



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES

VICTOR CARDOSO OLIVEIRA

**AVALIAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE AS CARACTERÍSTICAS DE SUPERFÍCIE DE
PAVIMENTOS E OS NÍVEIS DE EMISSÕES DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS**

FORTALEZA/CE

2021

VICTOR CARDOSO OLIVEIRA

AVALIAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE AS CARACTERÍSTICAS DA SUPERFÍCIE DE
PAVIMENTOS E OS NÍVEIS DE EMISSÕES DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS

Documento de Dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes. Área de concentração: Infraestrutura de Transportes.

Orientadora: Profa. Veronica Teixeira Franco Castelo Branco, Ph.D.

FORTALEZA/CE

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- O1a Oliveira, Victor Cardoso.
Avaliação da relação entre as características da superfície de pavimentos e os níveis de emissões de poluentes atmosféricos / Victor Cardoso Oliveira. – 2021.
91 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de PósGraduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2021.
Orientação: Profa. Dra. Verônica Teixeira Franco Castelo Branco.
1. Poluição atmosférica. 2. Emissões de poluentes veiculares. 3. Superfície de pavimento. 4. Coleta de emissões de escapamento. 5. IRI.

CDD 388

VICTOR CARDOSO OLIVEIRA

AVALIAÇÃO DA RELAÇÃO ENTRE AS CARACTERÍSTICAS DA SUPERFÍCIE DE
PAVIMENTOS E OS NÍVEIS DE EMISSÕES DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS

Documento de Dissertação apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes. Área de concentração: Infraestrutura de Transportes.

Aprovada em: 16 / 11 / 2021.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Verônica Teixeira Franco Castelo Branco, Ph.D. (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Bruno Vieira Bertoncini (Examinador Interno)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Ricardo Almeida de Melo (Examinador Externo)
Universidade Federal da Paraíba (UFPB)

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, criador de tudo, por me conceder forças para todos os momentos da minha vida.

Aos meus pais, Noel Cardoso Ferreira e Elisnete Fontenele Oliveira, e ao meu irmão, Vinicius Cardoso Oliveira, por serem essenciais na minha vida e pelo incentivo a quaisquer decisões que eu venha a tomar.

À minha namorada e, futura esposa, Poliana Carneiro Tavares, por me ajudar a suportar os momentos mais difíceis durante toda a caminhada acadêmica. Muito obrigado por estar sempre presente ao meu lado.

À minha orientadora, Verônica T. F. Castelo Branco, pela orientação e amizade, sempre buscando o melhor para mim, contribuindo para meu crescimento acadêmico e pessoal. Agraço a enorme paciência e gentileza nos diversos assuntos abordados durante essa etapa.

Ao professor Bruno V. Bertoncini, e aos colegas, Cassiano, Amanda e Jefferson, pela disposição e prontidão, sem os quais este trabalho teria maiores desafios.

A todos os professores, funcionários e colegas que fazem parte do DET/PETTRAN, em especial à Clélia, que me obrigava a fazer o “reverso” quando eu passava muito tempo sentado, e que juntamente com a Eliania, Maria e o Webert, protagonizaram o sucesso do meu vídeo na disciplina de metodologia científica.

À FUNCAP pela bolsa de mestrado concedida.

Aos participantes da banca examinadora, pelo interesse e disponibilidade.

*“A vida me ensinou a nunca desistir,
Nem ganhar, nem perder,
Mas procurar evoluir...”*

Dias de Luta, dias de glória.

Charlie Brown Jr.

RESUMO

O setor de transportes é um dos grandes responsáveis pelas emissões globais de poluentes atmosféricos. O modo rodoviário se destaca como principal emissor quando comparado aos outros modos de transportes. No Brasil, esse modo é predominante, tanto no deslocamento de pessoas quanto de cargas, e por isso é relevante a análise dos seus impactos nas emissões de poluentes atmosféricos. Os níveis de emissões veiculares são subestimados pelos relatórios de emissões e pelas simplificações dos modelos matemáticos de previsão apontados pela literatura. Múltiplos fatores podem alterar os níveis de emissão quando se avalia o veículo e a via. No veículo, a tecnologia do motor, o combustível utilizado e o modo de condução são os mais relevantes. Na via, destacam-se as características da superfície e a condição funcional (qualidade) do pavimento. A resistência ao rolamento do veículo, a interação pneu-pavimento, ocorre na camada de revestimento. Esta camada pode ser composta de revestimento flexível ou rígido, por exemplo. O objetivo do presente trabalho é analisar como as características da superfície da via influenciam nos níveis de emissões atmosféricas veiculares. Para isso, realizou-se a análise da irregularidade longitudinal da via através da obtenção do IRI por meio de *smartphone* e comparou-se com as emissões de CO₂, CO e NO_x coletadas com um equipamento acoplado no escapamento do veículo (*on-board*), em quatro vias com trânsito livre, com revestimentos asfáltico, de concreto de cimento Portland e com paralelepípedo. Os resultados sugerem que a irregularidade longitudinal não está correlacionada diretamente com os níveis de emissões de gases veiculares como apontado por alguns modelos matemáticos, contudo o tipo de revestimento pode alterar os níveis de emissão de NO_x. Constatou-se, também, que o veículo de testes utilizado no presente estudo não ultrapassou os limites estabelecidos pela norma brasileira, assim como esperado pelo isolamento do fator tráfego durante o levantamento dos dados. O método utilizado se mostrou satisfatório para determinação dos níveis de emissão avaliados.

Palavras-chave: Poluição atmosférica. Emissões de poluentes veiculares. Superfície de pavimento. Coleta de emissões de escapamento. IRI

ABSTRACT

The transport sector is one of the major contributors to global emissions of air pollutants. The road mode stands out as the main emitter when compared to other modes of transport. In Brazil, this mode is predominant, both in the displacement of people and cargo, and that is why the analysis of its impacts on air pollutant emissions is relevant. Vehicle emission levels are underestimated by emission reports and by simplifications of mathematical prediction models pointed out in the literature. Multiple factors can change emission levels when evaluating the vehicle and the road. In the vehicle, the engine technology, the fuel used, and the driving mode are the most relevant. On the road, the characteristics of the surface and the functional condition (quality) of the pavement stand out. The vehicle's rolling resistance, the tire-pavement interaction, takes place in the coating layer. This layer can be composed of flexible or rigid pavement, for example. The objective of the present work is to analyze how the characteristics of the road surface influence the levels of vehicular atmospheric emissions. For this, an analysis of the longitudinal irregularity of the road was performed by obtaining the IRI through a smartphone and compared with the CO₂, CO and NO_x emissions collected with an equipment coupled to the vehicle exhaust (on-board), on four lanes with free traffic, with asphalt pavement, Portland cement concrete and paving stone. The results suggest that the longitudinal irregularity is not directly correlated with the emission levels of vehicular gases as pointed out by some mathematical models, however the type of coating can change the NO_x emission levels. It was also found that the test vehicle used in this study did not exceed the limits established by the Brazilian standard, as expected by the isolation of the traffic factor in the data collection. The method used proved to be satisfactory for determining the emission levels evaluated.

Key words: Atmospheric Pollution. Vehicle gas emissions. Pavement surface. On-board monitoring. IRI

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Participação das emissões de poluentes veiculares por localização.....	17
Figura 2 – Níveis de irregularidade longitudinal dos pavimentos.....	23
Figura 3 – Classes de medições do IRI	24
Figura 4 – Informações obtidas pelos sensores do <i>smartphone</i>	25
Figura 5 – Ciclo de trabalho de um motor com ciclo Otto.....	27
Figura 6 – Emissão de CO, HC e NO _x em função do λ (coeficiente de ar).....	29
Figura 7 – Conversor catalítico	30
Figura 8 – Interface dos modelos de emissões em sistemas de transportes	32
Figura 9 – Esquema de montagem para equipamentos <i>on-board</i> em coleta de gases veiculares	35
Figura 10 – Evolução da frota de veículos circulante no estado de São Paulo separada por fases do PROCONVE.....	42
Figura 11 – Participação percentual de emissão em função da idade e fases do PROCONVE no estado de São Paulo.	43
Figura 12 – Etapas do Trabalho.....	45
Figura 13 – Idade média da frota circulante no Brasil em milhões de veículos.....	45
Figura 14 – Localização das vias analisadas	47
Figura 15 – Esquema de montagem do equipamento portátil de coleta de gases e do <i>smartphone</i> no veículo de teste.	48
Figura 16 – Interface do aplicativo GPS Logger.	49
Figura 17 – Interface do aplicativo <i>SmartIRI</i>	49
Figura 18 – Fluxo de obtenção dos dados a serem analisados	50
Figura 19 – <i>Boxplot</i> : Velocidade Média (km/h)	53
Figura 20 – Histograma: Velocidade Média (km/h)	54
Figura 21 – <i>Boxplot</i> : IRI (m/km).....	55
Figura 22 – Histograma: IRI (m/km).....	57
Figura 23 – <i>Boxplot</i> : Emissões de CO ₂ , CO e NO _x (g/s).....	59
Figura 24 – Emissões médias por trecho: CO ₂ , CO e NO _x (g/s).....	61
Figura 25 – Dispersão dos dados: IRI vs CO ₂ , CO e NO _x	63
Figura 26 – <i>Boxplot</i> : Velocidade Média (km/h)	66
Figura 27 – Histograma: Velocidade Média (km/h)	67

Figura 28 – Boxplot: IRI (m/km)	69
Figura 29 – Histograma: IRI (m/km).....	70
Figura 30 – <i>Boxplot</i> : Emissões de CO ₂ , CO e NO _x (g/s).....	72
Figura 31 – Emissão de CO ₂ no tempo.....	73
Figura 32 – Emissão de CO no tempo	74
Figura 33 – Emissão de NO _x no tempo	74
Figura 34 – Emissão média por trecho: Rod. 4º Anel Viário (C01, C02 e C03).....	76
Figura 35 – Emissão média por trecho: BR 020 (A01, A02 e A03).....	77
Figura 36 – Dispersão:IRI vs Emissões	79
Figura 37 – Níveis de emissões médias (g/km) por amostra.....	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Frota total de veículos por região – 2000 a 2020.....	22
Tabela 2 – Estratégia de implantação do PROCONVE para veículos leves	38
Tabela 3 – Síntese dos requisitos das fases L5 e L6 do PROCONVE	40
Tabela 4 – Limites de emissão de poluentes por categoria de veículos - PROCONVE L7	40
Tabela 5 – Dados técnicos do veículo de teste	46
Tabela 6 – Classificação da qualidade da Rodovia através do IRI	51
Tabela 7 – Atributos das vias levantadas	52
Tabela 8 – Média e desvio padrão: Velocidade média (km/h).....	53
Tabela 9 – Teste de normalidade Shapiro-Wilk: Velocidade Média (km/h).....	55
Tabela 10 – Dados estatísticos descritivos: IRI (m/km)	56
Tabela 11 – Teste de normalidade Shapiro-Wilk: IRI (m/km).....	58
Tabela 12 – Teste não-paramétrico de Kruskal-Wallis: IRI (m/km).....	58
Tabela 13 – Dados estatísticos descritivos: Emissões de CO ₂ , CO e NO _x	60
Tabela 14 – Teste de normalidade Shapiro-Wilk: Emissões de CO ₂ , CO e NO _x	62
Tabela 15 – Teste não-paramétrico de Kruskal-Wallis: Emissões de CO ₂ , CO e NO _x	62
Tabela 16 – Correlação de Spearman (ρ): IRI vs CO ₂ , CO e NO _x	64
Tabela 17 – Atributos das vias levantadas	65
Tabela 18 – Dados estatísticos descritivos: Velocidade Média (km/h).....	65
Tabela 19 – Teste de hipóteses: Velocidade Média (km/h).....	68
Tabela 20 – Dados estatísticos descritivos: IRI (m/km)	68
Tabela 21 – Teste de comparação de amostras: IRI.....	71
Tabela 22 – Média e desvio padrão dos gases	73
Tabela 23 – Teste de comparação de amostras: CO ₂ , CO e NO _x	75
Tabela 24 – Análise de correlação (R): IRI vs Emissões.....	79
Tabela 25 – Níveis médios de emissão por quilômetro	81

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
A/C	Ar-Combustível
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
Ce	Cério
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
EUA	Estados Unidos da América
FHWA	<i>Federal Highway Administration</i>
FTP	<i>Federal Test Procedure</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICPF	Índice de Condição do Pavimento Flexível
IES	Índice de Estado da Superfície
IGGE	Índice de Gravidade Global Expedito
IRI	<i>International Roughness Index</i>
GEE	Gases do Efeito Estufa
GPS	<i>Global Positioning System</i>
HC	Hidrocarbonetos
HCNM	Hidrocarbonetos Não-Metano
HDM	<i>Highway Development and Maintenance</i>
LVC	Levantamento Visual Contínuo
MP	Material Particulado
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
NMHC	<i>Non-Methane Hydrocarbon</i>
NO _x	Óxidos de Nitrogênio
OBD	<i>On-Board Diagnostic</i>
PBT	Peso Bruto Total
PEMS	<i>Portable Emission Measurement System</i>

PROCONVE	Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores
RMF	Região Metropolitana de Fortaleza
RMS	<i>Root Mean Square</i>
SHED	<i>Sealed Housing for Evaporative Determination</i>
SO ₂	Dióxido de Enxofre
VSA	Valor de Serventia Atual

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	16
1.1.	Contextualização.....	16
1.2.	Problema de pesquisa	18
1.3.	Questões de pesquisa	18
1.4.	Justificativa	19
1.5.	Objetivo geral.....	19
1.5.1.	Objetivos específicos	19
1.6.	Estrutura do trabalho	20
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1.	O modo rodoviário.....	21
2.2.	Avaliação funcional dos pavimentos	22
2.2.1.	Avaliação funcional com o uso de smartphones.....	25
2.3.	Dinâmica de combustão nos motores de veículos do ciclo Otto.....	26
2.3.1.	Princípios da combustão em motores ciclo Otto	27
2.3.2.	Emissão de gases de escape.....	28
2.3.2.1.	<i>Emissão de CO</i>	30
2.3.2.2.	<i>Emissão de HC</i>	31
2.3.2.3.	<i>Emissão de NO_x</i>	31
2.4.	Modelos de previsão de emissões.....	31
2.5.	Métodos de coleta de emissões de gases veiculares	34
2.6.	A superfície das vias e seus impactos no consumo e nas emissões veiculares.	36
2.7.	Legislação referente as emissões atmosféricas veiculares	38
2.7.1.	Relatórios de emissões de gases por fontes móveis	41
2.7.2.	As políticas mitigadoras da poluição atmosférica nos maiores centros urbanos mundiais.....	43

3.	MATERIAIS E MÉTODOS	45
3.1.	Veículo utilizado	45
3.2.	Trecho das vias analisadas	46
3.3.	Equipamentos utilizados	47
3.4.	Processamento e análise dos dados obtidos	50
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	52
4.1.	Levantamentos de campo: 1ª Etapa	52
4.1.1.	Velocidade média percorrida	52
4.1.2.	A irregularidade longitudinal das vias	55
4.1.3.	As emissões de CO ₂ , CO e NO _x	58
4.1.4.	Correlação entre as variáveis: IRI vs emissões de CO ₂ , CO e NO _x	63
4.2.	Levantamentos de campo: 2ª Etapa	64
4.2.1.	Velocidade média percorrida	65
4.2.2.	A irregularidade longitudinal das vias	68
4.2.3.	Emissões de CO ₂ , CO e NO _x	71
4.2.3.1.	<i>Emissão no tempo</i>	71
4.2.3.2.	<i>Emissão no espaço</i>	75
4.2.4.	Correlação entre as variáveis: IRI vs emissões de CO ₂ , CO e NO _x	78
4.2.5.	As características superficiais das vias versus níveis de emissão.....	80
5.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	82
5.1.	Conclusões	82
5.2.	Sugestões para trabalhos futuros	83
	REFERÊNCIAS	84

1. INTRODUÇÃO

Este Capítulo apresenta o escopo do trabalho, bem como a importância e os impactos das emissões atmosféricas oriundas do setor de transportes. Inicialmente, contextualiza-se o assunto, esboça-se o problema, as questões de pesquisa e a justificativa para execução do trabalho. Por fim, são apresentados os objetivos da pesquisa e a estrutura da dissertação.

1.1. Contextualização

É inegável a importância socioeconômica do sistema de transportes de um país, entretanto, este é um dos grandes responsáveis pela emissão de poluentes no planeta. Nas últimas décadas, houve crescimento nos índices de emissão de Gases do Efeito Estufa (GEE). O setor de transportes contribuiu com um quarto das emissões globais de dióxido de carbono (CO₂) (Nicolau; Chaves; Zanchetta, 2018). Entre 1990 e 2019, as emissões globais de CO₂ cresceram 63,9%, no setor de transportes o crescimento foi de 78,4% (IEA, 2020). Em 2019, esse setor, respondeu por 24,5% das emissões totais de CO₂ no planeta e o modo rodoviário foi responsável por três quartos dessa emissão (IEA, 2020).

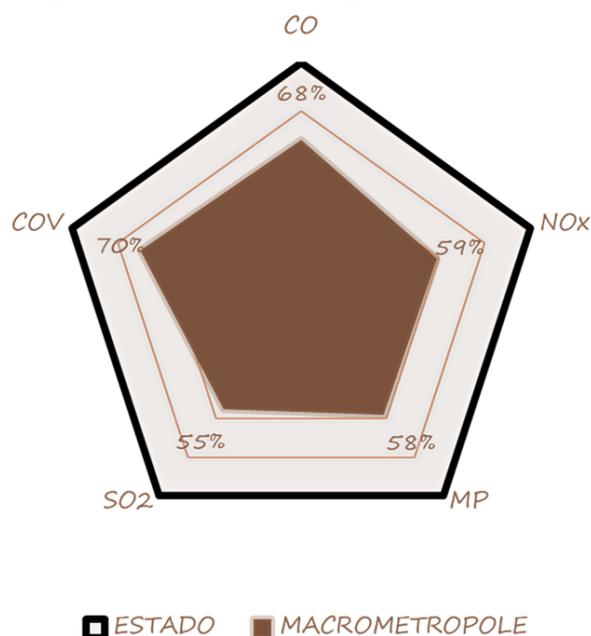
No Brasil, a contribuição do setor de transportes na emissão de gases é mais significativa em relação à média global, pois é responsável por 49,4% das emissões de CO₂ do país, sendo que, 90% foram oriundos do modo rodoviário (OBSERVATÓRIO DO CLIMA, 2017; IEA, 2020). Este cenário pode ser explicado pela dependência deste modo de transportes específico no país. As rodovias são responsáveis por 95% do transporte de passageiros no Brasil, em contraste com 21% na China e 39% na Índia, que são países similares ao Brasil em termos de economia e extensão territorial (Raiser *et al.*, 2017). Assim, este modo merece uma maior atenção em relação aos seus impactos nas emissões de poluentes atmosféricos.

O aspecto local tem influência relevante nos níveis de poluição do ar, pois em zonas urbanas, as barreiras físicas, como as edificações, reduzem a velocidade dos ventos e, conseqüentemente, a dispersão dos gases é também reduzida (Louka *et al.*, 1998). Apesar das árvores também serem uma barreira física, elas podem atuar como sumidouros de partículas de vários tamanhos (Beckett *et al.*, 2000). Outro fenômeno inerente às áreas urbanas que elevam os níveis de emissão são as paradas e retomadas do veículo (do inglês, *stop and go*), durante o deslocamento, derivadas das condições de tráfego das cidades. Esse evento ocorre devido à redução da entrada de ar na câmara de combustão, ou seja, combustão incompleta e, assim,

aumenta-se o consumo de combustível e as taxas de emissão de gases veiculares (Azevedo *et al.*, 2017).

A Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) divulga anualmente o relatório de emissões veiculares do Estado que exibe estimativas de emissão de poluentes por veículos rodoviários na região. Em 2018, estima-se que 315 mil toneladas de Monóxido de Carbono (CO), 65 mil toneladas de Hidrocarbonetos Não-Metano (HCNM), 148 mil toneladas de Óxidos de Nitrogênio (NOx), 3,9 mil toneladas de Material Particulado (MP), 4,4 mil toneladas de Dióxido de Enxofre (SO₂) e 1,7 mil toneladas de aldeídos foram emitidas por veículos no Estado. Em média, 60% dessas emissões foram concentradas na Macrometrópole Paulista como mostra a Figura 1 (CETESB, 2019).

Figura 1 – Participação das emissões de poluentes veiculares por localização



Fonte: Adaptado de CETESB (2019)

As estimativas de emissão de poluentes, provavelmente, são subestimadas, pois diversos aspectos contribuem para potencializar a emissão de poluentes veiculares. Segundo Fontaras, Zacharof e Ciuffo (2017), além do modo de condução do motorista, as características do veículo, da via e do local influenciam nos nível de emissões: (i) nos veículos: a eficiência do motor, o peso, os componentes eletrônicos, a qualidade e a pressão dos pneus; (ii) na infraestrutura da via: os defeitos funcionais (buracos, panelas, trincas) e a característica da superfície de rolamento; (iii) na geometria da via: declividades, números de faixas de rolamento, presença de faixas exclusivas de ônibus, ciclofaixas, interseções; e (iv) uso do solo: áreas comerciais, residenciais, e outras.

1.2. Problema de pesquisa

A tecnologia dos motores dos veículos tem relação com o seu nível de emissão de gases. Apesar de existir uma tendência de uma maior rigidez da legislação brasileira (CONAMA, 2018b), com relação à emissão de poluentes gerada por veículos novos, esta certificação é realizada em condições de laboratório, e, isto pode destoar da realidade, considerando as condições funcionais dos pavimentos, por exemplo (Fontaras, Zacharf e Ciuffo, 2017).

A interação pneu-pavimento impacta nas trocas mecânicas e térmicas entre o veículo e a via e afeta a resistência ao rolamento do veículo. As características superficiais da camada de revestimento dos pavimentos podem contribuir para redução dessas emissões a curto prazo. Alguns autores divergem sobre qual o tipo de pavimento é mais eficiente em termos de consumo de combustível e emissão de gases. A EAPA (2004) afirma que o consumo de combustível é maior em vias de revestimento de concreto, porém Sumitsawan (2011) afirma que os pavimentos de concreto contribuem para a redução na emissão de CO₂.

Em relação a influência da qualidade funcional dos revestimentos, pesquisadores afirmam que a irregularidade longitudinal impacta nos níveis de emissão de gases veiculares, porém utilizam modelos da literatura que podem não reproduzir adequadamente a realidade do local de estudo (Franco *et al.*, 2013). Portanto, faz-se necessário realizar uma análise de campo dos impactos das características dos revestimentos na emissão de gases veiculares. A investigação auxiliará na tomada de decisão sobre a escolha do revestimento mais adequado àquela realidade local do ponto de vista de emissões veiculares.

1.3. Questões de pesquisa

- a. As características superficiais dos revestimentos utilizados nas vias influenciam nos níveis de emissões veiculares?
- b. Quais os impactos da irregularidade longitudinal dos revestimentos na emissão de poluentes veiculares?
- c. Os níveis de emissão possuem um padrão na distribuição dos dados entre os levantamentos realizados em uma mesma via?
- d. Quais são as divergências existentes nos resultados práticos de emissões de poluentes frente aos normatizados para os veículos?

1.4. Justificativa

Para avaliar os encargos ambientais de uma via, faz-se necessário realizar uma análise de ciclo de vida, isto inclui a avaliação do material, produção, construção, uso, manutenção, reabilitação e fim de vida (Wang *et al.*, 2012). A fase de uso é uma etapa significativa na análise de ciclo de vida de uma via (Santero *et al.*, 2011). Zhang *et al.* (2010) avaliaram o efeito da irregularidade longitudinal no consumo de combustíveis de caminhões pesados durante a fase de uso, usando um método linear simples e, obtiveram um aumento no consumo de 53,5 L/100 km para 56,0 L/100 km, com alteração do IRI (do inglês, *International Roughness Index*) de 1,2 m/km para 2,4 m/km.

Azevedo (2019b) utilizou o IRI para estimar as emissões de um veículo leve através da avaliação do consumo de combustível utilizando o modelo do HDM-4 (do inglês, *Highway Development & Management*). Chatti e Zaaber (2012) concluíram que o modelo HDM-4 subestima os efeitos da superfície da via em relação ao consumo de combustível e os níveis de emissões. Azevedo (2019b) reconhece as limitações do modelo e recomenda a análise de emissões com o uso de equipamentos acoplados no escapamento dos veículos. De acordo com Fontaras, Zacharof e Ciuffo (2017), a diferença entre a emissão de poluentes e o consumo de combustível, avaliadas em laboratório e estimada pelos modelos, com relação a emissão real, pode chegar a 50%.

1.5. Objetivo geral

Analisar se as características superficiais das vias influenciam no nível de emissões de gases veiculares oriundos de veículo leve de passeio *flex fuel*.

1.5.1. Objetivos específicos

- a. Avaliar se a irregularidade longitudinal dos revestimentos possui correlação com o nível de emissão de poluentes veiculares;
- b. Verificar se o tipo de material utilizado na camada de revestimento do pavimento influencia no nível de emissão de poluentes veiculares;
- c. Analisar se os níveis de emissões possuem um padrão de emissão temporal e espacial;
- d. Comparar se os resultados de emissão coletados em campo com os limites estabelecidos pelas normas.

1.6. Estrutura do trabalho

Além deste Capítulo 1 introdutório, este trabalho é composto por mais quatro Capítulos, descritos a seguir.

O Capítulo 2 contém a revisão bibliográfica realizada a partir da leitura crítica de artigos, teses e dissertações sobre a emissão de poluentes atmosféricos de origem veicular e sua relação com as características das vias. Inicialmente será apresentado a importância do modo rodoviário para o Brasil e o crescimento da frota nas últimas décadas. Em seguida, será definido e explanado sobre como é realizada a avaliação funcional das vias e discutido a utilização do *smartphone* para este fim. Posteriormente, será explicado como acontece a dinâmica de funcionamento dos motores veiculares e os principais gases gerados pela combustão. Depois se discute sobre as premissas e limitações dos modelos de previsões de emissões veiculares. Em seguida, será apresentado o estado da arte dos métodos de levantamento dos níveis de emissões de gases veiculares e discutidas suas principais premissas e limitações. O impacto das características superficiais das vias nos níveis de emissões de gases será discutido adiante. Por fim, será apresentada as principais normas brasileiras referentes aos limites de emissões de gases veiculares, os relatórios diagnósticos sobre as emissões veiculares e as políticas mitigadoras utilizadas nos grandes centros urbanos.

O Capítulo 3 descreve os materiais e métodos utilizados neste trabalho, o veículo de teste, os trechos analisados, os equipamentos utilizados e a análise dos dados de emissão de poluentes e da irregularidade longitudinal dos pavimentos obtidos no levantamento.

O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos nos levantamentos realizados em campo. Inicialmente serão apresentados os resultados da 1ª Etapa de levantamentos. Exibe-se os resultados das variáveis Velocidade Média (km/h), IRI (m/km) e Emissões de CO₂, CO e NO_x (g/s). Em seguida, mostram-se os resultados da análise de correlação entre o IRI e as Emissões. Em seguida serão apresentados os resultados da 2ª Etapa de levantamentos, posteriores a validação das premissas. Exibem-se os resultados de Velocidade Média, IRI e Emissões, desta etapa. Em seguida, os níveis de emissão serão apresentados no tempo e no espaço, neste último agrupando por trechos. Por fim, apresenta-se a análise de correlação entre o IRI e as Emissões e, a comparação entre as médias obtidas em todas as amostras analisadas e os limites normativos.

O Capítulo 5 apresenta as principais conclusões obtidas nesta pesquisa, assim como recomendações para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, inicialmente, aborda-se o impacto do modo rodoviário à economia brasileira e o seu crescimento na última década. Posteriormente, apresentam-se os principais métodos de avaliação funcional das vias, ou seja, como medir/determinar a sua qualidade funcional e discute-se o estado da arte na avaliação funcional das vias com o uso de *smartphones*. Em seguida, explana-se como acontece a dinâmica de combustão veicular, os principais poluentes gerados e os impactos ao meio ambiente. Em seguida, discutem-se as premissas e limitações dos modelos de previsão de emissões utilizados no HDM-4. Posteriormente, será discutido sobre o estado da arte referente às coletas de emissão em veículos. Depois, discute-se a influência das características superficiais das vias, como a irregularidade longitudinal, no consumo de combustíveis e nos níveis de emissão de poluentes veiculares. Por fim, apresentam-se as legislações brasileiras referentes às emissões veiculares, premissas e características dos atuais relatórios dos volumes de emissões veiculares realizados pela CETESB e como as grandes cidades estão agindo em prol da redução dos níveis de concentração de poluentes nos centros urbanos.

2.1. O modo rodoviário

O desenvolvimento de um país está diretamente relacionado a um sistema de transporte eficiente e de qualidade. Este deve possuir uma integração de diferentes modos, porém a matriz de transporte no Brasil é, predominantemente, rodoviária. Esta preferência está relacionada mais a fatores políticos e mercadológicos do que a decisões técnicas (Raiser *et al.*, 2017). O modo rodoviário concentra 95% das movimentações de passageiros e 61% de mercadorias do país, o desenvolvimento econômico, desta forma, depende diretamente da qualidade dessas vias (CNT, 2019).

Apesar da importância para o país, nos últimos anos, não houve ampliação na malha rodoviária nacional, em contrapartida, a frota de veículos cresceu nas últimas décadas. Em 2020, a quantidade de veículos automotores passou de 106 milhões de unidades, e teve crescimento mais expressivos nas regiões Norte e Nordeste do país, como mostra a Tabela 1.

Tabela 1 – Frota total de veículos por região – 2000 a 2020

REGIÃO	ANO: 2000	ANO: 2010	ANO: 2020	Taxa de crescimento 2000-2020 (%)
NORTE	857.452	2.682.257	5.645.767	558,43
NORDESTE	3.388.602	8.896.904	18.453.465	444,57
SUDESTE	16.886.046	32.138.456	51.363.489	204,18
SUL	6.607.485	12.908.115	20.841.592	215,42
CENTRO-	2.375.944	5.560.738	9.985.387	320,27
BRASIL	30.115.529	62.186.470	106.289.700	252,94

Fonte: DENATRAN (2021).

Diante do crescimento da frota de veículos, o impacto imediato destes, principalmente nos centros urbanos, é o aumento nos tempos de deslocamento e a diminuição da qualidade de vida da população. Esses problemas causam também a elevação nos custos logísticos e nos níveis de emissão de gases, pois o consumo de combustíveis dos veículos é maior em trechos de congestionamentos.

Na pesquisa da Confederação Nacional do Transporte (CNT), as rodovias brasileiras, em condições ótimas e boas, somam apenas 58,2% do total com relação à qualidade do pavimento (CNT, 2019). A pesquisa da CNT apresenta algumas limitações metodológicas, porém expõe os principais defeitos encontrados nas rodovias nacionais observadas pelas equipes técnicas de inspeção (Quintanilha *et al.*, 2019). O inadequado estado de conservação das vias também pode implicar em um aumento no consumo de combustível e, conseqüentemente, nos níveis de emissões de CO₂ (Grenne *et al.*, 2013; El Khoury *et al.*, 2014; Robbins e Trans, 2015; Azevedo, 2019b).

2.2. Avaliação funcional dos pavimentos

O objetivo principal da pavimentação é garantir a trafegabilidade em qualquer época do ano e condições climáticas e proporcionar conforto ao rolamento e segurança aos usuários (Bernucci *et al.*, 2006). Quando o conforto ao rolamento é afetado, as conseqüências podem, além do descontentamento dos usuários, gerar maiores custos operacionais e maiores níveis de emissões atmosféricas (Fontaras, Zacharof e Ciuffo, 2017).

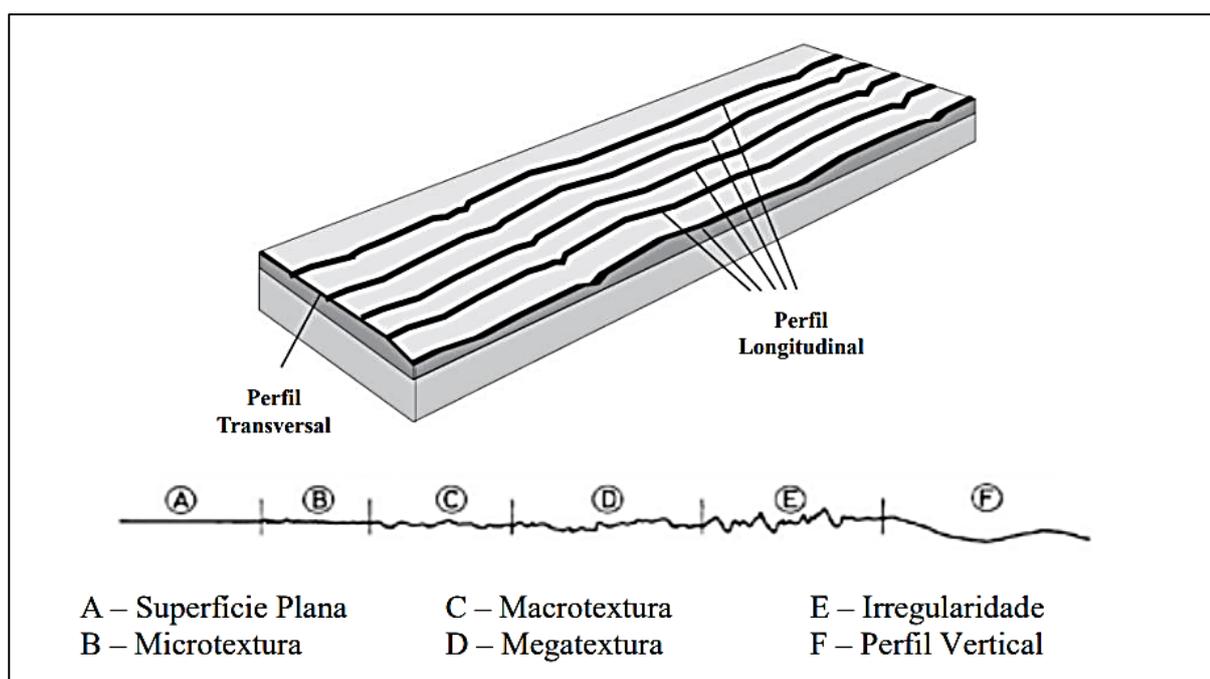
A avaliação funcional de uma via está relacionada à apreciação da superfície da camada de revestimento e como o estado desta influencia no conforto ao rolamento (Bernucci *et al.*, 2006). Esta avaliação pode ocorrer de forma subjetiva ou objetiva. Na subjetiva, avalia-se o conforto ao rolamento proporcionado pela via e, na objetiva, levantam-se

informações sobre as manifestações patológicas presentes na via (Diniz, Silva e Melo, 2020). A escolha do método depende: do objetivo do levantamento, da acurácia desejada e das condições operacionais e financeiras disponíveis.

O Valor de Serventia Atual (VSA) é uma atribuição numérica subjetiva compreendida em uma escala de 0 a 5, onde 0 é a pior condição e 5 é o valor ideal (sem irregularidades), dada pela média de notas de avaliadores para o conforto ao rolamento de um veículo, trafegando em um determinado trecho (DNIT, 2003). A condição de perfeição, VSA=5, não é encontrada na prática mesmo para os trechos da via recém executados (Bernucci *et al.*, 2006). A análise de serventia da via é importante para a avaliação da condição do revestimento em nível de rede (Albuquerque, 2017). O desempenho da via, ou seja, sua capacidade de servir ao tráfego com conforto, segurança e economia, está intimamente relacionado com o IRI, sendo este útil apenas nas vias de trânsito rápido (acima de 60km/h) (Fernandes Jr., 2001; Albuquerque, 2017).

O IRI é o índice internacional que mede a irregularidade longitudinal dos revestimentos. A irregularidade longitudinal medida por este índice é o somatório dos desvios da superfície de um pavimento em relação à um plano de referência (DNIT, 2006). A Figura 2 ilustra este conceito e os diferentes níveis de irregularidade longitudinal que existem nos pavimentos.

Figura 2 – Níveis de irregularidade longitudinal dos pavimentos

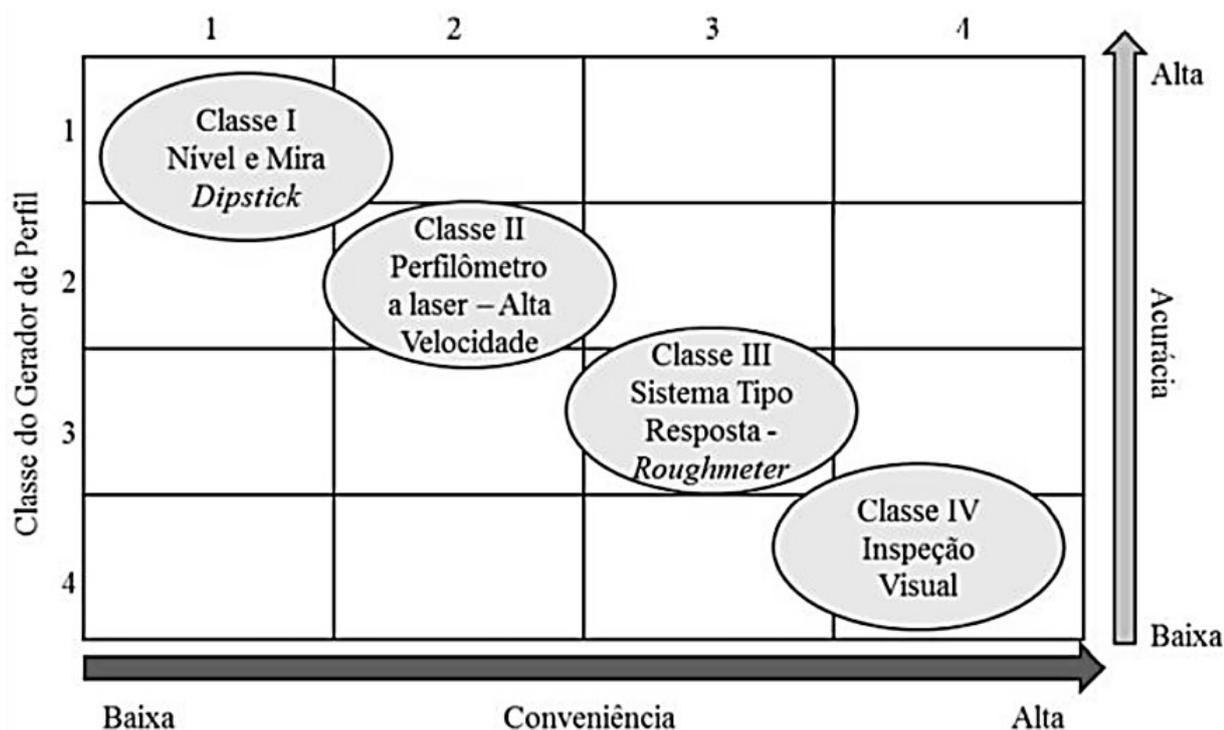


Fonte: Almeida (2019) adaptado de Douangphachanh (2014).

O IRI é expresso em m/km ou mm/m e é utilizado como ferramenta de controle de obras e aceitação de serviços em alguns países (Bernucci *et al.*, 2006). O índice é, frequentemente, utilizado pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), em substituição a outros índices com aspectos qualitativos também utilizados na avaliação da qualidade dos revestimentos, tais como: VSA, Levantamento Visual Contínuo (LVC), Índice de Gravidade Global Expedido (IGGE), Índice de Estado da Superfície (IES) e Índice de Condição do Pavimento Flexível (ICPF) (DNIT, 2006).

A avaliação qualitativa é considerada por alguns órgãos de controle, como o DNIT e Associação Americana de Rodovias do Estado e Funcionários de Transporte (AASHTO) (do inglês, *The American Association of State Highway and Transportation Officials*), como classe IV, numa variação de acurácia decrescente de I a IV, como mostra a Figura 3. Esta avaliação é realizada subjetivamente por técnicos que trafegam na rodovia (Bernucci *et al.*, 2006; Tomiyama, 2012). Nas avaliações quantitativas, citam-se dois métodos: avaliação direta (classe I e II) ou indireta (classe III). Os equipamentos de classe I são Nível e Mira e *Dipstick*; os de classe II são os Perfilógrafos e Perfilômetro à *laser* e os de Classe III são *Maysmeter*, *Merlin* e *SmartPhones* (Sayer e Karamihas, 1998; Bernucci, *et al.*, 2006; Almeida, 2018).

Figura 3 – Classes de medições do IRI



Fonte: Tomiyama (2012)

2.2.1. Avaliação funcional com o uso de smartphones

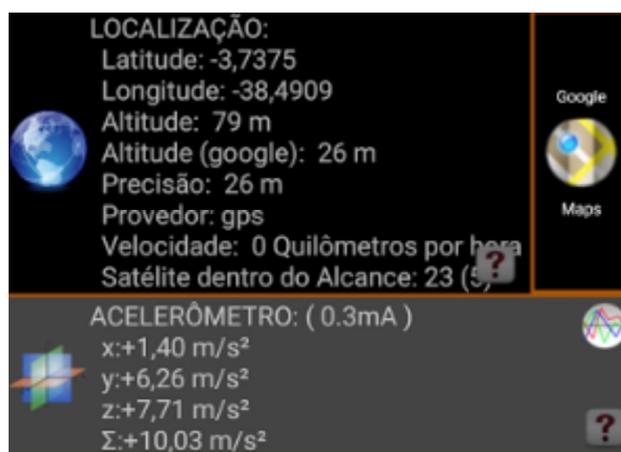
Pesquisadores têm estudado o uso de *smartphones* para avaliação funcional das vias, principalmente na determinação da irregularidade longitudinal e na localização de defeitos, devido ao seu baixo custo e fácil operação (Islam *et al.*, 2014; Forlöf e Jones, 2015; Bisconsini, 2016; Almeida, 2018). O objetivo dos trabalhos desenvolvidos pelos pesquisadores supracitados foi desenvolver uma ferramenta com maior acurácia e conveniência possível. Diversos sensores modernos, como acelerômetros de 3 eixos, giroscópio e GPS (do inglês, *Global Positioning System*), compõe os *smartphone* atuais e estes são usados para desenvolver aplicativos com a intenção de medir o IRI por meio de abordagem do tipo resposta (Classe III), como ilustra a Figura 4.

Figura 4 – Informações obtidas pelos sensores do *smartphone*



(a) Sistema de coordenadas

Fonte: Bisconsini (2016)



(b) GPS e Acelerômetro.

Fonte: Almeida (2018)

A desvantagem de um sistema do tipo resposta é a necessidade de calibração prévia, denominada de correlação de calibração. Isso se faz necessário pois deve-se determinar, para cada velocidade operacional, a relação entre o valor da irregularidade e a quantidade de deslocamentos verticais por uma determinada distância percorrida medida pelo dispositivo (Bisconsini, 2016).

Islam *et al.* (2014) concluíram que os valores de IRI medidos com o uso de *smartphone* foram semelhantes àqueles coletados com o uso do perfilômetro inercial (Classe II). Outro estudo realizado por Forlöf e Jones (2015) aponta uma correlação de até 81%

entre os dados coletados com o uso do aplicativo *RoadRoad* quando comparados aos dados obtidos com o uso do perfilômetro à laser (Classe II).

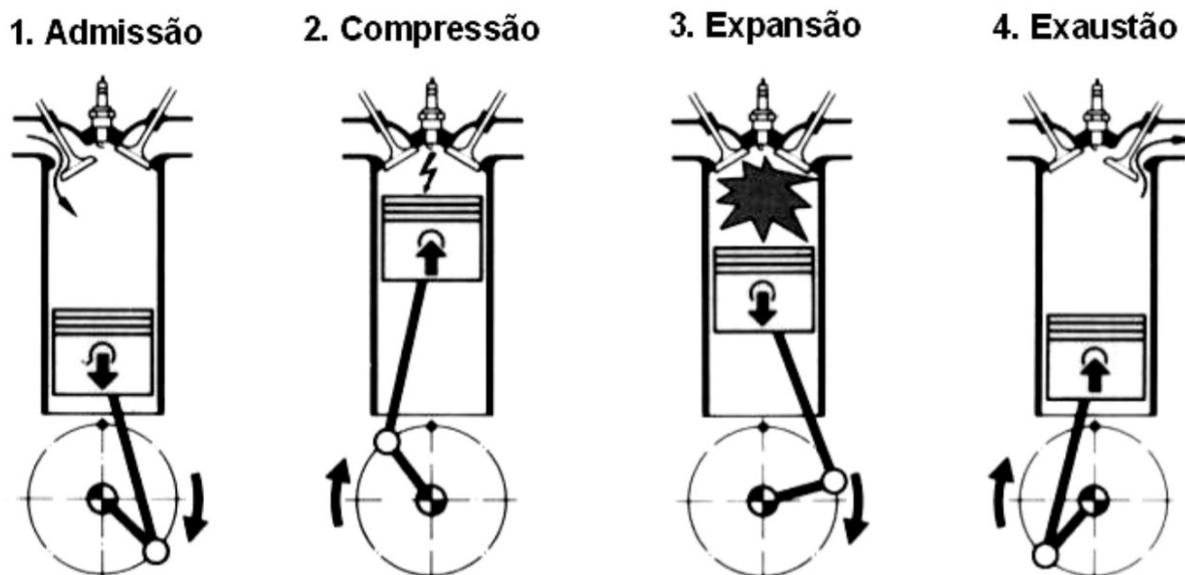
Bisconsini (2016) confrontou os valores de acelerações verticais obtidos com o uso de *smartphones* de diferentes marcas e modelos e os comparou com os valores de IRI medidos com o uso de nível e mira (Classe I) e obteve correlações entre 97% e 99%, respectivamente. Almeida (2018) comparou os resultados de IRI com o uso do aplicativo *SmartIRI* com medições realizadas com o uso de perfilômetro à laser (Classe II) e nível e mira (Classe I). O citado autor obteve correlação de 91% nos seus resultados.

2.3. Dinâmica de combustão nos motores de veículos do ciclo Otto

Para avaliar a emissão de poluentes veiculares, faz-se necessário entender como funciona a dinâmica de combustão dos motores. A combustão é uma reação química que ocorre entre combustível e comburente (ar), nos motores a combustão interna (Lima, 2015). Os motores automotivos, geralmente, possuem dois princípios básicos de ignição: centelha ou compressão. Motores que utilizam gasolina ou etanol como combustível são de ignição por centelha, e, motores à diesel, são de ignição por compressão (Andrade, 2007).

O motor de ignição por centelha se enquadra na classificação de motor de combustão interna ciclo Otto, composto por um ciclo de quatro tempos: admissão, compressão, expansão e exaustão. A Figura 5 ilustra, de forma geral, a dinâmica dos quatro tempos de funcionamento para o motor do ciclo Otto. Atualmente, estes motores apresentam um sistema de admissão de ar, alimentação de combustível e ignição, com controle eletrônico, para que a combustão seja mais eficiente em todos os cilindros, conseqüentemente, reduzem-se as emissões de poluentes e melhora-se o desempenho do veículo (Andrade, 2007).

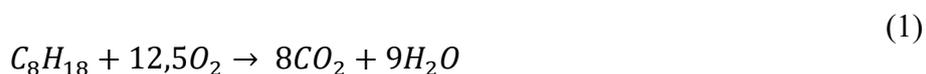
Figura 5 – Ciclo de trabalho de um motor com ciclo Otto



Fonte: BOSCH (2005)

2.3.1. Princípios da combustão em motores ciclo Otto

Todo o oxigênio presente no processo de combustão deve ser consumido para que ocorra uma combustão completa ou estequiométrica (Lima, 2015). Um exemplo que pode ser citado é a reação entre o oxigênio e o iso-octano dada pela Equação (1):



Nesse exemplo, a quantidade de oxigênio é exatamente a necessária para transformar o combustível e o comburente em dióxido de carbono e água. Porém, a quantidade de oxigênio pode ser maior ou menor do que o necessário. Quando o oxigênio ultrapassa essa quantidade ideal, denomina-se de mistura pobre e, quando a quantidade de oxigênio é menor, chama-se de mistura rica (Lima, 2015). O coeficiente lambda (λ) mostra a proporção teórica para queima completa, e é dado pela Equação (2):

$$\lambda = \frac{\text{mistura ar/combustível admitida nos cilindros}}{\text{mistura estequiométrica}} \quad (2)$$

A partir desta identidade, é possível obter três valores diferentes para λ :

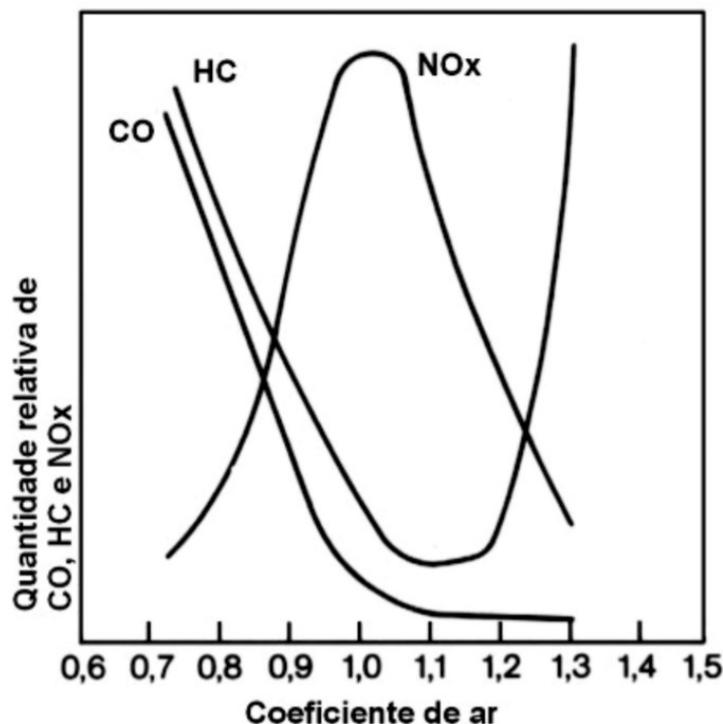
- $\lambda > 1$ – Mistura pobre;
- $\lambda < 1$ – Mistura rica;
- $\lambda = 1$ – Combustão completa.

A mistura pobre resulta em diminuição na potência do motor, pois a pressão de combustão se reduz com o excesso de oxigênio, diminuindo o torque e o consumo de combustível (Guzzella e Onder, 2010). Na condição de mistura rica, há ganho de potência e pressão na combustão, porém com desperdício de parte do combustível e um maior nível de emissão (Kiencke e Nielsen, 2005). Os motores dos veículos são equipados com um sensor de oxigênio de banda larga, conhecido como sonda lambda, que faz a leitura do valor da mistura Ar/Combustível (A/C) e realizar o controle da injeção de combustível (Pereira, 2015).

2.3.2. *Emissão de gases de escape*

Caso a combustão fosse sempre realizada de forma completa, os danos ao meio ambiente não seriam tão prejudiciais, contudo, ressalta-se que o CO_2 está relacionado à degradação da camada de ozônio, conseqüentemente, este possui influência no efeito estufa. Os gases de exaustão, muitas vezes, contêm CO , NO_x , HC e aldeídos, originados pela combustão do álcool e SO_2 advindo do processo de refinamento da gasolina. A emissão de CO , HC e NO_x em função do λ , pode ser visualizada na Figura 6.

Figura 6 – Emissão de CO, HC e NO_x em função do λ (coeficiente de ar)

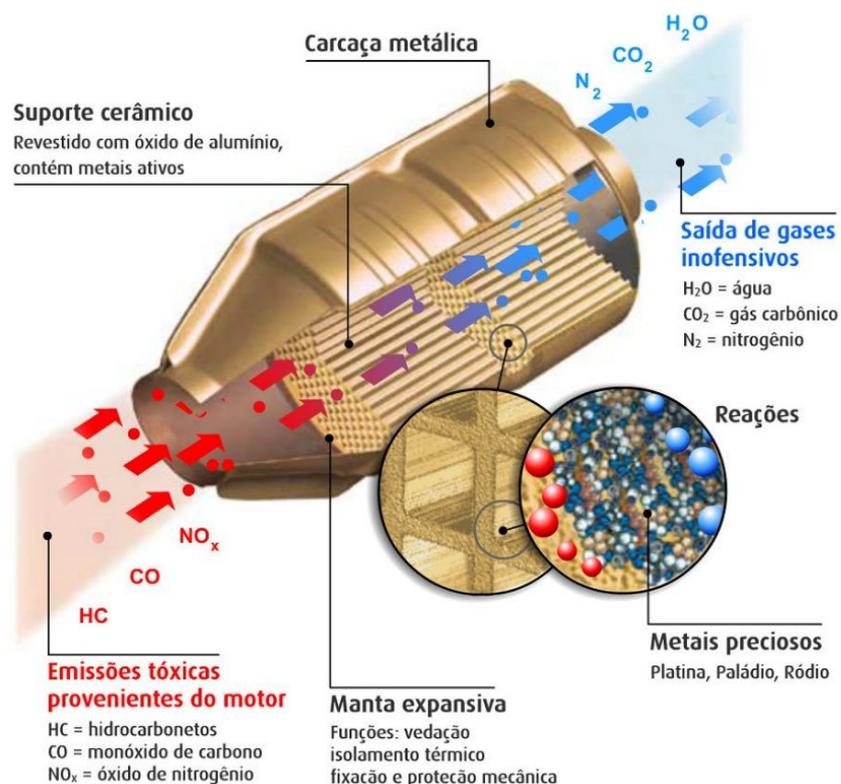


Fonte: BOSCH (1995)

Na faixa $\lambda = 1$, a emissão de CO é determinada pela distribuição uniforme de combustível em cada cilindro. Caso alguns cilindros estejam operando em condições distintas, alguns com misturas pobres e outros com misturas ricas, a consequência será uma média maior de CO emitido, ao se comparar esta situação ao cenário onde todos os cilindros operam uniformemente com o mesmo λ .

Segundo Pereira (2015), para transformar gases mais poluentes em menos poluentes é utilizado um catalizador chamado de conversor catalítico. Este equipamento faz as seguintes conversões: oxidação de hidrocarbonetos em dióxido de carbono e água; oxidação de monóxido de carbono em dióxido de carbono; redução de NO_x em nitrogênio e oxigênio. De acordo com o autor, o catalizador mais utilizado nos veículos é o conversor catalítico de três vias ilustrado na Figura 7.

Figura 7 – Conversor catalítico



Fonte: Pereira (2015)

No momento onde o $\lambda > 1$ a conversão do NO_x é comprometida, pois a quantidade excessiva de oxigênio presente no catalisador é redita pelo cério (Ce) presente no revestimento do composto cerâmico (Pereira, 2015). Quando o $\lambda < 1$ consegue-se obter uma maior eficiência na conversão do NO_x, porém os outros gases (HC e CO) têm sua conversão prejudicada pela ausência do oxigênio (Guzzella e Onder, 2010). Portanto, o catalisador é mais eficiente quando o $\lambda \approx 1$ (Pereira, 2015).

2.3.2.1. Emissão de CO

Em condição de mistura rica, o CO₂ é produto da combustão incompleta da mistura e, conseqüentemente, a emissão de CO é fortemente dependente da razão A/C (BOSCH, 1988). A concentração de CO no cilindro é alta durante a combustão, enquanto na subsequente fase de expansão, uma porção é oxidada formando CO₂ (Milhor, 2002). No cenário de mistura pobre, a emissão de CO é baixa e não depende da razão A/C. Atrela-se a sua formação a não homogeneidade na distribuição da mistura A/C e às flutuações em sua composição em cada ciclo.

2.3.2.2. Emissão de HC

Similar ao que ocorre com o CO, como a deficiência de ar leva à combustão incompleta da mistura A/C, e, conseqüentemente, à emissão de hidrocarbonetos (HC) não queimados e parcialmente queimados, essa dinâmica pode ser visualizada na Figura 6. BOSCH (1995) explica que quando o λ ultrapassa 1,2 a produção de HC aumenta devido às áreas da câmara de combustão que não estão incluídas, ou são parcialmente incluídas, na combustão. Essas regiões correspondem às camadas fronteiriças, localizadas próximas às paredes do cilindro, onde a chama é extinta por resfriamento, devido à baixa temperatura da câmara de combustão (Milhor, 2002).

Milhor (2002) relata que podem ocorrer outros eventos para formação de HC, como por exemplo o “*blow-by*” que é o processo no qual a mistura nova escapa para o cárter através de folgas entre o cilindro e o pistão do motor. Contudo, existe um respiro do cárter para a admissão, e, os HC retornam para a câmara de combustão. Outra possibilidade de formação de HC não queimados são as perdas evaporativas do tanque e do carburador, porém esse último só advém, normalmente, de carros mais antigos que não possuíam injeção direta.

2.3.2.3. Emissão de NO_x

Como pode ser visualizado na Figura 6, apresentada anteriormente, a emissão de NO_x , na dependência do λ , é inversa ao HC. A formação de picos de temperatura na câmara de combustão, e a duração de seu efeito, têm influência decisiva na formação de NO (BOSCH, 1995). Além do NO_x e do NO, outros gases podem ser formados, como o dióxido de nitrogênio (NO_2) e o óxido nitroso (N_2O).

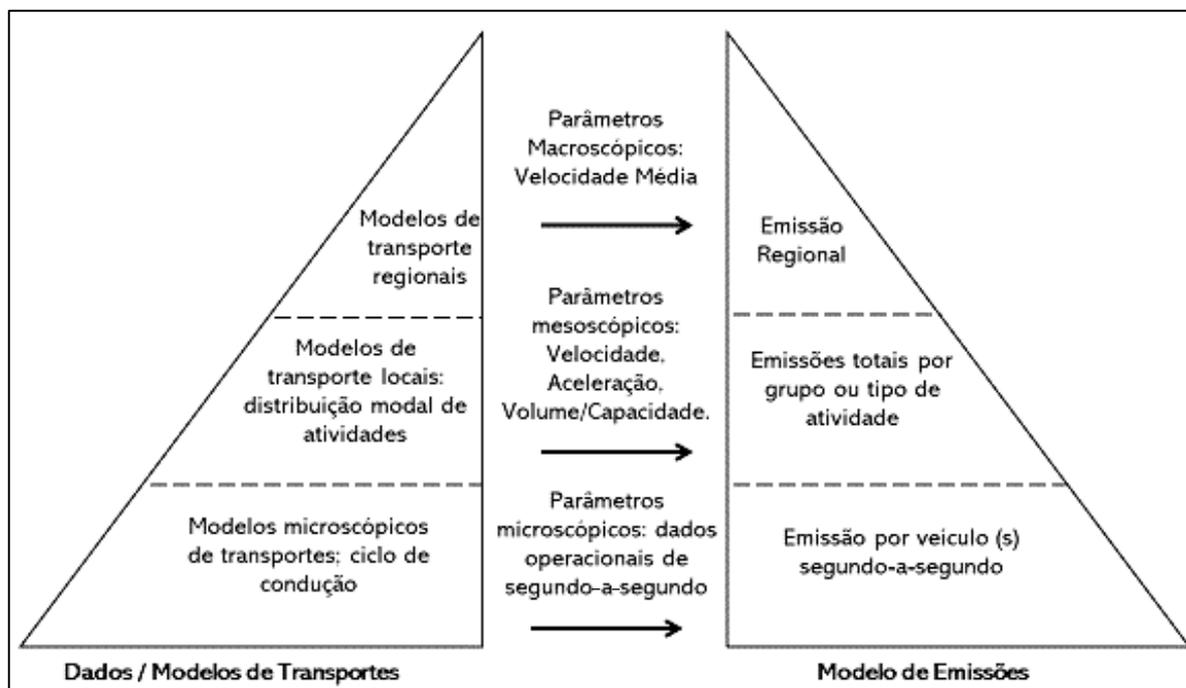
Esses gases, derivados da combinação do nitrogênio com o oxigênio, são danosos à saúde das pessoas e podem afetar o meio ambiente, pois contribuem na formação de chuva ácida e *smog* fotoquímico. O NO_2 causa irritação no sistema respiratório e danos ao tecido pulmonar. O NO é considerado uma severa hemotoxina, pois sua combinação com a hemoglobina do sangue pode causar paralisia central (EPA, 2017).

2.4. Modelos de previsão de emissões

Como acontece com a maioria dos modelos, existe uma variação dos níveis de sofisticação disponíveis para a modelagem das emissões veiculares. An *et al.* (1997) elaboraram

um diagrama que relaciona o tipo de modelo de emissão gerado de acordo com os níveis de dados disponíveis, exibido na Figura 8.

Figura 8 – Interface dos modelos de emissões em sistemas de transportes



Fonte: Adaptado de An *et al.* (1997)

Evidentemente que o nível de sofisticação exigidos na saída dos dados requer a coleta de parâmetros de entradas apropriados. O HDM-4 é uma ferramenta desenvolvida pelo Banco Mundial que auxilia na tomada de decisões relacionadas à gestão da conservação e reabilitação de pavimentos. Os modelos de emissões do HDM-4 são aplicáveis aos níveis mesoscópico/macrocópico e são extraídos de estudos realizados (ETSU, 1997; An *et al.* 1997).

ETSU (1997) elaborou um modelo de previsão de emissão de acordo com o tipo de veículo. Os autores atribuíram 6 parâmetros em 16 tipos de veículos como mostra a Equação (3), separando-os pelo porte e o tipo de combustível utilizado, além de diferenciar os parâmetros pelo tipo de gás que se deseja modelar.

$$E_{ij} = A1_{ij} + A2_{ij}V_j + A3_{ij}V_j^{A4_{ij}} + A5_{ij}e^{A6_{ij}V_j} \quad (3)$$

Onde:

A1-A6	parâmetros do modelo
i	modelagem de emissão de NO _x , CO, HC, MP
j	modelagem do tipo de veículo
E_{ij}	quantidade de emissão de acordo com o tipo de veículo em g/km
V_j	velocidade média do tipo de veículo.

No modelo de ETSU (1997) não há uma relação direta entre as emissões e o consumo de combustível dos veículos. Os autores argumentam que as emissões de NO_x por exemplo não dependem necessariamente do consumo de combustível, elas estão relacionadas com a velocidade do motor e a temperatura de combustão.

Ao relacionar as emissões com o consumo de combustível é preciso supor que há um equilíbrio estequiométrico com uma razão da mistura A/C próxima a 1. An *et al.* (1997) utilizaram essa premissa na sua modelagem, conforme detalhado nas Equações (4) e (5).

$$E_i = CC \left(\frac{g_{emissões}}{g_{combustível}} \right)_i \quad (4)$$

$$CC = \frac{CCI D_{combustível} 1000}{Velocidade} \quad (5)$$

Onde:

E_i	Emissão em g/km para o gás (i)
CC	Consumo de Combustível (g/km)
$\frac{g_{emissões}}{g_{combustível}}$	Razão entre emissão de determinado gás (i) por grama e o combustível consumido
CCI	Consumo de Combustível instantâneo (mL/s)
$D_{combustível}$	Densidade do combustível em g/mL
Velocidade	Velocidade do veículo em m/s

Para os autores é preciso considerar que o consumo de combustível é dependente do ciclo de condução do veículo, então faz-se necessário organizar o consumo em dois cenários: inicialmente, realizar a estimativa de consumo com o veículo parado; posteriormente, medir o consumo em velocidades constantes. Com isso, será possível organizar o modelo em dois cenários extremos e atribuir um coeficiente de previsão mais adequado a realidade.

É preciso ressaltar que os modelos de previsões utilizados no HDM-4 analisaram os dados em laboratório nas regiões da Suécia e Inglaterra. Tanto ETSU (1997) como An *et al.* (1997) alertam que não está claro quais seriam as relações sob diferentes condições climáticas, com outros tipos de veículos e níveis de manutenção. Portanto é necessário calibrar o modelo para regiões de climas tropicais como o Brasil. Além disso, é importante ressaltar que os veículos passaram por melhorias técnicas nas emissões de gases veiculares nos anos posteriores ao desenvolvimento dessas pesquisas.

2.5. Métodos de coleta de emissões de gases veiculares

Para simular um padrão de condução próximo à realidade durante a análise de emissões de gases veiculares é utilizado o conceito de “ciclo de condução”. No ciclo de condução utiliza-se um gráfico de velocidade em função do tempo, e, inferem-se parâmetros como aceleração, distância percorrida e modo de condução (Martins, 2005). O objetivo é simular um padrão de condução próximo ao real. Este consiste numa sequência de 4 modos de operação do veículo: cruzeiro, aceleração, desaceleração e parado (Martins, 2005). Os ciclos de condução utilizados para análise de coleta de emissões veiculares brasileiro são inspirados nos métodos americanos FTP-75 (do inglês, *Federal Test Procedure 75*). Os procedimentos relativos ao ensaio de coleta de emissões veiculares no Brasil estão dispostos na NBR 6601/2012 (Cassiano, 2016; Azevedo, 2019a).

A literatura aponta que, fundamentalmente, existem três métodos para coleta dos níveis de emissão de gases em um veículo: teste em bancada (dinamômetro); sensoriamento remoto; e teste com utilização de instrumento embarcado no veículo (*on-board*) (Cassiano, 2016). No teste em bancada, o ambiente é controlado e o ciclos de condução são padronizados. Nos outros, a análise está subordinada às conturbações das condições cotidianas de infraestrutura e tráfego locais (Frey *et al.*, 2003; BOSCH, 2005; Cassiano, 2016). No método com o uso do sensoriamento remoto, são utilizados sensores remotos que permitem medir os níveis de poluentes veiculares em um determinado ponto da via (Cassiano, 2016; Quintanilha, 2017). No procedimento com instrumentação *on-board* a coleta é realizada de forma direta no veículo e, neste caso, as análises são impactadas pelo tráfego e pelas condições da infraestrutura.

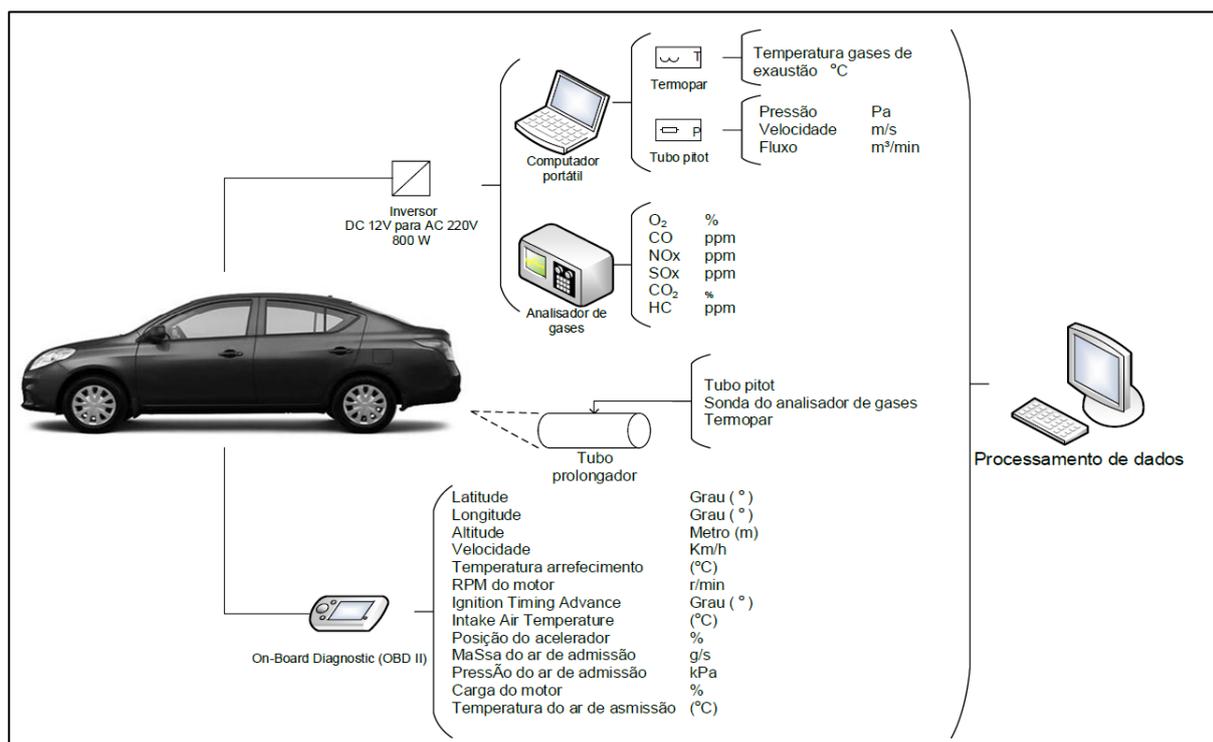
O teste com o uso do dinamômetro apresenta resultados com elevada capacidade de reprodução pois a maioria das condições de uso do veículo (ambientais, tráfego, velocidade) são controladas, contudo este possui um custo estrutural de análise elevado (Ferguson e Kirkpatrick, 2001). A limitação deste método é a exclusão das condições reais de percurso do veículo.

O método de sensoriamento remoto mede a proporção dos gases no escapamento dos veículos por meio do uso de ondas de infravermelho e ultravioleta (Franco *et al.*, 2013). O equipamento não é instalado no veículo. O método possui alta produtividade pois permite realizar uma grande quantidade de coletas de emissões de veículos por dia. Porém, este método

possui limitações pois está sujeito às condições de tempo e fornece estimativas pontuais e instantâneas em determinados locais (Quintanilha, 2017).

O procedimento com o uso do instrumento *on-board* instalado no veículo permite coletar as emissões de forma constante e nas condições reais de tráfego e infraestrutura da via. Esses equipamentos são chamados de PEMS (do inglês, *Portable Emission Measurement Systems*), sistema portátil de emissões. Nos levantamentos, alguns destes equipamentos são utilizados, tais como: analisador de gases, GPS, controladores de fluxo e OBD (do inglês, *On-Board Diagnostic*). Cassiano (2016) utilizou esse método com o objetivo de analisar o nível de emissão em veículo *flex fuel* para três proporções distintas de etanol e gasolina. A Figura 9 detalha o esquema de montagem dos equipamentos utilizados para coleta realizada pelo citado autor.

Figura 9 – Esquema de montagem para equipamentos *on-board* em coleta de gases veiculares



Fonte: Cassiano (2016)

2.6. A superfície das vias e seus impactos no consumo e nas emissões veiculares

A literatura aponta que a superfície da via afeta o consumo de combustível e os níveis de emissão veiculares. As características da superfície da via incluem microtextura, macrotextura, megatextura e irregularidade longitudinal (EAPA, 2004).

Um dos primeiros estudos dos efeitos da superfície das vias sobre o consumo de combustível foi realizado entre 1983 e 1990 na Suécia, onde foram avaliadas diferentes características das vias suecas com velocidades de 50, 60 e 70km/h (Sandberg, 1990). Em relação a superfície das vias, o consumo de combustível teve maiores correlações, respectivamente, com a irregularidade longitudinal ($R = 0,91$), megatextura ($R = 0,83$) e macrotextura ($R = 0,60$) (Sandberg, 1990). Ressalta-se que os parâmetros de superfície foram coletados por um perfilômetro a laser e os resultados foram posteriormente confirmados por Laganier e Lucas (1990) utilizando o mesmo método. Os autores também analisaram a relação do consumo com a declividade das vias e concluíram que uma declividade de mais de 5% pode elevar o consumo de combustível em até 6%.

A EAPA (2004) realizou um estudo de consumo de combustíveis, em diferentes tipos de pavimentos e velocidades médias, na região da Europa. Nas vias suecas, o consumo de combustível aumentou 0,8%, com velocidade média de 50km/h, em vias com revestimento de concreto de cimento Portland em comparação com o asfáltico. Na Holanda, o consumo de combustíveis também aumentou 2,7% nas vias com revestimento de concreto, porém com velocidade média de 90km/h.

Greene *et al.* (2013) realizaram um estudo de caso para relacionar a eficiência de combustível à irregularidade longitudinal da via usando o banco de dados da Administração Federal de Rodovias dos Estados Unidos (FHWA) (do inglês, *Federal Highway Administration*) ao longo da vida útil das vias (1990-2004). Os autores encontraram um consumo adicional de combustível de 30.000 galões por milha (cerca de 70.564L/km) pelas condições não ideais das vias ($IRI > 6$), considerando apenas a contribuição da irregularidade longitudinal.

El Khoury *et al.* (2014) também analisaram o efeito do IRI, em vias com condições geométricas semelhantes (curvatura e inclinação), sobre o consumo de combustíveis e concluíram que as vias com $IRI < 4$ possuem uma economia de 13% em comparação com as de $IRI > 8$. De acordo com Robbins e Tran (2015), existe uma relação positiva entre o IRI do pavimento e o consumo de combustível, os autores afirmam que um aumento no IRI de 1m/km

reflete um consumo adicional de combustível de 2% (independentemente da velocidade) para veículos de passageiros.

Quando se analisa o efeito do IRI sobre as emissões de gases, alguns resultados podem diferir dos resultados de consumo de combustível. Sumitsawan (2011) analisou as emissões de CO₂ oriunda dos veículos que trafegavam em pavimentos com revestimento em concreto de cimento Portland e asfáltico, em uma região urbana de Arlington, Texas, com velocidade de tráfego urbano da ordem de 50km/h. A emissão de CO₂ em veículos que trafegavam em vias de revestimento de concreto apresentaram reduções em torno de 4%, em comparação aquelas geradas em pavimentos com revestimento asfáltico.

Shahare *et al.* (2017) utilizaram o modelo usado no HDM-4 para estimar emissões através do IRI com veículos de diferentes tipos (veículos de passeio, ônibus, caminhões e reboques) e, concluíram que, as emissões podem ser reduzidas em 10% com uma manutenção adequada na superfície das vias, em limites de velocidades inferiores a 60km/h. Azevedo (2019b) estimou a emissão de HC, CO, NO_x, SO₂ e CO₂ através do mesmo modelo utilizado por Shahare *et al.* (2017) empregando o IRI coletado por um aplicativo de *smartphone* em um veículo de passeio. A citada autora obteve as maiores correlações, respectivamente, para os seguintes gases HC (R = 0,80), CO (R = 0,79), NO_x (R = 0,63), SO₂ (R = 0,60) e CO₂ (R = 0,59). Ressalta-se que os autores supracitados realizaram estimativas através de modelos da literatura. Shahare *et al.* (2017) e Azevedo (2019b) recomendam que a análise de estimativas deve ser comparada com as emissões obtidas na prática com métodos de coleta *on-board*.

Quintanilha (2017) avaliou a relação entre o consumo de combustível e as emissões de CO₂ e NO_x em vias urbanas com diferentes classificações funcionais (arterial, coletora e local) utilizando o método de coleta *on-board*, porém concluiu que não foi possível obter diferenças significativas de emissões dentre elas. Rocha (2019) avaliou a relação entre a qualidade do revestimento asfáltico e as emissões de CO₂ e NO_x durante o tráfego de veículos em vias urbanas, utilizando o LVC e o IRI para avaliar a qualidade do revestimento e correlacionou os resultados destes com as emissões de CO₂ e NO_x obtidas por Quintanilha (2017). Rocha (2019) concluiu que as correlações entre as duas variáveis são baixas, porém recomendou a condução de estudos futuros em vias sem a presença de interseções e a influência do tráfego urbanos para evitar a influência do fenômeno de *stop and go* nos resultados.

2.7. Legislação referente as emissões atmosféricas veiculares

A experiência de regulamentações brasileira sobre a poluição atmosférica de origem veicular se mostra semelhante àquelas encontradas nos Estados Unidos e na Europa, no que diz respeito à estrutura de elaboração das regulamentações, porém com particularidades na execução e nos resultados alcançados (Silva, 2020). A Agência do Proteção Ambiental do Estados Unidos (EPA, do inglês *Environmental Protection Agency*) é a instituição responsável pela regulamentação dos níveis de emissão dos Norte-Americanos enquanto na Europa a Comissão Europeia (formada por todos os países membros do bloco europeu) responde por essa ação.

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) desenvolveu novas resoluções visando atingir o objetivo de redução progressiva de emissões na década atual (2020-2030). O CONAMA criou o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE) com o objetivo de controlar a poluição atmosférica e a emissão de ruídos por fontes móveis, através da resolução CONAMA nº18/1986 (CONAMA, 1986).

O PROCONVE estabelece os níveis de emissão de poluentes para diversas categorias de veículos. O programa divide a classificação em razão do seu Peso Bruto Total (PBT), sendo as fases “L” para veículos Leves e “P” para veículos Pesados. Os cronogramas de implantação seguem períodos distintos. A Tabela 2 mostra, sinteticamente, os objetivos do PROCONVE nas 5 fases iniciais.

Tabela 2 – Estratégia de implantação do PROCONVE para veículos leves

Fase	Implantação	Características/Inovação
L1	1988-1991	Caracterizada pela eliminação dos modelos mais poluentes e aprimoramento dos projetos dos modelos já em produção. Iniciou-se também nesta fase o controle das emissões evaporativas. As principais inovações tecnológicas que ocorreram nesta fase foram: reciclagem dos gases de escapamento para controle das emissões de NO _x ; injeção secundária do ar no coletor de exaustão para o controle de CO e HC; implantação de amortecedor da borboleta do carburador para controle do HC e a otimização do avanço da ignição.

Fase	Implantação	Características/Inovação
L2	1992-1996	A partir dos limites verificados na Resolução CONAMA 18 de 1986, nessa fase investiu-se na adequação de catalisadores e sistemas de injeção eletrônica para uso com mistura de etanol, em proporção única no mundo ($22\% \pm 1\%$ de etanol, em volume). As principais inovações nos veículos foram a injeção eletrônica, os carburadores assistidos eletronicamente e os conversores catalíticos. Em 1994, iniciou-se o controle de ruído dos veículos.
L3	1997-2004	Em face da exigência de atender aos limites estabelecidos a partir de 1º de janeiro de 1997 (Resolução CONAMA 15 de 1995), ocorreram reduções bastante significativas em relação aos limites anteriores, e o fabricante/importador empregou, conjuntamente, as melhores tecnologias disponíveis para a formação de mistura e controle eletrônico do motor como, por exemplo, o sensor de oxigênio (denominado "sonda lambda").
L4	2005-2008	Tendo como referência a Resolução CONAMA Nº 315 de 2002, a prioridade nesta fase, que teve início no ano de 2005, é a redução das emissões de HC e NO _x (substâncias precursoras de Ozônio). Para o atendimento desta fase, foram desenvolvidos motores com novas tecnologias como a otimização da geometria da câmara de combustão e dos bicos de injeção, o aumento da pressão da bomba injetora e a injeção eletrônica.
L5	2009-2013	Com os limites de emissão da Resolução CONAMA Nº 315 de 2002, da mesma forma que na fase L-4, a prioridade na fase L-5 é a redução das emissões de HC e NO. De maneira análoga à fase L-4, as inovações tecnológicas se deram na otimização da geometria da câmara de combustão e dos bicos, o aumento da pressão da bomba injetora e a injeção eletrônica. Nesta fase deu-se a redução de 31% das emissões de hidrocarbonetos não metano para os veículos leves do ciclo Otto e de 48% e 42% para as emissões de NO _x para os veículos leves do ciclo Otto e Diesel, respectivamente. Além disso, as emissões de aldeídos foram reduzidas em, aproximadamente, 67% para os veículos do ciclo Otto.

Fonte: MMA, 2009.

Em 2009, o CONAMA introduziu a atual fase do programa, Fase – L6, que entrou em vigor em 2013 (CONAMA, 415). O novo nível ficou mais restritivo para emissões de CO, NO_x e MP, como mostra a Tabela 3, que compara as fases L5 e L6 para veículos leves de passageiros.

Tabela 3 – Síntese dos requisitos das fases L5 e L6 do PROCONVE

Fase	CO (mg/km)	HC (mg/km)	NMHC (mg/km)	NO _x (mg/km)	CHO ⁽²⁾ (mg/km)	MP ⁽³⁾ (mg/km)	Evaporativa ⁽²⁾
L5	2.000	300 ⁽¹⁾	50	120 ⁽²⁾ ou 250 ⁽³⁾	20	50	2g/teste
L6	1.300	300 ⁽¹⁾	50	80	20	25	1.5 g/teste

Fonte: MMA, 2009.

Legenda:

- (1) Aplicável somente a veículos movidos a GNV
- (2) Aplicável somente a veículos movidos a gasolina ou etanol
- (3) Aplicável somente a veículos movidos a diesel

Em 1º de janeiro de 2022 iniciará a fase L7 e em 2025 a fase L8, de acordo com a resolução n°492 do CONAMA. Esta norma foi baseada na norma EURO 6 (n.º715/2007) que está em vigência nos países europeus (Kuklinska, Wolska e Namiesnik, 2015; Cassiano, 2016; EPA, 2017). A norma ficará mais restritiva com os níveis de emissão de CO e NO_x em veículos leves *flex fuel*, por exemplo. A Tabela 4 exibe os novos níveis para a fase L7.

Tabela 4 – Limites de emissão de poluentes por categoria de veículos - PROCONVE L7

Categoria	NMOG+ NO _x (mg/km)	MP ⁽¹⁾ (mg/km)	CO (mg/km)	Aldeídos ⁽³⁾ (mg/km)	NH ₃ ⁽²⁾ (ppm)	Evaporativa ⁽⁵⁾	Emissão de Abastecimento ⁽⁵⁾
Leve Passageiro	80	6	1.000	15	Declarar	0,5g/teste	50 mg/L abastecido
Leve Comercial	140 ⁽³⁾	6 ⁽³⁾		-		-	
	320 ⁽⁴⁾	20 ⁽⁴⁾		-		-	

Fonte: CONAMA (2019b)

Legenda:

- (1) Aplicável a veículos equipados com motores de ignição por centelha e injeção direta de combustível ou motores do ciclo Diesel
- (2) Aplicável a veículos equipados com motores do ciclo Diesel com sistemas de pós-tratamento que utilizem agente redutor líquido
- (3) Aplicável somente a veículos equipados com motores de ignição por centelha
- (4) Aplicável somente a veículos equipados com motores do ciclo Diesel
- (5) Não aplicável nos ensaios em que os veículos utilizarem óleo diesel ou GNV

Segundo Dias *et al.* (2021), uma das justificativas para a incorporação do limite da emissão no abastecimento nas fases futuras do PROCONVE foi o aumento de 38% desse tipo de emissão diagnosticado pelo relatório da CETESB no período entre 2006 e 2018. Para os autores, apesar do estabelecimento do limite da emissão no abastecimento ser uma medida

importante na redução das emissões veiculares, ela não será efetiva a curto prazo, pois o índice de renovação da frota atual é baixo, logo essa política só terá ganho significativos na próxima década quando pelo menos 50% da frota possuir este controle.

Para o CONAMA, as emissões de CO₂ não são consideradas como poluentes e não possuem limites de emissões. Contudo para a EPA e Comissão Europeia as emissões de CO₂ precisam ser reduzidas, pois impactam diretamente no aquecimento global. Em 2010, a EPA definiu um programa de redução das emissões de CO₂, para veículos leves. Em 2017, o limite estabelecido é de 132,5g/km até chegar em 89g/km em 2025 (EPA, 2010). Na União Europeia (2009), o objetivo é reduzir a emissão média de 130g/km de CO₂ para 95g/km em 2021 para veículos leves, de acordo com a norma EU n.º 443/2009. Mais recentemente, outra norma da União Europeia (2019) foi estabelecida a EU n.º 631/2019 que objetiva reduzir a emissões de CO₂ para veículos leves: entre 2021 e 2025, uma redução de 15%; e entre 2025 e 2030, uma redução de 37%. Diante do exposto, é recomendável que o CONAMA reveja sua premissa de não regular as emissões de CO₂ no Brasil.

2.7.1. Relatórios de emissões de gases por fontes móveis

Quando se analisam os Estados brasileiros que contabilizam os níveis de emissão para fontes móveis, destacam-se apenas cinco: Espírito Santo, Minas Gerais, Pernambuco, Rio de Janeiro e São Paulo, mas em geral estes funcionam sem atualizações periódicas (Silva, 2020). A exceção é o estado de São Paulo que apresenta os dados atualizados anualmente, além de elaborar um plano de controle de emissão veicular com revisão a cada três anos (Silva, 2020). A CETESB é o órgão responsável por quantificar o volume de poluentes emitidos no Estado através dos relatórios de emissões veiculares. Esta contabiliza as emissões que ocorrem após a queima de combustível no motor, ou seja, os gases lançados pelo sistema de escapamento; a evaporação do combustível contido no tanque e a evaporação no abastecimento dos veículos (CETESB, 2019).

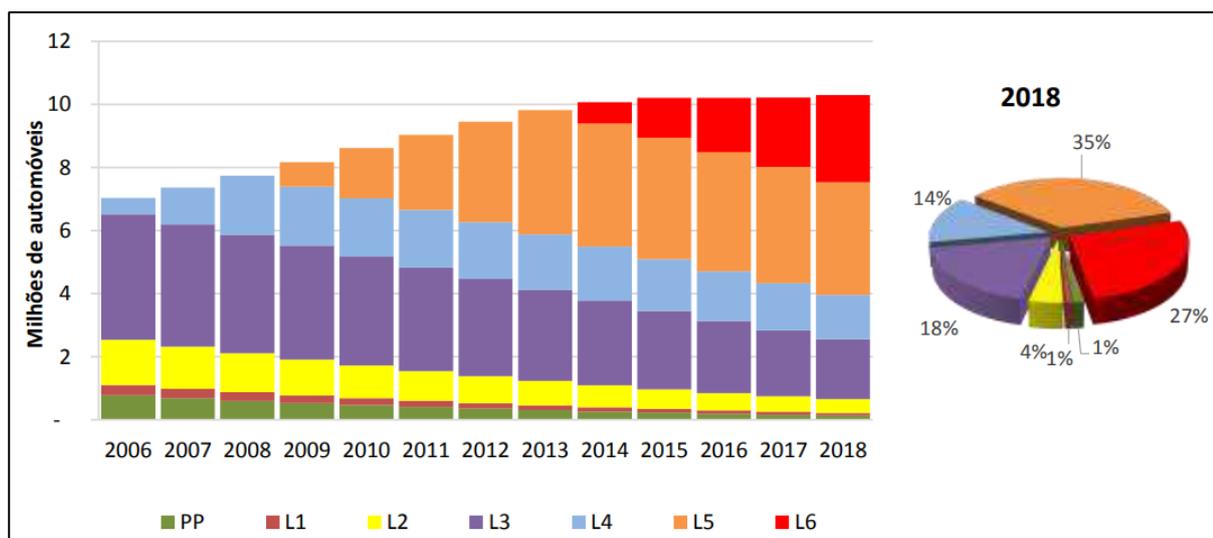
Uma das limitações do método da CETESB são os fatores de emissão do escapamento utilizados no cálculo, pois são oriundos de informações recebidas pelos fabricantes dos veículos. A CETESB (2019) utiliza uma média de emissão dos poluentes por categoria de veículo. A evaporação do combustível contido no tanque é denominada de emissão evaporativa. Esta é baseada na metodologia desenvolvida por Vicentini (2010) e presente na ABNT NBR 11481/2010. O equipamento denominado de SHED (do inglês, *Sealed Housing for Evaporative Determination*) é utilizado nessa análise. Trata-se de uma câmara selada, onde

o veículo é inserido e sua emissão de vapor de combustível é mensurada pela concentração de hidrocarbonetos ao final do ensaio (ABNT, 2010).

A emissão do abastecimento se dá no momento do abastecimento do veículo no posto de combustível. Esta acontece pelo fato de o vapor contido no tanque ser expulso pelo preenchimento com combustível líquido. O vapor emitido é proporcional ao volume de combustível consumido pelo veículo e a taxa de evaporação é função da volatilidade do combustível (CETESB, 2015).

Após contabilizar as variáveis de emissão, a CETESB faz a composição da frota. Esta é calculada a partir da venda de veículos novos nos últimos 40 anos, utiliza-se um fator de correção, pois existe uma taxa de sucateamento dos veículos ao longo dos anos (CETESB, 2019). A Figura 10 mostra a frota do estado de São Paulo e suas respectivas fases do PROCONVE que devem ser atendidas.

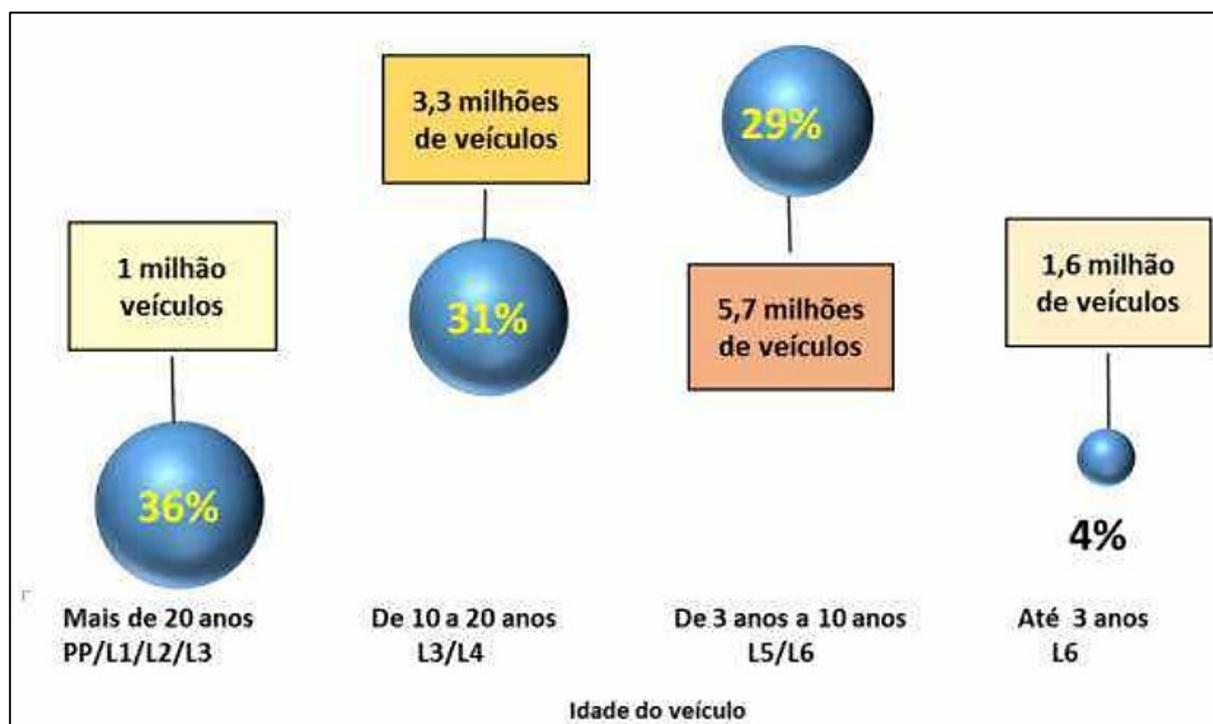
Figura 10 – Evolução da frota de veículos circulante no estado de São Paulo separada por fases do PROCONVE



Fonte: CETESB, 2019.

De posse das informações sobre emissão e frota, descritas anteriormente, a CETESB utiliza indicadores de atividade veicular para compor seu relatório, tais como: intensidade de uso, distâncias anuais percorridas, taxa de motorização, indicador tecnológico do motor, emissão veicular por habitante e por veículo (CETESB, 2019). Na Figura 11 é possível visualizar a contribuição percentual nos níveis de emissão pela idade do veículo.

Figura 11 – Participação percentual de emissão em função da idade e fases do PROCONVE no estado de São Paulo



Fonte: CETESB, 2019

Observa-se a participação percentual da emissão gerada para cada grupo de veículos correspondente às fases do PROCONVE. É possível concluir que os veículos das fases anteriores a L3 (mais de 20 anos de fabricação) compõe 8,6% da frota, porém são responsáveis por 36% das emissões veiculares do Estado. Em contrapartida, os veículos mais novos (até 3 anos de uso) são 13,7% da frota, porém são responsáveis por 4% das emissões apenas. Nota-se que a tecnologia evoluiu para os veículos mais novos. As restrições de circulação de veículos mais velhos nos centros urbanos serão discutidas na seção seguinte.

2.7.2. *As políticas mitigadoras da poluição atmosférica nos maiores centros urbanos mundiais*

A presença de substâncias no ar que envolvem risco, perigo ou sérios problemas à saúde das pessoas é definida como poluição atmosférica, podendo estar presente de diversas formas, principalmente como partículas sólidas e/ou gasosas (Carbajal-Hernández *et al.*, 2012; Azevedo, 2019a). A emissão não necessariamente determina a qualidade do ar, mas os fatores de dispersão, topografia e condições meteorológicas por exemplo, apresentam mais influência neste aspecto (Quintanilha, 2020). Pesquisadores também constataram que a verticalização dos ambientes urbanos impacta, diretamente, nas elevadas concentrações de poluentes tóxicos na

atmosfera. A explicação, segundo Godish (1991), é que a verticalização da cidade reduz a velocidade dos ventos e, conseqüentemente, a dispersão dos poluentes.

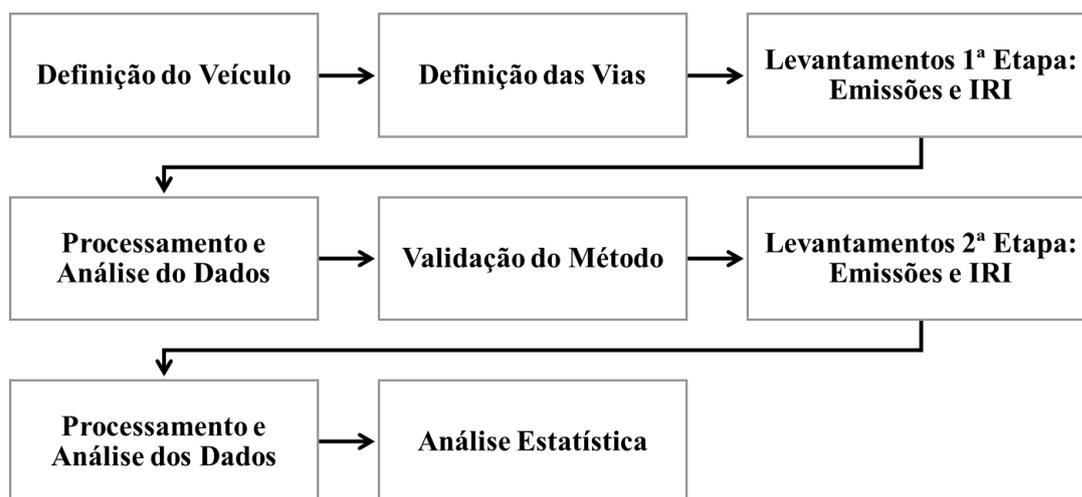
Iniciativas públicas que visam melhorar a qualidade do ar são praticadas em todo o mundo. Na Europa, criaram-se zonas de baixa emissão, proibindo a circulação total de veículos que não cumprissem os limites estabelecidos para os níveis de poluição nas ruas dos centros urbanos (Holman *et al.*, 2015). Alguns países como Áustria, Dinamarca, Alemanha, Holanda e Suécia, padronizam nacionalmente as especificações técnicas (localização, nível de emissão, horários de funcionamento, multas). Outros países como Itália, França e Inglaterra deixam a critério do município determinar as especificações das zonas de baixa emissão no seu território (Holman *et al.*, 2015).

Uma estratégia utilizada por México, Colômbia e Brasil foi restringir a circulação de veículos em determinados dias da semana nas regiões centrais de suas cidades mais desenvolvidas economicamente, respectivamente: Cidade do México, Bogotá e São Paulo. Na cidade de Bogotá por exemplo, as restrições de trânsito tiveram um efeito positivo nas emissões diárias de NO_x e CO, porém não foi percebida redução significativa de SO₂ (Zhang, Lawell e Umanskaya, 2017). Contudo na Cidade do México e em São Paulo alterações significativas dos níveis de emissão de poluentes não foram detectadas. Uma das hipóteses é que houve uma mudança no comportamento das famílias que buscaram comprar um segundo veículo para suprir suas necessidades de deslocamento (Eskeland e Feuzioglu, 1997; Zhang, Lawell e Umanskaya, 2017).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho se caracteriza como pesquisa descritiva com procedimentos técnicos experimentais (Gil, 2002). Para o seu desenvolvimento algumas etapas foram necessárias, a Figura 12 sintetiza as etapas metodológicas realizadas.

Figura 12 – Etapas do Trabalho

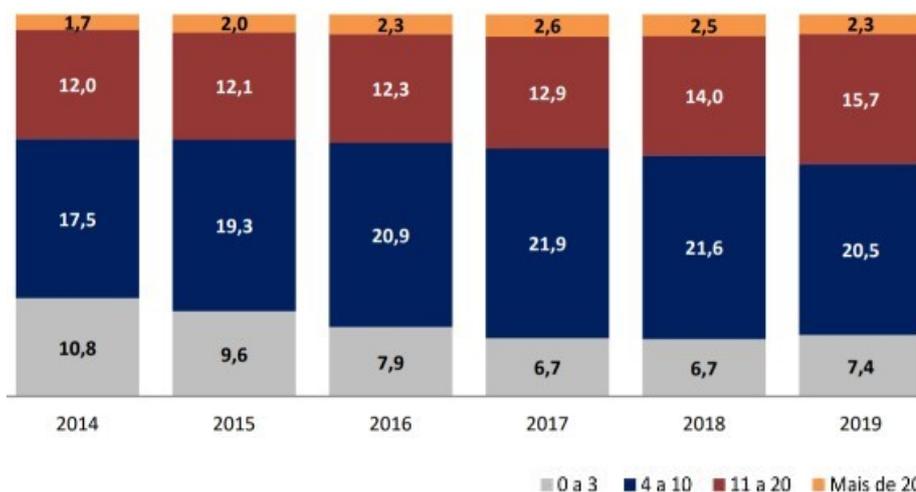


Fonte: Autor

3.1. Veículo utilizado

Os veículos *flex fuel* representam 69,5% da frota circulante no país e, em 2019, a composição média da frota atingiu 9 anos e 8 meses (SINDIPEÇAS, 2020). A Figura 13 mostra a idade média da frota de veículos no Brasil, observar-se um aumento na idade média dos veículos. Esse fenômeno pode ser explicado pela crise econômica instaurada no país.

Figura 13 – Idade média da frota circulante no Brasil em milhões de veículos



Fonte: SINDIPEÇAS (2020)

Como a maior proporção de veículos está na faixa entre os 4 e 10 anos, escolheu-se, para a realização dessa pesquisa, um veículo, ano 2014 (fabricação) da marca Chevrolet, modelo Classic, *flex-fuel*, com motorização 1.0 L. A Tabela 5 apresenta os principais dados técnicos do veículo utilizado no presente estudo.

Tabela 5 – Dados técnicos do veículo de teste

CHEVROLET CLASSIC - MODELO 2015	
Massa (kg)	905
Transmissão	Manual, 5 marchas
Volume do Tanque (L)	54
Consumo (km/L)	Urbano: 7,4 (etanol) / 10,4 (gasolina) Rodoviário: 9,2 (etanol) / 13,0 (gasolina)
Direção	Hidráulica
Suspensão Dianteira	McPherson com barra estabilizadora, roda tipo independente e molas helicoidais
Suspensão Traseira	Eixo de torção com barra estabilizadora, roda tipo independente e molas helicoidais
Certificação	PRONCONVE (L6)

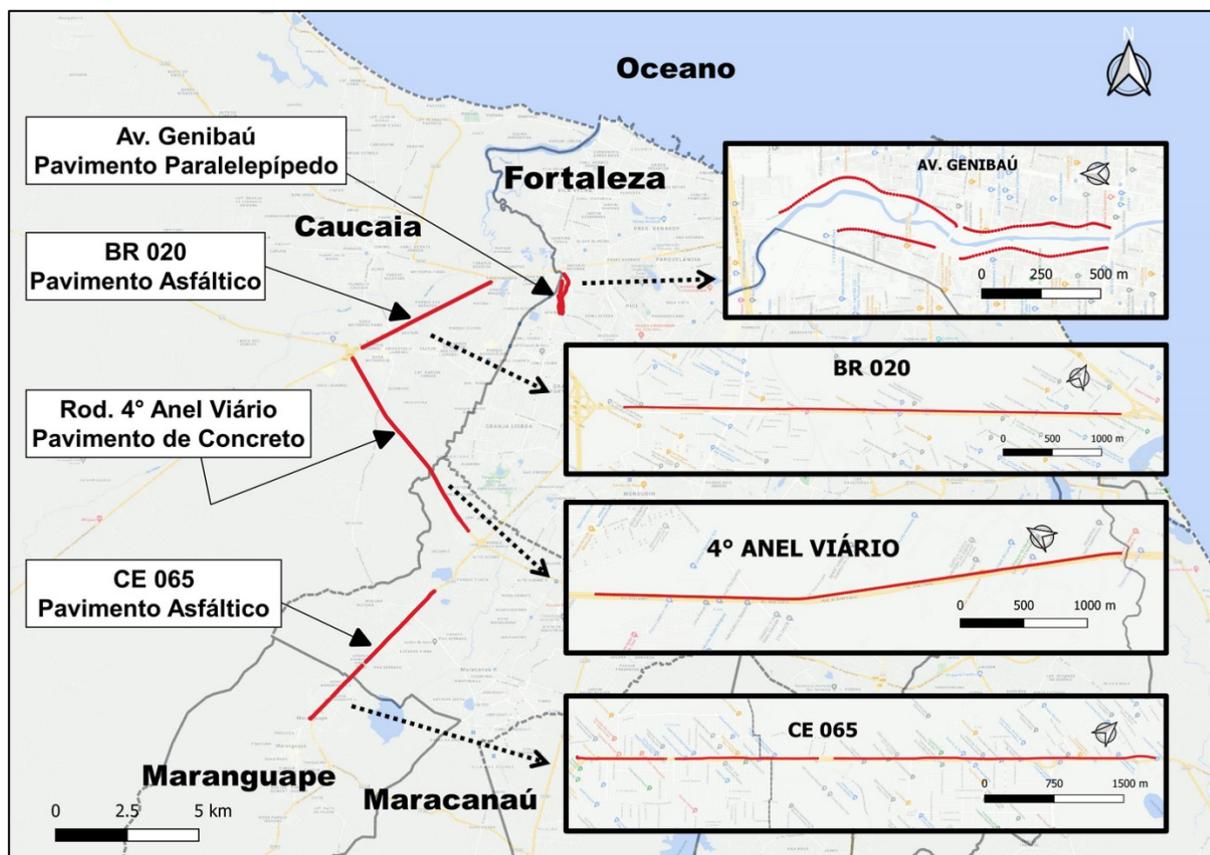
Fonte: Autor

3.2. Trecho das vias analisadas

Inicialmente, foi realizada uma análise subjetiva das possíveis vias, localizadas na Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), que pudessem atender as seguintes premissas: (1) realizar os levantamentos sem interrupção com interseções semaforizadas ou pelo alto fluxo de veículos como sugerido por Rocha (2019) para evitar o *stop and go*; (2) evitar vias com curvas e declividades, pois alteram velocidade do veículo e a potência do motor; (3) buscar vias que o veículo de teste possa atingir uma velocidade média de pelo menos 60km/h; (4) as vias devem possuir trechos de pelo menos 1km disponível para o levantamento; e (5) buscar vias com diferentes tipos de revestimento e qualidade funcional.

As coletas da 1ª etapa de levantamentos foram realizadas em 4 vias: BR 020 (Pavimento Asfáltico); Rod. 4º Anel Viário (Pavimento de Concreto); CE 065 (Pavimento Asfáltico); e Av. Genibaú (Pavimento em Paralelepípedo). Durante o trajeto buscou-se adequar a velocidade usada aos limites máximos permitidos em cada via e sem grandes variações. A Figura 14 mostra a localização dos trechos das vias analisadas. Na 2ª etapa de levantamentos, foram realizadas mais 2 coletas na BR 020 e Rod. 4º Anel Viário.

Figura 14 – Localização das vias analisadas



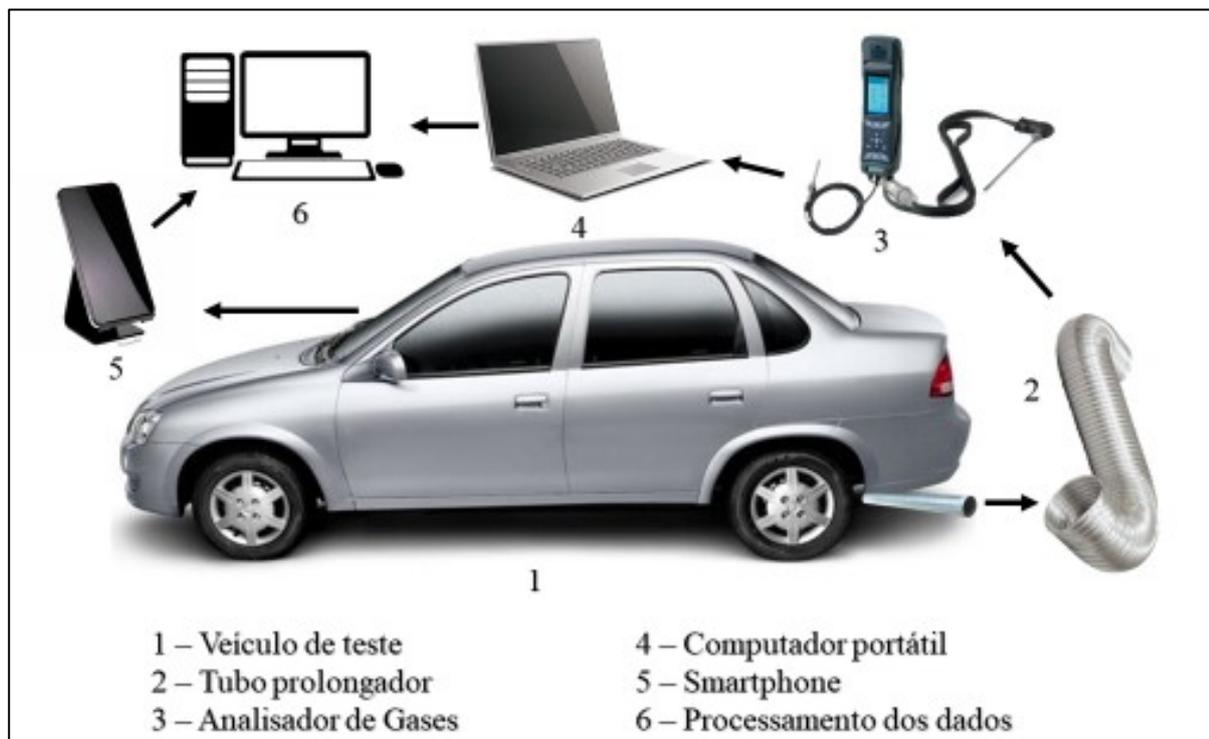
Fonte: Autor.

3.3. Equipamentos utilizados

Este trabalho se propõe a investigar a relação entre as emissões e as condições reais das superfícies dos pavimentos, portanto o método com o equipamento *on-board* atende a essas premissas e foi o escolhido. A utilização do teste de sensoriamento remoto foi descartada pois a análise é realizada de forma pontual e dispersa, assim como o teste de dinamômetro que é realizado em ambiente controlado.

Instalou-se um equipamento portátil de análise de gases (marca: Ecil, modelo: *Chemist 500*) conectado a um tubo prolongador no escapamento do veículo e integrado ao computador portátil. Para análise do IRI, foi utilizado um *smartphone* acoplado no para-brisa do veículo. O esquema de montagem está ilustrado na Figura 15.

Figura 15 – Esquema de montagem do equipamento portátil de coleta de gases e do *smartphone* no veículo de teste



Fonte: Autor

O equipamento portátil de gases utiliza a amostragem ativa, inicialmente aspira os gases produzidos no processo de combustão, através de uma bomba de sucção interna, a partir disso as concentrações dos gases: CO₂, CO, NO, NO_x e SO₂ são analisadas. A obtenção dos dados é fornecida numa frequência de 1Hz, com alta precisão e os dados adquiridos de maneira praticamente instantânea (Frey *et al.*, 2003; Weiss *et al.*, 2011; Cassiano, 2016).

Para georreferenciar a emissão de gases, utilizou-se um aplicativo de GPS para *smartphone* e fez-se uma sincronização de tempo conjuntamente com o analisador portátil de gases. A Figura 16 mostra a interface do aplicativo utilizado *GPS Logger*.

Figura 16 – Interface do aplicativo *GPS Logger*

Fonte: Autor

O aplicativo para *smartphone* utilizado neste trabalho para analisar a irregularidade longitudinal foi o *SmartIRI* desenvolvido por Almeida (2018). O *smartphone* foi instalado em um suporte fixo, como recomendado pelo autor. O aplicativo utiliza os sensores do celular no cálculo do parâmetro baseado em RMS (do inglês, *Root Mean Square*) (Almeida, 2018). O aplicativo fornece os dados brutos de IRI e a sua respectiva classificação, latitude, longitude, distância percorrida, velocidade média e o horário da coleta (formatos: .csv, .pdf, .kml). A Figura 17 mostra a interface do aplicativo.

Figura 17 – Interface do aplicativo *SmartIRI*

Fonte: Autor

3.4. Processamento e análise dos dados obtidos

Os dados obtidos a partir do uso do analisador de gases são dispostos em ppm e foram convertidos em g/s através das Equações (6) e (7), respectivamente:

De ppm para g/L:

$$ppm \cdot 0,001 = \frac{g}{L} \quad (6)$$

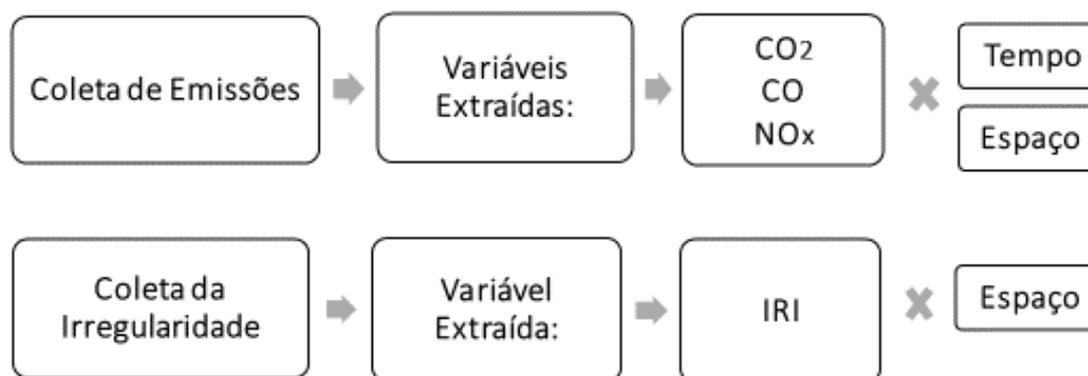
De g/L para g/s:

$$\frac{g}{s} = \frac{g}{L} \cdot \left(\frac{L}{s}\right)_i \quad (7)$$

i = fluxo instantâneo do gás de escape

Posteriormente, as médias de emissões foram agrupadas por trechos de aproximadamente 100m para compatibilizar com os valores de IRI obtidos através do uso do aplicativo *SmartIRI*. A Figura 18 apresenta as etapas realizadas para a obtenção dos dados analisados.

Figura 18 – Fluxo de obtenção dos dados a serem analisados



Fonte: Autor

Na determinação da classificação do IRI, utilizou-se a classificação proposta por Almeida (2018). A Tabela 6 apresenta a classificação utilizada pelos desenvolvedores que se assemelha à proposta do HDM-4 (PIARC, 2010).

Tabela 6 – Classificação da qualidade da Rodovia através do IRI

HDM-4		<i>SmartIRI</i>		
Classificação	IRI (m/km)	Classificação	IRI (m/km)	Legenda
Boa	$0 < \text{IRI} < 2$	Excelente	$0 < \text{IRI} < 2$	
Regular	$2 \leq \text{IRI} < 4$	Bom	$2 \leq \text{IRI} < 4$	
Ruim	$4 \leq \text{IRI} < 6$	Regular	$4 \leq \text{IRI} < 6$	
Péssimo	$6 \leq \text{IRI}$	Ruim	$6 \leq \text{IRI}$	

Fonte: Adaptado de Almeida (2018)

Para a apresentação dos resultados, foi realizada uma análise com o uso de estatística descritiva para todas as variáveis (Velocidade média, IRI e Emissões de CO₂, CO e NO_x). Para os dados da 1ª Etapa de levantamentos, inicialmente realizaram-se testes de normalidades Shapiro-Wilk (Shapiro e Wilk, 1965) para todas as variáveis e testes não-paramétrico Kruskal-Wallis (Kruskal e Wallis, 1952) para avaliar se as amostras pertenciam a uma mesma população. Em seguida realizou-se a correlação de Spearman (ρ) (Spearman, 1904) entre as variáveis IRI e Emissões de CO₂, CO e NO_x.

Para os dados da 2ª Etapa de levantamentos, dispensou-se o uso de teste de normalidade de acordo com o Teorema do Limite Central (Devore, 2006). Em seguida, realizaram-se testes de hipóteses (ANOVA) para as médias das variáveis: Velocidade média, IRI e Emissões de CO₂, CO e NO_x, para avaliar se pertenciam a uma mesma população. Em seguida, apresentaram-se as emissões distribuídas no tempo e espaço. Posteriormente, realizou-se uma dispersão dos dados de IRI e emissões dos gases, bem como uma análise de correlação de Pearson (R). Por fim, apresentaram-se as emissões médias por quilômetro e compararam-se com os limites permitidos pela norma brasileira, e, no caso de CO₂, com as normas europeias e norte-americanas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos na 1ª e 2ª Etapa de levantamentos, preliminares e posteriores, à validação das premissas e do método. Inicialmente, fez-se uma análise estatística descritiva e teste de normalidade às variáveis: Velocidade Média (km/h), IRI (m/km) e Emissões de CO₂, CO e NO_x (g/s). Utilizou-se um teste não-paramétrico para comparar se há diferenças significativas entre as amostras de IRI e Emissões, respectivamente. Em seguida, são apresentados os resultados de correlação entre as variáveis IRI e Emissões. Posteriormente, além da análise descrita, somente para os dados da 2ª Etapa de levantamentos, serão mostrados os resultados emissões de CO₂, CO e NO_x no tempo. Em seguida, faz-se um teste de comparação entre pares às amostras de emissões. Por fim, são expostas as médias de emissão média dos gases nas vias por quilômetro (g/km).

4.1. Levantamentos de campo: 1ª Etapa

Como mencionado na seção 3.2, foram realizados, inicialmente, levantamentos em 4 vias. Cada via recebeu um código representando o tipo de revestimento (A-Asfáltico; C-Concreto; ou P-Paralelepípedo), o sentido do levantamento (0-Ida; ou 1-Volta) e o nome da via (A-Rod. 4º Anel Viário; B-BR 020; C-CE065; ou G-Av. Genibaú) conforme mostrado na Tabela 7. Ressalta-se que tanto na CE 065 quanto na Av. Genibaú não foi possível realizar as coletas no sentido de volta, pois estas não atendiam às premissas iniciais.

Tabela 7 – Atributos das vias levantadas

Revestimento	Sentido	Via	Código	Extensão (m)
Pavimento Asfáltico	Ida-0	BR 020	A0B	5.010
	Volta-1		A1B	5.493
	Ida-0	CE 065	A0C	3.093
	Volta-1	Rod. 4º Anel Viário	A1A	4.145
Ida-0	C0A		3.871	
Pavimento Paralelepípedo	Ida-0	Av. Genibaú	P0G	2.851

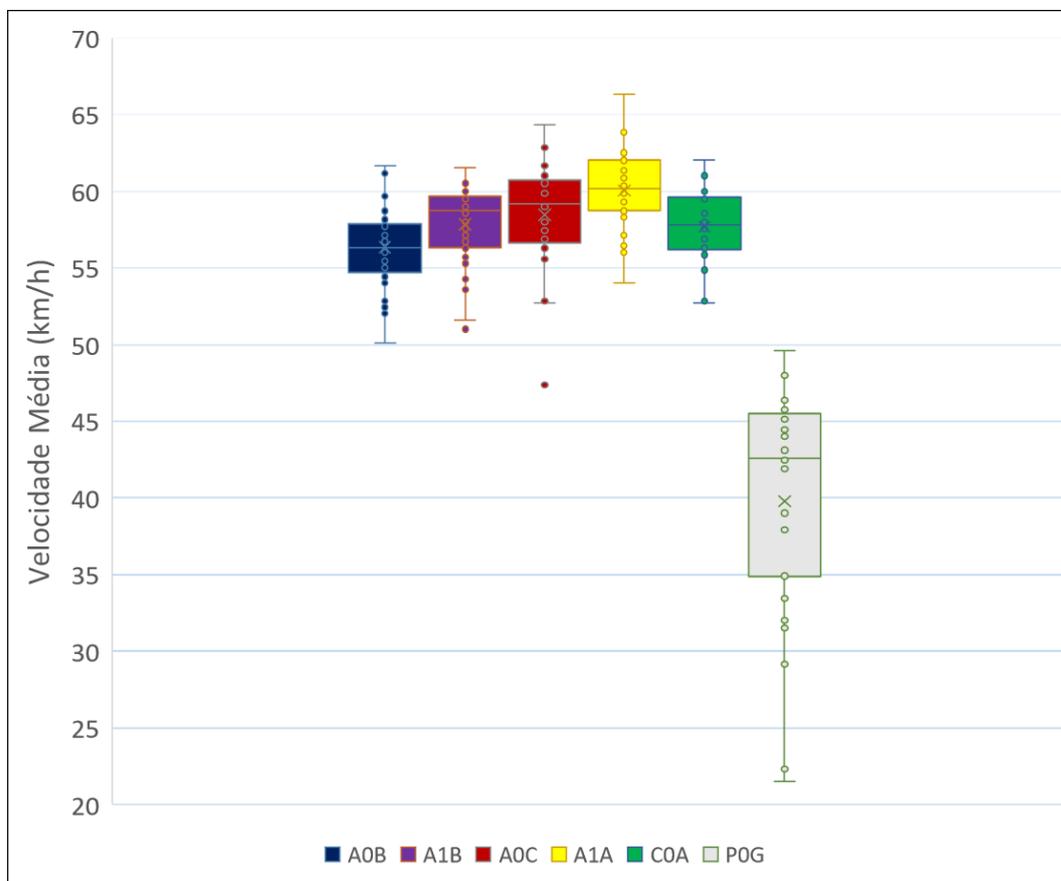
Fonte: Autor

4.1.1. Velocidade média percorrida

Como premissa mencionada anteriormente, buscou-se realizar as análises com velocidades constantes, com valores próximos de 60km/h. A Figura 19 exhibe as velocidades médias desenvolvidas por trecho em todas as vias do estudo por meio do diagrama de caixas

(do inglês, *boxplot*). A Tabela 8 sintetiza a média e desvio padrão amostral das velocidades médias desenvolvidas em cada trecho das vias analisadas.

Figura 19 – *Boxplot*: Velocidade Média (km/h)



Fonte: Autor

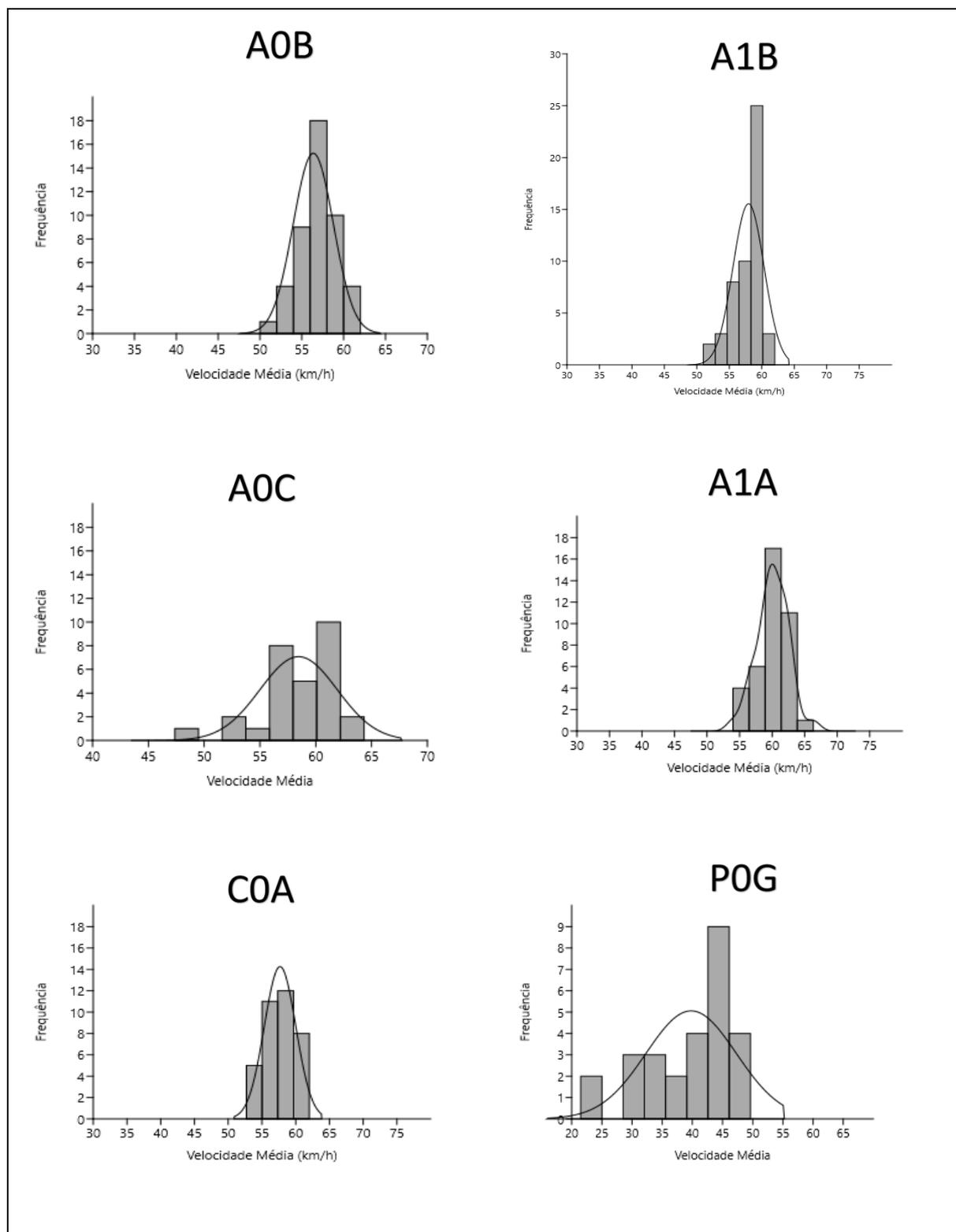
Tabela 8 – Média e desvio padrão: Velocidade média (km/h)

	A0B	A1B	A0C	A1A	C0A	P0G
Média (km/h)	56	58	58	60	58	40
Desvio Padrão (km/h)	2,36	2,35	3,47	2,42	2,34	7,48
Nº observações	46	50	29	39	36	24

Fonte: Autor

Observa-se que em P0G houve o maior desvio padrão e não foi possível atender a premissa de velocidade próximo a 60km/h como nas demais vias. Nesta via, o revestimento em paralelepípedo gera um desconforto ao rolamento quando se tenta alcançar tal velocidade. No levantamento A0C nota-se um desvio padrão 46% maior que média dos seus pares, provavelmente devido à presença de duas rotatórias no trajeto. Para compreender como estão distribuídos os dados, elaborou-se um histograma ilustrado na Figura 20.

Figura 20 – Histograma: Velocidade Média (km/h)



Fonte: Autor

Visualmente, a partir do histograma, as vias A0B, A1B, A1A e C0A se assemelham a uma distribuição normal. Para melhorar a avaliação na distribuição dos dados, realizou-se um

teste de normalidade Shapiro-Wilk (Shapiro e Wilk, 1965) com a hipótese nula (H_0) de normalidade na distribuição dos dados. Os resultados estão dispostos na Tabela 9.

Tabela 9 – Teste de normalidade Shapiro-Wilk: Velocidade Média (km/h)

	A0B	A1B	A0C	A1A	C0A	P0G
Teste	0,9801	0,9073	0,9171	0,9846	0,9672	0,8867
valor-p	0,6103	0,0007	0,0257	0,8622	0,3529	0,0067
H₀	Não-rejeita	Rejeita	Rejeita	Não-rejeita	Não-rejeita	Rejeita

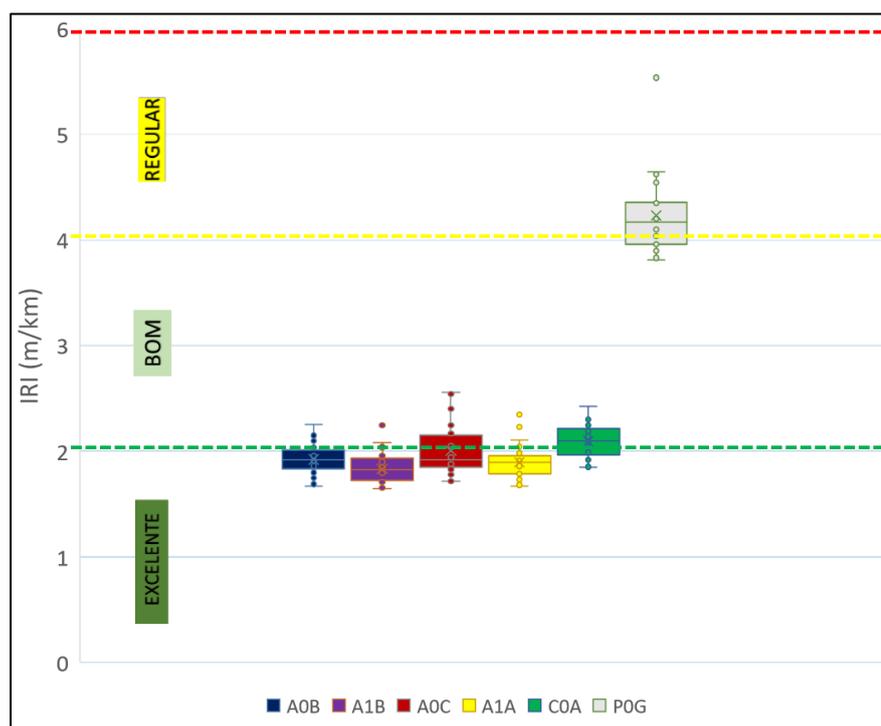
Fonte: Autor

Assim, como já esperado, as vias A0B, A1A e C0A não tiveram sua hipótese nula rejeitada, ou seja, não se pode rejeitar a hipótese de os dados seguirem uma distribuição normal. A1B teve sua hipótese nula rejeitada, logo os dados não seguem uma distribuição normal como esperado a partir da análise do histograma. A0C e P0G tiveram sua hipótese nula rejeitada também, assim como esperado a partir da análise pelo histograma.

4.1.2. *A irregularidade longitudinal das vias*

Na avaliação da condição funcional (qualidade) das vias foi coletado o IRI para análise da irregularidade longitudinal. A Figura 21 apresenta o gráfico *boxplot* e a Tabela 10 os valores de média, desvio padrão, valor máximo, valor mínimo e número de observações dos resultados de IRI.

Figura 21 – *Boxplot*: IRI (m/km)



Fonte: Autor

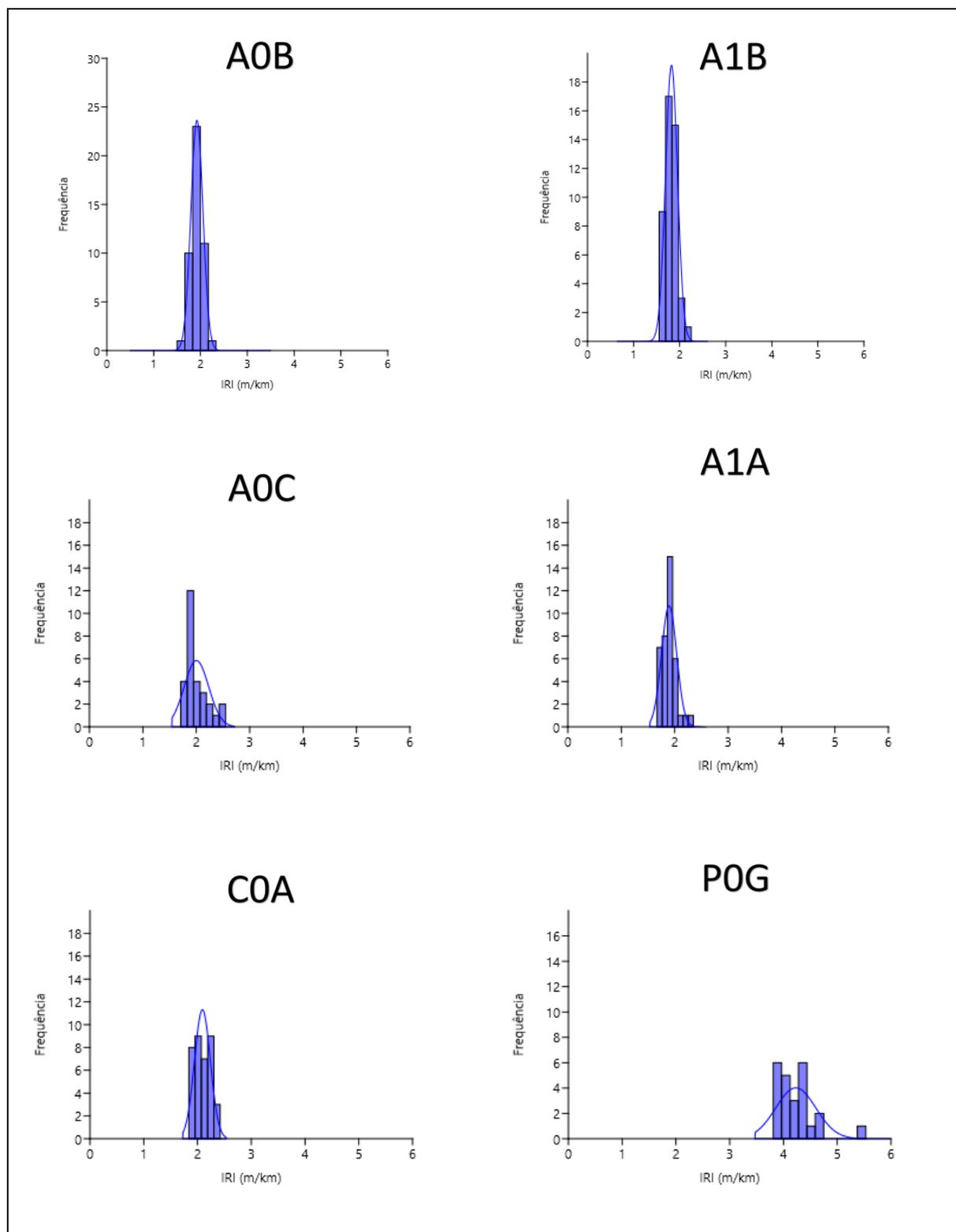
Tabela 10 – Dados estatísticos descritivos: IRI (m/km)

	A0B	A1B	A0C	A1A	C0A	P0G
Média (m/km)	1,92	1,83	2,00	1,89	2,09	4,22
Valor Máximo (m/km)	2,26	2,25	2,55	2,35	2,42	5,53
Valor Mínimo (m/km)	1,66	1,65	1,71	1,67	1,84	3,81
Desvio Padrão (m/km)	0,129	0,134	0,229	0,142	0,147	0,372
Nº observações	46	50	29	39	36	24

Fonte: Autor

Percebe-se, novamente, uma discrepância dos dados da via P0G com as demais vias. Como esperado, esta via apresentou as piores condições de irregularidade longitudinal pelo fato de possuir o seu revestimento em Paralelepípedo. Pela classificação de Almeida (2018), utilizando as médias, as vias: A0B, A1B, A0C e A1A são classificadas, de acordo com o IRI, como “Excelente”, a via C0A como “Bom” e a P0G como “Regular”. Para entender como os dados estão distribuídos, elaborou-se o histograma a partir dos dados de IRI como pode ser visto na Figura 22.

Figura 22 – Histograma: IRI (m/km)



Fonte: Autor

A partir do histograma, percebe-se que apenas a via A0B tem semelhança com a curva de distribuição normal. A partir disso, realizou-se um teste de normalidade Shapiro-Wilk (Shapiro e Wilk, 1965), com a hipótese nula (H_0) de normalidade na distribuição dos dados no

intuito de entender como estão distribuídos os dados, e os resultados estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Teste de normalidade Shapiro-Wilk: IRI (m/km)

	A0B	A1B	A0C	A1A	C0A	P0G
Teste	0,9853	0,9419	0,8851	0,9369	0,9672	0,8375
valor-p	0,8206	0,0159	0,005	0,030	0,5748	0,0067
H₀	Não-rejeita	Rejeita	Rejeita	Rejeita	Não-rejeita	Rejeita

Fonte: Autor

A partir dessa análise, pode-se concluir que apenas os dados das vias A0B e C0A seguem uma distribuição normal. Como a premissa de normalidade não foi atendida para todas as amostras, optou-se pelo teste não-paramétrico proposto por Kruskal-Wallis (Kruskal e Wallis, 1952). A hipótese nula do teste é que as diferenças medianas entre as amostras não são significativas, os resultados do valor-p dos testes podem ser observados na Tabela 12.

Tabela 12 – Teste não-paramétrico de Kruskal-Wallis: IRI (m/km)

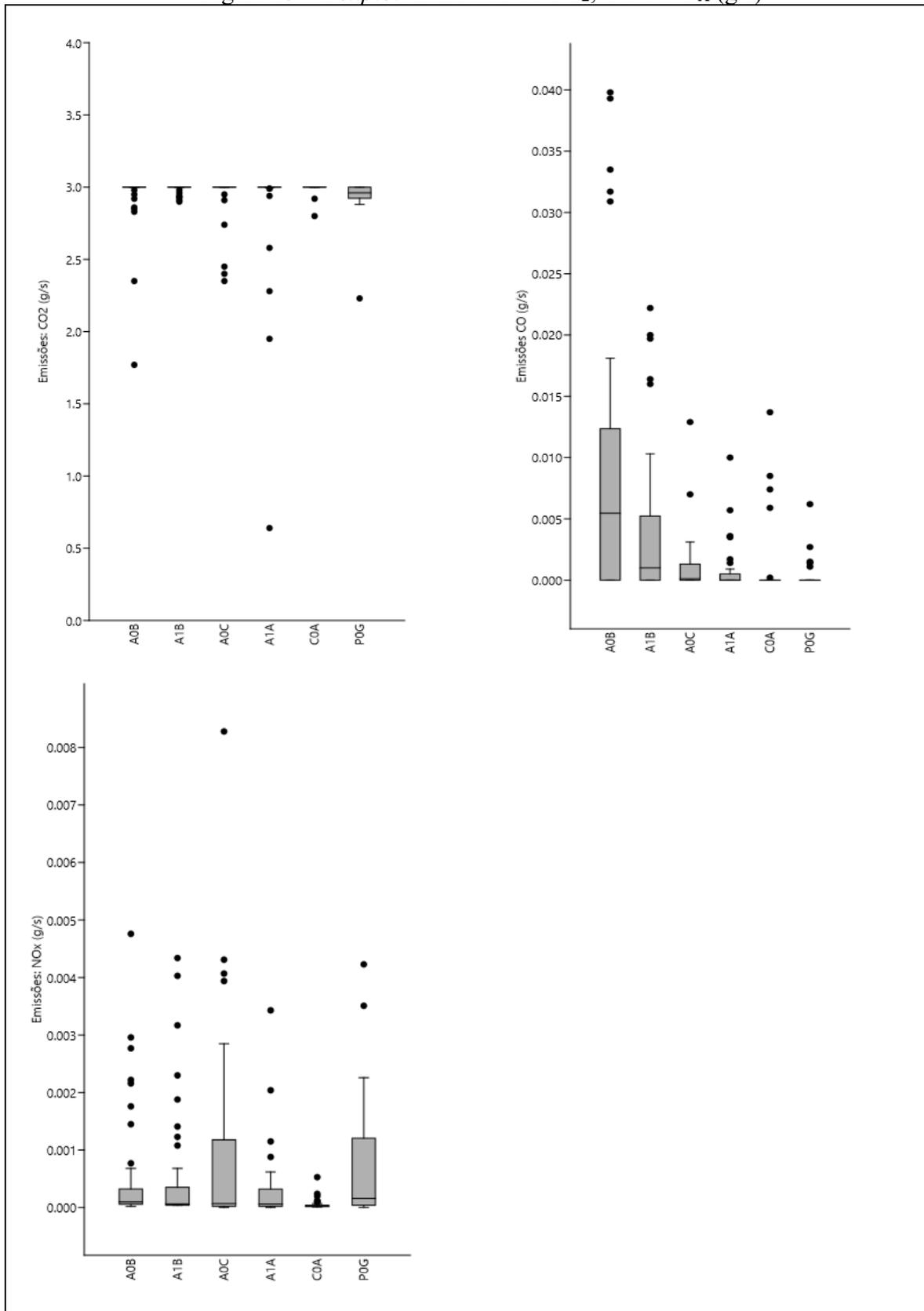
	A0B	A1B	A0C	A1A	C0A	P0G
A0B		Rejeita	Não-Rejeita	Não-Rejeita	Rejeita	Rejeita
A1B	0,0068		Rejeita	Não-Rejeita	Rejeita	Rejeita
A0C	0,4122	0,0015		Não-Rejeita	Rejeita	Rejeita
A1A	0,3599	0,0983	0,1100		Rejeita	Rejeita
C0A	0,0001	0,0000	0,0181	0,0000		Rejeita
P0G	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0004	

Fonte: Autor

A via A1A não apresentou diferença significativas entre as medianas em relação às outras vias com o mesmo revestimento (A0B, A1B e A0C). As vias C0A e P0G apresentaram diferenças significativas entre elas e com todas as amostras analisadas. Esses resultados corroboram na afirmação que o IRI é diferente entres os 3 tipos de revestimentos analisados.

4.1.3. As emissões de CO₂, CO e NO_x

Os gases analisados foram agrupados por trechos de aproximadamente 100 metros (os mesmos trechos do IRI) e calculado seus valores médios de emissão em grama por segundo (g/s). Elaborou-se um gráfico tipo *boxplot* para apresentação inicial dos dados, como pode ser visualizado na Figura 23. Os valores de média, desvio padrão, valor máximo, valor mínimo e o número de observações foram calculados e estão apresentados na Tabela 13. Ressalta-se que os valores de CO e NO_x estão apresentados na Tabela 13 em miligrama por segundo (mg/s) e o de CO₂ em g/s.

Figura 23 – *Boxplot*: Emissões de CO₂, CO e NO_x (g/s)

Fonte: Autor

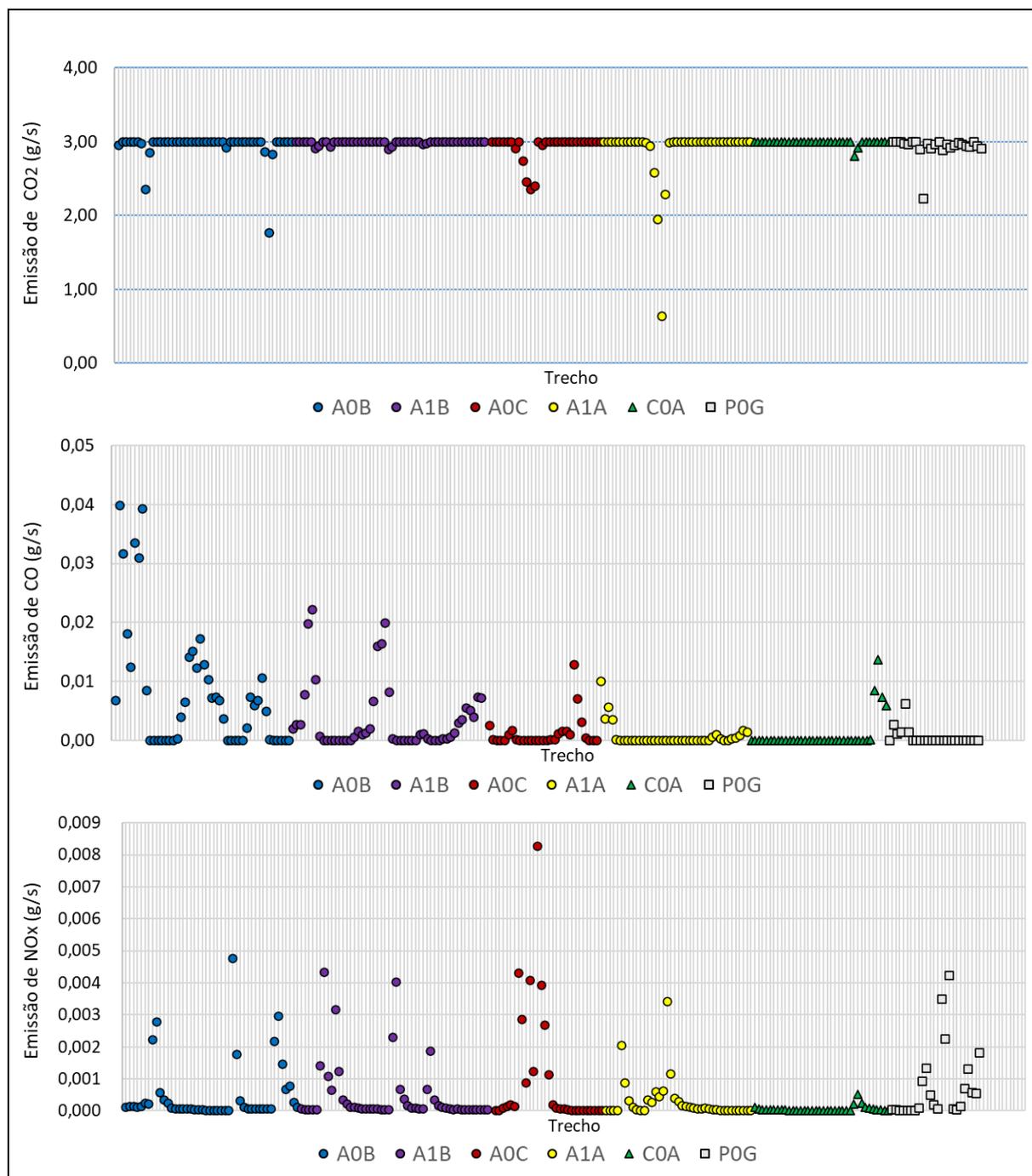
Tabela 13 – Dados estatísticos descritivos: Emissões de CO₂, CO e NO_x

Emissões	Parâmetros	A0B	A1B	A0C	A1A	C0A	P0G
CO₂	Média (g/s)	2,94	2,99	2,92	2,88	2,99	2,93
	Valor Máx. (g/s)	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
	Valor Mín.(g/s)	1,77	2,90	2,35	0,64	2,80	2,23
	Desv. Pad. (g/s)	0,030	0,003	0,035	0,068	0,006	0,031
CO	Média (mg/s)	8,18	3,66	1,18	0,76	0,99	0,54
	Valor Máx. (mg/s)	39,8	22,2	12,9	10,0	13,7	6,2
	Valor Mín.(mg/s)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Desv. Pad. (mg/s)	1,611	0,819	0,498	0,310	0,499	0,283
NO_x	Média (mg/s)	0,512	0,499	1,051	0,304	0,058	0,765
	Valor Máx. (mg/s)	4,76	4,34	8,28	3,43	0,53	4,23
	Valor Mín.(mg/s)	0,02	0,04	0,00	0,00	0,01	0,00
	Desv. Pad. (mg/s)	0,145	0,140	0,362	0,104	0,016	0,234
Nº observações		46	51	29	39	36	27

Fonte: Autor

Os valores máximos de emissão de CO₂ foram de 3,0 g/s, e os valores mínimos de emissão de CO chegaram a 0,0 g/s, em todas as vias analisadas. Esperava-se que as emissões mínimas de NO_x também fossem de 0,0 g/s, em alguns trechos, em todas as vias estudadas. A via A0B possui a maior média de emissão de CO, e a A0C, a maior emissão média de NO_x. Esperava-se um pico de emissões de CO e NO_x em P0G devido às maiores amplitudes nos resultados de velocidade média desta via, porém isto não ocorreu.

No intuito de compreender como estão distribuídas as emissões ao longo dos percursos, elaborou-se um gráfico de emissões (g/s) por trecho. Os resultados estão apresentados na Figura 24.

Figura 24 – Emissões médias por trecho: CO₂, CO e NO_x (g/s)

Fonte: Autor

Na emissão de CO₂ percebe-se uma constância nos valores próximos a 3,0 g/s com variações decrescente em poucos pontos durante a análise em todas as vias. Em CO, percebe uma variação de emissão maior em A0B e A1B, justificando os valores de desvio padrão dessas vias serem o triplo das demais. Nas emissões de NO_x, encontrou-se um comportamento parecido em todas as vias, com exceção da C0A que teve um valor máximo de 15% em comparação ao segundo menor valor máximo, em A1A.

Para analisar se os dados de emissões seguiam uma distribuição normal, realizou-se um teste de normalidade Shapiro-Wilk (Shapiro e Wilk, 1965), com a hipótese nula (H_0) de normalidade na distribuição dos dados. Os resultados estão dispostos na Tabela 14.

Tabela 14 – Teste de normalidade Shapiro-Wilk: Emissões de CO₂, CO e NO_x

Gás		A0B	A1B	A0C	A1A	C0A	P0G
CO ₂	Teste	0,2938	0,4193	0,4571	0,3199	0,2332	0,4181
	valor-p	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	H0	Rejeita	Rejeita	Rejeita	Rejeita	Rejeita	Rejeita
CO	Teste	0,7495	0,6745	0,4967	0,4582	0,3814	0,4582
	valor-p	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	H0	Rejeita	Rejeita	Rejeita	Rejeita	Rejeita	Rejeita
NO _x	Teste	0,5545	0,5297	0,6104	0,5049	0,4683	0,7092
	valor-p	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	H0	Rejeita	Rejeita	Rejeita	Rejeita	Rejeita	Rejeita

Fonte: Autor

Todos os gases tiveram suas hipóteses nulas rejeitadas, então há indícios para afirmar que os dados de emissões não seguem uma distribuição normal. Para avaliar se as diferenças medianas entre as amostras são significativas utilizou-se o teste não-paramétrico proposto por Kruskal-Wallis (Kruskal e Wallis, 1952). Os resultados do valor-p dos testes estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 – Teste não-paramétrico de Kruskal-Wallis: Emissões de CO₂, CO e NO_x

		A0B	A1B	A0C	A1A	C0A	P0G
CO ₂	A0B		Não-Rejeita	Não-Rejeita	Não-Rejeita	Não-Rejeita	Rejeita
	A1B	0,5667		Não-Rejeita	Não-Rejeita	Não-Rejeita	Rejeita
	A0C	0,6667	0,3478		Não-Rejeita	Não-Rejeita	Rejeita
	A1A	0,9664	0,5547	0,7047		Não-Rejeita	Rejeita
	C0A	0,1787	0,4045	0,1077	0,1821		Rejeita
	P0G	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	
	CO	A0B		Não-Rejeita	Rejeita	Rejeita	Rejeita
A1B		0,4093		Não-Rejeita	Rejeita	Rejeita	Rejeita
A0C		0,0097	0,0566		Não-Rejeita	Rejeita	Não-Rejeita
A1A		0,0000	0,0010	0,2961		Não-Rejeita	Não-Rejeita
C0A		0,0000	0,0000	0,0357	0,2465		Não-Rejeita
P0G		0,0000	0,0003	0,1027	0,4543	0,7796	
NO _x		A0B		Não-Rejeita	Não-Rejeita	Rejeita	Rejeita
	A1B	0,9352		Não-Rejeita	Rejeita	Rejeita	Não-Rejeita
	A0C	0,3691	0,3253		Não-Rejeita	Rejeita	Não-Rejeita
	A1A	0,0394	0,0296	0,3372		Rejeita	Não-Rejeita
	C0A	0,0000	0,0001	0,0035	0,0325		Rejeita
	P0G	0,9514	0,9960	0,4080	0,0739	0,0003	

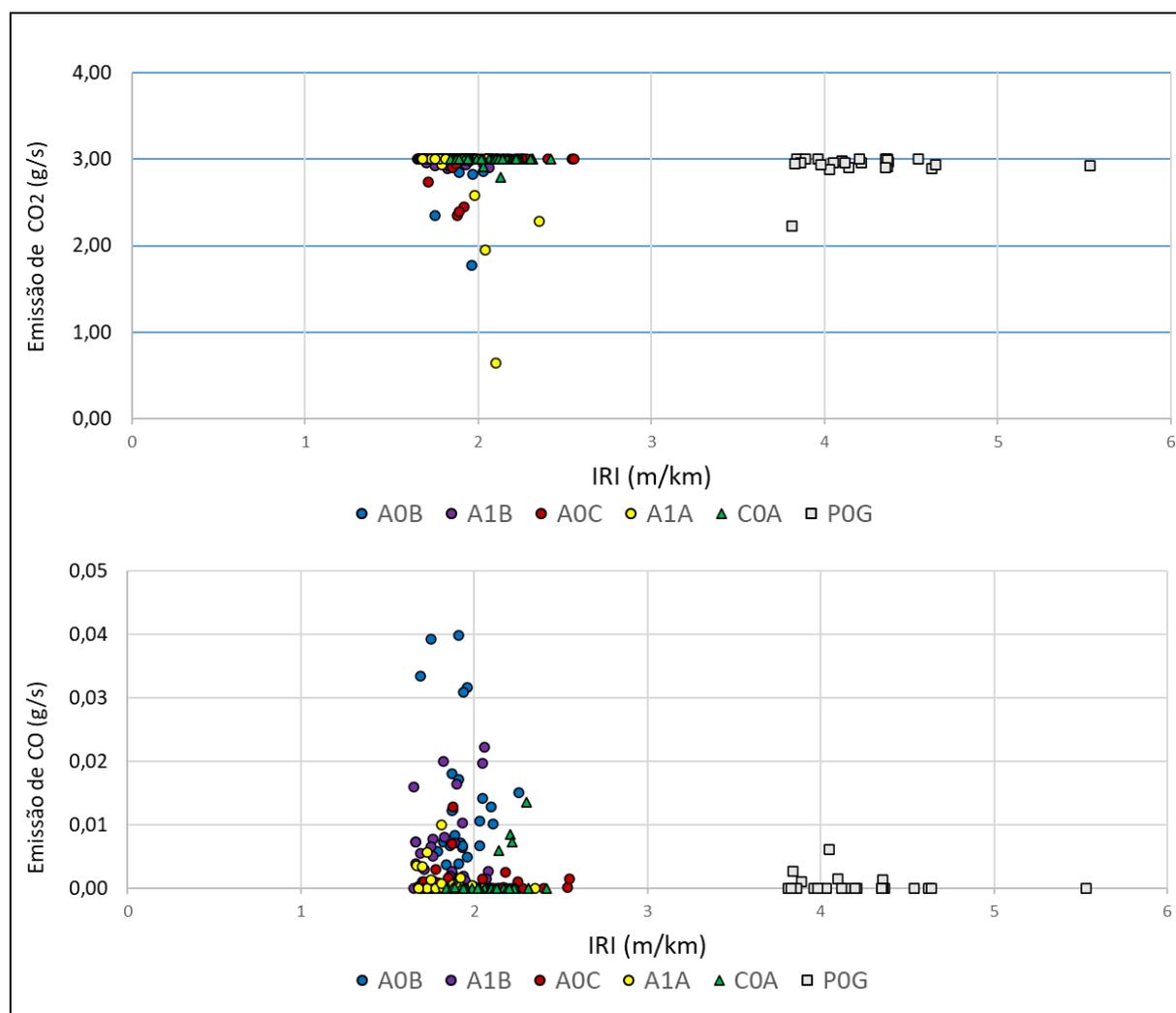
Fonte: Autor

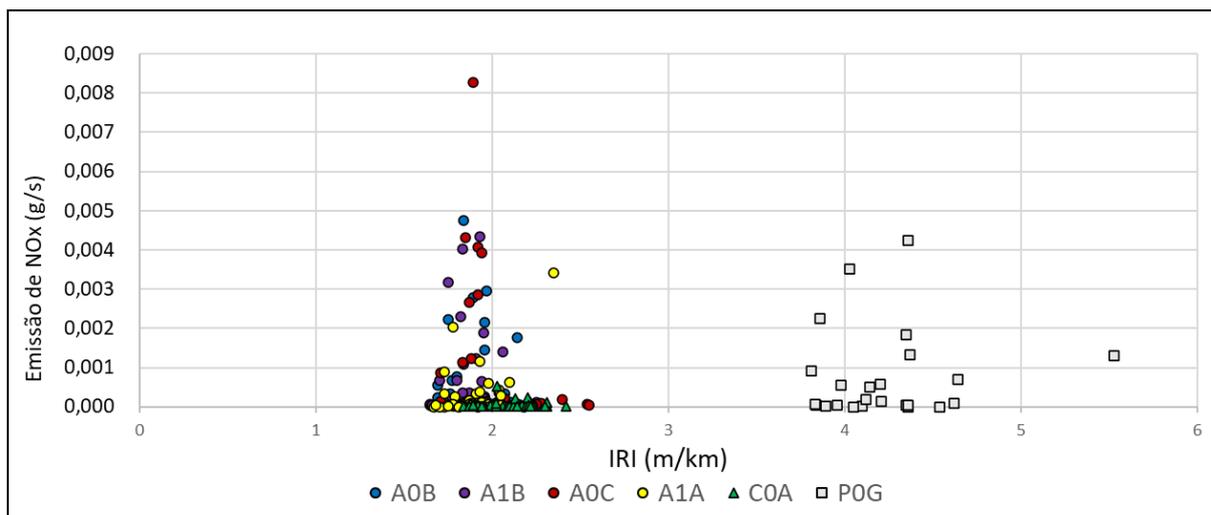
Para o CO₂ houve rejeição da hipótese nula em todas as comparações com a via P0G. Isto indica que a via revestida em Paralelepípedo possui um nível de emissão de CO₂ diferente das demais vias. Em relação as emissões de CO, não houve rejeição da hipótese nula entre as vias A1A, C0A e P0G, ou seja, não se pode afirmar que os diferentes tipos de revestimentos impactam em um nível de emissões de CO distintos. A via C0A apresentou diferenças nas emissões de NO_x em todas as comparações com as demais vias, ou seja, os níveis de emissões de NO_x realmente são mais baixos em comparação aos demais.

4.1.4. *Correlação entre as variáveis: IRI vs emissões de CO₂, CO e NO_x*

Inicialmente, para comparar se o IRI impacta nos níveis de emissões de CO₂, CO e NO_x, elaborou-se um gráfico de dispersão entre os dados. Os resultados estão dispostos na Figura 25.

Figura 25 – Dispersão dos dados: IRI vs CO₂, CO e NO_x





Fonte: Autor

Como a hipótese nula de normalidade foi rejeitada para todos os gases, em todas as vias, então para avaliar a correlação entre o IRI e as Emissões utilizou-se o coeficiente de correlação de Spearman (ρ) (Spearman, 1904). Os resultados estão apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 – Correlação de Spearman (ρ): IRI vs CO₂, CO e NO_x

Via		CO ₂	CO	NO _x
A0B	IRI	-0,05	-0,04	-0,16
A1B		-0,11	0,03	0,34
A0C		0,30	-0,03	-0,13
A1A		-0,39	-0,35	0,35
C0A		0,01	0,22	0,09
P0G		-0,04	-0,27	0,08
Total		-0,21	-0,23	-0,04

Fonte: Autor

No geral, houve uma fraca correlação entre os dados $\rho < 30$. Para a via A1A a correlação foi moderada $30 < \rho < 50$ (Cohen, 1992). Logo, para os dados analisados, o IRI não contribuiu para o aumento nos níveis de emissões como se esperava inicialmente.

4.2. Levantamentos de campo: 2ª Etapa

Após análise dos resultados preliminares e discussão do método, realizou-se outra etapa de levantamentos. Nesta etapa, buscou-se comparar duas vias com valores de IRI próximos, porém com características superficiais distintas, uma via em revestimento asfáltico e outra em revestimento de concreto.

Nesta análise, foram comparados 3 levantamentos para cada via, BR 020 – Ida e Rod. 4º Anel viário - Ida. Nestas vias foi possível atender totalmente as premissas iniciais

estipuladas. Cada via recebeu um código representando o tipo de revestimento (C-Concreto ou A-Asfáltico) e a ordem do levantamento (01, 02 ou 03), conforme mostrado na Tabela 17.

Tabela 17 – Atributos das vias levantadas

Amostra	Via	Revestimento	Código	Extensão (m)
01	Rod. 4º Anel Viário	Concreto de cimento Portland (C)	C01	3.871
02			C02	7.367
03			C03	6.929
01	BR 020	Pavimento Asfáltico (A)	A01	5.010
02			A02	5.037
03			A03	5.060

Fonte: Autor

Ressalta-se que, além da premissa de velocidade aproximadamente constante, buscou-se levantar a mesma quantidade de trechos, ou seja, uma extensão similar em todos os levantamentos. Contudo, na primeira análise realizada na Rodovia 4º Anel Viário (C01) não foi possível realizar o levantamento em toda a extensão útil da via devido a existência de barreiras de contenção.

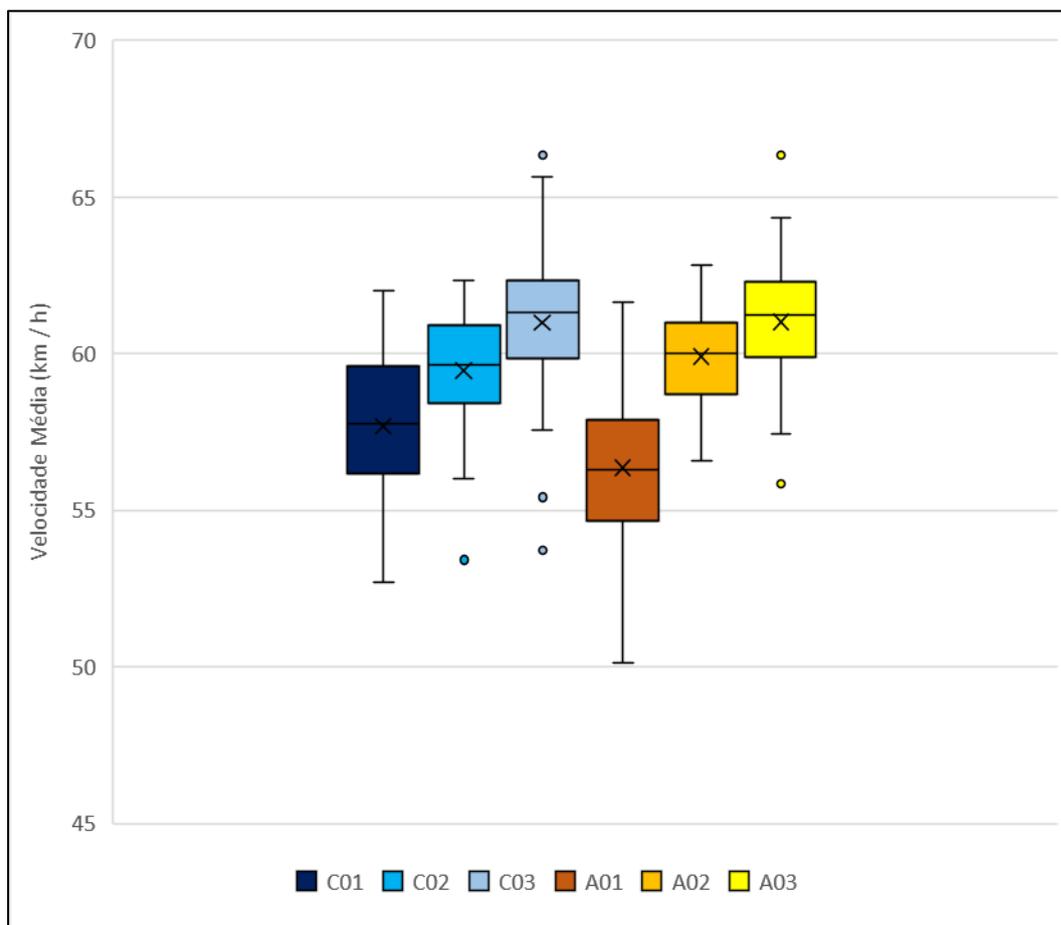
4.2.1. *Velocidade média percorrida*

Como premissa, já mencionada anteriormente, buscou-se realizar as análises com velocidades constantes, com valores próximos a 60km/h. A Tabela 18 exibe as médias, os valores máximos e mínimos, os desvios padrões amostrais e o coeficiente de variação das velocidades médias desenvolvidas no levantamento. Na Figura 26 é possível visualizar o *boxplot* representando os dados de velocidade média por trecho em todas as vias avaliadas.

Tabela 18 – Dados estatísticos descritivos: Velocidade Média (km/h)

	C01	C02	C03	A01	A02	A03
Média (km/h)	57,7	59,5	61,0	56,4	59,9	61,0
Valor Máx. (km/h)	62,0	62,3	66,3	61,7	62,8	66,3
Valor Mín. (km/h)	52,7	53,4	53,7	50,1	56,6	55,9
Desv. Pad. (km/h)	2,33	1,64	2,16	2,36	1,57	1,85
Coef. Var. (%)	4,04	2,75	3,53	4,20	2,61	3,03
Nº observações	36	69	66	46	47	48

Fonte: Autor

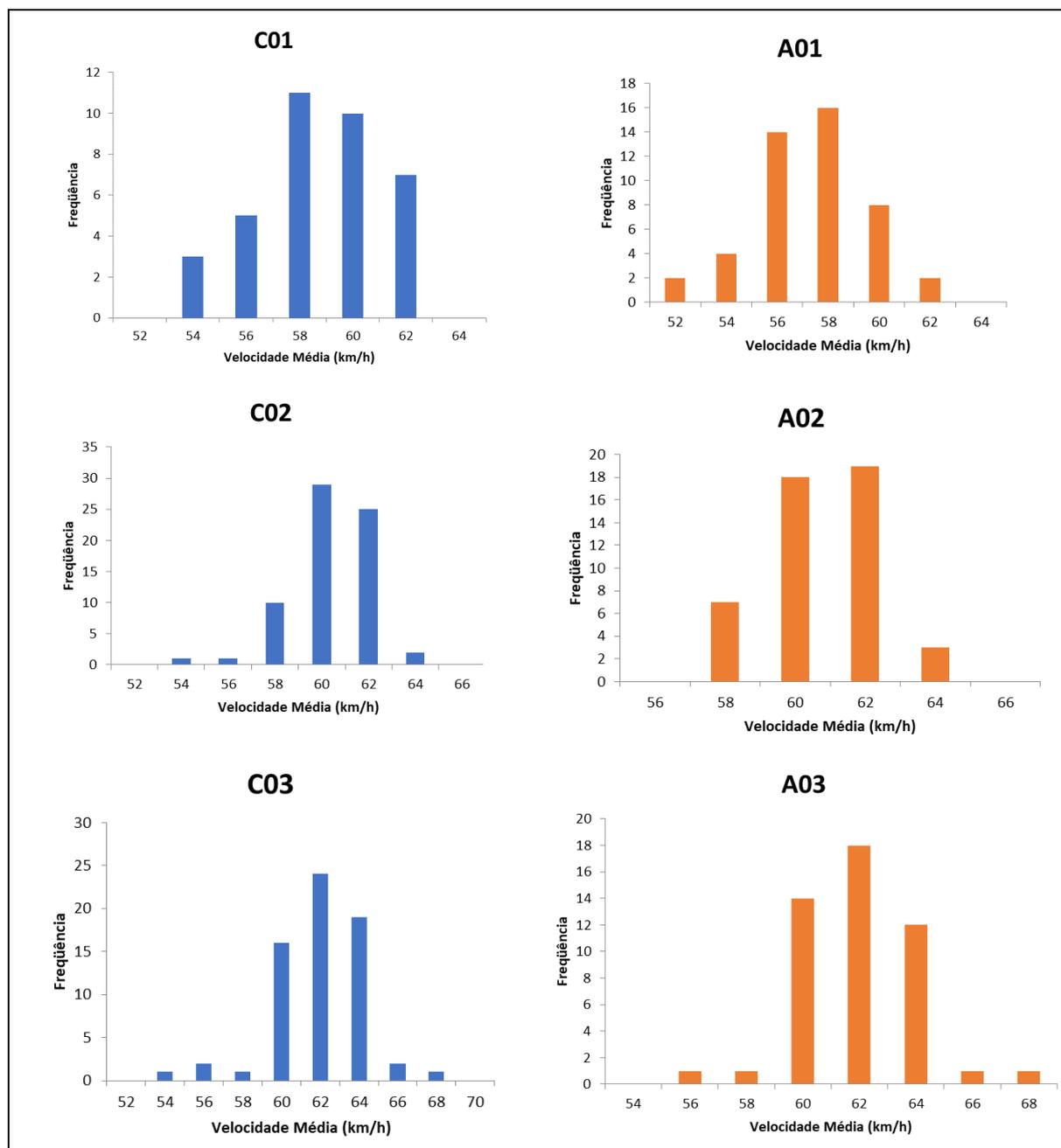
Figura 26 – *Boxplot*: Velocidade Média (km/h)

Fonte: Autor

Observa-se que nos primeiros levantamentos, C01 e A01, as velocidades médias ficaram levemente abaixo, 4% e 6%, respectivamente, de 60km/h. Porém essas médias estiveram mais próximas do desejado nos levantamentos seguintes. É possível observar a presença de *outliers* em C02, C03 e A03 ocorridos, provavelmente, devido às condições de tráfego encontradas durante os levantamentos realizados. Ressalta-se que o marcador de velocidade do veículo utilizado é analógico, este fato pode explicar as diferenças nas médias das velocidades médias levantadas.

Para entender como estão distribuídos os valores de velocidade média, foi elaborado um histograma, exibido na Figura 27. É possível observar uma similaridade à curva de distribuição normal à velocidade média em todos os levantamentos realizados.

Figura 27 – Histograma: Velocidade Média (km/h)



Fonte: Autor

Como o número de amostras é maior que 30, dispensou-se o uso de teste de normalidade previamente ao teste de hipóteses de comparação entre médias considerando o Teorema do Limite Central (Devore, 2006). Então, realizou-se um teste de hipóteses (ANOVA), com intervalo de confiança de 99% bicaudal, com hipótese nula (H_0) de igualdade entre as médias. Os resultados são exibidos na Tabela 19.

Tabela 19 – Teste de hipóteses: Velocidade Média (km/h)

	C01	C02	C03	A01	A02	A03
C01		Rejeita	Rejeita	Rejeita	Rejeita	Rejeita
C02	0,0002		Rejeita	Rejeita	Não-Rejeita	Rejeita
C03	0,0000	0,0001		Rejeita	Rejeita	Não-Rejeita
A01	0,0116	0,0000	0,0000		Rejeita	Rejeita
A02	0,0000	0,2362	0,0007	0,0000		Não-Rejeita
A03	0,0000	0,0005	0,8049	0,0000	0,0029	

Fonte: Autor

Houve rejeição da hipótese nula de C01 e A01 com todos os outros levantamentos, exceto entre eles. Na via C02 não houve rejeição da hipótese nula apenas em comparação a A02. Nos demais testes, não houve rejeição da hipótese nula. Tal fato indica que algumas amostras de velocidade média são diferentes em cada levantamento, apesar da intenção de realizá-lo de forma constante. Nota-se, observando o *boxplot*, que a amplitude entre os dados é pequena. O coeficiente de variação foi menor que 5% em todos os casos e, as diferenças entre as médias também, logo esses resultados de rejeição da hipótese nula podem ser explicados pelo baixo desvio padrão das amostras coletadas.

4.2.2. *A irregularidade longitudinal das vias*

Na obtenção dos dados de irregularidade longitudinal, utilizou-se o parâmetro IRI, obtido através da utilização de um *smartphone* fixado no para-brisa do veículo, como descrito na seção 3.3. Na Tabela 20 é possível observar os valores médios e desvio padrão do IRI obtidos em cada levantamento.

Tabela 20 – Dados estatísticos descritivos: IRI (m/km)

	C01	C02	C03	A01	A02	A03
Média (m/km)	2,09	2,00	2,03	1,92	1,98	2,00
Valor Máx. (m/km)	2,42	2,36	2,62	2,26	2,51	3,06
Valor Mín. (m/km)	1,84	1,74	1,68	1,66	1,71	1,78
Desv. Pad. (m/km)	0,145	0,143	0,181	0,129	0,162	0,198
Coef. Var. (%)	7,04	7,04	8,94	6,72	8,19	9,89
Nº observações	36	69	66	46	47	48

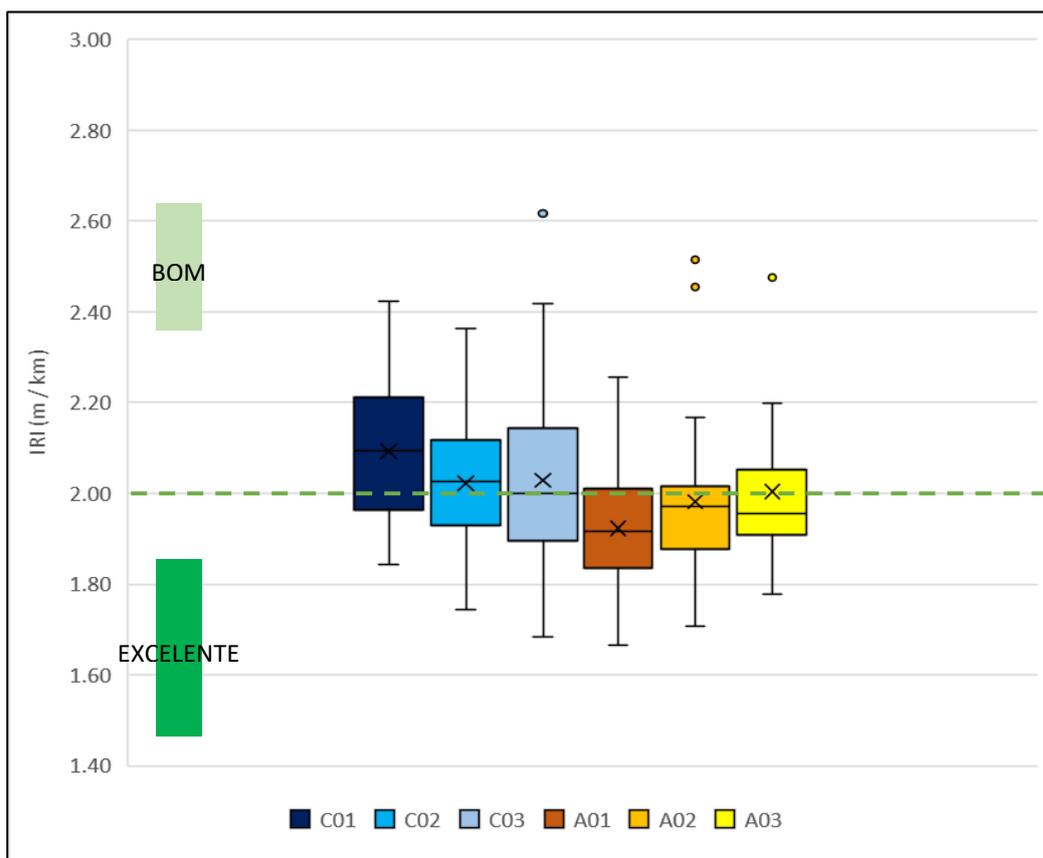
Fonte: Autor

A partir dos dados expostos na Tabela anterior, verifica-se que as amostras C01 e A01 geraram os maiores e menores valores de IRI, respectivamente. No levantamento obtido em C03 foi encontrado um valor de IRI médio e um desvio padrão maior do que aquele observado em C02, provavelmente devido ao acréscimo de velocidade entre os levantamentos. O mesmo resultado acontece entre A03, A02 e A01. Provavelmente, o mesmo comportamento

não pôde ser observado em C01 pela quantidade inferior de observações em relação aos seus pares.

Para entender como estão distribuídos visualmente os dados levantados de IRI, construiu-se um diagrama de caixas mostrados na Figura 28. É possível identificar a presença de poucos *outliers* em C3, A2 e A3.

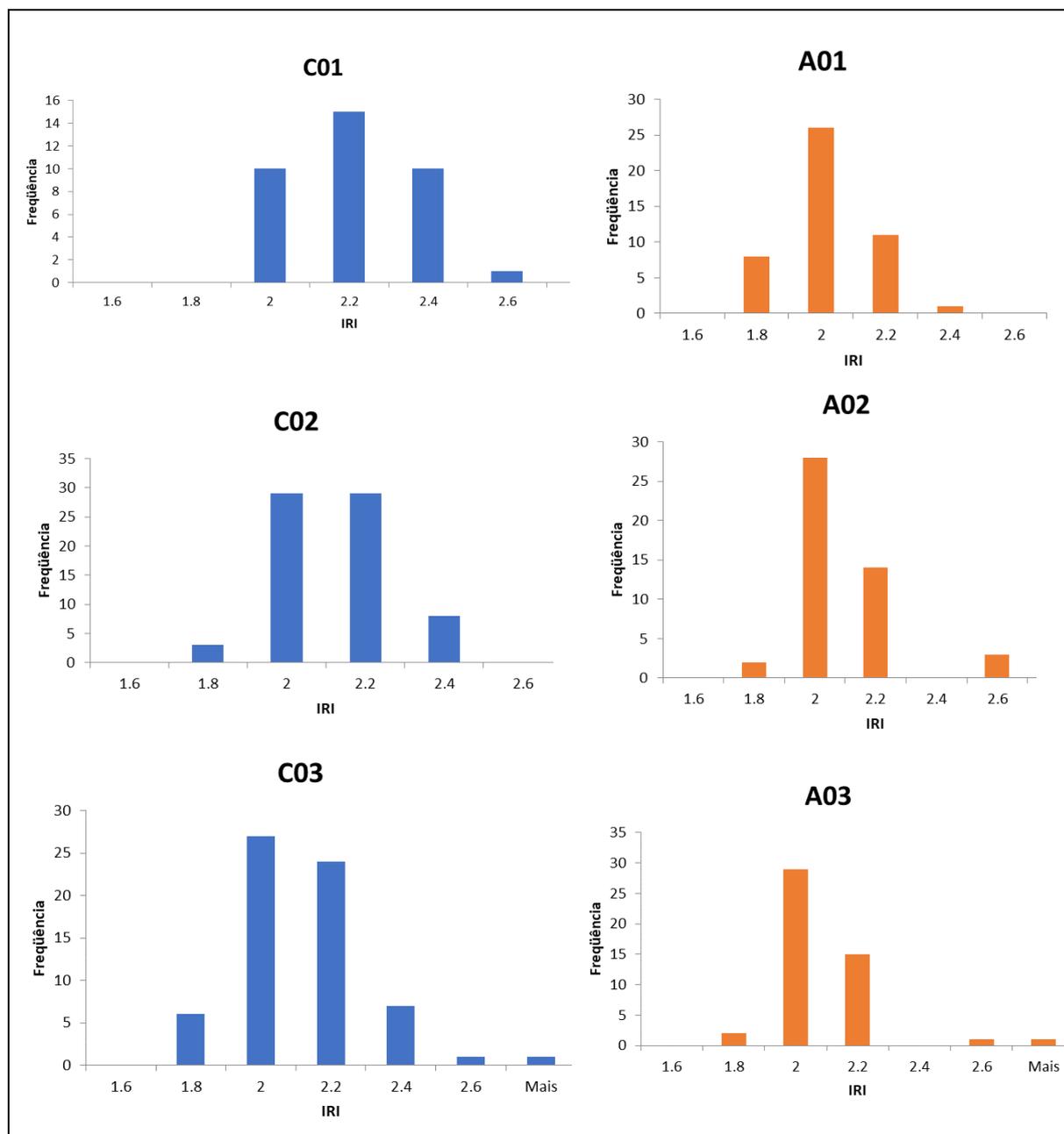
Figura 28 – *Boxplot*: IRI (m/km)



Fonte: Autor

Os valores de IRI foram divididos em grupos com o objetivo de elaborar um histograma, como exibidos na Figura 29. É possível notar uma similaridade à curva de distribuição normal para o IRI levantado em todas as amostras.

Figura 29 – Histograma: IRI (m/km)



Fonte: Autor

Para avaliar as médias das amostras de IRI levantadas, realizou-se, novamente, um teste de hipóteses, com intervalo de confiança de 99% bicaudal, com hipótese nula (H_0) de igualdade entre as médias (ANOVA). Como o número de amostras é maior que 30, dispensou-se o uso de teste de normalidade previamente ao teste de hipóteses de comparação entre médias considerando o Teorema do Limite Central (Devore, 2006). Os resultados obtidos estão dispostos na Tabela 21.

Tabela 21 – Teste de comparação de amostras: IRI

	C01	C02	C03	A01	A02	A03
C01		Não-Rejeita	Não-Rejeita	Rejeita	Rejeita	Rejeita
C02	0,0236		Não-Rejeita	Rejeita	Não-Rejeita	Rejeita
C03	0,0365	0,9386		Rejeita	Rejeita	Não-Rejeita
A01	0,0000	0,0004	0,0014		Não-Rejeita	Rejeita
A02	0,0002	0,0452	0,0107	0,0922		Não-Rejeita
A03	0,0011	0,0011	0,2629	0,0186	0,5613	

Fonte: Autor

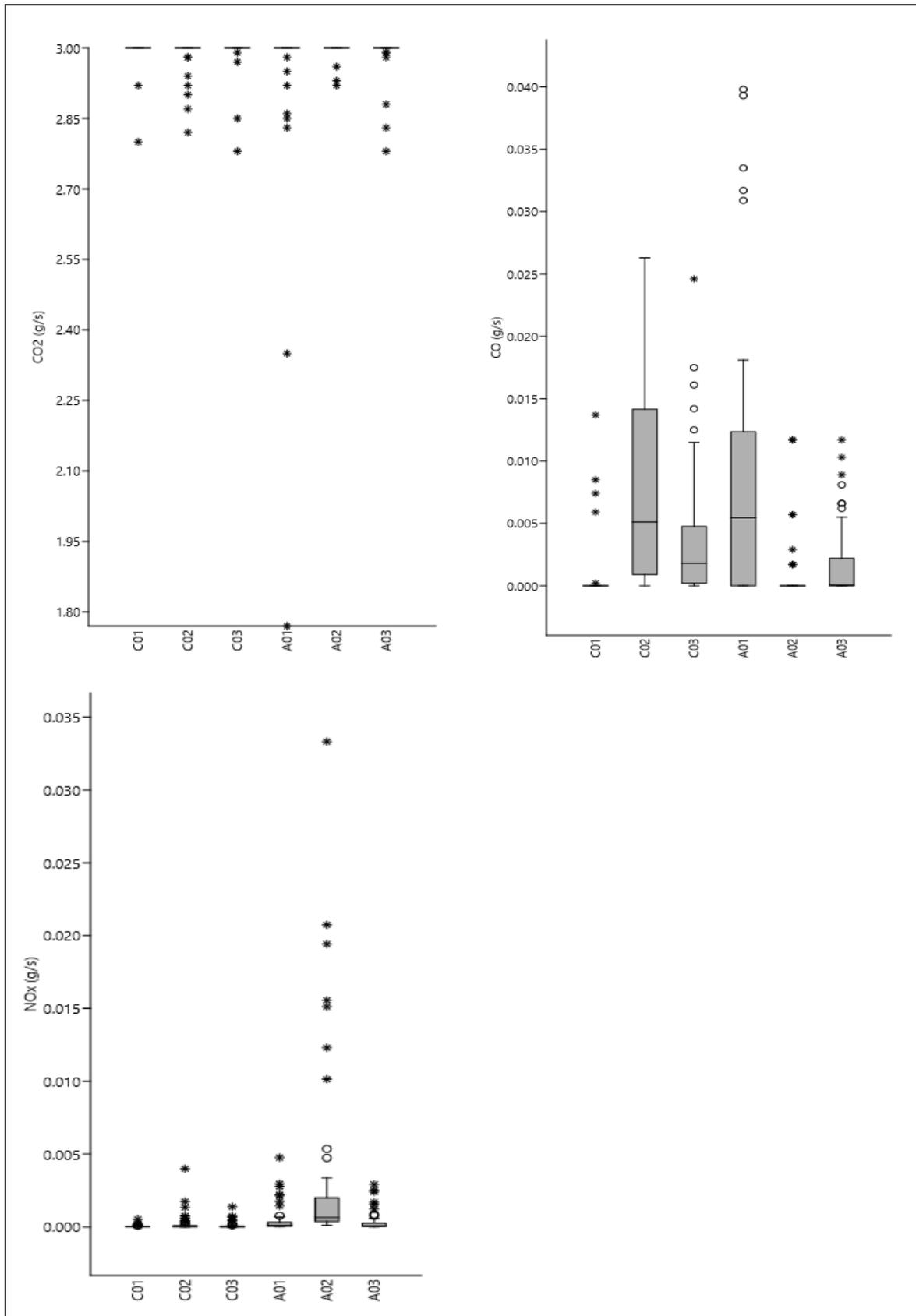
Observa-se que não houve rejeição da hipótese nula entre as amostras da via com revestimento de concreto (C01, C02 e C03), logo pode-se inferir que não houve diferença entre as médias de IRI em todos os levantamentos desta via. Na via em revestimento asfáltico, houve rejeição da hipótese nula na comparação das médias de IRI entre os levantamentos A01 e A03. Provavelmente, dois motivos justificam esse resultado: a diferença na velocidade média percorrida e a deterioração da via entre esses levantamentos.

4.2.3. Emissões de CO₂, CO e NO_x

4.2.3.1. Emissão no tempo

Os dados dos gases analisados, CO₂, CO e NO_x, foram calculados e agrupados por via. Elaborou-se um gráfico tipo *boxplot* para apresentação inicial dos dados, como pode ser visto na Figura 30. Na Tabela 22 estão apresentados as médias e os desvios padrões amostrais.

Figura 30 – *Boxplot*: Emissões de CO₂, CO e NO_x (g/s)



Fonte: Autor

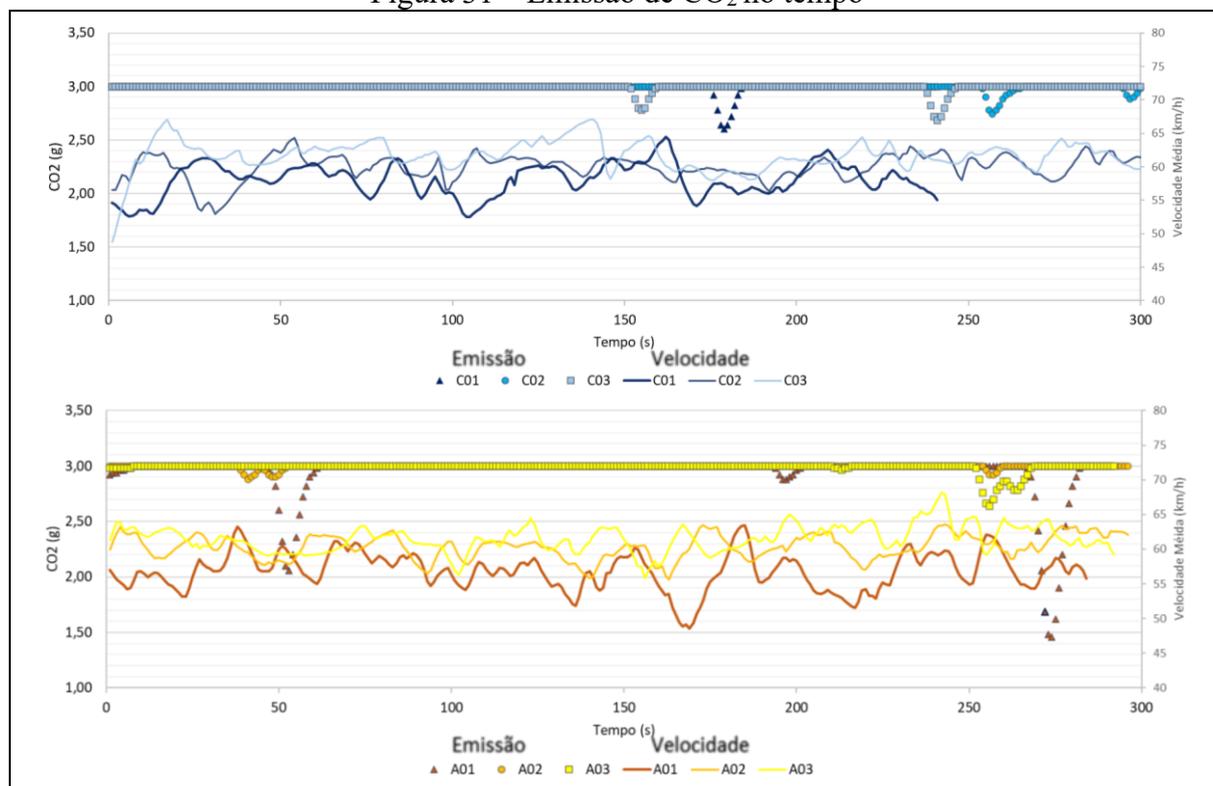
Tabela 22 – Média e desvio padrão dos gases

Amostra	CO ₂ (g/s)		CO (mg/s)		NO _x (mg/s)		N° observações
	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.	
C01	2,99	0,006	0,99	2,99	0,06	0,095	241
C02	2,99	0,004	7,99	7,87	0,19	0,551	439
C03	2,99	0,004	3,59	4,94	0,10	0,226	403
A01	2,94	0,030	8,18	10,93	0,51	0,986	284
A02	3,00	0,002	0,95	2,62	3,49	6,851	296
A03	2,99	0,006	1,76	3,10	0,38	0,698	292

Fonte: Autor

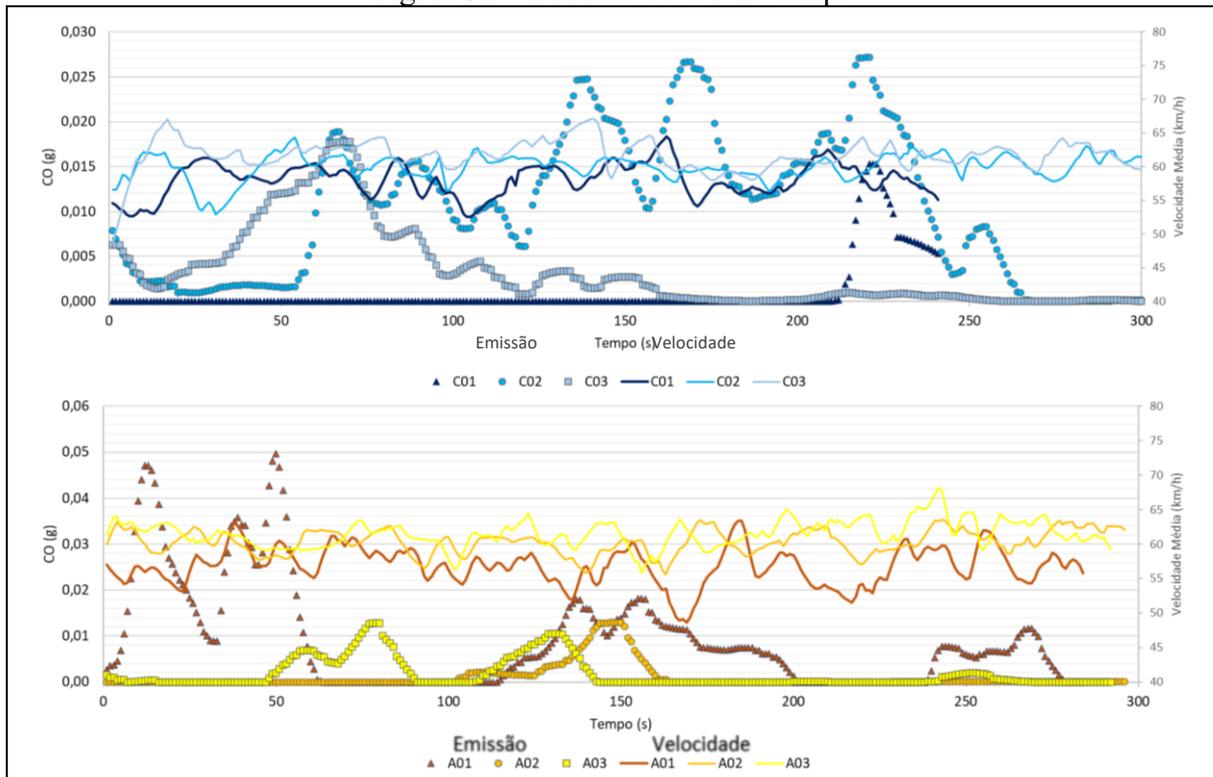
Na emissão de CO₂, percebe-se uma média igual na via em revestimento de concreto e uma variação de apenas 2% na via em revestimento asfáltico no levantamento A01. Provavelmente, isso explica o resultado de emissão de CO, na amostra A01, ser maior que seus pares. A maior emissão de NO_x também ocorreu numa via em revestimento asfáltico, A02. Isto não era esperado, pois esta amostra apresentou a maior média e o menor desvio padrão para as emissões de CO₂.

Para entender o comportamento das emissões no tempo, elaborou-se um gráfico de dispersão para gases, representou-se também a velocidade percorrida. Na Figura 31, Figura 32 e Figura 33 estão dispostos os resultados de CO₂, CO e NO_x, respectivamente.

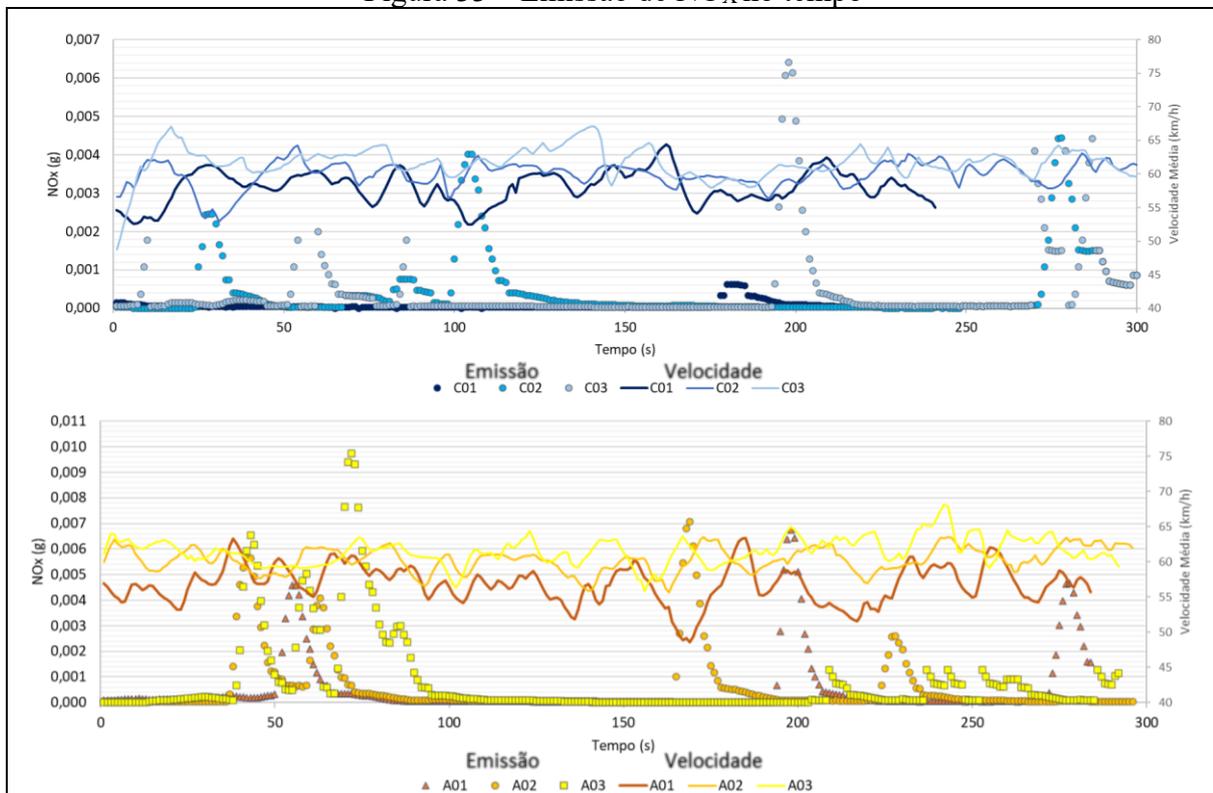
Figura 31 – Emissão de CO₂ no tempo

Fonte: Autor

Figura 32 – Emissão de CO no tempo



Fonte: Autor

Figura 33 – Emissão de NO_x no tempo

Fonte: Autor

Para o CO₂ percebe-se um decréscimo na emissão média (≈ 3 g/s) próximo ao meio ($t \approx 160$ s) e ao final do percurso ($t \approx 250$ s) nas amostras C01, C02 e C03. Nas amostras A01, A02 e A03 o decréscimo acontece no começo ($t \approx 50$ s) e no final do trajeto ($t \approx 260$ s).

Na análise de emissão do CO, nota-se um pico inicial ($t \approx 60$) na amostra C03 e um decréscimo no restante do percurso. Em C01, ocorre o oposto com um pico na parte final do trajeto ($t \approx 230$ s). Na amostra C02 há vários picos de emissão, iniciando em $t \approx 50$ s e terminando em $t \approx 260$ s. Na outra via, ocorrem 3 picos; no início, na metade e no final do trecho, com exceção do A01 que possui um pico somente na metade do percurso.

Na emissão de NO_x percebem-se alguns picos ao longo do percurso para todas as amostras analisadas. Especificamente, na amostra C01, nota-se uma emissão praticamente nula, a menor média de emissão dentre todas as observações, com um leve pico de emissão no $t \approx 180$ s.

Para avaliar as diferenças entre as médias das amostras de gases coletadas, realizou-se outro teste de hipóteses, com intervalo de confiança de 99% bicaudal, com hipótese nula (H₀). Os resultados obtidos estão dispostos Tabela 23.

Tabela 23 – Teste de comparação de amostras: CO₂, CO e NO_x.

	CO ₂		CO		NO _x	
	H ₀	valor-p	H ₀	valor-p	H ₀	valor-p
C01 vs C02	Não-Rejeita	0,461	Rejeita	0,000	Não-Rejeita	0,808
C01 vs C03	Não-Rejeita	0,938	Rejeita	0,000	Não-Rejeita	0,185
C02 vs C03	Não-Rejeita	0,396	Rejeita	0,003	Não-Rejeita	0,321
A01 vs A02	Não-Rejeita	0,087	Rejeita	0,000	Rejeita	0,000
A01 vs A03	Não-Rejeita	0,445	Rejeita	0,003	Não-Rejeita	0,622
A02 vs A03	Não-Rejeita	0,315	Rejeita	0,005	Rejeita	0,000

Fonte: Autor

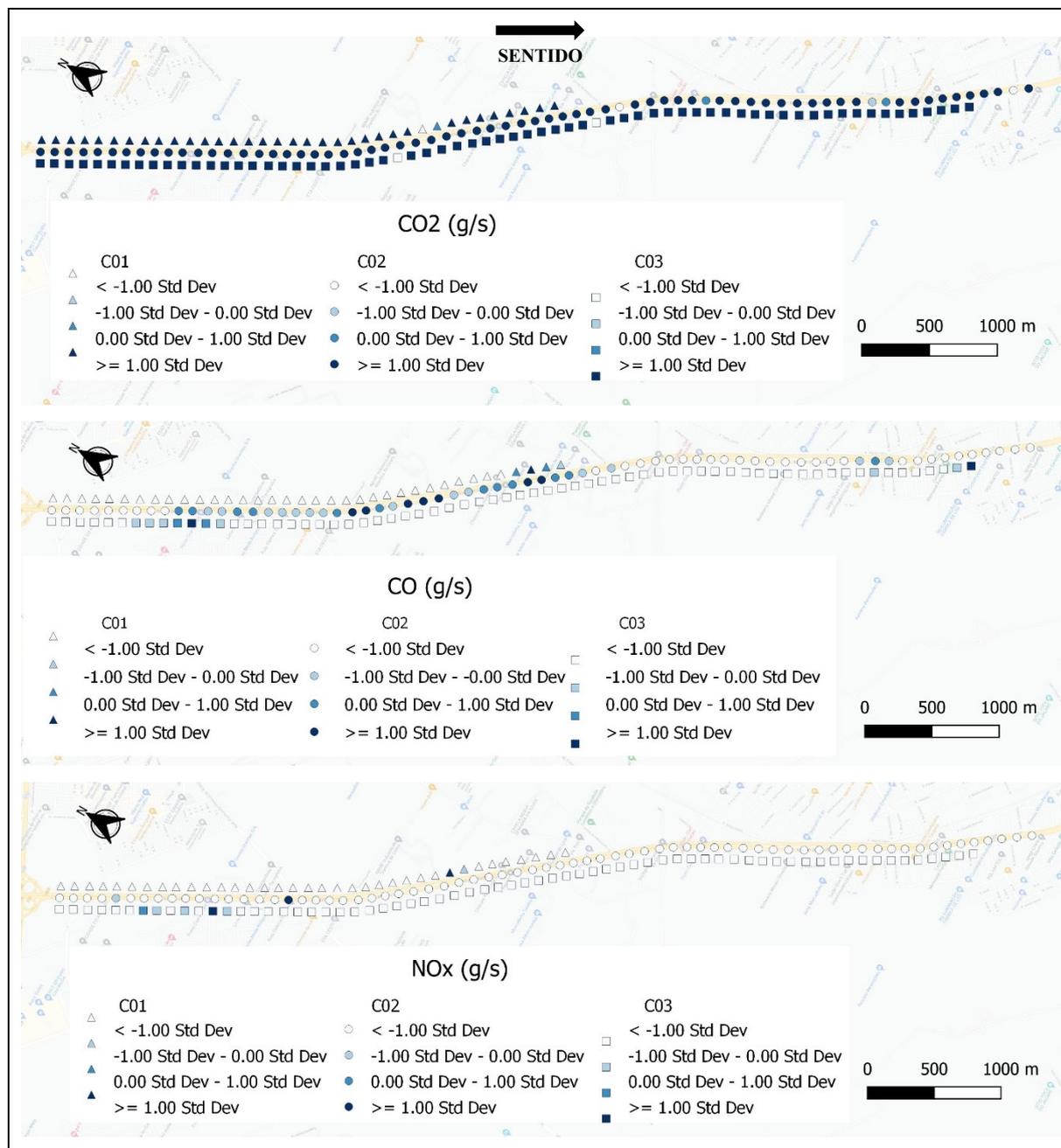
Na emissão de CO todas as hipóteses nulas foram rejeitadas, logo todas as médias de emissão do CO pertencem a populações diferentes. Na análise de emissão de CO₂, ocorreu o oposto. Na análise de comparação entre a emissão média de NO_x a hipótese nula não foi rejeitada quando se comparou A01 e A03. Isto já era esperado, pois A02 teve uma emissão média sete vezes maior que seus pares.

4.2.3.2. Emissão no espaço

Para comparar as emissões com o IRI no espaço, agruparam-se as emissões em trechos e fez-se uma média de emissões para cada trecho. Os resultados de emissão média dos gases CO₂, CO e NO_x no espaço à via de revestimento em concreto de cimento Portland estão dispostos na Figura 34. Ressalta-se que a classificação foi dividida em 4 classes ($< - 1$ desvio

padrão; entre -1 desvio padrão e 0 desvio padrão; entre 0 desvio padrão e 1 desvio padrão; ≥ 1 desvio padrão).

Figura 34 – Emissão média por trecho: Rod. 4º Anel Viário (C01, C02 e C03)



Fonte: Autor

Para o CO₂ percebe-se um declínio na sua emissão inicialmente entre o 26º e 29º trecho nas amostras C01 e C03. Em seguida, outro decaimento entre o 40º e 42º trecho, nas amostras C02 e C03. Por fim, no 58º e 68º trechos houve outra queda nos níveis de emissão de CO₂ na amostra C02.

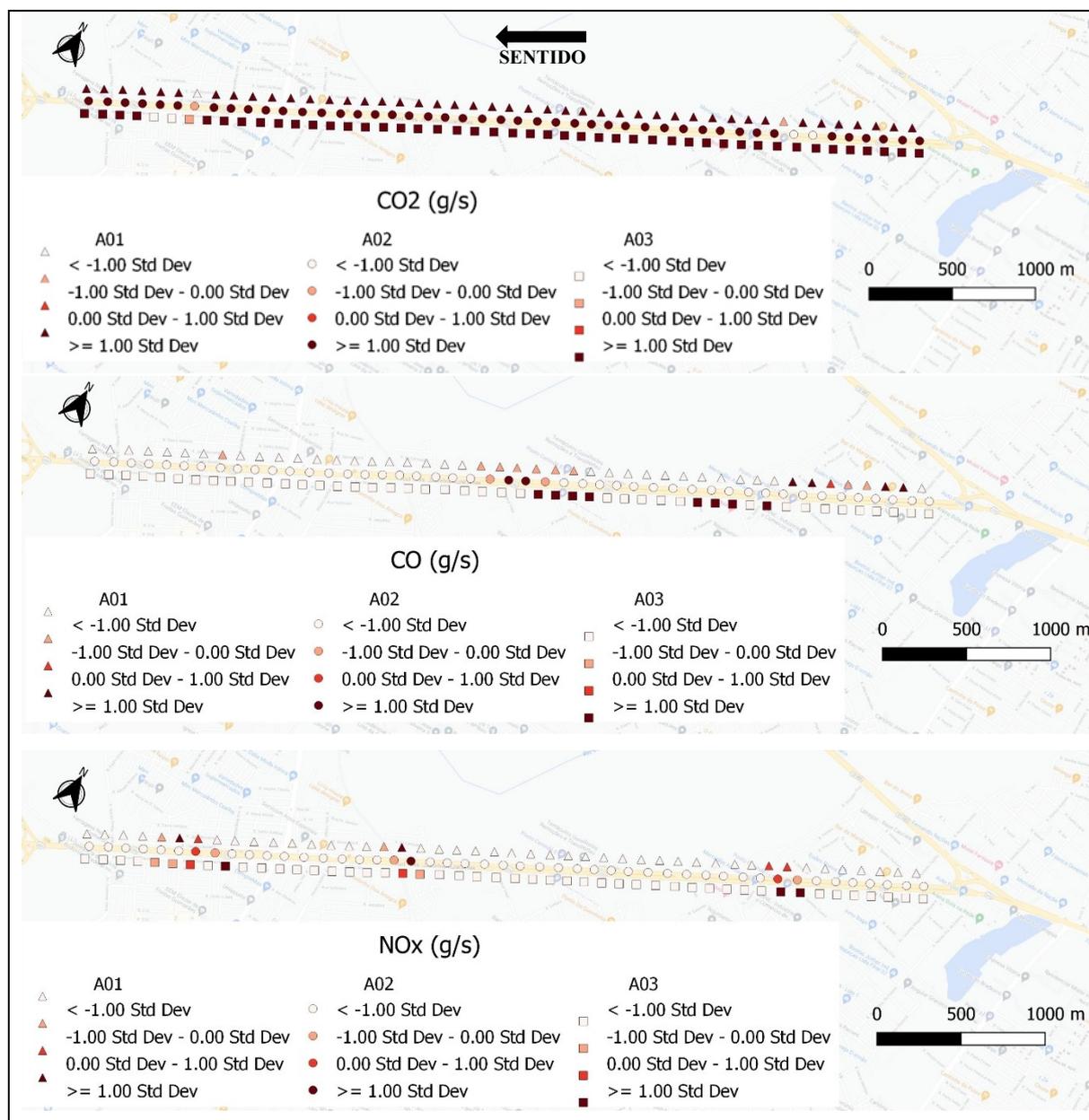
Na emissão de CO, houve um aumento nos níveis de emissão entre o 33º e 36º trecho na amostra C01. Para a amostra C02, os níveis de emissões elevaram-se entre o 10º e

40° e, 57° e 59°, trecho. Na amostra C03, os níveis de emissões foram elevados entre o 7° e 13° trecho e, com elevação também nos trechos 58°, 65° e 66°.

Para a amostra C01 houve apenas um pico nos níveis de emissão de NO_x , no 28° e 29° trecho. Na amostra C02 ocorre um aumento nos níveis de NO_x apenas no 5° e 17° trecho. Contudo, em C03, os níveis de emissão de NO_x , são elevados em uma quantidade maior de trechos.

A mesma análise de emissão no espaço fora realizada à via em revestimento asfáltico. Os resultados de emissão média dos gases CO_2 , CO e NO_x no espaço estão ilustrados na Figura 35.

Figura 35 – Emissão média por trecho: BR 020 (A01, A02 e A03)



Fonte: Autor

Em relação aos níveis de emissão de CO₂, percebe-se um decaimento coincidente em 2 momentos para A01 e A02, inicialmente no 7º trecho e posteriormente no 40º. Neste último trecho também houve um declínio nos níveis de emissões de CO₂ na amostra A03.

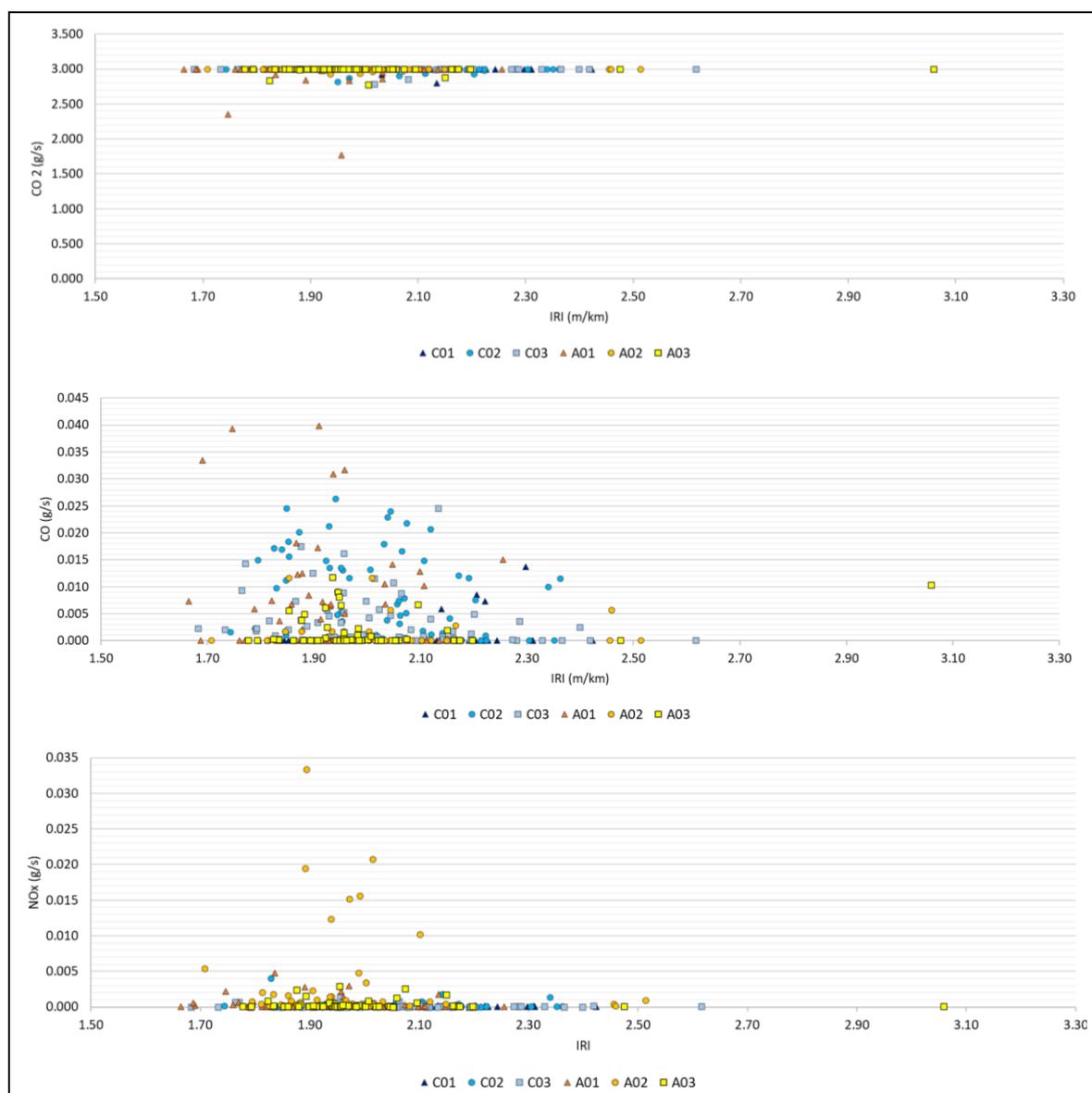
Os níveis de emissão de CO foram distintos nas 3 amostras observadas, com coincidência nos picos de emissão em alguns trechos. Em A01 houve uma elevação nos níveis de emissão no início (entre o 2º e 8º trecho), na metade (entre 20º e 25º trecho) e no final (39º trecho) do levantamento. Em A02 teve-se apenas um pico entre 22º e 25º trecho. Na última amostra, A03, os níveis foram elevados em dois momentos, entre o 10º e 14º trecho e, entre o 20º e 23º trecho.

Na emissão de NO_x houve uma coincidência espacial nos níveis de emissões coletados. Inicialmente entre o 8º e o 9º trecho e, posteriormente, entre o 29º e o 30º trecho em todas as amostras. Nos trechos finais também ocorreu picos de emissões de NO_x com destaque para a amostra A03.

4.2.4. *Correlação entre as variáveis: IRI vs emissões de CO₂, CO e NO_x*

Para entender como se relacionam os dados de IRI com as emissões, elaborou-se um gráfico de dispersão entre eles. A Figura 36 mostra a dispersão entre o IRI e os gases analisados (CO₂, CO e NO_x). Em seguida, realizou-se uma análise de correlação de Pearson (R) do IRI com as emissões nas vias levantadas como mostrados na Tabela 24.

Figura 36 – Dispersão: IRI vs Emissões



Fonte: Autor

Tabela 24 – Análise de correlação (R): IRI vs Emissões

	CO ₂	CO	NO _x
C01	-0,015	0,327	0,048
C02	-0,031	-0,247	-0,028
C03	-0,022	-0,237	-0,166
A01	0,045	-0,121	-0,104
A02	0,014	0,102	-0,102
A03	0,042	0,233	-0,056
Total	0,051	-0,120	-0,083

Fonte: Autor

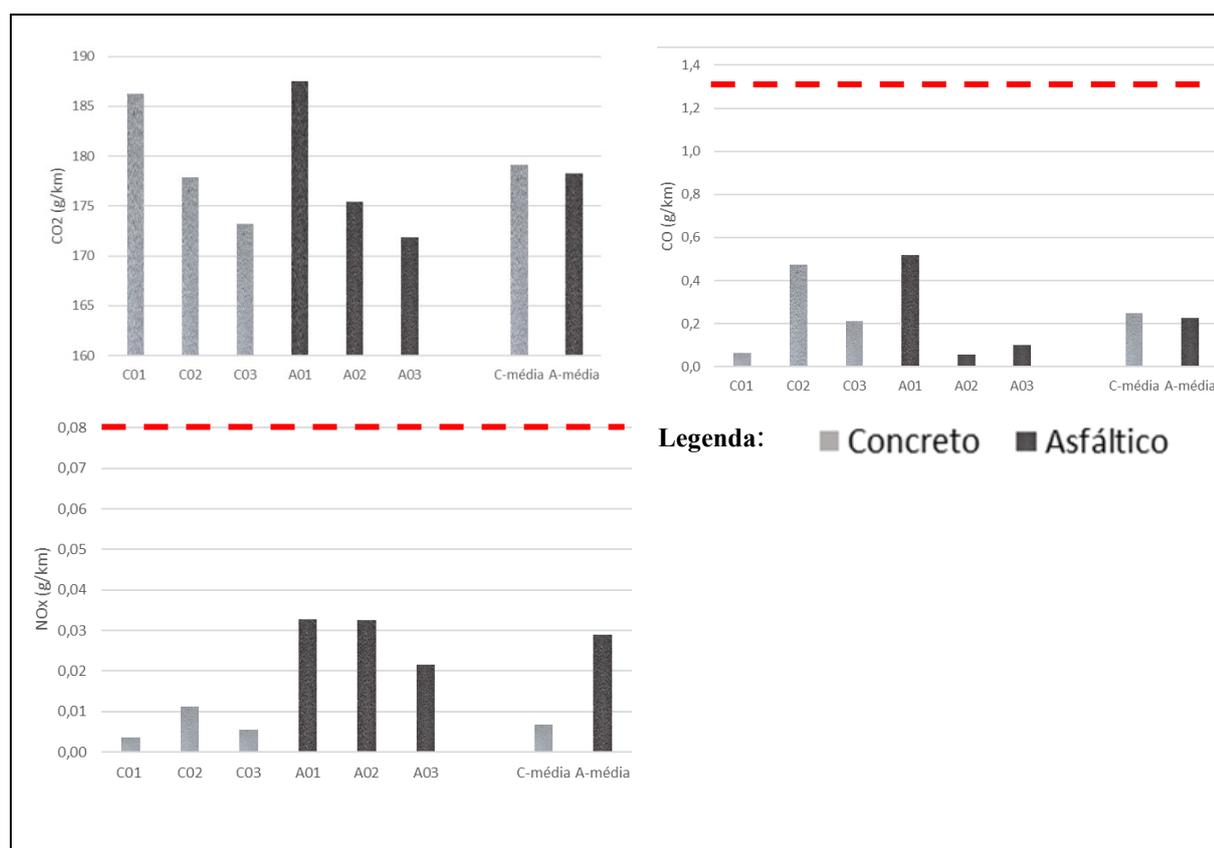
Nos níveis de emissão de CO₂, nota-se a tendência de um padrão de emissão de 3,0g/s independente do IRI. Em CO e NO_x é percebido uma grande quantidade de observações próxima de zero também independente do IRI.

O CO foi o gás com melhor correlação com o IRI nas amostras levantadas. Contudo, em geral, as correlações foram nulas (< 0,35) (Devore, 2006).

4.2.5. *As características superficiais das vias versus níveis de emissão*

Para analisar se o tipo de revestimento pode alterar os valores médios dos níveis de emissão elaborou-se um gráfico com as médias de emissões por quilômetro em todas as amostras analisadas. A Figura 37 mostra os níveis de emissões média por quilômetro de acordo com a via para as emissões de CO₂, NO e NO_x.

Figura 37 – Níveis de emissões médias (g/km) por amostra



Fonte: Autor

Para comparar se os níveis obtidos estão de acordo com a norma, utilizou-se os valores de emissão média por quilômetro em todas as amostras coletadas. Na Tabela 25 são mostrados os valores médios obtidos por quilômetro e comparados aos permitidos pela norma brasileira, e no caso do CO₂, comparado com a norma europeia.

Tabela 25 – Níveis médios de emissão por quilômetro

Amostra	CO ₂ (g/km)		CO (mg/km)		NO _x (mg/km)	
	Média	¹ EURO VI ² EPA	Média	PROCONVE L6	Média	PROCONVE L6
C01	186		64		4	
C02	178		473		11	
C03	173	<130 ¹	210		6	
C _{média}	179	<146 ²	249	< 1.300	7	< 80
A01	188		520		33	
A02	175		56		33	
A03	172		100		22	
A _{média}	178		230		29	

Fonte: Autor

Na emissão de CO₂ não houve diferença significativa entre as emissões em vias de revestimento asfáltico ou de concreto. O mesmo comportamento aconteceu nas emissões de CO. Contudo, avaliando as emissões de NO_x, houve uma emissão 4 vezes maior na via em revestimento asfáltico.

Em todas as amostras analisadas, os níveis de emissão por quilômetro não ultrapassaram os limites de CO e NO_x especificados na norma brasileira (CONAMA, 2009). Esse resultado era esperado, pois o levantamento não foi realizado em condições intensas de tráfego.

Ressalta-se que a norma brasileira não considera o CO₂ como um poluente e, também, não limita seu nível de emissões nas normas vigentes, tampouco nas futuras. Para fins de comparação, os níveis de emissões de CO₂ está acima dos permitidos pelas normas europeia e americana (União Europeia, 2009; EPA, 2010). Enfatiza-se que se as condições de tráfego influenciam nas emissões de CO₂ também.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste capítulo, são apresentadas as principais conclusões do trabalho e sugestões para estudo futuros. De modo geral, é relevante terminar os níveis de emissões de poluentes atmosféricos veiculares tendo em vista sua contribuição significativa nas emissões globais. Ressalta-se que os níveis de emissões são afetados por diversos aspectos (condutor, veículo, via etc.) como já supracitado neste documento. Porém, os métodos utilizados na análise de emissões pelos relatórios de emissões de gases por fontes móveis possuem diversas limitações, pois adotam a premissa de emissões médias fornecidas pelos fabricantes. Adverte-se que as conclusões obtidas estão vinculadas às especificidades do estudo aqui descrito.

5.1. Conclusões

Este trabalho se propôs a analisar um dos aspectos que impactam nos níveis de emissões veiculares, as características superficiais das vias. Para alcançar esse objetivo foi proposto inicialmente avaliar se a irregularidade longitudinal altera os níveis de emissões de CO₂, CO e NO_x. Depois, verificar se o tipo de material utilizado na camada de revestimento influencia no nível de emissão. Em seguida, analisar se os níveis de emissões possuem um padrão de emissão temporal e espacial. E por fim, se os resultados encontrados diferem daqueles esperados para o veículo.

Na emissão de CO₂, foi possível concluir que existe um padrão de emissão considerado “ideal” para este veículo, próximo a 3g/s. E este padrão deve ocorrer quando a combustão realizada no motor é completa ($\lambda=1$) e sem a presença de emissão de CO e NO_x. Porém, este comportamento não foi encontrado em diferentes trechos analisados mesmo praticando a premissa de velocidade aproximadamente constante em todas as análises.

Nos trechos onde teve decréscimo do valor médio de emissão de CO₂ geralmente ocorreu acréscimos de emissões de CO e NO_x, porém o contrário nem sempre foi verdadeiro. As amostras pares de CO obtiveram comportamento distintos em ambas as vias analisadas. Nos resultados de NO_x houve coincidência espacial para as amostras realizadas na via BR 020 (revestimento asfáltico).

É possível concluir que os trechos levantados em pavimento de concreto possuíram menores médias de emissão de NO_x. Além disso, possuem menores amplitudes de emissões de CO₂ e CO, porém emissões médias similares ao pavimento asfáltico.

Em relação ao impacto do IRI nos níveis de emissões, não foi possível concluir se há correlação entre os dados. Este fato pode ser explicado pela baixa amplitude dos valores de

IRI encontrados nos levantamentos. Provavelmente, uma amplitude maior na irregularidade longitudinal ajudaria a entender os níveis de emissões em pavimentos mais desgastados (IRI elevado).

Quando se comparou as amostras analisadas com os limites estabelecidos pela norma brasileira, constatou-se que em nenhum levantamento esses limites foram extrapolados. Este resultado era esperado, pois é importante ressaltar que a análise fora realizada com velocidade constante e sem efeitos do tráfego e de outros obstáculos do cotidiano das grandes cidades. Tal premissa é necessária para a realização do levantamento da irregularidade longitudinal com o uso de *smartphone*. As simulações estabelecidas por norma consideram 4 padrões de ciclo de condução.

Para finalizar, foi possível encontrar indícios que as características das superfícies das vias alteram os níveis de emissões de NO_x. O método utilizado se mostrou satisfatório para determinação dos níveis de emissão de CO₂, CO, NO_x avaliados neste trabalho.

5.2. Sugestões para trabalhos futuros

A seguir serão apresentadas algumas sugestões para pesquisas futuras relacionadas à influência das características superficiais das vias com os níveis de emissões veiculares:

- a) Utilizar diferentes veículos nos levantamentos de forma a avaliar o comportamento dos níveis de emissões em outros veículos de uma mesma classificação normativa;
- b) Realizar os levantamentos em diferentes cenários de velocidade para simular as alterações no IRI e nos níveis de emissões obtidos;
- c) Avaliar trechos com diferentes classificações funcionais (maiores amplitudes de IRI) para analisar o impacto deste cenário nos níveis de emissões;
- d) Analisar o efeito da declividade e dos trechos curvos nos níveis de emissões veiculares para mensurar o impacto das características do projeto geométrico nas emissões;
- e) Realizar o levantamento em trechos urbanos com o intuito de simular as emissões na prática combinando os efeitos do tráfego e do pavimento, tal análise pode ser comparada com os padrões de condução normatizados;
- f) Realizar levantamentos em pavimentos com outros tipos de revestimento e/ou em estradas não pavimentadas, buscando isolar a variável velocidade média, para medir o impacto do tipo de revestimento nos níveis de emissões.

REFERÊNCIAS

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 11481/2010: Veículos rodoviários automotores leves – Medição da emissão evaporativa**. Rio de Janeiro, RJ, 2010.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR6601/2012: veículos rodoviários automotores leves: determinação de hidrocarbonetos, monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio, dióxido de carbono e material particulado no gás de escapamento**. Rio de Janeiro, RJ, 2012.
- ALBUQUERQUE, Tairone Paz. **Índice de condição baseado em defeitos superficiais para gerência de pavimentos urbanos**. Dissertação de Mestrado. UFPB. João Pessoa, PB. 2017.
- ALMEIDA, Lucas Cavalcante. **Aplicativo para *smartphone* destinado à medição da irregularidade longitudinal em rodovias**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará. Departamento de Engenharia de Transportes. Fortaleza, 2018.
- AN, F.; BARTH, M.; NORBECK, F.; ROSS, M. **Development of comprehensive modal emissions model operating under hot-stabilized conditions**. Transportation Research Record 1587, pp 52 – 62.1997. Disponível em: <<https://doi.org/10.3141/1587-07>>. Acesso em: 25 de out. 2021.
- ANDRADE, Giovanni Souza. **Avaliação experimental da duração de combustão para diferentes combustíveis, em um motor padrão ciclo Otto ASTM-CFR**. Dissertação de mestrado. Porto Alegre, 2007.
- AZEVEDO, J. A. H.; CASSIANO, D. R.; FEITOSA, B. B.; OLIVEIRA, M. L. M.; LIMA, E. P.; BERTONCINI, B. V. **Influências dos modos de operação nas emissões de poluentes provenientes de veículos *flex* em região urbana**. Transportes, 25(2), 91-100. 2017. DOI:10.14295/transportes.v25i2.1304
- AZEVEDO, Julie Anne Holanda. **Proposta metodológica para elaboração de fatores de emissão de veículos de carga a partir de perfis de condução**. Tese de doutorado. Universidade Federal do Ceará. 2019a.
- AZEVEDO, Priscilla Oliveira. ***Effects of International Roughness index (IRI) on vehicle emissions***. Dissertação de Mestrado. University of Stuttgart. 2019b.
- BECKETT, KP; FREER-SMITH, P; TAYLOR, G. ***The capture of particulate pollution by trees at five contrasting urban sites***. 2000. Arboric J 24:209– 230. doi:10.1080/03071375.2000.9747273.
- BENNET, CHRISTOPHER R.; GREENWOOD, IAN D. ***HDM-4. Modelling Road User and Environmental Effects in HDM-4***. 7 volumes (The Highway Development and Management Series Collection, 7). 2003.
- BERNUCCI, Liedi Bariani; MOTTA, Laura Maria Goretti; CERATTI, Jorge Augusto Pereira; SOARES, Jorge Barbosa. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro, v. 504, 2006.

- BISCONSINI, Danilo Rinaldi. **Avaliação da irregularidade longitudinal dos pavimentos com dados coletados por smartphones**. 2016. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2016.
- BOSCH. *Automotive electric/electronic systems*. GmbH. 1988. 1ed. Warrendale, P.A. EUA.
- BOSCH. *Automotive electric/electronic system*. GmbH. 1995. 2 ed. Wanrendale, P. A. EUA.
- BOSCH. **Manual de tecnologia Automotiva**. Editora Blucher. Ed 25. 2005.
- CARBAJAL-HERNÁNDEZ, J. J.; SÁNCHEZ-FERNÁNDEZ, L. P.; CARRASCO-OCHOA, J. A.; MARTÍNEZ-TRINIDAD, J. F. *Assessment and prediction of air quality using fuzzy logic and autoregressive models*. Atmospheric Environment, v.60, p.37-50, 2012.
- CASSIANO, D. R. **Avaliação das emissões poluentes de um veículo flex em percurso real urbano e rodoviário no Ceará**. 2016. 143 f. Dissertação (Mestrado acadêmico em Ciências Físicas Aplicadas) – Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, 2016.
- CAVALCANTE, R. M.; ROCHA, C. A.; DE SANTIAGO, I. S.; DA SILVA, T. F. A.; CATTONY, C. M.; SILVA, M. V. C.; SILVA, I. B.; THIERS, P. R. L. *Influence of urbanization on air quality based on the occurrence of particle-associated polycyclic aromatic hydrocarbons in a tropical semiarid area (Fortaleza-CE, Brazil)*. Air Quality, Atmosphere and Health, v. 10, n. 4, p. 437–445, 2017. DOI: 10.1007/s11869-016-0434-z
- CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Metodologia de inventário de evaporação de combustíveis no abastecimento de veículos leves do ciclo Otto**. São Paulo, SP, 2015. 15 p. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/wp-content/uploads/sites/6/2013/12/Metodologia-de-inventario-de-evaporacao-de-combustivel-no-abastecimento-de-veiculos-leves-Otto.pdf> . Acesso em: 15 out. 2021
- CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Emissões veiculares no Estado de São Paulo 2018**. São Paulo, 2019. 192 p. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/relatorios-e-publicacoes> . Acesso em: 15 out. 2021.
- CHATTI, K.; ZAABER, I., 2012. *Estimating the effects of pavement condition on vehicle operating costs*. Washington, DC: Transportation Research Board of the National Academies NCHRP Report 720
- CNT. Confederação Nacional dos Transportes. **Pesquisa CNT de Rodovias**. ed. 23. Outubro de 2019. Disponível em: www.pesquisarodovias.cnt.org.br. Acesso em: 18 out. 2021.
- CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Dispõe sobre a criação do Programa de Controle de Poluição do Ar por veículos Automotores – PROCONVE**. Resolução CONAMA nº 18/86, de 06 de maio de 1986. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=41>>. Acesso em: 09 out. 2021.
- CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Estabelece a Fase PROCONVE L6**. Resolução CONAMA nº 415/2009, de 24 de setembro de 2009. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=615>>. Acesso em: 09 out. 2021.

- CONAMA (2018a). Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Estabelece a Fase PROCONVE P8**. Resolução CONAMA nº 490/2018, de 16 de novembro de 2018. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=739>>. Acesso em: 09 out. 2021.
- CONAMA (2018b). Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Estabelece as Fases PROCONVE L7 e PROCONVE L8**. Resolução CONAMA nº 492/2018, de 20 de dezembro de 2018. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=742>>. Acesso em: 09 out. 2021.
- CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Estabelece a Fase PROMOT M5 de exigências do Programa de Controle da Poluição do Ar por Motociclos e Veículos similares – PROMOT para controle de emissões de gases poluentes e de ruído por ciclomotores**. Resolução CONAMA nº 493/2019, de 24 de junho de 2019. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=743>>. Acesso em: 09 out. 2021
- DENATRAN. Departamento Nacional de Trânsito. **Estatística de frota de veículos**. Ministério da Infraestrutura. Brasília/DF. 2021. Disponível em: <<https://antigo.infraestrutura.gov.br/denatran.html>> Acesso em: 25 out. 2021.
- DEVORE, Jay L. "**Probabilidade e estatística: para engenharia e ciências**. (tradução Joaquim Pinheiro Nunes da Silva). Editora Cengage Learning. São Paulo. 2006.
- DIAS, Cristiane; BALES, Marcelo Pereira; DA SILVA, Silmara Regina. **Benefits of new PROCONVE phases for light duty vehicles, considering vehicle refueling emissions in the São Paulo Metropolitan Area**. AEA – Brazilian Society of Automotive Engineering – SIMEA. 2021.
- DINIZ, Maria Ingridy Lacerda; SILVA, Aryelle Nayra Azevedo; MELO, Ricardo Almeida. **Comparação entre índices de condição de pavimentos para proposta de atividades de manutenção e reabilitação em vias urbanas da cidade de João Pessoa–PB**. 34º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET. 2020.
- DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Norma 009/2003 – ES – Avaliação subjetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semi-rígidos - Procedimento**. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes–Diretoria de Planejamento e Pesquisa, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2003.
- DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos**. Diretoria Executiva. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Rio de Janeiro. 2006.
- DOUANGPHACHANH, V. **The Development of a Simple Method for Network-wide Road Surface Roughness Condition Estimation and Monitoring Using Smartphone Sensors**. 2014. Tese de Doutorado, Tokyo Metropolitan University. Tokyo, Japão, 2014
- EEA. European Environment Agency. **Final energy consumption by sector and fuel**. 2017. Disponível em: <<https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/transport-final-energy-consumption-by-mode/assessment-10>>. acesso em 24-07-20

- EL KHOURY, John; AKLE, Barbar; KATICHA, Samer; GHADDAR, Ahmad; DAOU, Makram: *A microscale evaluation of pavement roughness effects for asset management*. In International Journal of Pavement Engineering 15 (4), pp. 323–333. 2014. DOI: 10.1080/10298436.2013.792930
- EPA. Environmental Protection Agency. *Light-Duty Vehicle Greenhouse Gas Emission Standards and Corporate Average Fuel Economy Standards*. 2010. Disponível em: <<https://www.epa.gov/>>. Acesso em: 20 out. 2021.
- EPA. Environmental Protection Agency. *Permitting Under the Clean Air Act*. 2017. Disponível em: <<https://www.epa.gov/caa-permitting>>. Acesso em: 01 out. 2021.
- ETSU. Energy Technology Support Unit. *Emissions Modelling Framework for HDM-4*. Working Paper for Discussion with University of Birmingham and ODA. ETSU REF:RYCA18825001/wp2/Issue1. 4 November 1997.
- FERGUSON, C R.; KIRKPATRICK, A. T. *Internal combustion engines: Applied thermosciences*. New York: Jonh Wiley & Sons, Inc, 2001. 369p
- FERNANDES JR, J. L. *Sistema de Gerencia de Pavimento Urbano para cidade de médio porte*. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Transportes. São Carlos, SP. 2001.
- FRANCO, V.; KOUSOULIDOU, M.; MUNTEAN, M.; NTZIACHRISTOS, L.; HAUSBERGER, S.; DILARA, P. *Road vehicle emission factors development: a review*. Atmospheric Environment. 2013. Pag. 84-97. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.01.006>>. Acesso em: 10 out. 2021.
- FREY, H. C.; UNAL, A.; ROUPHAIL, N. M.; COLYAR, J. D. *On-road measurement of vehicle tailpipe emissions using a portable instrument*. Journal of the Air & Waste Management Association. 1995, v. 53, n. 8, p. 992–1002, 2003.
- FREY, H. C.; UNAL, A.; ROUPHAIL, N. M.; COLYAR, J. D. *Emissions Reduction Through Better Traffic Management: An Empirical Evaluation Based Upon On-Road Measurements*. Prepared by NC State University for NC Department of Transportation, Raleigh, v. NC: 28, 2001.
- FONTARAS, G.; ZACHAROF, N. G.; CIUFFO, B. *Fuel consumption and CO2 emissions from passenger cars in Europe – Laboratory versus real-world emissions*. 2017. Progress in Energy and Combustion Science, 60, 97–131. doi:10.1016/j.peccs.2016.12.004
- FORSLÖF, Lars; JONES, Hans. *Roadroid. Continuous Road Condition Monitoring with Smart Phones*. 2015. In JCEA 9 (4). DOI: 10.17265/1934-7359/2015.04.012.
- KUKLINSKA, K.; WOLSKA, L. NAMIESNIK, J. *Air quality policy in the U.S. and the EU – a review*. Atmospheric Pollution Research, v. 6, n. 1, p. 129–137, 2015.
- GEHRSTZ, M. *The effect of low emission zones on air pollution and infant health*. Journal of Environmental Economics and Management, v. 83, p. 121–144. 2017. doi:10.1016/j.jeem.2017.02.003
- GIL, A. C. *Como elaborar projetos de pesquisa*. 4 ed. São Paulo, Atlas S.A. 2002.

- GODISH, T. *Air Quality*. Lewis Publishers, fifth ed., 1991. Michigan, USA.
- GREENE, Suzanne; AKBARIAN, Mehdi; ULM, Frank-Josef; GREGORY, Jeremy: *Pavement Roughness and Fuel Consumption*. With assistance of Concrete Sustainability HUB.2013
- GUZZELLA, L; ONDER, C. H. *Introduction to modeling and control of internal combustion Engine System*. 2ª ed. Zurique: Springer-Verlag, 2010.
- IEA. Internacional Energy Agency. *Energy and Climate Change*, 2015. Disponível em: <<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEO2015SpecialReportonEnergyandClimateChangeExecutiveSummaryPortugueseversion.pdf>> Acesso em: jan. 2021.
- ISLAM, Shahidul; Buttlar, William G.; Aldunate, Roberto G.; Vavrik, William R.: *Measurement of Pavement Roughness Using Android-Based Smartphone Application*. 2014. In Transportation Research Record 2457 (1), pp. 30–38. DOI: 10.3141/2457-04
- KIENCKE, U.; NIELSEN, L. *Automotive Control Systems*. 2ª. ed. Berlim: Springer, 2005.
- LAGANIER, R.; LUCAS, J. *The influence of pavement evenness and macrotexture on fuel consumption*. In: W.E. Myer and J. Reichert, eds. Surface characteristics of roadways: international research and technologies. 1990. Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials, 454–459. Disponível em: http://www.astm.org/DIGITAL_LIBRARY/STP/SOURCE_PAGES/STP1031.htm. Acesso: Ago. 2021.
- LIMA, Leonardo Lopes. **Identificação dos fenômenos de combustão e detonação em um moto ciclo Otto através da corrente iônica**. 105p. São Paulo, 2014
- LOUKA, P; BELCHER, S. E; HARRISON, R. G. *Modified street canyon flow*. 1998. J Wind Eng Ind Aerod 74-76:485–493. doi:10.1016/S0167-6105(98)00044-0
- MARTINS, Jorge. **Motores de combustão interna**. Publindústria, 2006. 437p.
- MILHOR, Carlos Eduardo. **Sistema de desenvolvimento para controle eletrônico dos motores de combustão interna ciclo Otto**. São Carlos. 72p. Dissertação de Mestrado-Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2002.
- MMA. Ministério no Meio Ambiente. **PROCONVE: programa de controle de poluição do ar por veículos automotores**. Brasília. 2009. Disponível em: <https://www.mma.gov.br/estruturas/163/_arquivos/proconve_163.pdf>
- NICOLAU, Olivia Nascimento Boldrini; CHAVES, Gisele de Lorena Diniz; ZANCHETTA, Igor Tureta. **Avaliação do consumo energético e emissão de dióxido de carbono do setor de transportes rodoviário do Brasil (2016-2026)**. Desenvolvimento e Meio Ambiente, v. 54, 2020. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/made/article/view/62606>>. Acesso: Mar. 2021. DOI: 10.5380/dma.v54i0.62606
- OBSERVATÓRIO DO CLIMA. **Sistema de Estimativa de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG)**, 2017. Disponível em <http://www.observatoriodoclima.eco.br/wp-content/uploads/2017/10/seeg2017presskit_FINAL.pdf>. Acesso em: abr. 2018

- PIARC. The World Road Association. **Manual do Usuário do Programa HDM-4**. Volume 04,1 CD-ROM. 2010.
- QUINTANILHA, Wendy Fernandes Lavigne. **Análise do consumo de combustível e emissão de poluentes de veículos *flex fuel* em diferentes tipos de vias na cidade de Fortaleza - Ceará**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2017.
- QUINTANILHA, W. F. L.; ALECRIM, C. M. C.; MAIA, R. S.; MESQUITA Jr., G. S. M. **Avaliação crítica de procedimentos de análise estatística em modelos de previsão linear do estado geral de rodovias**. Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes. 33^a ANPET. Balneário Camboriú-SC, 2019.
- QUINTANILHA, Wendy Fernandes Lavigne. **Método para avaliação *ex post* dos níveis de concentração de poluentes provenientes de corredores de transporte**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2020.
- RAISER, M; CLARKE, R; PROCEE, P; BRICENO-GARMENDIA, C. **De volta ao planejamento: como preencher a lacuna de infraestrutura no Brasil em tempos de austeridade**. Banco Mundial, 2017. Disponível em:<http://documents.worldbank.org/curated/pt/237341502458978189/pdf/117392-PORTUGUESE-ForBacktoPlanningFinal.pdf> 28. Acesso em: jan. 2021
- ROBBINS, Mary M.; TRAN, Nam: **Literature Review: The Effect of Pavement Roughness on Vehicle Operating Costs**. With assistance of National Center for Asphalt Technology (NCAT). (NCAT Report 15-02). 2015.
- SÃO PAULO. Lei nº 12.490, de 3 de outubro de 1997. **Autoriza o Executivo a implantar Programa de Restrição ao Trânsito de Veículos Automotores no Município de São Paulo, e dá outras providências**. Câmara Municipal de São Paulo. São Paulo. 1997.
- SANDBERG, U. **Road macro- and megatexture influence on fuel consumption**. In: W.E. Myer and J. Reichert, eds. Surface characteristics of roadways: international research and technologies. 1990. Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials, 460 – 479. Disponível em: http://www.astm.org/DIGITAL_LIBRARY/STP/SOURCE_PAGES/STP1031.htm. Acesso em: 10 out. 2021
- SANTERO, N.J.; MASANET, E.; HORVATH, A. **Life-cycle assessment of pavements**. Part I: Critical review. Resources, Conservation and Recycling, 55, 801–809.2011 DOI:10.1016/j.resconrec.2011.03.010
- SAYERS, M.W; KARAMIHAS, S.M. **The Little Book of Profiling. Basis information about measuring an interpreting road profiles**. The Regent of the University of Michigan. 1998.
- SHAHARE, Padmakar; GUPTA, Sanket; LANDGE, V.S.; HOKAM, Vivek S.: **Effect of Road Deterioration on Vehicle Emission**. In International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET) Volume 8, Issue 5, May 2017, pp. 904–912. 2017. ISSN Online: 0976-6316
- SHAPIRO, S.S. and WILK, M.B. **An Analysis of Variance Test for Normality** (Complete Samples) .1965. Biometrika, Vol. 52, No. 3/4, pp. 591-611.

- SILVA, Mariana Império Meyrelles Thomaz. **Nexo entre poluição atmosférica de impacto local e mudanças climáticas globais em um modelo de avaliação integrada para o Brasil**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2020.
- SINDIPEÇAS. **Relatório da Frota Circulante de 2019**. Sindipeças e Abipeças, 2020.
- SNRA. Swedish National Road Administration. **ISOHDM Supplementary Technical Relationship Stud**. Draft Final Report. November 1995.
- SPEARMAN, C. **General intelligence objectively determined and measured**. 1904. *Am J Psychol* 15:201–293
- SUMITSAWAN, P. **Effect of pavement type on fuel consumption in city driving**. Texas at arlington. 2011.
- TOMIYAMA, K., KAWAMURA, A., NAKAJIMA, S., ISHIDA, T., JOMOTO, M. **A Mobile Profilometer for Road Surface Monitoring by Use of Accelerometers**. 2012.
- UNIÃO EUROPEIA. **Regulation (EU) 2009/443**. European Parliament and of the Council setting emission performance standards for new passenger cars as part of the community's integrated approach to reduce CO2 emissions from light-duty vehicles. 2009. Disponível em: <<https://www.eea.europa.eu/policy-documents/443-2009>>. Acesso em 26 out de 2021.
- UNIÃO EUROPEIA. **Regulation (EU) 2019/631**. European Parliament and of the Council setting CO2 emission performance standards for new passenger cars and for new light commercial vehicles, and repealing Regulations (EC) No 443/2009 and (EU) No 510/2011. 2019. Disponível em: <<https://www.eea.europa.eu/policy-documents/631-2019>>. Acesso em 26 out de 2021.
- VICENTINI, P. C. **Metodologia para o inventário de emissões evaporativas provenientes do sistema de alimentação de combustível de veículos do ciclo Otto: desempenho de produtos em motores**. Rio de Janeiro: PETROBRAS, 2010.
- WANG, Ting; Lee, In-Sung; Kendall, Alissa; Harvey, John; Lee, Eul-Bum; Kim, Changmo. **Life cycle energy consumption and GHG emission from pavement rehabilitation with different rolling resistance**. *Journal of Cleaner Production*, 33, 86–96. 2012 DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.05.001.
- WEISS, M; BONNEL, P; HUMMEL, R; MANFREDI, U; COLOMBO, R; LANAPPE, G; LIJOUR, P. L; SCULATI, M. **Analyzing on-road emissions of lightduty vehicles with Portable Emission Measurement Systems (PEMS)**. 2011.
- ZHANG, HAN; LEPECH, MICHAEL; KEOLEIAN, GREGORY; QIAN, SHUNZHI; LI, VICTOR. **Dynamic life-cycle modeling of pavement overlay systems: capturing the impacts of users, construction, and roadway deterioration**. *Journal of Infra-structure Systems*, 16, 299–309. DOI:10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000017. 2010.
- ZHANG, W; LAWELL, C. Y. C. L; UMANSKAYA V. I. **The Effects of License Plate-Based Driving Restrictions on Air Quality: Theory and Empirical Evidence**. *Journal of Environmental Economics and Management*, 82, 2017, 181–220. doi.org/10.1016/j.jeem.2016.12.002.

ZIYADI, M; OZER, H; KANG, S; AL-QADI, I. L. *Vehicle energy consumption and an environmental impact calculation model for the transportation infrastructure systems*. 2018. Journal of Cleaner Production, v. 174, p. 424–436. doi:10.1016/j.jclepro.2017.10.292