis de conforto aos ocupantes e melhoria da qualidade do ar interno é o que se define como ventilação natural (ALLARD, 1998; LIPING e HIEN, 2007). Entretanto, fatores como o layout da construção, localização das aberturas e o tipo de ventilação exercem influência direta sobre a qualidade do ar interno (SANTOS et al., 2011).

Em uma edificação, a ventilação natural pode ser cruzada, quando a circulação do ar se dá através de aberturas situadas em lados opostos de um ambiente, ou unilateral, quando a circulação do ar se dá através de aberturas situadas no mesmo lado de um ambiente. Fatores como número, tipo, posição e tamanho das aberturas existentes para a passagem de ar, perfil de ocupação e posição da edificação em relação à direção predominante do vento, interferem no desempenho da ventilação natural (EFTEKHARL et al., 2001; ALLOCA et al., 2003).

Esse capítulo será dividida em 5 partes: Primeiramente uma breve explicação sobre tipos de ventilação, seguido da legislação relacionada com ambientes internos, possíveis poluentes nos ambientes de garagens, monóxido de carbono e estudos vinculados ao assunto.

3.1 SISTEMA DE VENTILAÇÃO

A ventilação geral ou diluidora é amplamente usada para manter a qualidade do ar aceitável em muitos ambientes internos. O foco histórico de ventilação geral tem sido manter o conforto dos ocupantes quando relacionados às emissões geradas pelos humanos, seja essas emissões naturais do ocupante ou causada por suas atividades. Como consequência, as diretrizes de ventilação especificam taxas mínimas de fluxo de ar volumétrico ao ar livre com base no número de pessoas que ocupariam espaços de construção e no uso pretendido de tais espaços (ASHRAE, 1989).

A ventilação geral ou por diluição pode ser usada com eficácia para manter as emissões geradas pelos ocupantes nos ambientes internos em um nível aceitável. Com base na teoria da diluição (BILLINGS E VANDERSLICE, 1982), seria de esperar uma redução geométrica nos níveis de contaminantes cada vez que o volume de ar em um espaço é dobrado. Pode-se esperar que essa redução ocorra em condições estáticas, quando os contaminantes são liberados episodicamente (com tempo suficiente entre os episódios) e quando as fontes estão emitindo taxa mais ou menos constante.

O próprio sistema de ventilação pode ser uma fonte de contaminantes. Isso é sugerido pelos estudos de Burge et al. (1987), Mendell e Smith (1990) e Zweers et al. (1992), que mostraram sintomas significativamente maiores nas taxas de prevalência em edifícios com ar condicionado em comparação com outros sistemas de ventilação mecânica ou natural em edifícios. Isso se dar por conta do ar condicionado produzir águas condensadas que podem servir como foco para o crescimento microbiano (Morey, 1988), tanto Burge et al. (1987) e Mendell e Smith (1990) sugeriram que o fator causal ou fatores para queixas de saúde em

tais edifícios podem ser de origem biológica. O uso de isolamento poroso úmido para alinhar as unidades de tratamento de ar e as superfícies internas do duto foram relatadas como locais de amplificação para mofo e outros microorganismos (Morey e Williams, 1990; Morey e Williams, 1991).

Estudos que tentaram avaliar possíveis relações entre condições de ventilação e queixas de saúde relacionadas ao edifício (ou insatisfação com qualidade do ar) diferiram consideravelmente em termos de desenho do estudo, tamanho da população de edifícios e ocupantes, e seu poder estatístico para detectar relacionamentos significativos.

Salisbury, 1984; Hill et al., 1992; Hodgson et al., 1992 estudaram essa relação de maneira observacional e tiveram capacidade limitada de detectar relacionamentos significativos porque as taxas de ventilação não estavam sob o controle dos investigadores e as avaliações de ventilação foram feitas apenas indiretamente (Níveis de CO₂ e taxas nominais de ventilação). Apesar dessas limitações, relações significativas entre a prevalência de sintomas e as taxas de ventilação foram observadas no Projeto de Edifícios Comerciais do Norte Suécia (Sundell et al., 1994). Este estudo foi relevante devido à sua grande população de edifícios e ocupantes e à medição das taxas de ventilação reais usando gases traçadores.

Considera-se que nos estudos experimentais há uma medida de controle sobre as condições de ventilação com maior capacidade de avaliar as relações associadas às taxas de ventilação. Neste contexto, alguns estudos foram realizados incluindo os de Wyon (1992), Jaakkola et al. (1991), Menzies et al. (1993) e Jaakkola et al. (1994), os dois últimos estudos tentaram atribuir populações de construção em diferentes condições de ventilação sem que os ocupantes soubessem quais eram as condições.

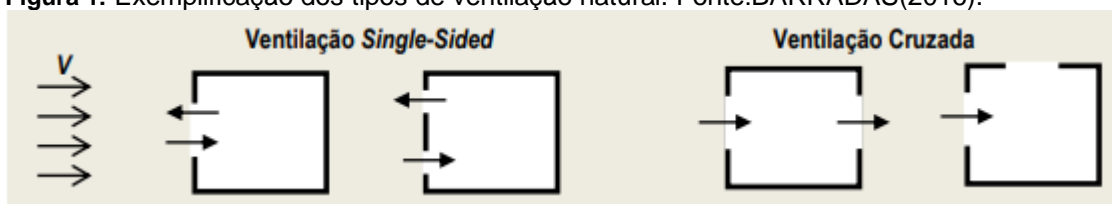
Além disso, a classificação dos tipos de sistema de ventilação se mostra importante e foi estudada por Mendell e Smith (1990) que realizou essa classificação de acordo com a listagem abaixo :

- **Ventilação mecânica:** refere-se a qualquer sistema que use meios mecânicos, como um ventilador, para introduzir ar em um ambiente. Isso inclui ventilação com pressão positiva, ventilação de exaustão e sistemas balanceados que utilizam ventilação de suprimento e exaustão.
- **Ventilação natural:** costuma utilizar métodos passivos e projetados intencionalmente para introduzir ar a um espaço sem o uso de sistemas mecânicos.

- **Sistemas de ventilação de modo misto:** Conhecida como ventilação híbrida, usam processos naturais e mecânicos.

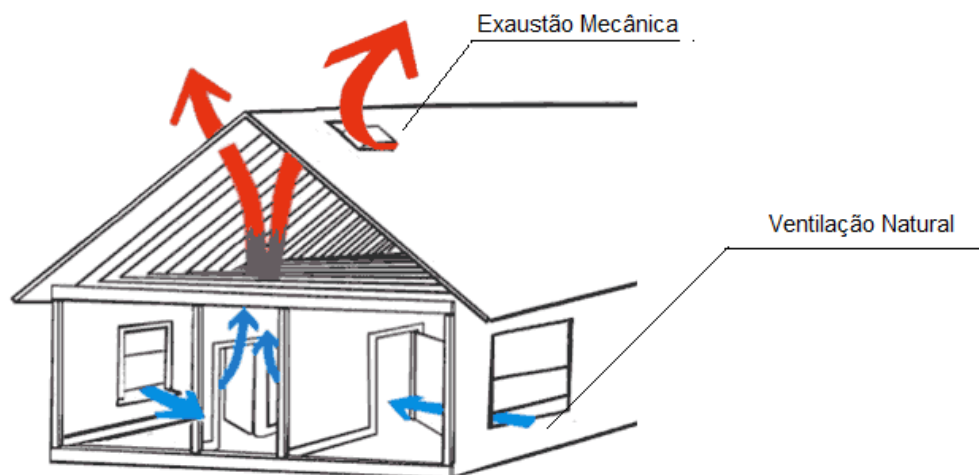
A Figura 1 exemplifica os tipos de ventilação natural abordados. Sendo assim, se o espaço destinado à ventilação apenas contiver aberturas numa das paredes exteriores, as trocas de ar entre o interior e o exterior dão-se no mesmo plano e a ventilação diz-se do tipo *single-sided*. Por sua vez, se duas ou mais paredes contiverem aberturas para o exterior, o escoamento é obrigado a atravessar o espaço e a ventilação diz-se do tipo *cross*, ou ventilação cruzada (BARRADAS, 2016).

Figura 1: Exemplificação dos tipos de ventilação natural. Fonte: BARRADAS(2016).



A Figura 2 apresenta um exemplo do Sistema de Ventilação Misto, onde é possível observar a utilização da ventilação natural e saídas mecânicas de exaustão.

Figura 2: Exemplificação do sistema de ventilação misto (natural+mecânico). Fonte: BARRADAS(2016).



Segundo Freitas et al. (2007) o sistema de ventilação misto se apresenta como uma evolução da ventilação natural, auxiliando no aumento da eficiência da ventilação. Além disso, é importante ressaltar que a configuração desse tipo de sistema varia de acordo com a atividade comum no local que foi inserido.

Dessa forma, observa-se que a escolha do sistema de ventilação para cada tipo de ambiente é muito importante para que seja eficaz e eficiente, levando em consideração a atividade majoritária do ambiente e os potenciais resultados que o uso da ventilação pode gerar para a saúde dos ocupantes e da edificação.

3.2 LEGISLAÇÃO PARA QUALIDADE DO AR INTERIOR

A legislação nacional e internacional ainda não apresenta uma normatização bem definida sobre qualidade do ar interno. Muitos países ainda não apresentam padrões nacionais e há uma ampla variação do conjunto de contaminantes abordados (PAGEL, 2015). Alguns países apresentam diretrizes específicas para setores diferentes da economia, industriais e comerciais, por exemplo, e há ainda uma diferença entre a origem das regulamentações. Alguns padrões são baseados nos resultados de estudos científicos, outros derivam de experiências práticas ou ainda há aqueles baseados no conhecimento consensual (CHARLES et al., 2005).

A Organização Mundial da Saúde (OMS) desenvolveu diretrizes para qualidade do ar interno para serem usadas em meios não industriais. Essas diretrizes foram desenvolvidas em 1987 e sua última revisão foi em 2010, resultado da contribuição de mais de sessenta cientistas internacionais, e pela primeira vez, com orientações para proteger a saúde global do impacto de produtos químicos no ar interior. Relata-se que essas diretrizes para a qualidade do ar interno englobam apenas um conjunto de contaminantes químicos, incluindo: benzeno, monóxido de carbono, formaldeído, naftaleno, dióxido de nitrogênio, hidrocarbonetos aromáticos policíclicos, radônio, tricloroetileno e tetracloroetileno (WHO, 2010).

Países europeus instituíram diretrizes e regulamentações próprias, como por exemplo a Alemanha, que criou em 1996 um Guia da QAI com referenciais para o ar interno e, desde então, vem sendo atualizado incluindo novas substâncias (IRK, 2011). Portugal criou um programa de Certificação Energética de Climatização e Ar Interior cujos edifícios novos que almejam o selo devem ser auditados e possuir concentrações máximas dentro dos limites estabelecidos por um conjunto de contaminantes físico-químicos e microbiológicos (SCE, 2009).

Já no âmbito norte-americano, o Canadá instituiu diretrizes para qualidade do ar interno em meios residenciais onde determina os riscos causados por poluentes específicos no ar interior e fornecem um nível de exposição recomendado para que a saúde dos ocupantes não seja influenciada. A primeira vez que o Canadá emitiu uma avaliação de riscos e orientação de

gestão sobre os poluentes do ar interior foi em 1987. Estas diretrizes são revisadas e atualizadas frequentemente (HEALTH CANADA, 2014).

Salienta-se que o Brasil não possui legislação específica para a Qualidade do Ar em ambientes internos. Entretanto, até o ano de 2005, apenas a Federação Russa e o Brasil apresentavam padrões quantitativos para fungos no ar de interiores (NUNES, 2005), demonstrando que mesmo que exista um crescente interesse nos estudos de qualidade do ar interior ainda há poucas diretrizes e padrões capazes de suprir os problemas de contaminação do ar em edificações (BARDANA, 2003).

A qualidade do ar em ambientes internos proporcionada pela ventilação natural ainda é uma área em desenvolvimento no contexto internacional e pouco conhecida no Brasil (GIODA e NETO, 2003).

A Portaria do Ministério da Saúde 3523 de 28 de agosto de 1998 apresenta-se como a Legislação Brasileira relativa à Qualidade do Ar de Interiores. Segundo Abreu (2010), essa legislação abrange os seguintes parâmetros:

- A preocupação mundial com a qualidade do ar de interiores em ambientes climatizados e a ampla e crescente utilização de sistemas de ar condicionado no país, em função das condições climáticas;
- A preocupação com a saúde, o bem-estar, o conforto, a produtividade e o absenteísmo ao trabalho, dos ocupantes dos ambientes climatizados e a sua inter-relação com a variável qualidade de vida;
- A qualidade do ar de interiores em ambientes climatizados e a sua correlação com a Síndrome dos Edifícios Doentes relativa à ocorrência de agravos à saúde o projeto e a execução da instalação, inadequados, a operação e a manutenção precárias dos sistemas de climatização, favorecem a ocorrência e o agravamento de problemas de saúde;
- A necessidade de serem aprovados procedimentos que visem minimizar o risco potencial à saúde dos ocupantes, em face de permanência prolongada em ambientes climatizados.

Observa-se que a legislação não determina limites e incentivos para a utilização da ventilação natural, sendo mais destinada a saúde, sem relacionar com o método para a redução dos níveis de poluentes nesses ambientes. A Tabela 1 apresenta a comparação entre as legislações e exigências de alguns países.

É possível ver na Tabela 1 que o Brasil é um dos países com menor número de exigências, quando se compara com outros países mais desenvolvidos. Além disso, em relação à ventilação natural somente o Brasil e o Reino Unido que não possuem exigências.

Na Norma Regulamentadora (NR) 15 de 1978, que trata de atividades e operações insalubres, há limites de tolerância para alguns poluentes, como poeiras minerais, agentes químicos, benzeno e agentes biológicos. Porém, sua aplicação está relacionada, normalmente, com locais que necessitam de ventilação mecanizada, para se obter um melhor controle de insalubridade, conforto térmico e agentes nocivos em relação de trabalho dos funcionários.

Os agentes nocivos são considerados levando-se em conta certos riscos, quais sejam: ambientais, físicos, químicos e biológicos existentes nos ambientes de trabalho que, em função de sua natureza, concentração ou intensidade e tempo de exposição, são capazes de causar danos à saúde do trabalhador. Exemplo desses agentes são: ruído, vibrações, pressões anormais, temperaturas extremas, radiações ionizantes, radiações não ionizantes; gases ou vapores, ou ainda que, pela natureza da atividade de exposição, possam ter contato ou ser absorvidos pelo organismo através da pele ou por ingestão; e as bactérias, fungos, bacilos, parasitas, protozoários, vírus, entre outros. A NR15 descreve e regulamenta esses agentes, bem como as atividades consideradas insalubres no âmbito do trabalho e funções (DA SILVA, 2006).

Dessa forma, pode-se observar que a legislação vinculada ao ambiente interno ainda é escassa no país, sendo necessários estudos que apontem problemas que devem ser resolvidos.

3.3 POSSÍVEIS POLUENTES EXISTENTES EM GARAGENS

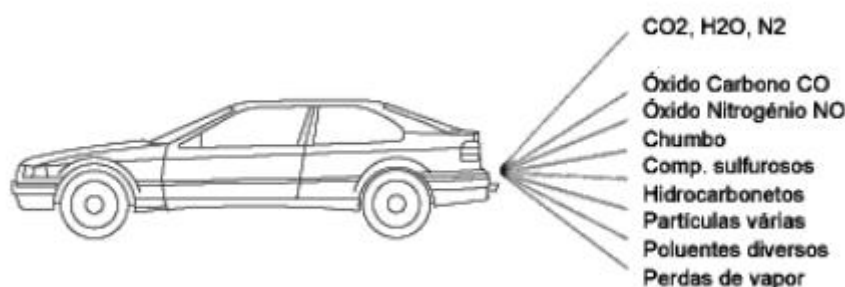
De acordo com dados da Cetesb (1996), Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 35% dos hidrocarbonetos que foram parar na atmosfera de São Paulo tinham origem na evaporação da gasolina dos tanques de combustível. Outros 9%, da evaporação de álcool. Esses dados referem-se às emissões de veículos ligados, mas também incluem os veículos desligados que possuem parcela de influência nessa porcentagem.

As emissões de gases poluentes de um veículo ocorrem após a queima de combustível no motor e são lançadas pelo sistema de escapamento, esses gases são chamados de gases de exaustão. Além disso, também acontecem pela evaporação do combustível contido no

tanque, em pontos como a tampa do bocal de abastecimento, as mangueiras de combustível, suas conexões, o respiro do tanque (CETESB, 2016).

Segundo a Cestesb (2016), no grupo dos gases de exaustão estão o monóxido de carbono (CO), os óxidos de nitrogênio (NOx), os hidrocarbonetos não metano (NMHC), os aldeídos totais (RCHO), o dióxido de enxofre (SO₂) e material particulado (MP). Nesse grupo também se encontram os gases do efeito estufa: dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O). A Figura 3 ilustra os poluentes comuns que são emitidos pelos veículos.

Figura 3: Poluentes emitidos por veículos. Fonte: Villar (2010) (Adaptado)



É necessário salientar que boa parte da poluição atmosférica nos centros urbanos é gerada pelos veículos automotores, sendo dois terços da poluição gerada pelos veículos formada por monóxido de carbono. Esse poluente, de acordo com inventário da Cetesb divulgado no Relatório da Qualidade do Ar no Estado de São Paulo, com base em dados de 1999, é gerado pela movimentação dos veículos a gasolina (47%), a diesel (24%) e também a álcool (13%).

Segundo Freire (2000), alguns poluentes emitidos por veículos, como hidrocarbonetos e dióxido de nitrogênio, desencadeiam um processo químico complexo que resulta na produção de ozônio em camadas mais baixas da atmosfera (onde ocorrem os processos de poluição do ar que as pessoas respiram). Muito próximo do solo, o ozônio não cumpre o mesmo papel de filtro natural dos raios ultravioletas provenientes do sol, que desempenha na estratosfera. É apenas mais um poluente, de difícil controle, atuando como agente citotóxico, que mata a vegetação.

Dessa forma, é possível observar que os veículos possuem uma influência significativa na qualidade do ar da cidade, em geral, ou seja, pessoas e vegetação que estão intimamente ligadas. Porém, é importante destacar que esses fenômenos quando acontecem em um

ambiente interno e mal ventilado pode causar interferências plausíveis na saúde da população ocupante e até mesmo na estrutura e vida útil da edificação (LERSCH, 2003).

3.4 MONÓXIDO DE CARBONO

O monóxido de carbono (CO) é um produto incolor, não irritante, inodoro e insípido poluente gasoso (LANGSTON et al., 2010) que pode ser emitido em ambiente de fontes antropogênicas ou naturais, ou seja, é produzido por combustão incompleta de combustíveis carbonosos, como madeira, gasolina, carvão, gás natural e querosene (OMS, 2010).

A exposição ao monóxido de carbono ocasiona vários efeitos à saúde afetando o sistema cardiovascular, respiratório, sanguíneo e nervoso, dependendo da saúde e do estado fisiológico da pessoa exposta, concentração de poluentes e tempo de exposição (OMS, 2010; REBOUL et al., 2012). É importante ressaltar que a exposição ao CO resulta na reação com moléculas de hemoglobina no sangue para produzir carboxihemoglobina (COHb), reduzindo o suprimento de oxigênio ao cérebro e outros órgãos do corpo.

Após a exposição ao CO, outros sintomas podem ser sentidos, como, por exemplo, ataques de angina, arritmias e aumento do nível de enzimas cardíacas frequentemente ocorrem (SOMOGYI et al., 1981). Os distúrbios da função cerebral predominam na intoxicação aguda de CO que são causadas através de altas concentrações de monóxido de carbono em uma exposição (CHOI, 2000).

Há uma cronologia de sinais e sintomas ocasionados caso haja intoxicação por monóxido de carbono apresentado por Prockop et al. (2007) na Tabela 2 abaixo. Esses sintomas são agravados de acordo com o tempo de exposição e concentração do poluente no local.

Tabela 2: Sequência de sintomas causados pela intoxicação por monóxido de carbono. Fonte :PROCKOP et al (2007).

Sinais e sintomas de intoxicação por monóxido de carbono	
1. Dor de Cabeça	8. Dificuldade de Respiração
2. Tontura	9. Dor no peito
3. Irritabilidade	10. Edema cerebral
4. Confusão/Perda de memória	11. Convulsões
5. Desorientação	12. Coma
6. Náusea e Vômito	13. Morte
7. Dificuldade de coordenação motora	

É importante salientar que esse poluente não causa efeitos crônicos na saúde, somente agudos, ou seja, esses efeitos não perduram durante a vida após a saída do local que está havendo a exposição ao poluente. Dessa forma, a necessidade de acompanhar a evolução das concentrações do CO nas garagens, por meio de medidores, é uma questão de saúde ocupacional e das pessoas que utilizam por um curto período de tempo, pois a concentração desse poluente aumenta de forma abrupta (JACKSON e MENGES, 1980).

Por conta disso, é necessária atenção quando se discute limites de exposição para o monóxido de carbono, sabe-se que o Brasil não possui legislação específica para esse poluente, portanto a solução para a ausência de legislação é a utilização de legislações internacionais. Segundo a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA), existem limites de exposição explicitados na Tabela 3.

Tabela 3: Apresentação de Legislação de limites de exposição de monóxido de carbono em ambientes internos.
Fonte: USEPA.

Órgão	Limite de Exposição (ppm)	Tempo de Exposição (h)
OSHA	50	8
NIOSH	35	8
ACGIH	25	8

Pode-se observar que os limites de exposição também se associam a 8 horas de exposição, sendo relacionado ao turno de trabalho, vinculando à saúde ocupacional.

A OMS também estabelece alguns limites de tolerância para exposição de CO. A Tabela 4 apresenta esses limites.

Tabela 4: Apresentação de limites de exposição para monóxido de carbono para diferentes escalas de tempo.
Fonte: OMS(2000).

Órgão	Limite de Exposição (ppm)	Tempo de Exposição (h)
OMS (2000)	10	8
	30	1
	60	30 min
	100	15 min

Dessa forma, é importante ressaltar a necessidade de minimizar zonas em que há acúmulo de monóxido de carbono, sabendo que se a concentração estiver muito elevada, basta poucos minutos de exposição para colocar a saúde do ocupante do ambiente em risco.

3.4 ESTUDOS VINCULADOS AO ASSUNTO

No estudo experimental realizado por Gładyszewska-Fiedoruk (2016), analisou-se as concentrações de monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono (CO₂) em uma garagem de um prédio residencial em Warsaw na Polônia. O sistema de ventilação desta garagem estudada se baseia em ventilação natural e mecanizada, através de exaustores, além de possuir sensores de detecção de CO. Concluiu-se que as concentrações dos poluentes encontradas não excedem o Padrão Polonês, Padrão Europeu e o Padrão estabelecido pela Organização Mundial da Saúde. Além disso, observou-se que as oscilações de concentrações estavam vinculadas com o fluxo mais intenso de carros e não com as características físicas do local, como temperatura e umidade. Assim, pôde-se ver a repetição da variação do fluxo de carros durante os dias, sendo uma forma de economia de energia com o uso da ventilação mecanizada em horas mais críticas do dia.

Além do fluxo de veículos, o tipo de veículo também influencia na concentração dos poluentes, como pode ser visto no estudo experimental realizado por Kim et al (2007) em Baltimore (USA). Foram analisados os níveis de toxicidade do ar através da quantificação dos poluentes Monóxido de Carbono (CO), Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos ligados à partícula (PAH) e Compostos Orgânicos Voláteis (COVs), onde os dois primeiros foram medidos com instrumentos, já o último por meio de tubo sequencial carregado com sorvente amostrador. Abordou-se análise longitudinal de dados não identificando apenas a contribuição da fonte do veículo (porcentagem poluição do ar / veículo), mas também para alguns poluentes e identificou-se um diferencial do tipo veículo, por exemplo, caminhões leves possuem maior potencial poluidor do que carros. Prevê-se uma maior emissão de caminhões leves em relação aos carros devido à maior peso, menor eficiência de combustível e controles de emissão.

A contaminação do ar em ambientes internos normalmente se dá através de gases, porém o material particulado nesses locais também é prejudicial. Pensando nesse problema, Obaidullah et al (2012) realizou um estudo objetivando a determinação de concentrações de

PM_{2,5} e PM₁₀ em três garagens diferentes. Uma das garagens analisadas possui somente ventilação natural, enquanto as outras duas têm tanto ventilação natural, quanto ventilação mecanizada. Para a realização dessas medições utilizou-se um impactador elétrico de baixa pressão Plus (ELPI +) para medir as concentrações de massa de partículas internas, concentrações numéricas e sua distribuição granulométrica em tempo real. Concluiu-se que para PM_{2,5} as concentrações das três garagens excederam os Padrões da OMS e USEPA, enquanto as concentrações de PM₁₀ excederam os Padrões da OMS e da União Europeia (UE). É possível observar que possuir ventilação mecanizada em um ambiente fechado não o isenta de estar fora dos padrões estabelecidos para qualidade do ar. Além disso, os resultados do presente estudo podem ser utilizados pelos formuladores de políticas e autoridades interessadas a projetar e sistema de ventilação apropriado com medidas de controle de emissões.

Os estudos experimentais são, normalmente, mais empregados nessa área de pesquisa, pelo fato de facilitar a comparação com os padrões de saúde, porém há uma crescente inserção de métodos numéricos para a análise dessas situações. Os métodos numéricos, como por exemplo o CFD, apresentam crescimento em aplicações práticas por diminuir gastos com campanhas de amostragem, além de facilitar as modificações de cenários instantaneamente, conseguindo assim resultados de otimização, e podendo ser aplicado em projetos antes de sua implementação.

Com essa motivação, Papakonstantinou et al (2003) estudou a comparação dos sistemas de ventilação entre garagens com o sistema de ventilação mecanizada ativado e desativado, além disso, realizou experimentos e os comparou com os resultados computacionais. Nessa validação do método numérico observou-se que os resultados numéricos seguiram o mesmo padrão do experimental, mesmo que superestimados em alguns momentos. Também foi possível ver que os resultados com ventilação mecanizada se mostraram inferiores aos limites da OMS, em todos os casos.

Outro exemplo de uso da ferramenta CFD em cenários de ambientes internos é o estudo de Yang et al (2014), que realizou a análise de escoamentos de vento e conforto térmico com sistemas mecanizados de ar condicionado em um layout de residência na China. Concluiu-se que a utilização de ar condicionado auxilia no conforto térmico, porém a velocidade desse vento inserido no ambiente pode influenciar na saúde da população. Velocidades muito baixas causam estagnação de poluentes e velocidades muito altas desconfortos. A estagnação de poluentes, e, conseqüentemente, aumento da concentração desses

poluentes, em ambientes fechados potencializa possíveis intoxicações nas pessoas presentes no local (YANG et al, 2014).

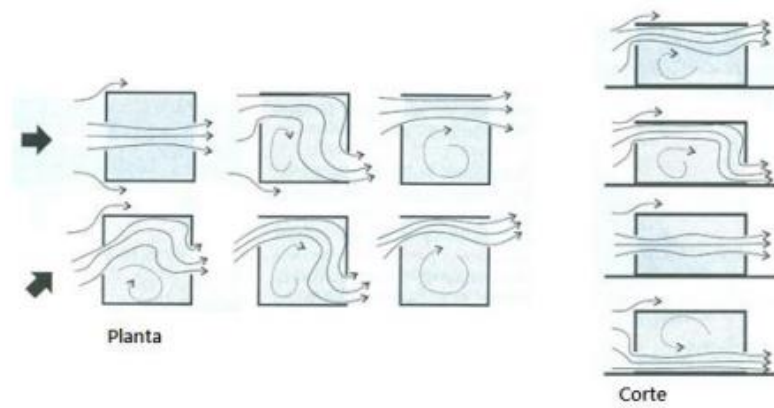
A ventilação mecanizada, teoricamente, aumenta a qualidade do ar no ambiente fechado, pela diluição mais eficiente dos poluentes. Porém, a ventilação natural, quando projetada da melhor forma possível, pode chegar ao nível da ventilação mecanizada ou até superá-la, reduzindo gastos energéticos e econômicos. Assim, os métodos computacionais facilitam essa escolha da geometria do projeto antes da sua construção, podendo nortear, previamente, decisões em relação à ventilação, realizando modificações.

Como dito anteriormente, as técnicas computacionais facilitam a implementação do projeto. Mas, algumas boas práticas são importantes para essa implementação como, por exemplo, evitar a localização de aberturas de entrada e saída de ar na mesma parede; preferir combinação de aberturas de entrada e saída em paredes adjacentes ou opostas; dispor aberturas de entrada e saída em altura tal que o fluxo de ar incida sobre os usuários, por meio de peitoris ventilados e por meio de bandeiras, para permitir ventilação permanente; projetar aberturas grandes com 40 a 80% da área das paredes externas e fechamentos que possam se abrir ao exterior, além de paredes e fechamentos internos com aberturas para favorecer a circulação do ar; usar venezianas, persianas e gelosias para permitir o fluxo permanente do ar (BITTENCOURT E CÂNDIDO, 2005; MASCARÓ, 1991).

Outro estudo, como o realizado por Aminian et al(2018) abrange a ideia de que o posicionamento adequado das entradas e saídas de ar tem grande contribuição no aumento da qualidade do ar interno e reduz a quantidade de contaminantes e o consumo de energia nas garagens. Concluiu-se que de acordo com a concentração de monóxido de carbono, é possível saber a altura apropriada de aberturas e a instalação do sistema de exaustão adequado, se for necessário.

Givoni (1976) discute que aberturas equivocadas em uma edificação reduz a potencialidade de utilização da ventilação natural. A Figura 4 apresenta essas possibilidades, e observa-se que a ausência de planejamento, nessa questão, pode ocasionar zonas mortas, gerando zonas com grande possibilidade de encontrarmos grandes concentrações.

Figura 4: Representação dos possíveis caminhos que o vento percorre quando se varia as posições de aberturas. Fonte: Givoni (1976).



Sendo assim, observa-se que os estudos acerca da qualidade do ar em ambientes internos estão sendo desenvolvidos com maior representatividade no cenário acadêmico. Porém, ainda são pouco os que estão inseridos no âmbito de análise preliminar de projeto.

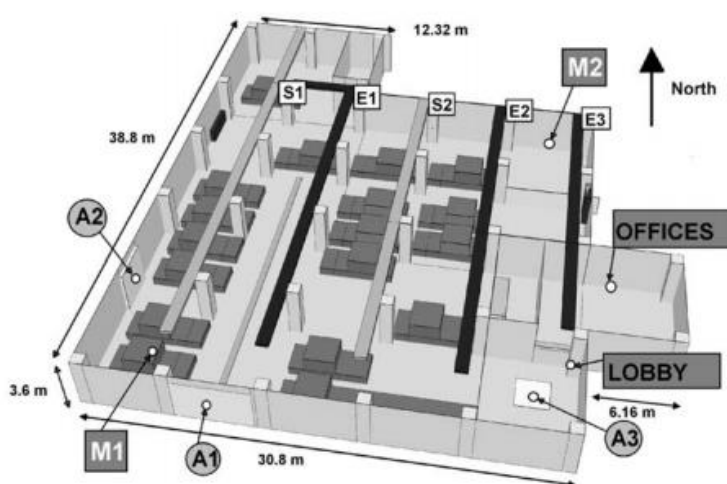
4 METODOLOGIA

Este capítulo abrange os casos simulados na seção 4.1, na sequência foram discutidos assuntos relacionados à modelagem matemática na seção 4.2, juntamente com a apresentação das equações governantes, modelos de turbulência e as condições de contorno aplicadas para o estudo. E para finalizar o capítulo, a seção 4.3 discorre sobre a importância sobre a validação do modelo.

4.1 CASOS SIMULADOS

O presente estudo baseou-se na simulação de uma garagem de 35,5 metros de largura, 38,8 metros de comprimento e 3,6 metros de altura, com entradas de ar que variam espacial e numericamente, tendo casos com uma, duas ou três aberturas. As saídas de exaustão foram mantidas fixas. A Figura 5 apresenta as dimensões da geometria utilizada no estudo.

Figura 5: Apresentação das dimensões da geometria utilizada no estudo. Fonte: Asimakopoulou et al (2013).

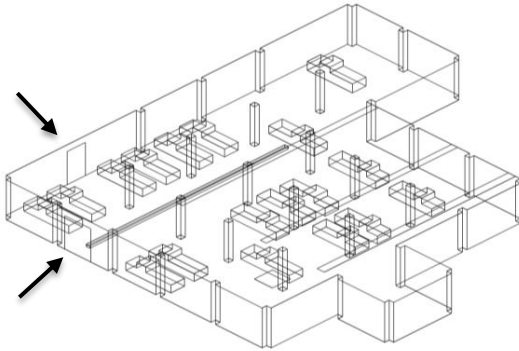


Foram simulados 7 casos, realizando modificações nos posicionamentos das entradas de ar. Esses casos são apresentados na Figura 6.

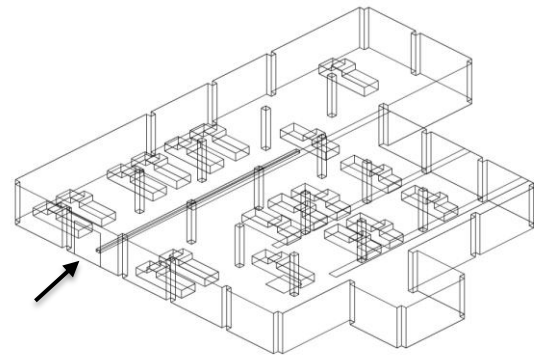
O Caso Base é o cenário inicial, ou seja, a geometria simplificada do local onde se obteve os resultados experimentais que foram utilizadas para validar o modelo numérico (ASIMAKOPOULOU et al, 2013). Os casos 2 e 3 possuem somente uma entrada de ar. Já os casos 4 e 5 possuem 2 entradas de ar em lados opostos, seguindo dos Casos 6 e 7 que dispõem de 3 entradas de ar distribuídas na geometria.

A seleção dos cenários para a análise da eficiência dos posicionamentos de aberturas de entrada de vento, a fim de utilizar a ventilação natural, foi realizada a partir de possíveis comportamentos do escoamento no interior da garagem.

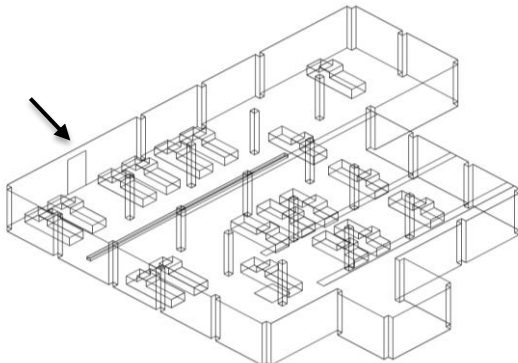
Figura 6: Posicionamento das entradas de ar nos casos analisados.



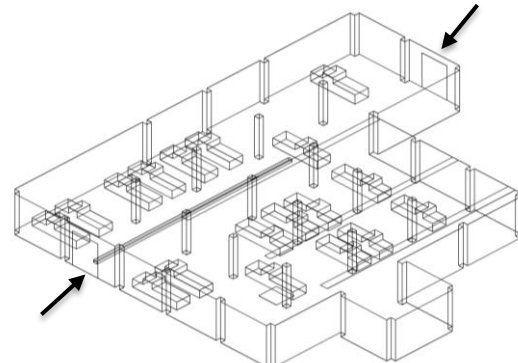
CASO BASE



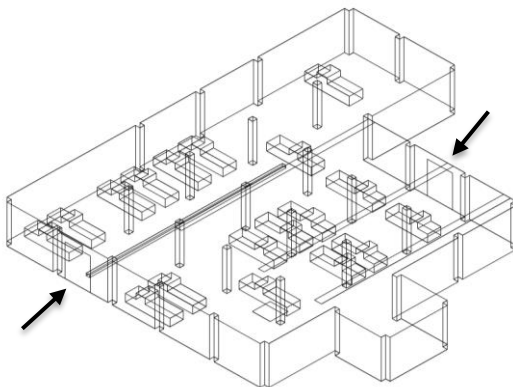
CASO 2



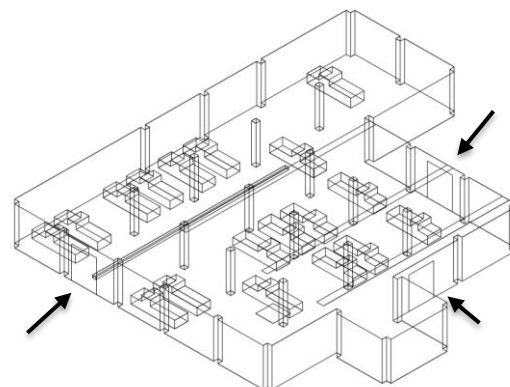
CASO 3



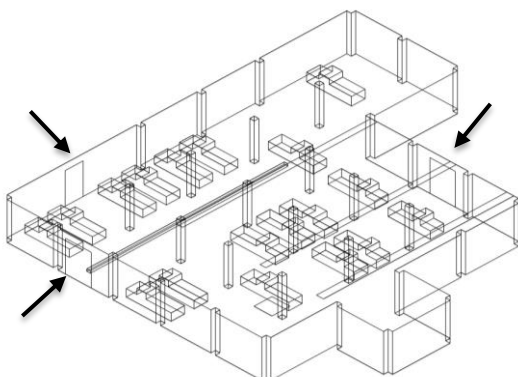
CASO 4



CASO 5



CASO 6



CASO 7

4.2 MODELAGEM MATEMÁTICA

4.2.1 EQUAÇÕES GOVERNANTES

Os processos de escoamento e dispersão dos poluentes são governados pelas seguintes equações:

- Continuidade;
- Quantidade de movimento;
- Espécie química.

Essas equações são descritas em (1),(2),(3), respectivamente.

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

$$\rho \frac{\partial u_j}{\partial t} + \rho \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_i} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \right] \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial c}{\partial t} + \rho \frac{\partial u_i c}{\partial x_i} = \rho \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_m \frac{\partial c}{\partial x_i} \right) + S \quad (3)$$

Onde:

- ρ é a densidade do fluido [kg/m^3];
- t é o tempo [s];
- u_i é a componente da velocidade na direção i [m/s]
- x_i é a coordenada cartesiana na direção i [m]
- p é a pressão estática do fluido [N/m^2];
- μ é a viscosidade dinâmica do fluido [Pa.s];
- D_m é a difusividade mássica molecular [m^2/s];
- S é a taxa da fonte da espécie química [$\text{kg/m}^3.\text{s}$];
- c é a concentração da espécie química [kg/m^3].

As equações listadas são utilizadas para análises de problemas de mecânica dos fluidos, sendo que no presente estudo essas equações foram simplificadas retirando os termos transientes, tornando-as referentes à escoamentos permanentes. A equação de Navier Stokes (2) não possui solução analítica, por conta disso desenvolveu-se métodos com o intuito de modelar esses resultados, ou seja, chegar o mais perto da solução analítica possível. Assim, a metodologia computacional utilizada para simular essas equações neste

trabalho é a Dinâmica dos Fluidos Computacional através do software comercial Ansys Fluent 19.3.

4.2.2 DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL

Nos últimos anos, o CFD se tornou uma ferramenta muito poderosa e popular na construção de simulação, transferência de calor e transporte de contaminantes em ambientes internos. As suas aplicações no design de edifícios incluem o planejamento do local, ventilação natural, dispersão e controle. Cerca de 70% do desempenho de estudos de ventilação publicados em 2008 usaram o CFD em sua análise, sendo um método particularmente adequado para modelar as condições internas naturais de espaços ventilados, que são difíceis de prever usando outros tipos de construção de ferramentas de simulação (HAJDUKIEWICZ et al, 2013).

A Dinâmica dos Fluidos Computacional se baseia em métodos numéricos para se chegar a um resultado plausível, sendo a tarefa do método numérico resolver uma ou mais equações diferenciais, substituindo as derivadas existentes por expressões algébricas que envolvam a função incógnita. Quando não possui solução analítica, é decidido a utilização de uma aproximação numérica da equação diferencial, aceitando a solução para um número discreto de pontos (com determinado erro), e quanto maior for esse número, mais próximo da solução exata (MALISKA, 1995).

É válido ressaltar que existem tipos de métodos numéricos diferentes com esses mesmos princípios. Neste trabalho será descrito o método dos volumes finitos por ser o método numérico utilizado no software empregado para realização das simulações. O método dos volumes finitos mostra-se uma ferramenta em que satisfaz a conservação da propriedade em níveis de volumes elementares (MALISKA, 1995).

Os volumes elementares serão vistos através da malha computacional e por isso a construção da malha é importante para que seja refinada o suficiente com o intuito de não haver distorções nos resultados, pelo fato do método dos volumes finitos ser um método iterativo, ou seja, o que sai do elemento como resultado será utilizado como entrada do seguinte, assim, caso haja uma distorção na construção da malha, essa deformação poderá ser a causa de divergência do modelo e até mesmo resultados fora da realidade física.

Além disso, com o intuito de se aproximar mais da realidade, na geração de malha é necessário a realização do refinamento próximo a paredes. Essa ferramenta é importante por representar a camada limite próximo às paredes da geometria. Por possuírem um número maior de volumes elementares essas zonas são importantes para o resultado do restante do escoamento.

4.2.3 TURBULÊNCIA

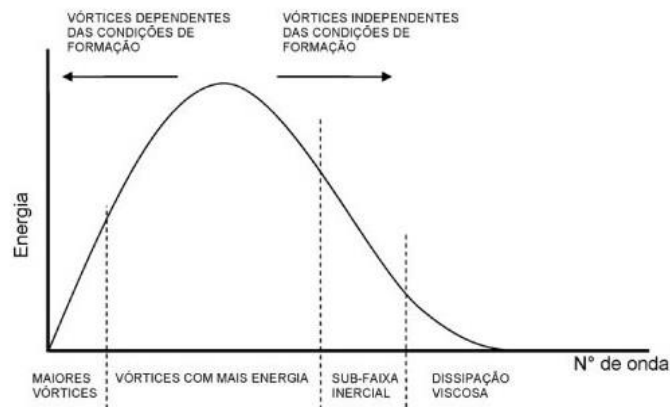
Os escoamentos reais são majoritariamente turbulentos, ou seja, caóticos e randômicos. Segundo MALALASEKERA (1995), os escoamentos turbulentos são caracterizados por altos Número de Reynolds, diferentemente de escoamentos laminares.

Os escoamentos são representados fisicamente pelas equações de Navier Stokes. Essas equações descrevem tanto escoamentos laminares quanto turbulentos. Entretanto, escoamentos turbulentos em velocidades reais englobam um grande número de escalas de tempo e espaço, incluindo escalas muito menores que uma malha de elementos finitos.

Essas escalas muito pequenas são chamadas de Escala de Kolmogorov que determinam que a viscosidade molecular se mostra significativa, diferentemente de escalas maiores (KOLMOGOROV, 1941). Essa característica inviabiliza a solução numérica direta da turbulência (DNS) para a maior parte das aplicações, pois a demanda computacional seria muito além das disponíveis atualmente, sendo utilizado mais na academia que industrialmente (MALALASEKERA, 1995).

A Escala de Kolmogorov se forma através da ideia da Cascata de Energia Turbulenta, desenvolvida pelo próprio Kolmogorov. A Energia cinética produzida pelas grandes escalas do movimento, sendo transferida para escalas menores por um processo não viscoso até atingir escalas pequenas o suficiente para que a dissipação ocorra por efeitos viscosos (KOLMOGOROV, 1941). A Figura 7 apresenta a Cascata de Energia Turbulenta, com o intuito de exemplificar a dificuldade de simular escalas tão pequenas.

Figura 7: Representação do espectro de turbulência .Fonte: ROSMAN(1989.).



Sendo assim, desenvolveu-se diversos modelos para a previsão da turbulência, a maior parte deles com base estatística. Os mais utilizados são os que utilizam as médias de Reynolds (RANS), que separa as características do escoamento em um termo médio e uma flutuação. O mesmo princípio é aplicado de maneira análoga a outras propriedades do escoamento.

Aplica-se a média de Reynolds em toda a equação governante do escoamento, gerando um termo que é interpretado fisicamente como a contribuição média das flutuações turbulentas de velocidade à quantidade de movimento, chamado de Tensor de Reynolds.

Necessita-se das tensões de Reynolds para a modelagem turbulenta, já que as tensões extras geradas em um escoamento turbulento são consideravelmente maiores que a contribuição viscosa na região de escoamento livre (Pope, 2000). Nas proximidades das paredes, onde há influência da camada limite, as flutuações são muito pequenas, assim os termos viscoso e turbulento são equiparáveis, essa ideia se baseia na teoria da Similaridade de Kolmogorov (KOLMOGOROV, 1941). As tensões de Reynolds são essenciais para a modelagem, porém complicados de serem resolvidos.

Dessa forma, pode-se perceber que o sistema a ser resolvido para um escoamento turbulento apresenta mais variáveis do que equações. Logo, não é possível determinar todas as variáveis. Esse desbalanceamento no sistema de equações é conhecido como problema de fechamento da turbulência e apresenta soluções através dos modelos de turbulência.

Dentre os modelos RANS, os mais populares são os de duas equações:

- $k - \varepsilon$: baseia-se nas escalas turbulentas de altos número de Reynolds. Sendo assim, é preciso na região de escoamento livre, porém não obtém bons

resultados em regiões próximas à camada limite, já que nessas regiões a velocidade é muito baixa (MALALASEKERA, 1995).

- $k - \omega$: foi desenvolvido para atingir melhores resultados próximo à paredes. Entretanto, ele é mais sensível às condições de contorno, principalmente na região de escoamento livre. Dependendo dos valores especificados para ω no contorno, uma variação significativa nos resultados é observada (WILCOX, 1988).
- $k - \omega SST$: foi introduzido por Menter (1994). Nesse caso, $k - \omega$ é utilizado em regiões próximas à parede, e $k - \varepsilon$ na região de escoamento livre.

Após uma breve explicação sobre Turbulência e a própria fluidodinâmica computacional é importante explicitar que neste trabalho, será utilizado o método das médias de Reynolds (RANS), por ser um método mais utilizado e apresentar uma maior facilidade e acessibilidade computacional. Além disso, o $k - \varepsilon$ será o modelo de turbulência utilizado. Escolheu-se esse modelo pelo objetivo do trabalho estar vinculado à uma visão mais abrangente do escoamento em um ambiente interno, não tendo necessidade de modelos com detalhamento e refinamentos de malha complexos, como, por exemplo, na escala da camada limite.

4.2.4 MODELO $k - \varepsilon$

O modelo $k - \varepsilon$ é o modelo de turbulência mais utilizado em aplicações de dinâmica dos fluidos computacional atualmente. O modelo $k - \varepsilon$ Padrão foi desenvolvido por Jones e Launder (1972). Posteriormente as constantes do modelo foram aprimoradas por Launder e Sharma (1974). Ao longo dos anos, diversos estudos têm sido apresentados no sentido de ampliar a generalidade e a sua precisão, entre outros Yakhot e Orzag (1986), Speziale (1987), Lien e Leschziner (1994).

Sabe-se que os modelos de viscosidade turbulenta são necessários para que os problemas de fechamento das equações sejam resolvidos.

Por conta disso, é possível listar os conceitos para a aplicação o modelo $k - \varepsilon$:

- Inserir uma equação diferencial de conservação adicional para o cálculo de κ ;
- Inserir uma segunda equação diferencial de conservação adicional para o cálculo de ε ;
- Especificar o valor da viscosidade turbulenta.

A equação abaixo é responsável pelo cálculo da viscosidade turbulenta:

$$\mu_{turb} = \frac{C_\mu \rho \kappa^2}{\varepsilon} \quad (4)$$

onde κ é a energia cinética turbulenta, ε é a dissipação da energia cinética turbulenta e C_μ é uma constante empírica do modelo. Um valor usual de C_μ é 0,09 (LAUNDER e SPALDING, 1974). Para determinar os valores da energia cinética turbulenta (κ) e da dissipação da energia cinética turbulenta (ε), são resolvidas duas equações diferenciais adicionais:

$$\frac{\partial(U_j \kappa)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu_{turb}}{\rho \sigma_\kappa} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] + P_\kappa + G_\kappa - \varepsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial(U_j \varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\mu_{turb}}{\rho \sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\varepsilon}{\kappa} (C_1 P_\kappa + C_3 G_\kappa) - C_2 \frac{\varepsilon^2}{\kappa} \quad (6)$$

Sabe-se que:

$$P_\kappa = \frac{\mu_{turb}}{\rho} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial U_j} \quad (7)$$

$$G_\kappa = \frac{\mu_{turb}}{\rho \sigma_t} g \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} \quad (8)$$

onde C_1 , C_2 , C_3 , σ_ε , σ_κ e σ_t são constantes dadas empiricamente, de acordo com a Tabela 5, P_κ é a produção de energia cinética turbulenta por tensão de cisalhamento, G_κ é a produção de energia cinética por forças de empuxo e ε é a taxa de dissipação de energia cinética.

Tabela 5: Coeficientes empíricas para o modelo κ - ε Padrão

C_1	C_2	C_3	σ_ε	σ_κ	σ_t
1,44	1,92	1,44	1,3	1,0	0,9

4.2.5 CONDIÇÃO DE CONTORNO

As aplicações da dinâmica de fluidos computacional (CFD) precisam de condições de contorno para que sejam fidedignas à realidade e mostre para o modelo o que precisa ser feito. Caso essas condições de contorno sejam aplicadas de forma equivocada os resultados tendem a divergir do esperado.

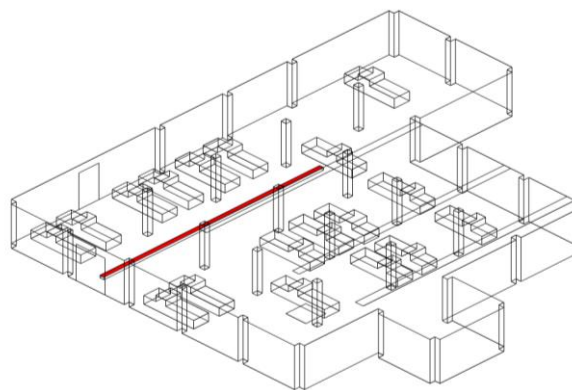
As condições de contorno para o caso deste estudo baseiam-se em entradas de ar, saídas de exaustão, fonte de poluente (CO) e condição de parede (wall). A condição de entrada de ar utiliza os perfis de velocidade do vento do experimento utilizada para validação do modelo. Já as saídas de exaustão, foi utilizada a condição de contorno outflow, por saber que a saída do escoamento não aconteceria para a atmosfera, não sendo viável a utilização da condição de contorno mais utilizada outlet (diferença de pressão igual à zero).

A condição de contorno de parede (Wall), utilizada para representar locais onde há superfícies sólidas se baseia em condição de não-deslizamento, onde a velocidade nas superfícies é igual à zero.

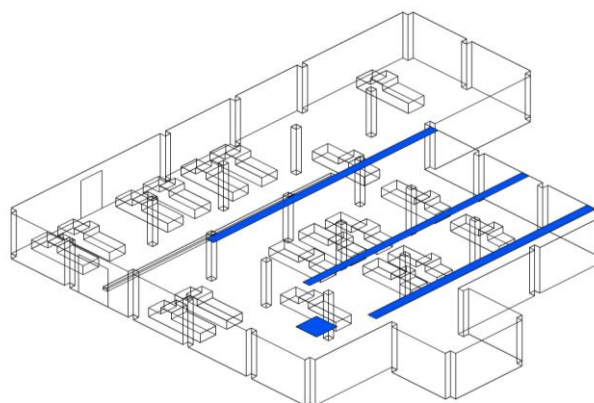
A condição de contorno representativa à fonte de poluente insere-se como taxa de emissão de 10 g/min de CO (ASIMAKOPOULOU et al, 2013). As condições de contorno de parede necessitam de um cuidado especial por saber que a velocidade nessas áreas é nula, por conta de ser o local inicial das camadas limites, por conta disso é importante que nessas áreas precisam de um refino da malha mais detalhado para que esses comportamentos da camada limite sejam alcançados.

A Figura 8 apresenta as localizações das condições de contorno (Fonte de poluente em vermelho e Saídas de exaustão em azul).

Figura 8: Apresentação dos posicionamentos das condições de contorno. (a) fonte de poluentes e (b) saídas de exaustão.



(a)



(b)

4.3 VALIDAÇÃO DO MODELO

Utilizando essa ferramenta, mostra-se necessária a validação do modelo, ou seja, a comparação entre o modelo simulado e uma análise experimental, seja em túnel de vento ou em campo. Essa validação baseia-se em conferir se o modelo computacional apresenta dados confiáveis.

Neste projeto, a validação será feita a partir do estudo de Asimakopoulou et al (2013), que analisou a concentração do poluente monóxido de carbono em uma garagem de um shopping na Grécia durante um dia.

Dois dispositivos eletroquímicos portáteis analisadores de gases foram empregados para obter medições contínuas de concentração de CO. Ambos os dispositivos analisadores de gás utilizados exibiram características técnicas semelhantes (ASIMAKOPOULOU et al, 2013).

Além das concentrações do poluente, as velocidades das entradas A1 e A2 foram medidas, facilitando a formação do perfil de velocidade que servirá de condição de contorno de entrada no modelo computacional. Essas velocidades relacionadas com a altura estão mostradas na Tabela 6:

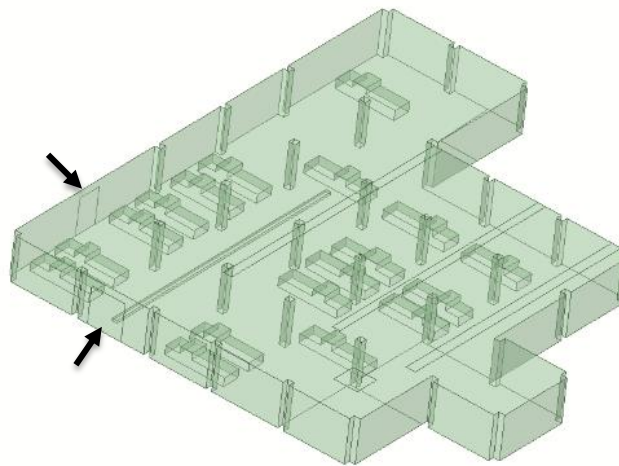
Tabela 6: Perfis de velocidade experimentais das entradas A1 e A2 do estudo de validação. Fonte: ASIMAKOPOULOU et al (2013).

Entradas	Entrada Principal (A1)			Entrada Secundária (A2)		
Altura (m)	0,7	1,35	2,1	0,7	1,4	2,0
Velocidade média (m/s)	+0,39	+0,24	+0,21	-0,43	-0,49	-0,33

O estudo fornece a taxa de emissão, que também será inserida no modelo, de 10g/min. Para inserir no modelo, transforma-se essa taxa em fluxo, através da área da fonte escolhida.

A geometria foi construída a partir de dados geométricos fornecidos pelo próprio estudo. A Figura 9 mostra a geometria gerada que foi utilizada na validação.

Figura 9: Geometria construída para utilização na modelagem CFD para a validação do modelo.



Além da geometria, a geração da malha é uma etapa muito importante para a modelagem, como já mencionado neste trabalho. Sendo assim, é importante destacar que para a geração da malha utilizou-se elementos hexaédricos, essa abordagem pôde ser empregada nesse estudo porque a geometria baseia-se em componentes quadrados, sem grandes curvaturas.

Neste estudo foi realizado um teste de malha para verificar a independência dos resultados em função do refino da malha computacional. Essa análise é importante para identificar se a malha computacional está influenciando negativamente o resultado físicos do modelo, além de reduzir uma demanda computacional. O resultado do teste de malha será apresentado no capítulo de Resultados e Discussões.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo está dividido em 5 seções. A primeira seção apresenta o teste de malha realizado. Na seção 5.2 é apresentado o resultado da validação do modelo, esta etapa se mostra necessária para seja respaldado a representatividade do modelo em relação à realidade obtida nos estudos experimentais. Já na seção 5.3 discute-se sobre os resultados do escoamento no interior do ambiente e suas modificações de acordo com as alterações das entradas de ar. Após a análise do escoamento, a seção 5.4 apresenta a discussão sobre a dispersão do monóxido de carbono na garagem. Cabe ressaltar que os veículos interferem no escoamento por se comportarem como obstáculos, por conta disso, a seção 5.5 abrange sobre esse assunto.

5.1 TESTE DE MALHA

Desenvolveu-se o teste de malha com três refinamentos de malha: Malha 1 (500 000 nós), Malha 2 (2 000 000 nós) e Malha 3 (3 000 000 nós), apresentado na Figura 10. Exemplificase esse posicionamento através da Figura 11 no domínio computacional utilizado na simulação.

Figura 10: Representação das malhas (a) Malha 1, (b) Malha 2 e (c) Malha 3.

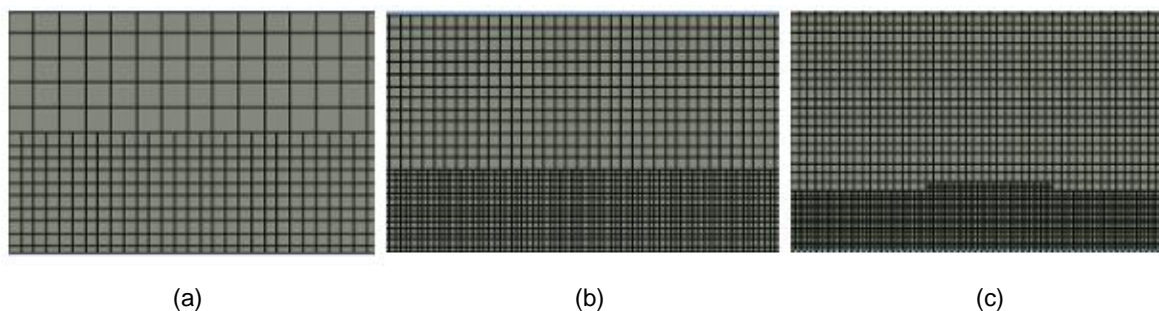
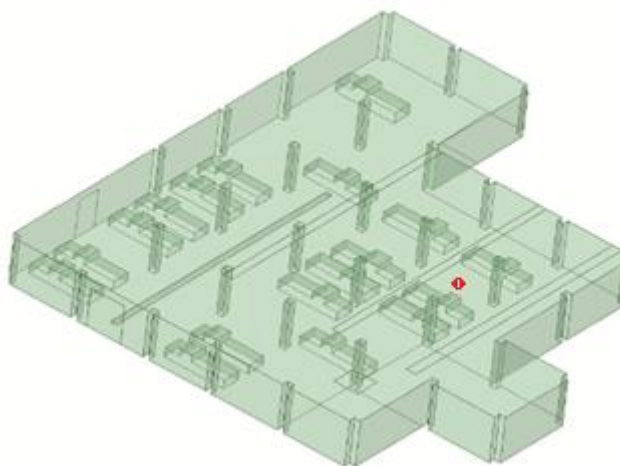
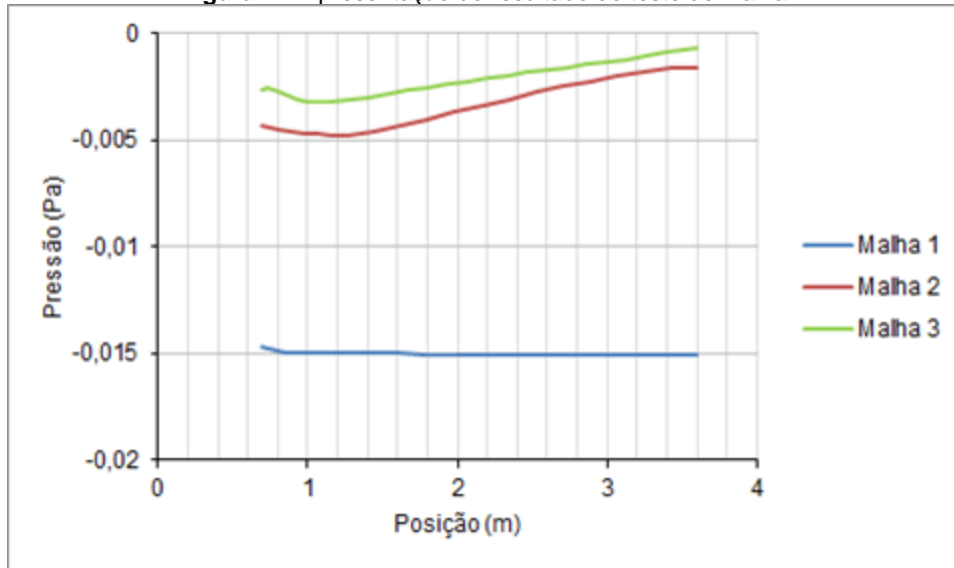


Figura 11: Representação do posicionamento de retirada do resultado do teste de malha.



A escolha do posicionamento no ponto de análise buscou selecionar uma região da geometria que fosse representativa no todo, ou seja, próximo aos veículos e saídas de ar.

A Figura 12 apresenta os resultados do cenário analisado para a validação para cada tipo de malha.

Figura 12: Apresentação do resultado do teste de malha.

Pode-se observar que a Malha 1, por ser a menos refinada, mostra-se muito influenciada negativamente nos aspectos físicos da simulação, quando comparada com as Malhas 2 e 3.

É possível visualizar que as Malhas 2 e 3 estão próximas o suficiente para se determinar que caso houvesse uma malha mais refinada os resultados não se alterariam significativamente. Dessa forma, a malha escolhida para a modelagem da validação foi a Malha 2, por necessitar de uma demanda computacional menor que a Malha 3, por possuir menos nós.

5.2 VALIDAÇÃO

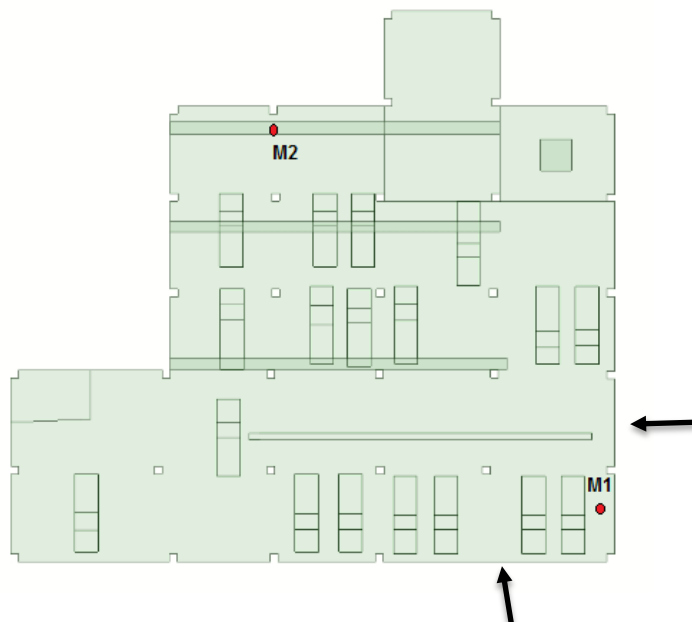
Um passo importante na análise dos dados obtidos neste trabalho é avaliar a acurácia do modelo de turbulência, através da comparação dos resultados numéricos com os dados experimentais. Essa prática é necessária por auxiliar na veracidade e representatividade física dos resultados. A Figura 13 apresenta uma exemplificação do local em que a análise experimental foi realizada.

Figura 13: Apresentação da garagem real utilizada para a análise de campo. Fonte: Asimakopoulou et al (2013)



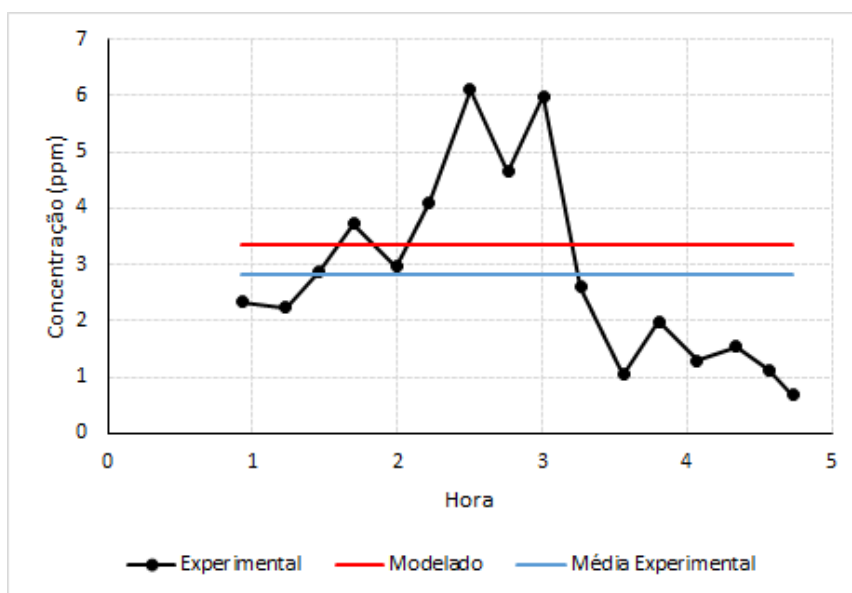
Realizou-se a validação a partir da comparação com estudo experimental de Asimakopoulou et al (2013), como já dito anteriormente. A Figura 14 apresenta os pontos em que as medições experimentais aconteceram durante um período comercial de 8 horas ao longo do dia, explicita as entradas de ar no ambiente e mostra, conseqüentemente, os locais de comparação com a simulação computacional

Figura 14: Locais de medição de monóxido de carbono (M1 e M2).

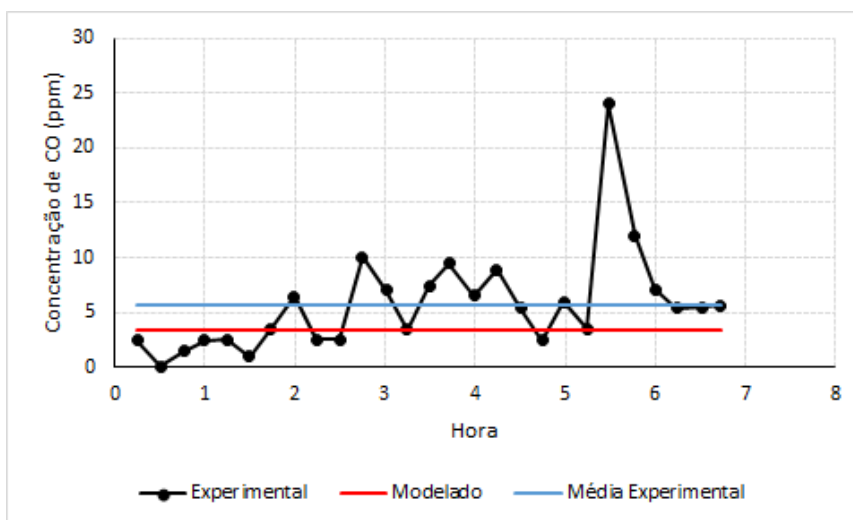


Essas medições foram realizadas à 1,6 metros do solo, altura representativa à maioria dos ocupantes desse ambiente. As Figuras 15(a) e 15(b) mostram os resultados da comparação entre os dados experimentais e modelados dos pontos M1 e M2, respectivamente.

Figura 15: Apresentação dos resultados da validação do modelo, sendo (a) ponto M1 e (b) ponto M2.



(a)



(b)

Pode-se observar que os valores experimentais foram medidos ao longo de um dia comercial, sendo plausível que haja oscilações de entradas e saídas de veículos. É possível ressaltar que a concentração média no ponto M2 é maior do que em M1, muito provavelmente devido a sua proximidade com as entradas de ar, como mostrada na Figura 11.

É importante ressaltar que para o ponto M1 a média modelada apresentou-se cerca de 20% superior à média experimental. Quando se fala sobre o ponto M2 a média modelada se apresenta cerca de 30% inferior à média experimental.

Salienta-se que o resultado da simulação computacional se mostra com baixas variações em relação às médias dos resultados medidos experimentalmente. Essa relação mostra que o modelo se encontra calibrado com os fenômenos físicos.

Além disso, nesse estudo certa diferença entre os resultados experimentais e modelados é aceitável, devido ao fato de que os resultados experimentais foram obtidos a partir de experimentos em campo, ou seja, o ambiente não era controlado como é de costume em análises experimentais (túnel de vento).

5.3 ANÁLISE DO ESCOAMENTO

A análise do escoamento no interior do ambiente interno auxilia na discussão dos resultados. Quanto mais bem distribuída é a circulação do ar no ambiente menor a probabilidade de criação de zonas mortas, áreas em que há estagnação de poluentes e baixa diluição desses poluentes.

O material particulado é um dos poluentes emitidos na exaustão dos veículos, além de também serem inseridos no ambiente através da ressuspensão desses materiais vindos do ambiente externo ou até mesmo nas rodas do próprio veículo.

Dessa forma, cabe observar que os ambientes em que a velocidade se mostra baixa, há uma tendência maior em sedimentar material particulado e, conseqüentemente, causar incômodo aos usuários do ambiente. Além de maiores gastos com limpeza desses ambientes.

Além disso, a existência de obstáculos impede a uniformidade do escoamento e cria zonas de estagnação do ar poluído. Cabe ressaltar que os automóveis e pilastras presentes na geometria analisada no estudo se comportam como obstáculos. Por esta razão, cada vez mais se utiliza, em garagem coberta, posicionamentos estratégicos de aberturas de entrada de ar. A vantagem é permitir a orientação do escoamento, gerando um varrimento global e eliminando zonas de eventual estagnação. Uma das desvantagens é promover a mistura entre o ar novo e o ar poluído, uniformizando a concentração de poluentes no interior. Esta situação por um lado é vantajosa, pois atenua os picos de concentração, por outro obriga ao escoamento de um maior volume de ar para retirar a mesma quantidade de poluentes (Vilar, 2010).

A Figura 16 e 17 apresentam o escoamento na garagem analisada em 0,4 e 2,8 metros de altura, respectivamente.

Figura 16: Representação do campo de velocidade do escoamento no interior da garagem analisada à 0,4 metros do solo.

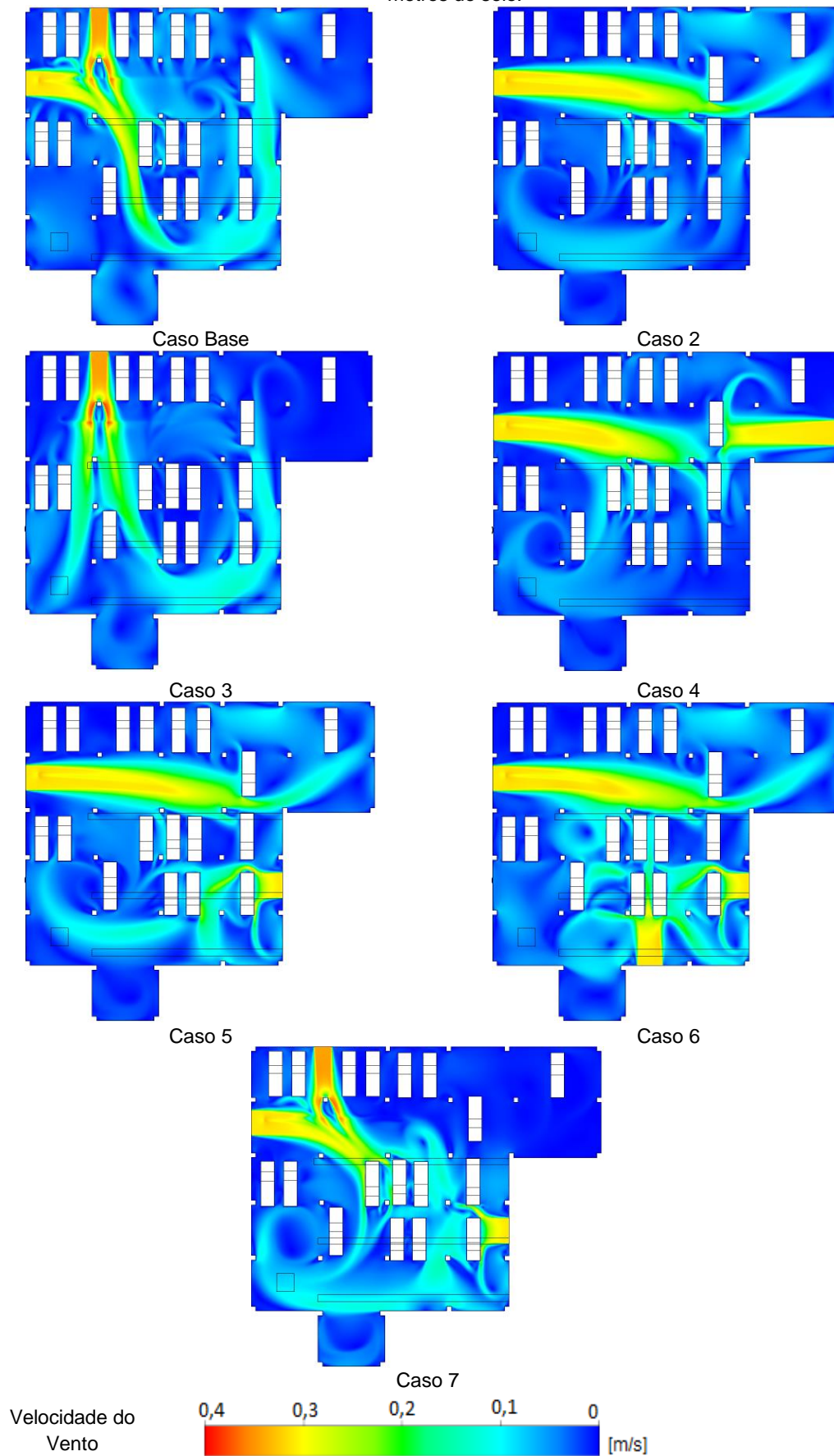
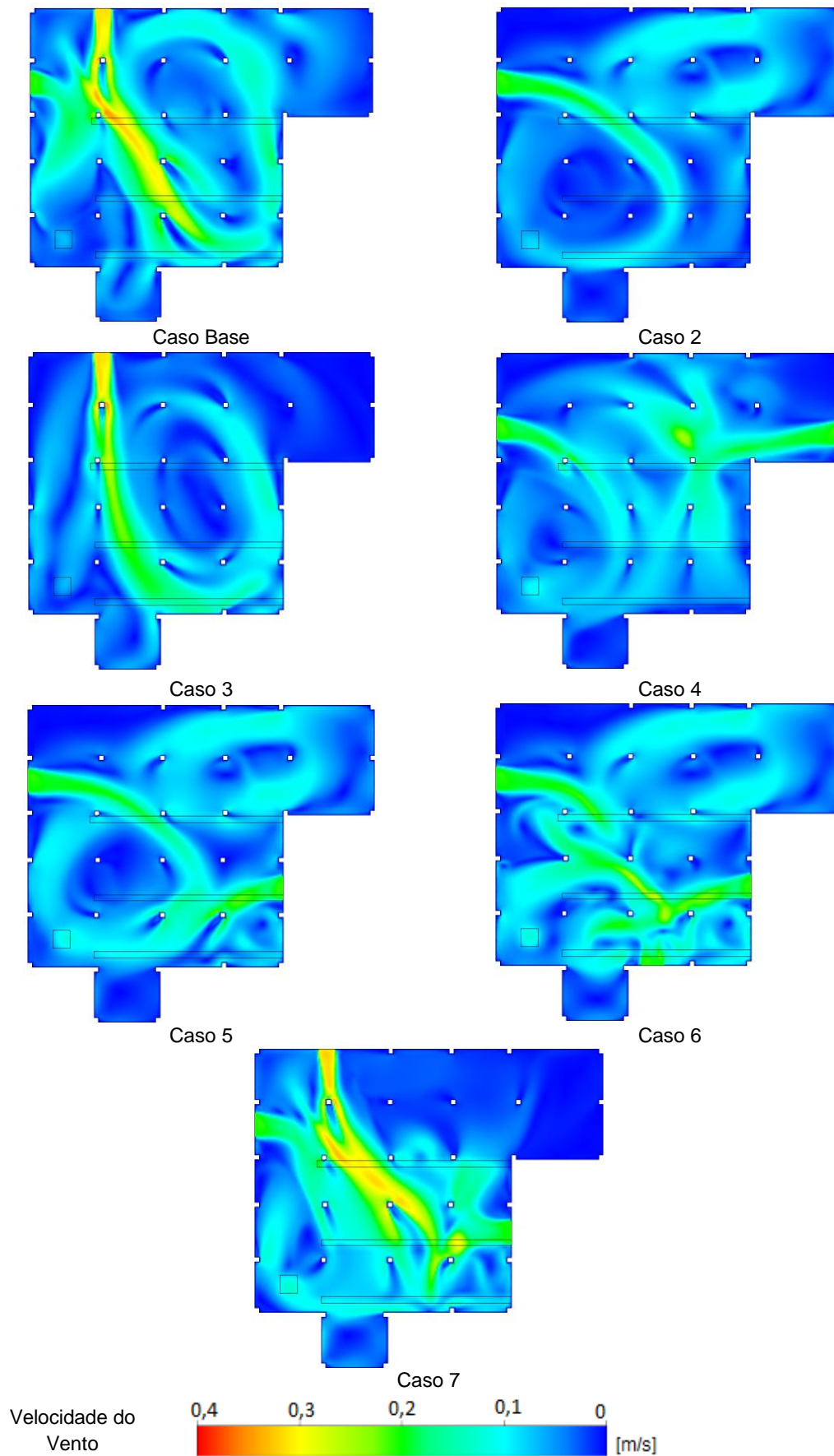


Figura 17: Representação do campo de velocidade do escoamento no interior da garagem analisada à 2,8 metros do solo.



É importante observar que a Figura 17 (2,8 m) apresenta um comportamento do escoamento de forma diferenciada quando comparado com a Figura 16 (0,4 m), isso se dá pelas saídas de ar estarem posicionadas na parte superior da geometria, fazendo com que os contornos mais próximos à essas saídas estejam com escoamentos mais conturbados.

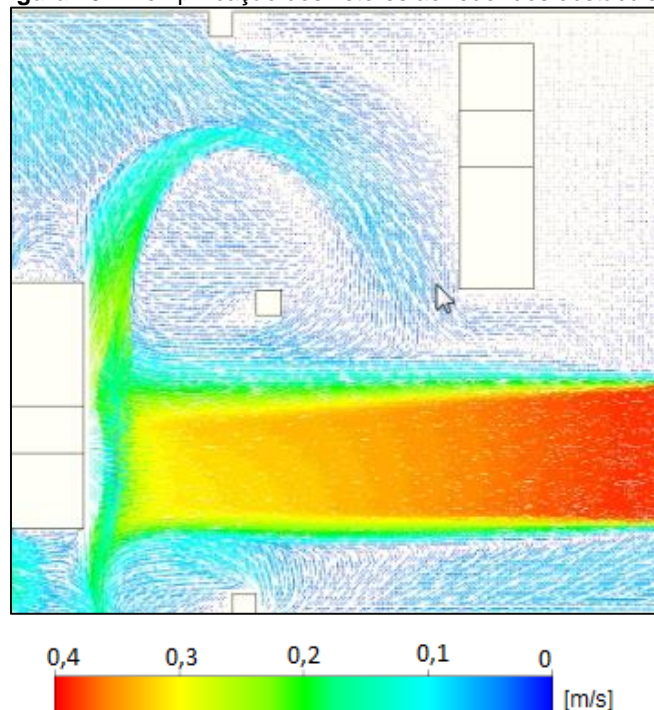
Esse tipo de comportamento é comum nas proximidades de saídas de ar, por conta da condição de contorno aplicada à essas saídas: outflow. A condição de contorno para saídas Outflow determina uma pressão de saída adequada para o caso de estudo, essa estratégia é utilizada quando não se possui dados de saída para serem inseridos na simulação. Dessa forma, a parcela do escoamento se mantém no interior do ambiente até atingir a pressão necessária para ser retirada pelas saídas de exaustão, causando assim variação do escoamento nessas regiões.

Cabe ressaltar que o Caso Base apresenta escoamento com poucas áreas de velocidades baixas, o que facilita na redução de formação de zonas de estagnação de poluentes, responsáveis por formar regiões com concentrações de poluentes altas, ocasionando desconforto ao ocupante. Ao contrário deste caso, os Casos 2, 3 e 4 mantêm áreas da geometria com velocidades baixas, além de ser possível observar a formação de zonas de recirculação que também auxiliam na estagnação de poluentes.

Em relação ao Caso 4, apresentado nas Figuras 16 e 17, pondera-se que essa análise se apresenta influenciada pela taxa de ocupação no interior da garagem, sabendo que o obstáculo representado pelo veículo bloqueia a passagem do escoamento para o restante da geometria. Por conta disso, a quantidade de zonas de recirculação é maior, levando em consideração que são formadas, em geral, pela presença de obstáculos.

Os Casos 5, 6 e 7 apresentam zonas de recirculação causadas pelas presenças dos obstáculos, porém apresentam menos regiões com velocidade do escoamento baixas, fazendo com que o escoamento se mantenha com velocidades médias e reduza a tendência de sedimentação e aumento das concentrações dos poluentes. É possível ver as zonas de recirculação ao redor do obstáculo na Figura 18 abaixo. Exemplificando o que acontece ao redor dos veículos em todas as geometrias.

Figura 18: Exemplificação dos vetores ao redor dos obstáculos.



Cabe dizer, que as entradas de ar como ventilação natural são hipotéticas. É possível observar que nos Casos 4, 5 e 6 para cenários reais, algumas dessas entradas precisariam da ajuda da ventilação mecanizada para acontecerem, por possuírem entradas em lado oposto à uma outra entrada de ar, o que fisicamente seria dificultaria o escoamento.

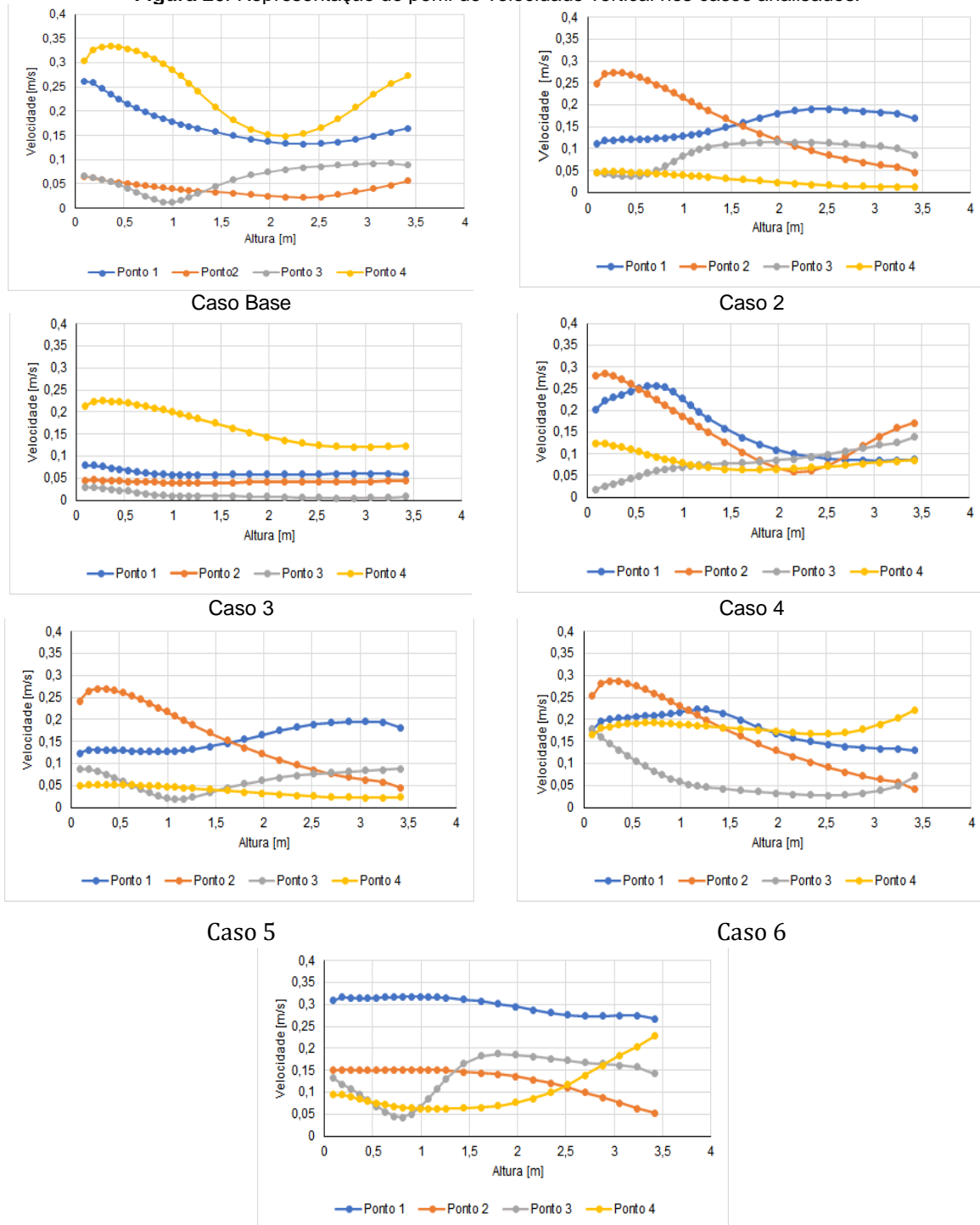
Além da análise dos contornos, a análise das velocidades em relação a altura se apresenta importante. A escolha dos pontos foi determinada por ser posicionada em uma região central à geometria, próxima das entradas e saídas de ar. Além disso, esses pontos são representativos por possuírem pilastras e veículos ao redor e, conseqüentemente, zonas de recirculação. Os pontos escolhidos estão apresentados na Figura 19.

Figura 19: Pontos de análise dos gráficos verticais.



A Figura 20 apresenta gráficos que representam a variação da velocidade do vento de acordo com a altura para cada um dos casos simulados.

Figura 20: Representação do perfil de velocidade vertical nos casos analisados.



Caso 7

Analisando o Caso Base é possível observar que os pontos 1 e 4 apresentam as maiores velocidades, esse comportamento mostra-se plausível pela posição das entradas de ar que favorecem um escoamento na direção desses pontos, como pode ser observado na Figura 17, onde é apresentado o contorno do escoamento. Dessa forma, por esses pontos estarem na rota do escoamento geral do cenário, conseqüentemente, as velocidades serão mais altas.

No início do Caso 2 visualiza-se que o ponto 2 possui um aumento de velocidade próximo ao solo, isso acontece pela velocidade da entrada de ar tender a esse ponto após perder sua força ao longo do deslocamento. Esse comportamento se mantém no Caso 5, porém neste segundo caso há uma outra entrada de ar em que favorece a formação de zonas de recirculação e, conseqüentemente, menores velocidades em outros pontos analisados.

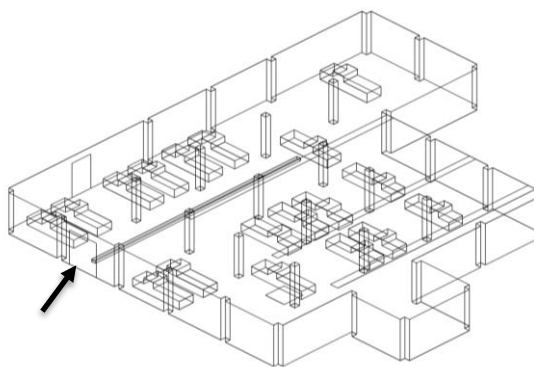
No Caso 3 é possível observar que os valores de velocidade se mantêm baixos e aproximados, esse comportamento se mostra plausível por conta de o posicionamento dos pontos de análise estarem no centro de uma zona de recirculação, onde as velocidades, majoritariamente, são mais baixas.

A análise do Caso 7 também traz observações importantes pois os pontos 2 e 3 apresentam descendência nas magnitudes de suas velocidades por estarem em regiões onde há recirculação. Além disso, o ponto 4 apresenta ascendência quando se eleva a altura, esse comportamento está vinculado à proximidade com entrada de ar e as saídas de ar.

Ao observar o Caso 5 é possível dizer que os pontos 3 e 4 tendem a possuir velocidades menores por estarem posicionados próximos a zonas de recirculações causadas pela presença das entradas de ar. Essa análise também vale para o Caso 6, porém o ponto 3 se apresenta o mais influenciado por essas zonas de recirculação.

É necessário observar que os Casos 2,4, 5 e 6 que possuem somente a entrada lateral do Caso Base (apresentado na Figura 20) em comum, apresentam semelhança no comportamento do ponto 2. Essa semelhança está relacionada com a alta velocidade próximo ao solo pela presença da entrada de ar mencionada anteriormente (Figura 20) e a diminuição da velocidade ao longo da variação da altura pelo afastamento, além de não possuir outra entrada de ar que interfere no caminho em que o escoamento percorre, como acontece nos Casos 1 e 7.

Figura 21: Entrada lateral no caso base.



5.4 ANÁLISE DA DISPERSÃO DO MONÓXIDO DE CARBONO

Discute-se nessa seção a concentração dos poluentes na garagem analisada, por conta da configuração da geometria a dispersão do poluente comporta-se de maneira diferenciada quando se compara com um ambiente externo. O poluente utilizado na simulação é o monóxido de carbono.

Para a representação do monóxido de carbono como poluente referente à fonte da simulação utilizou-se a taxa de emissão de 10 g/min (ASIMAKOPOULOU et al, 2013), para que esse valor seja lido de forma coesa pelo software transformou-se o valor em fluxo de emissão, ou seja, dividiu-se pela área superficial da fonte de emissão (8,8 m²) e foi aplicado as conversões de unidade (0,0000189 kg/m²s). A densidade do monóxido de carbono utilizada na simulação foi de 1,12 kg/m³, respectivamente.

As Figuras 22 e 23 apresentam os contornos de concentração normalizada (c/c_m) de monóxido de carbono de acordo com a alteração da entrada de ar no interior da garagem (entradas de acordo com a Figura 5). Esses resultados estão sendo apresentados em 2 alturas a partir do solo: 0,4 m e 2,8 m. Sabe-se que a altura do solo até o limite superior da geometria é de 3,6 m.

Ressalta-se que a normalização se mostra necessária para seja possível a comparação entre os casos analisados, sabendo que a variação da concentração do poluente no interior da garagem é pequena, não sendo possível a equiparação dos resultados e impedindo, conseqüentemente, a escolha do cenário adequado, levando em consideração somente os casos descritos nesse trabalho.

Realizou-se a normalização da legenda dos resultados de concentração através do software de pós processamento da Ansys CFD-Post. Um domínio cúbico foi criado muito próximo à fonte para cada um desses sete casos apresentados abaixo, e calculou-se a concentração nesse domínio (C_m). Cabe ressaltar que a concentração calculada nesse domínio criado é a máxima em cada um dos casos, pelo posicionamento muito próximo à fonte. Após o cálculo da concentração máxima, divide-se a concentração de todo o ambiente interno (C) por essa concentração calculada no domínio cúbico.

Figura 22: Distribuição de concentração normalizada do monóxido de carbono para a altura de 0,4m

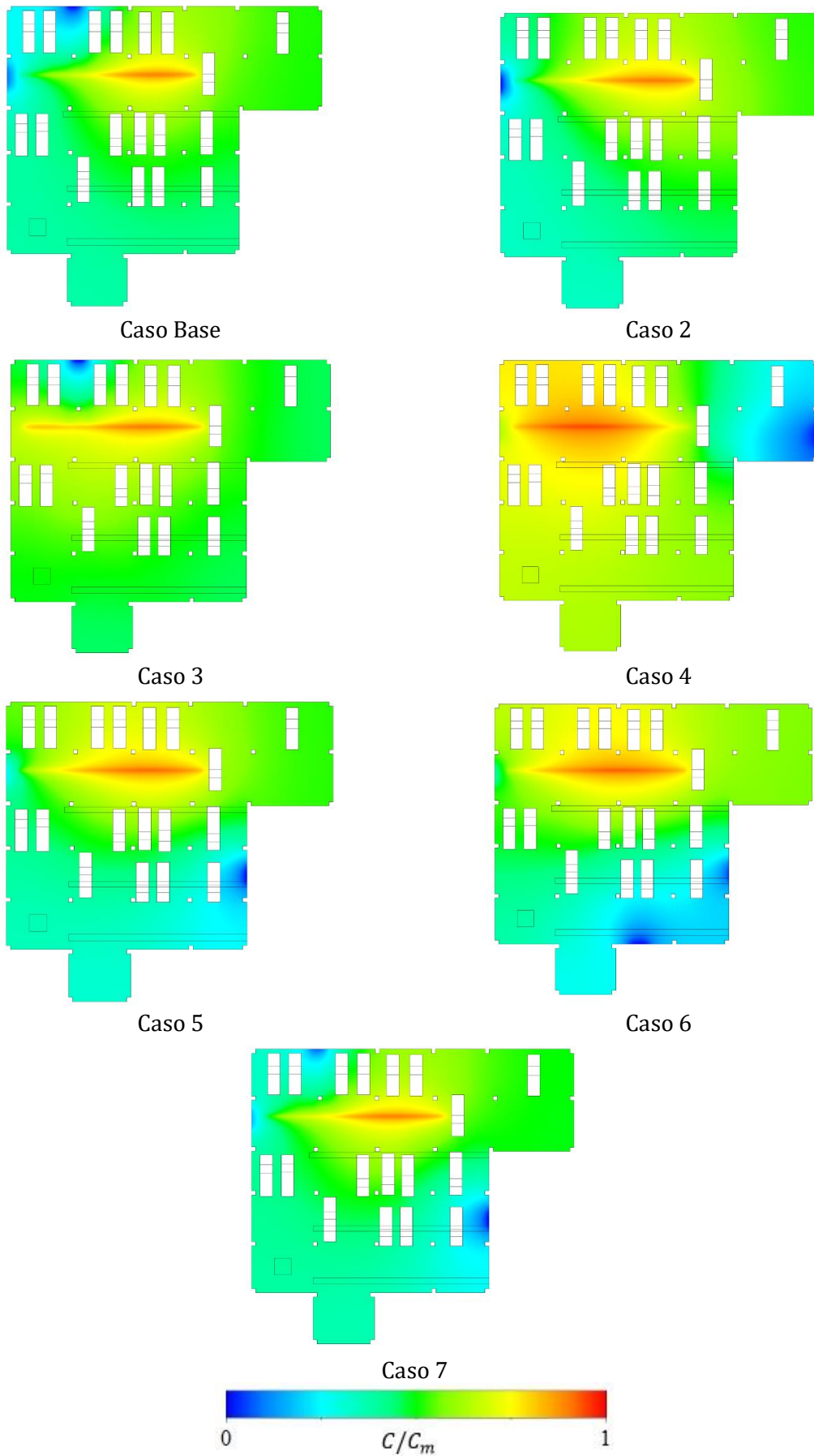
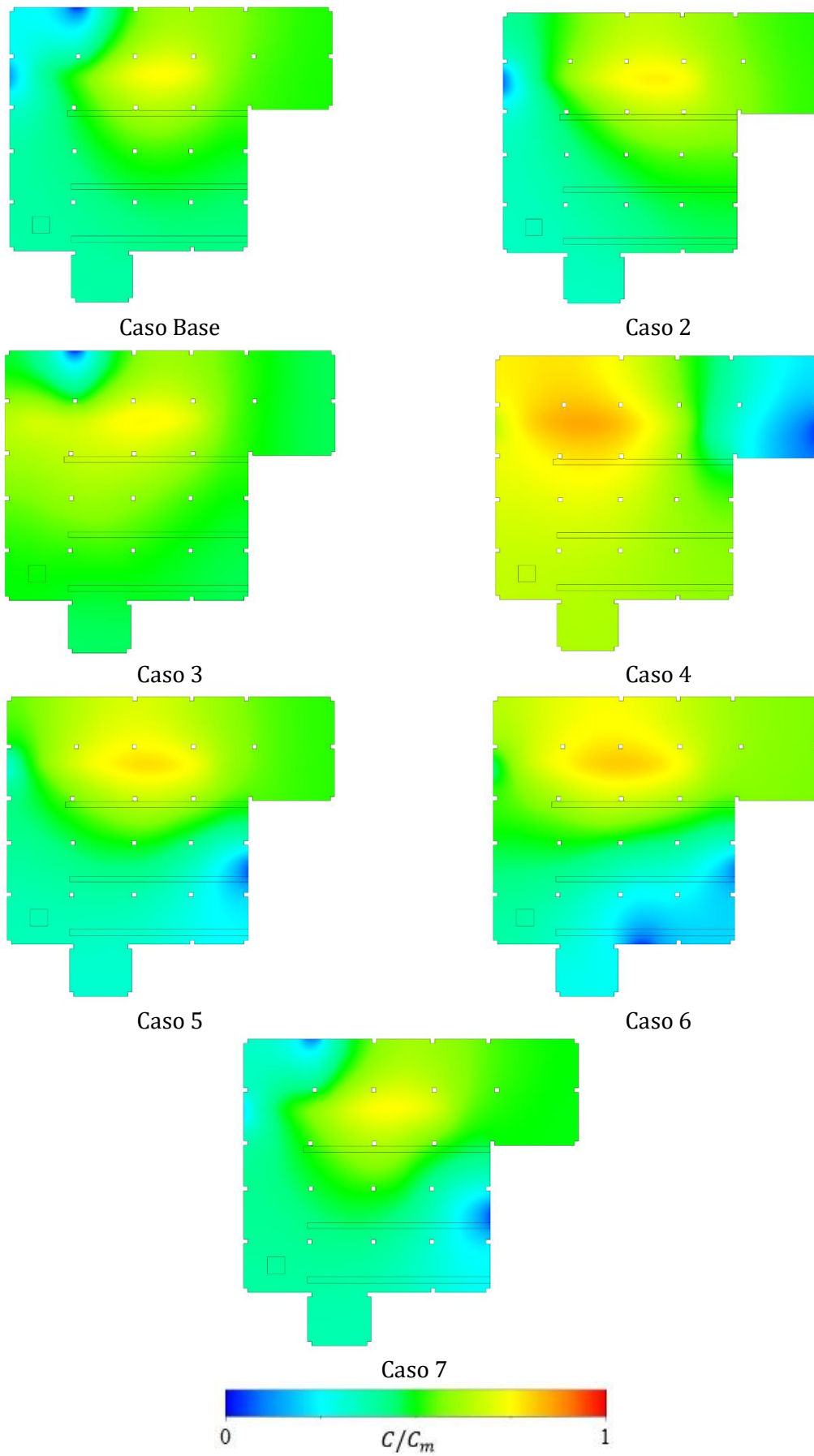


Figura 23: Distribuição de concentração normalizada do monóxido de carbono para a altura de 2,8 m



Por meio da análise das Figuras 22 e 23 que com o aumento da altura as concentrações são suavizadas, esse comportamento apresenta-se plausível pelo distanciamento da fonte, ou seja, quanto mais distante da fonte, o ambiente se mantém menos influenciado pelos poluentes emitidos por ela.

Através da análise dos cenários é possível observar que as concentrações no ambiente alteram com a variação das entradas de ar. Cabe ressaltar que as concentrações variam de forma radial ao redor da fonte, como esperado. Os cenários com maiores concentrações e, assim, sendo considerados os mais críticos são os Caso 3 e Caso 4.

O Caso 3 possui apenas uma entrada de ventilação natural, sendo essa entrada perpendicular a uma pequena parcela da representação da fonte de poluentes. Dessa forma, apresenta-se plausível a baixa dispersão do poluente monóxido de carbono e a baixa redução da concentração na garagem.

Já o Caso 4 apresenta 2 entradas de ventilação natural, sendo essas entradas com posicionamentos opostos na mesma direção, essa configuração tende a criar escoamentos preferenciais, ou seja, dificultando a circulação do ar dentro do ambiente interno. Além disso, é importante salientar que essas entradas de ar na mesma direção também influenciam na diluição do monóxido de carbono no restante do ambiente, sabendo que essas aberturas estão limitadas à uma região do ambiente. Além disso, é importante ressaltar que o Caso 4 apresenta uma das entradas de ar muito influenciadas pelos obstáculos da geometria, como apresentado na seção sobre a análise do escoamento. Por conta disso, a diluição do poluente é prejudicada.

O Caso 2 apresenta-se com apenas uma entrada que auxilia na diluição do poluente de monóxido de carbono, estando posicionada na direção da representação da fonte. Dessa forma, ressalta-se que mesmo que o caso possua somente uma entrada de ar, é possível torna-lo mais eficaz que casos em que há maior número de aberturas somente pelo posicionamento assertivo.

Em relação à discussão sobre o posicionamento das aberturas, os Casos 5 e 6 apresentam margem para essa análise. O Caso 5 possui duas aberturas para entrada de ar, enquanto o Caso 6 três entradas de ar, é possível observar, pelas Figuras 22 e 23, que não há alterações significativas nos contornos relacionados à concentração do poluente entre os dois casos, ou seja, a inserção de uma abertura a mais no Caso 6 não se mostrou eficaz para a diluição da poluente.

Dessa forma, cabe ressaltar que a abertura lateral inferior do Caso 5 auxilia na diluição do monóxido de carbono da parcela inferior da geometria, reduzindo a necessidade de inserção de outra entrada de ar nessa região. É válido salientar que por conta dessa análise essa entrada de ar foi utilizada no Caso 7.

O cenário que representa os menores níveis de concentração de monóxido de carbono é o Caso 7, como observado nas Figura 22 e 23. É importante observar que este cenário consiste em 3 entradas de ar, sendo as duas que estavam inseridas inicialmente no projeto, juntamente com outra entrada na faixa inferior do ambiente analisado. Analisa-se que após a implantação da terceira entrada de ar, a concentração de CO da faixa inferior da geometria reduziu consideravelmente. Dessa forma, a maioria da geometria se manteve com baixa concentração do poluente quando comparado com o restante dos casos.

5.5 INFLUÊNCIA DOS VEÍCULOS NO ESCOAMENTO

Os obstáculos no interior da garagem influenciam no escoamento. Essa influência pode estar vinculada às estagnações de poluentes e até mesmo sedimentação de material particulado.

Dessa forma, outras três simulações foram feitas para exemplificar a alteração no escoamento causada pelos obstáculos (veículos):

- Simulação da garagem padrão com o posicionamento das entradas de vento do Caso Base sem a presença dos veículos.
- Simulação da garagem padrão com o posicionamento das entradas de vento do Caso 7 sem a presença dos veículos.
- Simulação da garagem padrão com o posicionamento das entradas de vento do Caso 4 sem a presença dos veículos.

Escolheu-se esses casos para a representação da alteração do escoamento com a presença dos obstáculos por serem os cenários que apresentaram as melhores configurações (Caso Base e 7) e pior configuração (Caso 4), respectivamente, em relação à dispersão do poluente.

É importante ressaltar que o posicionamento dos veículos e a ocupação da garagem são variáveis flutuantes, ou seja, modificam-se rapidamente durante o expediente de uso do ambiente escolhido para análise.

As Figuras 24, 25 e 26 apresentam as comparações das velocidades das simulações dos Casos 1, 7 e 4, com a presença e a ausência dos veículos. Essa comparação objetiva a observação da variação das zonas de recirculação e o fluxo do escoamento com a retirada dos obstáculos.

Figura 24: Apresentação da velocidade para o Caso Base (a) com os veículos e (b) sem os veículos.

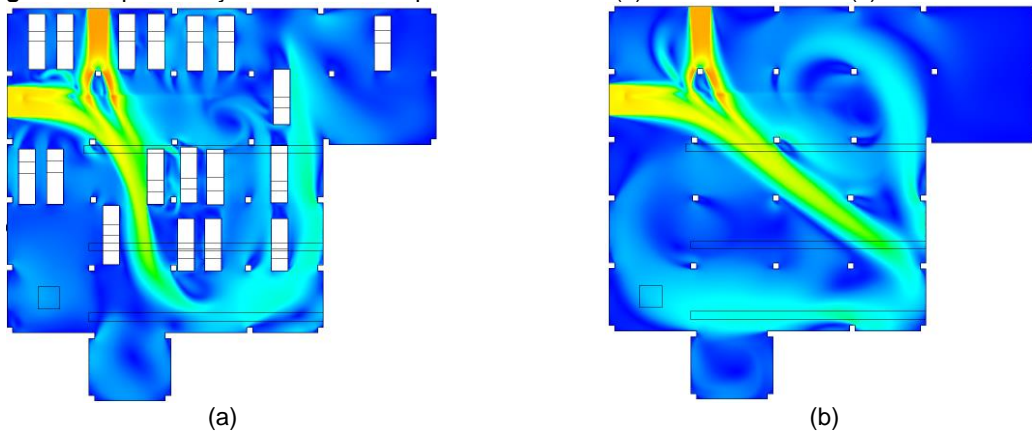


Figura 25: Apresentação da velocidade para o Caso 7 (a) com os veículos e (b) sem os veículos.

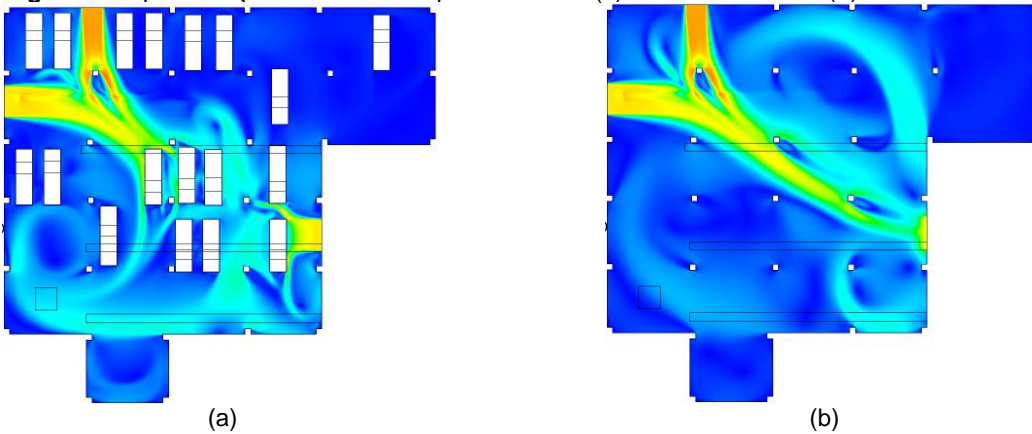
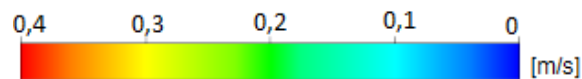
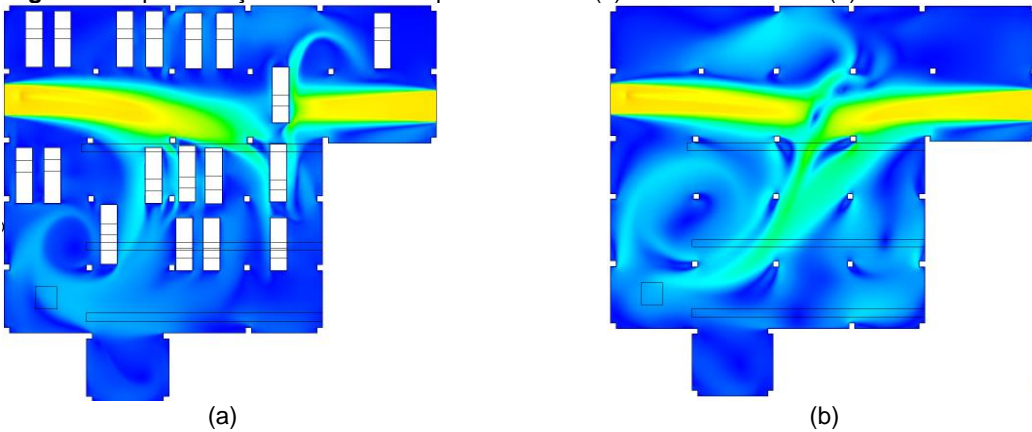


Figura 26: Apresentação da velocidade para o Caso 4 (a) com os veículos e (b) sem os veículos.



Observa-se que no Caso Base e no Caso 7 a presença dos veículos causa formação de pequenos vórtices que podem causar possíveis estagnações de poluentes, já nos cenários sem os obstáculos o escoamento se apresenta mais simétrico, tendendo a minimizar esse comportamento de estagnação de poluentes. Além disso, é importante salientar que mesmo

com a presença dos veículos e a perturbação no escoamento causada por estes, o ambiente apresenta-se ventilado nos dois casos, por conta disso esses cenários apresentam as melhores configurações quando é feita a análise da dispersão do poluente (monóxido de carbono).

A apresentação do Caso 4 salienta que a presença do veículo perpendicular à entrada de vento dificulta a passagem do escoamento por ser um bloqueio sólido. É possível ver que a ausência dos automóveis neste cenário fez com que o escoamento abrangesse pontos em que a presença dos veículos limitava. Além disso, o cenário em que os automóveis estão presentes, há formação de zonas de recirculações ao redor desses obstáculos, sendo favorável à estagnação de poluentes e dificultando a dispersão dos poluentes emitidos na garagem. Por conta disso, o caso 4 possui a configuração de entrada de vento menos favorável para a dispersão dos poluentes.

Dessa forma, é possível dizer que a posição em que o veículo é estacionado pode auxiliar ou prejudicar a ventilação no interior da garagem, interferindo na dispersão do poluente. Porém esse posicionamento é variável durante o uso da garagem. Dessa forma, a variação da concentração dos poluentes será mais crítica em momentos em que a garagem estiver com a maioria das vagas ocupadas, não somente pelo posicionamento dos carros, mas também pelo aumento da emissão de poluente.

6 CONCLUSÕES

Neste estudo foram estudados o escoamento e dispersão do monóxido de carbono no interior de uma garagem padrão, com o objetivo de analisar as alterações causadas no escoamento e dispersão através da modificação das configurações de entrada de ar no ambiente. O modelo matemático utilizado é baseado nas equações de conservação da massa, quantidade de movimento e espécie química com a utilização do método de volumes finitos. Escolheu-se o modelo de turbulência $k - \varepsilon$ pois é um modelo difundido. Realizou-se sete simulações para diferentes configurações de entrada de ar para a geometria referente à garagem escolhido. A primeira simulação se baseou no Caso Base, ou seja, o cenário vinculado ao experimento de campo utilizado para a validação do modelo, e os casos seguintes se referem as modificações das entradas de ar, seja em seus posicionamentos ou quantidades.

Após as simulações serem realizadas, observou-se que os posicionamentos estratégicos das entradas de ar interferem com maior intensidade na redução das concentrações quando comparado com as quantidades dessas entradas. Além disso, concluiu-se que o Caso 7 se mostrou com menos zonas de recirculação, quando o escoamento é analisado, e as menores concentrações normalizadas de CO, quando a análise de dispersão é realizada. O resultado mostra-se plausível pelo Caso 7 apresentar as entradas de ar de forma espacialmente heterogênea. Porém, é importante ressaltar que o Caso 4 mostra-se com o escoamento e dispersão menos favoráveis à redução da concentração de CO no ambiente interno, sendo prejudicado pelo posicionamento das entradas de ar e da presença dos obstáculos (veículos e pilastras).

A interferência dos obstáculos no escoamento no interior da garagem se apresentou significativa nos casos analisados, por conta disso simulou-se o escoamento para os Caso Base, Caso 4 (cenário menos favorável) e o Caso 7 (cenário mais favorável) sem a presença dos veículos e pôde observar que os cenários sem os veículos obtiveram uma circulação e vento mais homogênea no interior do ambiente, reduzindo as zonas de recirculação e, consequentemente, as áreas de possível estagnação de poluentes. Essas simulações puderam concluir que a quantidade de veículos que ocupam as vagas da garagem influenciará o escoamento no interior do ambiente, ou seja, caso a garagem estiver com poucos veículos esse escoamento provavelmente será menos influenciado. O posicionamento em que esses veículos se fixam também pode ser um fator influenciador.

No cotidiano, estudos como estes podem ser aplicados na fase de projeto em empreendimentos onde contem garagens fechadas, a fim de analisar o melhor

posicionamento das entradas de ar com o intuito de reduzir gastos energéticos e operacionais com equipamentos de ventilação mecânica após o projeto já finalizado. Além disso, a aplicabilidade desse trabalho também é influenciada pela prévia da qualidade do ar no interior de ambientes antes de serem construídos ou para melhorias de ambientes já consolidados.

Após as discussões dos resultados dos cenários simulados, é importante ressaltar que alguns pontos necessitam de recomendações para possíveis trabalhos futuros. Essas recomendações são destacadas abaixo:

- Realização do estudo desde a fase experimental até a fase computacional para garagem na região da Grande Vitória, levando em consideração as condições de velocidade e direção do vento dependendo do posicionamento da garagem analisada.
- Simular os cenários levando em consideração a temperatura do ambiente que influencia na dispersão dos poluentes e na qualidade do ar interior pelo desconforto causado.
- Analisar cenários com ventilação mecânica e comparar com os resultados fornecidos pela ventilação natural.
- Simular configurações com modificações das posições das saídas de exaustão, a fim de auxiliar na dispersão dos poluentes no ambiente interno.
- Realização de simulações com outros poluentes que estão presentes em garagens fechadas.

7 REFERÊNCIAS

ABREU, Catarina Fabíola Cardoso. O ambiente interior e a saúde dos ocupantes de edifícios de habitação. 2010. Tese de Doutorado.

ALLARD, F. (Ed.). Natural ventilation in building: a design handbook. London: James & James, 1998. 356 p.

ALLOCA, C., CHEN, Q., GLICKSMAN, L. R. Design analysis of single-sided natural ventilation. *Energy and Buildings*, London, v. 35, p. 785-795, 2003.

AMINIAN, Javad; MAEREFAT, Mehdi; HEIDARINEJAD, Ghassem. The enhancement of pollutant removal in underground enclosed parking lots by reconsideration of the exhaust vent heights. *Tunnelling and underground space technology*, v. 77, p. 305-313, 2018.

ASIMAKOPOULOU, Eleni K.; KOLAITIS, Dionysios I.; FOUNTI, Maria A. Experimental and computational investigation of CO production and dispersion in an automotive repair shop. *Indoor and Built Environment*, v. 22, n. 5, p. 750-765, 2013.

BARDANA, Emil J. Indoor air quality and health does fungal contamination play a significant role? *Immunology and Allergy Clinics of North America*, v. 23, n. 2, p. 291–309, 2003.

BOECHAT, Jose Laerte. Presença de endotoxinas, fungos e ácaros em prédios de escritórios no Rio de Janeiro e sua influência na prevalência dos sintomas de asma, rinite, atopia e síndrome do edifício doente. 2009. 266 f. Tese de doutorado. Faculdade de Medicina. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.

CÂNDIDO, Christhina; TORRES, Simone; BITTENCOURT, Leonardo. Avaliação do uso de peitoril ventilado para melhorar a ventilação natural em edificações: estudo de caso em núcleo de pesquisa multidisciplinar em Maceió/AL. *ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO (ENCAC)*, v. 8, p. 270-279, 2005.

CARAZO FERNÁNDEZ, Luis et al. Indoor Air Contaminants and Their Impact on Respiratory Pathologies. *Archivos de Bronconeumología (English Edition)*, v. 49, n. 1, p. 22–27, 2013.

CETESB (2002) Relatório de Qualidade do Ar 2002.

CHARLES, K. et al. Indoor Air Quality Guidelines and Standards. . Canada: National Research Council Canada. , 2005.

CHOI S. Delayed neurological sequelae in carbon monoxide intoxication. Arch Neurol 2000;57:1214–8.

EFTEKHARL, M. M., MARJANOVIC, L. D., PINNOCK, D. J. Air flow distribution in and around a single-sided naturally ventilated room. Building and Environment, London, v. 38, p. 389-397, 2001.

GIODA A, NETO A. chemical pollution related to the indoor air in Brazil. Quim. Nova 2003, vol. 26, n°3, 359-65.

GIVONI, B.. Man, Climate and Architecture. Applied Science Publishers. London, 1976.

GŁADYSZEWSKA-FIEDORUK, Katarzyna; NIECIECKI, Mariusz. Indoor air quality in a multi-car garage. Energy Procedia, v. 95, p. 132-139, 2016.

GODISH, Thad. Air Quality. 4th editio ed.Chelsea, Michigan: Lewis Publishers, 2003.

HAJDUKIEWICZ, Magdalena; GERON, Marco; KEANE, Marcus M. Formal calibration methodology for CFD models of naturally ventilated indoor environments. Building and Environment, v. 59, p. 290-302, 2013.

HEALTH CANADA. Residential Indoor Air Quality Guidelines. Canada: [s.n.]. Disponível em: <www.hc-sc.gc.ca>, 2014.

Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IEMA). Relatório da qualidade do ar na região da grande vitória, Vitória, ES, 2018.

IRK - FEDERAL ENVIRONMENT AGENCY'S INDOOR AIR HYGIENE COMMISSION. Guide values for indoor air quality. . Germany: [s.n.], 2011.

JACKSON, David L.; MENGES, Herman. Accidental carbon monoxide poisoning. JAMA, v. 243, n. 8, p. 772-774, 1980.

KIM, Sung R.; DOMINICI, Francesca; BUCKLEY, Timothy J. Concentrations of vehicle-related air pollutants in an urban parking garage. *Environmental Research*, v. 105, n. 3, p. 291-299, 2007.

KOLMOGOROV, A. N. Dissipation of energy in locally isotropic turbulence. *Dokl. Akad. Nauk. SSSR*, v. 32, p. 15-17, 1941. (reimpresso em *Proc. R. Soc. Lond. A* 434, 15-17 (1991) 667 p

LANGER, Sarka; BEKÖ, Gabriel. Indoor air quality in the Swedish housing stock and its dependence on building characteristics. *Building and Environment*, v. 69, n. 2, p. 44–54, 2013.

LANGSTON, J.W., WIDNER, H., BROOKS, D., 2010. Carbon monoxide poisoning. *Encyclopedia of Movement Disorders* 1, 187.

LIPING, W., HIEN, W. N. The impacts of ventilation strategies and façade on indoor thermal environment for naturally ventilated residential buildings in Singapore. *Building and Environment*, v. 42, p. 4006-4015, 2007.

MALALASEKERA, W. e VERSTEEG, H. K. (1995). An introduction to computational uid dynamics. Prentice Hall ISBN, Essex, UK, primeira edição.

MALISKA, C. R.; DE CALOR, R. Transferência. *Mecânica dos fluidos computacional*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora RJ, 1995.

MASCARÓ, Lúcia R. Energia na edificação: estratégia para minimizar seu consumo. 2. ed. São Paulo: Projeto, 1991. 213 p

MENTER, F. R. (1994). Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*, 32:3844.

NUNES, Zilma das Graças. Estudo da qualidade microbiológica do ar de ambientes internos climatizados. 2005. 143 f f. Teses de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Vigilância Sanitária. Instituto de Controle da Qualidade em Saude. Fundação Oswaldo Cruz. Rio de Janeiro., 2005.

OBAIDULLAH, M. et al. Measurements of particle concentrations and size distributions in three parking garages. *International Journal of Energy and Environment*, v. 6, n. 5, p. 508-515, 2012.

PAGEL, E. C. Qualidade do ar interno da Estação Antártica Comandante Ferraz (EACF) e sua relação com os materiais de construção e as atividades humanas. 2015.

PAPAKONSTANTINO, K. et al. Air quality in an underground garage: computational and experimental investigation of ventilation effectiveness. *Energy and Buildings*, v. 35, n. 9, p. 933-940, 2003.

POPE, S. (2000). *Turbulent Flows*. Cambridge University Press, primeira edição.

PROCKOP, Leon D.; CHICHKOVA, Rossitza I. Carbon monoxide intoxication: an updated review. *Journal of the neurological sciences*, v. 262, n. 1-2, p. 122-130, 2007.

REBOUL, C, THIREAU, J., MEYER, G., ANDRE, L., OBERT, P., CAZORLA, O., RICHARD, S., 2012. Carbon monoxide exposure in the urban environment: An insidious foe for the heart? *Respiratory Physiology & Neurobiology* 184, 204–212.

ROSMAN PCC. 1989. Modelos de Circulação em Corpos d'Água Rasos. In: SILVA RCV (Ed.). *Métodos Numéricos em Recursos Hídricos*. Coleção da ABRH - Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Vol. 1, Cap. 3, p. 156-221.

SALES, Gustavo de Luna. Diagrama de ventilação natural: ferramenta de análise do potencial da ventilação natural no estudo preliminar de projeto. 2016.

SANTOS, J. M. et al. Experimental investigation of outdoor and indoor mean concentrations and concentration fluctuations of pollutants. *Atmospheric Environment*, v. 45, n. 36, p. 6534–6545, 2011.

SCE - SISTEMA NACIONAL DE CERTIFICAÇÃO ENERGÉTICA DA QUALIDADE DO AR INTERIOR NOS EDIFÍCIOS. Nota Técnica NT-SCE-02 Metodologia para auditorias periódicas de Qualidade do Ar Interior em edifícios de serviços existentes no âmbito do RSECE. . Portugal: [s.n.].

SOMOGYI, E. et al. New findings concerning the pathogenesis of acute carbon monoxide (CO) poisoning. *The American journal of forensic medicine and pathology*, v. 2, n. 1, p. 31-39, 1981.

SREBRIC, Jelena et al. CFD boundary conditions for contaminant dispersion, heat transfer and airflow simulations around human occupants in indoor environments. *Building and Environment*, v. 43, n. 3, p. 294-303, 2008.

VAN HOOFF, Twan; BLOCKEN, Bert. CFD evaluation of natural ventilation of indoor environments by the concentration decay method: CO₂ gas dispersion from a semi-enclosed stadium. *Building and Environment*, v. 61, p. 1-17, 2013.

WHO (World Health Organization), 2010. WHO Guidelines for Indoor Air Quality: Selected Pollutants, Geneva, Switzerland.

WILCOX, David C. Multiscale model for turbulent flows. *AIAA journal*, v. 26, n. 11, p. 1311-1320, 1988.

World Health Organization, Regional Office for Europe (2000): Air quality guidelines for Europe 2000.- Second Edition. WHO Regional Publications, European Series, N. 91.

YANG, Li et al. CFD simulation research on residential indoor air quality. *Science of the Total Environment*, v. 472, p. 1137-1144, 2014.

MENDELL, Mark J.; SMITH, Allan H. Consistent pattern of elevated symptoms in air-conditioned office buildings: a reanalysis of epidemiologic studies. **American journal of public health**, v. 80, n. 10, p. 1193-1199, 1990.

FREIRE, Rita. Controle da poluição atmosférica. *Rev. Adusp*, v. 20, p. 56-62, 2000.

LERSCH, Inês Martina. Contribuição para a identificação dos principais fatores e mecanismos de degradação em edificações do patrimônio cultural de Porto Alegre. 2003.

MUKAI, Shinji et al. CFD simulation of diffusion of hydrogen leakage caused by fuel cell vehicle accident in tunnel, underground parking lot and multistory parking garage. *JARI RESEARCH JOURNAL*, v. 27, n. 9, p. 505, 2005.

BARRADAS, Ana Catarina Mendes. Avaliação do desempenho do OpenFOAM® em estudos de ventilação natural. 2016. Dissertação de Mestrado.

KRARTI, Moncef; AYARI, Arselene. CFD analysis of ventilation system performance for enclosed parking garages. *ASHRAE Transactions*, v. 109, p. 21, 2003.

JONES, W. P.; LAUNDER, Brian Edward. The prediction of laminarization with a two-equation model of turbulence. *International journal of heat and mass transfer*, v. 15, n. 2, p. 301-314, 1972.

LAUNDER, Brian Edward; SHARMA, B. I. Application of the energy-dissipation model of turbulence to the calculation of flow near a spinning disc. *Letters in heat and mass transfer*, v. 1, n. 2, p. 131-137, 1974.

LIEN, Fue-Sang; LESCHZINER, M. A. Assessment of turbulence-transport models including non-linear RNG eddy-viscosity formulation and second-moment closure for flow over a backward-facing step. *Computers & Fluids*, v. 23, n. 8, p. 983-1004, 1994.

YAKHOT, Victor; ORSZAG, Steven A. Renormalization group analysis of turbulence. I. Basic theory. *Journal of scientific computing*, v. 1, n. 1, p. 3-51, 1986.

SPEZIALE, Charles G. On nonlinear k_l and $k-\epsilon$ models of turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 178, p. 459-475, 1987.

LAUNDER, Brian Edward; SPALDING, Dudley Brian. The numerical computation of turbulent flows. In: *Numerical prediction of flow, heat transfer, turbulence and combustion*. Pergamon, 1983. p. 96-116.

CUNHA, Pedro Xavier Garim da. Estudo da dispersão de fumos num parque de estacionamento. 2014. Tese de Doutorado.

VILAR, Filipe Sacchetti Freitas et al. Segurança contra incêndio em parques de estacionamento cobertos. 2010.

ASHRAE (1989) "Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality", Atlanta, GA, American Society of Heating, Refrigerating, and Air-conditioning Engineers (ASHRAE Standard 62 – 1989).

BILLINGS, C.E. and VANDERSLICE, S.F. "Methods for control of indoor air quality", *Environment International*, 8,497- 504, (1982)

BURGE, Sherwood et al. Sick building syndrome: a study of 4373 office workers. *The Annals of Occupational Hygiene*, v. 31, n. 4A, p. 493-504, 1987.

ZWEERS, T. et al. Health and indoor climate complaints of 7043 office workers in 61 buildings in the Netherlands. *Indoor Air*, v. 2, n. 3, p. 127-136, 1992.

MOREY, P. R. Microorganisms in buildings and HVAC systems: A summary of 21 environmental studies. *ASHRAE IAQ'88*, p. 10-24, 1988.

MOREY, R.; WILLIAMS, C. Porous insulation in buildings: a potential source of microorganisms. *Proceedings of Indoor Air*, v. 90, n. 5, p. 529-533, 1990.

MOREY, P. R. et al. Is porous insulation inside an HVAC system compatible with a healthy building. In: *Proceedings of IAQ'91, Healthy Buildings*. 1991. p. 128-135.

RYLANDER, R. et al. The importance of endotoxin and glucan for symptoms in sick buildings. *Present and Future of Indoor Air Quality* (Bieva CJ, Courtois Y, Govaerts M, eds). Amsterdam: Elsevier Science, p. 219-226, 1989.

PASANEN, P. et al. Emissions of volatile organic compounds from air conditioning filters of office buildings. *Indoor Air*, v. 90, p. 183-186, 1990.

MØLHAVE, L.; THORSEN, M. A model for investigations of ventilation systems as sources for volatile organic compounds in indoor climate. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*, v. 25, n. 2, p. 241-249, 1991.

FANGER, P. O. et al. Air pollution sources in offices and assembly halls, quantified by the olf unit. *Energy and Buildings*, v. 12, n. 1, p. 7-19, 1988.

THORSTENSEN, Ellen et al. Air pollution sources and indoor air quality in schools. *Proceedings of Indoor Air*, v. 90, p. 531-536, 1990.

PEJTERSEN, J. et al. Air pollution sources in kindergartens. In: *Proceedings of IAQ*. 1991. p. 221-224.

SALISBURY, S. A. A typically frustrating building investigation. *Ann. ACGIH: Evaluating Office Environmental Problems*, v. 10, 1984.

HILL, Bert A.; CRAFT, Bobby F.; BURKART, John A. Carbon dioxide, particulates, and subjective human responses in office buildings without histories of indoor air quality problems. *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, v. 7, n. 2, p. 101-111, 1992.

HODGSON, M. J. et al. Sick building syndrome symptoms, work stress, and environmental measures. *Proceedings of ASHRAE IAQ*, p. 47-56, 1992.

SUNDELL, Jan; LINDVALL, Thomas; STENBERG, Berndt. Associations between type of ventilation and air flow rates in office buildings and the risk of SBS-symptoms among occupants. *Environment International*, v. 20, n. 2, p. 239-251, 1994.

WYON, David P. Sick buildings and the experimental approach. *Environmental Technology*, v. 13, n. 4, p. 313-322, 1992.

JAAKKOLA, Jouni JK; HEINONEON, Olli P.; SEPPÄNEN, Olli. Mechanical ventilation in office buildings and the sick building syndrome. An experimental and epidemiological study. *Indoor air*, v. 1, n. 2, p. 111-121, 1991.

JAAKKOLA, J. J.; TUOMAALA, Pekka; SEPPÄNEN, Olli. Air recirculation and sick building syndrome: a blinded crossover trial. *American Journal of Public Health*, v. 84, n. 3, p. 422-428, 1994.

MENZIES, Richard et al. The effect of varying levels of outdoor-air supply on the symptoms of sick building syndrome. *New England Journal of Medicine*, v. 328, n. 12, p. 821-827, 1993.

FREITAS, Vasco; PINTO, Manuel; GUIMARÃES, Ana. Sistemas de Ventilação Natural/Mistos em Edifícios de Habitação. *Implicações Construtivas. Climatização*, v. 52, p. 40-56, 2007.

PINTO, Manuel; SILVA, Fernando; FREITAS, Vasco. Modelos Preditivos para Ventilação Natural. *Construção Magazine*, n. 14, 2005.

DA SILVA, Raquel BTR et al. Insalubridade do trabalhador na produção animal: uma questão de educação e informação. 2006.