



**CENTRO UNIVERSITÁRIO FAMETRO
ENGENHARIA CIVIL**

JAIRO IVO CASTRO BRITO

**ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE AS EMISSÕES DE POLUENTES
ATMOSFÉRICOS VEICULARES E A PRESENÇA DE FAIXA EXCLUSIVA DE
TRANSPORTE PÚBLICO**

FORTALEZA

2022

JAIRO IVO CASTRO BRITO

ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE DAS EMISSÕES DE POLUENTES
ATMOSFÉRICOS VEICULARES E A PRESENÇA DE FAIXA EXCLUSIVA DE
TRANSPORTE PÚBLICO

Artigo TCC apresentado ao curso de Bacharel em Engenharia Civil da Faculdade Metropolitana da Grande Fortaleza – UNIFAMETRO – como requisito para a obtenção do grau de bacharel, sob a orientação do professor Dr. Jefferson Pereira Ribeiro.

FORTALEZA

2022

JAIRO IVO CASTRO BRITO

ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE DAS EMISSÕES DE POLUENTES
ATMOSFÉRICOS VEICULARES E A PRESENÇA DE FAIXA EXCLUSIVA DE
TRANSPORTE PÚBLICO

Artigo TCC apresentada no dia 15 de junho de 2022 como requisito para a obtenção do grau de bacharel em Engenharia Civil da Faculdade Metropolitana da Grande Fortaleza – FAMETRO – tendo sido aprovado pela banca examinadora composta pelos professores abaixo:

BANCA EXAMINADORA

Profº. Dr. Jefferson Pereira Ribeiro
Orientador – Faculdade Metropolitana da Grande Fortaleza

Profº. Esp. Kaio Gefferson de Almeida Mesquita
Membro interno – Centro Universitário Fametro (UNIFAMETRO)

Profº. Dr. Bruno Vieira Bertoncini
Membro externo – Universidade Federal do Ceará (UNIFAMETRO)

Ao professor Jefferson Ribeiro, que com sua dedicação e cuidado de mestre, orientou-me na produção deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

A Vilauba, por ser uma mãe atenciosa que sempre buscou me dar bons estudos, ao professor João Gleidson por sempre me incentivar a ter curiosidade e a entrar na engenharia, ao professor Bruno Bertoncini por ter me recebido no grupo de transportes e por ter me ajudado em tantos momentos, ao Cassiano por ter sido um incrível coorientador e um amigo, a Amanda por ter me ajudado com a revisão deste trabalho e por todas as orientações e, ao professor Jefferson Ribeiro por todos os conselhos, por ter me ouvido em tanto momento, por ter me orientado neste trabalho e por me guiar à conclusão de mais uma preciosa etapa da minha vida.

“Uma criança, um professor, uma caneta e um livro podem mudar o mundo. Eu sonho com um país onde a educação prevalecerá.”

Malala Yousafzai

ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE DAS EMISSÕES DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS VEICULARES E A PRESENÇA DE FAIXA EXCLUSIVA DE TRANSPORTE PÚBLICO

Jairo Ivo Castro Brito¹
Jefferson Pereira Ribeiro²

RESUMO

O objetivo geral deste trabalho é verificar se existe influência de faixas exclusivas para transporte público nas emissões de (Dióxido de Carbono) CO₂ e (Óxidos de Nitrogênio) NO_x de um veículo leve. A atividade dos transportes, representada pelo tráfego veicular, é um dos maiores responsáveis pela degradação da qualidade do ar. Acredita-se que as emissões de poluentes veiculares sofrem influência das interações ocorridas no meio urbano, bem como pela implantação de alternativas para o sistema de transportes, portanto intervenções no sistema de transportes deveriam ser estudadas de forma a, também, considerar o caráter ambiental no seu escopo. Para isso, propõem-se com este estudo a realização de coletas com equipamentos *on-board* do tipo PEMS. Tais coletas foram realizadas em pares de vias, com e sem a presença de faixa exclusiva de ônibus; com similaridades quanto à classificação funcional, ao número de linhas de ônibus, ao número de faixas trafegáveis, ao padrão de uso do solo e à distância trafegável contínua. Foram identificados nos resultados que as emissões na via com faixa exclusiva e sem faixa exclusiva de ônibus se mostraram consideravelmente diferentes, sendo de até 6% para CO₂ e 20% para NO_x, mesmo que não tenha se observado grande diferença nas velocidades das duas vias. Tal fato pode ser explicado pelas interações que ocorrem entre os veículos de transporte e os veículos leves, não a ponto de afetar a velocidade, mas sim afetando a qualidade do ar das vias estudadas.

Palavras-chave: Emissões veiculares. PEMS. Faixas exclusivas de ônibus. Meio urbano.

¹ Graduando do curso de Engenharia Civil pela Faculdade Metropolitana da Grande Fortaleza – UNIFAMETRO.

² Prof. Orientador do curso de Engenharia Civil da Faculdade Metropolitana da Grande Fortaleza – UNIFAMETRO.

ABSTRACT

The general objective of this work is to verify if there is an influence of exclusive lanes for public transportation on the emissions of (Carbon Dioxide) CO₂ and (Nitrogen Oxides) NO_x from a light vehicle. The transportation activity, represented by vehicular traffic, is one of the most responsible for the degradation of air quality. It is believed that the vehicular pollutant emissions are influenced by the interactions that take place in the urban environment, as well as by the implementation of alternatives for the transportation system, therefore interventions in the transportation system should be studied in a way that also considers the environmental character in its scope. To this end, this study proposes to collect data with on-board PEMS-type equipment. These collections were performed in pairs of streets, with and without the presence of an exclusive bus lane; with similarities in terms of road hierarchy, the number of bus lines, the number of traffic lanes, the land use pattern and the continuous traffic distance. We identified in the results that the emissions in the lane with exclusive bus lane and without exclusive bus lane were considerably different, up to 6% for CO₂ and 20% for NO_x, even though there was no great difference in the speeds of the two lanes. This fact can be explained by the interactions that occur between transport vehicles and light vehicles, not to the extent of affecting the speed, but affecting the air quality of the streets studied.

Keywords: Vehicle emissions. PEMS. Exclusive bus lanes. Urban environment.

1 INTRODUÇÃO

As emissões relacionadas aos poluentes provenientes da combustão interna em veículos tornaram-se objeto de estudo, não apenas devido a sua parcela de contribuição em problemas ambientais, climáticos, de qualidade do ar, mas, também, em questões relacionadas à saúde da população e à economia, efeitos secundários destes problemas. Ainda assim, esta continua sendo uma área promissora para novas pesquisas, principalmente, quando estas se referem ao meio urbano, onde há maior concentração populacional e conflitos entre os diversos atores envolvidos nas dinâmicas que ocorrem em uma cidade.

Quando voltados aos transportes, tais conflitos podem ser traduzidos como as diversas interações ocorridas em vias urbanas. Estas interações se tornam ainda mais acentuadas em cidades de países em desenvolvimento, onde há uma rápida taxa de motorização e um sistema de transporte público precário. Aliadas ao crescimento desordenado de algumas cidades e à falta de uma regulamentação ambiental adequada, estes fatores contribuem para a problemática das emissões de poluentes, uma vez que o transporte de passageiros individuais é responsável por emitir 40 vezes mais poluentes do que o transporte público na condução do mesmo número de pessoas (BRASIL, 2010).

Em São Paulo, por exemplo, estima-se que fontes móveis, como automóveis e ônibus, sejam responsáveis por 97% a 98% das emissões de CO e por 55% a 97% das emissões de NO_x (WHO, 2011). Já na Região Metropolitana de Fortaleza, somente no período compreendido entre abril/2018 e março/2019, houve mais de 40 mil internações pelo Sistema Único de Saúde relacionadas a problemas do sistema respiratório e do sistema circulatório, principais atingidos pela poluição atmosférica. Estas internações ocasionaram um custo total de aproximadamente 90 milhões de reais aos cofres públicos (BRASIL, 2019a), o que demanda ações para melhor compreender e mitigar essas emissões.

Sabe-se que a geração das emissões veiculares é um assunto complexo devido aos diversos fatores envolvidos no processo (ARIOTTI, 2010). Estes englobam desde características da fonte emissora, ao comportamento do condutor e aspectos da estrutura urbana, que correspondem ao conjunto formado por atributos de uso do solo, densidade do entorno, tipologia viária e fatores relacionados ao transporte público e demais transportes (KENWORTHY; NEWMAN; LYONS, 1992).

Fatores como a densidade, a diversidade do uso do solo, o desenho da rede viária e a acessibilidade ao transporte público, podem ajudar a explicar como a estrutura do ambiente urbano contribui para a emissão de poluentes veiculares (WU *et al.*, 2019). Adicionalmente, intervenções que influenciam o tráfego possuem um papel importante na geração de poluentes atmosféricos (ARIOTTI, 2010).

De uma maneira geral, o ciclo de condução é uma representação do comportamento do veículo perante o tráfego ao longo de um trajeto percorrido, geralmente é expresso em gráficos de velocidade *versus* tempo, e podem ser relacionados com a emissão de poluentes (KENWORTHY; NEWMAN; LYONS, 1992). Muitos estudos aplicam ferramentas de modelagem de forma a simular diferentes condições de tráfego na via para, então, utilizar estas condições como *inputs* em modelos de emissão de poluentes (BIGAZZI; ROULEAU, 2017). Estes modelos, no entanto, não conseguem capturar adequadamente a ampla variedade de fatores que afetam a condução de um motorista em condições reais de operação do veículo, que fazem uso de sistemas de medição portáteis (do inglês, PEMS, Portable emissions measurement system - PEMS), um instrumento para captar de forma precisa esses parâmetros.

No que tange às características da via, a organização do tráfego (misto ou separado fisicamente), a presença de interseções e dispositivos de controle viário (como semáforos) e a priorização do tráfego de acordo com a hierarquia das vias, entre outros, podem acarretar em diferentes condições para a operação dos veículos, afetando, conseqüentemente, as emissões de poluentes veiculares. De acordo com Shu *et al.* (2014), reestruturações em uma via podem alterar diversos aspectos que ocorrem nela, como padrões de atividade, uso por diferentes modos de transporte, níveis de poluentes oriundos do tráfego e exposição dos usuários da via a estes poluentes. Ademais, alterações de projeto podem reduzir a velocidade média dos veículos, a realocação do espaço da via, reservar faixas para ônibus e bicicletas, que acabam por restringir fisicamente o volume de tráfego (COLVILE *et al.*, 2001).

Sendo as faixas exclusivas de ônibus um dos elementos modificadores de vias urbanas já consolidadas, evidencia-se a importância de estudos voltados para os impactos de sua implantação. Motta, Ribeiro e Portugal (2007) realizaram um levantamento sobre trabalhos cujo objetivo era avaliar a qualidade do ar neste tipo de via. Os citados autores apontaram reduções dos níveis de poluentes em escala macro quando comparados os sistemas de BRT e ônibus no tráfego misto. Entretanto, tais

trabalhos tendem a levar em consideração apenas a concentração de poluentes no ar ao longo dos corredores de modo geral ou a emissão do ponto de vista do veículo de transporte público, traduzida em indicadores de melhoria na sua operação, como aumento da velocidade média, mas não consideram as emissões dos demais veículos que ali trafegam. Isso leva, à seguinte questão de pesquisa: De que forma a presença de faixas exclusivas de ônibus afeta a emissão de automóveis particulares trafegando em vias urbanas?

Assim, do ponto de vista da Engenharia de Transportes, justifica-se este trabalho através de contribuir para o planejamento do sistema de transportes no controle e até na diminuição das emissões de poluentes ocasionadas pelo setor, buscando relacionar parâmetros obtidos durante a operação dos veículos em condições reais e elementos da estrutura urbana que influenciam estas emissões. Desta forma, gestores podem se focar na implantação de alternativas que sejam ambientalmente sustentáveis.

Diante do exposto, o objetivo geral deste trabalho é verificar se existe influência de faixas exclusivas para transporte público nas emissões de (Dióxido de Carbono) CO₂ e (Óxidos de Nitrogênio) NO_x de um veículo leve.

Verificando estatisticamente as emissões de CO₂ e NO_x oriundas das emissões veiculares para as vias analisadas e a relação entre velocidade e emissão de poluentes nas vias analisadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Emissões veiculares

Em países industrializados, as emissões de poluentes se dão majoritariamente por fontes móveis, predominando a contribuição dos veículos com motor de combustão interna (VALLERO, 2008). Eles podem ser classificados como pesados, como ônibus e caminhões que utilizam o diesel como combustível, ou veículos leves com motor de ciclo Otto, que podem ser movidos a álcool ou gasolina (HEYWOOD, 1988).

Estes veículos têm diferentes funcionamentos e produzem diferentes tipos de emissões durante sua operação. De acordo com a European Environment Agency – EEA (2016), estas podem ser separadas em três grupos: i) emissões evaporativas;

ii) emissões de abrasão; e iii) emissões do escapamento, conforme apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Tipos de emissões veiculares e seus principais produtos



Fonte: Adaptado de EEA (2016)

Neste trabalho, foi dado foco às emissões do escapamento, que são aquelas produzidas através do processo de combustão e cujos gases e partículas são lançados à atmosfera através do sistema de descarga do veículo.

De acordo com a literatura, estas emissões podem ser influenciadas por diversos fatores, dentre eles: a idade e condição de manutenção do veículo, a tecnologia do motor, a composição e qualidade do combustível, a velocidade e carga do mesmo, bem como, as características do tráfego, e da via, o comportamento do usuário, entre outros (AZUAGA, 2000; CAPPIELLO, 2002; VALLERO, 2008). Variáveis diretamente vinculadas à tecnologia do veículo, como as características do motor, sua potência e combustível utilizado, são a base das emissões do escapamento (ZHOU; JIN; WANG, 2016).

Conforme já mencionado, motores de ciclo Otto e de ciclo Diesel possuem particularidades cada um e o tipo de combustível utilizado pode modificar substancialmente a formação das emissões liberadas durante a operação veicular. A combustão da gasolina, por exemplo, tende a produzir maiores níveis de poluentes como Dióxido de Carbono (CO₂), Monóxido de Carbono (CO) e Hidrocarbonetos (HC), enquanto o uso do diesel gera maiores níveis de Óxidos de Nitrogênio (NO_x) e Material Particulado (MP). Não obstante, a composição e qualidade de tais combustíveis também podem gerar variações quanto aos poluentes emitidos. No Brasil, a gasolina vendida em postos de abastecimento possui 27% de etanol na sua composição.

Policarpo *et al.* (2018) realizaram experimentos onde foram testadas três diferentes proporções de etanol/gasolina no combustível utilizado em um mesmo veículo trafegando em condições reais de tráfego, 27%, 85% e 100% de volume de etanol. As emissões relativas à proporção de 85% de etanol mostraram-se cerca de 100 vezes menores do que as relativas às outras duas proporções.

Aguiar *et al.* (2015) realizaram um estudo comparativo entre as emissões veiculares para diferentes condições de partida do motor em veículos utilizando combustíveis distintos. Pode-se observar que, para o caso de veículo utilizando gasolina, partidas a frio produziram níveis sessenta e cinco vezes maiores nas emissões de CO e seis vezes maiores para HC do que as emissões durante a condição de temperatura de motor já estabilizada. Os autores citam que para estes casos onde o motor está frio, verifica-se que a temperatura é a variável com maior influência no processo de produção de poluentes, entretanto, quando o motor já se encontra aquecido durante um ciclo de condução, outras variáveis tornam-se mais relevantes, como a velocidade do veículo e a inclinação da via.

A emissão de poluentes veiculares também depende diretamente das condições do tráfego, podendo variar substancialmente de uma localidade para outra (PATHAK *et al.*, 2016). Um indicador do efeito do tráfego no padrão destas emissões é o modo de operação do veículo, cujo conjunto de variações ao longo do tempo em um trajeto é conhecido como ciclo de condução. Estes ciclos são compostos por situações de aceleração, desaceleração, veículo parado (velocidade e aceleração nulas) e veículo em cruzeiro (velocidade constante, diferente de zero, e aceleração nula) e são apresentados como gráficos de velocidade pelo tempo.

A Figura 2 apresenta o ciclo de condução padronizado Federal Test Procedure 75 (FTP-75), produzido pelo o órgão ambiental federal americano US Environmental Protection Agency (EPA). No Brasil, este é o ciclo utilizado em ensaios utilizando dinamômetro de chassi que busca simular uma viagem média em área urbana para determinação das emissões de poluentes de veículos leves (BRASIL, 2009).

Figura 2 - Ensaio com base no ciclo de condução FTP-75



Fonte: Adaptado de EPA (2019) e ABNT (2001)

O ensaio compreende um ciclo inicial de 1369 segundos de duração, percorrendo uma distância de aproximadamente 12 km e velocidade média de 31,5 km/h, composto por uma fase com partida a frio e uma fase estabilizada, após a qual há um intervalo de 10 minutos onde o motor do veículo permanece desligado para, então, serem repetidos os primeiros 505 segundos do ensaio, desta vez, com partida a quente. Pathak *et al.* (2016), no entanto, afirmam que o ciclo teste FTP-75 não consegue cobrir mais do que 15% das condições de condução e comportamentos dos condutores em operações reais na via, fazendo com que tais métodos possuam baixa aderência com o fenômeno real.

2.2 Emissões veiculares em meio urbano

Em meio urbano, ciclos de condução tendem a apresentar grandes variações relativas ao modo de operação, sendo um dos motivos atribuído à densidade de tráfego na via. Aumentos nessa densidade são traduzidos em congestionamentos, onde há a ocorrência de maior frequência de aceleração e de eventos transitórios, sucessivas paradas e partidas, conhecidas como *stop-and-go*, que causam maiores gastos de combustível e emissões veiculares (CAPPIELLO, 2002). Estas condições de congestionamento acontecem pelo excesso de demanda

por transportes, principalmente devido à necessidade de deslocamento para trabalho, estudo ou atividades comerciais. Em momentos de maior saturação, as interações entre veículos e entre veículos e pedestres aumentam, reduzindo a velocidade média durante o percurso na via (CHOUDHARY; GOKHALE, 2016).

Azevedo *et al.* (2017) estudaram a relação direta entre o modo de operação de veículos flex-fuel e o padrão de emissões em meio urbano através de coletas com equipamentos embarcados. A área onde o estudo foi aplicado caracterizou-se por tráfego intenso, havendo grandes flutuações da velocidade do veículo e recorrência de eventos de parada e partida. Os autores concluíram que estes eventos de *stop-and-go* possuíram maior contribuição na emissão de CO₂, CO e NO_x.

Achour *et al.* (2011) realizaram um estudo comparando emissões reais obtidas em ciclos de condução obtidos por coletas em meio urbano e o ciclo de condução padronizado europeu, com emissões modeladas com auxílio do software COPERT, chegando a resultados de emissões modeladas superestimadas para o poluente CO e subestimadas para os NO_x.

Choudhary e Gokhale (2016) realizaram um estudo composto por medições em tempo real de velocidade, aceleração e emissão de poluentes do escapamento de diferentes veículos, entre eles, veículos de passeio, em uma via urbana de grande saturação de tráfego na Índia. As coletas ocorreram em períodos de maior e menor carregamento durante dias típicos, auferidos com o auxílio de videomonitoramento. Os autores encontraram que cerca de 50% a 60% das emissões ocorreram em picos acentuados de pequena duração indicando relação com eventos de aceleração brusca, tanto em baixa quanto em maior velocidade. Também, eventos de *stop-and-go* apresentaram os maiores índices de emissão para os poluentes CO, HC e NO_x.

Diversos estudos, também, têm sido realizados com relação ao gerenciamento de tráfego e comportamento de viagens de forma a contribuir para a mitigação dos impactos causados pelo setor de transportes na qualidade do ar. Segundo Cappiello (2002), o uso de dispositivos de controle de tráfego como semáforos localizados em interseções pode evitar a formação de congestionamentos, porém, a concentração da emissão de poluentes acaba por aumentar na proximidade destes locais.

Bigazzi e Rouleau (2017) realizaram uma revisão sistemática de literatura onde buscaram sumarizar evidências da efetividade de estratégias de gerenciamento de tráfego para mitigação das emissões de poluentes, concentração ambiente,

exposição humana e efeitos na saúde causados pela poluição urbana relacionada ao tráfego. Os autores afirmam que os efeitos destas estratégias nas emissões podem ser categorizados em dois itens: mudanças no total de quilômetros percorridos por veículo e taxas médias de emissões, onde o primeiro é afetado principalmente pela atividade de viagem e por mudanças na escolha modal, enquanto o segundo é afetado pelo tipo de veículo, tipo de combustível utilizado e por mudanças de velocidade características da dinâmica no trânsito. Assim, mudanças nas emissões gerais seriam o resultado desses dois itens. O estudo afirma que, apesar de uma grande quantidade de trabalhos revisados, as evidências quanto aos efeitos destas estratégias em relação à emissão de poluentes ainda foram limitadas, uma vez que a maioria dos estudos era focada em gases do efeito estufa e apoiavam-se em modelos de simulação, e não em dados coletados em ambiente real, devido à complexidade e altos custos envolvidos no processo. Há crítica, também, sobre a falta de avaliações comparativas de antes e depois da implantação da estratégia em ambiente real. Entre as estratégias investigadas, estão: alterações na capacidade da via; faixas de uso exclusivo para ônibus e/ou caminhões; dispositivos de controle de velocidade, dispositivos de controle em interseções, entre outros, enquanto planejamento de uso do solo, por exemplo, não foi abordado.

Por sua vez, Wu *et al.* (2019) avança na questão do meio urbano ligado às emissões, afirmando que diversos estudos têm investigado esta relação tanto de maneira agregada, na escala de setor censitário ou bairros/zonas, como desagregada, na escala de viagens individuais.

Zhang, Matsushima e Kobayashi (2018) analisaram o padrão espacial das emissões de CO₂ em relação ao tipo de uso do solo através de dados de viagens pessoais obtidas em uma pesquisa aplicada na cidade de Changzhou, na China, formando uma matriz Origem-Destino (O/D) para 65 zonas de análise de tráfego.

Com estes dados, o estudo utilizou modelagem computacional para simular o tráfego nas diferentes zonas e alocá-lo na malha viária, identificando o volume do tráfego em períodos de pico para cada link na via e incorporando um modelo de emissão de poluentes veiculares a estes links. Por fim, os dados de emissão de CO₂ foram obtidos para cada zona, analisando-se diversos indicadores relacionados ao uso do solo (taxa de área residencial, comercial, industrial e área verde), bem como métricas representativas do entorno, como fragmentação, forma, agregação, diversidade, etc.

Os resultados mostraram que as emissões ocorreram, em maior escala, em links nas proximidades do centro da cidade, zona com maiores taxas de uso comercial e residencial, e, em menor escala, em zonas suburbanas e rurais, o que indica, também, correlação entre a área construída e aumentos nos níveis de CO₂ oriundos dos veículos. Entretanto, o estudo discute que a origem destas emissões não está necessariamente localizada nesta zona, uma vez que uso do solo mais adensado e diverso exige menos viagens motorizadas em relação a áreas mais dispersas, com uso do solo uniforme.

Wu *et al.* (2019) empregaram um modelo GBDT (do inglês, gradient boosting decision tree) a dados de características do ambiente construído associados a dados de emissões de CO₂, que foram calculados a partir de viagens realizadas em seis bairros nas cidades vizinhas, Minneapolis e Saint Paul, nos Estados Unidos. Os autores utilizaram um aplicativo para smartphone para cada respondente e tipo de veículo utilizado no estudo. As características do ambiente construído investigadas, para um raio de meia milha do entorno da residência do respondente, foram: a quantidade de paradas de transporte público, a densidade populacional e de postos de trabalho, o número de interseções viárias e a entropia de uso do solo. Também foram coletadas as distâncias da residência do respondente para o centro de cada cidade e para a parada de transporte público mais próxima.

Dentre as emissões de CO₂, um total 97% foi atribuído a viagens realizadas por automóveis particulares. Os resultados do estudo apontam que a entropia de uso do solo no entorno, seguida pela densidade de postos de trabalho e distâncias para os centros das cidades foram as variáveis de maior potencial explicativo para estas taxas de emissão veicular, uma vez que regiões mais distantes ao centro, com menor diversidade de uso do solo, possuem menor potencial para a utilização de transporte não motorizado ou público nos deslocamentos diários (WU *et al.*, 2019).

2.3 Principais gases das emissões veiculares

Os poluentes atmosféricos originados a partir da operação veicular podem ser classificados como primários, emitidos diretamente da fonte, ou secundários, quando novos poluentes são formados a partir de reações químicas ocorridas entre os poluentes primários e outros gases encontrados na atmosfera. O tipo de poluente

emitido depende, entre outros fatores, do tipo de fonte energética utilizada. Entre as principais emissões de veículos com motores de ciclo Otto estão CO_2 , CO, NO_x e SO_2 .

Em termos de massa total emitida por poluente, o dióxido de carbono (CO_2) é aquele com maior representatividade entre os gases oriundos do setor de transportes. Ele, juntamente com vapor de água (H_2O), se forma quando ocorre a combustão completa da fonte de energia fóssil na presença de oxigênio em abundância (COLVILE *et al.*, 2001). Sua emissão veicular está diretamente relacionada com o consumo de combustível do veículo. Devido a ser um gás do efeito estufa, o CO_2 produz efeito nocivo ao meio ambiente quando há excesso de sua concentração na atmosfera, influenciando mudanças climáticas (EEA; 2016).

O monóxido de carbono (CO) é um dos produtos da combustão incompleta e sua emissão se dá principalmente em decorrência da proporção de ar e combustível no interior da câmara de combustão do veículo. Em uma mistura rica em gasolina, não há quantidade suficiente de oxigênio para oxidar todas as moléculas de carbono, gerando excesso de CO. Os picos de emissão deste poluente se dão, principalmente, na operação de aceleração dos veículos, ocorridas constantemente em interseções urbanas (ROSO, 2016; AZEVEDO *et al.*, 2017). Entre os efeitos da exposição deste poluente à saúde humana está a redução da habilidade do sistema circulatório em transportar oxigênio pelo sangue e agravamento de doenças cardiovasculares, bem como irritação nos olhos (AZUAGA, 2000; VALLERO, 2008; EEA, 2016).

A emissão dos óxidos de nitrogênio (NO_x) se dá, majoritariamente, devido aos processos de combustão nos quais as condições de pressão e alta temperatura do motor do veículo fazem com que moléculas de nitrogênio se combinem com o oxigênio presente na mistura combustível/ar (TSUNOKAWA; HOBAN, 1997; VALLERO, 2008). A maior parte dos componentes formados nestas condições é do gás incolor conhecido como óxido nítrico (NO), principalmente, quando os veículos alcançam maiores velocidades. Na atmosfera, o NO logo é convertido em NO_2 , um gás de coloração avermelhada, tóxico e bastante reativo. Ambos os gases têm papel importante na formação do ozônio troposférico e contribuem para o processo de acidificação de água e solo. Em relação à saúde humana, a exposição ao NO_2 aumenta a suscetibilidade a patologias respiratórias (EEA, 2016).

O SO_2 , por sua vez, é um poluente formado principalmente pela queima de fontes energéticas fósseis, quando o oxigênio reage com o enxofre presente na composição do combustível (TSUNOKAWA; HOBAN, 1997). A exposição ao SO_2

afeta o sistema respiratório, prejudicando o funcionamento dos pulmões e agravando casos de asma e bronquite. Também causa irritação nos olhos. Na atmosfera, o SO₂ interage com partículas de água, ocasionando chuvas ácidas, causando corrosão a materiais e danos à vegetação (SÃO PAULO, 2018).

2.4 Métodos de quantificação de emissões veiculares

Existem vários métodos que podem ser utilizados para a medição de poluentes emitidos por veículos motorizados, sendo divididos em duas categorias: métodos com condições controladas ou métodos com condições reais de operação.

Os métodos de medição com condições controladas são aqueles realizados em laboratório, nos quais há domínio sobre as variáveis que influenciam a operação do veículo, que facilitam a replicação dos resultados. Neste método, geralmente é utilizado um dinamômetro de chassi para simular a resistência exercida sobre as rodas do veículo encontrada em uma via. Durante o teste, o veículo permanece em estado estacionário, sendo operado para imitar um perfil de aceleração e velocidade pré-estabelecido aliado a um padrão de mudança de marchas, a isto se dá o nome de ciclo de condução. O fluxo de exaustão é continuamente monitorado e os gases do escapamento são coletados para análise. Também podem ser aplicados testes de bancada diretamente ao motor do veículo, como é o caso do um dinamômetro de motor (FRANCO *et al.*, 2013).

A maior crítica aos testes realizados através dos métodos de medição com condições controladas reside no fato de que eles não conseguem replicar as condições reais de emissão. Já os métodos de medição com condições de mundo real proporcionam dados mais valiosos em relação ao comportamento de emissão de poluentes, uma vez que estes são coletados fora dos limites de laboratórios, em vias. Estes métodos podem ser do tipo por sensoriamento remoto, *on-road* ou *on-board*.

No caso do método por sensoriamento remoto, equipamentos de infravermelho e ultravioleta são posicionados às margens da via de forma a coletar informações diretamente do escapamento dos veículos que ali trafegam. A vantagem deste método é a sua capacidade de monitorar uma ampla quantidade de veículos durante o tempo de coleta, tendo resolução suficiente para identificar níveis de emissões individuais. Entretanto, uma de suas desvantagens é que os motoristas, ao

perceberem a presença do equipamento, podem ser influenciados quanto ao seu comportamento de condução, afetando a emissão captada (FRANCO *et al.*, 2013).

Nas medições realizadas através da técnica *on-road* ou de perseguição, um veículo alvo é selecionado aleatoriamente durante sua operação na via e passa a ser seguido por outro veículo equipado com instrumentos de medição e monitoramento, como analisadores de gases, GPS e câmera de filmagem (de modo a captar a influência do tráfego). As vantagens deste método estão na sua capacidade de capturar as emissões veiculares em situações operacionais variadas e ampla gama de condições do ambiente. A principal desvantagem está no fator de segurança, uma vez que o veículo que está perseguindo o alvo deve estar próximo o suficiente para captar dados, tornando-se vulnerável quando há mudanças bruscas na operação (XIAO, DUI-JIA e JUN-MIN, 2012).

Por último, a técnica de medição *on-board* (ou embarcada) utiliza-se de sistemas de medidas portáteis de emissão chamados de PEMS (do inglês, “portable emissions measurement systems”) que são conectados diretamente ao veículo de modo a captar níveis de emissão instantâneos para cada poluente associados a parâmetros dinâmicos do veículo, como velocidade e temperatura do motor, posição do acelerador, entre outros (HOLMÉN; NIEMEIER, 1998; FRANCO *et al.*, 2013; CASSIANO, 2016).

Nos últimos anos, a utilização de PEMS tem obtido um maior destaque nos estudos de emissões veiculares em condições operacionais reais na vida, sendo uma alternativa de maior viabilidade quando comparada a técnicas de laboratório como dinamômetro de chassi (FREY; ZHANG; ROUPHAIL, 2008). Diversos trabalhos utilizaram PEMS, atestando a eficácia destes equipamentos (Holmén e Niemeier, 1998; Rolim *et al.*, 2014; Cassiano, 2016; Choudhary e Gokhale, 2016; Azevedo *et al.*, 2017; Gallus *et al.*, 2017; Quintanilha, 2017; Policarpo *et al.*, 2018).

Frey, Zhang e Roupail (2008) buscaram quantificar a variabilidade das emissões de diferentes veículos leves utilizando gasolina por rota, hora do dia e greide da via. Para isso, selecionaram dois pares O/D distintos e realizaram coletas utilizando PEMS em três rotas alternativas para cada um dos pares. Foi utilizado o teste ANOVA de forma a quantificar a relação entre as emissões dos poluentes HC, CO, CO₂ e NO e outros parâmetros coletados. Os autores identificaram que a velocidade, aceleração e inclinação da via foram os fatores mais importantes associados à variabilidade das emissões para um mesmo veículo. No comparativo das emissões por rota, as

diferenças foram investigadas baseadas sempre para o mesmo veículo, motorista e hora do dia. Devido às diferentes configurações das rotas (distância percorrida, distribuição de classificação viária por trechos, etc), às que apresentaram valores menores nas emissões totais não necessariamente foi a mesma com as menores taxas de emissão. Assim, o estudo encontrou que, para um determinado par O/D, a diferença percentual de emissão entre rotas varia de 14% a 41%, a depender do poluente. Os autores recomendaram que mais estudos focassem no comportamento do motorista e sua correlação com emissões de poluentes em condições reais de operação, indicando que a estimativa total de emissões em um local deve levar em consideração não somente a composição da frota, mas também a população de motoristas.

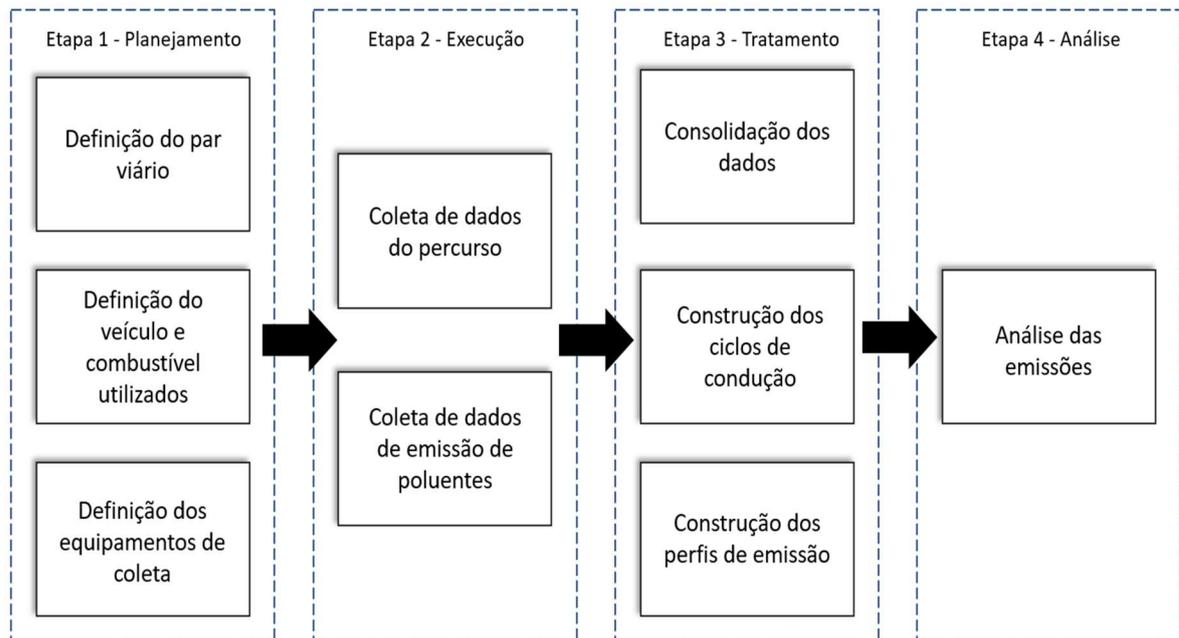
Na Alemanha, Gallus *et al.* (2017) realizaram coletas em veículos leves de passageiros utilizando PEMS de modo a investigar o impacto causado por diferentes estilos de condução e inclinações de vias em poluentes do escapamento veicular. Os autores utilizaram parâmetros coletados como aceleração positiva relativa e aceleração positiva média de forma a avaliar a contribuição dos estilos de condução divididos em “suave” e “regular” (lidos como comportamentos normais) ou “agressivo”. Os valores obtidos foram então comparados com aqueles do ciclo de condução de dinamômetro de chassis WLTC (do inglês, *world harmonized light-duty test cycle*). Já os parâmetros relativos à localização do veículo foram coletados por um GPS, com a inclinação da via obtida a partir do Google Mapas para segmentos de 100m, cada. As coletas foram realizadas por três motoristas que conduziram dois veículos distintos em um trajeto de 86 km composto por partes iguais de vias urbanas, rurais e autoestradas, em um ciclo de condução de aproximadamente 100 a 110 minutos. De forma a controlar eventos de tráfego, os trajetos ocorreram nas manhãs de dias úteis após períodos de pico. Os resultados obtidos neste estudo mostraram que os parâmetros de aceleração, principalmente os obtidos em condução suave e regular, representaram bem as viagens realizadas com PEMS em comparação ao ciclo WLTC. Isso corrobora com estudos que indicam que eventos atribuídos ao meio urbano, como acelerações mais bruscas e sucessivas paradas originadas pela dinâmica na via não são bem representadas em ciclos padronizados. Quanto aos poluentes, pôde-se perceber que o estilo de condução impactou fortemente as emissões de CO₂ e NO_x. Comparada ao estilo de condução normal (suave e regular), a direção agressiva causou aumentos de 20% a 40% na emissão de CO₂ e de 50% a 255% para o NO_x

dependendo do motorista e do veículo. Já em relação à inclinação da via, mudanças de 0% a 5% ocasionaram aumentos nas emissões de CO₂ em 81% dentro do perímetro urbano, uma vez considerado que a inclinação da via está diretamente relacionada à demanda de força no motor que, por sua vez, está atrelada ao consumo de combustível. Além disso, as variações positivas nas emissões de NO_x puderam ser melhor explicadas nos trechos de autoestrada e em superfícies mais planas devido à operação do veículo em maiores velocidades, o que aumenta a temperatura do motor e potencializa a formação destes poluentes.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

As etapas que compõem o método a ser utilizado nesta pesquisa estão esquematizadas na Figura 3. Este método é uma adaptação dos trabalhos de Cassiano et al. (2016), Azevedo et al. (2017) e Quintanilha (2017).

Figura 3 - Esquema do método de pesquisa



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Para realização do estudo, são confrontados dados de uso do solo e do entorno com parâmetros de emissão dos gases e parâmetros dinâmicos do veículo utilizado. Os dados de uso do solo foram obtidos através de base da Secretaria de

Finanças do município de Fortaleza/CE (SEFIN, 2015). Dados da dinâmica veicular e dos poluentes emitidos são obtidos através de PEMS.

Utilizou-se PEMS para coleta de dados das operações veiculares reais nas vias. Estes foram capturados de maneira instantânea para analisar o comportamento das emissões durante os trajetos e das interações do veículo com o tráfego local e o entorno.

3.1.1 Definição das vias de estudo

A coleta de dados do presente estudo se dá em vias urbanas localizadas na cidade de Fortaleza/CE. Pelas bases de dados oficiais da Prefeitura Municipal de Fortaleza e demais órgãos competentes, buscou-se identificar um par viário, compostos por corredores com e sem faixa exclusiva de ônibus, que tivessem similaridades quanto aos seguintes critérios: i) classificação funcional; ii) número de linhas de ônibus; iii) número de faixas trafegáveis; iv) percentual de uso do solo residencial; v) percentual de uso do solo comercial; vi) distância trafegável contínua. Para o primeiro critério, classificação funcional, utilizou-se a Lei de Uso e Ocupação do Solo de Fortaleza (LUOS) para identificar e agrupar vias de mesma categoria (FORTALEZA, 2017). Com este critério, analisou-se os indícios da influência da classificação funcional nas emissões veiculares tal como Zhang, Matsushima e Kobayashi (2018) fizeram para o caso de Changzou e Sun, Zhang e Shen (2018) fizeram para Xangai, ambas as cidades na China.

Através do segundo critério, número de linhas de ônibus, procurou-se parear as vias que tivessem operação similar do transporte público, diferenciando-se apenas pela segregação física entre modos imposta pela faixa exclusiva de ônibus em uma delas.

Para que as vias tivessem as mesmas características físicas dentro do par, buscou-se manter o mesmo número de faixas. Optou-se, também, por parear vias com a mesma extensão trafegável, eliminando aquelas que fossem inferiores a 1,0km para melhor adequabilidade à metodologia de obtenção de dados durante a condução do veículo, a ser descrita no item 3.2.

Para os próximos dois critérios, relativos ao padrão de uso do solo, o pareamento de vias foi realizado levando em consideração que estas tivessem percentual residencial e comercial similares entre si.

Segundo a LUOS, é de 50m a 250m a dimensão regulamentada da testada de loteamentos destinados à implantação de residências e de edificações para atividades comerciais que deem suporte a estas (FORTALEZA, 2017). Assim, de modo a padronizar a área de abrangência ao longo das vias para a determinação do percentual de uso residencial e comercial, utilizou-se um *buffer* de 100m a partir do eixo viário.

3.1.2 Definição do veículo e combustível utilizados

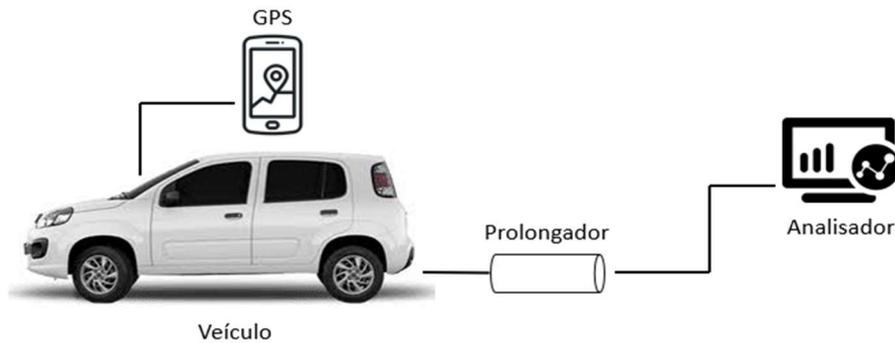
Todas as coletas foram realizadas com o mesmo automóvel e o mesmo tipo de combustível, eliminando-se variabilidades tecnológicas do veículo e da fonte de energia. O condutor, também, foi o mesmo, de forma a controlar variabilidades relacionadas ao comportamento de condução (HOLMÉN; NIEMEIER, 1998; ROLIM et al., 2014; ZHOU; JIN; WANG, 2016; ZHENG et al., 2017).

A escolha do veículo levou em consideração os registros do sistema do Departamento Estadual de Trânsito, DETRAN-CE referentes à frota cadastrada em 2019 (CEARÁ, 2019). Os dados de frota veicular foram agrupados pelas denominações “automóvel”, “camioneta” e “utilitário” por fazerem parte da mesma categoria da Carteira Nacional de Habilitação. Analisou-se os veículos cadastrados em Fortaleza por tecnologia do motor, e escolheu-se a categoria mais representativa da frota circulante na cidade. Para os veículos do tipo flex-fuel, o critério utilizado para decisão de qual combustível utilizar nas coletas, gasolina ou álcool, foi daquele com a maior proporção do mercado nacional, baseado em dados da Agência Nacional do Petróleo – ANP para venda de combustíveis nos últimos cinco anos (BRASIL, 2019d). Também, de forma a garantir menor variabilidade quanto à composição do combustível utilizado, definiu-se que o veículo deveria ser sempre abastecido no mesmo posto durante o período de coleta.

3.1.3 Definição do equipamento de medição das emissões veiculares

Durante as coletas, são capturados dados referentes a CO, CO₂, NO_x e SO₂. A Figura 4 a seguir apresenta um exemplo esquemático do PEMS utilizado, similar ao proposto por Cassiano *et al.* (2016) e, também, adaptado e utilizado por Azevedo *et al.* (2017) e Quintanilha (2017) em seus estudos.

Figura 4 – Esquema do equipamento de coleta de dados



Fonte: Adaptado de Cassiano *et al.* (2016), Azevedo *et al.* (2017) e Quintanilha (2017).

Um tubo prolongador é conectado ao escapamento do veículo de forma a direcionar as emissões produzidas para um tubo pitot, que fornece informações acerca do fluxo, velocidade e pressão do escapamento veicular; para um analisador de gases, que realiza a análise instantânea dos poluentes; e para um termopar, responsável por coletar dados da temperatura dos gases de exaustão. Estes aparelhos, por sua vez, são conectados a um computador portátil de forma a monitorar e gravar os dados, para, em seguida, processá-los.

Um smartphone com um aplicativo (OruxMAP) para sistema de posicionamento global (GPS) é embarcado ao veículo de forma a coletar informações sobre suas características dinâmicas (velocidade), bem como do trajeto percorrido (latitude, longitude e altitude), que possibilitou realizar a associação desses parâmetros com o perfil de emissão de poluentes.

A Figura 5 apresenta o equipamento real utilizado e sua montagem no veículo adotado para realização das coletas.

Figura 5 - Equipamento de coleta de dados



Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

3.2 Etapa 2 – Execução

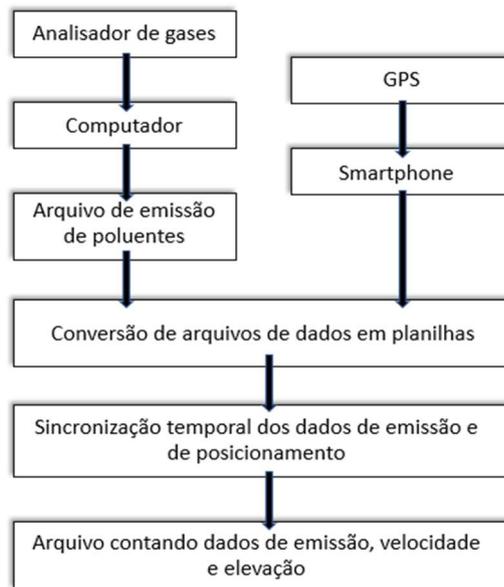
Uma vez definidos os locais onde o estudo foi realizado, o veículo e o combustível utilizados, bem como o equipamento adequado, a etapa seguinte correspondeu à execução da coleta de dados. O equipamento utilizado obteve os dados em tempo real com observações a cada um segundo, que compôs a base de dados para essa pesquisa. Definiu-se como critério realizar as passagens durante uma hora de pico, em cada via, dentro do período da noite. Entende-se que as vias possam apresentar padrões distintos de carregamento durante o dia, já que deslocamentos pendulares por motivo de trabalho e/ou estudo geralmente se dão no início da manhã e final da tarde/início da noite. Assim, as coletas nos pares viários aconteceram sempre na mesma faixa horária em cada turno.

De modo a garantir o seu correto funcionamento, o veículo passou por manutenção preventiva antes do início das coletas. Tal ação incluiu a troca de óleo do motor, a limpeza dos filtros, o alinhamento e a calibração dos pneus.

3.3 Etapa 3 – Tratamento

Após a coleta, foi realizado o processamento e montagem do banco de dados em planilhas eletrônicas, composto por todas as informações obtidas nas coletas. O método para elaboração destas planilhas foi adaptado da proposta de Choudhary e Gokhale (2016), que leva em consideração as leituras de tempo para sincronizar cada observação coletada. Um esquema deste processo é apresentado na Figura 6.

Figura 6 - Modelo conceitual da consolidação dos dados



Fonte: Adaptado de Choudhary e Gokhale (2016).

Nesta etapa, também são criados os ciclos de condução de cada trajeto através dos parâmetros de velocidade, aceleração e tempo obtidos, bem como os perfis de emissão de cada poluente e sua distribuição ao longo da via com o auxílio de ferramental de informação geográfica (QGis).

3.4 Etapa 4 – Análise

Por fim, a última etapa refere-se à análise dos dados. As emissões veiculares em cada uma das vias foram relacionadas ao ciclo de condução do trajeto, para identificar a influência de elementos do ambiente urbano construído existente no local e as alterações destas taxas. Os fatores considerados compreenderam: o percentual de uso do solo residencial, o percentual de uso do solo comercial, a presença de interseção semaforizada, a presença de parada de ônibus e a quantidade de vagas de estacionamento na via.

4 RESULTADOS

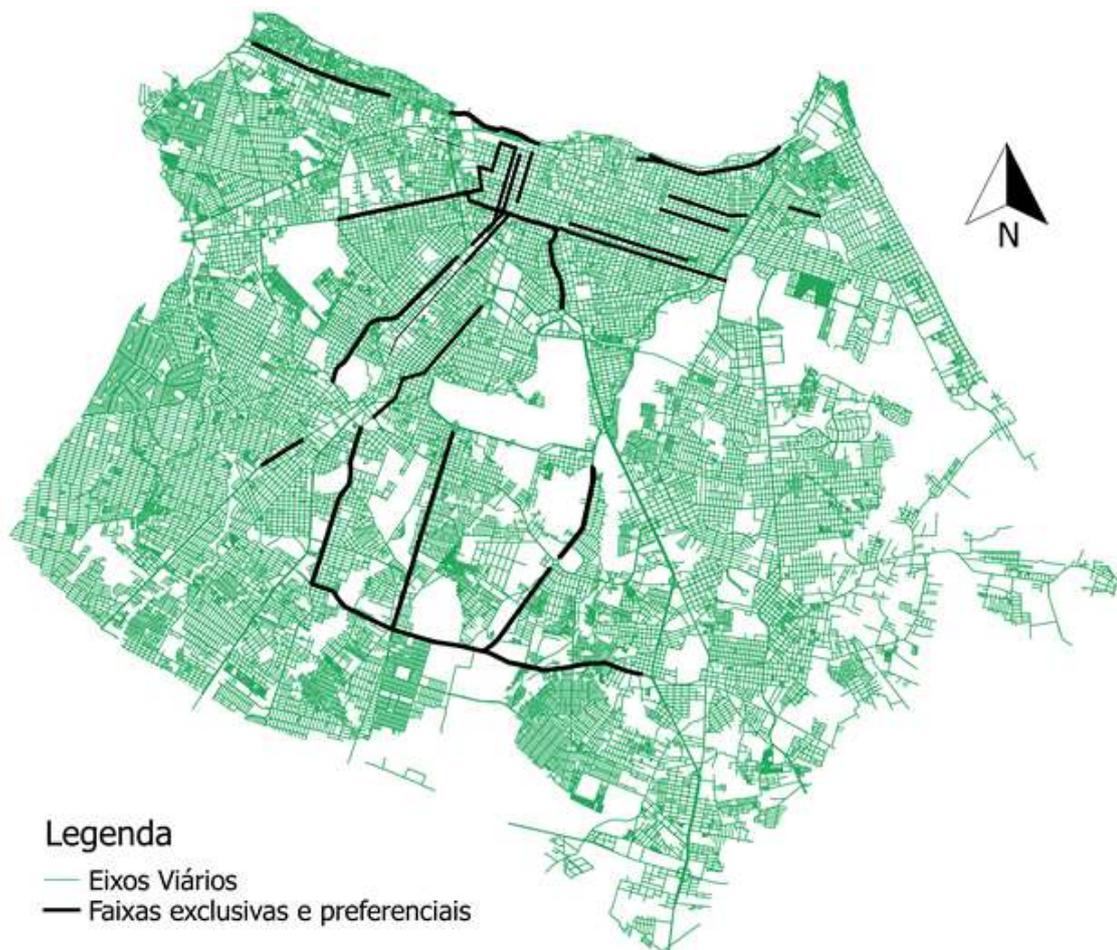
Nesta seção são apresentados os resultados obtidos a partir da aplicação do método de pesquisa, referentes à definição das vias de estudo, do veículo e do combustível utilizados (Etapa 1 – Planejamento) e às coletas realizadas (Etapa 2 –

Execução), além do tratamento e análise dos dados (Etapas 3 e 4 – Tratamento, Análise, respectivamente).

4.1 Vias de estudo

Em Fortaleza/CE, as vias que possuem faixa exclusiva de ônibus (Figura 8) são limitadas a pouco mais de 110 km de extensão e se enquadram nas classificações funcionais arterial I, Arterial II e Comercial (FORTALEZA, 2019).

Figura 7 - Distribuição de vias com faixa exclusiva para ônibus em Fortaleza/CE



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Aplicando-se os critérios apresentados no item 3.1.1, para seleção de vias, não foi possível identificar um par com classificação Arterial I para ser analisado,

entretanto, obteve-se apenas um par de vias de classificação Comercial e um par de vias com classificação Arterial II. Isso se dá uma vez que Zhang, Matsushima e Kobayashi (2018) encontraram em seu estudo que as tipologias de uso do solo são relevantes quando correlacionadas à emissão de poluentes veiculares. Assim, controlar variações destes percentuais dentro de um mesmo par de vias de estudo pode ajudar a controlar incertezas quanto aos resultados encontrados para os níveis de cada poluente. Para efeitos de um trabalho factível, em termos de tempo hábil para análise dos dados, foi utilizada para análise apenas as vias Arteriais II. Estas vias e suas características podem ser vistos na Tabela 1.

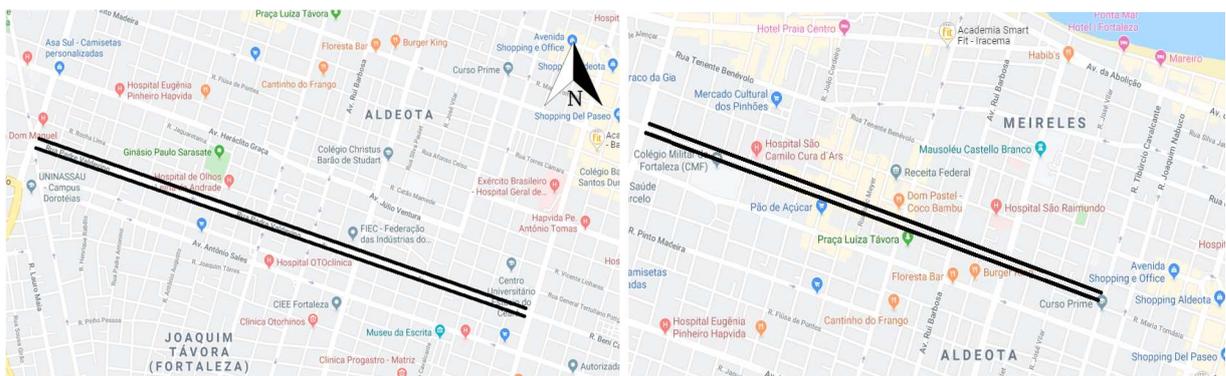
Tabela 1 - Definição do par de vias

Nome da Via	Presença de Faixa Exclusiva	Classific. Viária	Nº Linhas	Nº Faixas	Uso Comerc.	Uso Resid.	Dist. Trafegável Contínua
			(EXCETO CORUJÃO)		(%)	(%)	
Rua Pde. Valdevino	Sim	Arterial II	22	2	15.34%	70.56%	2,7 Km
Rua Costa Barros	Não	Arterial II	17	2	19.35%	62.59%	2,6 Km

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

O par Arterial II, Rua Padre Valdevino (Figura 9a) e Rua Costa Barros (Figura 9b), se encontram na Aldeota, região de grande geração de viagens e uma das mais importantes em relação ao potencial econômico da cidade. No entanto, percebeu-se que o uso predominante ao longo das duas vias é residencial.

Figura 8 - Vias selecionadas – Par Arterial II



a) Rua Padre Valdevino

b) Rua Costa Barros

Fonte: Google Maps (2020).

4.1.2 Veículo e combustível utilizados

Aplicando os critérios anteriormente estabelecidos, o automóvel escolhido para utilização no estudo foi do tipo flex-fuel. A justificativa desta escolha se dá pelo fato de que mais da metade dos veículos particulares registrados no Departamento Estadual de Trânsito na cidade de Fortaleza/CE são desta categoria (CEARÁ, 2019).

Com isso, foi selecionado um veículo do tipo hatch da marca FIAT, modelo Uno Vivace 1.0. Um resumo de suas especificações é apresentado na Tabela 2, enquanto a versão completa pode ser vista no Anexo I. Importante ressaltar que o veículo encontra-se em conformidade com a fase L-5 do PROCONVE, e não com a mais atual, L-6, uma vez que seu ano de fabricação é 2011.

Tabela 2 - Dados do veículo utilizado nas coletas



Especificações Uno Vivace 1.0	
Massa (kg)	895
Transmissão	Manual, 5 marchas + 1 ré
Tipo de combustível	<i>Flex (álcool/gasolina)</i>
Volume do Tanque (L)	48
Potência (à gasolina)	73 cv / 6.250 RPM
Consumo (km/Lgasolina)	15,6 (urb) / 20,1 (rod)
Quilometragem (km)	56,426

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

4.1.3 Coletas executadas

A campanha de coleta de dados ocorreu conforme apresentado na Tabela 3, abaixo.

Tabela 3 - Coletas realizadas

Dia do mês	Dia da semana	Turno	Rua Padre Valdevino	Rua Costa Barros
16/9/20	Quarta-feira	Manhã		
		Tarde		
		Noite		X
17/9/20	Quinta-feira	Manhã		
		Tarde		
		Noite	X	

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Estes dados foram tabulados e unificados conforme a Etapa 3, descrita na seção de materiais e métodos, para obtenção do banco de dados e para as análises conforme Etapa 4.

4.2 Comparação entre o perfil de emissões.

4.2.1 Costa Barros

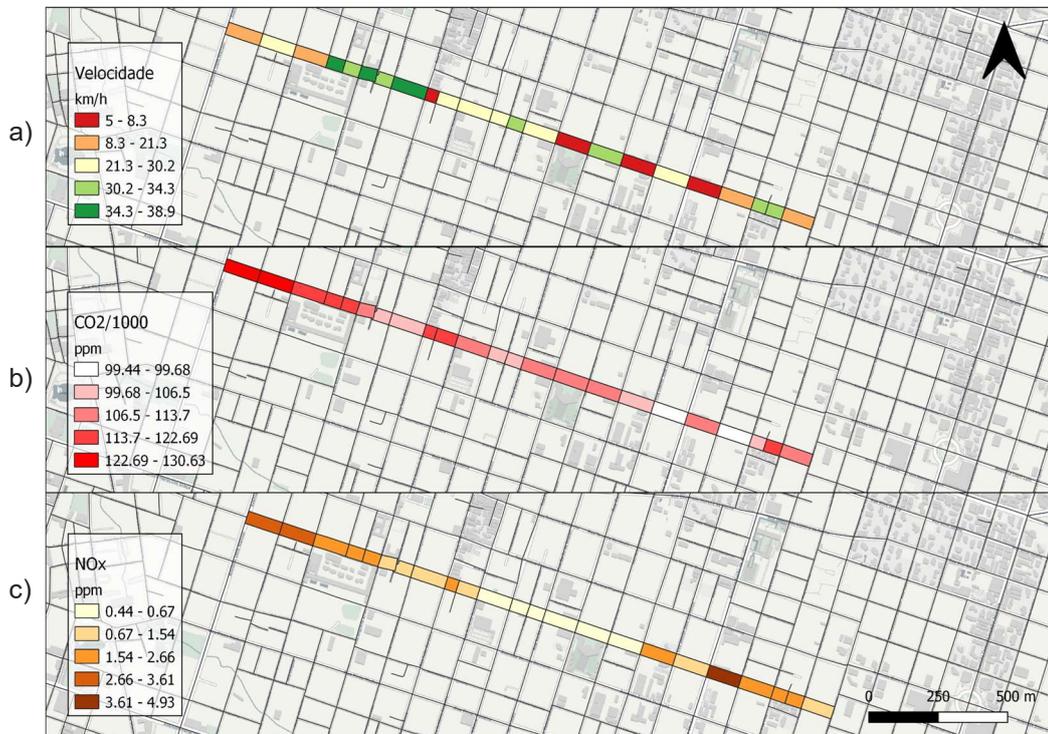
Na Tabela 4 são mostrados os valores das estatísticas descritivas que caracterizam as passagens realizadas na via sem faixa exclusiva. De acordo com Figura 9 é possível notar que a interferência na fluidez do tráfego ocorre principalmente nas extremidades do percurso, sobretudo, onde a velocidade é mais afetada e tal fato se reflete nas emissões de CO₂, mas principalmente no NO_x, poluente que é mais suscetível aos eventos que interferem na fluidez da corrente de tráfego.

Tabela 4 - Estatísticas referente a via sem faixa exclusiva.

Dados CB	Média	Mediana	Maior	Menor	Moda	Desvio padrão
Velocidade	17.25	17.25	57.9	0	0	15.6
CO ₂ ppm	108826.5	105000	147000	86000	100000	12072.1
NO _x ppm	2.0	1	20	0	1	3.2

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 9 - Perfil de emissões e velocidade na via sem faixa exclusiva.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

4.2.2 Padre Valdevino

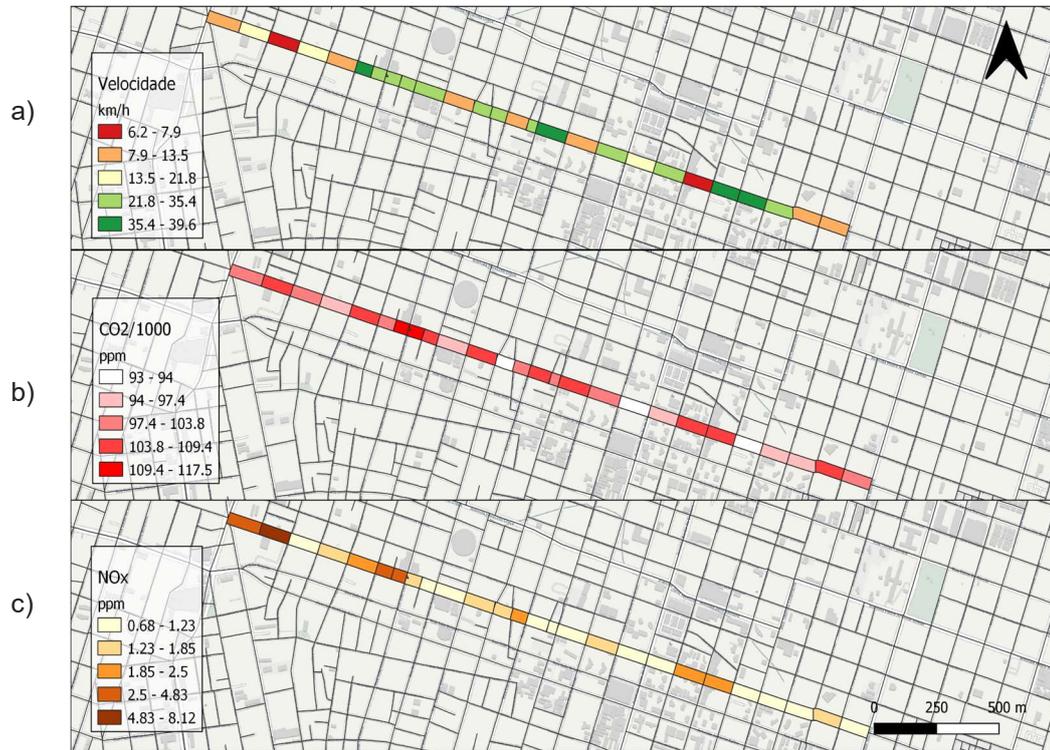
Na Tabela 5 são mostrados os valores das estatísticas descritivas que caracterizam as passagens realizadas na via com faixa exclusiva. De acordo com Figura 10 é possível notar que a dinâmica do veículo é menos constante. Assim, durante a passagem, os efeitos da presença da faixa exclusiva são perceptíveis nas emissões de poluentes, ao longo da via, devido a interferência na corrente de tráfego dos veículos motorizados individuais.

Tabela 5 - Estatísticas referente a via com faixa exclusiva

Dados PV	Média	Mediana	Maior	Menor	Moda	Desvio padrão
Velocidade	16.54	13.9	53.6	0	0.1	15.1
CO ₂ ppm	102583.0	97000	144000	78000	93000	12904.5
NO _x ppm	1.6	1	7	0	1	1.2

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 10 - Perfil de emissões e velocidade na via com faixa exclusiva.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

4.2.3 Costa Barros x Padre Valdevino

Teste de hipótese - Teste-t de Student

Adotou-se como hipótese nula a igualdade entre as médias nas emissões das duas vias e nível de confiança de 95%. A tabela 6 mostra, portanto, que não foram encontradas diferenças significativas que atestem o efeito da faixa exclusiva de transporte público na velocidade do veículo. Porém, obteve-se diferenças significativas nos padrões de emissão, isto sugere que a presença da faixa exclusiva altera a dinâmica dos veículos motorizados individuais que circulam na via Pe. Valdevino, que impacta nas emissões. A diferença da concentração média de poluentes coletados entre as vias é de, aproximadamente, 6% para o CO₂ e 20% para o NO_x, na via com faixa exclusiva, quando comparado com a via sem a faixa exclusiva.

Tabela 6 - Resultados do teste

Vias	n	CO ₂ ppm		NO _x ppm		Velocidade (KM/h)	
		Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.
		12072.051					
Costa Barros	876	108826	57	1.98	3.23	17.25	15.58
Pe. Valdevino	1150	102583	12904.46	1.59	1.2	16.54	15.11
Teste de hipóteses							
VT/TC fp	11.1917	REJEITA	3.4583	REJEITA	1.01982	ACEITA	1.9612

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As emissões na via com faixa exclusiva e sem faixa exclusiva de ônibus se mostraram consideravelmente diferentes mesmo que não tenha se observado grande diferença nas velocidades das duas vias. Isso se dá uma vez que interações com os veículos de transporte público podem ocasionar alterações na operação de veículos leves, conforme estudado por Hallmark, Guensler e Fomunung (2002). O teste de hipótese da diferença das médias bilaterais rejeitou a hipótese de igualdade para as emissões e aceitou para as velocidades, da mesma forma a comparação das diferenças percentuais médias de emissões das duas vias mostram grandes variações de tal forma que é possível ver uma diferença nas emissões entre esses tipos de vias.

Em suma, a quantidade amostral para esse trabalho foi um dos fatores limitantes, pois as conclusões levantadas não permitem uma robustez na afirmação ou até mesmo uma extrapolação dos resultados para vias similares, de tal forma que é recomendada uma coleta mais robusta em trabalhos futuros, adicionando outros sensores nos veículos.

Como proposta para trabalhos futuros, sugere-se efetuar o mesmo tipo de coleta nos veículos de transporte público a fim de se medir os efeitos das faixas exclusivas do transporte público nesse tipo de veículo.

REFERÊNCIAS

- ACHOUR, H.; CARTON, J.G.; OLABI, A.G.. Estimating vehicle emissions from road transport, case study: Dublin City. **Applied Energy**, [s.l.], v. 88, n. 5, p.1957-1964, maio 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.12.032>.
- AGUIAR, Suzana de Oliveira *et al.* Avaliação das emissões de escapamento veicular em condições específicas do motor: partida e marcha-lenta. **Transportes**, [s.l.], v. 23, n. 3, p.35-43, 23 dez. 2015. Lepidus Tecnologia. <http://dx.doi.org/10.14295/transportes.v23i3.896>.
- AHN, KyoungHo; RAKHA, Hesham. The effects of route choice decisions on vehicle energy consumption and emissions. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, [s.l.], v. 13, n. 3, p.151-167, maio 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2008.01.005>.
- ARIOTTI, P. **Método para aprimorar a estimativa de emissões veiculares em áreas urbanas através de modelagem híbrida em redes**. 2010. 172 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.
- AZEVEDO, Julie Anne Holanda *et al.* Influências dos modos de operação nas emissões de poluentes provenientes de veículos flex em região urbana. **Transportes**, [s.l.], v. 25, n. 2, p.91-100, 31 ago. 2017. Lepidus Tecnologia. <http://dx.doi.org/10.14295/transportes.v25i2.1304>.
- AZUAGA, Denise. **Danos ambientais causados por veículos leves no Brasil**. 2000. 193 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2000.
- BIGAZZI, Alexander York; ROULEAU, Mathieu. Can traffic management strategies improve urban air quality? A review of the evidence. **Journal Of Transport & Health**, [s.l.], v. 7, p.111-124, dez. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jth.2017.08.001>.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Setor de transporte é o que causa mais impactos na qualidade do ar**. 2010. Disponível em: <<https://www.mma.gov.br/informma/item/6191-setor-de-transporte-e-o-que-causa-mais-impactos-na-qualidade-do-ar>>. Acesso em: 10 nov. 2019.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução Nº 492, de 20 de Dezembro de 2018**. Brasília: Imprensa Nacional. Disponível em: <http://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/56643907>. Acesso em: 10 dez. 2019.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Ministério da Saúde. **DATASUS - Tecnologia da Informação a Serviço do SUS: Morbidade Hospitalar do SUS - Por Local de Internação - Ceará**. 2019a. Disponível em: <<http://tabnet.datasus.gov.br/cgi/tabcgi.exe?sih/cnv/nice.def>>. Acesso em: 05 maio 2019.

BRASIL. Departamento Nacional de Trânsito - DENATRAN. Ministério da Infraestrutura. **Frota de Veículos**. 2019b. Disponível em: <<https://www.denatran.gov.br/estatistica/237-frota-veiculos>>. Acesso em: 20 maio 2019.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. **População estimada**: Estimativas da população residente com data de referência 5 de dezembro de 2019. 2019c. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ce/fortaleza/panorama>>. Acesso em: 5 dezembro 2019.

BRASIL. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - ANP. **Vendas, pelas distribuidoras, dos derivados combustíveis de petróleo (metros cúbicos)** 2019d. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/dados-estatisticos>>. Acesso em: 20 maio 2019.

BRASIL. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – Ibama. Programa de controle de poluição do ar por veículos Automotores. **Manual PROCONVE/PROMOT**. Coleção Meio Ambiente. Série Diretrizes-Gestão n.3, IBAMA. 3.ed. Brasília, 2011.

CAPPIELLO, Alessandra. **Modeling Traffic Flow Emissions**. 2002. 157 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Science In Transportation, Department of Civil and Environmental Engineering, Massachusetts Institute Of Technology, Cambridge, 2002.

CASSIANO, D. R.; AZEVEDO, J. A. H.; DIAS, H. L. F. ; ARAUJO, R. S.; CAVALCANTE, F. S. A.; BERTONCINI, B. V. ; POLICARPO, N. A. ; OLIVEIRA, M. L. M. (2016) MAMUTE: Monitoring AutoMotive Unit Transit Emissions Development and Application for Flex-fuel and Diesel Vehicles. In: Markus Helfert, Oleg Gusikhin. (Org.). **International conference on vehicle technology and intelligent transport systems**, 2., 2016. Anais.... Portugal: SCITEPRESS Science and Technology Publications, Lda., v. 1, p. 237-244

CEARÁ. Departamento Estadual de Trânsito - DETRAN. Secretaria das Cidades. **Quantidade de veículo por município até março/2019**. 2019. Disponível em: <http://www.detran.ce.gov.br/wp-content/uploads/2019/03/Evolucao-da-frota-por-municipios_ate-Fevereiro.pdf>. Acesso em: 27 maio 2019.

CHOUDHARY, Arti; GOKHALE, Sharad. Urban real-world driving traffic emissions during interruption and congestion. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, [s.l.], v. 43, p.59-70, mar. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2015.12.006>.

COLVILE, R.N. *et al*. The transport sector as a source of air pollution. **Atmospheric Environment**, [s.l.], v. 35, n. 9, p.1537-1565, mar. 2001. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s1352-2310\(00\)00551-3](http://dx.doi.org/10.1016/s1352-2310(00)00551-3).

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY – EEA. **Explaining road transport emissions**: A non-technical guide. Copenhagen: EEA, 2016.

FORTALEZA (Município). Lei Complementar nº 236, de 11 de agosto de 2017. **Parcelamento, Uso e Ocupação do Solo**. Fortaleza, CE.

FORTALEZA. **Faixas Exclusivas de Ônibus**. Disponível em: <<https://mobilidade.fortaleza.ce.gov.br/menu-programas/faixa-exclusivas-de-%C3%B4nibus.html>>. Acesso em: 26 set. 2019.

FRANCO, Vicente *et al.* Road vehicle emission factors development: A review. **Atmospheric Environment**, [s.l.], v. 70, p.84-97, maio 2013. Elsevier BV. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2013.01.006.

FREY, H. Christopher; ZHANG, Kaishan; ROUPHAIL, Nagui M.. Fuel Use and Emissions Comparisons for Alternative Routes, Time of Day, Road Grade, and Vehicles Based on In-Use Measurements. **Environmental Science & Technology**, [s.l.], v. 42, n. 7, p.2483-2489, abr. 2008. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/es702493v>.

GALLUS, Jens *et al.* Impact of driving style and road grade on gaseous exhaust emissions of passenger vehicles measured by a Portable Emission Measurement System (PEMS). **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, [s.l.], v. 52, p.215-226, maio 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2017.03.011>.

HALLMARK, Shauna L; GUENSLER, Randall; FOMUNUNG, Ignatius. Characterizing on-road variables that affect passenger vehicle modal operation. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, [s.l.], v. 7, n. 2, p.81-98, mar. 2002. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s1361-9209\(01\)00012-8](http://dx.doi.org/10.1016/s1361-9209(01)00012-8).

HEYWOOD, John B.. **Internal Combustion Engine Fundamentals**. New York: Mcgraw-Hill, Inc., 1988.

HOLMÉN, Britt A.; NIEMEIER, Debbie A.. Characterizing the effects of driver variability on real-world vehicle emissions. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, [s.l.], v. 3, n. 2, p.117-128, mar. 1998. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s1361-9209\(97\)00032-1](http://dx.doi.org/10.1016/s1361-9209(97)00032-1).

HUANG, Yuhan *et al.* Fuel consumption and emissions performance under real driving: Comparison between hybrid and conventional vehicles. **Science Of The Total Environment**, [s.l.], v. 659, p.275-282, abr. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.349>.

KENWORTHY, J.R.; NEWMAN, P.W.G.; LYONS, T.J.. The ecology of urban driving I — methodology. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, [s.l.], v. 26, n. 3, p.263-272, maio 1992. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0965-8564\(92\)90036-7](http://dx.doi.org/10.1016/0965-8564(92)90036-7).

MOTTA, Renata Almeida; RIBEIRO, Suzana Kahn; PORTUGAL, Licinio da Silva. Análise crítica de corredores de ônibus sob o ponto de vista ambiental. **Revista dos Transportes Públicos**, São Paulo, v. 30, n. 116, p.43-54, dez. 2007.

PATHAK, Sunil Kumar *et al.* Real world vehicle emissions: Their correlation with driving parameters. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**,

[s.l.], v. 44, p.157-176, maio 2016. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2016.02.001>.

POLICARPO, N.A. *et al.* Emission estimates for an on-road flex-fuel vehicles operated by ethanol-gasoline blends in an urban region, Brazil. **Urban Climate**, [s.l.], v. 24, p.111-120, jun. 2018. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.uclim.2018.01.005>.

QUINTANILHA, Wendy Fernandes Lavigne. **Análise do consumo de combustível e emissão de poluentes de veículos flex fuel em diferentes tipos de via na cidade de Fortaleza - Ceará**. 2017. 101 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

ROLIM, Catarina C. *et al.* Impacts of On-board Devices and Training on Light Duty Vehicle Driving Behavior. **Procedia - Social And Behavioral Sciences**, [s.l.], v. 111, p.711-720, fev. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.01.105>.

ROSO, Vinícius Rückert. **Ciclos reais de condução veicular em Santa Maria e seus impactos em consumo e emissões**. 2016. 89 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

SÃO PAULO. CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Governo do Estado de São Paulo. **Qualidade do ar no estado de São Paulo 2017**. CETESB, 2018. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br>>. Acesso em: 07 de maio 2019.

SHU, Shi *et al.* Changes of street use and on-road air quality before and after complete street retrofit: An exploratory case study in Santa Monica, California. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, [s.l.], v. 32, p.387-396, out. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2014.08.024>.

SUN, Daniel; ZHANG, Kaisheng; SHEN, Suwan. Analyzing spatiotemporal traffic line source emissions based on massive didi online car-hailing service data. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, [s.l.], v. 62, p.699-714, jul. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2018.04.024>.

TSUNOKAWA, Koji; HOBAN, Christopher (Ed.). **Roads and the Environment: A Handbook**. Washington, D.c: The World Bank, 1997.

VALLERO, D. A. **Fundamentals of Air Pollution**. 4. Ed. San Diego: Elsevier Inc., 2008.

WHO, WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Urban Transport and Health, Module 5g: Sustainable transport - Sourcebook for policy makers in developing cities**. Geneva: GIZ and WHO, 2011.

WU, X. *et al.* Examining threshold effects of built environment elements on travel-related carbon-dioxide emissions. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, [s.l.], v. 75, p.1-12, out. 2019. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2019.08.018>.

XIAO, Zhang; DUI-JIA, Zhao; JUN-MIN, Shen. A Synthesis of Methodologies and Practices for Developing Driving Cycles. **Energy Procedia**, [s.l.], v. 16, p.1868-1873, 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2012.01.286>.

ZHANG, Runsen; MATSUSHIMA, Kakuya; KOBAYASHI, Kiyoshi. Can land use planning help mitigate transport-related carbon emissions? A case of Changzhou. **Land Use Policy**, [s.l.], v. 74, p.32-40, maio 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.04.025>.

ZHENG, Fangfang et al. Influence of driver characteristics on emissions and fuel consumption. **Transportation Research Procedia**, [s.l.], v. 27, p.624-631, 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trpro.2017.12.142>.

ZHOU, Min; JIN, Hui; WANG, Wenshuo. A review of vehicle fuel consumption models to evaluate eco-driving and eco-routing. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, [s.l.], v. 49, p.203-218, dez. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2016.09.008>.