Universidade de Ribeirão Preto
Centro de Ciências Exatas, Naturais e Tecnologias
Doutorado em Tecnologia Ambiental

Tomnila da Costa Lacerda Motta

Impacto do trânsito de veículos automotores nos níveis de monóxido de carbono nos emboques dos túneis da cidade de São Paulo

Ribeirão Preto
2024

Tomnila da Costa Lacerda Motta

Impacto do trânsito de veículos automotores nos níveis de monóxido de carbono nos emboques de túneis da cidade de São Paulo

Tese de Doutorado apresentada à Universidade de Ribeirão Preto, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutora pelo programa de Pós-graduação em Tecnologia Ambiental do Centro de Ciências Exatas, Naturais e Tecnologias. Área de concentração: Controle de Poluição e Contaminação do Ar.

.

Orientador: Prof. Dr. Murilo Daniel de Mello Innocentini

Ribeirão Preto
2024

Ficha catalográfica preparada pelo Centro de Processamento
Técnico da Biblioteca Central da UNAERP

- Universidade de Ribeirão Preto -

MOTTA, Tomnila da Costa Lacerda, 1977-

M921i

Tese (Doutorado) - Universidade de Ribeirão Preto,
UNAERP, Tecnologia Ambiental, 2024.

1. Monóxido de carbono. 2. Exposição prolongada. 3. Túneis
. 4. Emboques. 5. São Paulo. II. Título.

TOMNILA DA COSTA LACERDA MOTTA

IMPACTO DO TRÂNSITO DE VEÍCULOS AUTOMOTORES NOS NÍVEIS DE MONÓXIDO DE CARBONO NOS EMBOQUES DOS TÚNEIS DA CIDADE DE SÃO PAULO

Tese de Doutorado apresentada ao programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental do Centro de Ciências Exatas, Naturais e Tecnologias da Universidade de Ribeirão Preto, para a obtenção do título de Doutora em Tecnologia Ambiental.

Área de concentração: Tecnologia Ambiental

Data de defesa: 29 de julho de 2024

Resultado: **APROVADA**

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
gov.br
MURILO DANIEL DE MELLO INNOCENTINI
Data: 14/08/2024 08:54:16-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Murilo Daniel de Mello Innocentini
Presidente/UNAERP

Documento assinado digitalmente
gov.br
RACHEL PASSOS DE OLIVEIRA SANTOS
Data: 12/08/2024 14:30:06-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Profa. Dra. Rachel Passos de Oliveira Santos
UNAERP

Documento assinado digitalmente
gov.br
CARLOS EDUARDO FORMIGONI
Data: 12/08/2024 15:45:55-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Carlos Eduardo Formigoni
UNAERP

Prof. Dr. Andre Luiz Gonçalves Scabbia
IPT

ANDRE LUIZ GONCALVES SCABBIA:10547810873
Assinado de forma digital por ANDRE LUIZ GONCALVES SCABBIA:10547810873
Dados: 2024.08.12 08:24:01 -03'00'

Profa. Dra. Flávia Matias Oliveira da Silva
Instituto Politécnico de Beja (IPBeja)

Assinado por: Flávia Matias Oliveira da Silva
Identificação: PASBR-FY478179
Data: 2024-08-14 às 10:44:35

RIBEIRÃO PRETO
2024

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho:
ao meu companheiro Erich e aos nossos filhos, Pedro e Matheus,
a Fátima Lacerda Novi, *in memoriam,*
aos meus pais Domingos e Tereza
aos irmãos Douglas e Diogo.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Murilo Daniel de Mello Innocentini pela orientação e pelos ensinamentos transmitidos ao longo deste trabalho.

Ao Prof. Dr. André Scabbia por me incentivar a seguir estudando e pesquisando.

À Guara Motta, pelo apoio incondicional.

À Profa. Emyko Sakugawa, pela revisão dos textos.

À Profa. Caroline Kehl, pelas contribuições.

A Leandro Elias de Oliveira, pelo apoio nas ilustrações.

A Hans Albert Motta e Fernanda Baptista de Paula, pelo apoio na realização das medições.

"Quem é apenas bravo tem só um assomo, quem é apenas valente tem só um temperamento, quem é apenas corajoso tem só uma virtude; o obstinado na verdade tem a grandeza. Quase todo o segredo dos grandes corações está nesta palavra: _ Perseverança. A perseverança está para a coragem como a roda para a alavanca; é a renovação perpétua do ponto de apoio."

Victor Hugo

Trecho do livro *Os Trabalhadores do Mar*

RESUMO

A poluição do ar é uma preocupação ambiental. A atmosfera de centros urbanos é caracterizada por uma elevação nos níveis de poluentes. A dispersão dos poluentes atmosféricos resultantes do tráfego rodoviário é facilitada no tráfego de veículos em ruas abertas. Porém, na cidade de São Paulo, foram priorizadas soluções urbanísticas com o uso do espaço subterrâneo. As normas brasileiras aplicáveis aos túneis visam emergências e os sistemas operacionais previstos nestas normas estão limitados ao interior dos túneis, não havendo protocolos de monitoramento nos emboques. Cada túnel é uma construção individual com condições individuais. Isso implica que o uso de uma norma comum para implementar sistemas operacionais para um túnel arbitrário introduz deficiências à construção e ao controle operacional. Este trabalho apresentou características básicas de todos os túneis da cidade de São Paulo e realizou medições de monóxido de carbono nos túneis com comprimento maior que 1.000 m, entre os meses de julho e novembro de 2023. Sendo possível demonstrar que, os níveis de monóxido de carbono, nos emboques com fluxo de saída de veículos dos túneis da cidade de São Paulo alcançaram níveis de monóxido de carbono de 9 a 177 ppm nos momentos de monitoramento, ultrapassando desta forma, o índice de qualidade do ar classificado como bom pela CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Atualmente, não é observada uma correlação da localização dos pontos de monitoramento de qualidade do ar, de responsabilidade da CETESB, com a localização dos túneis da cidade de São Paulo. Dentro deste contexto, o presente estudo busca alertar que a exposição prolongada ao monóxido de carbono nas proximidades dos emboques dos túneis pode provocar efeitos tóxicos continuados para a população circunvizinha.

Palavras-chaves: monóxido de carbono, exposição prolongada, emboques, túneis, São Paulo

ABSTRACT

The impact of motor vehicle traffic on carbon monoxide levels in tunnels entrances in the city of São Paulo

Air pollution is an environmental concern. The atmosphere of urban centers is characterized by an increase in pollutant levels. The dispersion of air pollutants resulting from road traffic is facilitated by vehicles traveling on open streets. However, in the city of São Paulo, urban solutions using underground space have been prioritized. The Brazilian standards applicable to tunnels are aimed at emergencies and the operational systems provided for in these standards are limited to the interior of the tunnels, with no monitoring protocols at the embankments. Each tunnel is an individual construction with individual conditions. This means that using a common standard to implement operating systems for an arbitrary tunnel introduces shortcomings in construction and operational control. This work presented the basic characteristics of all the tunnels in the city of São Paulo and carried out carbon monoxide measurements in tunnels longer than 1,000 m between July and November 2023. It was possible to demonstrate that the levels of carbon monoxide at the junctions where vehicles exit the tunnels in the city of São Paulo reached carbon monoxide levels of 9 to 177 ppm at the times of monitoring, thus exceeding the air quality index classified as good by CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Currently, there is no correlation between the location of the air quality monitoring points, which are the responsibility of CETESB, and the location of the tunnels in the city of São Paulo. In this context, the aim of this study is to warn that prolonged exposure to carbon monoxide near tunnel embankments can have long-term toxic effects on the surrounding population.

Keywords: carbon monoxide, prolonged exposure, entrance of tunnels, São Paulo

Lista de ilustrações

Figura 01 – Subprefeituras da cidade de São Paulo 25

Figura 02 – Climatologia ao longo do ano na cidade de São Paulo 26

Figura 03 – Seção tipo de um túnel rodoviário 28

Figura 04 – Perfil longitudinal de um túnel rodoviário 29

Figura 05 – Composição do fluxo de veículos 31

Figura 06 – Pontos pesquisados com áreas de restrição de circulação 32

Figura 07 – Pontos pesquisados com faixas e corredores de ônibus 32

Figura 08 – Linha do tempo da legislação 38

Figura 09 – Rede automática de monitoramento da CETESB 49

Figura 10 – Rede manual de monitoramento da CETESB 50

Figura 11 – Ventilação longitudinal em túnel rodoviário 64

Figura 12 – Ventilação forçada, semi longitudinal em túnel rodoviário 65

Figura 13 – Ventilação transversal em túnel rodoviário 66

Figura 14 – Ventilação semi-tranversal em túnel rodoviário 67

Figura 15 – Medidor de monóxido de carbono 69

Figura 16 – Localização dos pontos de leitura 70

Figura 17 - Localização das túneis da cidade de São Paulo 71

Figura 18 – Emboque 1 do Túnel Sebastião Camargo 72

Figura 19 - Emboque 2 do Túnel Sebastião Camargo 72

Figura 20 - Emboque 1 do Túnel Jânio Quadros 73

Figura 21 - Emboque 2 do Túnel Jânio Quadros 73

Figura 22 - Emboque 1 do Túnel Ayrton Senna 74

Figura 23 - Emboque 2 do Túnel Ayrton Senna 74

Figura 24 - Emboque 1 do Túnel Tribunal de Justiça 76

Figura 25 - Emboque 2 do Túnel Tribunal de Justiça 76

Figura 26 - Emboque 1 do Túnel Max Feffer.....76
Figura 27 - Emboque 2 do Túnel Max Feffer.....76
Figura 28 - Emboque 1 do Túnel Takeharu Akagawa.....77
Figura 29 - Emboque 2 do Túnel Takeharu Akagawa.....77
Figura 30 - Emboque 1 do Túnel Noite Ilustrada.....78
Figura 31 - Emboque 2 do Túnel Noite Ilustrada.....79
Figura 32 - Emboque 1 do Túnel Jornalista Fernando Vieira de Mello.....79
Figura 33 - Emboque 2 do Túnel Jornalista Fernando Vieira de Mello.....80
Figura 34 - Emboque 1 do Túnel José Roberto Fanganiello Melhem 80
Figura 35 - Emboque 2 do Túnel José Roberto Fanganiello Melhem 81
Figura 36 – Emboque 1 do Passagem Inferior Dirce Camargo.....81
Figura 37 – Emboque 2 do Passagem Inferior Dirce Camargo.....82
Figura 38 - Emboque 1 do Túnel 9 de julho – Emboque de Entrada.....83
Figura 39 - Emboque 2 do Túnel 9 de julho – Emboque de Saída.....83
Figura 40 - Emboque 1 do Passagem subterrânea Tom Jobim 84
Figura 41 - Emboque 2 do Passagem subterrânea Tom Jobim 84
Figura 42 - Emboque 1 do Túnel Papa João Paulo II.....85
Figura 43 - Emboque 2 do Túnel Papa João Paulo II.....85
Figura 44 – Emboque 1 do Passagem subterrânea Presidente Roosevelt.....86
Figura 45 - Emboque 2 do Passagem subterrânea Presidente Roosevelt.....86
Figura 46 - Emboque 1 do Túnel Maria Maluf.....87
Figura 47 - Emboque 2 do Túnel Maria Maluf.....87
Figura 48 - Emboque 1 do Passagem subterrânea Dr. Euryclides de Jesus Zerbini 88
Figura 49 - Emboque 2 do Passagem subterrânea Dr. Euryclides de Jesus Zerbini 88
Figura 50 – Emboque 1 do Passagem subterrânea Senna Madureira.....89
Figura 51 – Emboque 2 do Passagem subterrânea Senna Madureira.....89

Figura 52 – Emboque 1 do Túnel Mackenzie – Emboque de Entrada 90
Figura 53 – Emboque 2 do Túnel Mackenzie.....90
Figura 54 – Emboque 1 do Túnel Odon Pereira.....91
Figura 55 – Emboque 2 do Túnel Odon Pereira.....91
Figura 56 – Emboque 1 do Túnel Francisco Matarazzo.....92
Figura 57 – Emboque 2 do Túnel Francisco Matarazzo.....92
Figura 58 – Emboque 1 do Túnel Paulo Autran.....93
Figura 59 – Emboque 2 do Túnel Paulo Autran 93
Figura 60 – Túnel Nove de Julho – Localização dos emboques 102
Figura 61 – Emboque 1 do Túnel Nove de Julho 103
Figura 62 – Emboque 2 do Túnel Nove de Julho em 29/07/2023 103
Figura 63 – Túnel Nove de Julho em 15/08/2023.....104
Figura 64 – Túnel Nove de Julho em 16/09/2023.....104
Figura 65 – Túnel Maria Maluf – Localização dos emboques 105
Figura 66 – Emboque 1 do Túnel Maria Maluf em 22/08/2023 106
Figura 67 – Emboque 2 do Túnel Maria Maluf em 16/09/2023 107
Figura 68 – Túnel Jânio Quadros – Localização dos emboques.....108
Figura 69 – Túnel Jânio Quadros em 15/08/2023 109
Figura 70 – Emboque 2 do Túnel Jânio Quadros em 17/11/2023.....110
Figura 71 – Emboque 1 do Túnel Jânio Quadros em 17/11/2023.....110
Figura 72 – Túnel Sebastião Camargo – Localização dos emboques 112
Figura 73 – Túnel Sebastião Camargo em 15/08/2023.....113
Figura 74 – Emboque 1 do Túnel Sebastião Camargo em 17/11/2023.....113
Figura 75 – Emboque 2 do Túnel Sebastião Camargo em 17/11/2023.....114
Figura 76 – Avenida Vinte e Três de Maio em 16/09/2023 115
Figura 77 – Túnel Ayrton Senna – Localização dos emboques 115

Figura 78 – Túnel Ayrton Senna em 16/09/2023.....117

Figura 79 – Túnel Ayrton Senna em 16/09/2023.....118

Figura 80 – Túnel Ayrton Senna em 16/09/2023.....118

Figura 81 – Túnel Ayrton Senna em 16/09/2023.....119

Figura 82 – Passagem Presidente Roosevelt – Localização dos emboques.. 120

Figura 83 – Emboque 1 Passagem Presidente Roosevelt em 17/11/2023..... 121

Figura 84 – Emboque 3 Passagem Presidente Roosevelt em 29/07/2023..... 122

Figura 85 – Emboque 2 Passagem Presidente Roosevelt em 10/08/2023.... 123

Figura 86 – Emboque 4 Passagem Presidente Roosevelt em 10/08/2023. 124

Figura 87 – Emboque 4 Passagem Presidente Roosevelt em 10/08/2023... 124

Figura 88 – Emboque 4 Passagem Presidente Roosevelt 125

Lista de tabelas

Tabela 01 – Climatologia ao longo do ano na cidade de São Paulo 27

Tabela 02 – Vias mais carregadas – período da manhã 33

Tabela 03 – Vias mais carregadas – período da tarde 33

Tabela 04 – Frota de veículos da cidade de São Paulo por tipo 34

Tabela 05 – Frota de veículos da cidade de São Paulo por combustível 35

Tabela 06 – Veículos mais vendidos no Brasil em 2023 35

Tabela 07 – Emissão de CO por modelo de veículo 36

Tabela 08 – Padrões de qualidade o ar – Decreto Estadual nº 59.113/2013 40

Tabela 09 – Critérios para episódios agudos de poluição do ar 41

Tabela 10 – Padrões de qualidade o ar – CONAMA nº 491/2018 46

Tabela 11 – Classificação da qualidade do ar e efeitos à saúde 46

Tabela 12 – Rede automática de monitoramento da CETESB 48

Tabela 13 – Rede manual de monitoramento da CETESB 49

Tabela 14 – Monóxido de carbono – Distâncias das vias 52

Tabela 15 – Monóxido de carbono – Monitoramento CETESB 53

Tabela 16 – Dióxido de enxofre – Monitoramento CETESB 54

Tabela 17 – Dióxido de nitrogênio – Distâncias das vias 54

Tabela 18 – Dióxido de nitrogênio – Monitoramento CETESB 55

Tabela 19 – Material particulado – Distâncias das vias 56

Tabela 20 – Partículas Inaláveis MP_{10}- – Monitoramento CETESB 56

Tabela 21 – Partículas Inaláveis $MP_{2,5}$- – Monitoramento CETESB 57

Tabela 22 – Normas de segurança relacionadas a túneis 58

Tabela 23 – Limites temporais de exposição ao monóxido de carbono 60

Tabela 24 – Tipo de ventilação de acordo com a extensão do túnel 60

Tabela 25 – Pontos de leitura 69

Tabela 26 – Túnel Sebastião Camargo 73

Tabela 27 - Túnel Jânio Quadros 74

Tabela 28 - Túnel Ayrton Senna.....75

Tabela 29 - Túnel Tribunal de Justiça 76

Tabela 30 - Túnel Max Feffer.....77

Tabela 31 - Túnel Takeharu Akagawa 78

Tabela 32 - Túnel Noite Ilustrada 79

Tabela 33 – Túnel Jornalista Fernando Vieira de Mello 80

Tabela 34 - Túnel José Roberto Fanganiello Melhem..... 81

Tabela 35 – Passagem subterrânea Dirce Camargo 82

Tabela 36 - Túnel Nove de Julho.....83

Tabela 37 - Passagem Subterrânea Tom Jobim.....84

Tabela 38 - Túnel Papa João Paulo II 85

Tabela 39 - Passagem Subterrânea Presidente Roosevelt.....86

Tabela 40 - Túnel Maria Maluf.....87

Tabela 41 – Passagem subterrânea Dr. Eurycludes de Jesus Zerbini.....88

Tabela 42 – Passagem subterrânea Sena Madureira 89

Tabela 43 - Túnel Mackenzie 90

Tabela 44 - Túnel Odon Pereira 91

Tabela 45 - Túnel Francisco Matarazzo 92

Tabela 46 - Túnel Paulo Autran.....93

Tabela 47 – Localização dos pontos de monitoramento da CETESB em relação aos túneis e passagens subterrâneas 95

Tabela 48 – Datas das leituras realizadas por túnel.....96

Tabela 49 – Dados do clima em 29/07/2023 97

Tabela 50 – Dados do clima em 10/08/2023 98

Tabela 51 – Dados do clima em 15/08/2023 98
Tabela 52 – Dados do clima em 22/08/2023 98
Tabela 53 – Dados do clima em 16/09/2023 99
Tabela 54 – Dados do clima em 29/09/2023 99
Tabela 55 – Dados do clima em 02/10/2023 100
Tabela 56 – Dados do clima em 15/11/2023 100
Tabela 57 – Dados do clima em 17/11/2023 101
Tabela 58 – Leituras no Túnel Nove de Julho – Emboque 1 102
Tabela 59 – Leituras no Túnel Nove de Julho – Emboque 2 102
Tabela 60 – Leituras no Túnel Maria Maluf – Emboque 1 106
Tabela 61 – Leituras no Túnel Maria Maluf – Emboque 2 106
Tabela 62 – Leituras no Túnel Jânio Quadros – Emboque 1 108
Tabela 63 – Leituras no Túnel Jânio Quadros – Emboque 2 109
Tabela 64 – Leituras no Túnel Sebastião Camargo – Emboque 1 112
Tabela 65 – Leituras no Túnel Sebastião Camargo – Emboque 2 112
Tabela 66 – Leituras no Túnel Ayrton Senna – Emboque 1A 116
Tabela 67 – Leituras no Túnel Ayrton Senna – Emboque 1B 116
Tabela 68 – Leituras no Túnel Ayrton Senna – Emboque 2 116
Tabela 69 – Leituras no Túnel Ayrton Senna – Emboque 3 117
Tabela 70 – Leituras na Passagem Presidente Roosevelt – Emboque 1 121
Tabela 71 – Leituras na Passagem Presidente Roosevelt – Emboque 2 122
Tabela 72 – Leituras na Passagem Presidente Roosevelt – Emboque 3 123
Tabela 73 – Leituras na Passagem Presidente Roosevelt – Emboque 4 124
Tabela 74 – Avaliação dos túneis segundo critério da CETESB 128

Lista de abreviaturas e siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ASAS	Sistema Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul
BDMEP	Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa
CET	Companhia de Engenharia de Tráfego
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CEPDEC	Coordenadoria Estadual de Proteção e Defesa Civil
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
CONSEMA	Conselho Estadual do Meio Ambiente
CONTRAN	Conselho Nacional de Trânsito
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EM-IAG	Estação Meteorológica do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo
EUA	Estados Unidos da América
EPA	Environmental Protection Agency
FENABRAVE	Federação Nacional da Distribuição de Veículos Automotores
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IQA	Índices de Qualidade do Ar
ITA	International Tunnelling Association
MMA	Ministério do Meio Ambiente
NBR	Norma Técnica Brasileira
NFPA	National Fire Protection Association
ONU	Organização Nações Unidas
OHSAS	Occupation Health and Safety Assessement
PBEV	Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular
PIARC	Permanent International Association of Road Congress
PRONAR	Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar
PROCONVE	Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores

PROMOT	Programa de Controle da Poluição do Ar por Motociclos e Veículos Similares
PCPV	Plano de Controle de Poluição Veicular no Estado de São Paulo
PMMVD	Programa para Melhoria da Manutenção de Veículos a Diesel
SEADE	Fundação Sistema Estadual de Análise de Dados
SENATRAN	Secretaria Nacional de Trânsito
SAE	Society of Automotive Engineers
SUS	Sistema Único de Saúde
RMSP	Região Metropolitana de São Paulo
UE	União Europeia
WRA	World Road Association

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 21
2. OBJETIVOS 24
2.1. Objetivo geral 24
2.2. Objetivo específico 24
3. REVISÃO DA LITERATURA 25
3.1. Cidade de São Paulo 25
3.2. Clima da cidade de São Paulo ao longo do ano 27
3.3. Túneis 29
3.4. Fluxo de veículos na cidade de São Paulo 31
3.5. Legislação para emissões de poluentes atmosféricos 37
3.5.1. Decreto Estadual no 59.113, de 23/04/2013 40
3.5.2. Resolução CONAMA Nº 018, de 6 maio de 1986 42
3.5.3. Resolução CONAMA Nº 003, de 28 de junho de 1990 42
3.5.4. Lei 8.723, de 28 de outubro de 1993 43
3.5.5. Resolução CONAMA Nº 005, de 05 de agosto de 1993 44
3.5.6. Resolução CONAMA Nº 297, de 26 de fevereiro de 2002 45
3.5.7. Resolução CONAMA Nº 491, de 19 de novembro de 2018 45
3.5.8. Resolução CONAMA Nº 490, de 16 de novembro de 2018 48
3.5.9. Resolução CONAMA Nº 492, de 20 de dezembro de 2018 48
3.5.10. Resolução CONAMA Nº 493, de 24 de junho de 2019 48
3.5.11. Níveis de poluentes monitorados pela CETESB 48
3.5.11.1. Monóxido de carbono (CO) 53
3.5.11.2. Dióxido de enxofre (SO_2) 54
3.5.11.3. Dióxido de nitrogênio (NO_2) 55
3.5.11.4. Material particulado 56
3.5.12. Normas brasileiras e normas internacionais para sistemas operacionais em túneis 58
3.5.13. Diretiva 2004/54 - União Europeia 62
3.5.14. NFPA 502 - *Standard for road tunnels, bridges, and other limited access highways* 62
3.5.15. NBR 15.661:2009 – Proteção contra incêndio em túneis 63
3.5.15.1. Ventilação natural para túneis com comprimento ≤ 500m 64
3.5.15.2. Ventilação longitudinal (por jatos-ventiladores) até 3.000m 64
3.5.15.3. Ventilação forçada, semi longitudinal (por ventiladores axiais), horizontais ou verticais 65

3.5.15.4. Ventilação transversal 66
3.5.15.5. Ventilação semi-transversal 67
4. MATERIAL E MÉTODOS 69
4.1. Caracterização dos túneis e passagens subterrâneas da cidade de São Paulo 69
4.2. Análise os níveis de poluentes monitorados pela CETESB 69
4.3. Medição da concentração de monóxido de carbono 70
4.4. Avaliação dos níveis de monóxido de carbono nos emboques de túneis urbanos 71
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO 72
5.1. Caracterização dos túneis e passagens subterrâneas da cidade de São Paulo 72
5.2. Análise dos pontos de monitoramento da CETESB 96
5.3. Características do clima no período de leituras 97
5.3.1. Túnel Nove de Julho 102
5.3.2. Túnel Maria Maluf 106
5.3.3. Túnel Jânio Quadros 108
5.3.4. Túnel Sebastião Camargo 112
5.3.5. Túneis Ayrton Senna 115
5.3.6. Passagem subterrânea Presidente Roosevelt 120
6. CONCLUSÃO 128
7. REFERÊNCIAS 132

1. INTRODUÇÃO

A poluição do ar é uma preocupação ambiental, focada em sua essência nas áreas urbanas, onde a crescente expansão por meio dos setores industriais e de transporte tem conduzido a elevados níveis de poluição do ar.

No cenário urbano, o trânsito de veículos automotores é responsável pelo lançamento de substâncias nocivas ao homem na atmosfera, em função do processo de queima dos combustíveis fósseis, atuando de forma direta ou indireta sobre a saúde das pessoas próximas à sua emissão. Na emissão de poluentes destacam-se o monóxido de carbono (CO), os hidrocarbonetos (HC), os materiais particulados, os óxidos de nitrogênio (NOx) e os óxidos de enxofre (SOx).

Como contraponto, no espaço urbano buscam-se soluções urbanísticas que proporcionem o equilíbrio econômico, social e ecológico. Neste sentido, o uso do espaço subterrâneo, por meio de túneis, tem um papel importante a desempenhar, seja no alcance de um desenvolvimento ambiental amigável ou na redução da poluição do ar.

No tráfego de veículos em ruas abertas, a dispersão dos poluentes atmosféricos resultantes do tráfego rodoviário é facilitada, principalmente quando predominam condições de instabilidade atmosférica. Nos túneis, registra-se uma acumulação progressiva dos poluentes provenientes dos veículos no seu interior, desde a entrada até a saída dos veículos. Os condutores que atravessam um túnel rodoviário podem estar sujeitos a elevadas concentrações de poluentes durante um curto período. Por outro lado, a população que reside ou trabalha nas imediações dos portais poderá estar exposta, a longo prazo, a valores prejudiciais à sua saúde (Oliveira, 2020).

Em túneis rodoviários, acumula-se uma grande quantidade de poluição do tráfego de veículos, que é removida pela diferença de pressão entre o efeito dos veículos em movimento e o sistema de ventilação do túnel. No Brasil, os sistemas operacionais para túneis foram inicialmente descritos pela Associação Brasileira de Normas Técnicas a partir das normas NBR 5.181:1976 - Sistemas de iluminação de túneis e da norma NBR 15.661:2009 – Proteção contra incêndio em túneis, sendo que a segunda especifica os requisitos de segurança para prevenção e proteção contra incêndio em túneis destinados ao transporte de passageiros e/ou cargas. As

disposições estabelecidas nesta norma não se aplicam às instalações, equipamentos ou estruturas existentes ou cuja construção ou implantação tenha sido aprovada antes da data em que a norma entrou em vigor.

Em julho de 2021, a ABNT publicou a norma NBR 16.980 - Proteção contra incêndio – Túneis urbanos existentes – Requisitos de revitalização, que estabelece os requisitos de segurança contra incêndio para túneis urbanos existentes, visando à sua revitalização e atendendo às condições necessárias para a implantação dos sistemas de segurança utilizados atualmente em túneis urbanos.

Em termos práticos, as normas brasileiras têm como foco a operação do túnel, como atividade fim da estrutura construída, considerando que os túneis têm problemas particulares em emergências e os sistemas operacionais, previstos nestas normas, estão limitados ao interior dos túneis. As normas brasileiras não estabelecem um protocolo de monitoramento dos níveis de poluição atmosférica proveniente no emboque[1] do túnel.

Atualmente, não é observada uma correlação da localização dos pontos de monitoramento da qualidade do ar, de responsabilidade da CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, com a localização dos túneis da cidade de São Paulo.

Desde a década de 1940, os resultados na literatura internacional veem aumento da incidência de doenças pulmonares crônicas em pessoas expostas continuamente a pequenas concentrações de contaminantes. A morbidade e a mortalidade dessas enfermidades são maiores em ambientes de maior contaminação do ar e atingem, invariavelmente, de maneira mais acentuada a população infantil e idosa (OMS, 2006).

Além de provocarem efeitos na saúde da população, os problemas causados pela poluição do ar também geram impactos negativos no que se refere à perspectiva econômica e social. Aumento de custos dos sistemas de saúde e maior vulnerabilidade das populações carentes podem ser vistos como exemplos de problemas causados pela contaminação do ar (Instituto de Energia e Meio Ambiente, 2014).

---

[1] Emboque – estrutura que delimita a entrada ou saída do túnel.

O monóxido de carbono inibe a capacidade do sangue de trocar oxigênio com os tecidos vitais e, em concentrações extremas, provoca morte por envenenamento. Afeta principalmente o sistema cardiovascular e o sistema nervoso. Concentrações mais baixas são suscetíveis de gerar problemas cardiovasculares, principalmente em pacientes cardiopatas. Concentrações elevadas são susceptíveis de provocar tonturas, dores de cabeça e fadiga (Coelho, 2007).

Nesta condição, torna-se importante determinar a concentração de monóxido de carbono proveniente do tráfego rodoviário no emboque dos túneis, com recurso de ferramentas de medição que possam alertar a população circunvizinha.

2. OBJETIVOS

Este trabalho de doutorado tem como objetivo geral e objetivos específicos:

2.1. Objetivo geral

Demonstrar que os níveis de monóxido de carbono, nos emboques dos túneis da cidade de São Paulo, podem ser prejudiciais à saúde da população circunvizinha, considerando que sua exposição prolongada pode ocasionar efeitos tóxicos continuados.

2.2. Objetivo específico

Esta tese tem como objetivos específicos:

a) Apresentar as características dos 17 túneis e 4 passagens subterrâneas da cidade de São Paulo: localização, extensão, subprefeitura, distrito, população do distrito, densidade demográfica do distrito, características físicas;
b) Analisar os dados sobre emissão de poluentes registrados pela CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, comparando-os com as características dos túneis e vias com maior volume veicular e dos distritos com maiores densidades demográficas na cidade de São Paulo;
c) Realizar medição de concentração de monóxido de carbono no emboque dos túneis ou passagens subterrâneas selecionados;
d) Propor requisitos mínimos de controle ambiental nos emboques dos túneis da cidade de São Paulo, no que tange ao monitoramento dos níveis de poluição atmosférica proveniente de veículos automotores, de modo a alertar a população circunvizinha.

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1. Cidade de São Paulo

De acordo com o censo de 2022, São Paulo possui área de 1.521.202 km^2, população de 11.451.245 habitantes e densidade demográfica média de 7.527,76 hab./km^2 (IBGE, 2023).

Segundo o IBGE, São Paulo possui a maior população e maior PIB per capita[2] do país, quando comparada com outros municípios. A cidade apresenta 74,8% de domicílios urbanos em vias públicas com arborização e 50,3% de domicílios urbanos em vias públicas com urbanização adequada (presença de bueiro, calçada, pavimentação e meio-fio). Quando comparado com os outros municípios do país, fica na posição 2.779 de 5.570 e 419 de 5.570, respectivamente.

A cidade possui 3.573.509 domicílios particulares permanentes, sendo 3.545.601 (99,22%) classificados em área urbana e 27.908 (0,78%) em área rural.

O Relatório Mundial das Cidades, publicado pela ONU em julho de 2022, aponta que a população mundial será 68% urbana até 2050. A estimativa é que a população urbana aumente em 2,2 bilhões de pessoas, apesar de ter havido uma desaceleração no ritmo da urbanização durante a pandemia. O relatório conclui que o futuro da humanidade é inegavelmente urbano, tornando-se uma poderosa megatendência do século 21 (ONU, 2022).

A cidade de São Paulo é subdividida em 32 subprefeituras para organização político-administrativa da cidade. Cada subprefeitura pode ser composta de 2 ou mais distritos. As 32 Subprefeituras são: Aricanduva, Butantã, Campo Limpo, Capela do Socorro, Casa Verde, Cidade Ademar, Cidade Tiradentes, Ermelino Matarazzo, Freguesia/Brasilândia, Guaianases, Ipiranga, Itaim Paulista, Itaquera, Jabaquara, Jaçanã/Tremembé, Lapa, M'Boi Mirim, Mooca, Parelheiros, Penha, Perus/Anhanguera, Pinheiros, Pirituba/Jaraguá, Santana/Tucuruvi, Santo Amaro, São Mateus, São Miguel, Sapopemba, Sé, Vila Maria/Vila Guilherme, Vila Mariana e Vila Prudente. A Figura 01 apresenta as subprefeituras e distritos da cidade de São Paulo.

---

[2] PIB per capita – PIB per capita é o produto interno bruto dividido pela quantidade de habitantes de um país. O PIB é a soma de todos os bens de um país.

Figura 01: Subprefeituras da cidade de São Paulo



Fonte: Prefeitura da Cidade de São Paulo (2022)

Nas grandes cidades, como é o caso da cidade de São Paulo, Brasil, que possui mais de 11 milhões de habitantes, a poluição do ar, o tempo e o clima local foram as condições ambientais que mais se transformaram (Moraes *et al.*, 2019).

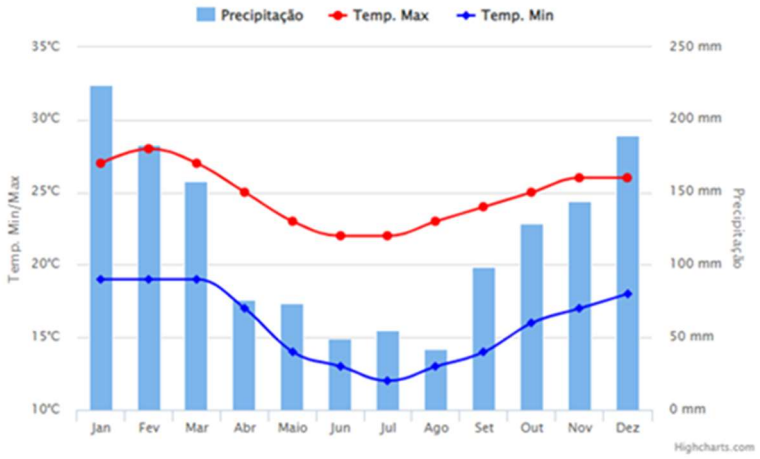
3.2. Clima da cidade de São Paulo ao longo do ano

Na Estação Meteorológica do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (EM-IAG-USP) são realizadas observações meteorológicas desde 1933, sendo que por meio de registros históricos é possível calcular médias e fazer um levantamento de informações que ajudam a descrever o clima na cidade de São Paulo.

De acordo com a classificação de Koppen[3], o clima de São Paulo é Cwa[4], também chamado de subtropical úmido, caracterizado por um inverno notadamente seco e um verão bastante chuvoso. Sendo assim, a melhor maneira de descrever o clima da cidade de São Paulo é dizendo que a amplitude anual de temperatura é menor do que a amplitude diária de temperatura e que ele é caracterizado por duas estações (uma seca e outra úmida) (EM-IAG-USP, 2022).

Os dados apresentados na Tabela 01 e na Figura 02 representam o comportamento da chuva e da temperatura ao longo do ano. As médias climatológicas são valores calculados a partir de uma série de dados de 30 anos observados. É possível identificar as épocas mais chuvosas/secas e quentes/frias de uma região.

Figura 02: Climatologia ao longo do ano na cidade de São Paulo



Fonte: Climatempo (2023)

[3] Koppen - A classificação climática de Köppen-Geiger, mais conhecida por classificação climática de Köppen, é o sistema de classificação global dos tipos climáticos.
[4] Cwa – Clima subtropical úmido.

Tabela 01: Climatologia ao longo do ano na cidade de São Paulo

Mês	Mínima (ºC)	Máxima (ºC)	Precipitação (mm)
Janeiro	19	27	224
Fevereiro	19	28	183
Março	19	27	158
Abril	17	25	76
Maio	14	23	74
Junho	13	22	49
Julho	12	22	55
Agosto	13	23	42
Setembro	14	24	99
Outubro	16	25	129
Novembro	17	26	144
Dezembro	18	26	189

Fonte: Climatempo (2023)

A qualidade do ar é diretamente influenciada pela distribuição e intensidade das emissões de poluentes atmosféricos de origem veicular e industrial. Exercem papel fundamental a topografia e as condições meteorológicas, que se alteram de modo significativo nas várias regiões do estado. As emissões veiculares desempenham um papel de destaque nos níveis de poluição do ar dos grandes centros urbanos, ao passo que as emissões industriais afetam significativamente a qualidade do ar em regiões mais específicas (CETESB, 2020).

A atuação dos fenômenos globais *El Niño* (fase quente) e *La Niña* (fase fria) tem grande influência no comportamento das variáveis meteorológicas e, consequentemente, na qualidade do ar de todo o estado de São Paulo. Esses fenômenos representam, de modo impreciso, uma alteração do sistema de interação oceano-atmosfera no Oceano Pacífico Equatorial, produzindo alterações meteorológicas e climáticas em todo o globo terrestre, que também influenciam na circulação do vento em altitude e afetam o regime de chuvas nas diversas regiões do globo, inclusive do Brasil (CEPDEC, 2021).

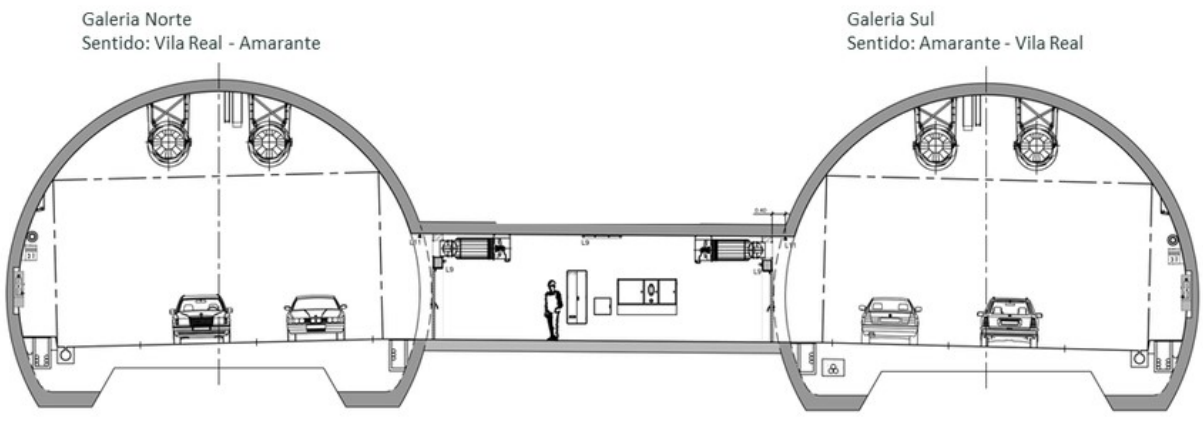
3.3. Túneis

A palavra túnel é definida como caminho ou passagem subterrânea. Todo espaço subterrâneo construído pode ser entendido como túnel. (Bilfinger, 2023). Túneis rodoviários são definidos pela *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) *Technical Commitee for Tunnels* (T-20) como rodovias enclausuradas com acesso de veículos restritos às entradas, independentemente do tipo de estrutura e do método construtivo. A NBR 16.736:2019 define túnel urbano como estrutura pavimentada, abaixo d nível do solo, com superfície protegida por estrutura de rocha, concreto e/ou aço, destinada à passagem de veículos de passageiros e/ou transporte de carga, localizada em perímetro urbano.

Os túneis mais antigos escavados no Egito no ano de 1500 a.C. e em Jerusalém no ano de 700 a.C. foram construídos para a condução de água. Mais tarde, os romanos construíram aquedutos para a expansão de suas cidades e foram os primeiros a abrir túneis rodoviários quando construíram estradas (El Salam, 2002).

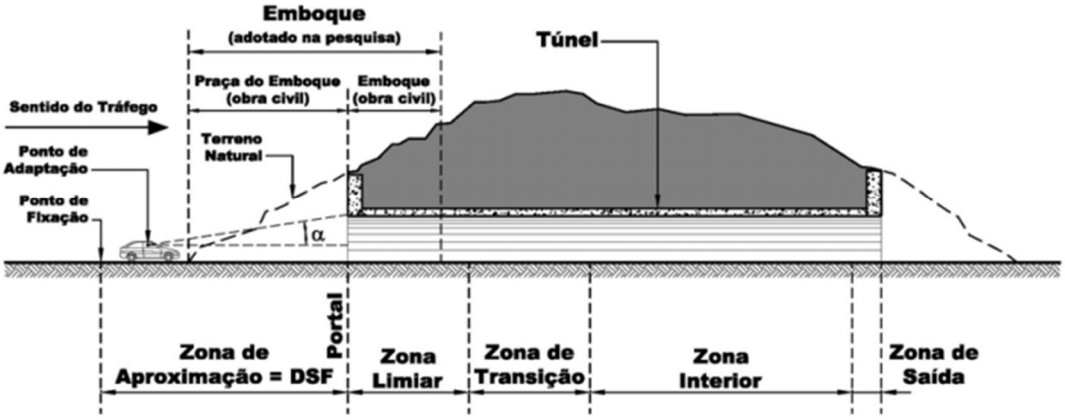
Os túneis rodoviários favoreceram a passagem contínua e segura de veículos, por meio de obstáculos topográficos (montanhas), permitindo distâncias mais curtas entre dois pontos com uma inclinação mínima, reduzindo assim o tempo de viagem, a energia e a emissão de gases de combustão para a atmosfera. Os túneis rodoviários foram construídos em cidades populosas para resolver muitos problemas de tráfego e foram projetados para serem seguros e confortáveis para o uso humano. As Figuras 03 e 04 apresentam a seção transversal e o perfil longitudinal de um túnel. As dimensões variam de acordo com os volumes de tráfego, velocidades de projeto, distâncias de visibilidade, normas locais habituais.

Figura 03: Seção transversal túnel rodoviário



Fonte: Santos *et all* (2016)

Figura 04: Perfil longitudinal de um túnel rodoviário



Fonte: Moura (2007)

Para a PIARC (2001), estas dimensões variam devido a volumes de tráfego, tipos de veículos, velocidade de projeto, distância de frenagem do veículo, distância de visibilidade, espaço para equipamentos do túnel, o gerenciamento do tráfego necessário para responder a um incidente no túnel, as normas habituais e as possibilidades financeiras.

Uma seção transversal típica de um túnel, normalmente, é composta por faixas de rolamento, acostamento, segregador físico (barreira *New Jersey*), passeio para pedestre e drenagem.

A quantidade de faixas de rolamento está diretamente associada ao volume de tráfego. As larguras das faixas de rolamento variam conforme o país. No Brasil, a largura da faixa é orientada pelo Manual de Projeto Geométrico do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), em função da classe da rodovia a ser atendida.

De acordo com Souza (2012), por motivos econômicos a velocidade adotada tende a ser 10 a 20 km/h inferior à velocidade da rodovia. Em túneis localizados em áreas urbanas, normalmente a velocidade não supera 80 km/h.

No caso de vias destinadas ao uso rodoviário, as normas existentes no Brasil indicam um gabarito vertical de 5,50 m, os túneis devem manter gabarito vertical mínimo de 5,50 m, observando que entre o teto do túnel e o limite de 5,50 m há previsão de instalação de equipamentos de ventilação, iluminação, entre outros.

De acordo com NFBA 502 (2008), há cinco categorias de túneis determinadas pela extensão do mesmo: Categoria X - menos de 90m, Categoria A - a partir de 90m,

Categoria B - a partir de 240m, Categoria C – a partir de 300m, Categoria D – a partir de 1.000m.

É recomendável, sempre que possível, adotar para o túnel as mesmas dimensões utilizadas para a faixa de rolamento e as áreas adjacentes. Caso isso não seja possível – ou seja, se a faixa de rolamento é menor no túnel, em comparação com a via a céu aberto adjacente –, essa transição deve começar a 150 m de distância do túnel (Souza, 2012).

A necessidade de ar fresco é determinada pelo aumento admissível da concentração de emissões no fluxo de ar. O ar entra no ambiente do túnel com concentrações ambientais de poluentes. O ar viciado deve ser diluído no interior do túnel antes de atingir os limites admissíveis de poluentes. As concentrações de emissões no interior do túnel são o produto das taxas de emissão e o inverso da vazão de ar (PIARC, 2019).

Para a operação adequada de túneis rodoviários, a Associação Mundial de Rodovias (PIARC) estabelece dois cenários para a implementação de um sistema de ventilação. O primeiro considera a manutenção da qualidade do ar interno (IAQ) e o segundo considera o caso em que um risco de incêndio é gerado dentro do túnel. A qualidade do ar no interior do túnel depende do número de veículos e do congestionamento do tráfego.

3.4. Fluxo de veículos na cidade de São Paulo

A Companhia de Engenharia de Tráfego (CET) realiza pesquisa sistemática de monitoração da fluidez desde 1977, por meio de contagem volumétrica classificada de veículos e levantamento de velocidades médias nas principais vias da cidade. As contagens são realizadas em um dia típico do ano. A quantidade de veículos é levantada por pesquisadores utilizando contadores manuais, posicionados nos pontos de contagem, escolhidos segundo critérios de fluxo, visibilidade e de segurança para o pesquisador (CET, 2020).

Os veículos são classificados em automóveis, motocicletas, ônibus urbanos, ônibus fretados, caminhões e bicicletas, sendo que, em algumas vias, os caminhões são classificados em 2 eixos, 3 eixos e 4 ou mais eixos.

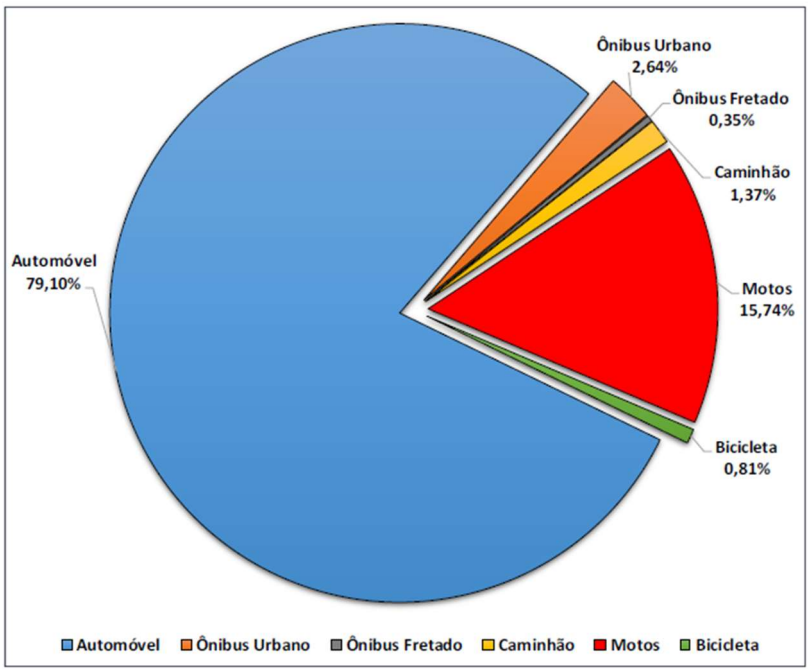
De acordo com a Companhia de Engenharia de Tráfego (CET), o levantamento é realizado pela manhã das 7:00 às 10:00 e, à tarde, das 17:00 às 20:00, totalizando

6 horas de contagem, e os valores acumulados são anotados a cada 15 minutos. A contagem do fluxo de tráfego é direcional, feita sempre nos dois sentidos da via, quando esta é de mão dupla. Os sentidos são, predominantemente, Centro e Bairro.

O cálculo da composição dos veículos é realizado utilizando-se os dados obtidos na pesquisa de volume veicular, o que representa uma amostra dos veículos em geral. Por questões de logística e recursos, nem todas as vias/pontos que constam da pesquisa de mobilidade do sistema viário têm informações coletadas todos os anos, e, por este motivo, são utilizados os números da última pesquisa nos últimos seis anos (CET, 2020).

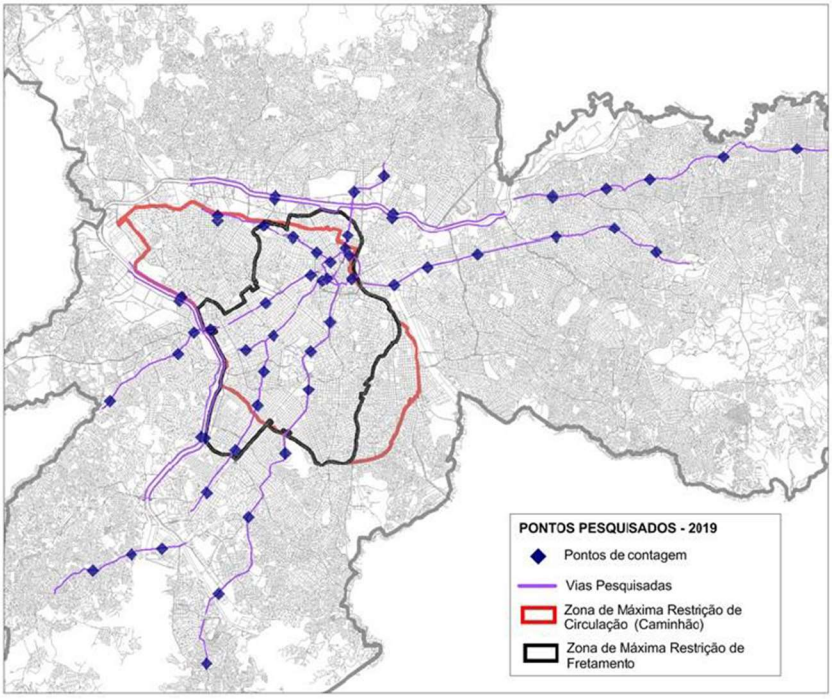
Os resultados da composição dos veículos nas vias pesquisadas em 2019 são mostrados na Figura 05. Os pontos pesquisados com áreas de restrição de circulação e os pontos pesquisados com faixas e corredores de ônibus são apresentados nas Figuras 06 e 07.

Figura 05: Composição do fluxo de veículos



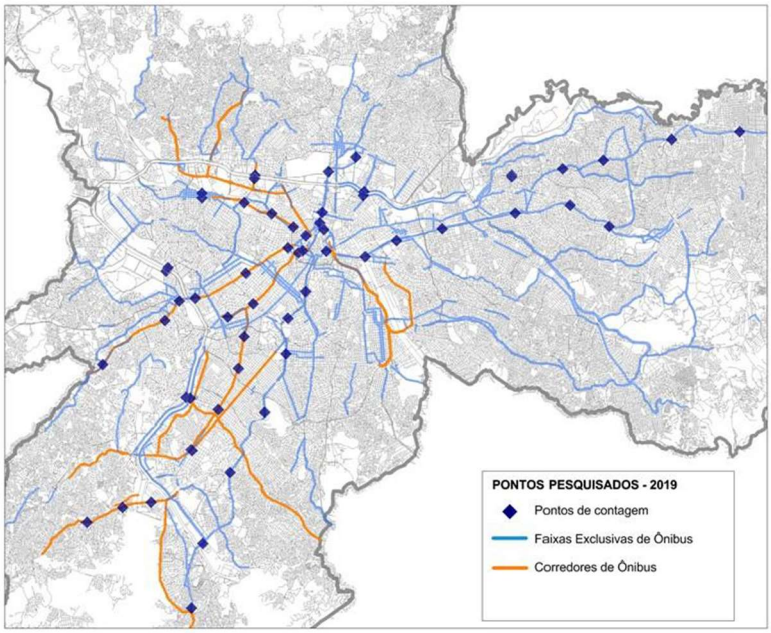
Fonte: CET (2020)

Figura 06: Pontos pesquisados com áreas de restrição de circulação.



Fonte: CET (2020)

Figura 07: Pontos pesquisados com faixas e corredores de ônibus



Fonte: CET (2020)

Os automóveis têm maior participação no horário entre 07:00 e 08:00, no pico manhã, e entre 19:00 e 20:00, no pico tarde. Já as motos têm participação maior entre 08:00 e 09:00, no pico manhã, e entre 18:00 e 19:00, no pico tarde. As Tabelas 02 e 03 mostram os detalhamentos de trechos, sentidos e horários das vias/pontos mais carregados nos dois períodos.

Tabela 02: Vias mais carregadas – período manhã

Posição	Via	Trecho	Sentido	Hora Pico Manhã	Total
1	Vinte e Três de Maio, Av.	Viaduto Tutóia	Bairro	07:30-08:30	10.199
2	Marginal Pinheiros - Expressa (Av. Eng. Billings)	Ponte da Cidade Universitária	Interlagos	07:00-08:00	9.478
3	Radial Leste (Av. Alcântara Machado)	Viaduto Alcântara Machado	Centro	07:15-08:15	8.817
4	Marginal Tietê - Central (Av. Otaviano Alves de Lima)	Ponte do Limão	Castelo Branco	07:15-08:15	6.996
5	Marginal Tietê - Expressa (Av. Morvan Dias de Figueiredo)	Ponte da Vl. Guilherme	Castelo Branco	07:00-08:00	6.927
6	Rubem Berta, Av.	Viaduto Pedro de Toledo	Centro	07:00-08:00	6.617
7	Marginal Tietê - Expressa (Av. Pres. Castelo Branco)	Ponte do Limão	Ayrton Senna	07:15-08:15	6.548
8	Radial Leste (R. Melo Freire)	Viaduto Carlos Ferraci	Centro	07:00-08:00	6.378
9	Washington Luís, Av.	Passarela de Congonhas	Centro	07:00-08:00	5.699
10	Eusébio Matoso, Av.	Passarela de Congonhas	Centro	08:00-09:00	5.659

Fonte: CET (2020)

Tabela 03: Vias mais carregadas – período tarde

Posição	Via	Trecho	Sentido	Hora Pico Tarde	Total
1	Vinte e Três de Maio, Av.	Viaduto Tutóia	Bairro	17:15-18:15	8.844
2	Radial Leste (Av. Alcântara Machado)	Viaduto Alcântara Machado	Bairro	18:30-19:30	8.637
3	Marginal do Rio Pinheiros (Expressa)	Ponte do Morumbi - Caio P. de Toledo	Interlagos	18:00-19:00	7.405
4	Rubem Berta, Av.	Viaduto Pedro de Toledo	Centro	17:45-18:45	7.039
5	Radial Leste (R. Melo Freire)	Viaduto Carlos Ferraci	Bairro	17:00-18:00	6.843
6	Marginal Pinheiros - Expressa (Av. Eng. Billings)	Ponte da Cidade Universitária	Interlagos	17:00-18:00	6.585
7	Washington Luís, Av.	R. Renascença / Passarela de Congonhas	Bairro	17:30-18:30	6.541
8	Marginal Tietê - Central (Av. Pres. Castelo Branco)	Ponte da Vl. Guilherme	Ayrton Senna	18:30-19:30	6.513
9	Marginal Tietê - Central (Av. Otaviano Alves de Lima)	Ponte. do Limão	Castelo Branco	17:00-18:00	5.825
10	Tiradentes, Av.	R. João Teodoro	Bairro	18:00-19:00	5.705

Fonte: CET (2020)

O Ministério dos Transportes, por meio de dados do SENATRAN – Secretaria Nacional de Trânsito, divulga as principais características da frota de veículos automotores do Brasil, como: frota por estado e tipo veículo, frota por munícipio e tipo de veículo. A Tabela 04 apresenta a frota da cidade de São Paulo por tipo de veículo e a Tabela 05 apresenta a frota por tipo de combustível, para o mês de dezembro de 2023.

Tabela 04: Frota de veículos da cidade de São Paulo por tipo

Tipo	Quantidade (un.)	Percentual (%)
Automóvel	6.237.367	65,93%
Motocicleta	1.231.804	13,02%
Caminhonete	593.920	6,28%
Camioneta	540.876	5,72%
Motoneta	239.469	2,53%
Utilitário	214.999	2,27%
Caminhão	145.767	1,54%
Reboque	64.595	0,68%
Ônibus	50.422	0,53%
Semi-reboque	49.788	0,53%
Microônibus	41.788	0,44%
Caminhão trator	36.711	0,39%
Ciclomotor	6.068	0,06%
Trator rodas	3.770	0,04%
Triciclo	1.715	0,02%
Outros	1.160	0,01%
Chassi plataf	200	0,00%
Side-car	95	0,00%
Quadriciclo	57	0,00%
Bonde	8	0,00%
Trator de esteira	5	0,00%

Fonte: SENATRAM (2023)

A FENABRAVE - Federação Nacional da Distribuição de Veículos Automotores divulga anualmente, o balanço do setor automobilístico, sobretudo mostrando os automóveis mais vendidos. A Tabela 06 lista os veículos mais vendidos no Brasil em 2023. O SENATRAN é o órgão máximo executivo do Sistema Nacional de Trânsito, tem como objetivo principal fiscalizar e fazer cumprir a legislação de trânsito e a execução das normas e diretrizes estabelecidas pelo CONTRAN - Conselho Nacional de Trânsito.

Tabela 05: Frota de veículos da cidade de São Paulo por combustível

Tipo	Quantidade (un.)	Percentual (%)
Gasolina	4.189.779	44,29%
Álcool/Gasolina	3.936.990	41,61%
Álcool	502.159	5,31%
Diesel	502.149	5,31%
Sem informação	144.434	1,53%
Gasolina/gás natural veicular	86.089	0,91%
Gasolina/álcool/gás natural	44.334	0,47%
Gasolina/elétrico	18.073	0,19%
Gasolina/álcool/elétrico	12.623	0,13%
Elétrico/fonte externa	7.088	0,07%
Álcool/gás natural veicular	5.533	0,06%
Gasol/gás natural combustível	2.870	0,03%
Elétrico/fonte interna	2.399	0,03%
Gás metano	2.164	0,02%
Híbrido plug-in	1.301	0,01%
Híbrido	845	0,01%
Diesel/elétrico	664	0,01%

Fonte: SENATRAM (2023)

Tabela 06: Veículos mais vendidos no Brasil em 2023

Posição	Fabricante	Modelo	Emplacamentos em 2023
1	Fiat	Strada	120.603
2	Volkswagen	Polo	111.247
3	Chevrolet	Onix	102.049
4	Hyundai	HB20	88.909
5	Chevrolet	Onix Plus	74.898
6	Fiat	Mobi	73.433
7	Volkswagen	T-Cross	72.448
8	Fiat	Argo	66.720
9	Chevrolet	Tracker	66.651
10	Hyundai	Creta	65.826

Fonte: FENABRAVE (2024)

O PBEV - Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular, coordenado pelo INMETRO, publica anualmente uma tabela com informações sobre eficiência energética, consumo, autonomia e emissão de gases de todos os carros de passeio, picapes e utilitários à venda no Brasil.

O PBEV segue as diretrizes definidas, desde 2015, pelo Programa Inovar Auto e que se mantiveram presentes no Programa Rota 2030, ambos programas do Governo Federal, para avaliar o consumo energético de carros tanto a combustão,

quanto elétricos. Os ensaios são baseados na metodologia norte-americana da SAE - *Society of Automotive Engineers*. A declaração dos dados de eficiência energética dos elétricos segue a mesma metodologia, definida pela EPA - *Environmental Protection Agency.* Desde a publicação da Portaria Inmetro Nº 377/2011, os modelos a combustão trazem os valores na etiqueta e nas divulgações devidamente ajustados para refletir o uso cotidiano em quilometragem por litro (km/l), que são apresentados como autonomia real, por meio da aplicação de fatores de correção de aproximadamente 0,28 em relação aos valores obtidos nos ensaios em laboratório. A Tabela 07 apresenta os dados de emissão de CO, do PEB, para os veículos mais vendidos em 2023.

Tabela 07: Emissão de CO por modelo de veículo

Posição	Fabricante	Modelo	CO (mg/km)
1	Fiat	Strada	393
2	Volkswagen	Polo	310
3	Chevrolet	Onix	464
4	Hyundai	HB20	266
5	Chevrolet	Onix Plus	378
6	Fiat	Mobi	225
7	Volkswagen	T-Cross	134
8	Fiat	Argo	363
9	Chevrolet	Tracker	488
10	Hyundai	Creta	113

Fonte: PBEV (2024)

3.5. Legislação para emissões de poluentes atmosféricos

As emissões de grande parte dos poluentes têm diminuído ao longo dos últimos 20 anos, por progressos legislativos ou por opções de veículos sustentáveis do mercado. Em contrapartida, o setor dos transportes continuou a crescer e contribuir para as emissões atmosféricas.

O controle e a redução das emissões de substâncias nocivas no escapamento veicular já são preocupação de várias décadas, tendo ganhado destaque em 1970, com a aprovação do *Clean Air Act* nos EUA, que iniciou um contínuo processo de redução de poluentes emitidos naquele país (Leal; Consoni, 2021).

O *Clean Air Act* autoriza a EPA (*Environmental Protection Agency*) a estabelecer normas nacionais de qualidade do ar ambiente para proteger a saúde pública e o bem-estar coletivo e regular as emissões dos poluentes atmosféricos mais perigosos, tratando-se de uma lei federal dos Estados Unidos da América.

Especificamente no Brasil, o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE) e o uso do etanol combustível ajudaram a reduzir a poluição produzida pelos escapamentos veiculares ao longo das últimas quatro décadas. Já o Programa Nacional do Álcool (PROÁLCOOL) foi criado, em 1975, para viabilizar o uso do etanol como alternativa aos combustíveis baseados no petróleo. A mola propulsora desse programa foi a chamada “crise do petróleo”, ocorrida desde o início daquela década, que elevou sobremaneira o preço desse recurso, acarretando crescentes dificuldades econômicas ao Brasil, devido ao aumento dos déficits em sua balança comercial (Leal;, Consoni, 2021).

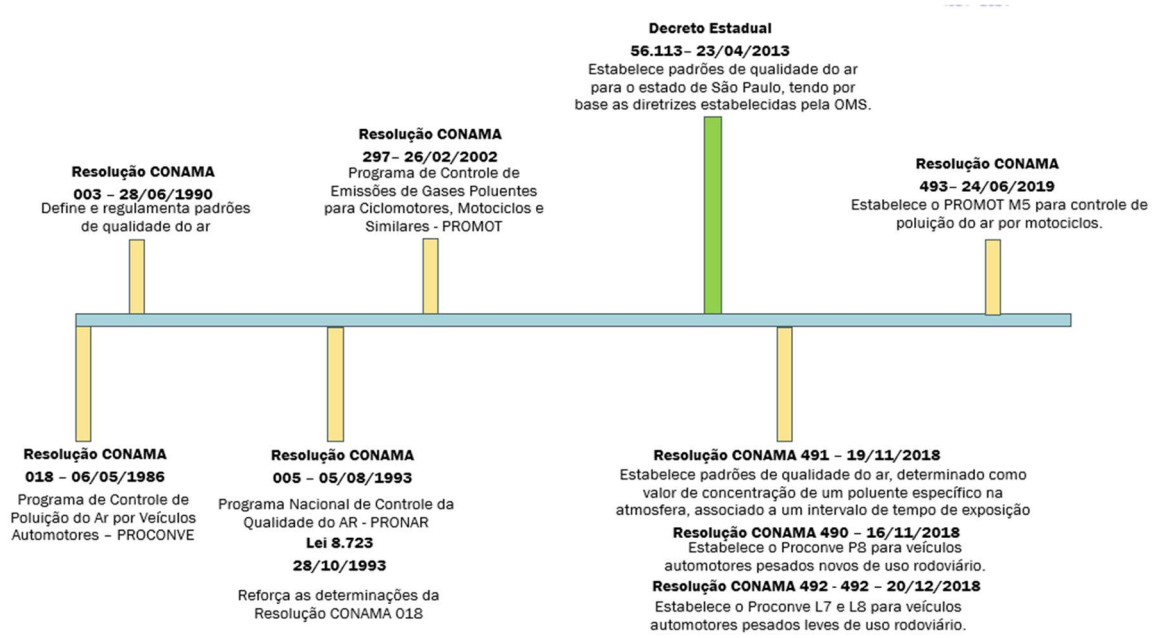
No Brasil, o Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, criado em 1981, vinculado ao Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – Ibama, é o órgão federal que atualmente dispõe sobre as normas de monitoramento e controle da poluição do ar.

Dentre os órgãos ambientais estaduais que se encarregam do controle da poluição urbano-industrial no Brasil, a CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental em São Paulo – foi pioneira, operando, desde a década de 1970, uma rede de monitoramento na região metropolitana de São Paulo e nas principais cidades do interior do Estado.

As restrições legais e institucionais no controle de emissões de poluentes atmosféricos, por parte dos órgãos ambientais, têm como objetivo principal as emissões industriais e veiculares. As ações normativas, junto às indústrias, são diretas e específicas de acordo com as características dos processos produtivos. Já aquelas que abarcam as emissões veiculares, por motivos óbvios, são mais abrangentes e envolvem tanto restrições de composição dos combustíveis como os mecanismos dos motores (Danni-Oliveira, 2008).

A legislação ambiental brasileira vem cada vez mais refinando suas ações normativas, no que diz respeito ao controle das emissões fixas, como também da qualidade dos combustíveis derivados de petróleo e das emissões veiculares, conforme se ilustra na Figura 08.

Figura 08: Linha do tempo da legislação



Fonte: Autora (2023)

Contudo, deve-se levar em conta que a população brasileira é predominantemente urbana e que as cidades, dado o seu dinamismo inerente, tendem a intensificar seus processos de urbanização, ampliando o contingente de pessoas a gerar, notadamente devido à emissão veicular, e a respirar os poluentes do ar (Danni-Oliveira, 2008).

Vale destacar os poluentes lançados pelas motocicletas, principalmente o monóxido de carbono e os hidrocarbonetos. Até pouco tempo, não havia qualquer restrição de emissão de poluentes para as motocicletas, já que a frota era bem reduzida em relação à frota de automóveis. O problema é que nos últimos dez anos a frota de motos no Brasil cresceu a uma taxa de quase 20% a.a., duas vezes maior do que a taxa crescimento da frota dos automóveis, e a tendência é que nos próximos anos essa situação permaneça (Carvalho, 2011).

Uma medida importante para o controle de emissões de poluentes é a manutenção periódica dos veículos motorizados. É sabido que os veículos mais velhos, sem uma manutenção adequada, emitem muito mais poluentes na atmosfera, apesar de esse valor não ter sido quantificado ainda no país em função da ausência de programas de inspeção veiculares já maturados e, portanto, passíveis de avaliação (Carvalho, 2011).

A cidade de São Paulo possui um sistema de rodízio de veículos com o objetivo de reduzir o tráfego e melhorar a mobilidade urbana. Criada em 1997, a regulamentação municipal funciona em duas zonas distintas da cidade, que são conhecidas como Zona de Máxima Restrição à Circulação (ZMRC) e Zona de Restrição ao Trânsito de Caminhões (ZRTC).

O dia de rodízio de cada placa é definido pelo último dígito numérico da placa do veículo. O rodízio é aplicado de segunda-feira a sexta-feira, excluindo os feriados, das 7h às 10h, e das 17h às 20h.

O decreto municipal nº 49.487, de 12 de maio de 2008, restringe a circulação de caminhões de médio e grande porte dentro do centro expandido da capital paulista e ampliou a área de restrição, inicialmente prevista em 25 km², para 100 km². Os horários para atividades de carga e descarga estão limitados das 21h às 5 h. Os veículos urbanos de cargas (VUC), que são veículos de menor capacidade, podem circular atendendo as mesmas condições de rodízio dos automóveis.

3.5.1. Decreto Estadual no 59.113, de 23/04/2013

O Decreto Estadual n. 59.113, de 23/04/2013, estabelece padrões de qualidade do ar para o estado de São Paulo, tendo por base as diretrizes estabelecidas pela Organização Mundial da Saúde, preconizando que a qualidade do ar será efetuada observados os seguintes critérios:

- Metas Intermediárias - (MI) estabelecidas como valores temporários a serem cumpridos em etapas, visando a melhoria gradativa da qualidade do ar no estado de São Paulo, baseada na busca pela redução das emissões de fontes fixas e móveis, em linha com os princípios do desenvolvimento sustentável;
- Padrões Finais (PF) - padrões determinados pelo melhor conhecimento científico para que a saúde da população seja preservada ao máximo em relação aos danos causados pela poluição atmosférica.

De acordo com a CETESB, as metas intermediárias devem ser atendidas em três etapas, assim determinadas:

- Meta Intermediária Etapa 1 - (MI1) - Valores de concentração de poluentes atmosféricos que devem ser respeitados a partir de 24/04/2013;

- Meta Intermediária Etapa 2 - (MI2) - Valores de concentração de poluentes atmosféricos que devem ser respeitados subsequentemente à MI1, que entrara em vigor após avaliações realizadas na Etapa 1, reveladas por estudos técnicos apresentados pelo órgão ambiental estadual, convalidados pelo CONSEMA;
- Meta Intermediária Etapa 3 - (MI3) - Valores de concentração de poluentes atmosféricos que devem ser respeitados nos anos subsequentes à MI2, sendo que o seu prazo de duração será definido pelo CONSEMA, a partir do início da sua vigência, com base nas avaliações realizadas na Etapa 2.

Os padrões finais (PF) são aplicados sem etapas intermediárias quando não forem estabelecidas metas intermediárias, como no caso do monóxido de carbono, partículas totais em suspensão e chumbo.

A Tabela 08 apresenta os padrões de qualidade do ar estabelecidos no Decreto Estadual nº. 59.113/2013 e a Tabela 09 estabelece critérios para episódios críticos de poluição do ar.

Tabela 08: Padrões de qualidade do ar – Decreto Estadual nº59.113/2013

Poluente Atmosférico.	**Tempo de amostragem**	**MI-1**	**MI-2**	**MI-3**	**PF**
		ug/m³	**ug/m³**	**ug/m³**	**ug/m³**
Material Particulado - MP_{10}.	24 horas	120	100	75	50
	MAA[5]	40	35	30	20
Material Particulado - $MP_{2,5}$	24 horas	60	50	37	25
	MAA[1]	20	17	15	10
Dióxido de Enxofre - SO_2	24 horas	60	40	30	20
	MAA[1]	40	30	20	-
Dióxido de Nitrogênio - NO_2.	1 hora	260	240	220	200
	MAA[1]	60	50	45	40
Ozônio - O3	8 horas	140	130	120	100
Monóxido de Carbono – CO	8 horas	-	-	-	9 ppm
Fumaça.	24 horas	120	100	75	50
	MAA[1]	40	35	30	20
Monóxido de Carbono – CO	8 horas	-	-	-	-
Partículas Totais em Suspensão	24 horas	-	-	-	240
	MGA[6]	-	-	-	80
Chumbo - Pb	MAA[1]	-	-	-	0,5

Fonte: CONAMA (2018b)

[5] MAA – Média aritmética anual
[6] MGA – Média geométrica anual

Tabela 09: Critérios para episódios agudos de poluição do ar

Parâmetro	Atenção	Alerta	Emergência
Partículas inaláveis finas (µg/m³) 24h	125	210	250
Partículas inaláveis (µg/m³) 24h	250	420	500
Dióxido de enxofre (µg/m³) 24h	800	1.600	2.100
Dióxido de nitrogênio (µg/m³) 1h	1.130	2.260	3.000
Monóxido de carbono (ppm) 8h	15	30	40
Ozônio (µg/m³) 8h	200	400	600

Fonte: CETESB (2022)

3.5.2. Resolução CONAMA Nº 018, de 6 maio de 1986

A Resolução CONAMA Nº 018, de 6 maio de 1986, dispõe sobre a criação do Programa de controle de poluição do ar por veículos automotores – PROCONVE, com o objetivo de: reduzir os níveis de emissão de poluentes por veículos automotores para atender aos Padrões de Qualidade do Ar, especialmente nos centros urbanos; promover o desenvolvimento tecnológico nacional, tanto na engenharia automobilística como em métodos e equipamentos para ensaios e medições da emissão de poluentes; criar programas de inspeção e manutenção para veículos automotores em uso; promover a conscientização sobre a poluição do ar por veículos automotores; promover a melhoria das características técnicas dos combustíveis líquidos disponíveis para a frota nacional de veículos automotores, visando à redução de poluentes emitidos na atmosfera; e estabelecer condições de avaliação dos resultados alcançados (IBAMA, 2021).

Cabe ao PROCONVE identificar e propor medidas que otimizem o programa com base nos seus resultados e em estudos realizados e estabelecer os limites máximos de emissão de poluentes do ar para os motores e veículos automotores novos.

3.5.3. Resolução CONAMA Nº 003, de 28 de junho de 1990

A Resolução CONAMA Nº 003 de 28 junho de 1990 define e regulamenta os padrões de qualidade do ar:

> Art. 1º - São padrões de qualidade do ar as concentrações de poluentes atmosféricos que, ultrapassadas, poderão afetar a saúde, a segurança e o bem-estar da população, bem como

> ocasionar danos à flora e à fauna, aos materiais e ao meio ambiente em geral.
>
> Parágrafo Único - Entende-se como poluente atmosférico qualquer forma de matéria ou energia (em intensidade e ou quantidade), com concentração, tempo ou características em desacordo com os níveis estabelecidos, e que tornem ou possam tornar o ar:
>
> I - Impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde;
>
> II - Inconveniente ao bem-estar público;
>
> III - Danoso aos materiais, à fauna e flora.
>
> IV - Prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade e às atividades normais da comunidade.
>
> Art. 2º - Para os efeitos desta Resolução ficam estabelecidos os seguintes conceitos: I - Padrões Primários de Qualidade do Ar são as concentrações de poluentes que, ultrapassadas, poderão afetar a saúde da população.
>
> II - Padrões Secundários de Qualidade do Ar são as concentrações de poluentes abaixo das quais se prevê o mínimo efeito adverso sobre o bem-estar da população, assim como o mínimo dano à fauna, à flora, aos materiais e ao meio ambiente em geral (CONAMA,1990).

A Resolução CONAMA Nº 003, de 28 de junho de 1990 estabelece os níveis de concentração considerados críticos para os poluentes indicadores da qualidade do ar, com o objetivo de prevenir episódios agudos de poluição, que deverão orientar a elaboração de Planos Regionais de Controle de Poluição do Ar.

3.5.4. Lei 8.723, de 28 de outubro de 1993

As determinações da Resolução CONAMA Nº 018 foram reforçadas pela Lei 8.723, de 28 de outubro de 1993, que estabeleceu a redução dos níveis de emissão de monóxido de carbono, óxido de nitrogênio, hidrocarbonetos, álcoois, aldeídos, fuligem, material particulado e outros compostos poluentes nos veículos comercializados no país (IBAMA, 2021).

3.5.5. Resolução CONAMA Nº 005, de 05 de agosto de 1993

A Resolução CONAMA Nº 005, de 5 de agosto de 1993, resolve:

> 1 - Instituir o Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar PRONAR, como um dos instrumentos básicos da gestão ambiental para proteção da saúde e bem-estar das populações e melhoria da qualidade de vida com o objetivo de permitir o desenvolvimento econômico e social do país de forma ambientalmente segura, pela limitação dos níveis de emissão de poluentes por fontes de poluição atmosférica com vistas a:
>
> a) uma melhoria na qualidade do ar;
>
> b) o atendimento aos padrões estabelecidos;
>
> c) o não comprometimento da qualidade do ar em áreas consideradas não degradadas (CONAMA,1993).

A Resolução CONAMA Nº 005, de 5 de agosto de 1993, estabelece dois tipos de padrões de qualidade do ar:

> a) São padrões primários de qualidade do ar as concentrações de poluentes que, ultrapassadas, poderão afetar a saúde da população, podendo ser entendidos como níveis máximos toleráveis de concentração de poluentes atmosféricos, constituindo-se em metas de curto e médio prazo.
>
> b) São padrões secundários de qualidade do ar as concentrações de poluentes atmosféricos abaixo das quais se prevê o mínimo efeito adverso sobre o bem-estar da população, assim como o mínimo dano à fauna e flora, aos materiais e meio ambiente em geral, podendo ser entendidos como níveis desejados de concentração de poluentes, constituindo-se em meta de longo prazo (CONAMA,1993).

Para que as ações de controle definidas pelo PRONAR possam ser concretizadas a nível nacional, foram estabelecidos instrumentos de apoio e operacionalização:

- Limites máximos de emissão;

- Padrões de Qualidade do Ar;
- PROCONVE - Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores, criado pela Resolução CONAMA Nº 018/86;
- PRONACOP - Programa Nacional de Controle da Poluição Industrial;
- Programa Nacional de Avaliação da Qualidade do Ar;
- Programa Nacional de Inventário de Fontes Poluidoras do Ar;
- Programas Estaduais de Controle da Poluição do Ar (CONAMA,1993).

3.5.6. Resolução CONAMA Nº 297, de 26 de fevereiro de 2002

O Programa de controle de emissões de gases poluentes para ciclomotores, motociclos e similares (PROMOT) foi instituído pela Resolução CONAMA nº 297/2002, logo após a implementação do controle de emissões para veículos leves.

3.5.7. Resolução CONAMA Nº 491, de 19 de novembro de 2018

A Resolução CONAMA Nº 491, de 19 de novembro de 2018, define:

> I - Poluente atmosférico: qualquer forma de matéria em quantidade, concentração, tempo ou outras características, que tornem ou possam tornar o ar impróprio ou nocivo à saúde, inconveniente ao bem-estar público, danoso aos materiais, à fauna e flora ou prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade ou às atividades normais da comunidade;
>
> II - Padrão de qualidade do ar: um dos instrumentos de gestão da qualidade do ar, determinado como valor de concentração de um poluente específico na atmosfera, associado a um intervalo de tempo de exposição, para que o meio ambiente e a saúde da população sejam preservados em relação aos riscos de danos causados pela poluição atmosférica;
>
> III - Padrões de qualidade do ar intermediários - PI: padrões estabelecidos como valores temporários a serem cumpridos em etapas;
>
> IV - Padrão de qualidade do ar final - PF: valores guia definidos pela Organização Mundial da Saúde - OMS em 2005;

> V - Episódio crítico de poluição do ar: situação caracterizada pela presença de altas concentrações de poluentes na atmosfera em curto período, resultante da ocorrência de condições meteorológicas desfavoráveis à dispersão dos mesmos;
>
> VI - Plano de Controle de Emissões Atmosféricas: documento contendo abrangência, identificação de fontes de emissões atmosféricas, diretrizes e ações, com respectivos objetivos, metas e prazos de implementação, visando ao controle da poluição do ar no território estadual ou distrital, observando as estratégias estabelecidas no Programa Nacional de Controle da Qualidade do Ar - PRONAR;
>
> VII - Material Particulado MP_{10}: partículas de material sólido ou líquido suspensas no ar, na forma de poeira, neblina, aerossol, fuligem, entre outros, com diâmetro menor ou igual a 10 micrômetros;
>
> VIII - Material Particulado $MP_{2,5}$: partículas de material sólido ou líquido suspensas no ar, na forma de poeira, neblina, aerossol, fuligem, entre outros, com diâmetro menor ou igual a 2,5 micrômetros;
>
> IX - Partículas Totais em Suspensão - PTS: partículas de material sólido ou líquido suspensas no ar, na forma de poeira, neblina, aerossol, fuligem, entre outros, com diâmetro menor ou igual a 50 micrômetros;
>
> X - Índice de Qualidade do Ar - IQAR: valor utilizado para fins de comunicação e informação à população que relaciona as concentrações dos poluentes monitorados aos possíveis efeitos adversos à saúde (CONAMA, 2018b).

A Resolução CONAMA Nº 491 estabelece padrões de qualidade do ar, determinado como valor de concentração de um poluente específico na atmosfera, associado a um intervalo de tempo de exposição, para que o meio ambiente e a saúde da população sejam preservados em relação aos riscos de danos causados pela poluição atmosférica.

A qualificação da qualidade do ar está vinculada à norma legal (Resolução CONAMA n° 491/2018) e independe do padrão de qualidade/meta intermediária em vigor, visto que está associada aos efeitos à saúde humana, conforme apresentado nas Tabelas 10 e 11.

Tabela 10: Padrões de qualidade do ar – CONAMA nº 491/2018

Poluente Atmosférico.	Período de Referência	PI-1	PI-2	PI-3	PI-F	
		mg/m³	mg/m³	mg/m³	mg/m³	ppm
Material Particulado - MP_{10}.	24 horas	120	100	75	50	-
	Anual[7]	40	35	30	20	-
Material Particulado - $MP_{2,5}$	24 horas	60	50	37	25	-
	Anual¹	20	17	15	10	-
Dióxido de Enxofre - SO_2	24 horas	125	50	30	20	-
	Anual¹	40	30	20	-	-
Dióxido de Nitrogênio - NO_2.	1 hora[8]	260	240	220	200	-
	Anual¹	60	50	45	40	-
Ozônio - O3	8 horas[9]	140	130	120	100	-
Fumaça.	24 horas	120	100	75	50	-
	Anual¹	40	35	30	20	-
Monóxido de Carbono – CO	8 horas³	-	-	-	-	9
Partículas Totais em Suspensão – PTS	24 horas	-	-	-	240	-
	Anual[10]	-	-	-	80	-
Chumbo - Pb5	Anual¹	-	-	-	0,5	-

Fonte: CONAMA (2018b)

Tabela 11: Classificação da qualidade do ar e efeitos à saúde

Qualidade	Índice	Significado
N1 – Boa	0 – 40	
N2 – Moderada	41 – 80	Pessoas de grupos sensíveis (crianças, idosos e pessoas com doenças respiratórias e cardíacas) podem apresentar sintomas como tosse seca e cansaço. A população, em geral, não é afetada.
N3 – Ruim	81 – 120	Toda a população pode apresentar sintomas como tosse seca, cansaço, ardor nos olhos, nariz e garganta. Pessoas de grupos sensíveis (crianças, idosos e pessoas com doenças respiratórias e cardíacas) podem apresentar efeitos mais sérios na saúde.
N4 – Muito ruim	121 – 200	Toda a população pode apresentar agravamento dos sintomas como tosse seca, cansaço, ardor nos olhos, nariz e garganta e ainda falta de ar e respiração ofegante. Efeitos ainda mais graves à saúde de grupos sensíveis (crianças, idosos e pessoas com doenças respiratórias e cardíacas).
N5 – Péssima	> 200	Toda a população pode apresentar sérios riscos de manifestações de doenças respiratórias e cardiovasculares. Aumento de mortes prematuras em pessoas de grupos sensíveis.

Fonte: CETESB (2022)

[7] Média aritmética anual
[8] Média horária
[9] Máxima média móvel obtida no dia
[10] Média geométrica anual

3.5.8. Resolução CONAMA Nº 490, de 16 de novembro de 2018

A resolução CONAMA Nº 490, de 16 de novembro de 2018, estabelece a fase Proconve P8 de exigências, para o controle das emissões de gases poluentes e de ruído para veículos automotores pesados novos de uso rodoviário e dá outras providências.

3.5.9. Resolução CONAMA Nº 492, de 20 de dezembro de 2018

A resolução CONAMA Nº 492, de 20 de dezembro de 2018, estabelece as fases PROCONVE L7 e PROCONVE L8 de exigências do programa de controle da poluição do ar por veículos automotores leves, novos, de uso rodoviário, alterando a Resolução CONAMA número nº 15 de 13 de dezembro de 1995.

3.5.10. Resolução CONAMA Nº 493, de 24 de junho de 2019

A resolução CONAMA Nº 493, de 24 de junho de 2019, estabelece a Fase PROMOT M5 de exigências do programa de controle da poluição do ar por motociclos e veículos similares, alterando as Resoluções CONAMA números 297/2002 e 432/2011.

3.5.11. Níveis de poluentes monitorados pela CETESB

Com relação à sua origem, os poluentes podem ser classificados como: Primários: aqueles emitidos diretamente pelas fontes de emissão; Secundários: aqueles formados na atmosfera por meio da reação química entre poluentes e/ou constituintes naturais na atmosfera (CETESB, 2020).

Quando se determina a concentração de um poluente na atmosfera, mede-se o grau de exposição dos receptores (seres humanos, outros animais, plantas, materiais) como resultado do processo de lançamento desse poluente na atmosfera a partir de suas fontes de emissão e suas interações na atmosfera do ponto de vista físico (diluição) e químico (reações químicas) (CETESB, 2020).

E importante frisar que, mesmo mantidas as emissões, a qualidade do ar pode mudar em razão das condições meteorológicas que determinam uma maior ou menor

diluição dos poluentes. É por isso que a qualidade do ar piora com relação aos parâmetros monóxido de carbono, material particulado e dióxido de enxofre durante os meses de inverno, quando as condições meteorológicas são mais desfavoráveis à dispersão dos poluentes. Já o ozônio apresenta maiores concentrações na primavera e verão, por ser um poluente secundário que depende, dentre outros fatores, da intensidade de luz solar para ser formado. O período de maio a setembro é, geralmente, o mais desfavorável para a dispersão de poluentes primários no estado de São Paulo (CETESB, 2020).

Os resultados do monitoramento da qualidade do ar no estado de São Paulo são apresentados por grupo de poluente. A CETESB possui estações medidoras na Região Metropolitana de São Paulo e no interior e litoral do Estado, além de estações móveis, que são utilizadas em estudos temporários.

Esta rede de monitoramento é ligada a uma central de computadores por meio do sistema de telemetria e registra ininterruptamente as concentrações dos poluentes na atmosfera. Estes dados são processados com base nas médias estabelecidas por padrões legais e são disponibilizados na internet.

Cada poluente é monitorado por um equipamento específico. Na denominada rede automática, o ar é amostrado, analisado e, em tempo real, os dados são enviados à central alocada na sede da CETESB, conforme apresentado na Tabela 12 e Figura 09. Há também estações dotadas de equipamentos que coletam amostras, então enviadas a laboratório da CETESB para análise. Tais estações constituem a denominada rede manual, apresentada nas Tabelas 13 e Figura 10.

Tabela 12: Rede automática de monitoramento da CETESB

Parâmetros	**Método de Medição**
Partículas inaláveis finas	radiação Beta
Partículas inaláveis	radiação Beta
Dióxido de enxofre	fluorescência de pulso (ultravioleta)
Óxidos de nitrogênio	quimiluminescência
Monóxido de carbono	infravermelho não dispersivo (GFC)
Enxofre reduzido total	oxidação térmica-fluorescência de pulso
Ozônio	ultravioleta
Benzeno / Tolueno	cromatografia gasosa

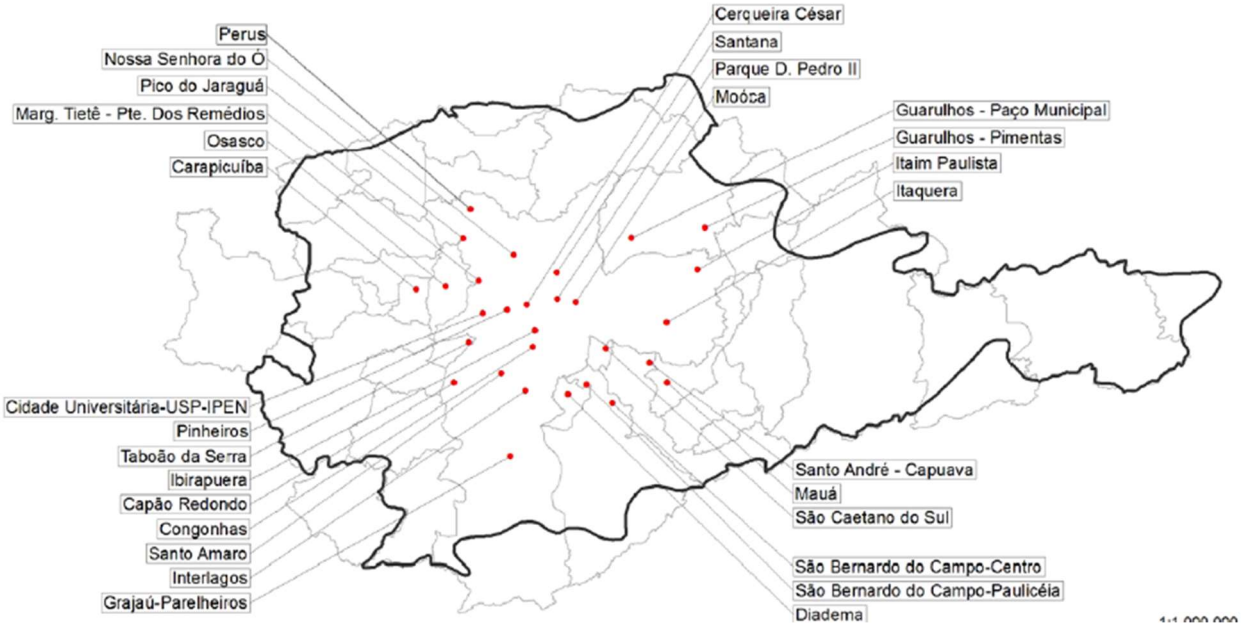
Fonte: CETESB (2022)

Tabela 13: Rede manual de monitoramento da CETESB

Parâmetro	Método	Frequência de amostragem
Partículas inaláveis finas – $MP_{2,5}$	gravimétrico / impactação-ciclone	1 amostra de 24 h a cada 6 dias
Partículas inaláveis – MP_{10}	gravimétrico / amostrador de grandes volumes acoplado a um separador inercial gravimétrico/impactação	1 amostra de 24 h a cada 6 dias
Partículas totais em suspensão	gravimétrico/impactação	1 amostra de 24 h a cada 6 dias
Fumaça	Refletância	1 amostra de 24 h a cada 6 dias
Dióxido de enxofre	cromatografia iônica / amostrador passivo	1 amostra mensal contínua
Acetaldeído e Formaldeído	Cromatografia Líquida de Alta Eficiência/Detecção UV-Visível	1 amostra de 24 h a cada 6 dias

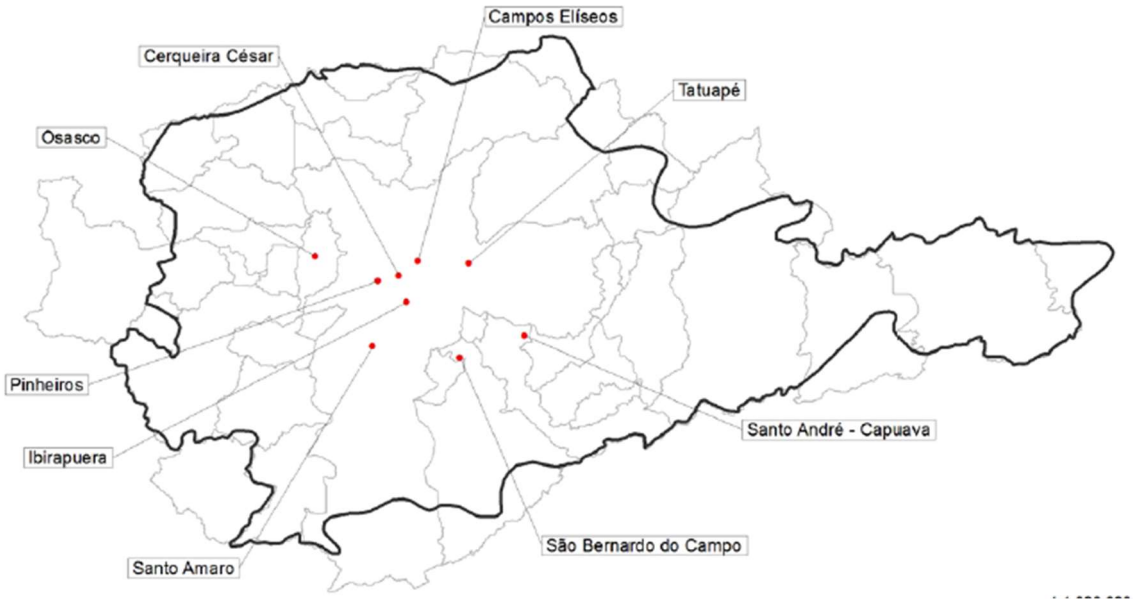
Fonte: CETESB (2022)

Figura 09: Rede automática de monitoramento da CETESB



Fonte: CETESB (2021)

Figura 10: Rede manual de monitoramento da CETESB



Fonte: CETESB (2021)

De acordo com a CETESB, os boletins mensais de qualidade do ar emitidos pela CETESB para o Estado de São Paulo apresentam um resumo dos dados obtidos no mês. Os dados são apresentados de acordo com as redes que os geram. Os produzidos pela rede automática, por serem contínuos, são apresentados com associação aos efeitos à saúde. Para efeito de divulgação, utiliza-se o índice mais elevado dentre os índices calculados para cada poluente, isto é, embora a qualidade do ar de uma estação seja avaliada para todos os poluentes monitorados, a sua classificação é determinada pelo maior índice (pior caso) (CETESB, 2020).

O Decreto Estadual nº 59113 de 23/04/2013 estabeleceu novos padrões de qualidade do ar para o Estado de São Paulo, assim como modificações na política de gerenciamento deste recurso e novos critérios de classificação da qualidade do ar das sub-regiões. Em seu artigo 5º, o decreto fixa os critérios para a classificação da qualidade do ar de uma sub-região, para efeito de gestão quanto a um poluente específico nas seguintes categorias: Maior que M1 (>M1), M1, M2, M3 e MF. Esta classificação é realizada a cada três anos, sendo considerados os seguintes poluentes: partículas inaláveis, partículas inaláveis finas, dióxido de enxofre, dióxido de nitrogênio e ozônio (CETESB, 2016).

O artigo 5º do Decreto Estadual nº 59113 também estabelece em seu parágrafo 4º que a CETESB deverá classificar as estações de monitoramento da qualidade do

ar segundo sua representatividade espacial, considerando as seguintes categorias: microescala, média escala, bairro e urbana. Em seu parágrafo 5º do artigo 5º, define que as estações com significativa influência das emissões veiculares e classificadas como de microescala para os poluentes primários poderão, a critério da CETESB, não ter seus dados considerados para a classificação da qualidade do ar (CETESB, 2016).

Os resultados do monitoramento em uma dada estação devem representar as concentrações do poluente de interesse numa escala espacial compatível com os objetivos do monitoramento. Dependendo dos objetivos, as escalas de representatividade mais apropriadas para as estações que compõem uma rede de monitoramento, e que estão estabelecidas no Decreto Estadual nº59113/2013, são:

- microescala: relativa à representatividade espacial de áreas de dimensão de poucos metros até 100 metros;
- média escala: relativa à representatividade espacial de blocos de áreas urbanas (poucos quarteirões com características semelhantes) com dimensões entre 101 e 500 metros;
- escala de bairro: relativa à representatividade espacial de áreas de bairros urbanos com atividade uniforme e dimensões entre 501 e 4.000 metros;
- escala urbana: relativa à representatividade espacial de cidades ou regiões metropolitanas, da ordem de 4 a 50 km.

A classificação da representatividade espacial depende da localização da estação, considerando-se: poluente de interesse, proximidade das fontes de emissão, intensidade das emissões, condições de topografia, relevo e transporte dos poluentes. Depende também da posição da sonda de amostragem em relação à altura de captação e proximidade de obstáculos (CETESB, 2016).

Para classificação das estações, é considerado o impacto de fontes fixas e/ou móveis, além do conhecimento técnico acumulado advindo do histórico de análise de eventos de poluição e de avaliação de pontos de monitoramento. Foram levados também em consideração os estudos já realizados pela CETESB sobre a caracterização das estações de monitoramento da qualidade do ar (CETESB, 2016).

De acordo com a CETESB, para fontes fixas, são consideradas sua distância e posição em relação à estação e a intensidade das emissões. Essas informações são analisadas em conjunto com detalhes do relevo / topografia do local e aspectos meteorológicos, como intensidade e predominância de ventos. Para fontes móveis,

são considerados a distância das vias e o volume de tráfego. Os critérios de classificação das estações consideram as recomendações expressas no "*Code of Federal Regulations - Title 40 – Protection of Environment/ Part 58 – Ambient Air QualitySurveillance/ Appendix E to Part 58 – Probe and Monitoring Path Siting Criteria for Ambient Air Quality Monitoring*".

3.5.11.1. Monóxido de carbono (CO)

O monóxido de carbono é um gás incolor, inodoro e insípido que é levemente menos denso que o ar. A afinidade da hemoglobina com o CO é 200 vezes maior do que com oxigênio em humanos, formando carboxihemoglobina, e interfere no metabolismo humano (PIARC, 2008).

O "*Code of Federal Regulations*" estabelece as distâncias das vias em função do volume de tráfego para estações classificadas como escala bairro para CO, conforme Tabela 14. As estações localizadas a distâncias de 2 a 10 metros de vias de tráfego em áreas centrais das cidades, perto de corredores de tráfego, medem a influência das fontes próximas e são classificadas como representativas de microescala (CETESB, 2016).

Tabela 14: Monóxido de carbono – Distância das vias

Número médio de veículos/dia	Distância mínima (m) Escala bairro
< 10.000	10
15.000	25
20.000	45
30.000	80
40.000	115
50.000	135
> 60.000	150

Fonte: CETESB (2016)

O boletim de qualidade do ar, emitido pela CETESB para o Estado de São Paulo, apresenta dados obtidos em agosto 2022 para monóxido de carbono (CO), que são exibidos na Tabela 15.

Tabela 15: Monóxido de carbono - Monitoramento CETESB

Monóxido de Carbono (CO) Agosto 2022

Estação	Boa 0-9 ppm	Moderada >9-11 ppm	Ruim >11-13 ppm	Muito Ruim >13-15 ppm	Péssima >15 ppm
Cerqueira César	100%				
Congonhas	100%				
Grajaú Parelheiros	100%				
Ibirapuera	100%				
Marg. Tietê Ponte Remédios	100%				
Mooca	100%				
Parque Dom Pedro II	100%				
Pinheiros	100%				

Fonte: CETESB (2022)

De acordo com a CETESB, os veículos são responsáveis por cerca de 96% das emissões de CO na RMSP. Dessa forma, há uma correlação estatística muito alta entre as medias anuais das concentrações máximas de 8 horas das estações da Região Metropolitana de São Paulo e a estimativa da evolução das emissões veiculares de CO para a RMSP.

3.5.11.2. Dióxido de enxofre (SO_2)

Os óxidos de enxofre resultam de processos que utilizam queima de óleo combustível, refinarias de petróleo, veículos a diesel, produção de polpa de celulose e papel, fertilizantes (CETESB, 2020).

O dióxido de enxofre é um gás incolor, com forte odor, semelhante ao gás produzido na queima de palitos de fósforos. E um importante precursor dos sulfatos, um dos principais componentes das partículas inaláveis (CETESB, 2020).

Para classificação das estações de monitoramento de SO_2 em termos de escala de representatividade, são adotados os mesmos critérios estabelecidos para o CO (CETESB, 2016).

O boletim de qualidade do ar emitido pela CETESB para o Estado de São Paulo apresenta dados obtidos em agosto 2022, para dióxido de enxofre (SO_2), exibidosna Tabela 16.

Tabela 16: Dióxido de enxofre - Monitoramento CETESB

Dióxido de Enxofre (SO_2) - agosto 2022

Estação	Boa 0-9 ppm	Moderada >9-11 ppm	Ruim >11-13 ppm	Muito Ruim >13-15 ppm	Péssima >15 ppm
Cerqueira César	100%				
Congonhas	100%				
Marg. Tietê Ponte Remédios	100%				

Fonte: CETESB (2022)

3.5.11.3. Dióxido de nitrogênio (NO_2)

Os óxidos de nitrogênio resultam da combinação do oxigênio e nitrogênio presentes no ar admitido pelo motor, em condições de altas temperaturas e pressões (Miyamoto, 2010).

Ao ser oxidado na atmosfera, o óxido de nitrogênio produz o ácido nítrico (HNO_3). Ele é um dos componentes que aumenta a acidez da chuva e causa vários danos à natureza por ser corrosivo. Gás marrom avermelhado, com odor forte e muito irritante, pode levar à formação de ácido nítrico, nitratos (os quais contribuem para o aumento das partículas inaláveis na atmosfera) e compostos orgânicos tóxicos.

A Tabela 17 apresenta as distâncias mínimas entre a estação e a via, em função do volume de tráfego, para escalas de representatividade bairro e urbana.

Tabela 17: Dióxido de nitrogênio – Distância das vias

Número médio de veículos/dia	Distância mínima (m) Escala bairro/urbana
< 10.000	10
15.000	20
20.000	30
40.000	50
70.000	100
> 110.000	250

Fonte: CETESB (2016)

As estações localizadas a menos de 15 metros de uma via com baixa densidade de tráfego, ou seja, com impacto de tráfego não significativo, foram classificadas em função da principal via mais próxima (CETESB, 2016).

O boletim de qualidade do ar, emitido pela CETESB para o Estado de São Paulo, apresenta dados obtidos em agosto 2022, para dióxido de nitrogênio (NO_2) apresentados na Tabela 18.

Tabela 18: Dióxido de nitrogênio - Monitoramento CETESB

Dióxido de Nitrogênio (NO_2) - agosto 2022

Estação	Boa 0-9 ppm	Moderada >9-11 ppm	Ruim >11-13 ppm	Muito Ruim >13-15 ppm	Péssima >15 ppm
Cerqueira César	100%				
Congonhas	100%				
Ibirapuera	100%				
Itaim Paulista	100%				
Marg. Tietê Ponte Remédios	100%				
Parque Dom Pedro II	100%				
Pico do Jaraguá	100%				
Pinheiros	100%				

Fonte: CETESB (2022)

3.5.11.4. Material particulado

O material particulado atmosférico das grandes cidades é formado principalmente por conta do trânsito de veículos, seja pelo processo de combustão ou pelo processo mecânico de transporte.

As partículas produzidas por meio de combustão têm diâmetro menor que as produzidas mecanicamente e estas podem provocar maior dano à saúde, uma vez que podem penetrar mais fundo no trato respiratório e, desta forma, ser levadas pela corrente sanguínea (Oliveira, 2015).

O material particulado pode ser classificado conforme o tamanho de suas partículas como material grosso (partículas com diâmetro superior a 2,5 μm), fino (partículas com diâmetro maior que 1 μm e inferior a 2,5 μm) e ultrafino (partículas com diâmetro menor que 1 μm). Os processos de combustão formam partículas ultrafinas e finas, enquanto os processos mecânicos formam as partículas grossas.

Uma vez que as emissões veiculares contribuem para os níveis de material particulado na atmosfera em suas diversas frações de tamanho, é importante considerar a distância da captação da amostra em relação às principais vias de tráfego (CETESB, 2016).

As estações localizadas a distâncias entre 5 e 15 metros de um corredor de tráfego, com altura de captação da amostra entre 2 e 7 metros, são consideradas representativas de microescala. A captação das amostras de material particulado nas redes de avaliação da CETESB se dá numa faixa de altura de 3 a 4 metros (CETESB, 2016).

Estações a menos de 15 metros da principal via de tráfego foram classificadas como microescala. No caso de via com baixa densidade de tráfego, as estações foram classificadas em função da via principal mais próxima. A Tabela 19 apresenta as distâncias mínimas entre a estação e a via; e as Tabelas 20 e 21 apresentam o monitoramento para Partículas Inaláveis MP_{10} e Partículas Inaláveis $MP_{2,5}$.

Tabela 19: Material particulado – Distância das vias

Número médio de veículos/dia	Distância (m)		
	Escala média	Escala bairro	Escala urbana
< 15.000	-	15 a 80	>80
20.000	15 a 20	20 a 90	>90
30.000	15 a 30	30 a 100	>100
40.000	15 a 40	40 a 110	>110
50.000	15 a 50	50 a 120	>120
60.000	15 a 60	60 a 130	>130
70.000	15 a 70	70 a 140	>140
75.000	15 a 75	75 a 150	>150
>80.000	15 a 85	>80	-

Fonte: CETESB (2016)

Tabela 20: Partículas Inaláveis MP_{10}- Monitoramento CETESB

Partículas Inaláveis (MP_{10}) - agosto 2022

Estação	**Boa 0-9 ppm**	**Moderada >9-11 ppm**	**Ruim >11-13 ppm**	**Muito Ruim >13-15 ppm**	**Péssima >15 ppm**
Capão Redondo	100%				
Cerqueira César	94%	6%			
Congonhas	94%	6%			
Grajaú	71%	26%	3%		
Itaim Paulista	87%	13%			
Marg. Tietê Ponte Remédios	79%	21%			
Nossa Senhora do Ó	90%	10%			
Parque D. Pedro II	70%	30%			
Perus	71%	29%			
Pinheiros	87%	13%			
Santo Amaro	97%	3%			

Fonte: CETESB (2022)

Tabela 21: Partículas Inaláveis Finas $MP_{2,5}$ - Monitoramento CETESB

Partículas Inaláveis Finas ($MP_{2,5}$) Agosto 2022

Estação	Boa 0-9 ppm	Moderada >9-11 ppm	Ruim >11-13 ppm	Muito Ruim >13-15 ppm	Péssima >15 ppm
Cidade Universitária USP	90%	10%			
Congonhas	87%	13%			
Grajaú Parelheiros	87%	13%			
Ibirapuera	87%	13%			
Itaim Paulista	77%	23%			
Marg. Tietê Ponte Remédios	67%	33%			
Mooca	89%	11%			
Parque D. Pedro II	87%	13%			
Perus	71%	29%			
Pico do Jaraguá	97%	3%			
Pinheiros	81%	19%			
Santana	85%	15%			

Fonte: CETESB (2022)

3.5.12. Normas brasileiras e normas internacionais para sistemas operacionais em túneis

Após o acidente no túnel ítalo-francês de Mont Blanc, em 1999, as normas que regem a segurança em túneis começaram a ser ajustadas em vários países, de modo a atender as novas demandas de tráfego e operação e reduzir a escala de acidentes e mortes (Scabbia, 2007).

A proposta de Diretiva 309/2002 (União Europeia, 2002) definia que, para o início da operação comercial, devia-se avaliar a conformidade do túnel com relação aos requisitos mínimos. Define também a realização de simulações e ensaios compreendendo as seguintes premissas: ser tão realista quanto possível e corresponder aos cenários de incidente pré-definidos no projeto básico; produzir resultados de avaliação claros; evitar danos no túnel. Podendo, também, ser parcialmente realizados por simulações teóricas por meio de simulações em computador (CFD), para obter-se resultados complementares (Scabbia, 2007).

O artigo 5º, da mesma proposta, definia que os Estados-Membros da União Europeia – UE designarão um ou mais órgãos de inspeção técnica para efetuarem avaliações, ensaios ou inspeções em nome da Autoridade Administrativa, na impossibilidade de que esta desempenhe tal função (Scabbia, 2007).

Ainda na proposta de Diretiva 309/2002 (União Europeia, 2002), estava estabelecido que os órgãos de inspeção deverão respeitar as normas harmonizadas, relativas à atividade dos organismos responsáveis pela avaliação da conformidade (EN 450000). Uma organização envolvida na gestão de um túnel não pode ser creditada como órgão de inspeção, sendo esse definido no âmbito da RETT – Comissão de Política Regional dos Transportes e do Turismo da UE. (Scabbia, 2007). A Tabela 22 apresenta as normas brasileiras e internacionais relacionadas a túneis.

Tabela 22: Normas de segurança relacionada a túneis

Norma	**Título**	**País**	**Versão em vigor**
NFBA	*NFBA 502: Standard for Road Tunnels Bridges and Other Limited Access Highways*	EUA	2020
Diretiva 89/106 da União Européia	Requisitos mínimos de segurança para os túneis da rede rodoviária Transeuropeia	União Europeia	Diretiva 2004/54
RABT	*Guidelines for equipment and operation of road tunnels*	Alemanha	2006
Australian Fire Authorities Council	*Fire Safety Guidelines for Road Tunnels*	Austrália	2001
RVS 09.02.22	*Tunnel- ausrüstung*	Áustria	2010
TP98	*Tunnel Equipment - Technical Specification*	República Tcheca	2004
NBR 16.980	Proteção contra incêndio – Túneis urbanos existentes – Requisitos de revitalização	Brasil	Primeira edição 07/2021
NBR 5.181	Sistemas de iluminação de túneis – Requisitos	Brasil	Segunda edição 24/04/2013
NBR 15.661	Proteção contra incêndio em túneis rodoviários e urbanos	Brasil	Terceira edição 28/03//2019
NBR 15.775	Sistemas de segurança contra incêndio em túneis – Ensaios, comissionamento e inspeções	Brasil	Primeira edição 05/11/2009
NBR 15.981	Sistemas de segurança contra incêndio em túneis – Sistemas de sinalização e de comunicação de emergências em túneis	Brasil	Segunda Edição 18/12/2019
NBR 17.240	Sistemas de detecção e alarme de incêndio – Projeto, instalação, comissionamento e manutenção de sistemas de detecção e alarme de incêndio – Requisitos	Brasil	Primeira edição 01/10/2010
NBR 16.820	Sistemas de sinalização de emergência – Projeto, requisitos e métodos de ensaios.	Brasil	2022
NBR 16.736	Proteção contra incêndio em túneis rodoviários e urbanos – Operação de emergência em túneis rodoviários e urbanos - Requisitos	Brasil	2004

Fonte: Autora (2023)

Esses regulamentos e diretrizes legislativas são usados para determinar o conjunto mínimo de requisitos; eles foram desenvolvidos nas últimas décadas e se baseiam em experiências com túneis existentes. A compilação desse conhecimento exige pesquisas de longo prazo, incluindo situações excepcionais, como acidentes ou incêndios (Pribyl, 2014).

No ano de 2003, em função do aumento do número de túneis no Brasil, principalmente em São Paulo, criou-se na ABNT o Comitê Brasileiro de Segurança ao Fogo, CB24, a Comissão de Estudos CE-24:301.13 – Proteção contra incêndio em túneis, com a missão de elaborar uma norma de segurança em túneis rodoviários e metroviários (Scabbia, 2007).

A Associação Mundial de Rodovias (PIARC) propõe uma regra para a qual nenhuma ventilação mecânica é mecânica e o comprimento máximo do túnel sem ventilação artificial depende da intensidade do tráfego, mas também depende das variáveis meteorológicas e da geografia.

A concepção, a construção e o funcionamento dos sistemas de ventilação devem ter em conta: o controle da poluição no interior do túnel em condições de tráfego normais e em situações de paragem devido ao congestionamento do tráfego; o controle de poluição nos portais e nas condutas, de forma a garantir uma qualidade mínima no ar poluído libertado para o exterior; a garantia das condições mínimas de visibilidade e segurança por meio do controle da fumaça proveniente de incêndios (Barbosa, 2008).

O objetivo principal da ventilação de um túnel é o de assegurar que os poluentes potencialmente perigosos, incluindo monóxido de carbono e partículas em suspensão, que estão presentes nas emissões dos veículos a motor, serão diluídos e eliminados, e que os níveis nocivos destas substâncias não se desenvolverão. O princípio de um sistema de ventilação é a transmissão por impulso, em que a circulação natural do ar ao longo do túnel é forçada por meio de ventiladores instalados na abóboda, o que gera o efeito de injetar energia cinética no fluxo de ar do túnel, facilitando o movimento do ar em direção à saída ou pontos específicos previamente definidos em projeto.

Exceto nos túneis curtos (menos de 300 m), é necessária ventilação mecânica para diminuir a concentração de poluentes emitidos pelos veículos para níveis aceitáveis. Normalmente, o requisito de ventilação baseia-se na redução das concentrações de monóxido de carbono para níveis seguros, uma vez que isso

assegurará normalmente a diluição de outros poluentes presentes no túnel (El-Fadel; Hashisho, 2001).

A Tabela 22 demonstra os limites temporais de exposição a concentrações máximas de monóxido de carbono em túneis. A decisão sobre o tipo de ventilação a instalar baseia-se principalmente no comprimento do túnel, conforme demonstra a Tabela 23. A sua configuração e o custo do sistema de ventilação, se for substancial, podem favorecer a construção de outra forma de estrada em vez da utilização de um túnel (El-Fadel; Hashisho, 2001).

Tabela 22: Limites temporais de exposição ao monóxido de carbono

Tempo de exposição (min)	Concentração máxima de CO (ppm)
15	120
30	65
45	45
60	35

Fonte: El-Fadel;, Hashisho (2001)

Tabela 23: Tipo de ventilação de acordo com a extensão do túnel

Tipo de ventilação	Extensão do túnel
Natural	<300
Longitudinal	<600
Semi transversal	<1.500
Transversal	>1.500

Fonte: El-Fadel;, Hashisho (2001)

Idealmente, o tempo de exposição nos túneis deveria ser curto. No entanto, nem sempre é o caso. Os aumentos inesperados do tempo de exposição agravarão inevitavelmente a situação, nomeadamente em túneis urbanos congestionados. De fato, vários fatores podem aumentar o tempo de exposição e, consequentemente, aumentar os riscos potenciais para a saúde. O mais importante desses fatores é o congestionamento do tráfego, que pode ocorrer nas horas de ponta, que resultará num aumento dos níveis de poluentes para além das normas correspondentes. Como resultado, as concentrações de poluentes no interior de um compartimento de veículo podem atingir níveis comparáveis aos do próprio túnel (El-Fadel; Hashisho, 2001).

Os condutores que atravessam um túnel rodoviário podem estar sujeitos a elevadas concentrações de poluentes durante um curto período. Por outro lado, a população que reside ou trabalha nas imediações dos portais poderá estar exposta, a longo prazo, a valores prejudiciais à sua saúde (El-Fadel; Hashisho, 2001).

3.5.13. Diretiva 2004/54 - União Europeia

A Diretiva 2004/54 define que deve ser instalado um sistema de ventilação mecânico em todos os túneis de extensão superior a 1.000 m com um volume de tráfego superior a 2.000 veículos por faixa, por dia.

A Diretiva também define que, nos túneis com extensão superior a 3.000m com tráfego em ambos os sentidos, um volume de tráfego superior a 2.000 veículos por faixa, um centro de controle e ventilação transversal ou semi-transversal, devem ser tomadas as seguintes medidas:

- Instalação de registros de extração de ar e fumaça que possam funcionar separadamente ou em grupos.
- Monitoramento permanente da velocidade longitudinal do ar e ajuste do processo de comando do sistema de ventilação em conformidade com padrões determinados.

3.5.14. NFPA 502 - *Standard for road tunnels, bridges, and other limited access highways*

NFPA 502 é uma norma que estabelece os requisitos de proteção contra incêndios e de segurança para túneis rodoviários, pontes e outras estradas de acesso limitado. Ela estabelece requisitos mínimos para cada uma das instalações identificadas. Para efeitos desta norma, o comprimento do túnel ditará os requisitos mínimos de proteção contra incêndios, como se segue:

- Se o comprimento do túnel for inferior a 90 m, as disposições desta norma não se aplicam.
- Se o comprimento do túnel for igual ou superior a 90 m, devem ser instalados sistemas de tubos verticais e sistemas de controle de tráfego devem ser instalados.

- Quando o comprimento do túnel for igual ou superior a 240 m e a distância máxima de qualquer ponto no interior do túnel a uma área de segurança for superior a 120 m, aplicar-se-ão todas as disposições da norma.
- Se o comprimento do túnel for igual ou superior a 300 m aplicar-se-ão todas as disposições da norma.

3.5.15. NBR 15.661:2009 – Proteção contra incêndio em túneis

No Brasil, sistemas de ventilação em túneis são descritos a partir da norma técnica ABNT, NBR nº 15.661:2009 – Proteção contra incêndio em túneis, especifica os requisitos de segurança para prevenção e proteção contra incêndio em túneis destinados ao transporte de passageiros e ou cargas.

A norma tem como foco a operação do túnel, como atividade fim da estrutura construída, considerando que os túneis têm problemas particulares em emergências. Também prevê que seja projetado um sistema de ventilação exclusivamente para cada túnel, atendendo às suas características operacionais.

A potência de incêndio de 30 MW é definida para o cálculo do sistema de ventilação contra incêndio de túnel. Este incêndio atinge a sua potência máxima (30 MW) em aproximadamente 10 min e gera uma vazão de fumaça de aproximadamente 80 m^3/s, com uma duração aproximada de 60 min. A velocidade do ar no túnel não deve ser inferior a 1,5 m/s e superior a 10 m/s.

A NBR nº 16.736:2009 define que os sistemas de ventilação do túnel devem gerar fluxo, de forma a evitar a presença de fumaça nas rotas de escape e de emergência durante o processo de evacuação. O sistema de ventilação de emergência deve ser acionado em pelo menos 2 min após a detecção do sinistro.

Segundo a norma NBR nº 15.661:2009, o sistema de ventilação poderá ser projetado a partir das formas descritas abaixo:

3.5.15.1. Ventilação natural para túneis com comprimento ≤ 500m

Utilizado para túneis de pequeno comprimento, dependendo, no entanto, do tipo de tráfego unidirecional/bidirecional, da inclinação e do volume de tráfego, a ventilação natural pode ser adotada para a renovação do ar (ABNT, 2009).

Também denominada como ventilação natural ou efeito pistão[11], esta é induzida pelo próprio movimento dos veículos no interior do túnel rodoviário. A ventilação natural é influenciada pelo volume e velocidade do tráfego, pela composição da frota e pelas dimensões do próprio túnel. Este tipo de ventilação é geralmente utilizado em túneis rodoviários com um comprimento inferior a 300 metros, sendo bem-sucedida quando o tráfego é unidirecional. Nestes casos, o ar poluído é geralmente libertado pelo emboque do túnel rodoviário, embora em alguns túneis existam também aberturas na parte superior que promovam alguma ventilação (El-Fadel; Hashisho, 2001).

3.5.15.2. Ventilação longitudinal

A ventilação longitudinal mecanizada produz um fluxo de ar uniforme ao longo de toda a extensão do túnel, sempre na mesma direção. Esse tipo de ventilação é obtido utilizando-se em geral jatos-ventiladores. Este sistema é adequado para túnel com fluxo de veículos unidirecionais, podendo ser utilizado em situações especiais em túnel bidirecional de pequeno comprimento (ABNT, 2009). A Figura 11 apresenta de forma esquemática um sistema de ventilação longitudinal.

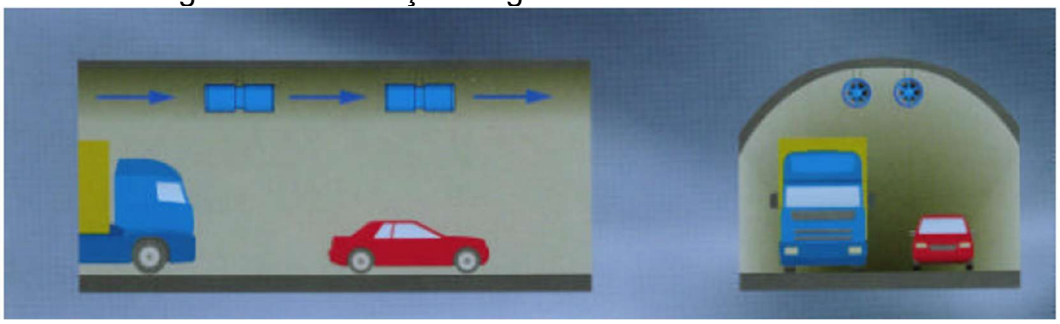
A ventilação longitudinal associa à ventilação passiva a impulsão dada por ventiladores existentes no túnel rodoviário, aumentando, assim, a taxa de ventilação pelo emboque de saída. Este sistema de ventilação pode introduzir ou remover ar no túnel rodoviário, num número limitado de pontos, de acordo com o fluxo longitudinal do tráfego. Assim, este sistema de ventilação pode incluir a instalação de ventiladores axiais de alta velocidade instalados no teto do túnel rodoviário para que o fluxo de ar seja induzido longitudinalmente ao longo do túnel. Geralmente, a ventilação

[11] Efeito pistão – Em um ambiente confinado onde existe uma pressão baixa que se distribui numa área grande, quando sobre a redução da área (passagem de veículo) sofre aumento de pressão e conseguinte velocidade do ar. (Scabbia, 2007)

longitudinal é utilizada em túneis rodoviários com comprimentos inferiores a 500 metros (El-Fadel; Hashisho, 2001).

Nesse tipo de ventilação, pares de ventiladores do tipo turbina (“Jet Fan”) são posicionados no teto do túnel a cada 100 a 200m. Atualmente, ventiladores mais modernos são do tipo reversível (com a inversão da rotação ou do ângulo das pás) para compensar eventuais reversões do trânsito. A regulagem da quantidade de ventilação necessária é feita ligando ou desligando um certo número de ventiladores e, em alguns tipos de ventiladores, aumentando ou diminuindo a velocidade de rotação (Souza, 2012).

Figura 11: Ventilação longitudinal em túnel rodoviário.



Fonte: Child & Associates (2020)

3.5.15.3. Ventilação forçada, tipo semi longitudinal

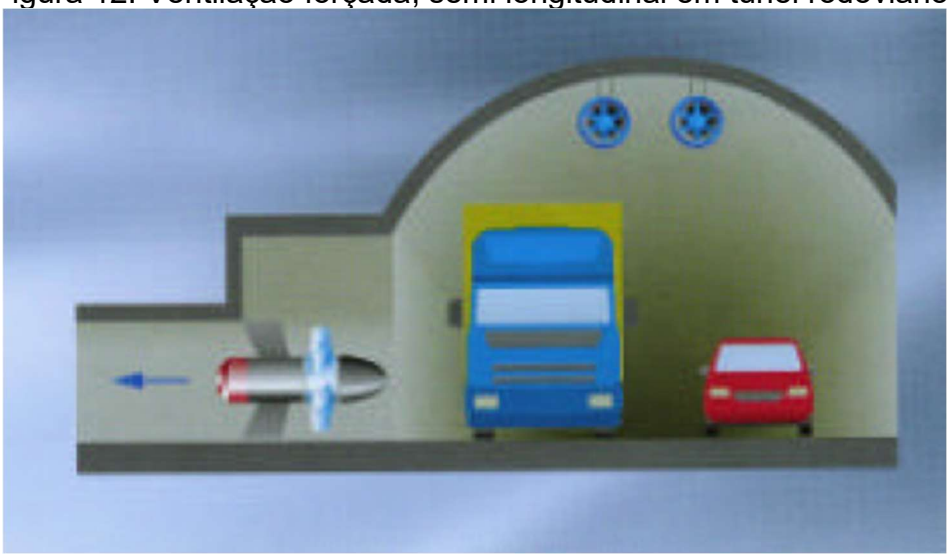
Na ventilação forçada, tipo semi longitudinal, existe um poço ou abertura intermediária, provido de equipamentos de ventilação, por onde o ar é exaurido ou insuflado no interior do túnel (ABNT, 2009). A Figura 12 apresenta de forma esquemática um sistema de ventilação semi-longitudinal.

As embocaduras ou aberturas nas extremidades do túnel são as tomadas ou saídas do ar, conforme o tipo de ventilação adotada. Este tipo de ventilação é aplicável para qualquer extensão de túnel (ABNT, 2009).

Para este sistema, em situação de emergência, devem ser considerados: ventiladores reversíveis (fluxo); velocidade do ar em emergência; tempo e temperatura mínima para operação em emergência; tempo e temperatura mínima para operação sem falhas em emergência; sistema de comando (automático, manual local e ou remoto) de fácil acesso; procedimentos operacionais; sistema de fixação e proteção

contra queda; sistema de alimentação e controle; sistema de captação e saída do ar (tipo/local); sinalização de incêndio (ABNT, 2009).

Figura 12: Ventilação forçada, semi longitudinal em túnel rodoviário.



Fonte: Child & Associates (2020)

3.5.15.4. Ventilação transversal

A ventilação transversal é a mais recomendada para túneis. A insuflação e a exaustão atuam paralelamente juntas, não havendo, portanto, percurso de ar viciado ao longo do túnel. Em condições ideais, o ar é insuflado na parte inferior e extraído na parte superior do túnel (ABNT,2009). A Figura 13 apresenta de forma esquemática um sistema de ventilação transversal.

Em condições operacionais de emergência, considerar: ventiladores com fluxo reversível; inibição dos sensores bloqueadores da operação; sistema de comando local ou remoto de fácil acesso; tempo e temperatura mínimos para operação sem falhas em emergência; velocidade do ar (ABNT,2009).

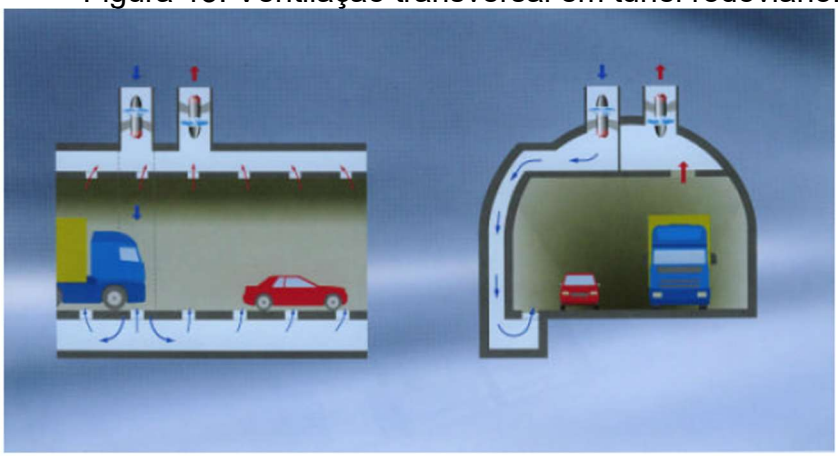
Os sistemas transversais são mais dispendiosos e difíceis de instalar. Neste tipo de ventilação, o ar limpo entra por condutas dispostas paralelamente ao túnel e é recolhido por condutas de exaustão no lado oposto. Assim, a qualidade do ar ao longo do túnel, é constante. O ar ventilado circula em condutas propositadamente construídas para o efeito. Em túneis de grande extensão, é necessária a instalação de condutas de grande dimensão devido à elevada vazão de ar. Em caso de incêndio,

nessa secção, a exaustão é aumentada para o máximo enquanto a vazão de ar nas secções transversais adjacentes é controlada, de forma a direcionar o fumo longitudinalmente. Este sistema, pelas suas características, é particularmente adequado em túneis de grande extensão (Barbosa, 2008).

A ventilação transversal requer pelo menos duas aberturas ao longo do túnel, havendo fornecimento de ar novo e remoção do ar contaminado em intervalos de tempo regulares. A existência no exterior de edifícios altos ou de terrenos complexos pode servir de obstáculo à sua implementação.

Neste tipo de ventilação, um forro falso acima da abóboda é dividido em dois septos: um destinado a insuflar ar puro e outro a aspirar o ar poluído. No portal do túnel são situados ventiladores centrais com torres de extração para o ar poluído e de aspiração de puro. A regulagem da ventilação é feita da mesma maneira, ou seja, ligando ou desligando um certo número de ventiladores ou aumentando ou diminuindo a velocidade de rotação (Souza, 2012).

Figura 13: Ventilação transversal em túnel rodoviário.



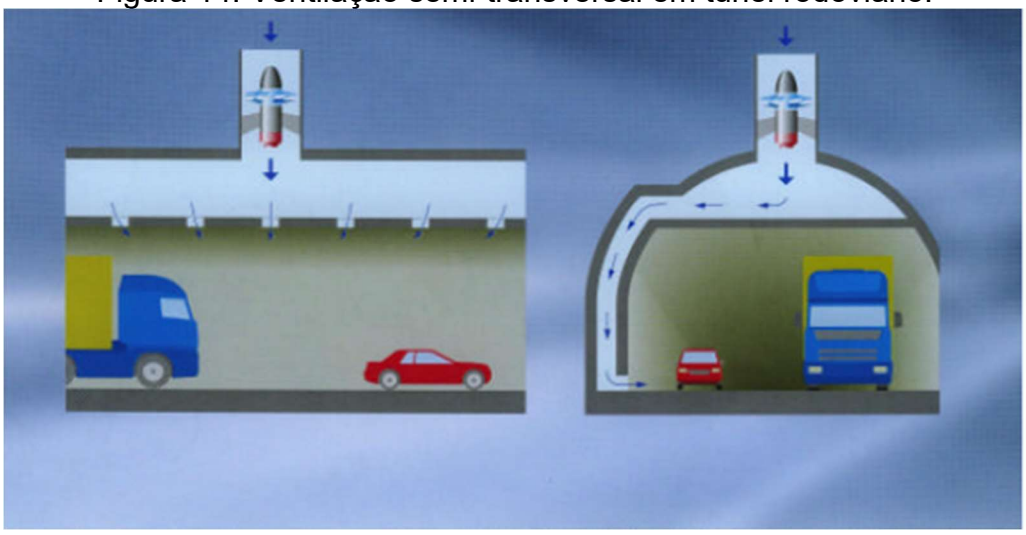
Fonte: Child & Associates (2020)

3.5.15.5. Ventilação semi-transversal

O sistema de ventilação semi-transversal envolve uma combinação de ventilação longitudinal e transversal. Uma aplicação comumente utilizada é o sistema semi-transversal da injeção, em que o ar fresco é fornecido uniforme (e transversalmente) ao longo do comprimento do túnel e o ar de escape é removido longitudinalmente dos portais do túnel. Esse sistema é comumente empregado em

túneis de médio comprimento, com volume de tráfego de médio a pesado (Souza, 2012). A Figura 14 apresenta de forma esquemática um sistema de ventilação semi-transversal.

Figura 14: Ventilação semi-transversal em túnel rodoviário.



Fonte: Child & Associates(2020)

4. MATERIAL E MÉTODOS

O objetivo proposto para este trabalho é demonstrar que os níveis de monóxido de carbono, nos emboques dos túneis da cidade de São Paulo, podem ser prejudiciais à saúde da população circunvizinha, considerando que sua exposição prolongada pode ocasionar efeitos tóxicos continuados.

Como consequência, o método a ser desenvolvido também poderá subsidiar a revisão das normas brasileiras de túneis.

A partir dessa premissa, o trabalho se estruturou em quatro etapas metodológicas específicas, descritas a seguir:

4.1. Caracterização dos túneis e passagens subterrâneas da cidade de São Paulo

Nesta etapa serão apresentadas características da cidade de São Paulo e dos 16 túneis e 4 passagens subterrâneas da cidade de São Paulo: localização, extensão, subprefeitura, distrito, população do distrito, densidade demográfica do distrito.

Para cumprimento desse item foram consultados:

- Lista dos túneis e passagens subterrâneas disponíveis no *website* da Prefeitura da Cidade de São Paulo;
- Dados de densidade demográfica das subprefeituras e distritos disponíveis no *website* da Prefeitura da Cidade de São Paulo;
- Dados populacionais disponíveis no *website* do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística;
- *Google Earth*;
- Sistema de Consulta do Mapa Digital da Cidade de São Paulo.

Nesta etapa serão selecionados os túneis/passagens para medição da concentração de monóxido de carbono no emboque de saída dos túneis.

4.2. Análise dos níveis de poluentes monitorados pela CETESB

Nesta etapa serão analisados os níveis de poluentes encontrados no monitoramento com os dados registrados pela CETESB.

4.3. Medição da concentração de monóxido de carbono

Serão realizadas medições de concentrações de monóxido de carbono no emboque nos túneis ou passagens subterrâneas selecionados, considerando a hipótese de que a pluma de poluentes originada no emboque possa atingir o ambiente externo.

Para a realização das medições será utilizado o equipamento AKROM KR1000, com certificado de calibração emitido em 29/03/2023, nº35.044-2023, conforme Figura 15 a seguir Para a realização das medições, adotou-se a altura aproximada de 1,20 m em relação ao nível da faixa de rolamento.

Segundo Scabbia, 2007, comissionamento com fumaça quente gerada por máquina de aquecimento de glicerina (modelo cenográfico) possui característica óptica (opacidade) similar a fumaça de um incêndio e atinge a altura aproximada de 1,20 m, corroborando para a adoção da altura para realização das medições.

Figura 15: Medidor de monóxido de carbono AKROM KR1000



Fonte: AKROM (2023)

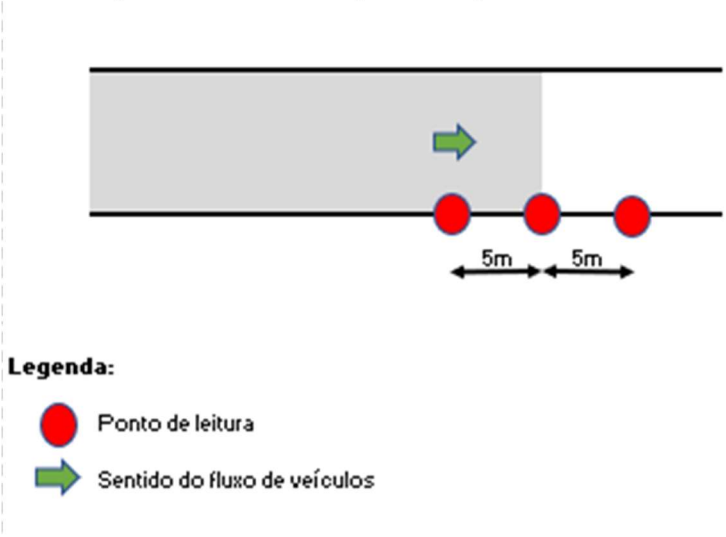
Adotou-se a realização de leituras em 3 posições: a primeira, cinco metros antes do limite da projeção o túnel (P1); a segunda, no limite da projeção do túnel (P2); a terceira, cinco metros após o limite do túnel (P3), conforme se ilustra na Tabela 25 e na Figura 16. Para convenção das leituras adotaram-se as siglas P1, P2 e P3, respectivamente.

Tabela 25: Pontos de leitura

Ponto de leitura	Distância em relação ao emboque do túnel (m)
Leitura P1	5 m antes do limite do emboque
Leitura P2	No limite do emboque
Leitura P3	5 m depois do limite do emboque

Fonte: Autora (2023)

Figura 16: Localização dos pontos de leitura



Fonte: Autora (2023)

4.4. Avaliação dos níveis de monóxido de carbono nos emboques de túneis urbanos

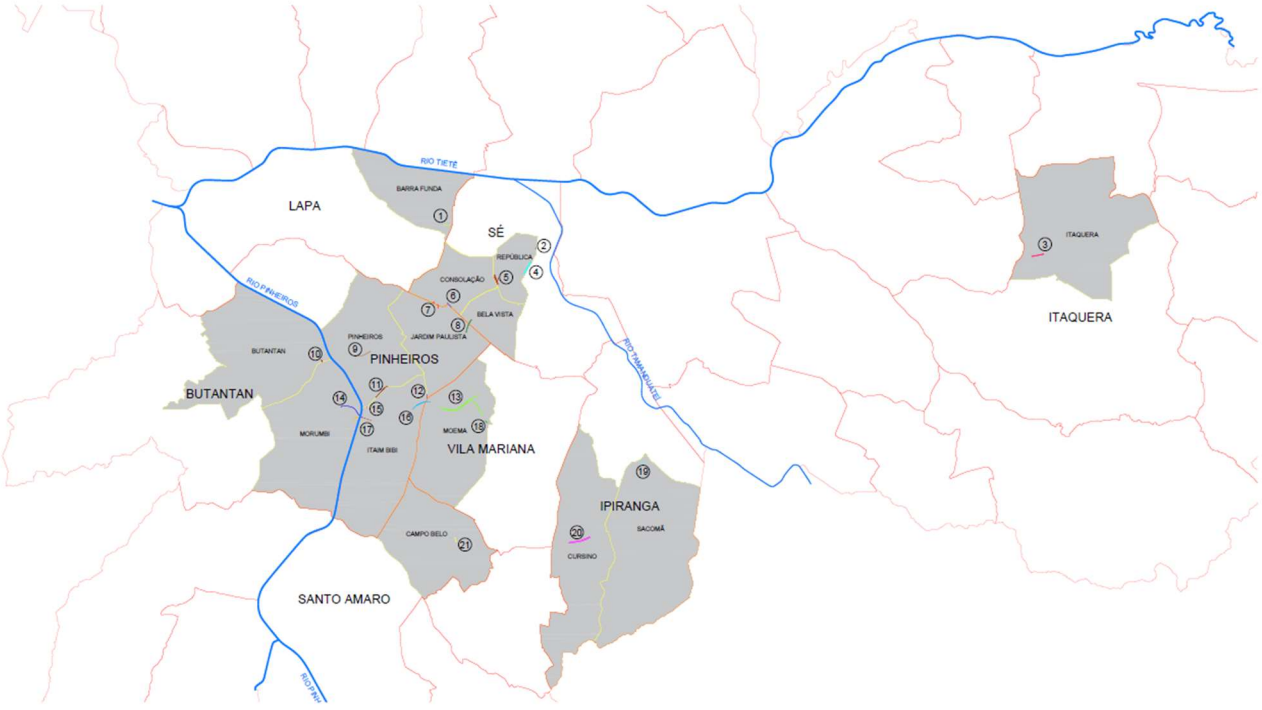
Nesta etapa serão propostos requisitos mínimos de controle ambiental nos emboques dos túneis da cidade de São Paulo, no que tange ao monitoramento dos níveis de poluição atmosférica proveniente de veículos automotores, de modo a alertar a população circunvizinha.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Caracterização dos túneis e passagens subterrâneas da cidade de São Paulo

De acordo com dados da Prefeitura de São Paulo, a cidade possui 17 túneis e 4 passagens subterrâneas. Alguns túneis, como é o caso do Tribunal de Justiça e Ayrton Senna, são compostos por duas estruturas, ou dois túneis que, em alguns casos, foram construídos e inaugurados em datas diferentes. No entanto, recebem o mesmo nome e são conhecidos desta maneira. Desta forma, estruturalmente a cidade tem 29 túneis e passagens subterrâneas, que somam 21 nomenclaturas, conforme demonstra a Figura 17.

Figura 17: Localização dos túneis da cidade de São Paulo



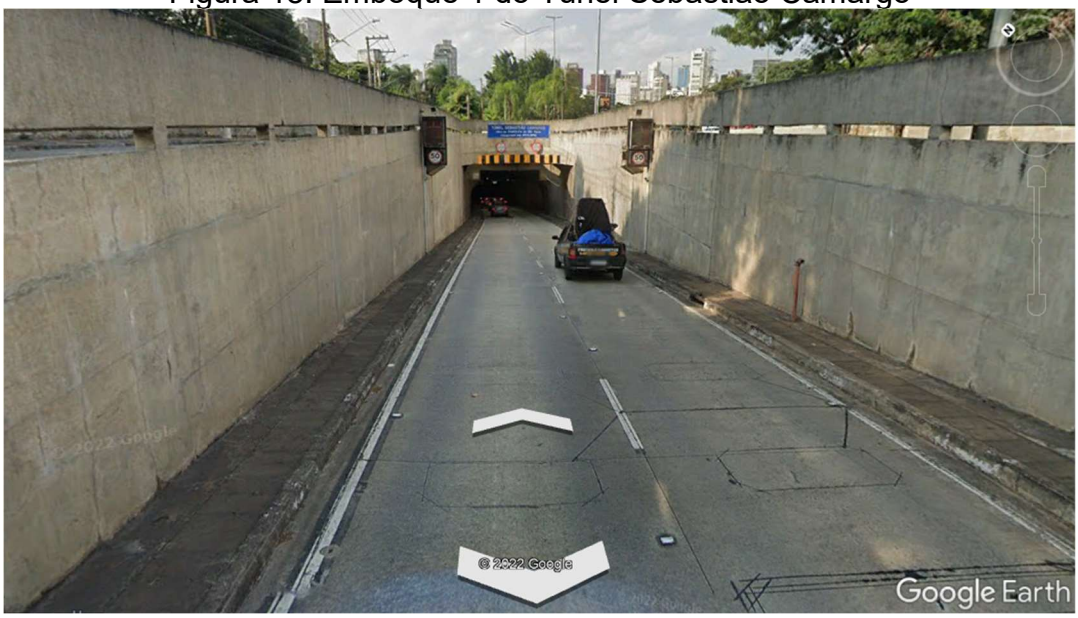
Fonte: Autora (2022)

O distrito de Itaim Bibi concentra 6 túneis da cidade de São Paulo: Túnel Sebastião Camargo (Figuras 18 e 19), Túnel Jânio Quadros (Figuras 20 e 21), Túnel Ayrton Senna (Figuras 22 e 23), Túnel Tribunal de Justiça (Figuras 24 e 25), Túnel Max Feffer (Figuras 26 e 27) e Túnel Takeharu Akagawa (Figuras 28 e 29). O distrito

Bibi possui população de 92.570 habitantes e densidade demográfica de 9.351 hab./km^2.

Dos 6 túneis localizados no Itaim Bibi, 3 possuem sistema de ventilação: Túnel Sebastião Camargo (Tabela 26), Túnel Jânio Quadros (Tabela 27), Túnel Ayrton Senna (Tabela 28). Os túneis que não possuem sistema de ventilação têm comprimento inferior a 1.000 m: Túnel Tribunal de Justiça (Tabela 29), Túnel Max Feffer (Tabela 30) e Túnel Takeharu Akagawa (Tabela 31).

Figura 18: Emboque 1 do Túnel Sebastião Camargo



Fonte: Google Earth (2022)

Figura 19: Emboque 2 do Túnel Sebastião Camargo



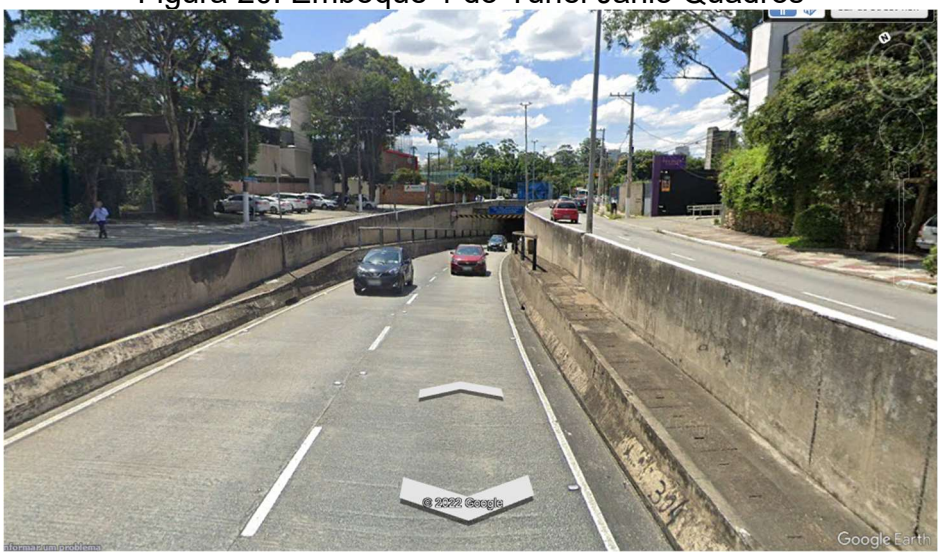
Fonte: Google Earth (2022)

Tabela 26: Túnel Sebastião Camargo

Item	**Descrição**
Nome	Túnel Sebastião Camargo
Extensão	1.170m
Ano de inauguração	1.955
Localização	Avenida das Magnólias Avenida Juscelino Kubitschek
Características físicas	- Tráfego em sentido único em galeria única; - 2 faixas de rolamento; - Ausência de acostamento; - Ausência de passeio para pedestres; - Sistema de ventilação transversal.

Fonte: Autora (2023)

Figura 20: Emboque 1 do Túnel Jânio Quadros



Fonte: Google Earth (2022)

Figura 21: Emboque 2 do Túnel Jânio Quadros



Fonte: Google Earth (2022)

Tabela 27: Túnel Jânio Quadros

Item	**Descrição**
Nome	Túnel Jânio Quadros
Extensão	1.900m
Ano de inauguração	1.994
Localização	Avenida Juscelino Kubitschek
Características físicas	- Tráfego em sentido único em galeria única; - 2 faixas de rolamento; - Ausência de acostamento; - Ausência de passeio para pedestres; - Sistema de ventilação transversal.

Fonte: Autora (2023)

Figura 22: Emboque 1 do Túnel Ayrton Senna



Fonte: Google Earth (2022)

Figura 23: Emboque 2 do Túnel Ayrton Senna



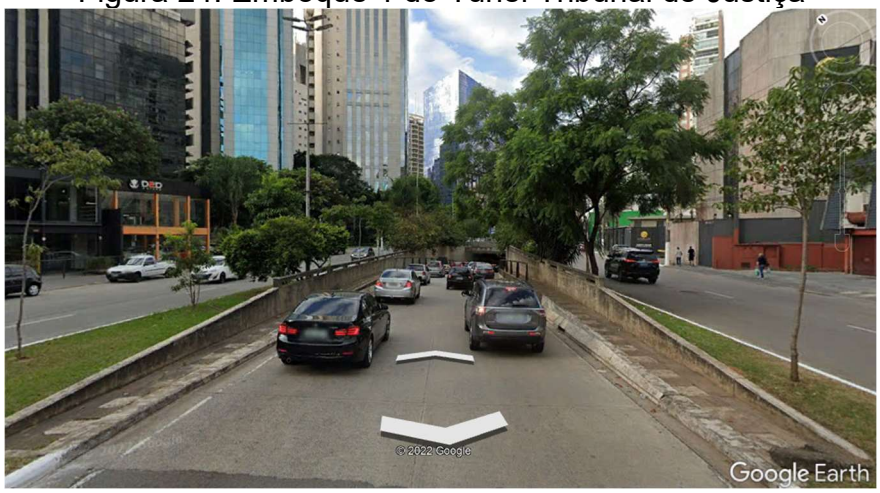
Fonte: Google Earth (2022)

Tabela 28: Túnel Ayrton Senna

Item	**Descrição**
Nome	Túnel Ayrton Senna
Extensão	Galeria 1 - 1.700m; Galeria 2 - 1.950m
Ano de Inauguração	1995 e 1996
Localização	Galeria 1: Avenida 23 de Maio – Avenida Antônio Joaquim de Moura Andrade Galeria 2: Avenida Antônio Joaquim de Moura Andrade – Av. Sena Madureira
Características físicas	- Tráfego em dois sentidos em duas galerias; - 2 faixas de rolamento por galeria; - Ausência de acostamento; - Ausência de passeio para pedestres; - Sistema de ventilação transversal.

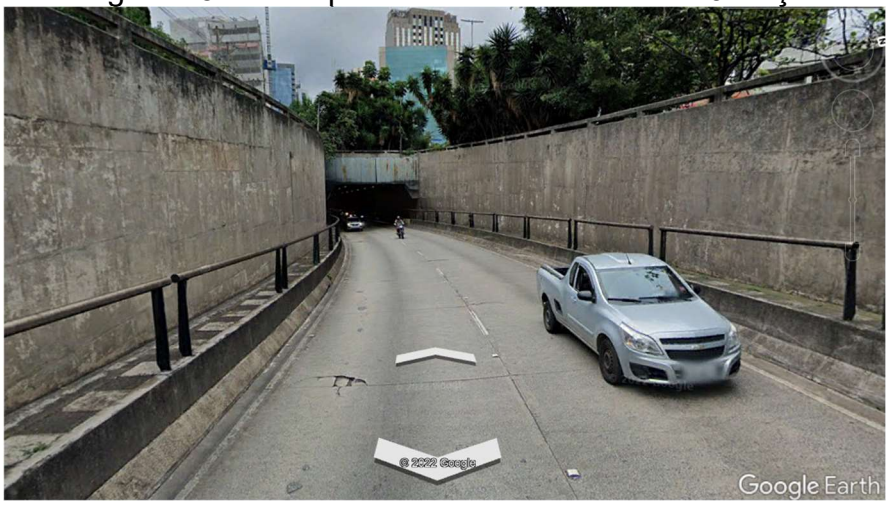
Fonte: Autora (2023)

Figura 24: Emboque 1 do Túnel Tribunal de Justiça



Fonte: Google Earth (2022)

Figura 25: Emboque 2 do Túnel Tribunal de Justiça



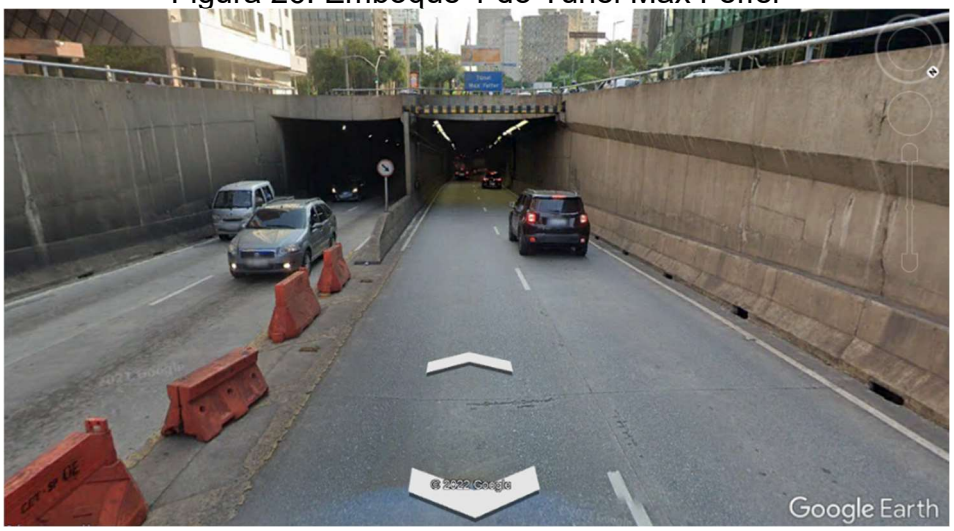
Fonte: Google Earth (2022)

Tabela 29: Túnel Tribunal de Justiça

Item	**Descrição**
Nome	Túnel Tribunal de Justiça
Extensão	824m
Ano de inauguração	1.994
Localização	Avenida Juscelino Kubitschek
Características físicas	- Tráfego em sentido único em galeria única; - 2 faixas de rolamento; - Ausência de acostamento; - Ausência de passeio para pedestres; - Ausência de sistema de ventilação.

Fonte: Autora (2023)

Figura 26: Emboque 1 do Túnel Max Feffer



Fonte: Google Earth (2022)

Figura 27: Emboque 2 do Túnel Max Feffer



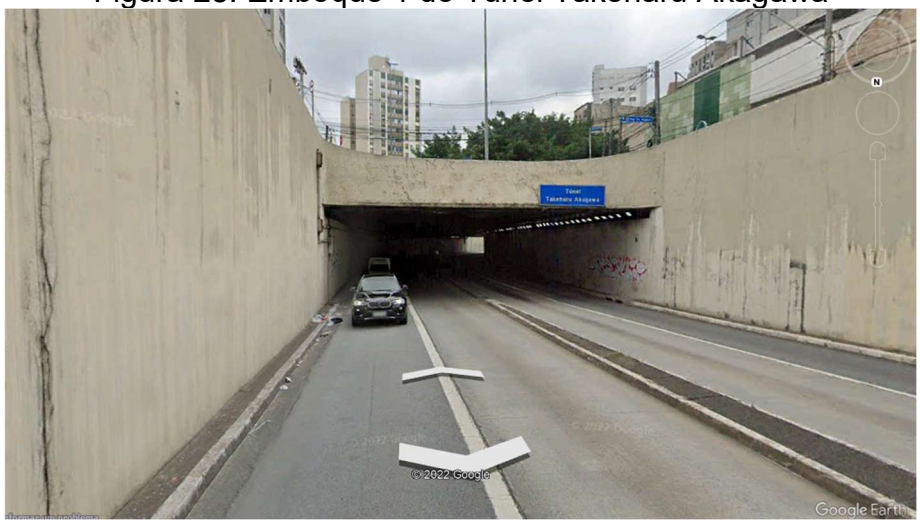
Fonte: Google Earth (2022)

Tabela 30: Túnel Max Feffer

Item	**Descrição**
Nome	Túnel José Roberto Fanganiello Melhem
Extensão	756m
Ano de inauguração	2.004
Localização	Avenida Cidade Jardim – Avenida 9 de Julho
Características físicas	- Tráfego em dois sentidos em duas galerias; - 2 faixas de rolamento por sentido; - Ausência de acostamento; - Ausência de passeio para pedestres; - Ausência de sistema de ventilação.

Fonte: Autora (2023)

Figura 28: Emboque 1 do Túnel Takeharu Akagawa



Fonte: Google Earth (2022)

Figura 29: Emboque 2 do Túnel Takeharu Akagawa



Fonte: Google Earth (2022)

Tabela 31: Túnel Takeharu Akagawa

Item	**Descrição**
Nome	Túnel Takeharu Akagawa
Extensão	393m
Ano de inauguração	1.969
Localização	Avenida São Gabriel Avenida Santo Amaro
Características físicas	- Tráfego em dois sentidos em galeria única; - 2 faixas de rolamento por sentido; - Ausência de acostamento; - Ausência de passeio para pedestres; - Ausência de sistema de ventilação.

Fonte: Autora (2023)

O distrito de Jardim Paulista concentra 4 túneis da cidade de São Paulo: Túnel Noite Ilustrada (Figuras 30 e 31), Túnel Fernando Vieira de Mello (Figuras 32 e 33), Túnel José Roberto Fanganiello Melhem (Figuras 34 e 35) e Passagem Dirce de Camargo (Figuras 36 e 37). O distrito possui população de 88.692 habitantes e densidade demográfica de 14.540 hab./km^2.

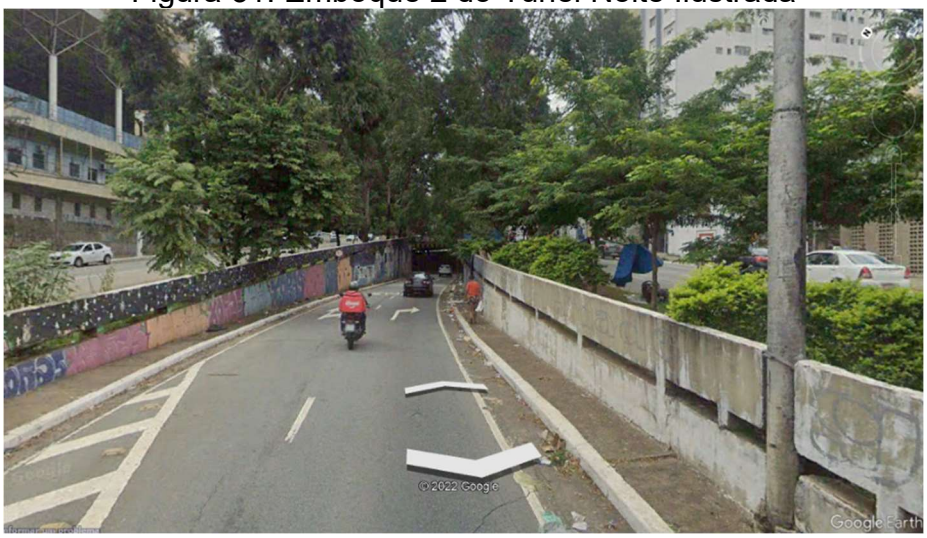
Dos 4 túneis localizados no Jardim Paulista, nenhum possui sistema de ventilação: Túnel Noite Ilustrada (Tabela 32), Túnel Fernando Vieira de Mello (Tabela 33), Túnel José Roberto Fanganiello Melhem (Tabela 34) e Passagem Dirce de Camargo (Tabela 35).

Figura 30: Emboque 1 do Túnel Noite Ilustrada



Fonte: Google Earth (2022)

Figura 31: Emboque 2 do Túnel Noite Ilustrada



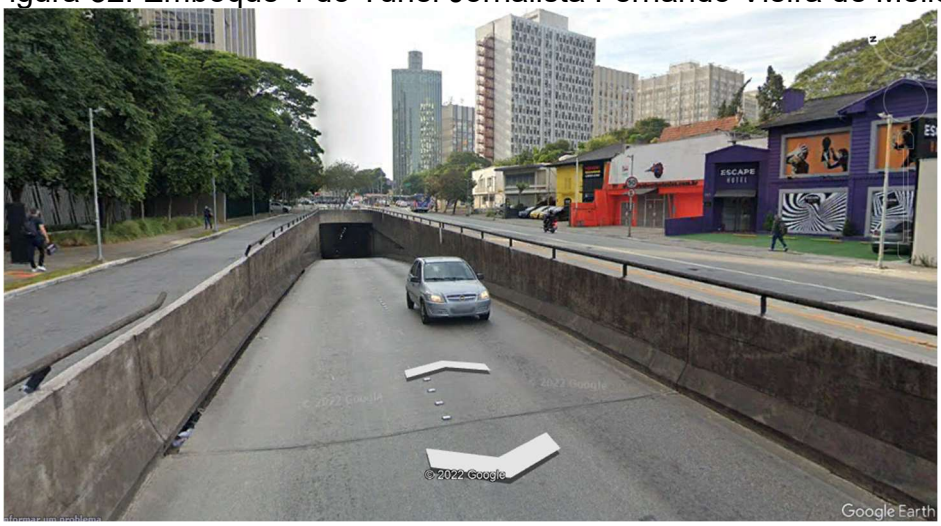
Fonte: Google Earth (2022)

Tabela 32: Túnel Noite Ilustrada

Item	**Descrição**
Nome	Túnel Noite Ilustrada
Extensão	884m
Ano de inauguração	1.973
Localização	Avenida Rebouças Avenida Doutor Arnaldo Avenida Major Natanael
Características físicas	- Tráfego em sentido único em galeria única; - 2 faixas de rolamento; - Ausência de acostamento; - Ausência de passeio para pedestres; - Ausência de sistema de ventilação.

Fonte: Autora (2023)

Figura 32: Emboque 1 do Túnel Jornalista Fernando Vieira de Mello



Fonte: Google Earth (2022)

Figura 33: Emboque 2 do Túnel Jornalista Fernando Vieira de Mello



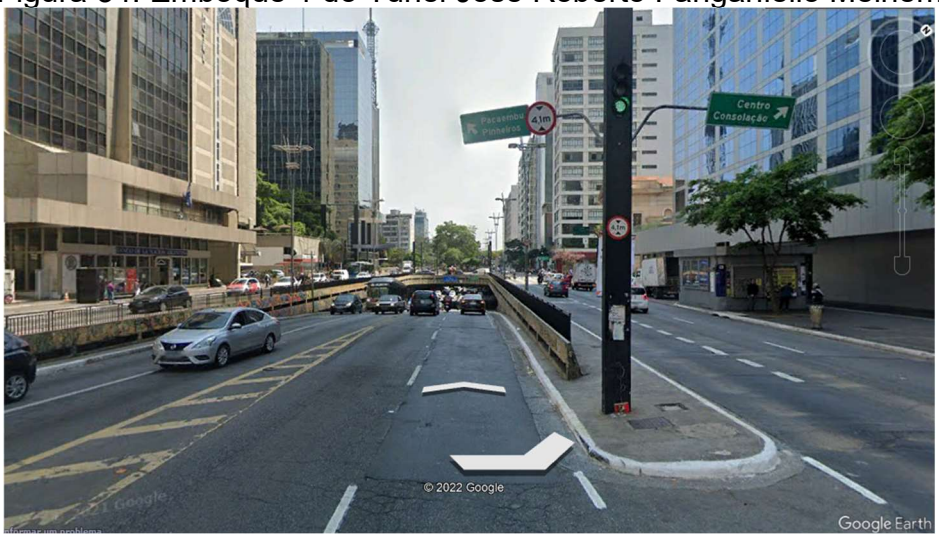
Fonte: Google Earth (2022)

Tabela 33: Túnel Fernando Vieira de Mello

Item	**Descrição**
Nome	Túnel Fernando Vieira de Mello
Extensão	583m
Ano de inauguração	2.004
Localização	Avenida Eusébio Matoso
Características físicas	- Tráfego em sentido único em galeria única; - 2 faixas de rolamento; - Ausência de acostamento; - Ausência de passeio para pedestres; - Ausência de sistema de ventilação.

Fonte: Autora,(2023)

Figura 34: Emboque 1 do Túnel José Roberto Fanganiello Melhem



Fonte: Google Earth (2022)

Figura 35: Emboque 2 do Túnel José Roberto Fanganiello Melhem



Fonte: Google Earth (2022)

Tabela 34: Túnel José Roberto Fanganiello Melhem

Item	**Descrição**
Nome	Túnel José Roberto Fanganiello Melhem
Extensão	360m
Ano de inauguração	1.973
Localização	Avenida Paulista Avenida Rebouças Avenida Doutor Arnaldo
Características físicas	- Tráfego em dois sentidos em galeria única; - 2 faixas de rolamento por sentido; - Ausência de acostamento; - Ausência de passeio para pedestres; - Ausência de sistema de ventilação.

Fonte: Autora (2023)

Figura 36: Emboque 1 do Passagem Inferior Dirce Camargo



Fonte: Google Earth (2022)

Figura 37: Emboque 2 do Passagem Inferior Dirce Camargo



Fonte: Google Earth (2022)

Tabela 35: Passagem subterrânea Dirce Camargo

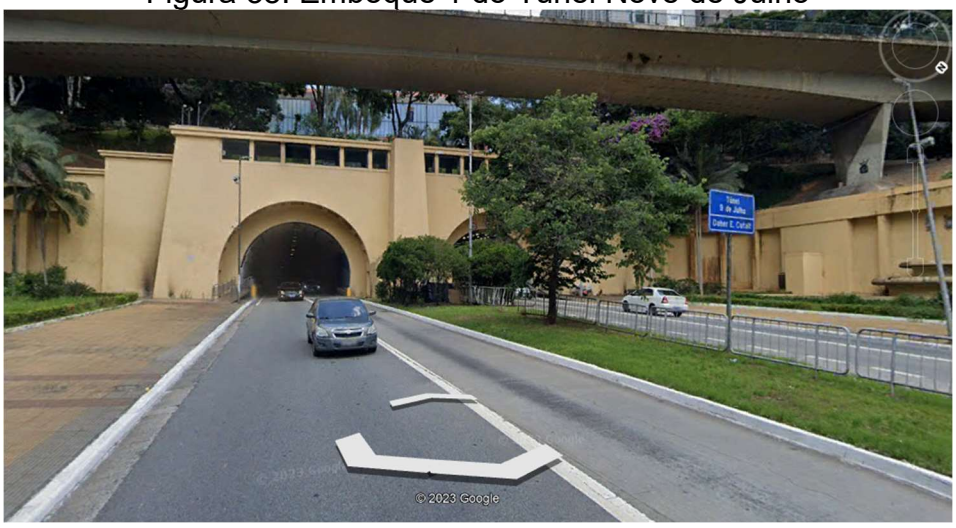
Item	**Descrição**
Nome	Passagem subterrânea Dirce Camargo
Extensão	196m
Ano de inauguração	2.013
Localização	Avenida Cidade Jardim
Características físicas	- Tráfego em único sentido em galeria única; - 1 faixa de rolamento por sentido; - Ausência de acostamento; - Ausência de passeio para pedestres; - Ausência de sistema de ventilação.

Fonte: Autora (2023)

O distrito de República concentra 3 túneis da cidade de São Paulo: Túnel Nove de Julho (Figuras 38 e 39), Passagem subterrânea Tom Jobim (Figuras 40 e 41) e Túnel Papa João Paulo II (Figuras 42 e 43). O distrito possui população de 56.981 habitantes e densidade demográfica de 24.774 hab./km^2.

Dos 3 túneis localizados na República, 1 possui sistema de ventilação: Túnel Nove de Julho (Tabela 36). Os túneis que não possuem sistema de ventilação têm comprimento inferior a 1.000 m: Passagem subterrânea Tom Jobim (Tabela 37) e Túnel Papa João Paulo II (Tabela 38).

Figura 38: Emboque 1 do Túnel Nove de Julho



Fonte: Google Earth (2022)

Figura 39: Emboque 2 do Túnel Nove de Julho



Fonte: Google Earth (2022)

Tabela 36: Túnel Nove de Julho

Item	**Descrição**
Nome	Túnel Nove de Julho
Extensão	1.060m
Ano de inauguração	1.938
Localização	Avenida Nove de Julho
Características físicas	- Tráfego em dois sentidos em galeria única; - 2 faixas de rolamento por sentido; - Ausência de acostamento; - Ausência de passeio para pedestres; - Sistema de ventilação longitudinal.

Fonte: Autora (2023)

Figura 40: Emboque 1 do Passagem subterrânea Tom Jobim



Fonte: Google Earth (2022)

Figura 41: Emboque 2 do Passagem subterrânea Tom Jobim



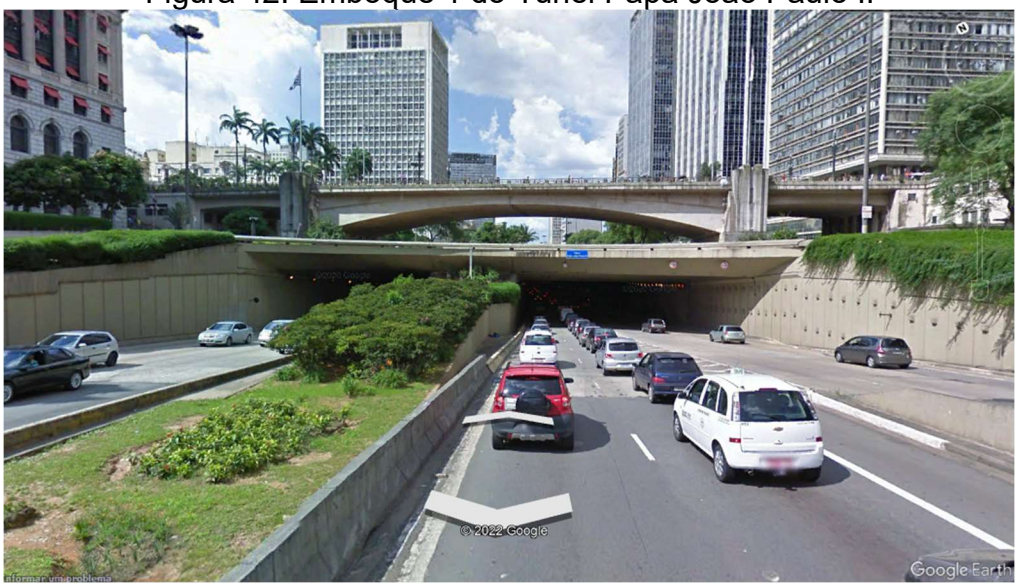
Fonte: Google Earth (2022)

Tabela 37: Passagem subterrânea Tom Jobim

Item	**Descrição**
Nome	Passagem subterrânea Tom Jobim
Extensão	329m
Ano de inauguração	1.995
Localização	Avenida Prestes Maia
Características físicas	- Tráfego em dois sentidos em duas galerias; - 3 faixas de rolamento por galeria; - Ausência de acostamento; - Ausência de passeio para pedestres; - Ausência de sistema de ventilação.

Fonte: Autora (2023)

Figura 42: Emboque 1 do Túnel Papa João Paulo II



Fonte: Google Earth (2022)

Figura 43: Emboque 2 do Túnel Papa João Paulo II



Fonte: Google Earth (2022)

Tabela 38: Túnel Papa João Paulo II

Item	**Descrição**
Nome	Túnel Papa João Paulo II
Extensão	582m
Ano de inauguração	1.998
Localização	Avenida 23 de Maio Avenida Prestes Maia
Características físicas	- Tráfego em dois sentidos em galeria única; - 3 e 4 faixas de rolamento por sentido; - Ausência de acostamento; - Ausência de passeio para pedestres; - Ausência de sistema de ventilação.

Fonte: Autora (2023)

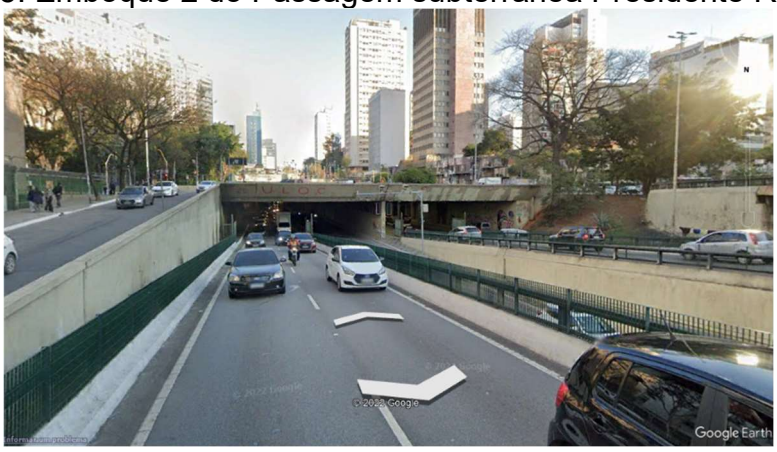
O distrito de Bela Vista possui população de 69.460 habitantes e densidade demográfica de 26.715 hab./km^2. A Passagem subterrânea Presidente Roosevelt, com 1.120m de comprimento está localizada neste distrito, sendo representado por meio das Figuras 44 e 45 e Tabela 39.

Figura 44: Emboque 1 do Passagem subterrânea Presidente Roosevelt



Fonte: Google Earth (2022)

Figura 45: Emboque 2 do Passagem subterrânea Presidente Roosevelt



Fonte: Google Earth (2022)

Tabela 39: Passagem subterrânea Presidente Roosevelt

Item	**Descrição**
Nome	Passagem subterrânea Presidente Roosevelt
Extensão	1.120m
Ano de inauguração	1.971
Localização	Praça Franklin Roosevelt
Características físicas	- Tráfego em dois sentidos em galeria única; - 4 e 3 faixas de rolamento por sentido; - Ausência de acostamento; - Ausência de passeio para pedestres; - Ausência de sistema de ventilação.

Fonte: Autora (2023)

O distrito de Cursino possui população de 109.098 habitantes e densidade demográfica de 8.523 hab./km^2. O Túnel Maria Maluf, com 1.020 m de comprimento está localizada neste distrito, sendo representado por meio das Figuras 46 e 47 e Tabela 40.

Figura 46: Emboque 1 do Túnel Maria Maluf



Fonte: Google Earth (2022)

Figura 47: Emboque 2 do Túnel Maria Maluf



Fonte: Google Earth (2022)

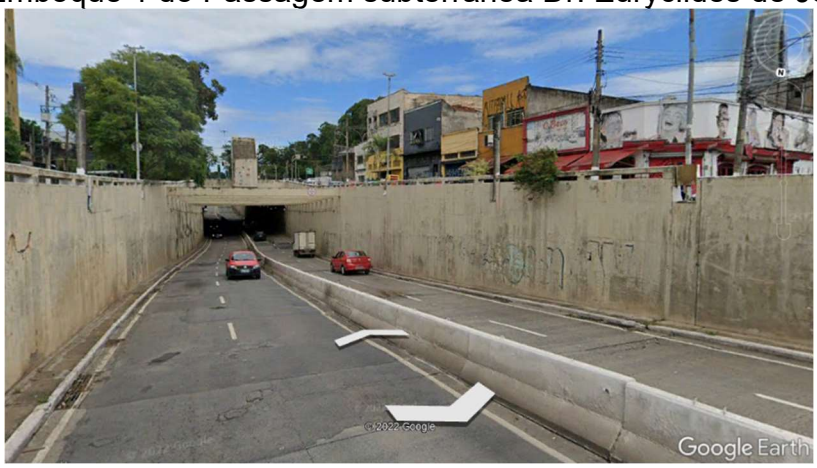
Tabela 40: Túnel Maria Maluf

Item	**Descrição**
Nome	Túnel Maria Maluf
Extensão	1.020m
Ano de inauguração	1.994
Localização	Avenida Presidente Tancredo Neves
Características físicas	- Tráfego em dois sentidos em duas galerias; - 3 faixas de rolamento por galeria; - Ausência de acostamento; - Ausência de passeio para pedestres; - Sistema de ventilação longitudinal.

Fonte: Autora (2023)

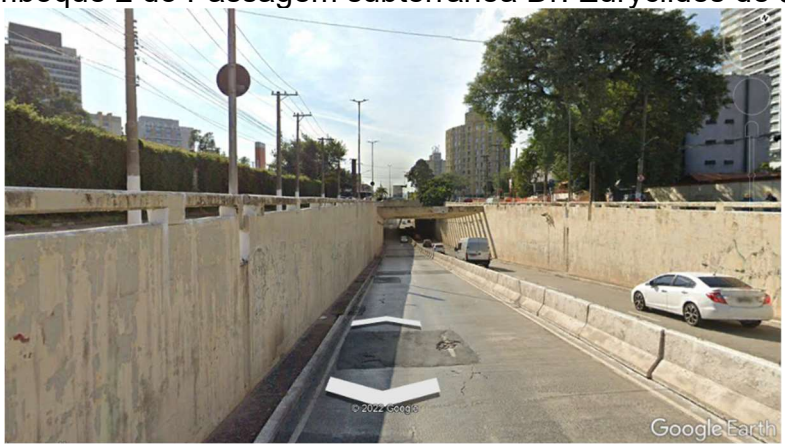
A Passagem subterrânea Doutor Euryclides Zerbini, com 420m de comprimento, está localizada no distrito do Butantã, que possui população de 54.196 habitantes e densidade demográfica de 4.336 hab./km^2, sendo representado por meio das Figuras 48 e 49 e Tabela 41.

Figura 48: Emboque 1 do Passagem subterrânea Dr. Euryclides de Jesus Zerbini



Fonte: Google Earth (2022)

Figura 49: Emboque 2 do Passagem subterrânea Dr. Euryclides de Jesus Zerbini



Fonte: Google Earth (2022)

Tabela 41: Passagem subterrânea Dr. Euryclides de Jesus Zerbini

Item	**Descrição**
Nome	Passagem subterrânea Doutor Euryclides Zerbini
Extensão	420m
Ano de inauguração	1.993
Localização	Avenida Lineu de Paula Machado Avenida Valdemar Ferreira
Características físicas	- Tráfego em dois sentidos em galeria única; - 2 faixas de rolamento por sentido; - Ausência de acostamento; - Ausência de passeio para pedestres; - Ausência de sistema de ventilação.

Fonte: Autora (2023)

A Passagem subterrânea Sena Madureira, com 205 m de comprimento, está localizada no distrito de Vila Mariana, que possui população de 130.484 habitantes e densidade demográfica de 15.173 hab./km^2, sendo representado por meio das Figuras 50 e 51 e Tabela 42.

Figura 50: Emboque 1 do Passagem subterrânea Sena Madureira



Fonte: Google Earth (2022)

Figura 51: Emboque 2 do Passagem subterrânea Sena Madureira



Fonte: Google Earth (2022)

Tabela 42: Passagem subterrânea Sena Madureira

Item	**Descrição**
Nome	Passagem subterrânea Sena Madureira
Extensão	205m
Ano de inauguração	1.996
Localização	Avenida 23 de Maio Avenida Sena Madureira
Características físicas	- Tráfego em sentido único em galeria única; - 3 faixas de rolamento; - Ausência de acostamento; - Ausência de passeio para pedestres; - Ausência de sistema de ventilação.

Fonte: Autora (2023)

O distrito de Sacomã possui população de 247.851 habitantes e densidade demográfica de 17.454 hab./km^2. O Túnel Mackenzie, com 180 m de comprimento, está localizada neste distrito, sendo representado por meio das Figuras 52 e 53 e Tabela 43.

Figura 52: Emboque 1 do Túnel Mackenzie



Fonte: Google Earth (2022)

Figura 53: Emboque 2 do Túnel Mackenzie



Fonte: Google Earth (2022)

Tabela 43: Túnel Mackenzie

Item	**Descrição**
Nome	Túnel Mackenzie
Extensão	180m
Ano de inauguração	1.996
Localização	Estrada das Lágrimas
Características físicas	- Tráfego sentido único em galeria única; - 2 faixas de rolamento; - Ausência de acostamento; - Ausência de passeio para pedestres; - Ausência de sistema de ventilação.

Fonte: Autora (2023)

O distrito de Itaquera possui população de 204.871 habitantes e densidade demográfica de 14.032 hab./km^2. O Túnel Odon Pereira, com 180 m de comprimento, está localizada neste distrito, sendo representado por meio das Figuras 54 e 55 e Tabela 44.

Figura 54: Emboque 1 do Túnel Odon Pereira



Fonte: Google Earth (2022)

Figura 55: Emboque 2 do Túnel Odon Pereira



Fonte: Google Earth (2022)

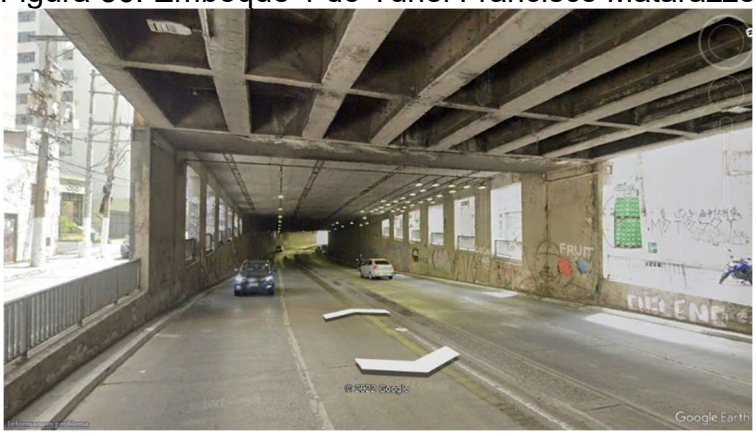
Tabela 44: Túnel Odon Pereira

Item	**Descrição**
Nome	Túnel José Roberto Fanganiello Melhem
Extensão	360m
Ano de inauguração	2.006
Localização	Avenida José Pinheiro Borges
Características físicas	- Tráfego em dois sentidos em duas galerias; - 2 faixas de rolamento por sentido; - Presença de acostamento; - Presença de passeio para pedestres; - Ausência de sistema de ventilação.

Fonte: Autora (2023)

O distrito de Barra Funda possui população de 14.383 habitantes e densidade demográfica de 2.568 hab./km^2. O Túnel Francisco Matarazzo, com 120 m de comprimento, está localizada neste distrito, sendo representado por meio das Figuras 56 e 57 e Tabela 45.

Figura 56: Emboque 1 do Túnel Francisco Matarazzo



Fonte: Google Earth (2022)

Figura 57: Emboque 2 do Túnel Francisco Matarazzo



Fonte: Google Earth (2022)

Tabela 45: Túnel Francisco Matarazzo

Item	**Descrição**
Nome	Túnel Francisco Matarazzo
Extensão	120m
Ano de inauguração	1.970
Localização	Avenida Francisco Matarazzo Avenida General Olímpio da Silveira
Características físicas	- Tráfego em dois sentidos em galeria única; - 2 faixas de rolamento por sentido; - Ausência de acostamento; - Ausência de passeio para pedestre; - Ausência de sistema de ventilação.

Fonte: Autora (2023)

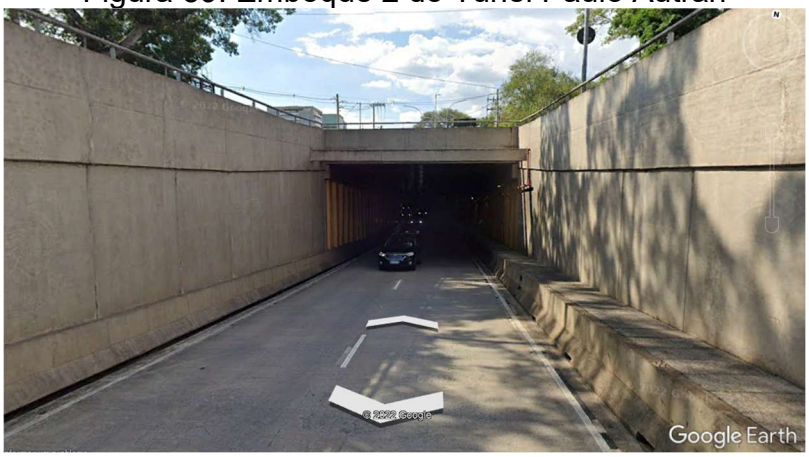
O distrito de Campo Belo possui população de 65.752 habitantes e densidade demográfica de 7.472 hab./km^2. O Túnel Paulo Autran, com 180 m de comprimento, está localizado nesse distrito, sendo representado por meio das Figuras 58 e 59 e Tabela 46.

Figura 58: Emboque 1 do Túnel Paulo Autran



Fonte: Google Earth (2022)

Figura 59: Emboque 2 do Túnel Paulo Autran



Fonte: Google Earth (2022)

Tabela 46: Túnel Paulo Autran

Item	**Descrição**
Nome	Túnel Paulo Autran
Extensão	150m
Ano de inauguração	2.008
Localização	Avenida Washington Luís Aeroporto de Congonhas
Características físicas	- Tráfego em dois sentidos em galeria única; - 2 faixas de rolamento por sentido; - Ausência de acostamento; - Ausência de passeio para pedestres; - Ausência de sistema de ventilação.

Fonte: Autora (2023)

A cidade de São Paulo possui 10 túneis/passagens com comprimento inferior a 500m, ou seja, que permite ventilação natural, e 21 túneis possuem comprimento superior a 500 m e inferior a 3.000 m, quando há a necessidade de implantação de sistema de ventilação mecânico.

Neste trabalho foram destacados os túneis com comprimento superior a 1.000 m, sendo eles: Túneis Ayrton Senna (1.950 e 1.700 m), Túnel Jânio Quadros (1.900 m), Túnel Sebastião Camargo (1.170 m), Passagem subterrânea Presidente Roosevelt (1.120 m), Túnel Nove de Julho (1.060 m) e Túnel Maria Maluf (1.020 m), nos quais foram realizadas medições dos níveis de monóxido de carbono.

Em 2020, Marinello *et al.* realizaram uma pesquisa bibliográfica sobre artigos publicados em diversos países sobre concentração de poluentes emitidos por veículos automotores em túneis rodoviários. Os artigos foram analisados com relação às características dos túneis: nome, unidirecional ou bidirecional, quantidade de galerias, número de pistas, comprimento do túnel, classificação do túnel, velocidade média dos veículos, condições meteorológicas internas e tipo de túnel. Os 113 artigos analisados estudaram um total de 104 túneis diferentes. Nos casos estudados, a condição mais frequente (63%) é de túneis com duas galerias e quatro pistas (49%). Na maioria dos casos, são túneis bidirecionais (89%), possivelmente com fluxos unidirecionais para cada galeria. O comprimento é um fator extremamente variável. Os mais frequentes são os túneis classificados como túneis longos (entre 1.000 e 3.000 m de comprimento), que representam 56% dos casos analisados e estão localizados principalmente em áreas urbanas (69% dos casos). Nesta pesquisa bibliográfica foi evidenciado que cada autor normalmente concentra seu estudo na avaliação e análise de um único túnel: aproximadamente 87% dos artigos analisados descrevem um único estudo de caso. Por outro lado, 13% (15 autores) analisaram pelo menos dois em um mesmo artigo. Cerca de 20% dos túneis foram estudados e descritos por pelo menos dois autores. O estudo mais completo com relação ao número de locais investigados é o de Chow e Chan (2003), que analisa os níveis de poluentes de dentro de onze túneis veiculares em Hong Kong, na China. Dos poluentes considerados em estudos de túneis, o monóxido de carbono representa 15%, sendo o material particulado o mais avaliado, com 36%.

Observa-se que, este trabalho apresenta as características básicas dos 21 túneis da cidade de São Paulo e realiza medição da concentração de monóxido de carbono em 6 dos túneis caracterizados, usando como critério os túneis com

comprimento superior a 1.000 m, onde, de acordo com as normas técnicas atuais, deve ser instalado um sistema de ventilação mecanizado.

5.2. Análise dos pontos de monitoramento da CETESB

De acordo com a CETESB, os resultados do monitoramento de uma dada estação devem representar as concentrações do poluente de interesse numa escala espacial compatível com os objetivos do monitoramento, considerando-se: poluente de interesse, proximidade das fontes de emissão, intensidade das emissões, condições de topografia, relevo e transporte dos poluentes. As distâncias entre os pontos de monitoramento da CETESB e os emboques dos túneis/passagens subterrâneas Ayrton Senna, Jânio Quadros, Sebastião Camargo, Presidente Roosevelt, Nove de Julho e Maria Maluf são apresentadas na Tabela 47. A análise conjugada dos dados sobre emissão de poluentes, com as características dos túneis e com os dados de volume veicular das vias, nos permite identificar as áreas próximas aos túneis da cidade de São Paulo que não são monitoradas pela CESTESB, apesar de as mesmas serem mais suscetíveis às emissões de poluentes.

Tabela 47: Localização dos pontos de monitoramento da CETESB em relação aos túneis e passagens subterrâneas

Túnel	**Ponto de monitoramento CETESB**	**Distância entre ponto de monitoramento da CETESB ao emboque do túnel (m)**
Maria Maluf	Congonhas	4.237
	Congonhas	4.762
Ayrton Senna	Ibirapuera	855
	Ibirapuera	665
Presidente Roosevelt	Parque Dom Pedro	1.765
	Parque Dom Pedro	1.670
Nove de Julho	Cerqueira César	2.845
	Ibirapuera	2.525
Sebastião Camargo	Pinheiros	3.465
	Ibirapuera	3.185
Jânio Quadros	Pinheiros	2.825
	Ibirapuera	3.185

Fonte: Autora (2023)

5.3. Características do clima no período de leituras

As leituras da concentração de monóxido de carbono foram realizadas entre os meses de julho de 2023 a novembro de 2023, ou seja, 3 meses no inverno e 2 meses na primavera, conforme apresentado na Tabela 48.

Tabela 48: Datas das leituras realizadas por túnel

Túnel / Passagem	Quantidade de leituras	Datas das leituras
Maria Maluf	5	22 de agosto de 2023 16 de setembro de 2023 29 de setembro de 2023 02 de outubro de 2023 15 de novembro de 2023
Ayrton Senna	7	22 de agosto de 2023 16 de setembro de 2023 29 de setembro de 2023 02 de outubro de 2023 15 de novembro de 2023 17 de novembro de 2023
Presidente Roosevelt	9	29 de julho de 2023 10 de agosto de 2023 15 de agosto de 2023 22 de agosto de 2023 16 de setembro de 2023 29 de setembro de 2023 02 de outubro de 2023 15 de novembro de 2023 17 de novembro de 2023
Nove de Julho	5	29 de julho de 2023 10 de agosto de 2023 15 de agosto de 2023 16 de setembro de 2023 29 de setembro de 2023
Sebastião Camargo	7	15 de agosto de 2023 22 de agosto de 2023 16 de setembro de 2023 29 de setembro de 2023 02 de outubro de 2023 15 de novembro de 2023 17 de novembro de 2023
Jânio Quadros	7	15 de agosto de 2023 22 de agosto de 2023 16 de setembro de 2023 29 de setembro de 2023 02 de outubro de 2023 15 de novembro de 2023 17 de novembro de 2023

Fonte: Autora (2023)

A variação na quantidade de leituras realizadas nos seis túneis deve-se aos valores obtidos. Para cada uma das leituras realizadas foram registrados os dados meteorológicos do dia, a partir dos dados do Climatempo. A Tabela 49 registra os dados obtidos para o dia 29/07/2023. Análise do Instituto Nacional de Meteorologia concluiu que julho de 2023 foi o julho mais quente no Brasil desde 1961.

A maioria das frentes frias que chegaram ao Brasil em julho de 2023 tiveram deslocamento oceânico, que não permitiram a entrada de ar frio de origem polar pelo interior do país (Climatempo, 2023).

Tabela 49: Dados do clima 29/07/2023

Item	**Dado**
Data	29 de julho de 2023
Dia da semana	Sábado
Horário da leitura	14 as 15h
Temperatura mínima (ºC)	18
Temperatura máxima (ºC)	23
Vento (km/h)	15
Precipitação (mm)	2
Umidade mínima (%)	82
Umidade máxima (%)	88

Fonte: Climatempo (2023)

As Tabelas 50, 51 e 52 registram os dados obtidos nos dias 10/08/2023, 15/08/2023 e 22/08/2023, respectivamente. A onda de calor entre os dias 22 e 28 de agosto de 2023 foi completamente atípica, pois ocorreu ainda no inverno.

Em um mês que tem como característica marcante o tempo seco em grande parte do Brasil, alguns eventos de chuva volumosa se destacaram. Durante a onda de calor de agosto de 2023, temperaturas na marca dos 40°C foram observadas no Sudeste (Climatempo, 2023).

Tabela 50: Dados do clima 10/08/2023

Item	**Dado**
Data	10 de agosto de 2023
Dia da semana	Quinta-feira
Horário da leitura	8 as 10h
Temperatura mínima (ºC)	23
Temperatura máxima (ºC)	25
Vento (km/h)	14
Precipitação (mm)	0
Umidade mínima (%)	82
Umidade máxima (%)	88

Fonte: Climatempo (2023)

Tabela 51: Dados do clima 15/08/2023

Item	**Dado**
Data	15 de agosto de 2023
Dia da semana	Terça-feira
Horário da leitura	8 as 10h
Temperatura mínima (ºC)	14
Temperatura máxima (ºC)	26
Vento (km/h)	11
Precipitação (mm)	3
Umidade mínima (%)	52
Umidade máxima (%)	95

Fonte: Climatempo (2023)

Tabela 52: Dados do clima 22/08/2023

Item	**Dado**
Data	22 de agosto de 2023
Dia da semana	Terça-feira
Horário da leitura	8 as 10h
Temperatura mínima (ºC)	15
Temperatura máxima (ºC)	31
Vento (km/h)	11
Precipitação (mm)	0
Umidade mínima (%)	18
Umidade máxima (%)	78

Fonte: Climatempo (2023)

As Tabelas 53 e 54 registram os dados obtidos nos dias 16/09/2023 e 29/09/2023 respectivamente. O grande destaque de setembro de 2023 foi a intensa onda de calor que se espalhou pelo país. Em 24/09/2023, a cidade de São Paulo registrou 36,5°C, a segunda maior temperatura para setembro já observada. Mas com o El Niño se organizando cada vez mais, a chuva não deu trégua no Sul do Brasil e grandes volumes de chuva voltaram a ser observados sobre a Região.(Climatempo, 2023).

Tabela 53: Dados do clima 16/09/2023

Item	**Dado**
Data	16 de setembro de 2023
Dia da semana	Sábado
Horário da leitura	11 as 13h
Temperatura mínima (ºC)	13
Temperatura máxima (ºC)	30
Vento (km/h)	11
Precipitação (mm)	0
Umidade mínima (%)	27
Umidade máxima (%)	88

Fonte: Climatempo (2023)

Tabela 54: Dados do clima 29/09/2023

Item	**Dado**
Data	29 de setembro de 2023
Dia da semana	Sexta-feira
Horário da leitura	8 as 10h
Temperatura mínima (ºC)	14
Temperatura máxima (ºC)	25
Vento (km/h)	18
Precipitação (mm)	5
Umidade mínima (%)	47
Umidade máxima (%)	87

Fonte: Climatempo (2023)

Outra onda de calor no Brasil, a quarta consecutiva e abrangente, e mais chuva no Sul foram destaques em novembro de 2023. São Paulo registrou 37,7°C nos dias 13 e 14 de novembro de 2023. Foi a segunda maior temperatura na capital paulista e

o maior valor para um dia de novembro, em 80 anos de medições. Esta foi a maior temperatura em São Paulo em 2023. O recorde histórico, desde 1943, é de 37,8°C em 17 de outubro de 2014 (Climatempo, 2023).

As Tabelas 55, 56 e 57 registram os dados obtidos nos dias 02/10/2023, 15/11/2023 e 17/11/2023, respectivamente. O ano de 2023 entra para a história climática do planeta Terra, como o ano mais quente já registrado, com temperatura média 1,4°C acima dos níveis do período pré-industrial (1850 a 1901). Na comparação com dados paleoclimatológicos obtidos pela análise de anéis de árvores e de camadas de gelo profundas, 2023 foi considerado o mais quente em 125 mil anos, segundo a Organização Meteorológica Mundial (Climatempo, 2023).

Tabela 55: Dados do clima 02/10/2023

Item	**Dado**
Data	2 de outubro de 2023
Dia da semana	Segunda-feira
Horário da leitura	10 as 12h
Temperatura mínima (ºC)	16
Temperatura máxima (ºC)	23
Vento (km/h)	12
Precipitação (mm)	2
Umidade mínima (%)	55
Umidade máxima (%)	89

Fonte: Climatempo (2023)

Tabela 56: Dados do clima 15/11/2023

Item	**Dado**
Data	15 de novembro de 2023
Dia da semana	Quarta-feira
Horário da leitura	8 as 10h
Temperatura mínima (ºC)	20
Temperatura máxima (ºC)	27
Vento (km/h)	12
Precipitação (mm)	5
Umidade mínima (%)	19
Umidade máxima (%)	88

Fonte: Climatempo (2023)

Tabela 57: Dados do clima 17/11/2023

Item	Dado
Data	17 de novembro de 2023
Dia da semana	Quarta-feira
Horário da leitura	8 as 10h 18 as 20h
Temperatura mínima (ºC)	21
Temperatura máxima (ºC)	35
Vento (km/h)	14
Precipitação (mm)	0
Umidade mínima (%)	21
Umidade máxima (%)	82

Fonte: Climatempo (2023)

5.3.1. Túnel Nove de Julho

O Túnel Nove de Julho situa-se na Avenida 9 de Julho, às proximidades dos bairros Bela Vista e Jardins, passando sob a Avenida Paulista. Ele foi o primeiro túnel a ser construído na cidade de São Paulo e passou por duas grandes reformas (1975 e 1988). Atualmente, é provido de iluminação e 4 conjuntos de jatos ventiladores por galeria. O túnel possui 2 emboques representados por meio da Figura 60 e descritos a seguir:

- Emboque 1 – formado por duas galerias, cada uma com 2 faixas de rolamento e sentido unidirecional de veículos, com acesso ao bairro Jardins.
- Emboque 2 – formado por duas galerias, cada uma com 2 faixas de rolamento e sentido unidirecional de veículos, com acesso ao bairro Bela Vista.

Foram realizadas 5 leituras de monóxido de carbono no Túnel Nove de Julho, em cada um dos emboques: 1 leitura em julho/2023, 2 leituras em agosto/2023 e 2 em setembro/2023, os resultados obtidos foram registrados nas Tabelas 58 e 59.

Figura 60: Túnel Nove de Julho – Localização dos Emboques



Fonte: Google Earth (2023)

As leituras realizadas em agosto e setembro, confirmaram os resultados obtidos em julho, não sendo registrado a concentração de monóxido de carbono nos emboques do túnel.

Tabela 58: Leituras no Túnel Nove de Julho – Emboque 1

Dia/Mês/Ano	Leitura realizada no P1 (ppm)	Leitura realizada no P2 (ppm)	Leitura realizada no P1 (ppm)
29/07/2023	0	0	0
10/08/2023	0	0	0
15/08/2023	0	0	0
16/09/2023	0	0	0
29/09/2023	0	0	0

Fonte: Autora (2023)

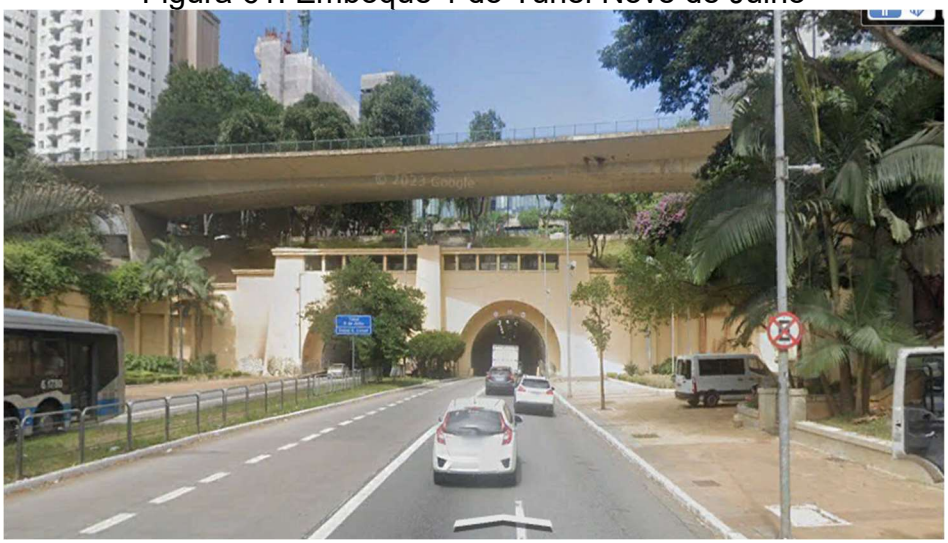
Tabela 59: Leituras no Túnel Nove de Julho – Emboque 2

Dia/Mês/Ano	Leitura realizada no P1 (ppm)	Leitura realizada no P2 (ppm)	Leitura realizada no P1 (ppm)
29/07/2023	0	0	0
10/08/2023	0	0	0
15/08/2023	0	0	0
16/09/2023	0	0	0
29/09/2023	0	0	0

Fonte: Autora (2023)

Observa-se por meio da Figura 61 que a condição topográfica do Túnel Nove de Julho favorece a dispersão de poluentes, pois o perfil altimétrico do túnel mantém-se o mesmo no entorno do emboque.

Figura 61: Emboque 1 do Túnel Nove de Julho



Fonte: Google Earth (2024)

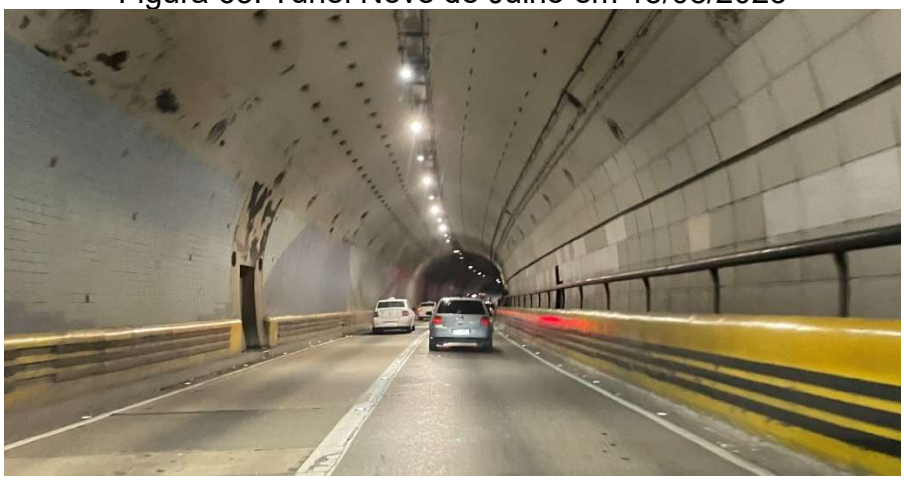
O Túnel possui 2 faixas de rolamento, sendo que, uma delas é dedicada para corredor exclusivo para ônibus, o que favorece a dispersão de poluentes, considerando que o tráfego na faixa exclusiva para ônibus não é constante.Em nenhum dos dias de leituras registrou-se engarrafamento de veículos no túnel, demonstra-se nas Figuras 62, 63 e 64.

Figura 62: Emboque 2 do Túnel Nove de Julho em 29/07/2023



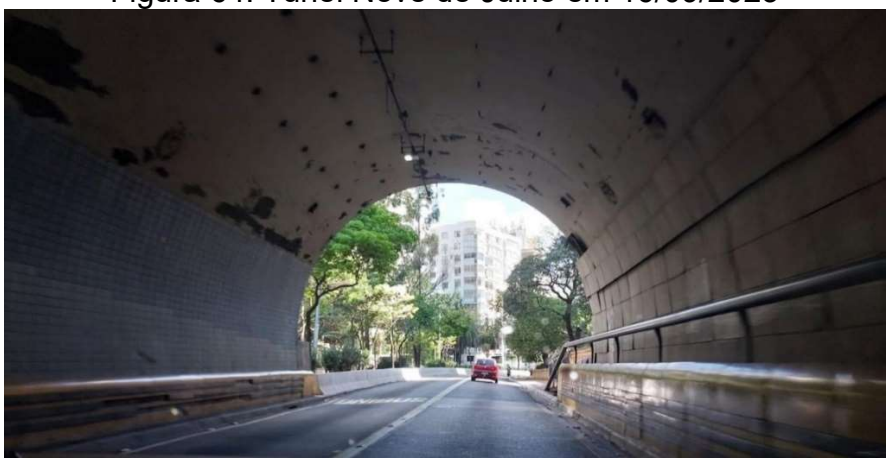
Fonte: Autora (2023)

Figura 63: Túnel Nove de Julho em 15/08/2023



Fonte: Autora (2023)

Figura 64: Túnel Nove de Julho em 16/09/2023



Fonte: Autora (2023)

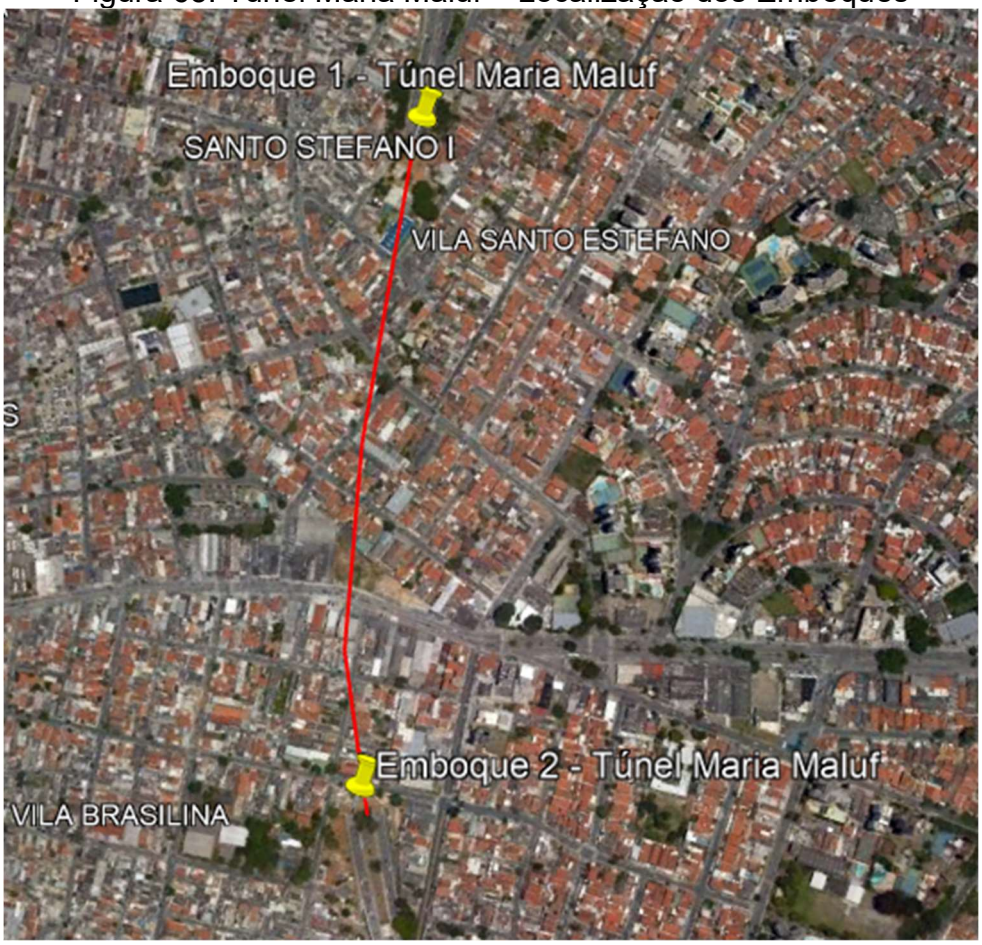
Em Dailan, China, foi realizada uma investigação numérica dos padrões de fluxo de ar e dispersão de poluentes induzidos por uma frota de 36 automóveis a gasolina localizados em nove filas com quatro veículos por fila, no interior de um túnel rodoviário com 450 m de extensão. A conclusão foi de que o efeito de pistão transitório induzido por uma frota de veículos que atravessa um túnel pode dominar a dispersão de poluentes se a velocidade do veículo for superior a 20 km/h. Este estudo utilizou o modelo k-ε realizável juntamente com a técnica da malha dinâmica. (ZHAO; SONG, 2019). Foi constatado visualmente, nos momentos de realização das leituras no Túnel Nove de Julho, que o tráfego de veículos era superior a 20 km/h, corroborando desta forma com os dados obtidos por meio da investigação numérica realizada em Dailan, por Zhao e Song.

5.3.2. Túnel Maria Maluf

O Túnel Maria Maluf faz a ligação entre o corredor da Av. dos Bandeirantes com a Av. Presidente Tancredo Neves, possibilitando a ligação da Marginal Pinheiros com a Via Anchieta, e está localizado no distrito do Ipiranga. O túnel possui 2 emboques, representados por meio da Figura 65 e descritos a seguir:

- Emboque 1 – formado por duas galerias, cada uma com 3 faixas de rolamento e sentido unidirecional de veículos, com acesso à Vila Brasiliana.
- Emboque 2 – formado por duas galerias, cada uma com 3 faixas de rolamento e sentido unidirecional de veículos, com acesso à Via Anchieta.

Figura 65: Túnel Maria Maluf – Localização dos Emboques



Fonte: Autora (2023)

Foram realizadas 5 leituras de monóxido de carbono no Túnel Maria Maluf, em cada um dos emboques: 1 leitura em agosto/2023, 2 leituras em setembro/2023, 1 em outubro/2023 e 1 em novembro/2023. Os resultados obtidos foram registrados nas Tabelas 60 e 61.

Tabela 60: Leituras no Túnel Maria Maluf – Emboque 1

Dia/Mês/Ano	Leitura realizada no P1 (ppm)	Leitura realizada no P2 (ppm)	Leitura realizada no P1 (ppm)
22/08/2023	0	0	0
16/09/2023	0	0	0
29/09/2023	0	0	0
02/10/2023	0	0	0
15/11/2023	0	0	0

Fonte: Autora (2023)

Tabela 61: Leituras no Túnel Maria Maluf – Emboque 2

Dia/Mês/Ano	Leitura realizada no P1 (ppm)	Leitura realizada no P2 (ppm)	Leitura realizada no P1 (ppm)
22/08/2023	0	0	0
16/09/2023	0	0	0
29/09/2023	0	0	0
02/10/2023	0	0	0
15/11/2023	0	0	0

Fonte: Autora (2023)

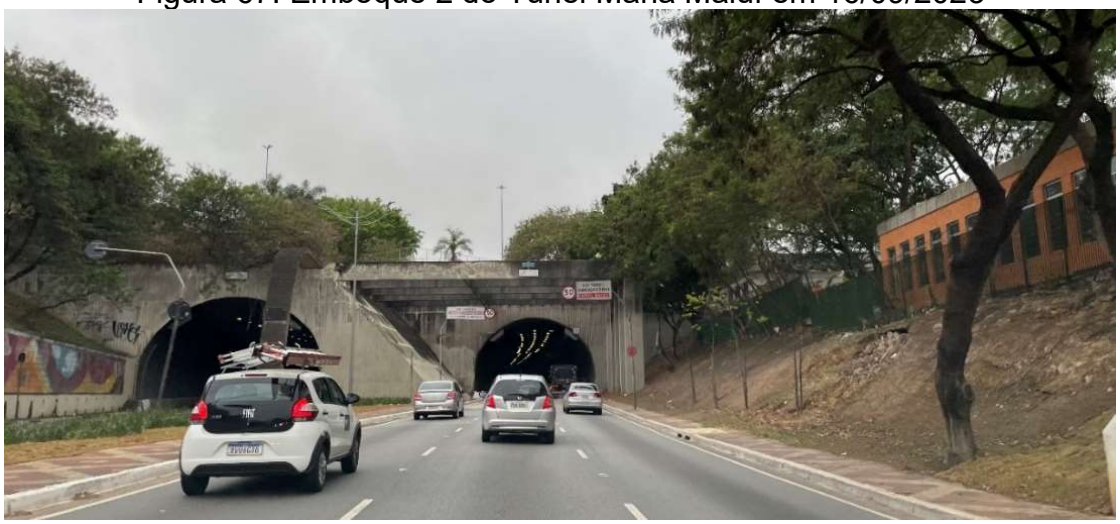
As leituras realizadas no Túnel Maria Maluf foram idênticas às do Túnel Nove de Julho, ou seja, não foi registrada a concentração de monóxido de carbono nos emboques do túnel.

Figura 66: Emboque 1 do Túnel Maria Maluf em 22/08//2023



Fonte: Autora (2023)

Figura 67: Emboque 2 do Túnel Maria Maluf em 16/09/2023



Fonte: Autora (2023)

Observa-se por meio das Figuras 66 e 67, que a condição topográfica do Túnel Maria Maluf favorece a dispersão de poluente, pois o perfil altimétrico do túnel mantém-se o mesmo no entorno do emboque. Em nenhum dos dias de leituras registrou-se engarrafamento de veículos no túnel.

Assim como no Túnel Nove de Julho, nos momentos de realização das leituras no Túnel Maria Maluf, o tráfego de veículos era superior a 20 km/h, corroborando desta forma com os dados obtidos por meio da investigação numérica realizada em Dailan, por Zhao e Song, 2019. Desta forma, adotou-se que os Túneis Nove de Julho e Maria Maluf teriam 5 leituras cada, considerando que, em ambos os túneis os valores foram iguais a zero.

O fluxo de ar turbulento e a dispersão de poluentes no interior de um túnel são influenciados pelos ventos de pistão induzidos pelos veículos em movimento, pela flutuabilidade devida à diferença de temperatura entre os gases de escape dos veículos e o ar circundante e pela diferença de pressão entre os portais do túnel devido à ventilação natural, aos veículos em movimento e aos axiais (Bellasio, 1997)

5.3.3. Túnel Jânio Quadros

O Túnel Presidente Jânio Quadros liga a Avenida Presidente Juscelino Kubitschek, no Itaim Bibi, à Avenida Lineu de Paula Machado e à Rua Engenheiro Oscar Americano, no Morumbi. O túnel possui 2 emboques representados por meio da Figura 68 e descritos a seguir:

- Emboque 1 – formado por duas galerias, cada uma com 2 faixas de rolamento e sentido unidirecional de veículos, Morumbi
- Emboque 2 – formado por duas galerias, cada uma com 2 faixas de rolamento e sentido unidirecional de veículos, Avenida Presidente Juscelino Kubitschek.

Figura 68: Túnel Jânio Quadros – Localização dos Emboques



Fonte: Google Earth (2022)

Foram realizadas 8 leituras de monóxido de carbono no Túnel Jânio Quadros, em cada um dos emboques: 2 leituras em agosto/2023, 2 leituras em setembro/2023, 1 em outubro/2023 e 2 em novembro/2023, os resultados obtidos foram registrados nas Tabelas 62 e 63.

Tabela 62: Leituras no Túnel Jânio Quadros – Emboque 1

Dia/Mês/Ano	Leitura realizada no P1 (ppm)	Leitura realizada no P2 (ppm)	Leitura realizada no P1 (ppm)
15/08/2023	0	0	0
22/08/2023	0	0	0
16/09/2023	0	0	0
29/09/2023	0	0	0
02/10/2023	0	0	0
15/11/2023	0	0	0
17/11/2023	0	0	0

Fonte: Autora (2023)

Tabela 63: Leituras no Túnel Jânio Quadros – Emboque 2

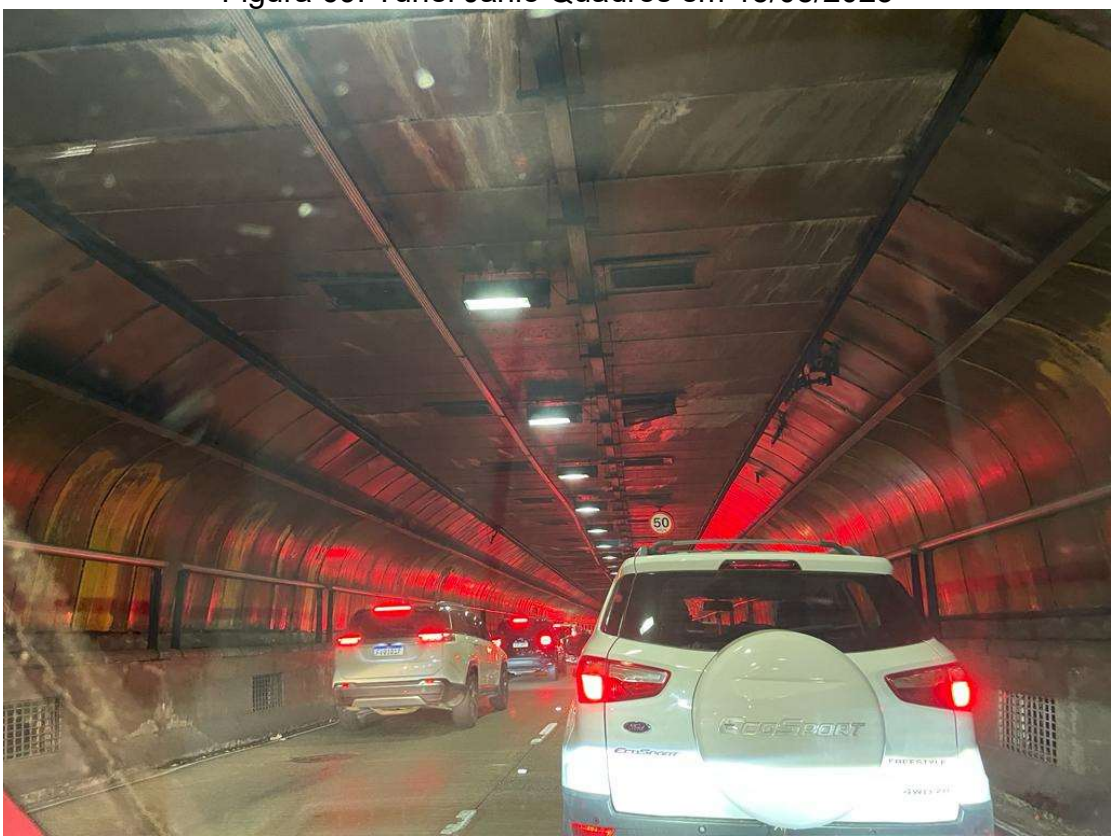
Dia/Mês/Ano	Leitura realizada no P1 (ppm)	Leitura realizada no P2 (ppm)	Leitura realizada no P1 (ppm)
15/08/2023	8	7	3
22/08/2023	8	7	3
16/09/2023	8	7	3
29/09/2023	8	7	3
02/10/2023	8	7	3
15/11/2023	0	0	0
17/11/2023	3	2	0

Fonte: Autora (2023)

O emboque 1, Figura 70, representa o fluxo unidirecional de entrada de veículos, colaborando desta forma para o efeito pistão e a ausência de monóxido de carbono nas leituras realizadas.

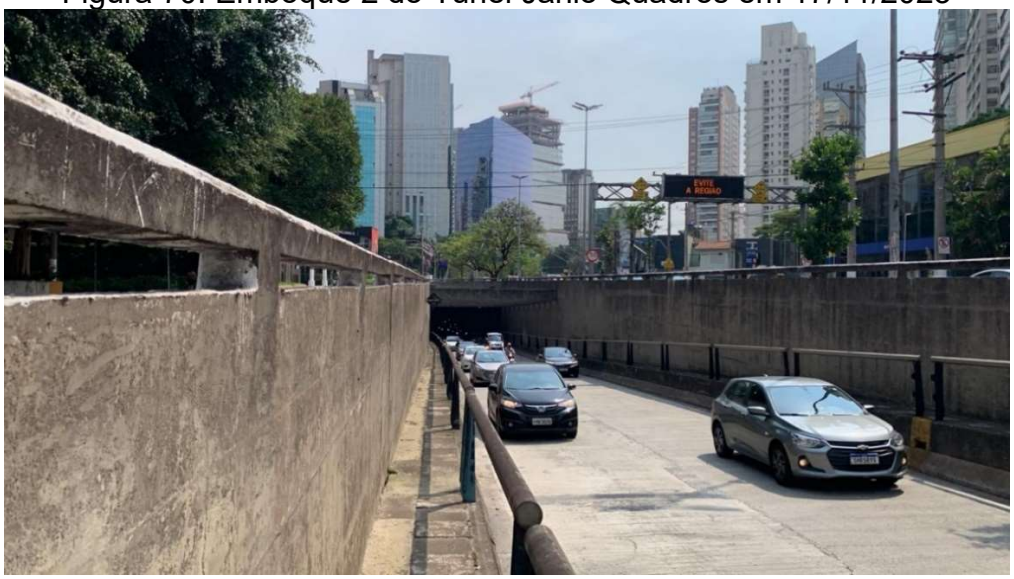
O emboque 2, Figura 71, possui uma retenção de veículos em virtude de um semáforo e passagem de pedestres, localizada aproximadamente a 700 m da saída do túnel, colaborando com a redução de velocidade e consequente retenção de veículos.

Figura 69: Túnel Jânio Quadros em 15/08/2023



Fonte: Autora (2023)

Figura 70: Emboque 2 do Túnel Jânio Quadros em 17/11/2023



Fonte: Autora (2023)

Figura 71: Emboque 1 do Túnel Jânio Quadros em 17/11/2023



Fonte: Autora (2023)

O túnel Jânio Quadros é o único que diariamente tem seu sentido de direção invertido para atender o fluxo dos moradores do Morumbi e arredores em direção ao Itaim Bibi, Ibirapuera, Aeroporto e Centro. A inversão ocorre de segunda a sexta-feira da seguinte forma:

- 6h00: bloqueio do tráfego no sentido Bairro;
- Das 6h15 às 10h00: liberação do tráfego no sentido Centro;
- 10h00: bloqueio do tráfego no sentido Centro;
- 10h15: liberação do tráfego no sentido Bairro;

As leituras realizadas no Túnel Jânio Quadros foram realizadas na liberação do tráfego para o sentido Centro, ou seja, quando a saída de veículos ocorre pelo emboque 2.

O sistema de monitoramento da CETESB define a qualidade do ar como boa quando os índices de monóxido de carbono, medidos por meio da rede automática, enquadram-se entre 0 e 9 ppm, e define a qualidade como moderada quando os índices se enquadram entre 9 e 11 ppm. Nos momentos de realização das leituras no Túnel Jânio Quadros, as leituras de monóxido de carbono chegaram ao valor máximo de 8 ppm, no emboque 2, podendo a qualidade do ar ser classificada como boa, segundo o parâmetro da CETESB.

5.3.4. Túnel Sebastião Camargo

O túnel Sebastião Camargo liga, em sentido único, a Avenida das Magnólias, no distrito do Morumbi, à Avenida Presidente Juscelino Kubitschek, no Itaim Bibi. O túnel Sebastião Camargo possui sistema de ventilação transversal e está localizado no distrito do Itaim Bibi, que possui densidade demográfica de 9.351hab/km^2. O túnel possui 2 emboques representados por meio da Figura 72 e descritos a seguir:

- Emboque 1 – formado por duas galerias, cada uma com 2 faixas de rolamento e sentido unidirecional de veículos, Morumbi, representado na Figura 74.
- Emboque 2 – formado por duas galerias, cada uma com 2 faixas de rolamento e sentido unidirecional de veículos, Avenida Presidente Juscelino Kubitschek.

Houve uma batalha jurídica iniciada com a construção do Túnel Sebastião Camargo. O projeto adotado para a construção túnel levou a Prefeitura da Cidade de São Paulo a desacatar 14 itens de uma resolução do Conselho Municipal do Meio Ambiente para obter licença ambiental da obra. Um dos itens era a construção da alça de acesso à Marginal Pinheiros, além do fechamento da Avenida das Acácias, de modo a evitar que a via e outras ruas do bairro fossem utilizadas como acesso ao túnel. Após a construção do Túnel Sebastião Camargo, a travessia de pedestres pela entrada do túnel tornou-se muito perigosa, em função do trânsito pesado.

Foram realizadas 7 leituras de monóxido de carbono no Túnel Maria Maluf, em cada um dos emboques: 2 leituras em agosto/2023, 2 leituras em setembro/2023, 1

em outubro/2023 e 2 em novembro/2023. Os resultados obtidos foram registrados nas Tabelas 64 e 65.

Figura 72: Túnel Sebastião Camargo – Localização Emboques



Fonte: Google Earth (2022)

Tabela 64: Leituras no Túnel Sebastião Camargo – Emboque 1

Dia/Mês/Ano	Leitura realizada no P1 (ppm)	Leitura realizada no P2 (ppm)	Leitura realizada no P1 (ppm)
15/08/2023	0	0	0
22/08/2023	0	0	0
16/09/2023	0	0	0
29/09/2023	0	0	0
02/10/2023	0	0	0
15/11/2023	0	0	0
17/11/2023	0	0	0

Fonte: Autora (2023)

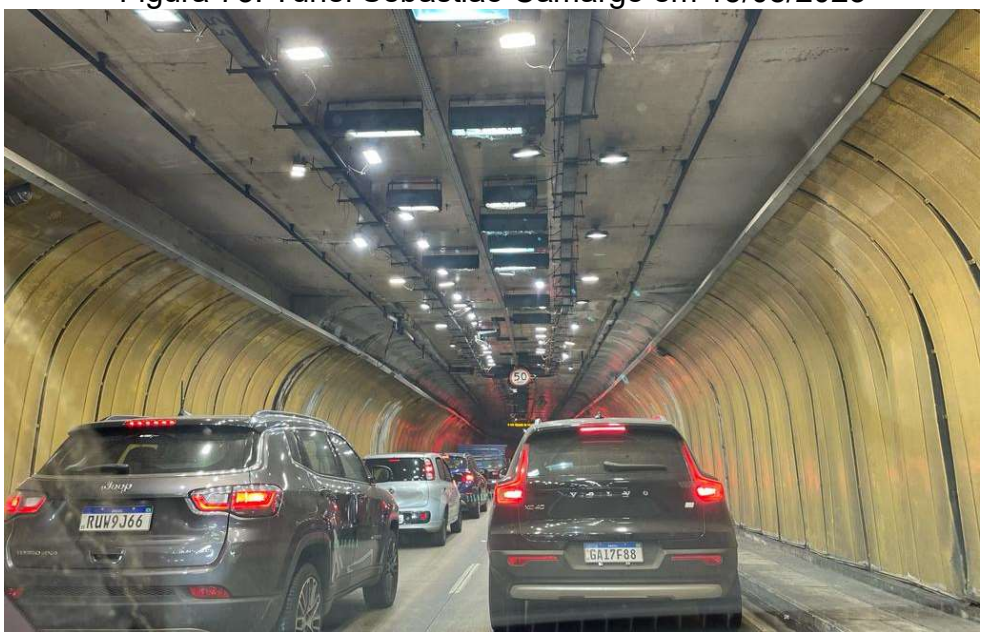
Tabela 65: Leituras no Túnel Sebastião Camargo – Emboque 2

Dia/Mês/Ano	Leitura realizada no P1 (ppm)	Leitura realizada no P2 (ppm)	Leitura realizada no P1 (ppm)
15/08/2023	6	6	3
22/08/2023	6	6	3
16/09/2023	6	6	3
29/09/2023	6	6	3
02/10/2023	6	6	3
15/11/2023	3	0	0
17/11/2023	2	0	0

Fonte: Autora (2023)

O emboque 2 do Túnel Sebastião Camargo, Figura 75, possui uma retenção de veículos em virtude de um semáforo e passagem de pedestres, localizada aproximadamente a 700 m da saída do túnel, colaborando com a redução de velocidade e consequente retenção de veículos, da mesma forma que o emboque 2 do Túnel Jânio Quadros.

Figura 73: Túnel Sebastião Camargo em 15/08/2023



Fonte: Autora (2023)

Figura 74: Emboque 1 do Túnel Sebastião Camargo em 17/11/2023



Fonte: Autora (2023)

Figura 75: Emboque 2 do Túnel Sebastião Camargo em 17/11/2023



Fonte: Autora (2023)

Nos momentos de realização das leituras no Túnel Sebastião Camargo, as leituras de monóxido de carbono chegaram ao valor máximo de 8 ppm no emboque 2, podendo a qualidade do ar ser classificada como boa segundo o parâmetro da CETESB.

5.3.5. Túneis Ayrton Senna

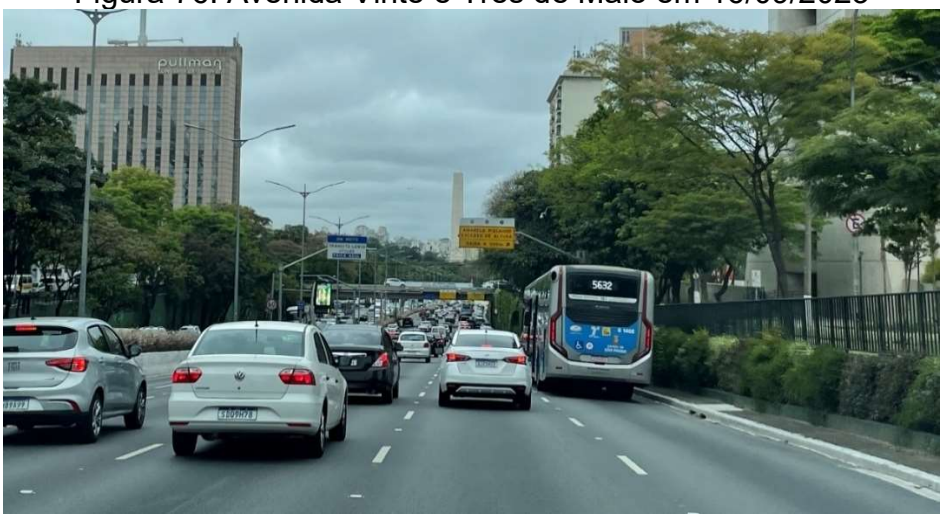
O Complexo Viário Ayrton Senna é composto por duas galerias:

- Túnel Ayrton Senna I, sentido único para o bairro, faz a ligação entre as avenidas 23 de Maio e Antônio Joaquim de Moura Andrade.
- Túnel Ayrton Senna II, sentido único para o centro, liga a Avenida Antônio Joaquim de Moura Andrade à Rua Sena Madureira/Avenida Professor Ascendino Reis.

Os túneis possuem sistema de ventilação transversal e estão localizados no distrito do Itaim Bibi, que possui densidade demográfica de 9.351 hab/km^2.

Segundo dados da CET, a Avenida Vinte e Três de Maio, no trecho do Viaduto Tutóia, é a via mais carregada da cidade de São Paulo na hora pico da manhã, com 10.199 veículos, e na hora pico da tarde, com 8.844 veículos. A Figura 76 demonstra o tráfego de veículos nesta região.

Figura 76: Avenida Vinte e Três de Maio em 16/09/2023

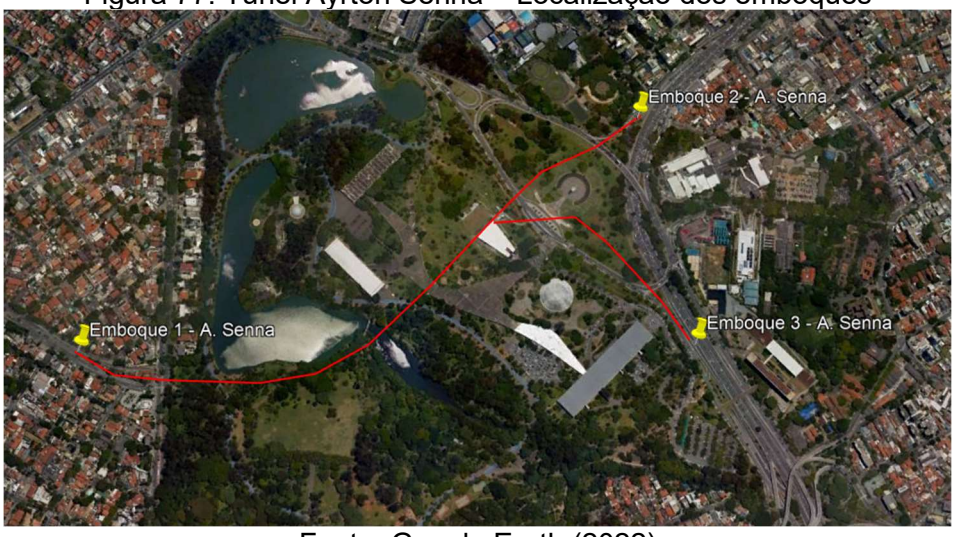


Fonte: Autora (2023)

O túnel possui 3 emboques, apresentados na Figura 77, descritos a seguir:

- Túnel Ayrton Senna I - Emboque 1A – com 2 faixas de rolamento e sentido unidirecional de veículos, sentido Avenida Antônio Joaquim de Moura Andrade à Avenida 23 de Maio
- Túnel Ayrton Senna I - Emboque 1B – com 2 faixas de rolamento e sentido unidirecional de veículos, Avenida Antônio Joaquim de Moura Andrade à Avenida Professor Ascendino Reis.
- Túnel Ayrton Senna I - Emboque 2 – com 2 faixas de rolamento e sentido unidirecional de veículos, Avenida 23 de Maio
- Túnel Ayrton Senna II - Emboque 3 – com 2 faixas de rolamento e sentido unidirecional de veículos, sentido Avenida Professor Ascendino Reis.

Figura 77: Túnel Ayrton Senna – Localização dos emboques



Fonte: Google Earth (2022)

Foram realizadas 7 leituras de monóxido de carbono no Complexo Viário Ayrton Senna, em cada um dos emboques: 1 leitura em agosto/2023, 2 leituras em setembro/2023, 1 em outubro/2023 e 3 leituras em novembro/2023. Os resultados obtidos foram registrados nas Tabelas 66, 67, 68 a 69.

Tabela 66: Leituras no Túnel Ayrton Senna – Emboque 1A

Dia/Mês/Ano	Leitura realizada no P1 (ppm)	Leitura realizada no P2 (ppm)	Leitura realizada no P1 (ppm)
22/08/2023	0	0	0
16/09/2023	0	0	0
29/09/2023	0	0	0
02/10/2023	0	0	0
15/11/2023	0	0	0
17/11/2023 (dia)	0	0	0
17/11/2023 (noite)	0	0	0

Fonte: Autora (2023)

Tabela 67: Leituras no Túnel Ayrton Senna – Emboque 1B

Dia/Mês/Ano	Leitura realizada no P1 (ppm)	Leitura realizada no P2 (ppm)	Leitura realizada no P1 (ppm)
22/08/2023	5	3	2
16/09/2023	3	1	1
29/09/2023	6	3	1
02/10/2023	4	3	3
15/11/2023	0	0	0
17/11/2023 (dia)	2	0	0
17/11/2023 (noite)	4	0	0

Fonte: Autora (2023)

Tabela 68: Leituras no Túnel Ayrton Senna – Emboque 2

Dia/Mês/Ano	Leitura realizada no P1 (ppm)	Leitura realizada no P2 (ppm)	Leitura realizada no P1 (ppm)
22/08/2023	0	0	0
16/09/2023	0	0	0
29/09/2023	0	0	0
02/10/2023	0	0	0
15/11/2023	0	0	0
17/11/2023 (dia)	0	0	0
17/11/2023 (noite)	0	0	0

Fonte: Autora (2023)

Tabela 69: Leituras no Túnel Ayrton Senna – Emboque 3

Dia/Mês/Ano	Leitura realizada no P1 (ppm)	Leitura realizada no P2 (ppm)	Leitura realizada no P1 (ppm)
22/08/2023	3	2	0
16/09/2023	0	0	0
29/09/2023	3	2	0
02/10/2023	2	0	0
15/11/2023	0	0	0
17/11/2023 (dia)	2	0	0
17/11/2023 (noite)	3	0	0

Fonte: Autora (2023)

Os emboques 1A e 2, Tabelas 62 e 64, representam o fluxo de entrada de veículos. O emboque 1B e 3, Tabelas 63 e 65, representam o fluxo de saída de veículos. O emboque 1 B não possui retenção semafórica próxima, porém representa o fluxo de veículos proveniente da Avenida Vinte e Três de Maio, ou seja, a via mais carregada da cidade de São Paulo na hora pico da manhã e da tarde.

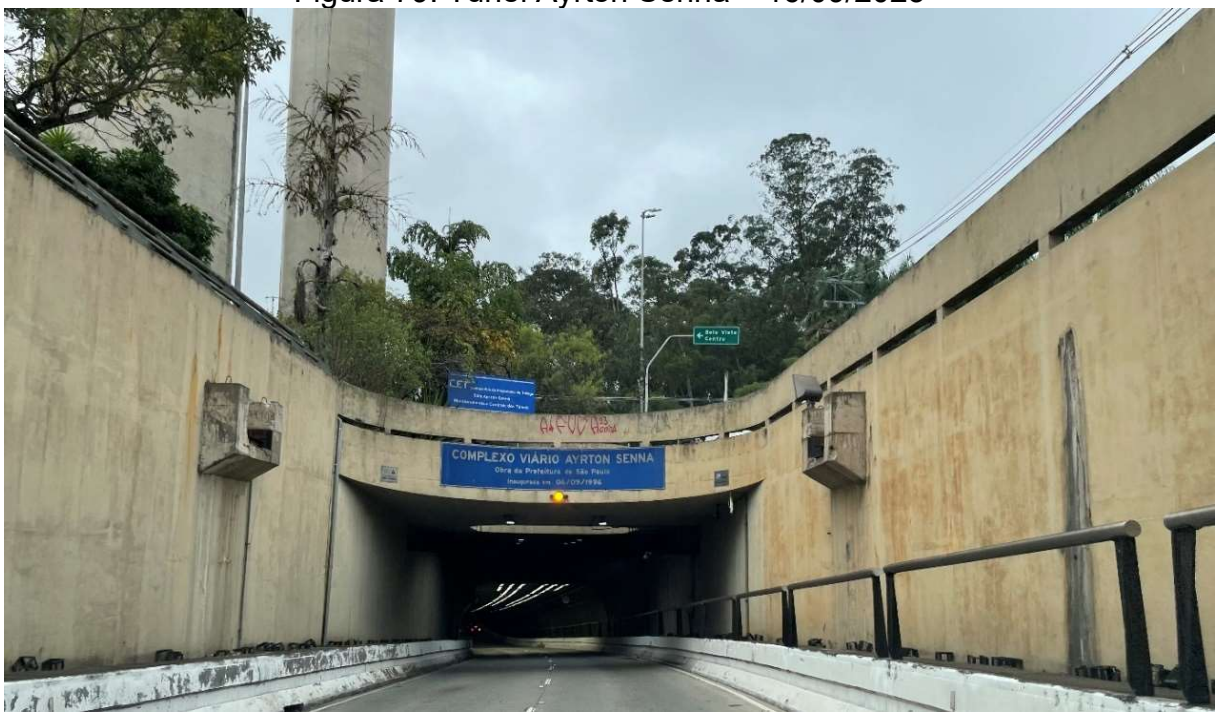
De acordo com Fiedrich (1999), o fluxo de ar constante no túnel, que é causado pelo efeito pistão dos veículos, tem influência direta sobre os fatores de emissões dos poluentes. Em geral, a emissão de monóxido de carbono diminui em 40% quando da vazão de ar constante.

Figura 78: Túnel Ayrton Senna – 16/09/2023



Fonte: Autora (2023)

Figura 79: Túnel Ayrton Senna – 16/09/2023



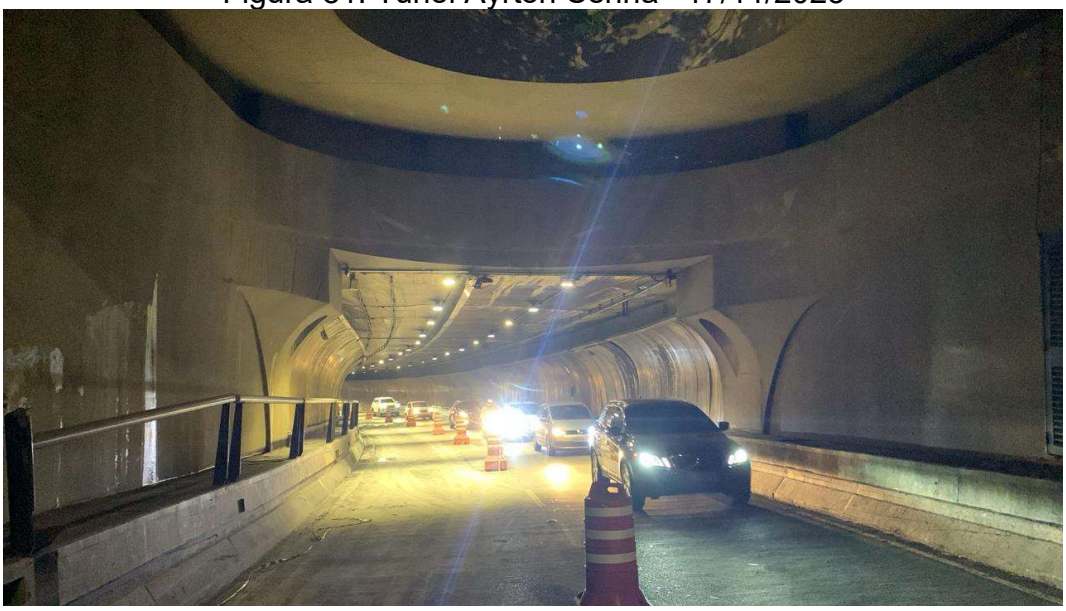
Fonte: Autora (2023)

Figura 80: Túnel Ayrton Senna –17/11/2023



Fonte: Autora (2023)

Figura 81: Túnel Ayrton Senna –17/11/2023



Fonte: Autora (2023)

Nos momentos de realização das leituras n Túnel Ayrton Senna, as leituras de monóxido de carbono chegaram no valor máximo de 6 ppm, no emboque 1B, podendo a qualidade do ar ser classificada como boa segundo o parâmetro da CETESB.

5.3.6. Passagem subterrânea Presidente Roosevelt

A passagem subterrânea Presidente Roosevelt está localizada no distrito de República, com densidade demográfica de 26.715hab/km^2. Ela é desprovida de sistema de ventilação, seu gabarito vertical de 4,40m inviabiliza a instalação de jatos ventiladores.

Na passagem subterrânea Presidente Roosevelt o tráfego é intenso, considerando que é a via da cidade de São Paulo que conecta a Radial Leste ao Elevado Presidente João Goulart (Minhocão), ou seja, sendo uma das conexões que formam o Corredor Leste-Oeste.

Atualmente, a passagem subterrânea é carente de iluminação e o local serve como abrigo para moradores de rua e usuários de drogas. Segundo a Prefeitura da Cidade de São Paulo, a região sofre com recorrentes e constantes registros de furto de cabos. A passagem subterrânea possui 4 emboques, apresentados na Figura 82, descritos a seguir:

- Emboque 1 – provido de 2 faixas de rolamento, com sentido unidirecional de veículos, com acesso à passagem subterrânea pela Rua da Consolação.
- Emboque 2 – provido de 8 faixas de rolamento, sendo: 4 faixas com sentido bidirecional de veículos, como acesso à Rua Amaral Gurgel; 4 faixas com sentido bidirecional de veículos, como acesso ao Elevado João Goulart (Minhocão).
- Emboque 3 – provido de 8 faixas de rolamento, com sentido bidirecional de veículos, como aceso à Radial Leste.
- Emboque 4 – provido de 3 faixas de rolamento, com sentido unidirecional para saída de veículos e acesso à Praça Presidente Roosevelt.

Foram realizadas 10 leituras de monóxido de carbono na passagem subterrânea Presidente Roosevelt: 1 leitura no mês de julho, 3 leituras em agosto/2023, 2 leituras em setembro/2023, 1 em outubro/2023 e 3 leituras em novembro/2023. Os resultados obtidos foram registrados nas Tabelas 70, 71, 72 e 73.

Figura 82: Passagem Presidente Roosevelt – Localização dos Emboques



Fonte: Google Earth (2023)

Tabela 70: Leituras na Passagem Presidente Roosevelt – Emboque 1

Dia/Mês/Ano	Leitura realizada no P1 (ppm)	Leitura realizada no P2 (ppm)	Leitura realizada no P1 (ppm)
29/07/2023	0	0	0
10/08/2023	0	0	0
15/08/2023	0	0	0
22/08/2023	0	0	0
16/09/2023	0	0	0
29/09/2023	0	0	0
02/10/2023	0	0	0
15/11/2023	0	0	0
17/11/2023	0	0	0
17/11/2023*	0	0	0

Fonte: Autora (2023)

Figura 83: Emboque 1 - Passagem Presidente Roosevelt em 17/11/2023



Fonte: Autora (2023)

Tabela 71: Leituras no Passagem Presidente Roosevelt – Emboque 2

Dia/Mês/Ano	Leitura realizada no P1 (ppm)	Leitura realizada no P2 (ppm)	Leitura realizada no P1 (ppm)
29/07/2023	-	-	-
10/08/2023	5	4	3
15/08/2023	6	4	3
22/08/2023	8	4	4
16/09/2023	8	4	3
29/09/2023	7	4	2
02/10/2023	5	2	0
15/11/2023	0	0	0
17/11/2023	2	0	0
17/11/2023*	3	0	0

Fonte: Autora (2023)

Não foram realizadas leituras no Emboque 2 (saída para o Elevado João Goulart) no dia 29/07/2023, pois o Elevado Presidente João Goulart tem funcionamento restrito, de segunda a sexta, das 7:00 às 20:00. A saída de veículos fica condicionada ao Emboque 4, o que reflete o engarrafamento registrado nas Figuras 84 e 88 e valor de monóxido de carbono de 171 ppm e 177 ppm.

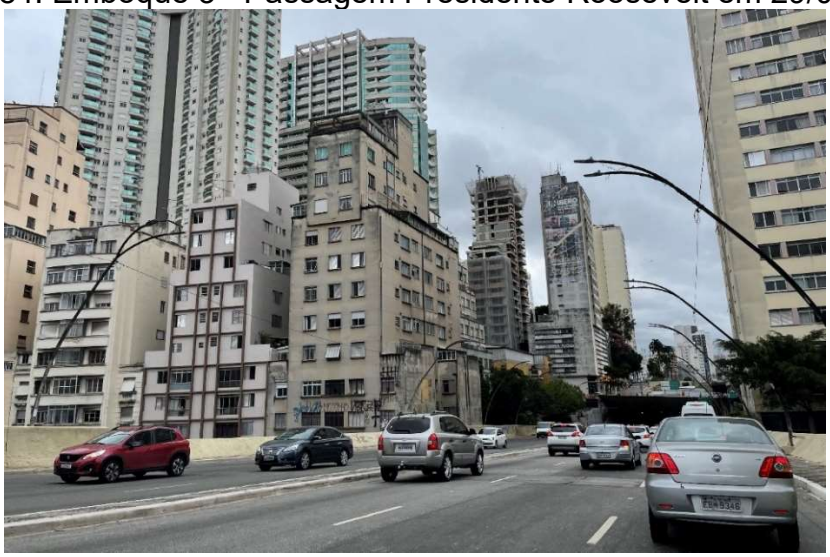
Tabela 72: Leituras na Passagem Presidente Roosevelt – Emboque 3

Dia/Mês/Ano	Leitura realizada no P1 (ppm)	Leitura realizada no P2 (ppm)	Leitura realizada no P1 (ppm)
29/07/2023	8	8	8
10/08/2023	8	8	6
15/08/2023	8	7	5
22/08/2023	9	4	2
16/09/2023	9	6	5
29/09/2023	8	7	6
02/10/2023	8	9	7
15/11/2023	0	0	0
17/11/2023	0	0	0
17/11/2023*	0	0	0

Fonte: Autora (2023)

A passagem Presidente Roosevelt possui tráfego em dois sentidos, configurado em galeria única. Com esta configuração, a exaustão e ventilação são prejudicadas, pois há a recirculação do movimento do ar em função do sentido do tráfego dos veículos, como se ilustra nas Figuras 84 e 85 e nas leituras realizadas dos emboques 2 e 3, registradas nas Tabelas 67 e 68.

Figura 84: Emboque 3 - Passagem Presidente Roosevelt em 29/07/2023



Fonte: Autora (2023)

Figura 85: Emboque 2 - Passagem Presidente Roosevelt em 10/08/2023



Fonte: Autora (2023)

O Elevado Presidente João Goulart tem funcionamento restrito, de segunda a sexta, das 7:00 às 20:00. O que redireciona o fluxo de saída de veículos pelo acesso pela Praça Presidente Roosevelt, ou seja, pelo Emboque 4.

Tabela 73: Leituras na Passagem Presidente Roosevelt – Emboque 4

Dia/Mês/Ano	Leitura realizada no P1 (ppm)	Leitura realizada no P2 (ppm)	Leitura realizada no P1 (ppm)
29/07/2023	177	177	171
10/08/2023	-	-	-
15/08/2023	-	-	-
22/08/2023	135	122	90
16/09/2023	168	150	145
29/09/2023	135	122	90
02/10/2023	90	87	82
15/11/2023	8	8	0
17/11/2023	16	16	6
17/11/2023*	14	14	14

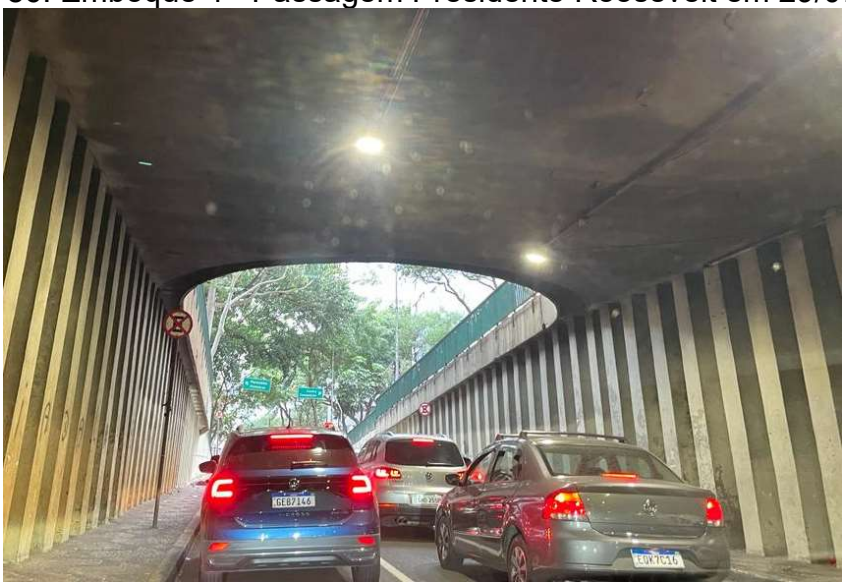
Fonte: Autora (2023)

O sistema de monitoramento da CETESB define a qualidade do ar por meio dos índices de monóxido de carbono como boa, quando compreendida entre 0 e 9 ppm; como moderada, entre 9 e 11 ppm; como ruim, entre 11 e 13 ppm; como muito

ruim, entre 13 a 15 ppm; como péssima, quando maior que 15 ppm.Nos momentos de realização das leituras na Passagem subterrânea Presidente Roosevelt, as leituras de monóxido de carbono chegaram ao valor máximo de 8 ppm no emboque 2, 9 ppm no emboque 3 e 177 ppm no emboque 4.

Seguindo a norma OSHAS 18001, o teor de monóxido de carbono da atmosfera em uma sala, edifício, veículo, vagão ou qualquer espaço fechado deve ser mantido a não mais de 50 partes por milhão (ppm) (0,0039%), como um nível de exposição média de oito horas. Esta norma estabelece que empregados devem ser removidos do espaço fechado, se a concentração de monóxido de carbono exceder um limite máximo de 100 ppm (0,01%).

Figura 86: Emboque 4 - Passagem Presidente Roosevelt em 29/07/2023



Fonte: Autora (2023)

Figura 87: Emboque 4 - Passagem Presidente Roosevelt em 17/11/2023



Fonte: Autora (2023)

Observa-se, em campo, que a condição topográfica da passagem subterrânea Presidente Roosevelt desfavorece a dispersão de poluente, pois denota-se um desnível da passagem em relação ao entorno. A passagem encontra-se numa cota inferior ao sistema viário adjacente.

Um semáforo está localizado a menos de 300m do emboque 4 da Presidente Roosevelt, o que provoca uma retenção veicular e, consequentemente, os maiores valores de monóxido de carbono do túnel, como ilustra-se na Figura 88.

Figura 88: Emboque 4 - Passagem Presidente Roosevelt



Fonte: Google Earth (2023)

Em Guanajuato, México, foram monitoradas as concentrações de CO, a velocidade do vento e o número de veículos em três túneis de pista simples, com tráfego constante de pedestres: Los Ángeles, Galereña e Barretero. As concentrações de CO foram medidas usando-se um aparelho portátil de radiação infravermelha não dispersiva (NDIR) (ALTAIR Pro Single-Gas Detector). O estudo foi realizado em outubro de 2019, todos os sete dias da semana, mas não consecutivos, em um horário entre 13:00 e 14:00. Esse horário corresponde à hora do almoço e ao término do horário escolar. O número de veículos e pedestres que entraram nos túneis foi estimado por observação visual durante o monitoramento. Os túneis Los Ángeles, Galereña e Barretero apresentaram concentrações médias mais altas de CO: 17, 21 e 18 ppm, respectivamente, e as máximas correspondentes de 67, 47 e 25 ppm,

respectivamente. O estudo realizado em túneis em Guanajuato, México, concluiu que as concentrações dos poluentes investigados variaram dentro dos túneis e aumentaram em direção às saídas (Molina *et al.*, 2021).

Observa-se que, o emboque 4 da passagem subterrânea Presidente Roosevelt apresentou valores superiores de monóxido de carbono do que os túneis Los Ángeles, Galereña e Barretero, em Guanajuato, México.

6. CONCLUSÃO

O tráfego de veículos é uma das fontes mais significativas de poluentes atmosféricos primários no mundo industrializado. Na cidade de São Paulo, o trânsito de veículos automotores é o principal responsável pelo lançamento de poluentes em função do processo de queima dos combustíveis. Em São Paulo, apesar de haver incentivos ao uso do transporte público em detrimento ao transporte individual, cada vez mais as aglomerações urbanas veem o aumento da frota de veículos privados. Neste contexto, este trabalho teve como objetivo demonstrar que os níveis de monóxido de carbono, nos emboques dos túneis da cidade de São Paulo, podem ser prejudiciais à saúde da população circunvizinha.

A partir do objetivo específico de caracterizar os túneis localizados na cidade de São Paulo, foi possível concluir que:

- O distrito de Itaim Bibi concentra a maior quantidade de túneis da cidade de São Paulo (6 túneis): Túnel Sebastião Camargo (1.170 m), Túnel Jânio Quadros (1.900 m), Túnel Ayrton Senna (1.700 m e 1.950 m), Túnel Tribunal de Justiça (824 m), Túnel Max Feffer (756 m) e Túnel Takeharu Akagawa (393 m).
- O distrito com a maior densidade demográfica da cidade, Bela Vista, com 26.715 hab/km^2, possui a Passagem subterrânea Presidente Roosevelt, com 1.120 m;
- A Passagem subterrânea Presidente Roosevelt, com 1.120 m, não possui sistema de ventilação;
- O distrito com a segunda maior densidade demográfica da cidade, República, com 24.774 hab/km^2, possui três túneis: Túnel Nove de Julho (1.060 m), Túnel Papa João Paulo II (582 m e 544 m) e Passagem subterrânea Tom Jobim (329 m);
- Os túneis com sistemas de ventilação mais modernos estão concentrados no distrito do Itaim Bibi: Túnel Sebastião Camargo (1.170 m), Túnel Jânio Quadros (1.900 m) e Túnel Ayrton Senna (1.700 m e 1.950 m).

Outro objetivo específico foi analisar os níveis de poluentes monitorados pela CETESB, não sendo observada uma correlação da localização dos pontos de monitoramento da qualidade do ar, de responsabilidade da CETESB - Companhia

Ambiental do Estado de São Paulo, com a localização dos túneis da cidade de São Paulo.

Estabelecer mais pontos de monitoramento da qualidade do ar na cidade de São Paulo pode proporcionar um banco de dados de emissões de poluentes que seja útil para avaliar estratégias de controle de tráfego e alternativas de logística. A exemplo da passagem subterrânea Presidente Roosevelt, que tem a saída para o Elevado Presidente João Goulart fechada aos finais de semana, fazendo que a saída de veículos fique condicionada ao Emboque 4, o que gera engarrafamento e os valores de monóxido de carbono registrados.

Outrossim, este trabalho realizou medições de monóxido de carbono nos emboques dos 6 túneis com mais de 1.000 m de comprimento, localizados na cidade de São Paulo. Por meio das leituras realizadas entre julho e novembro de 2023, foi possível concluir que:

- Os túneis que estão numa cota inferior ao sistema viário adjacente denotam a presença de monóxido de carbono nos emboques com fluxo de saída de veículos: Presidente Roosevelt (2 a 177 ppm), Complexo Ayrton Senna (1 a 6 ppm), Sebastião Camargo (2 a 6 ppm) e Jânio Quadros (2 a 8 ppm);
- Os emboques que atuam como fluxo de entrada de veículos não apresentaram nível detectável de monóxido de carbono nos momentos de realização das medições;
- A ocorrência de retenção semafórica colabora para a presença de monóxido de carbono nos emboque dos túneis, como no caso dos túneis: Presidente Roosevelt (2 a 177 ppm), Sebastião Camargo (2 a 6 ppm) e Jânio Quadros (2 a 8 ppm);
- Quando o emboque do túnel possui o mesmo perfil altimétrico do túnel, ou seja, quando não há diferença de greide, não foi encontrado nível detectável de monóxido de carbono nos momentos de realização das medições: Túnel Nove de Julho e Túnel Maria Maluf.

Segundo a CESTEB, a qualidade do ar nas proximidades dos túneis Sebastião Camargo e o Jânio Quadros é classificada como boa, por estar compreendida entre (0 e 9 ppm). Entretanto, na Passagem Presidente Roosevelt é classificada como péssima (2 a 177 ppm). A Tabela 74 apresenta um resumo da avalição dos túneis segundo critério da CESTESB.

Tabela 74: Avaliação dos túneis segundo critério da CETESB

Túnel	Maior leitura registrada (ppm)	Avaliação CETESB
Túnel Nove Julho	0	Boa
Túnel Maria Maluf	0	Boa
Túnel Jânio Quadros	8	Boa
Túnel Sebastião Camargo	6	Boa
Túnel Ayrton Senna	6	Boa
Passagem Presid. Rossevelt	177	Péssima

Fonte: Autora (2024)

Segundo a norma OSHAS 1800, os valores encontrados na Passagem Presidente Rossevelt, obrigariam a remoção das pessoas do local, por exceder o limite máximo de 100 ppm. Demonstrando que os níveis de monóxido de carbono encontrados, podem ser prejudiciais à saúde da população circunvizinha.

Por outra perspectiva, as pessoas que circulam no entorno dos túneis Jânio Quadros, Sebastião Camargo e Ayrton Senna estão continuamente expostos a valores baixos de monóxido de carbono, desta forma, a exposição por longos períodos ao monóxido de carbono, também pode ocasionar efeitos tóxicos.

Como base nas conclusões apresentadas neste trabalho, são apresentadas as seguintes sugestões de melhorias no ambiente urbano próximo aos túneis:

- Implantação de sistema de ventilação na Passagem subterrânea Presidente Roosevelt;
- Retirada das retenções semafóricas próximas aos emboques de túneis com fluxo de saída de veículos: Presidente Roosevelt, Sebastião Camargo e Jânio Quadros;
- Instalação de sensor para medição de monóxido de carbono e outros poluentes, em um raio de até 5 m do emboque dos túneis: Presidente Roosevelt, Complexo Ayrton Senna, Sebastião Camargo e Jânio Quadros;
- Compartilhamento de dados dos sensores dos emboques dos túneis com a rede de monitoramento automático da CETESB;
- Instalação de painel de mensagem variável, próximo ao emboque dos túneis, comunicando a população circunvizinha sobre a qualidade do ar;
- Aplicação de procedimento de retenção de tráfego quando níveis de alerta forem atingidos.

Um fator relevante a ser registrado neste trabalho é a presença de moradores de rua no interior e no entorno dos emboques da Presidente Roosevelt. Recomenda-se a reabilitação e a retirada dos moradores deste local.

As normativas do Brasil e de outros países são aplicadas aos túneis na forma de um conjunto mínimo de requisitos de segurança a serem implantados. A compilação do conhecimento aplicado às normas técnicas exige pesquisas de longo prazo, incluindo situações excepcionais, como acidentes ou incêndios. Neste sentido, este trabalho propõe que a aplicação de requisitos mínimos com vistas ao controle e monitoramento ambiental seja inclusa nas normas técnicas. Outrossim, cada túnel é uma construção individual com condições individuais. Isso implica que o uso de uma norma comum para implementar sistemas operacionais para um túnel arbitrário introduz deficiências à construção e ao controle operacional.

Muitas cidades ao redor do mundo buscam ampliar a importância das responsabilidades sociais e ambientais nos grandes centros urbanos. Qualquer movimento a favor de um desenvolvimento equilibrado é capaz de gerar um ambiente saudável para seus habitantes. Este trabalho demonstrou que os níveis de monóxido de carbono, nos emboques dos túneis da cidade de São Paulo, podem ser prejudiciais à saúde da população circunvizinha, considerando que sua exposição prolongada pode ocasionar efeitos tóxicos continuados. No Brasil, a poluição do ar agrega um custo econômico, devido aos seus impactos na saúde pública. Com intervenções em curto e médio prazo, pode-se melhorar significativamente a qualidade do ar urbano.

7. REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Proteção contra incêndio – Túneis urbanos existentes – Requisitos de revitalização. NBR 16.980**, Rio de Janeiro, 2021.

_____. **Sistemas de iluminação de túneis. NBR 5.181**, Rio de Janeiro, 2013

_____. **Proteção contra incêndio em túneis. NBR 15.661**, Rio de Janeiro, 2009.

_____. **Sistemas de segurança contra incêndio em túneis – Ensaios, comissionamento e inspeções. NBR 15.775**, Rio de Janeiro, 2009.

_____. **Sistemas de segurança contra incêndio em túneis – Sistemas de sinalização e de comunicação de emergência em túneis. NBR 15.981**, Rio de Janeiro, 2019.

_____. **Sistemas de detecção e alarme de incêndio – Projeto, instalação, comissionamento e manutenção de sistemas de detecção e alarme de incêndio – Requisitos. NBR 17.240**, Rio de Janeiro, 2010.

_____. **Sistemas de sinalização de emergência – Projeto, requisitos e métodos de ensaios. NBR 16.820**, Rio de Janeiro, 2022.

_____. **Proteção contra incêndio em túneis rodoviários e urbanos – Operação de emergência em túneis rodoviários e urbanos – Requisitos. NBR 16.736**, Rio de Janeiro, 2004.

BARBOSA, Pedro Filipe Moreira. **Avaliação do risco em túneis rodoviários extensos maciços rochosos**. 2008. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2008.

BELLASIO, Roberto. **Modeling traffic air pollution in road tunnels**. Atmospheric Environment. Elsevier, 31, 1539–1551, 1997

BRASIL, **Lei nº 6.938 de 31 de agosto de 1981**. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Brasília, DF, 1981

_____. **Lei nº 8.723 de 28 de outubro de 1993**. Dispõe sobre a redução de emissão de poluentes por veículos automotores e dá outras providências. Brasília, DF, 1993

CARVALHO, Carlos Henrique Ribeiro. **Emissões relativas de poluentes do transporte motorizado de passageiros nos grandes centros urbanos brasileiros**. Texto para Discussão, No. 1606. Institute of Applied Economic Research (ipea), Brasília, 2011

CEPDEC. Coordenadoria Estadual de Proteção e Defesa Civil. Previsão do Tempo: Dados Observados 2020. Disponível em: http://www.defesacivil.sp.gov.br/previsao-do-tempo/. Acesso em: 15 de ago. 2023.

CET – Companhia de Engenharia de Tráfego. **Mobilidade no Sistema Viário Principal – Volumes e Velocidades**. São Paulo 2020.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, **Qualidade do Ar no Estado de São Paulo**. São Paulo, Governo do Estado de São Paulo, Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente do Estado de São Paulo, 2020

_____. **Boletim mensal da qualidade do ar para o Estado de São Paulo**. Ano 3, Número 8. São Paulo, Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente do Estado de São Paulo, 2022

_____. **Classificação expedita da representatividade espacial das estações de monitoramento da qualidade do ar da CETESB no Estado de São Paulo.** São Paulo, Governo do Estado de São Paulo, Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente do Estado de São Paulo, 2016

CLIMA TEMPO. StamGeo Company. Disponível em: https://www.climatempo.com.br/. Acesso em 14 de jan. 2024.

CHILD & ASSOCIATES, M5 East Free Way: **A Review of Emission Treatment, Techonologies, Systems & Applications**. [S.l.] NSW Roads and Traffic Authority. 15-46. 2004

COELHO, S. Z. S. M. **Uma análise estatística com vistas à previsibilidade de internações por doenças respiratórias em função de condições meteorotrópicas na cidade de São Paulo**. 2007. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

CONAMA – Comissão Nacional do Meio Ambiente, 1986. Resolução nº 018, 6 de maio de 1986. Ministério do Meio Ambiente, 1986.

_____. **Resolução nº 003, 28 de junho de 1990**. Ministério do Meio Ambiente, 1990.

_____. **Resolução nº 005, 5 de agosto de 1990**. Ministério do Meio Ambiente, 1993.

_____. **Resolução nº 297, 26 de fevereiro de 2002**. Ministério do Meio Ambiente, 1993.

_____. **Resolução nº 490, 16 de novembro de 2018a**. Ministério do Meio Ambiente, 2018.

_____. **Resolução nº 491, 19 de novembro de 2018b**. Ministério do Meio Ambiente, 2018.

_____. **Resolução nº 492, 20 de dezembro de 2018c**. Ministério do Meio Ambiente, 2018.

_____. **Resolução nº 493, 24 de junho de 2019**. Ministério do Meio Ambiente, 2019.

DANNI-OLIVEIRA, Inês Moresco. **Poluição do ar como causa de morbidade e mortalidade da população urbana**. Revista RA´E GA, Curitiba, n. 15, p. 113-126, Editora UFPR, 2008.

EL-FADEL, Mutasen; HASHISHO, Zaher. **Vehicular Emissions in Roadway Tunnels: A Critical Review.** Journal of Critical Reviews in Environmental Science and Technology, Vol. 31, pp. 125–174, 2001.

EL SALAM, M.E.A. **Construction of underground works and tunnels in ancient Egypt. Tunnelling Underground Space**. Technol.Cairo, Egypt. 17, 295–304. 2002.

FIEDRICH, Christian John Rainer; STAEHELIN, Johannes; SCHLÄPFER, Kurt; STAHEL, Werner. **Comparison of emission factors for road traffic from a tunnel study (Gubrist tunnel, Switzerland) and from emission modeling**. Atmospheric Environment, Amsterdam, Elsevier, 33, 3367 – 3376. 1999.

EM-IAG-USP, Estação Meteorológica, Seção Técnica de Serviços Meteorológicos, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP. Disponível em: http://estacao.iag.usp.br/. Acesso em:12 de ago. 2023.

FENABRAVE – Federação Nacional da Distribuição de Veículos Automotores. Disponível em: https://www.fenabrave.org.br/. Acesso em: abr. 2024.

IBAMA – Instituto Brasileiro De Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Programa de Controle de Emissões Veiculares (Proconve). Data de atualização: 19 de agosto de 2021. Disponível em: http://ibama.gov.br/emissoes/veiculos-automotores/programa-de-controle-de-emissoes-veiculares-proconve. Acesso em: 15 de jun. 2022.

Instituto De Energia e Meio Ambiente. **1° Diagnóstico da rede de monitoramento da qualidade do ar no Brasil**. 2014.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/. Acesso em: 10 de ago. 2023

LEAL, Túlio Augusto Castelo Branco; CONSONI, Flávia Luciane. **Emissões poluentes dos veículos: impacto dos combustíveis utilizados e potencialidades da mobilidade elétrica.** Brasília: Núcleo de Estudos e Pesquisas/ CONLEG/Senado, Janeiro 2021 (Textos para Discussão nº293). Disponível em: <www.senado.leg.br/estudos>. Acessos em: 25 de maio 2023.

MARINELLO, Samuele; LOLLI, Francesco; GAMBERINI, Rita. Roadway tunnels: **A critical review of air pollutant concentrations and vehicular emissions**. Elsevier, Transportantion Research Part D, 86, 102478, 2020.

MORAES, Sara Lopes; ALMENDRA, Ricardo; SANTANA, Paula; GALVANI, Emerson. **Variáveis meteorológicas e poluição do ar e sua associação com internações respiratórias em crianças: estudo de caso em São Paulo.** Brasil. Cadernos de Saúde Pùblica, 2019.

MOLINA, Adrián Zamorategui; ORTEGA, Norma L. Gutiérrerz; VERA, Juan Carlos Baltazar; SOTO, Julio Del Ángel; TORRES, David Tirado. **Carbon Monoxide and Particulate Matter Concentrations inside the Road Tunnels of Guanajuato City, Mexico**. Aerosol and Air Quality Research. [S.l.], Volume 21. 2021

MOURA, Noberto Corrêa da Silva. **Segurança, eficiência energética e conforto visual em emboques de túneis rodoviários: soluções arquitetônicas**. 2007. 410 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Arquitetura, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2007

NFPA - National Fire Protection Association. **NFPA 502 – Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways**, 2001.

NHMRC - National Health and Medical Research Council. **Air Quality in and Around Traffic Tunnels.** Final Report. National Health and Medical Research Council. Australian Government. [S.l.], 2008

OLIVEIRA, Daniela Maria da Costa Santos. **Estudo da poluição do ar na envolvente de um túnel rodoviário.** 2020. 85 f. Tese (Doutorado em Engenharia do Ambiente), Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Coimbra, 2020.

OLIVEIRA, Rafael Lopes. **Avaliação da qualidade do ar no Rio de Janeiro: Maracanã, Floresta da Tijuca e Túnel Rebouças**. 2015. 154 f. Tese (Doutorado em Engenharia do Ambiente), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

Organização das Nações Unidas. **ONU-Habitat: população mundial será 68% urbana até 2050**. Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/188520-onu-habitat-populacao-mundial-sera-68-urbana-ate-2050. Acesso em: 25 de maio 2022.

OMS – ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD. **Las directrices sobre la calidad del aire en la protección de la salud publica: actualización mundial**. Nota descritiva, nº 313, outubro de 2006.

OSHA, Occupational Safety and Health Administration. **NIOSH recommendations to CO_2, VOCs and MP.** Disponível em: https://www.osha.gov/. Acesso em: 21 de abr. 2024.

PIARC (World Road Association). **Road tunnels: vehicle emissions and air demand for ventilation. Technical Commitee 5 Road Tunnels**. Paris, France. World Road Association. 2019

_____. Technical Commitee E.2 Environment. World Road Association. **Best practice guide to air quality in relation to road operations.** Paris, France. World Road Association. 2019

_____. Technical Commitee 5 Road Tunnels. **Cross Section Geometry in Unidirectional Road Tunnels**. Paris, France.World Road Association. 2001

_____. Technical Commitee C3.3 Road Tunnels **Operation. Risky Analysis For Road Tunnels**. Paris, France. World Road Association. 2008

PRIBYL, Pavel; PRIBYL, Ondrej. **Effect of tunnel technological systems on evacuation time.** Tunnelling and Underground Space Technology. Prague, Czech Repuplic, Chezc Technical University in Prague, Faculty of Transportation Sciences. 44, 88-96,2014.

SCABBIA, André Luiz Gonçalves. **Túneis Rodoviários: Proposta de avaliação de conformidade para liberação ao uso e operação comercial**. 2007. 197 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2007

SENATRAN – Secretaria Nacional de Trânsito. Disponível em: https://portalservicos.senatran.serpro.gov.br/. Acesso em 12 de abr. 2024

SANTOS, Dirceu; TICO, Nelson; LAGARINHOS, Carlos; CASTRO, Carlos Ferreira de; REIS, Nuno; MONTEIRO, Bernardo. **Túnel do Marão – Aspectos sobre segurança contra incêndio**. Revista Segurança. Portugal, 2016

SAO PAULO. **Decreto n° 59.113, de 23 de abril de 2013**. Estabelece novos padrões de qualidade do ar e dá providencias correlatas.

SONG, Iaocheng; ZHAOB, Yu. **Numerical investigation of airflow patterns and pollutant dispersions induced by a fleet of vehicles inside road tunnels using dynamic mesh part: Traffic wind evaluation**. Atmospheric Environment, Amsterdam, Elsevier, 212, 208 – 220, 2019.

SOUZA, Jean Carlo Trevizolo. **Proposta de diretrizes gerais para projeto de túneis rodoviários**. 2012. 248 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília-DF, 2012.

UNIÃO EUROPÉIA. Diretiva 2004/54/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 29 de abril de 2004.