



**Universidade do Estado do Rio de Janeiro**

Centro de Tecnologia e Ciências

Faculdade de Engenharia

James S. Miyamoto

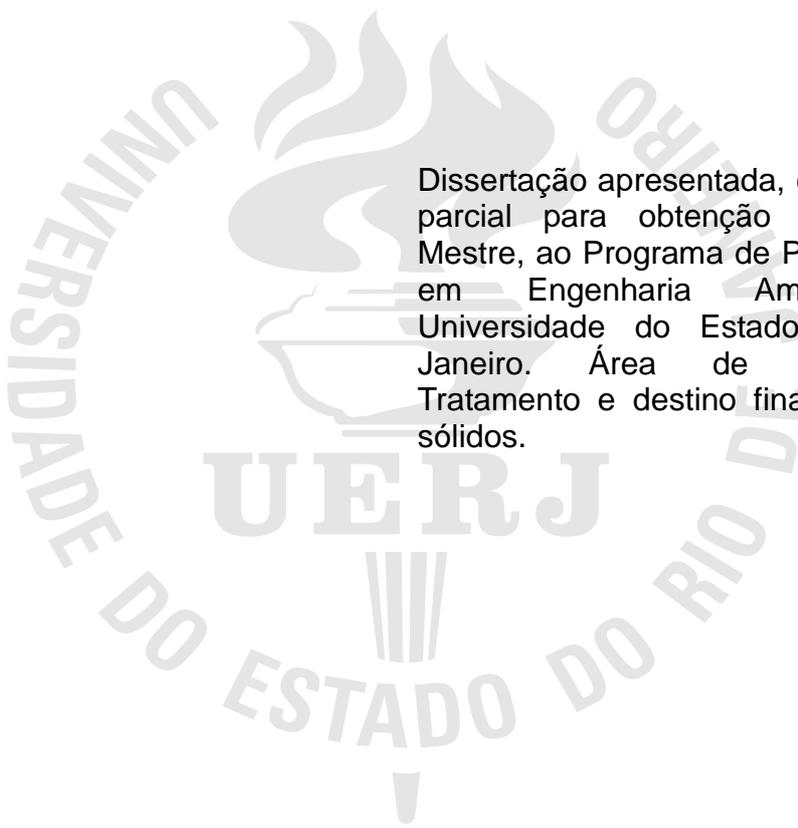
**Grandes túneis urbanos:  
uma proposta de gestão ambiental**

Rio de Janeiro

2010

James S. Miyamoto

**Grandes túneis urbanos:  
uma proposta de gestão ambiental**



Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Tratamento e destino final de resíduos sólidos.

Orientador: Prof. Dr. João Alberto Ferreira

Rio de Janeiro

2010

CATALOGAÇÃO NA FONTE  
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

M685 Miyamoto, James S.  
Grandes túneis urbanos: uma proposta de gestão ambiental /  
James S Miyamoto. - 2010.  
154 f.

Orientador: João Alberto Ferreira.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de  
Janeiro. Faculdade de Engenharia.

1. Túneis urbanos - Teses. 2. Engenharia Ambiental. I.  
Ferreira, João Alberto. II. Universidade do Estado do Rio de  
Janeiro. III. Título.

CDU 624.195

Autorizo, para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.

---

Assinatura

---

Data

James S. Miyamoto

**Grandes túneis urbanos: uma proposta de gestão ambiental**

Dissertação apresentada, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Tratamento e destino final de resíduos sólidos.

Aprovado em: 17 de dezembro de 2010.

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. João Alberto Ferreira (Orientador)  
Faculdade de Engenharia - UERJ

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Elisabeth Ritter  
Faculdade de Engenharia - UERJ

---

Prof. Dr. Jacques Sillos de Freitas  
Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro - Faculdade de  
Arquitetura e Urbanismo

Rio de Janeiro

2010

## DEDICATÓRIA

À Maria Candida Bentes Miyamoto, com todo amor e carinho.

## AGRADECIMENTOS

Aos colegas do PEAMB-UERJ, pela generosidade, em particular: Antonio Candeias, Carolina Andrade, Debora Aranha, Eduardo Gaiotto e Ubiratan Amorim.

Aos professores do PEAMB-UERJ, pelo profícuo aprendizado, em particular: prof. Celina Schmidt, prof. Elisabeth Ritter, prof. Gandhi Giordano e prof. Olavo Barbosa.

Ao amigo e orientador professor João Alberto Ferreira, por tudo: comprometimento, ensinamento, estímulo, incentivo, interesse e oportunidade.

À amiga Márcia Franco da Biblioteca da Engenharia pela gigantesca ajuda.

Ao prof. Josué Setta, por me apresentar a UERJ.

À UERJ, instituição pela qual sempre tive respeito, e que me acolheu de forma absoluta.

À Sra. Maria Thereza Wolff e Sr. Kurt Wolff pela atenção, receptividade e incentivo, quando eu ainda tateava o tema.

Ao prof. Jacques Sillos, pelas noções iniciais acerca do tema e o material disponibilizado.

Ao prof. José Barki, pela amizade e pelo *abstract*.

Ao prof. Ricardo Miranda Rodrigues, pelo material disponibilizado que, se inexistente, tornariam esta tarefa quase inalcançável.

Ao eng. Paulo Granato e ao Sr. José Antonio da Silva, pelas fundamentais informações fornecidas no âmbito do túnel Rebouças.

Ao amigo e prof. Luiz Claudio Franco, da UERJ, pelos contatos junto ao pessoal da LAMSA (Linha Amarela S.A.) e pela força de sempre.

Aos Srs. Roni Schonhosen, Marcelo Martins, Thiago Monteiro, Gustavo Albuquerque e José Carlos C. Caldas da LAMSA, pelas informações e a disponibilidade em esclarecer tantas dúvidas.

Ao eng. Annibal Espínola R. Coelho, pela amizade, orientação e acuidade das definições, baseadas em seus preciosos anos de experiência e enorme capacidade profissional.

À disponibilidade e interesse da banca: prof. D.Sc. João Alberto Ferreira, prof. D.Sc. Elisabeth Ritter e prof. D.Sc. Jacques Sillos.

Aos meus pais, por tudo na vida.

Àquela que continua sendo inspiração, companheira e desejo, Dely Bentes. Aliás, além dos agradecimentos, minhas desculpas pelo tempo que o estudo me (lhe) toma.

Àquela por quem pensar o mundo, em perspectiva de presente e futuro, ficou mais importante e prazeroso, Maria Candida Bentes Miyamoto.

## RESUMO

Miyamoto, James S. *Grandes túneis urbanos: uma proposta de gestão ambiental*. 2010. 154 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

Este estudo objetiva a sistematização do conhecimento, através de uma abordagem multidisciplinar, de forma a conformar uma proposta inicial de protocolo de gestão ocupacional e ambiental em grandes túneis urbanos em âmbito nacional. Há na presente pesquisa uma atenção particular aos túneis urbanos dedicados ao tráfego de veículos automotores, devido às suas características físico-espaciais que os tornam especialmente perigosos e tóxicos aos seus usuários e aos funcionários envolvidos. A relativa carência de material bibliográfico de caráter sistêmico e específico no Brasil enseja à busca por referências em documentos desenvolvidos em outros países. Ainda que em nível preliminar, a compilação crítica de dados, normas e referências pesquisadas, à luz do contexto e dos instrumentos normativos brasileiros referentes ao tema, traduz-se no aspecto original desta proposta dissertativa, a ser possivelmente utilizada como ponto de partida para estudos mais extensos. São abordadas as seguintes disciplinas relativas ao objeto de pesquisa: a) Características físico-espaciais; b) Formas de uso; c) Sistema de ventilação e exaustão; d) Sistema de iluminação; e) Sistema de segurança contra sinistros e incêndio; f) Sistema de fiscalização e orientação de tráfego, comunicação e sinalização; g) Sistema de drenagem; h) Sistema de gerenciamento de resíduos sólidos. O túnel Rebouças (1962-1965) e o túnel Engenheiro Raymundo de Paula Soares (Linha Amarela) (1997), distanciados por mais de três décadas, foram escolhidos como estudos de caso, não tão somente devido aos seus portes, fluxos intensos de veículos etc., mas também devido aos contextos das evoluções normativas em que se inserem.

Palavras-chave: Grandes túneis urbanos. Gestão ambiental. Qualidade da forma urbana. Urbanismo.

## ABSTRACT

Aiming to establish an initial proposal for an environmental and operational management protocol for large urban tunnels, one that could be applied nationwide, this study also intends to systematize, through a multidisciplinary approach, the state of the art on the subject. In this survey it will be given particular attention to vehicular urban tunnels. Due to its physical and spatial characteristics they are especially dangerous and toxic to both their users and employees involved in maintenance. Given the lack of systematic and specific bibliographic material in Brazil it was necessary to inquire about references, studies and investigations developed in other countries. A critical compilation of such data, standards and benchmarks, while in its initial level, considering the Brazilian context and the actual legal instruments, may reflect the original feature of this essay. It is hoped that the results can be used as a starting point for other extensive studies. Considering the main focus of this research, the following topics are discussed: a) physical and spatial characteristics; b) usage and operation; c) ventilation and exhaust system; d) lighting system; e) accidents prevention, security and fire protection system; f) management, traffic supervision, communication and signaling system; g) drainage system; h) solid waste management system. The two tunnels, *Rebouças* (1962-1965) and *Engenheiro Raymundo de Paula Soares (Linha Amarela)* (1997), both located in Rio de Janeiro and more than three decades apart, were selected as case studies, not only because of their size, intensity of flows etc., but also because of the changing normative contexts in which they operate.

Keywords: Large urban tunnels. Environmental management. Good city form. Urbanism.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Da Vinci .....	15
Figura 2 - Hernard .....	15
Figura 3 - San't Elia .....	15
Figura 4 - Demanda de espaço para um túnel-tipo de duas faixas mínimo (a) e desejável (b) .....	31
Figura 5 - Corte transversal de um típico túnel rodoviário de duas pistas .....	33
Figura 6 - Túnel circular, circular com duas células e túneis curvos.....	35
Figura 7 - Sistema de ventilação e exaustão.....	60
Figura 8 - Uma visão geral de um estudo investigativo sobre um sistema de detecção de incêndio em túneis automotivos internacionais.....	82
Figura 9 - Localização do túnel Rebouças .....	104
Figura 10 - Localização do túnel Eng. Raymundo de Paula Soares.....	105
Figura 11 - Túnel Rebouças .....	106
Figura 12 - Corte vertical Rio Comprido-Cosme Velho, Lagoa-Cosme Velho .....	109
Figura 13 - Fiação existente (desprotegida) no túnel Rebouças .....	109
Figura 14 - Calhas do sistema de drenagem da pista .....	120
Figura 15 - Amostra dos resíduos sólidos encontrados nas calhas.....	121
Figura 16 - Túnel Eng. Raymundo de Paula Soares: Jacarepaguá-Encantado ...	123
Figura 17 - Sinalização no túnel Eng. Raymundo de Paula Soares .....	125
Figura 18 - Túnel Engenheiro Raymundo de Paula Soares - <i>call-boxes</i> .....	126
Figura 19 - Túnel engenheiro Raymundo de Paula Soares – Emboque (saída) ..	128

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Gráfico 1 - Classificação do túnel, em função do fluxo e do comprimento.....	29
Gráfico 2 - Concentração de CO no túnel Rebouças ao longo do dia .....	62
Gráfico 3 - Velocidade média dos veículos, ao longo do dia, no túnel Rebouças..	63
Gráfico 4 - Média do Volume de Trânsito – 2002 a 2005.....	112
Gráfico 5 - Fluxo veicular estratificado – 2003 – dias corridos.....	113
Quadro 1 - Comparação entre instalações e procedimentos antes e depois do incêndio no túnel de Montblanc.....	92

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Referência de proteção em túneis – NFPA 502 (2008) .....	28
Tabela 2	- Características básicas do projeto geométrico do sistema arterial principal – via expressa primária, em túneis – DNIT (2010) .....	37
Tabela 3	- Limites de ruído para os veículos novos .....	46
Tabela 4	- Limites de ruído para motocicletas e similares.....	46
Tabela 5	- Média de pico de densidade de tráfego (pcu/km) - Fluxo de tráfego (pcu/km) por faixa de rolamento.....	49
Tabela 6	- Parâmetros gerais - CONAMA no 03/90 .....	54
Tabela 7	- Fatores de emissão (FE) referenciados aos veículos pesados e veículos leves nos túneis Janio Quadros e Maria Maluf.....	66
Tabela 8	- Zona de aproximação e de entrada nos túneis para efeitos de iluminação .....	70
Tabela 9	- Conclusão da situação determinada pela NBR-5181/1976.....	72
Tabela 10	- Taxas de liberação de calor, em caso de incêndio.....	83
Tabela 11	- Resumo do Regulamento de Segurança – Decreto Estadual SP 46.076/2001 .....	89
Tabela 12	- Quantidade de poluentes depositados por veículo/dia – Túnel Rebouças .....	100
Tabela 13	- Monitoramento dos poluentes atmosféricos emitidos pela frota circulante – Túnel Rebouças.....	116
Tabela 14	- Sistema de ventilação – Túnel Eng. Raymundo de Paula Soares .....	127
Tabela 15	- Sistema de Iluminação - Túnel Eng. Raymundo de Paula Soares.....	129
Tabela 16	- Túneis Urbanos – <i>check-list</i> de conteúdos necessários.....	133

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AADT	<i>Anual Average Daily Traffic</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AFAC	<i>Australasian Fire Authorities Council</i>
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
CCO	Centro de Controle e Operação
CFTV	Circuito Fechado de Televisão
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
DAI	Detecção Automática de Incêndio
EPA	<i>Environmental Protection Agencies</i>
HAR	<i>Highway advisory radio</i> (Sistema de radio com informações em estradas)
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio-Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
INEA	Instituto Estadual do Ambiente
MTFVTP	<i>Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program</i>
MP <sub>10</sub>	Material particulado (10 µm, igual à 10 milésimos de milímetro)
NFPA	<i>National Fire Protection Association</i> (EUA)
PIARC	<i>Permanent International Association of Road Congress</i>
PCPH (PCH)	<i>Passenger cars per hour</i> (Carros de passeio por hora)
PPM	Partes por milhão
TRRF	Tempo requerido de resistência ao fogo
UN	<i>United Nations</i> (Organização das Nações Unidas - ONU)
WRA	<i>World Road Association</i>

## SUMÁRIO

	<b>INTRODUÇÃO</b>	15
1	<b>DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA</b>	26
1.1	<b>Características físico-espaciais</b>	27
1.1.1	<u>Extensão do túnel</u>	27
1.1.2	<u>Número de tubos</u>	29
1.1.3	<u>Número de galerias</u>	30
1.1.4	<u>Número de faixas</u>	31
1.1.5	<u>Largura das faixas</u>	33
1.1.6	<u>Altura do túnel</u>	36
1.1.7	<u>Alinhamento horizontal e vertical</u>	36
1.1.8	<u>Tipo de construção e dos materiais de acabamento</u>	38
1.1.9	<u>Existência de tráfego em um ou dois sentidos</u>	39
1.1.10	<u>Aclives ou declives, no interior do túnel</u>	40
1.1.11	<u>Características físicas das rodovias à montante e à jusante (ao túnel)</u>	40
1.1.12	<u>Características da sinalização das rodovias à montante, no interior e à jusante (ao túnel)</u>	41
1.1.13	<u>Existência de alternativas de rota de resgate, socorro e fuga, além de áreas de segurança para espera por socorro, dotada de instrumentos para a prevenção de acidentes e de intoxicação</u>	42
1.1.14	<u>Tempo estimado para atendimento ao sinistro</u>	43
1.2	<b>Formas de uso</b>	44
1.2.1	<u>Volume de tráfego por galeria por faixa de horário</u>	44
1.2.2	<u>Presença de veículos pesados (caminhões e ônibus) e motocicletas e suas consequências</u>	44
1.2.3	<u>Proteção contra ruídos</u>	44
1.3	<b>Sistema de ventilação e exaustão</b>	47
1.3.1	<u>Sistema de ventilação e exaustão – NBR-15661/2009</u>	55
1.3.2	<u>Sistema de ventilação e exaustão – NFPA 502 (2008)</u>	56
1.3.3	<u>Sistema de ventilação e exaustão - U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration</u>	59
1.3.4	<u>Sistema de ventilação e exaustão – Directiva 2004/54/CE do</u>	

	<u>Parlamento Europeu e do Conselho da União Européia</u> .....	61
1.3.5	<u>Discussão sobre sistema de ventilação e exaustão</u> .....	61
1.4	<b>Sistema de iluminação</b> .....	69
1.4.1	<u>Sistema de iluminação – NBR-5181/1976</u> .....	70
1.4.2	<u>Discussão sobre o sistema de iluminação</u> .....	71
1.5	<b>Sistema de fiscalização e orientação de tráfego, comunicação e sinalização</b> .....	73
1.5.1	<u>Sistema de fiscalização e orientação de tráfego, comunicação e sinalização – NBR-15661/2009</u> .....	73
1.5.2	<u>Sistema de fiscalização e orientação de tráfego, comunicação e sinalização – NFPA 502 (2008)</u> .....	75
1.5.3	<u>Sistema de fiscalização e orientação de tráfego, comunicação e sinalização – Fire Safety Guidelines for Road Tunnels (2001)</u> .....	76
1.5.4	<u>Discussão sobre o sistema de fiscalização e orientação de tráfego, comunicação e sinalização</u> .....	77
1.6	<b>Sistema de segurança contra sinistro e incêndio</b> .....	78
1.6.1	<u>Sistema de segurança contra sinistro e incêndio – NBR-15661/2009</u> ....	84
1.6.2	<u>Sistema de segurança contra sinistro e incêndio – Instrução técnica nº 35/2004</u> .....	88
1.6.3	<u>Sistema de segurança contra sinistro e incêndio – NFPA 502 (2008)</u> ....	90
1.6.4	<u>Sistema de segurança contra sinistro e incêndio – Australasian Fire Authorities Council</u> .....	91
1.6.5	Discussão sobre o sistema de segurança contra sinistro e incêndio .....	92
1.7	<b>Sistema de drenagem</b> .....	96
1.7.1	<u>Sistema de drenagem – NBR-15661/2009</u> .....	96
1.7.2	<u>Sistema de drenagem - U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration</u> .....	97
1.7.3	<u>Sistema de drenagem – NFPA 502 (2008)</u> .....	98
1.7.4	<u>Discussão sobre o sistema de drenagem</u> .....	98
1.8	<b>Sistema de gerenciamento de resíduos sólidos</b> .....	101
2	<b>RESULTADOS E CONSIDERAÇÕES GERAIS E ESPECÍFICOS</b> .....	102
2.1	<b>Resultados e considerações gerais</b> .....	102
2.2	<b>Resultados e considerações específicos</b> .....	104
2.2.1	<u>Estudo de caso – Túnel Rebouças</u> .....	106

2.2.1.1	Características físico- espaciais .....	106
2.2.1.1.1	Extensão do túnel.....	106
2.2.1.1.2	Número de tubos.....	107
2.2.1.1.3	Número de galerias .....	107
2.2.1.1.4	Número de faixas .....	107
2.2.1.1.5	Largura das faixas .....	107
2.2.1.1.6	Altura do túnel .....	108
2.2.1.1.7	Alinhamento horizontal e vertical.....	108
2.2.1.1.8	Tipo de construção e dos materiais de acabamento .....	108
2.2.1.1.9	Existência de tráfego em um ou dois sentidos .....	108
2.2.1.1.10	Aclives ou declives, no interior do túnel .....	109
2.2.1.1.11	Características físicas das rodovias à montante e à jusante (ao túnel)	110
2.2.1.1.12	Características da sinalização das rodovias à montante, no interior e à jusante (ao túnel).....	111
2.2.1.1.13	Existência de alternativas de rota de resgate, socorro e fuga, além de áreas de segurança para espera por socorro, dotada de instrumentos para a prevenção de acidentes e de intoxicação .....	111
2.2.1.1.14	Tempo estimado para atendimento ao sinistro .....	112
2.2.1.2	Formas de uso .....	112
2.2.1.2.1	Volume de tráfego por galeria por faixa de horário.....	112
2.2.1.2.2	Presença de veículos pesados (caminhões e ônibus) e motocicletas e suas consequências .....	113
2.2.1.2.3	Proteção contra ruídos .....	114
2.2.1.3	Sistema de ventilação e exaustão.....	115
2.2.1.4	Sistema de iluminação .....	117
2.2.1.5	Sistema de segurança contra sinistro e incêndio .....	117
2.2.1.6	Sistema de fiscalização e orientação de tráfego, comunicação e sinalização.....	118
2.2.1.7	Sistema de drenagem .....	120
2.2.1.8	Sistema de gerenciamento de resíduos sólidos .....	118
2.2.2	<u>Estudo de caso – Túnel Eng. Raymundo de Paula Soares</u> .....	121
2.2.2.1	Características físico- espaciais .....	122
2.2.2.1.1	Extensão do túnel.....	122
2.2.2.1.2	Número de tubos.....	122

2.2.2.1.3	Número de galerias .....	122
2.2.2.1.4	Número de faixas .....	122
2.2.2.1.5	Largura das faixas .....	123
2.2.2.1.6	Altura do túnel .....	123
2.2.2.1.7	Alinhamento horizontal e vertical.....	124
2.2.2.1.8	Tipo de construção e dos materiais de acabamento .....	124
2.2.2.1.9	Existência de tráfego em um ou dois sentidos .....	124
2.2.2.1.10	Aclives ou declives, no interior do túnel .....	124
2.2.2.1.11	Características físicas das rodovias à montante e à jusante (ao túnel)	124
2.2.2.1.12	Características da sinalização das rodovias à montante, no interior e à jusante (ao túnel).....	125
2.2.2.1.13	Existência de alternativas de rota de resgate, socorro e fuga, além de áreas de segurança para espera por socorro, dotada de instrumentos para a prevenção de acidentes e de intoxicação .....	125
2.2.1.1.14	Tempo estimado para atendimento ao sinistro .....	126
2.2.2.2	Formas de uso .....	127
2.2.2.2.1	Volume de tráfego por galeria por faixa de horário.....	127
2.2.2.2.2	Presença de veículos pesados (caminhões e ônibus) e motocicletas e suas consequências .....	127
2.2.2.2.3	Proteção contra ruídos .....	127
2.2.2.3	Sistema de ventilação e exaustão.....	127
2.2.2.4	Sistema de iluminação .....	129
2.2.2.5	Sistema de segurança contra sinistro e incêndio.....	129
2.2.2.6	Sistema de fiscalização e orientação de tráfego, comunicação e sinalização .....	131
2.2.2.7	Sistema de drenagem .....	131
2.2.2.8	Sistema de gerenciamento de resíduos sólidos .....	131
3	<b>INSTRUMENTO BÁSICO DE CHECK-LIST DE CONTEÚDOS</b>	
	<b>NECESSÁRIOS</b> .....	132
	<b>CONCLUSÕES</b> .....	135
	<b>GLOSSÁRIO</b> .....	138
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	140
	<b>NOTAS REFERENCIAIS</b> .....	143

## INTRODUÇÃO

Historicamente, segundo Sillos (2006)<sup>1</sup>, os precursores dos túneis, identificados em exemplos ilustrados em tempos longínquos, podem estar representados através de nomes como Da Vinci (1490), Henard (1903) ou Sant'Elia (1913).

O mesmo autor, entretanto, destaca que aquele que é considerado o primeiro túnel da história da engenharia moderna, sob o leito do rio Tâmesa, em Londres (1843), aberto por Marc Isambard Brunel, é a própria antítese da limitada conceituação de que um túnel se define exclusivamente como uma passagem através de morros.



Figura 1 - Da Vinci

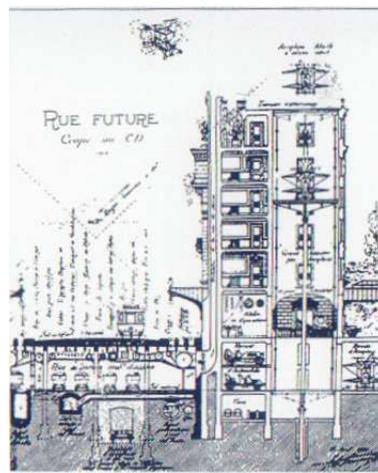


Figura 2 - Henard

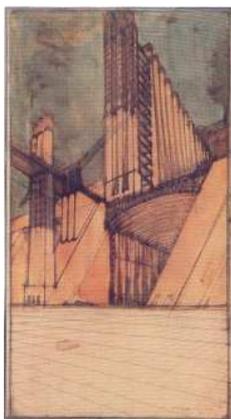


Figura 3 - Sant'Elia

Figura 1 - Kostof, Spiro. *The City Assembled – The Elements of Urban Form Through History*. London: Thames & Hudson Ltd., 1992.

Figura 2 - Labbé, Monique. *Offre et demande d'espace souterrain* in Von Meiss, Pierre e Radu, Florinel (org.) *Vingt mille lieux sous Le terres*. Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes, p. 31, 2004.

Figura 3 - Kahn, Hasan-Uddin. *International Style: Modernist Architecture form 1925 to 1965*. Köln: Benedikt Taschen Verlag GmbH, p. 20, 1998.

No Brasil, os túneis rodoviários mais antigos foram construídos na cidade do Rio de Janeiro: Túnel da rua Alice (1887) e Túnel Alvor Prata (antigo Túnel Velho) (1891):

“A abertura daqueles dois túneis foi, em grande parte, uma resposta tardia à necessidade de expansão da cidade, sobretudo após a chegada da família real e sua corte, no início do século XIX, quando consideráveis transformações urbanísticas começaram a ser implementadas num terreno de forte contraste fisiográfico, em que se destacam dois grandes tipos de paisagem: a baixada (cerca de 70% da área total), com suas colinas suaves e planícies; e a serra, com seu relevo energético, vertentes íngremes e picos escarpados”<sup>2</sup>.

As razões atuais para a ênfase em túneis talvez sejam ligeiramente semelhantes àquelas que se prenunciavam em idos tempos. Entretanto, com a evolução da urbanização e da maneira de lidar ambientalmente com a cidade, deve-se considerar que a importância contemporânea dos túneis pode ser sintetizada através da seguinte passagem:

“Com o desenvolvimento das modernas técnicas de construção, aeração e iluminação as justificativas para o desenvolvimento urbano em subsolo se ampliam, levando o Urbanismo Subterrâneo a estabelecer objetivos que consistem na criação de uma maior oferta de áreas verdes; na preservação e revalorização do patrimônio histórico edificado; no descongestionamento da rede viária existente e aumento da capacidade de circulação urbana pela criação de vias subterrâneas; na transposição de obstáculos naturais, como rios, morros e demais acidentes topográficos (...)”<sup>3</sup>.

Não por acaso, existem túneis automotivos, cada vez mais longos como, por exemplo: *Laerdal* (2000), Noruega, 24,5 km; *Zhongnanshan* (2007), China, 18,0 km; *Hsuehshan* (2006), Taiwan, 12,9 km etc.

Assim, esta solução urbanística, cada vez mais recorrente, demanda a implementação de novos e rigorosos instrumentos de gestão ambiental, gerenciamento de riscos e saúde ocupacional, face às suas características intrínsecas, como será visto durante o desenvolvimento desta pesquisa.

Deve-se destacar, entretanto, que os dados teóricos relativos à gestão ambiental dos túneis no Brasil são escassos e, quando existentes, extremamente pulverizados, o que justifica a necessidade de sistematização deste conhecimento e a pesquisa em publicações e normas de outros países.

Esta afirmação pode (até) ser relativizada pela recente publicação da NBR-15661/2009 que aborda a maior parte dos temas pertinentes à gestão dos túneis rodoviários. Contudo, possivelmente, por não pretender atender exatamente este objeto, - ainda que o abranja superficialmente em suas múltiplas nuances, - há duas

particularidades que parecem exigir a edição de um instrumento normativo mais completo sobre o assunto:

a) há uma forte hipertrofia em favor do tema: “proteção de incêndio em túneis”, prenunciado pela própria denominação da norma;

b) há uma certa carência no aprofundamento da análise das diversas disciplinas que permeiam a operacionalização e a gestão dos túneis.

Com o objetivo de suprir estas e outras lacunas relativas aos túneis automotivos urbanos em âmbito nacional, concluiu-se pela necessidade de realização deste estudo.

Desta forma, a estruturação da presente dissertação será realizada através da seguinte sequência:

O capítulo 1 será de caráter introdutório, com o objetivo de pontuar o objeto de estudo, melhor justificar a importância da pesquisa e definir campos disciplinares e metodologias de análise. Neste segmento se pavimentará as bases sobre as quais estará alicerçado o trabalho.

O capítulo 2, “Desenvolvimento da Pesquisa”, tratará pontual e especificamente de cada uma das disciplinas propostas, nos contextos das experiências brasileira e internacional. Para cada um destes sub-temas será proposta uma breve análise crítica que servirá de base para os capítulos subsequentes.

O capítulo 3 tratará dos “Resultados e Discussões” onde serão analisados, em nível geral, os pontos de consenso e conflito na relação direta entre: as normas e referências bibliográficas brasileiras, as experiências testemunhadas nos túneis Rebouças e eng. Raymundo de Paula Soares (Linha Amarela) e as fontes internacionais pesquisadas e analisadas. Por fim, uma planilha reunirá e sintetizará as principais disciplinas atinentes ao tema e servirá como uma espécie de *check-list* dos conteúdos necessários para o pleno e seguro funcionamento de grandes túneis urbanos.

O capítulo 4, “Instrumento básico de *check-list* de conteúdos necessários”, apresentará uma planilha-resumo com os elementos necessários para a gestão ocupacional e ambiental de grandes túneis urbanos, de acordo com suas características principais.

O capítulo 5, “Conclusões”, consolidará as apreciações finais da pesquisa, com o objetivo de estabelecer indicações para a melhoria dos instrumentos de

gestão ambiental e saúde ocupacional relativos ao tema, sobretudo no âmbito brasileiro.

O capítulo 6, “Glossário”, trará algumas definições principais que possam ser controversas e/ou cujos esclarecimentos possam resultar em melhor compreensão do trabalho apresentado.

O capítulo 7, “Referências bibliográficas” lista uma série de documentos obtidos por ocasião deste estudo e o capítulo 8, “Notas referenciais”, detalha a localização exata da citação, adiciona dados complementares etc.

Deve se ressaltar que esta pesquisa pretende se voltar aos aspectos relacionados diretamente à operação dos túneis, sem intencionar lidar com as precauções relacionadas com a execução da obra. A referência aos eventos sísmicos e congelamento (típicos de climas mais frios) também foi desconsiderada, já que não há evidências frequentes e/ou mesmo assertivas da existência destes eventos em contexto brasileiro. Estudos que compatibilizem viabilidade econômica e tempo de vida útil dos túneis foram igualmente descartados, assim como a utilização do espaço aéreo do (ou sobre) túnel. Neste caso, há a necessidade, evidente, da compatibilização das medidas de segurança relativas ao uso do túnel e do uso do espaço aéreo, análise de operações urbanísticas, proposição de flexibilização de zoneamento urbanístico etc.

Por fim, os tipos de equipamentos e métodos técnico-construtivos relacionados à execução da obra devem ser estudados de forma específica e não encontram residência nesta pesquisa.

#### Definição do objeto de estudo

Deve se estabelecer uma base de definição sólida e assertiva em relação ao objeto protagonista da presente pesquisa, antes de avançar no seu estudo.

Túneis rodoviários<sup>4</sup> são definidos pela *American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) Technical Committee for Tunnels (T-20)* como rodovias enclausuradas com acesso de veículos restrito às entradas, independente do tipo de estrutura e do método construtivo<sup>5</sup>.

Além disso, outra excelente definição dos usos, atributos e características relativas aos túneis urbanos pode ser a seguinte:

“Os túneis rodoviários são alternativas concretas para o cruzamento de um corpo d’água ou penetração através de barreiras físicas como montanhas, rodovias existentes, ferrovias ou outras instalações; para satisfazer requisitos ambientais ou ecológicos. Além disso, os túneis rodoviários são meios viáveis de redução de potenciais impactos ambientais como congestionamento, trânsito de pedestres, qualidade do ar, poluição sonora ou interferências visuais; para proteger áreas de especial valor cultural ou histórico como a conservação de localidades, edifícios ou propriedades privadas; ou por outras razões de sustentabilidade como para evitar o impacto em habitats naturais ou reduzir distúrbios na superfície (do solo)”<sup>6</sup>.

O grande túnel urbano para veículos automotores, especificamente no contexto deste estudo, deve ser compreendido e referenciado da seguinte forma:

Via de penetração de veículos automotores, com sentido de passagem completa, em ambiente coberto e confinado em toda a seção, aberturas nas extremidades, em âmbito urbano, com extensão mínima ininterrupta estabelecida em aproximadamente 1.000m (independente do número de galerias) e movimento intenso da ordem mínima de 10.000 veículos/dia por faixa de rolamento.

Esta particularização, longe de ser arbitrária, segue diretrizes sugeridas por documentos como, por exemplo: a) *Cross Section Design for Bi-Directional Road Tunnels*; b) *Recommendations of the Group of Experts on Safety in Road Tunnels – Final Report*; c) *NFPA 502* etc. no que concerne aos seguintes aspectos básicos:

1) Quanto ao número de veículos, a partir do qual há necessidade de túneis duplos com tráfego unidirecional de 10.000 veículos por pista de rolamento por dia. Como ambos os túneis brasileiros objetos de análise específica contam com três faixas destinadas à (duas) direções opostas, se ultrapassa ao número mínimo considerado e atinge-se o nível de 60.000 veículos/dia.

2) Quanto ao comprimento, diversas outras publicações lidam com a referência de 1.000m de comprimento quando se referenciam a túneis de médio ou grande porte, mesmo no caso de legislações e normas específicas de outros países.

## Objetivos da pesquisa

Determinar um protocolo justificado de ações em grandes túneis destinados a veículos automotores, a fim de se criarem condições ambientais mais adequadas à redução dos níveis de poluição e, conseqüentemente, a diminuição dos incidentes e acidentes, inclusive com otimização do atendimento e do tempo de resposta em

casos emergenciais (situação de pane, incêndio, derramamento de líquidos etc.).

Pode ser destacado ainda, como um objetivo secundário ou específico, que esta pesquisa tratará da análise dos túneis Rebouças e eng. Raymundo de Paula Soares (Linha Amarela), sob o ponto de vista da gestão ambiental, segurança e da saúde ocupacional.

#### Justificativa

Atualmente, nas cidades de médio e grande porte, a densificação e o ritmo urbano intenso ensejam a adoção de medidas que propiciem e agilizem o deslocamento. Novas técnicas de engenharia, geologia e geotecnia possibilitaram a construção de extensos túneis urbanos de forma a transpor barreiras geotopográficas e viabilizar o tráfego com maior facilidade e fluidez. Outrossim, a crescente preocupação e consciência ambiental contemporânea estabelece um quadro de minimização de interferências inconsequentes ao meio natural. Assim, o sentido de “atravessar”<sup>7</sup> pode contribuir para manter grandes extensões (externas) de terreno intactas (ao menos na superfície).

Ou seja, ao se propor um conjunto de sistemas que configurem um instrumento de gestão ambiental é possível que seja importante se referenciar ao tema da qualidade ambiental, ainda que de forma sucinta. Assim, objetivamente, pode-se compreender a boa qualidade ambiental como um conjunto de aspectos que atenda e satisfaça, de forma ampla, diferentes âmbitos: biológicos, culturais, perceptivos, sociais etc. dos partícipes envolvidos - neste caso, principalmente dos seres humanos.

De acordo com o DNIT, as condições que justificam a realização de túneis para transpor obstáculos naturais ou reduzir o impacto da via na comunidade, em geral, são as seguintes:

- a) “Necessidade de atravessar uma região elevada, estreita e longa, em que a execução de um corte pode ser danoso para o meio ambiente;
- b) Faixa de domínio restrita em que toda a área da superfície é necessária para o desenvolvimento urbano de ruas e demais logradouros;
- c) Grandes interseções ou série de interseções muito próximas em um trecho com distribuição de ruas irregular ou desfavorável à transposição desejada;
- d) Acessos a estações ferroviárias, aeroportos, parques e similares;
- e) Quando a aquisição da faixa de domínio necessária excede os custos da implantação e operação do túnel”<sup>8</sup>.

Por outro lado, deve-se considerar que no interior dos túneis, é necessária uma atenção especial às questões que envolvem a poluição e a segurança, por se tratarem de ambientes extremos, praticamente isolados e com pouquíssimo contato externo.

Em termos gerais, sabe-se que “em túneis, o número de acidentes é frequentemente menor que em estradas ao ar livre, pois não há exposição às adversidades meteorológicas (...)”. [Contudo], “devido ao fato dos túneis serem espaços fechados, incêndios que ocorrem neles resultam em [imediate] pouca visibilidade, propagação de fumaça e gases tóxicos, rápido desenvolvimento de altas temperaturas e a redução dos níveis de oxigênio no ar. A extensão do dano para usuários de túneis é, portanto, muito maior do que em estradas ao ar livre”<sup>9</sup>. Ou seja, embora mais improvável, caso ocorra (um acidente), as consequências tendem a ser muito mais graves.

Há uma literatura internacional específica sobre o assunto com a determinação de regras, normas, procedimentos etc. Em âmbito brasileiro, conforme exposto, existe apenas um quadro de relativa incipiência em relação à pertinência técnica e adequação prática que merece, entretanto, ser analisado e, se possível, aprimorado.

Para ilustrar a importância de determinados túneis em certos contextos, segundo dados do DETRAN-RJ, há atualmente<sup>10</sup> cerca de 2.200.000 de veículos licenciados na cidade do Rio de Janeiro. Os dois maiores túneis do Rio de Janeiro: a) Rebouças, com duas galerias e extensão de 2,8km<sup>11</sup>, tem fluxo diário de aproximadamente 152.000 veículos/dia<sup>12</sup>, com picos em torno de 200.000 veículos/dia e b) Engenheiro Raymundo de Paula Soares, com três galerias e extensão total de 2,1km<sup>13</sup>, tem fluxo diário de aproximadamente 91.000 veículos/dia<sup>14</sup>. Ou seja, estes números dão a dimensão de que, em números médios, mais de 10% da frota de veículos do município do Rio de Janeiro utiliza diariamente estes principais túneis da cidade.

Além disso, o tráfego por faixa em um túnel como o Rebouças supera bastante o limite de 2.500 veículos por hora por faixa. O que representa números significativos, segundo a respeitada publicação *Highway Capacity Manual*<sup>15</sup>.

Assim, justifica-se a análise destes dois relevantes exemplos, dentre outros motivos, em função de: a) suas extensões; b) suas importâncias nos desenhos e conexões no âmbito do sistema viário de uma grande cidade; c) suas enormes

demandas de fluxo etc.

Uma ampla sistematização deste corpo de conhecimento ensejaria a composição de uma equipe multidisciplinar, por um longo período, a fim de conformá-la ao contexto, especificidades e determinantes do país. Desta feita, ainda que em nível preliminar, a compilação crítica de dados aqui desenvolvida poderá ser utilizada como ponto de partida para estudos mais extensos e aprofundados sobre o tema.

Sobre a gestão de túneis, a NBR-15661/2009 assim sugere:

“O gestor do túnel deve elaborar o programa de gestão de riscos do túnel para manter a operação segura do túnel. Esse programa deve conter no mínimo os seguintes assuntos: revisão de riscos, sistemas de gestão de modificações, manutenção e inspeção de segurança dos sistemas críticos para a segurança do túnel, programa de treinamento de operadores, de usuários e da comunidade local, plano de resposta às emergências e sistema de auditoria do túnel”<sup>16</sup>.

## Metodologia de pesquisa

Para cada uma das disciplinas consideradas pertinentes ao tema, há uma forte tentativa de caracterização da sua respectiva situação em âmbito nacional, em função de normas e análises realizadas por diferentes cientistas.

Paralelamente, estabeleceu-se um interesse de que os túneis Rebouças e eng. Raymundo de Paula Soares (Linha Amarela), por suas extensões e importâncias, servissem de base material para o conhecimento da situação existente, sempre que possível.

Além disso, para cada um destes campos, houve também uma ampla pesquisa que visou a prospecção de um conjunto de estudos técnicos e normas adotadas em diferentes países. Objetivamente, para cada disciplina envolvida, buscaram-se fontes comparativas cuja intenção é, ao reunir pontos de contato e contrastes, servir de base para uma sistematização geral de procedimentos a serem considerados. Ou seja, um ensaio metodológico para a gestão ambiental de túneis urbanos no Brasil.

É importante também destacar que se buscou prover o estudo com a máxima abrangência de dados técnicos relativos à cada disciplina que compõe o universo da gestão ambiental de túneis urbanos. Deve-se considerar, entretanto, que há necessária e deliberadamente um desequilíbrio na importância dos temas

apresentados. Em geral, os assuntos relacionados às emissões atmosféricas e ao incêndio, em função dos aspectos relacionados às condições de confinamento dos túneis e à gravidade e dramaticidade dos sinistros relacionados (à estas disciplinas), praticamente monopolizam as pesquisas existentes e neste trabalho não haveria justificativa para proceder de forma diversa.

#### Apresentação das disciplinas de análise

Os túneis, apesar de serem considerados ambientes hostis, por suas características intrínsecas e, por este motivo, justificarem uma pesquisa sobre formas de gestão ambiental e de saúde ocupacional, podem ser vistos por um lado bastante positivo como recursos de instrumentalização de um ambiente mais ameno relacionado ao tráfego automotivo. Seus aspectos positivos, por exemplo, podem ser sintetizados através da seguinte passagem:

“Túneis rodoviários são ambientalmente mais amistosos que outros equipamentos de superfície. (...) A qualidade do ar [local] pode ser melhorada, pois os poluentes gerados [podem ser] capturados e dispostos longe do público. Da mesma forma, os ruídos podem ser reduzidos e os atributos visuais (...) incrementados. Ao se colocar o tráfego no subsolo, os valores das propriedades podem aumentar e as comunidades sofrerem menos impacto a longo prazo. Além disso, os túneis podem prover oportunidades para o desenvolvimento das terras ao longo e sobre o alinhamento do túnel ao adicionar características imobiliárias e desenvolvimento do potencial econômico”<sup>17</sup>.

Preliminarmente, antes de serem buscadas especificidades relativas às diversas disciplinas correlatas ao tema sob o ponto de vista da segurança e qualidade ambiental, devem ser analisados dois aspectos:

- a) **Características físico-espaciais;**
- b) **Formas de uso,**

do túnel urbano em questão para se buscar a máxima eficiência em relação às utilizações previstas e às formas de operação nos casos de previsibilidade relativa.

Em um ambiente onde as características físico-espaciais e as formas de uso não sejam adequadas podem ensejar engarrafamentos desnecessários, incidentes indesejáveis etc. Vale destacar, por exemplo, que:

“A ocorrência de engarrafamentos no interior do Túnel e/ou nas regiões circunvizinhas, ou de condições que propiciam à gênese dos poluentes fortemente associados ao carbono, como CO e material particulado, em situações como marcha lenta, acelerações, desacelerações, frenagens, arrancadas etc, que favorecem à oxidação parcial ou à combustão incompleta, em associação à queima rica em combustível”<sup>18</sup>.

Além disso, como recorrentemente exposto, a característica de enclausuramento dos túneis dificulta a dispersão de emissões atmosféricas, amplifica os efeitos dos sons devido à reverberação, restringe o acesso dos veículos de socorro e o escape em caso de sinistro, limita a visibilidade dos acontecimentos e “estimula o proibido” (devido ao confinamento que cria o “distanciamento” da visibilidade pública).

No Brasil, como fato agravante ao contexto geral de carência de normas específicas para túneis destinados ao tráfego de veículos automotivos, as pesquisas identificadas se atém basicamente à questão das emissões atmosféricas. Observa-se, portanto, a necessidade de um estudo bem mais amplo que lide assertivamente com questões multidisciplinares que possam compor um sistema de gestão ambiental e ocupacional.

Thewes<sup>19</sup>, por exemplo, em referência aos túneis que demandam grandes sistemas operacionais, aponta as principais variáveis a serem consideradas neste âmbito:

- c) **Sistema de ventilação [e exaustão];**
- d) **Sistema de iluminação;**
- e) **Sistema de segurança contra [sinistro] e incêndio;**
- f) **Sistema de fiscalização e orientação de tráfego, comunicação e sinalização;**
- g) **Sistema de drenagem.**

A princípio, as disciplinas acima descritas seriam consideradas suficientes como instrumentos de análise no que concerne à gestão ambiental e de saúde ocupacional. Contudo, além dessas, a fim de que se atinja um grau mais abrangente, deve ser considerada um item final:

- h) **Sistema de gerenciamento de resíduos sólidos,**

habitualmente descartados (jogados) dos veículos em movimento e que exigem uma logística particular para limpeza, por se constituírem elementos que podem provocar a necessidade de repentina mudança de curso de algum veículo, bloqueio da visão, impedimento de drenagem etc.

Evidentemente, muitos outros aspectos poderiam ser analisados em relação à gestão de túneis urbanos, como aspectos geotécnicos, estruturais, de engenharia de tráfego etc., pois indubitavelmente todos estes elementos repercutem direta ou indiretamente na questão ambiental, em alguma fase pré ou pós-ocupação. No entanto, é preferível ater-se de forma concentrada às disciplinas principais que impactam mais fortemente no objeto deste estudo.

Ao término desta pesquisa, principalmente a partir do estudo de diferentes documentos nacionais e internacionais pertinentes ao tema e observações realizadas *in loco*, serão apresentadas as condições de monitoramento das disciplinas mencionadas no contexto brasileiro e indicados os pontos passíveis de implementação de maior rigor para a gestão adequada de grandes túneis urbanos.

Na prática, as visitas e reuniões técnicas relativas ao túnel Rebouças, eixo de ligação da Zona Sul e Centro da cidade do Rio de Janeiro, e ao túnel eng. Raymundo de Paula Soares (Linha Amarela), eixo de ligação da Zona Norte e Zona Oeste da cidade do Rio de Janeiro, indicaram as formas atualmente vigentes de gestão ambiental destes túneis – sob as perspectivas positivas e negativas.

Evidentemente, todas as precauções citadas e passíveis de detalhamento estão sujeitas à uma adequada operacionalização e manutenção periódica das instalações, sem as quais não há sistemática possível. De acordo com a NBR-15661/2009<sup>20</sup>, os procedimentos de manutenção devem ser elaborados por meio da definição de sistemas essenciais (manutenção corretiva emergencial), equipamentos de apoio (manutenção corretiva normal) e equipamentos não essenciais (reparo junto com a manutenção preventiva).

## 1 DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

A norma NBR-15661/2009 prevê algumas fases relativas ao planejamento, à implementação e à operação de túneis. Neste caso, “o gestor do túnel deve reunir e manter permanentemente atualizada a documentação de segurança para cada túnel, da qual transmitirá uma cópia aos órgãos competentes pelo licenciamento do túnel”.

Em linhas gerais, a documentação de segurança deve ser composta de, no mínimo, os seguintes documentos:

- a) Análise de risco;
- b) Procedimentos operacionais e de manutenção;
- c) Projetos executivos revisados;
- d) Licenças ambientais (quando aplicáveis);
- e) Plano de emergência;
- f) Auto de vistoria do Corpo de Bombeiro (AVCB).

Além disso, há uma complementação de documentação a ser fornecida conforme a fase correspondente:

### g.1) Fase de projeto:

- Deve ser fornecido estudo de previsão do tráfego, com especificação das condições previstas para o transporte de mercadorias perigosas, juntamente com a análise de riscos (...) detalhada no Anexo A<sup>21</sup> da NBR-15661/2009;

### g.2) Fase de entrada de serviço do túnel:

- Descrição da organização dos recursos humanos e materiais e das instruções que o gestor do túnel especificar para assegurar o funcionamento e a manutenção do túnel.

- Plano de resposta de emergência, elaborado em conjunto com os serviços de emergência, que também considere a existência de pessoas com mobilidade reduzida e de pessoas [portadora de necessidades especiais];

- Descrição do sistema de recolha permanente dos dados de experiência, que permita registrar e analisar incidentes e acidentes significativos.

### g.3) Túneis em funcionamento:

- Relatório de análise sobre os incidentes e acidentes significativos;

- Lista dos exercícios de segurança realizados, juntamente com uma análise das suas conclusões.

## 1.1 Características físico-espaciais

A maior parte das características físico-espaciais dos túneis é, evidentemente, prevista durante a fase projetual de forma específica (para cada situação). Desta maneira, diversas variáveis confluem para a materialização de um determinado tipo de túnel. Alguns elementos essenciais serão listados a seguir e contribuirão para a compreensão do contexto geral no que tange à gestão ambiental dos túneis:

### 1.1.1 Extensão do túnel

O sentido longitudinal do túnel é fundamental para se determinar um universo de medidas relacionadas à gestão de túneis: “A instalação de equipamentos é baseada principalmente no comprimento dos túneis”<sup>22</sup>. Em resumo, este dado, por si, influencia: a) o sistema de exaustão e ventilação; b) as formas de socorro e escape; c) os padrões de iluminação; d) a sinalização relativa a eventos fixos (localização dos telefones, recuos, acessos às rotas de fuga etc.) e variáveis (sinistros, congestionamentos, avisos etc.); e) a localização e quantidade de equipamentos; f) o número de áreas de recuos; g) o sistema de fiscalização etc.

De acordo com a *NFPA 502* (2008)<sup>23</sup>, há cinco categorias de túneis, todas determinadas conforme comprimento específico: I) Categoria X: Menos de 90 m; II) Categoria A: A partir de 90 m; III) Categoria B: A partir de 240 m e onde a distância máxima de qualquer ponto no interior do túnel até um local seguro não exceda 120m; IV) Categoria C: A partir de 300 m; v) Categoria D: A partir de 1000m.

Deve se ressaltar que a última categoria (Categoria D) é a que protagoniza os estudos desenvolvidos nesta pesquisa.

O quadro a seguir possui uma listagem de disciplinas e sub-itens que contemplam os parâmetros básicos de segurança e conforto, segundo a *NFPA 502* (2008).

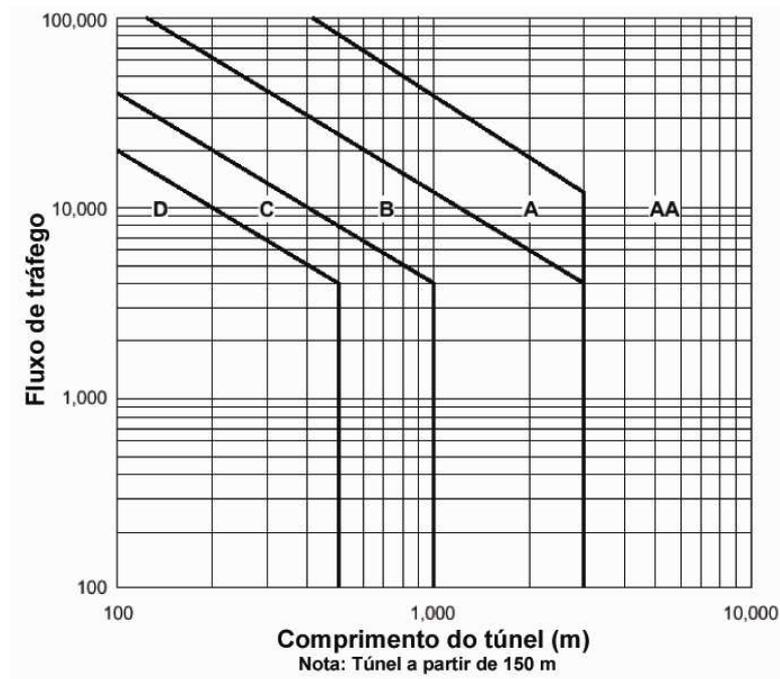
Referência de Proteção de Incêndio em Túneis - NFPA 502 (2008)	Categorias de Túneis				
	X	A	B	C	D
<b>Sistemas de Proteção de Incêndio</b>					
<b>Detecção de Fogo</b>					
Caixas de alarme de incêndio manual	-	-	M	M	M
CFTV	-	-	M	M	M
Detectores de fogo automáticos	-	-	M	M	M
Painel de controle de fogo	-	-	M	M	M
<b>Comunicações</b>					
Rádio	-	-	M	M	M
Telefone	-	-	M	M	M
<b>Controle de Tráfego</b>					
Paralisação do tráfego nas proximidades do portal	-	M	-	-	-
Paralisação do tráfego de forma a se evitar a entrada no túnel	-	-	M	M	M
<b>Proteção de Incêndio</b>					
Aparato de combate a incêndio (a)	-	N	N	N	N
Tubo vertical de água	-	M	M	M	M
Suprimento de água	-	M	M	M	M
Conexão com o Corpo de Bombeiros	-	M	M	M	M
Conexão de mangueiras	-	M	M	M	M
Bomba para incêndio (b)	-	N	N	N	M
Extintores portáteis	-	-	M	M	M
Sistema fixo de supressão de fogo (c)	-	N	N	N	N
Ventilação de emergência (d)	-	-	C	C	M
Sistema de drenagem	-	-	M	M	M
Detectores de hidrocarbonetos	-	-	M	M	M
<b>Saída</b>					
Saída de emergência	-	M	M	M	M
Identificação de saída	-	M	M	M	M
Ambiente protegido	-	M	M	M	M
Porta(s) de emergência	-	M	M	M	M
Cruzamento de pedestres entre os tubos (nos dois sentidos dos túneis)	-	M	M	M	M
<b>Eletricidade</b>					
Luzes de emergência	-	M	M	M	M
Força	-	M	M	M	M
Força redundante	-	-	-	-	M
Plano de segurança	-	M	M	M	M
<b>Plano de atendimento de emergência</b>	-	M	M	M	M
<b>M: Mandatório</b>					
<b>N: Não-Mandatório</b>					
<b>C: Condicionalmente Mandatório</b>					
<b>(a): Não-mandatório; contudo, deve estar próximo para minimizar tempo de resposta</b>					
<b>(b): De acordo com o documento, deve seguir a NFPA 20.</b>					
<b>(c): Pontos fixos de combate a incêndio devem ser permitidos em túneis como parte integrada do gerenciamento de incêndio e segurança à vida. Deve ser implantado de acordo com a NFPA 11, NFPA 13, NFPA 15, NFPA 16, NFPA 18, NFPA 25 e NFPA 750.</b>					
<b>(d) Sistemas de ventilação de emergência e procedimentos de operação de túneis devem ser desenvolvidos para maximizar o uso do sistema de ventilação de túneis para a remoção e controle de fumaça e gases quentes que resultam de emergência em incêndio.</b>					

Tabela 1 – Referência de proteção em túneis

Baseado em *National Fire Protection Association (NFPA). NFPA 502 – Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways*, p. 10, 2008.

Uma outra forma de classificação, um pouco mais complexa, é definida pelo gráfico abaixo:

Gráfico 1 – Classificação do túnel, em função do fluxo e do comprimento  
Høj, Niels Peter (COWI). Technical Report –  
Part 2 - Fire Safe Design – road tunnels, pag. 118/329, Dinamarca.



Em função do instrumento gráfico acima fornecido, diversos procedimentos são adotados no âmbito do Reino Unido no que tange aos procedimentos de segurança de túneis<sup>24</sup>.

### 1.1.2 Número de tubos<sup>25</sup>

De acordo com a publicação elaborada pela *United Nations*:

“Por se considerar que um túnel é parte integrante de um sistema rodoviário, o principal critério para decisão se se deve construir um tubo simples ou um tubo duplo deve ser o volume de tráfego projetado e segurança”. (...) Se o volume de tráfego projetado é baixo, um tubo simples pode ser construído e, se o volume de tráfego projetado é alto, um tubo duplo pode ser demandado.

(...) O comprimento do túnel e as condições topográficas, assim como o percentual de veículos pesados, podem influenciar a decisão (...)”<sup>26</sup>.

Este dado será melhor detalhado ao longo deste trabalho em diversas passagens, como, por exemplo, nos itens: a) “volume de tráfego por galeria por faixa de horário”; b) “número de faixas” etc.

### 1.1.3 Número de galerias

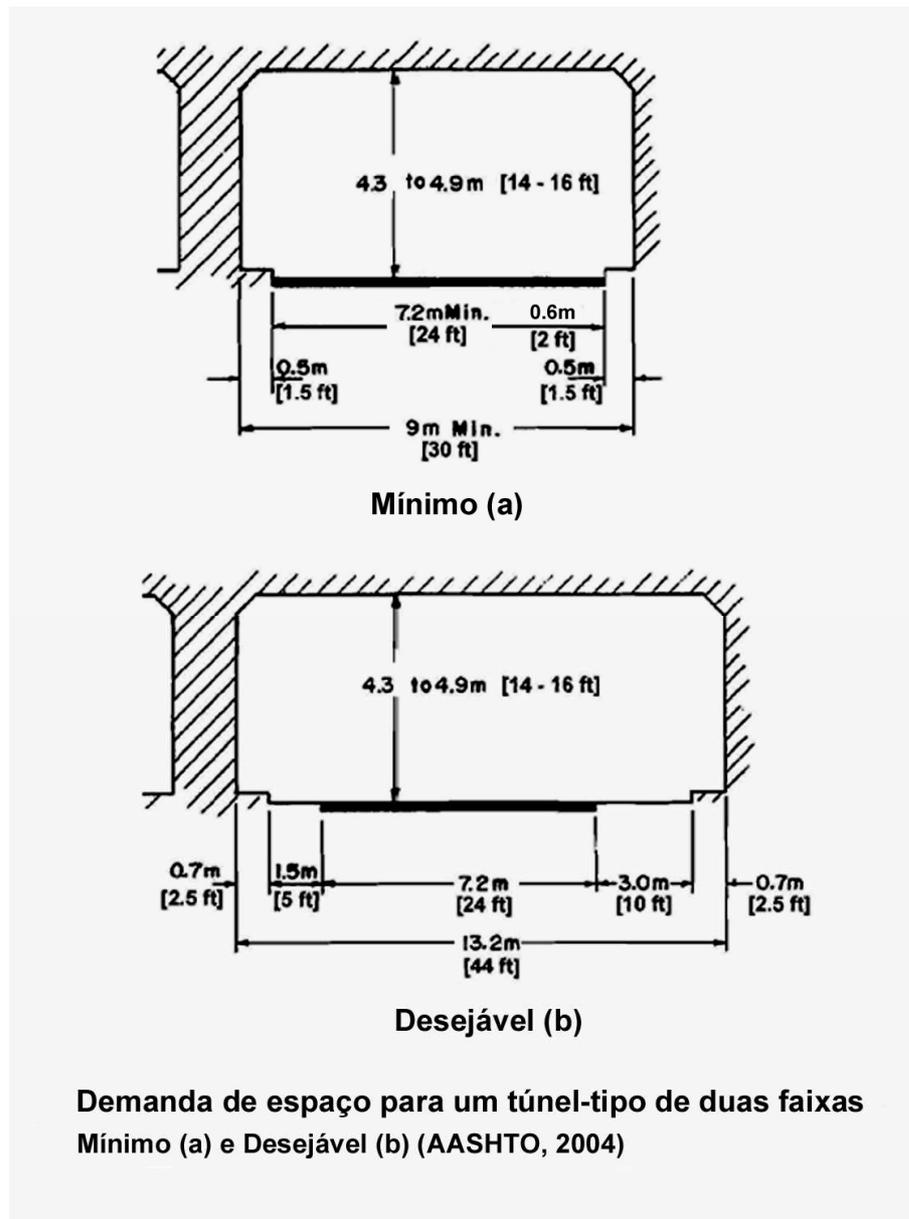
As questões topográficas influenciam diretamente o número de galerias necessário. Atualmente, o comprimento pode não ser uma condicionante fundamental para esta determinação, face ao avanço tecnológico e o domínio dos procedimentos relativos aos túneis.

Além disso, em função da extensão de cada galeria que conforma um determinado túnel, deve-se adotar um procedimento de gerenciamento e monitoramento diferente, ainda que seja importante a análise sistêmica (do conjunto). Neste caso, para cada galeria, é mandatório preverem-se os intervalos de existência de baias (para os casos de sinistro), equipamentos de exaustão e ventilação, câmeras, interfones, equipamentos de monitoramento e iluminação etc.

#### 1.1.4 Número de faixas

O esquema a seguir<sup>27</sup> ilustra a necessidade de espaço no sentido transversal do túnel, em função da necessidade de fluxo, com implicações diretas na segurança e nos custos de obras.

Figura 4 - Demanda de espaço para um túnel-tipo de duas faixas mínimo (a) e desejável (b)



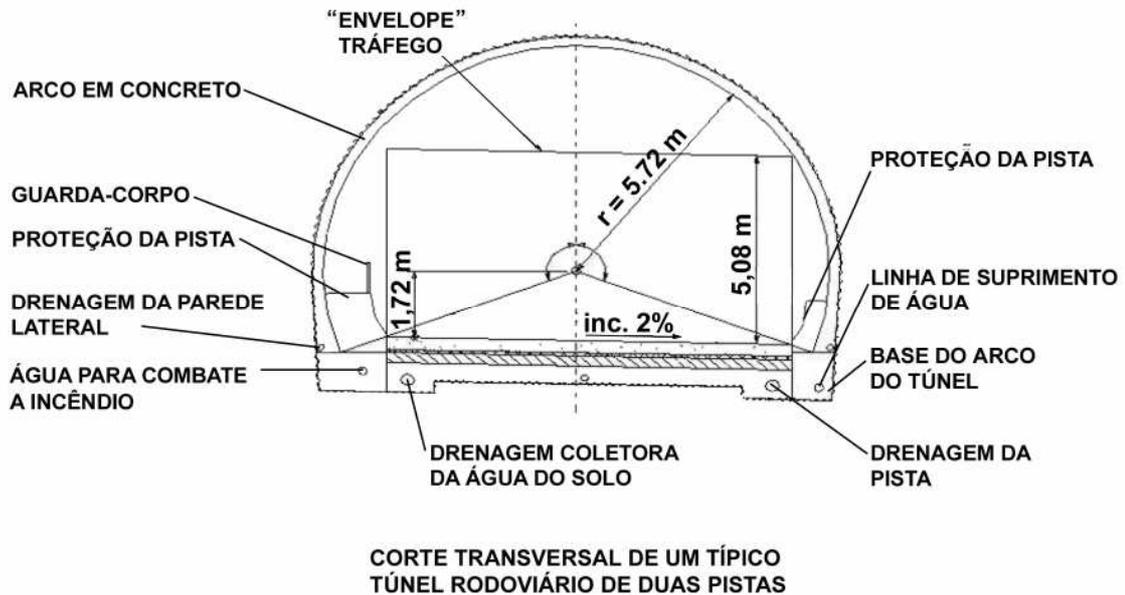
American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) Technical Committee for Tunnels apud U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration. *Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels – Civil Elements*, p. 2-5, 2009.

Uma seção transversal típica de um túnel é composta de:

- Pistas de rolamento;
- Faixa (vedada ao trânsito) à beira da estrada de rodagem<sup>28</sup>;
- Passeio/meio-fio;
- Drenagem do túnel;
- Ventilação do túnel;
- Iluminação do túnel;
- Equipamentos e energia do túnel;
- Suprimento de água, em caso de incêndio;
- Armário para mangueiras e extintores de incêndio;
- Sinalização;
- CFTV (Circuito Fechado de Televisão);
- Telefones de emergência;
- Antenas e equipamentos de comunicação;
- Equipamentos de monitoramento de emissões tóxicas e visibilidade;
- Sinalização de emergência iluminada em baixa altura (para que sejam visíveis em caso de incêndio e fumaça).

A seguir, um corte transversal de um típico de um túnel rodoviário de duas pistas:

Figura 5 - Corte transversal de um típico túnel rodoviário de duas pistas



*American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)  
 Technical Committee for Tunnels apud U.S. Department of Transportation  
 Federal Highway Administration. Op. Cit., p. 2-7, 2009.*

### 1.1.5 Largura das faixas

De acordo com *Highway Capacity Manual (2000)*<sup>29</sup>, a largura da faixa de rolamento padrão é de 3,6m. Para rodovias em geral, há uma indicação de que não haja qualquer tipo de obstáculo a uma distância mínima de 1,8m, a contar do limite da pista de rolamento em relação ao "seu bordo e que constituem obstáculos ou depressões aparentes para os condutores dos veículos". Neste caso, trata-se de uma faixa de segurança (*vide glossário*).

Há grande variação na largura das faixas, conforme o país. No trabalho desenvolvido pela *European Tunnel Assessment Programme*, foi realizado um levantamento das diferentes diretrizes normativas previstas<sup>30</sup>: Alemanha (3,25m – 3,75m); Áustria (3,00m – 3,75m); França (3,00m - 3,5m); Noruega (2,75m - 3,50m);

Suiça (3,50m – 3,75m) etc. Em geral, as faixas lindeiras às faixas de rolamento (vedadas à circulação) oscilam em torno de 1,00m.

De acordo com o Manual de Projeto Geométrico de Travessias Urbanas elaborado pelo DNIT:

“Embora a largura de 3,60 m seja a mais desejável para as vias arteriais, faixas de 3,30m são extensivamente usadas em vias arteriais urbanas e são aceitáveis em certas circunstâncias, conforme as características da faixa de domínio, do tráfego e do uso do solo adjacente. Por exemplo, para aumentar o número de faixas de tráfego em túneis e viadutos, e em vias com fluxo ininterrupto com velocidades baixas (50 km/h), localizadas em áreas com restrição de faixa de domínio. A largura de 3,30 m também pode ser adequada para faixas de tráfego direto, faixas contínuas de giro à esquerda e faixas adjacentes a canteiros separadores limitados por pintura no pavimento”<sup>31</sup>.

Em túneis, como há barreiras laterais inerentes à sua característica de vedação, determina-se que a área livre suficientemente larga para acomodar veículos avariados, por exemplo, seja da ordem de 2,50m. Em termos ideais, se considera uma largura de 3,00m, para que seja possível a abertura da porta do condutor do veículo<sup>32</sup>. Neste caso, esta faixa é reconhecida como acostamento (*vide glossário*).

Já no *Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels – Civil Elements*, há uma ponderação de que prover uma via, com faixas laterais em ambos os lados, de forma contínua, e vedadas à circulação é [economicamente] proibitivo. Segundo o mesmo documento, “a redução das faixas laterais é usual. Além disso, em certos casos, estreitas faixas laterais são previstas em um dos lados ou nos dois lados. Em alguns outros casos, contudo, as faixas são completamente eliminadas”<sup>33</sup>.

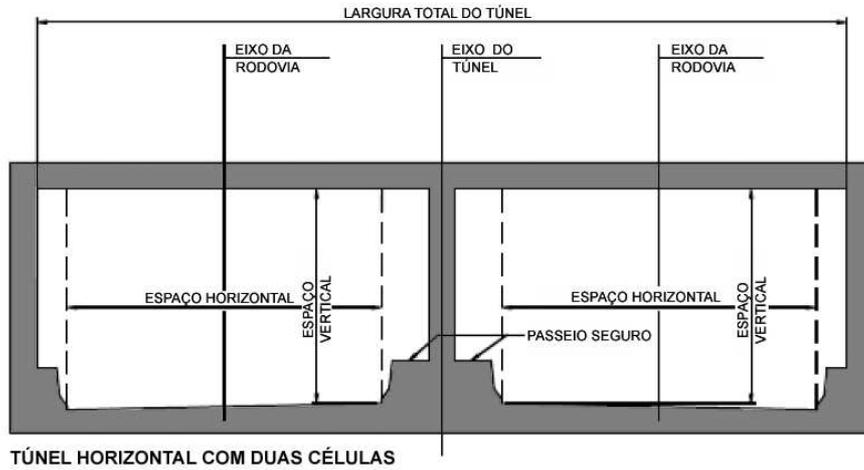
De acordo com a Directiva 2004/54/CE (2004):

“Quando a largura da faixa de acostamento for inferior a 3,5m e a circulação de veículos pesados de mercadorias for autorizada, serão tomadas medidas adicionais e/ou reforçadas para melhorar a segurança com base numa análise de riscos”<sup>34</sup>.

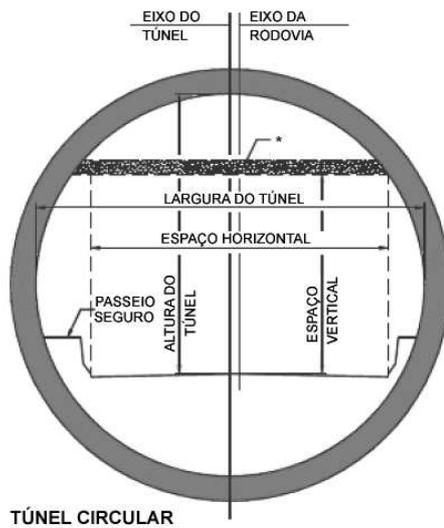
Para se prevenir que os automóveis atinjam as paredes do túnel, por exemplo, uma barreira de concreto defletora rampada ou parcialmente rampada é normalmente utilizada. (...) Em geral, adota-se a altura de 1 m de altura para esta barreira.

Os três principais formatos de túneis, incluindo sua geometria transversal e seus elementos internos, são<sup>35</sup>:

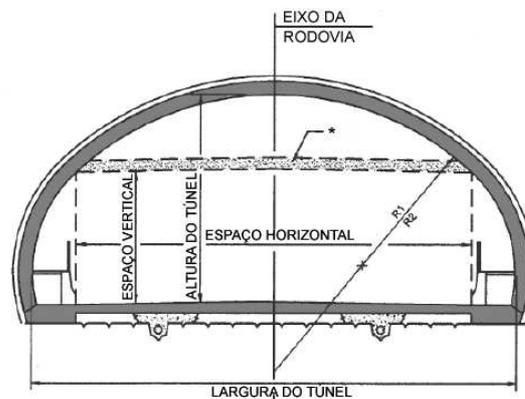
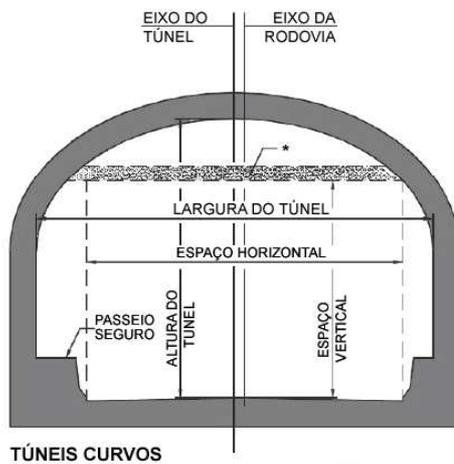
Figura 6 - Túnel circular, circular com duas células e túneis curvos



*U.S. Department of Transportation  
Federal Highway  
Administration, Technical Manual for  
Design and Construction  
of Road Tunnels – Civil Elements, p. 39,  
2009.*



\* LAJE DE COBERTURA OPCIONAL PARA PASSAGEM DE DUTOS DE AR E INSTALAÇÕES



\* LAJE DE COBERTURA OPCIONAL PARA PASSAGEM DE DUTOS DE AR E INSTALAÇÕES

### 1.1.6 Altura do túnel

A altura do túnel não deve exceder os níveis das passagens (sob viadutos, pontes etc.) que conduzem ao túnel. Além disso, devem ser considerados dois parâmetros principais: a) a altura dos veículos de socorro, como carros de bombeiros, por exemplo; b) os tipos de veículos que trafegarão naquela via. Desenhar um túnel para o trânsito esporádico de alguns tipos de veículos pode não ser economicamente viável, embora se reconheça que, em algumas situações, a administração pública deva oferecer ou exigir (no caso de concessão) uma altura mínima plausível e compatível.

Além disso, de acordo com a *U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration* (2009), “um teto muito baixo pode dar a impressão de alta velocidade e [conseqüentemente] o tráfego tende a tornar-se mais lento”.

### 1.1.7 Alinhamento horizontal e vertical

Uma vez mais, de acordo com o *U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration* (2009), o planejamento e o projeto de alinhamento de um túnel deve considerar as condições geológicas, geotécnicas e das águas subterrâneas.

Este mesmo documento<sup>36</sup>, afirma que as curvas podem ser necessárias para acomodar acessos à shafts, acessos de emergência ou outros elementos de apoio e que na saída dos túneis, “pode ser necessária uma leve curva horizontal para permitir que os condutores se habituem gradualmente com o brilho na área externa do túnel”. Os raios das curvas devem ser tão grandes quanto possíveis, da ordem de 255 m à 300 m.

Além disso, “a orientação do portal deve ser planejada de forma a evitar a direção leste-oeste para evitar o ofuscamento dos olhos em função da luz solar”<sup>37</sup>.

As inclinações laterais devem ser da ordem de 1% à 6%.

Caso seja prevista “uma faixa de rolamento adicional no sentido vertical, – ou seja, uma pista sobre outra, - ela deverá ser projetada, na medida do possível, para se iniciar e terminar na parte externa do túnel para prevenir a junção e a ultrapassagem no interior do túnel (que pode ser de maior risco)”<sup>38</sup>.

Deve-se destacar ainda que “a velocidade máxima recomendada em túneis bidirecionais é de 90 km/h ou menos, se a geometria do túnel (seção, curvas ou ladeira) envolver outros fatores limitantes. Neste caso, o limite de velocidade deve corresponder à velocidade de segurança sob as condições de tráfego e do túnel”<sup>39</sup>.

A seguir, características básicas do projeto geométrico do sistema arterial principal – via expressa primária, em túneis, de acordo com publicação elaborada pelo DNIT (2010):

Características	Desejável	Absoluto
Velocidade diretriz mínima	110 km/h	80 km/h
Distância mínima de visibilidade de parada	220 m	130 m
Raio mínimo de curva horizontal ( $e_{max}=8\%$ )	475 m	230 m
Taxa máxima de superelevação	8,0%	8,0%
Rampa máxima	3,0%	5,0%
Rampa mínima	0,5%	0,35%
Valor mínimo de K para curvas verticais convexas	74	26
Valor mínimo de K para curvas verticais côncavas	55	30
Largura da faixa de rolamento	3,60 m	3,50 m
Declividade transversal da pista	2,0%	2,5%
Largura mínima do acostamento externo	3,00 m	2,00 m
Largura mínima do acostamento interno		
• Pista de 3 faixas	1,20 m	0,60 m
• Pista de 4 ou mais faixas	3,00 m	1,00 m
Declividade dos acostamentos	5,0%	5,0%
Gabarito mínimo vertical	5,50 m	5,50 m
Afastamento lateral mínimo do bordo do acostamento		
• Obstáculos contínuos	0,50 m	0,30 m
• Obstáculos isolados	0,60 m	0,50 m

Tabela 2 - características básicas do projeto geométrico do sistema arterial principal  
Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes.

Manual de projeto geométrico de travessias urbanas. Rio de Janeiro: DNIT, p.374, 2010.

### 1.1.8 Tipo de construção e dos materiais de acabamento

A estrutura principal de um túnel deve atender aos requisitos de resistência ao incêndio, pois pode trazer sérias consequências, no caso de colapso. É fundamental que não haja material que possa se soltar por falta de manutenção ou calor intenso, inclusive segundo a NBR-15661/2009, “vem sendo desenvolvida a capacidade de produção de concretos estruturais para revestimento de túneis (projetado ou para anéis pré-moldados), que não requerem qualquer tipo de proteção e não são sujeitos a lascamento”<sup>40</sup>.

A fim de se evitar que pequenos fragmentos se soltem, no caso dos túneis escavados em rocha e mantidos sem acabamento, é comum o jateamento de camadas de concreto sobre telas ou fibras.

Há uma bibliografia específica sobre resistência de materiais, principalmente em se tratando de elementos estruturais, que deve ser considerada durante o projeto civil e a execução das obras. Em geral, deve ser considerado o tempo mínimo de 120 (cento e vinte) minutos sem que haja colapso ou cessão das qualidades básicas de manutenção do túnel, no caso de incêndio. Por não se tratar de um objetivo particular desta pesquisa, estes dados não serão aprofundados<sup>41</sup>.

Devido às características de umidade em túneis, em geral, há forte tendência à percolação. Por isso, é particularmente importante destacar uma característica preconizada pela NBR-15661/2009:

“Para garantir o desempenho, o revestimento dos túneis, bem como as demais estruturas a ele vinculadas, deve-se considerar, nas fases de projeto, construção e operação/manutenção, medidas e soluções que visem eliminar ou controlar patologias como infiltrações e falhas nos sistemas de impermeabilização, corrosão de armadura, fissuras em geral, falhas em juntas e seus elementos de vedação e proteção, falhas e degradação de elementos auxiliares de suporte do revestimento, falhas e degradação de elementos de drenagem do maciço, lixiviação do concreto, degradação de elementos de ligação no caso de revestimentos segmentados, degradação de elementos de fixação e suporte de equipamentos, entre outras (...)”<sup>42</sup>.

### 1.1.9 Existência de tráfego em um ou dois sentidos

De acordo com o *Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels – Civil Elements*, exceto por razões especiais ou manutenção, o tráfego em dois sentidos em um único “tubo” deve ser evitado<sup>43</sup>. Por razões óbvias, a exaustão e ventilação é prejudicada, pois há a recirculação do movimento do ar em função do sentido de tráfego dos veículos (e de seu respectivo sistema de ventilação). Apesar disso, os túneis devem ser projetados de forma a serem capazes de funcionar como túneis bidirecionais, ainda que em estruturas independentes. Isso se justifica, por exemplo, no caso de necessidade de fechamento de uma das direções, inclusive por razões de manutenção de rotina. Assim, é necessário um acesso que atenda à esta possível bipolaridade (reversibilidade), com um sistema de ventilação e sinalização adaptável às diferentes situações.

Segundo o material técnico desenvolvido pelo *U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration*, nas entradas dos túneis “deve ser necessário estender a parede divisória das vias em sentidos opostos para se reduzir a recirculação dos poluentes da saída do túnel em direção à entrada (do túnel)<sup>44</sup>.

Neste contexto, um caso clássico na cidade do Rio de Janeiro ocorreu, aliás, em um de seus mais antigos túneis, o túnel Santa Bárbara, projetado na década de 1920<sup>45</sup> e construído entre 1949 e 1963. Em 1964, foi inaugurado parcialmente (em somente uma pista, a outra foi aberta no ano seguinte).

Era, naquela época, o maior túnel da cidade (1.357 m) e “considerado o mais moderno da América Latina. Foi o primeiro a demandar a criação de equipes de operação, monitoramento e cuidados especiais na administração (...). Também foi o primeiro a contar com sistema de ventilação e exaustão, aparelhagem de radar, contagem de veículos, sinalização luminosa, recebimento independente de eletricidade, geradores de emergência e circuito fechado de TV para monitorar enguiços e acidentes”<sup>46</sup>.

A indesejável situação acima descrita (“o tráfego em dois sentidos em um único “tubo””) perdurou por mais de duas décadas, até o equipamento ser reformado (emblematicamente) para a Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e o Desenvolvimento, realizada em junho de 1992 no Rio de Janeiro, com o objetivo de conciliar desenvolvimento e proteção dos ecossistemas da Terra.

Neste contexto, Celestino (et al.) comenta:

“Devido ao enorme fluxo de veículos, o Túnel Santa Bárbara foi o primeiro a sofrer sérios problemas de qualidade do ar, tornando-se o mais poluído da cidade do Rio de Janeiro. Em 1992, para atenuar os efeitos da poluição atmosférica e sonora, colocou-se uma parede divisória pré-moldada entre as duas pistas e ventilação longitudinal independente em cada uma. Nesse processo, também se contemplou a instalação tanto de um sistema de iluminação quanto de novos ventiladores, controlados por computadores, para complementar a exaustão”<sup>47</sup>.

Segundo relato do documento emitido pela *United Nations* (2001), no caso de um sinistro que obrigue “o fechamento prolongado de uma das direções de determinado túnel com dois tubos, deve ser realizada uma análise relativa à segurança para que seja decidida a utilização da outra direção para um tráfego bidirecional. Para novos túneis, itinerários alternativos devem ser planejados, através de projetos de túneis com dois tubos que permitam o uso bidirecional temporário em cada tubo”<sup>48</sup>.

#### 1.1.10 Aclives ou declives, no interior do túnel

De acordo com a NBR-15661/2009: não deve se permitir “declives longitudinais superiores a 5% nos novos túneis”:

“Nos túneis com declives superiores a 3%, devem ser tomadas e registradas medidas adicionais para melhorar a segurança do sistema, como, por exemplo, a inclusão do sistema DAI, rampa de escape na saída do túnel e ampliação na potência de incêndio”<sup>49</sup>.

Já o *U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration* (2009), estabelece que “preferencialmente as inclinações não devam exceder 4%, embora reconheça que (inclinação de) 6% tem sido utilizada quando necessária”<sup>50</sup>.

#### 1.1.11 Características físicas das rodovias à montante e à jusante (ao túnel)

De acordo com o documento emitido pela *United Nations* (2001), no sentido longitudinal, “o número de faixas de rolamento deve ser mantida no interior e no exterior dos túneis”<sup>51</sup>.

Segundo o *Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels – Civil Elements*:

“Os túneis para veículos automotivos devem ter pelo menos a mesma capacidade de tráfego das vias comuns. Estudos sugerem que no túnel onde o tráfego é controlado, a demanda de fluxo é maior que nas vias comuns (sem controle) indicando que a redução do número de pistas pode ser perigosa”<sup>52</sup>.

A publicação Directiva 2004/54/CE, Jornal oficial da União Européia (2004), detalha um pouco mais esta característica, da seguinte forma:

“Com exceção da faixa de rolamento de emergência, (...) qualquer alteração do número de faixas deverá ocorrer a uma distância suficiente a montante da entrada do túnel; esta distância deve corresponder, pelo menos, à distância percorrida em 10 segundos por um veículo a circular à velocidade máxima autorizada. Quando as circunstâncias geográficas não permitirem respeitar este valor, devem ser tomadas medidas suplementares e/ou reforçadas para aumentar a segurança”<sup>53</sup>.

Outrossim, a visualização nos arredores do túnel e da entrada propriamente dita é importante para alertar o condutor sobre a iminência de chegada a um ambiente diverso com níveis de iluminação particulares. Desta forma, pode se reduzir a ocorrência de acidentes.

#### 1.1.12 Características da sinalização das rodovias à montante, no interior e à jusante (ao túnel)

É fundamental que haja um eficiente e coerente sistema de sinalização nas vias, - em geral, expressas, - que concernem aos túneis. O confinamento característico dos túneis agrava a limitação da visualização dos eventos a jusante (ao túnel) e demandam um maior rigor nas sinalizações horizontais, verticais e semaforicas. Uma precaução importante é a utilização de sinalização luminosa de conteúdo variável que alerte para as situações de perigo, opções de trajeto mais conveniente, pistas interrompidas, obras em curso etc. Em alguns países, as indicações de velocidade máxima podem ser alteradas conforme a necessidade que se apresente, a fim de se manter uma velocidade constante (ainda que reduzida) e se evitar a paralisação completa dos veículos (que, por evento inercial, pode provocar ou agravar congestionamentos, por exemplo).

1.1.13 Existência de alternativas de rota de resgate, socorro e fuga, além de áreas de segurança para espera por socorro, dotada de instrumentos para a prevenção de acidentes e de intoxicação

De acordo com o *U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration*, “apesar dos pedestres não serem usualmente permitidos em túneis rodoviários, passeios [de no mínimo 0,7 m, de largura,] são necessários para possibilitar a saída de emergência e o acesso de pessoal de manutenção”<sup>54</sup>.

Segundo a *NFPA 502* (2008), deve ser prevista uma saída de emergência a cada 300 m em ambiente fechado com taxa de isolamento de incêndio de no mínimo duas horas<sup>55</sup>.

Onde os túneis são divididos por uma construção (ou divisória), passagens de pedestres no meio - entre as duas partes, - podem ser utilizadas como saídas de emergência.

Os seguintes requisitos devem ser atendidos:

- a) O acesso de pedestres às saídas alternativas não deve exceder 200 m;
- b) Um passeio de largura mínima de 1,12 m deve ser previsto em cada lado da passagem de pedestres:

- b.1) Os passeios devem ser protegidos do tráfego por meio-fios, mudanças de nível e barreiras.

- b.2) Os passeios devem ser contínuos em toda a extensão do túnel.

- b.3) Os passeios elevados devem ter guarda-corpos (...).

A *NFPA 502* determina as formas de funcionamento das portas de acesso às saídas de emergência: a) sentido de abertura em direção à saída; b) no caso de portas de correr, a necessidade de indicação desta característica; c) resistência ao fogo superior à 1 hora e meia; d) força máxima necessária à abertura das portas de 222 N; e) desenho que garanta a diferença de pressão entre as partes positivas e negativas.

O documento emitido pela *United Nations* (2001) prevê baias em túneis, “em intervalos entre 500 m e 1.000 m”<sup>56</sup>.

O documento elaborado pela União Européia (2004), porém, dá os seguintes parâmetros:

a) “Nos novos túneis com dois sentidos de extensão superior a 1 500 m e com um volume de tráfego superior a 2 000 veículos por faixa, devem ser previstas [bairas] de emergência, a intervalos não superiores a 1 000 m, se não estiverem previstas faixas de emergência.

b) Nos túneis existentes com dois sentidos de extensão superior a 1 500 m e com um volume de tráfego superior a 2 000 veículos por faixa em que não existam faixas de emergência, deve ser avaliada a viabilidade e eficácia da construção de [bairas] de emergência.

c) Caso as características de construção do túnel não permitam a instalação de [bairas] de emergência ou apenas a permitam a um custo excessivo, não é obrigatória a instalação de tais áreas se a largura total do túnel destinada à circulação de veículos, excluídas as zonas sobrelevadas e as faixas de trânsito normal, for de largura igual ou superior à de uma faixa de trânsito normal”<sup>57</sup>.

O mesmo relatório determina que:

d) Quando existirem saídas de emergência, a distância entre duas saídas de emergência não deve ser superior a 500 m.

e) Devem ser utilizados meios adequados, como portas, para impedir a propagação [da fumaça] e do calor para dentro das vias de evacuação por trás das saídas de emergência, por forma a que os utentes (usuários) do túnel alcancem o exterior e os serviços de emergência possam aceder ao túnel.

#### 1.1.14 Tempo estimado para atendimento ao sinistro

Segundo documento publicado pela *United Nations* (2001):

“É recomendado que as autoridades de incêndio e outros serviços de emergência estejam incluídos nos estágios de planeamento, quando se iniciam os aspectos relacionados com a segurança. Os primeiros dez minutos são decisivos para a segurança dos usuários, no caso de ocorrência de um evento (em particular de um incêndio), e isso significa que a detecção prematura [do incidente] é da mais alta importância”.

## 1.2 Formas de uso

### 1.2.1 Volume de tráfego por galeria por faixa de horário

A principal referência ao volume de tráfego obtida nesta pesquisa é a de que:

“(…) No caso de túneis em fase de projeto, se uma previsão [com antecedência de] 15 anos indicar que o volume de tráfego irá exceder 10 000 veículos por dia e por faixa, deverá estar operacional, no momento em que este valor for ultrapassado, um túnel de galeria dupla com um só sentido em cada galeria”<sup>58</sup>.

### 1.2.2 Presença de veículos pesados (caminhões e ônibus) e motocicletas e suas consequências

O documento elaborado pela *United Nations* (2001) considera algumas situações particulares para veículos pesados:

- a) Além de extintores manuais de incêndio, há a necessidade de se considerar estudos para que eles estejam equipados com detectores de calor e possivelmente equipamentos automáticos de extinção de fogo.
- b) Os tanques de combustíveis devem ser suficientemente resistentes ao fogo.

Conforme será visto nas seções seguintes, os veículos pesados são, em geral, movidos à diesel e em função disso há uma série de poluentes envolvidos mais nocivos que no caso dos veículos leves: SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e MP, por exemplo. A presença de veículos pesados deve ser permitida somente sob forte controle e cuidado técnico.

### 1.2.3 Proteção contra ruídos

Em função do isolamento, da geometria convergente (côncava) e das superfícies reverberadoras (paralelas e, muitas vezes, lisas) é desejável que haja alguma forma de atenuação de ruído em túneis. Neste aspecto, contudo, talvez tão premente quanto o impacto para os usuários e funcionários no interior destas longas caixas sonoras, é fundamental estar atento à biocenose próxima (externa) que, a despeito das outras variáveis consideradas, é fortemente afetada pelo excesso de ruído.

Alguns materiais com capacidade de absorção são utilizados para compensar as características físicas dos túneis (e devem ser capazes de resistir à temperaturas de 250°C)<sup>59</sup>. Além disso, a irregularidade áspera das superfícies de muitos túneis minimiza a reverberação dos sons advindos dos veículos.

Costa Pinto (2004), em dissertação de mestrado intitulada “análise das emissões veiculares em regiões urbanas e metodologia para quantificação de poluentes”, argumenta que as principais fontes de ruído em veículos automotores se relacionam com o escapamento, sobretudo no que diz respeito aos veículos pesados (ciclo Diesel) e motocicletas<sup>60</sup>. Ou seja, quando é possível a restrição de circulação destes meios de transporte, há naturalmente uma redução considerável de ruídos nos interiores dos túneis.

Em 2006, o IBAMA passou à CETESB a atribuição para a homologação de emissões de ruídos, após 13 anos da criação do Programa Nacional de Controle de Ruído Veicular. Este programa teve como base as Resoluções CONAMA nº 01 e nº 02 de 1993, e atualizado pelas Resoluções CONAMA nº 08 de 1993, nº 17 de 1995, nº 20 de 1996, nº 242 de 1998, nº 268 e nº 272 de 2000. Ainda que não seja uma providência específica para a gestão de túneis, a limitação de emissão de ruídos, certamente, causou menor impacto nos túneis. Por exemplo, um fato paralelo (e quase coincidente) que contribuiu diretamente para a redução de ruído em túneis, por exemplo, é que um caminhão fabricado em 1993 emitia um nível de ruído equivalente a oito caminhões produzidos em 2006 e “[o nível de ruído de] um automóvel [atual equivale aos níveis de ruído emitidos por] quatro [automóveis] daquela época”. Ou seja, um automóvel atual (2006) é quatro vezes mais silencioso do que um outro fabricado em 1993. Possivelmente, este dado por si, já reduz a gravidade e a premência de adoção de medidas relacionadas à gestão ambiental no que tange aos ruídos de veículos automotores<sup>61</sup>.

Os limites de ruído para os veículos novos:

Tabela 3 – Limites de ruído para os veículos novos

<http://www.cetesb.sp.gov.br/Ar/emissoes/ruído.asp> , acesso: agosto/2010

Categ.	Descrição		Nível de Ruído - dB (A)		
			Motor Ciclo Otto	Motor Ciclo Diesel	
				Inj. Direta	Inj. Indireta
a	Veículo passageiro até 9 lugares		74	75	74
b	Veículo de passageiro com mais de 9 lugares de carga: de tração ou de uso misto	PBT até 2000 kg	76	77	76
		PBT entre 2000 kg e 3500 kg	77	78	77
c	Veículo de passageiro ou de uso misto com PBT maior que 3500 kg	Potência máxima menor que 150 kW	78	78	78
		Potência máxima igual ou superior a 150 kW	80	80	80
d	Veículo de carga ou de tração com PBT maior que 3500 kg	Potência máxima menor que 75 kW	77	77	77
		Potência máxima entre 75 kW e 150 kW	78	78	78
		Potência máxima igual ou superior a 150 kW	80	80	80

Os limites de ruídos para motocicletas e similares:

Tabela 4 – Limites de ruídos para motocicletas e similares

<http://www.cetesb.sp.gov.br/Ar/emissoes/ruído.asp> , acesso: agosto/2010

Categoria	Nível de ruído - dB (A)
Até 80 cm	75
81 cm a 125 cm	77
126 cm a 175 cm	77
176 cm a 350 cm	80
Acima de 350 cm	80

### 1.3 Sistema de ventilação e exaustão

Em alguns países, é estabelecido um limite físico ou analítico para a adoção exclusiva de ventilação natural em túneis:

- “Alemanha: entre 350 m e 700 m, não há necessidade de saídas de emergência e ventilação mecânica;
- França: são necessárias medidas de controle de fumaça, a partir de:
  - Urbano: 300 m.
  - Não-urbano: 500 m.
  - Não-urbano, caso o tráfego seja superior a 2.000 veículos por dia: 800 a 1.000 m.
- Reino Unido: acima de 400 m, mas requer justificativa;
- Holanda: sob análise de riscos;
- EUA: acima de 240 m”<sup>62</sup>.

Há diversas pesquisas em relação às emissões atmosféricas em túneis que são direta e exclusivamente relacionadas com a questão da exaustão e ventilação. Especificamente, em túneis de pequena extensão, comumente se prescinde de ventiladores, na rotina de funcionamento. Contudo, sobretudo no caso dos grandes túneis, além das ações de ventilação e exaustão para a redução das concentrações de poluentes a níveis aceitáveis, há necessidade de “um sistema de ventilação para controle da fumaça e dos gases quentes que são gerados durante um incêndio em um túnel”<sup>63</sup>.

Ou seja, em linhas gerais, como é de se supor, “sistemas de ventilação são instalados em túneis rodoviários para manter um nível aceitável de poluentes gerados pelo tráfego” (...) e “são projetados para controlar os níveis dos contaminantes de diversas formas, empregando ventiladores centrais ou ventiladores locais”<sup>64</sup>.

Desta forma, deve-se entender que:

“Um sistema de ventilação de emergência deve ser [previsto] para controlar a fumaça e para prover ar fresco para a evacuação de usuários e para dar suporte ao atendimento de emergência. O sistema de ventilação de emergência é frequentemente o sistema de ventilação normal operado à alta velocidade. (...) Os ventiladores devem ser conectados à fonte de energia de emergência, devido à [possível] falha do sistema de força primário”<sup>65</sup>.

O documento *Fire Safety Guidelines for Road Tunnels* conclui, na seção dedicada ao controle de fumaça, que o principal objetivo nestes casos emergenciais é criar condições para que “os serviços de emergência entrem no túnel, organizem a evacuação, resgatem os motoristas e iniciem estratégias de combate ao incêndio para extinção do fogo”<sup>66</sup>.

Assim se explica a lógica física da fumaça em incêndios em túneis, segundo testes realizados: “as forças cinéticas de um incêndio elevam a fumaça para as superfícies superiores do túnel. Se não impedida, a fumaça se resfriará e se espalhará pelo diâmetro interno do túnel. Durante testes com fumaça quente (superior à 2,5 MW) os traços se espalham entre 100 e 150 m do foco do incêndio. (...) Para conter o fluxo natural da fumaça, os efeitos cinéticos da velocidade do ar longitudinal podem ser empregados e/ou a fumaça pode ser extraída em pontos ao longo do túnel”<sup>67</sup>.

A publicação *Road Tunnels: Vehicle Emissions and Air Demand for Ventilation* estabelece uma diretriz para a determinação da quantidade de ar fresco (V) a ser introduzida em determinado túnel. Este parâmetro depende do número de veículos [leves] que trafegam pelo túnel ( $n_{veh}$ ), a quantidade média de emissão por veículo e a concentração máxima admissível para esta determinada emissão e a concentração do ar no ambiente:

$$V = n_{veh} \cdot Q \cdot \frac{1}{C_{adm} - C_{amb}}$$

$$n_{veh} = (M \cdot L) / v \text{ para } v > 0 \text{ km/h}$$

$$n_{veh} = D \cdot L \text{ para } v = 0 \text{ km/h (Vide quadro a seguir para densidade de tráfego D).}$$

Onde:

V = Volume (m<sup>3</sup>/h);

$n_{veh}$  = Número de veículos;

D = Densidade de tráfego (veh/km);

Q = Emissão por veículo (g/h, m<sup>2</sup>/h);

M = Tráfego por hora;

L = Comprimento;

v = Velocidade dos veículos;

$C_{adm}$  = Concentração admissível;

$C_{amb}$  = Concentração ambiental.

Tabela 5 - Média de pico de densidade de tráfego (pcu/km) - Fluxo de tráfego (pcu/km) por faixa de rolamento. / PIARC (World Road Association) – Technical Committee on Road Tunnel Operation (C5). *Road tunnels: Vehicle emissions and air demand for ventilation*, p. 11, 2004.

		Média de pico de densidade de tráfego (pcu/km) Fluxo de tráfego (pcu/km) por faixa de rolamento			
		TÚNEL URBANO			
		Tráfego Unidirecional		Tráfego Bidirecional	
	v (km/h)	pcu/km	pcu/h	pcu/km	pcu/h
Tráfego fluido	60	33	2000	25	1500
Tráfego congestionado	10	100	1000	85	850
Parado	0	165	-	165	-

Para que se compreenda o papel dos veículos automotores na produção de poluentes, de acordo com a pesquisa desenvolvida pela PIARC (2008), denominada *Road tunnels: a guide to optimising the air quality impact upon the environment*.

- a) “Na Suécia, as emissões por transporte rodoviário contribuem com aproximadamente 45% das emissões nacionais de óxido de nitrogênio.
- b) Na Holanda, aproximadamente de 5 à 6% das contribuições por MP<sub>10</sub> é atribuído aos veículos pesados rodoviários.
- c) Partículas do escapamento são emitidas como partículas ultra-finas com grande concentração em dimensões abaixo de 0,2 µm. Através da coagulação e da acumulação o tamanho das partículas aumenta, mesmo decorrido tempo e distância da fonte. Partículas com dimensões entre 0,1 e 1 µm são frequentemente transportadas por longas distâncias”<sup>68</sup>.

Para pontuar dados locais, o Instituto Estadual do Ambiente (INEA), em relação à Região Metropolitana do Rio de Janeiro, relata:

“Entre as diversas fontes que contribuem para a degradação da qualidade do ar na Região, os veículos se destacam, contribuindo com a parcela mais significativa de emissão de poluentes, ou seja, 77% dos poluentes emitidos são provenientes do tráfego veicular”<sup>69</sup>.

Preliminarmente ao desenvolvimento da pesquisa nesta seção, contudo, deve-se desenvolver a definição de “poluente atmosférico”, em suas múltiplas características.

De acordo com a CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo), “considera-se poluente qualquer substância presente no ar e que, pela sua concentração, possa torná-lo impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde, causando inconveniente ao bem estar público, danos aos materiais, à fauna e à flora ou prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade e às atividades normais da comunidade”<sup>70</sup>.

A Resolução CONAMA nº 03/90, entretanto, por ter abrangência nacional e ser um documento oficial e público, será analisada mais detidamente em relação à definição e pertinência da expressão “poluente”.

Objetivamente, de acordo com a referência acima, entende-se como poluente atmosférico qualquer forma de matéria ou energia com intensidade e em quantidade, concentração, tempo ou característica em desacordo com os níveis estabelecidos, e que tornem ou possam tornar o ar:

- impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde;
- inconveniente ao bem-estar público;
- danoso aos materiais, à fauna e flora;
- prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade e às atividades normais da comunidade.

De acordo ainda com o 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.

Como premissa de limite de concentração de poluentes com efeitos nocivos, será considerado o padrão primário de qualidade do ar. Em função desta assertiva, ficam estabelecidos, através da Resolução CONAMA nº 03/90, os seguintes padrões de qualidade do ar:

**I - Partículas Totais em Suspensão:**

a) Padrão Primário:

- 1 - concentração média geométrica anual de 80 (oitenta) microgramas por

metro cúbico de ar.

2 - concentração média de 24 (vinte e quatro) horas de 240 (duzentos e quarenta) microgramas por metro cúbico de ar, que não deve ser excedida mais de uma vez por ano.

**II – Fumaça:**

a) Padrão Primário:

1 -concentração média aritmética anual de 60 (sessenta) microgramas por metro cúbico de ar.

2 -concentração média de 24 (vinte e quatro) horas de 150 (cento e cinquenta) microgramas por metro cúbico de ar, que não deve ser excedida mais de uma vez por ano.

**III - Partículas Inaláveis:**

a) Padrão Primário e Secundário:

1- concentração média aritmética anual de 50 (cinquenta) microgramas por metro cúbico de ar.

2 - concentração média de 24 (vinte e quatro) horas de 150 (cento e cinquenta) microgramas por metro cúbico de ar, que não deve ser excedida mais de uma vez por ano.

**IV - Dióxido de Enxofre:**

a) Padrão Primário:

1- concentração média aritmética anual de 80 (oitenta) microgramas por metro cúbico de ar.

2- concentração média de 24 (vinte e quatro) horas de 365 (trezentos e sessenta e cinco) microgramas por metro cúbico de ar, que não deve ser excedida mais de uma vez por ano.

**V - Monóxido de carbono:**

a) Padrão Primário e Secundário:

1- concentração médio de 8 (oito) horas de 10.000 (dez mil) microgramas por metro cúbico de ar (9 ppm), que não deve ser excedida mais de uma vez por ano.

2 - concentração média de 1 (uma) hora de 40.000 (quarenta mil) microgramas por metro cúbico de ar (35 ppm), que não deve ser excedida mais de uma vez por ano.

**VI - Dióxido de Nitrogênio:**

a) Padrão Primário:

1 - concentração média aritmética anual de 100 (cem) microgramas por metro cúbico de ar.

2 - concentração média de 1 (uma) hora de 320 (trezentos e vinte) microgramas por metro cúbico de ar.

No caso de monitoramento da qualidade do ar em túneis, é possível até mesmo se assumir o Nível de Atenção como referência, com o objetivo de se evitar que se chegue ao Nível de Alerta e posteriormente, com o agravamento da situação, ao Nível de Emergência. Padrões estes estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 03/90. Deve-se sublinhar que esta resolução é um instrumento genérico orientador para a qualidade do ar, com vistas ao monitoramento que coíba possíveis efeitos danosos à vida, à matéria ou ao meio-ambiente.

Os padrões da Resolução CONAMA nº 03/90 para o Nível de Atenção são:

§ 5º - O Nível de Atenção será declarado quando, prevendo-se a manutenção das emissões, bem como condições meteorológicas desfavoráveis à dispersão dos poluentes nas 24 (vinte e quatro) horas subseqüentes, for atingida uma ou mais das condições a seguir enumeradas:

1. concentração de dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), média de 24 (vinte e quatro) horas, de 800 (oitocentos) microgramas por metro cúbico;
2. concentração de partículas totais em suspensão, média de 24 (vinte e quatro) horas, de 375 (trezentos e setenta e cinco) microgramas por metro cúbico;
3. produto, igual a 65x10<sup>3</sup>, entre a concentração de dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) e a concentração de partículas totais em suspensão - ambas em microgramas por metro cúbico, média de 24 (vinte e quatro) horas;
4. concentração de monóxido de carbono (CO), média de 08 (oito) horas, de 17.000 (dezesete mil) microgramas por metro cúbico (15 ppm);
5. concentração de ozônio, média de 1 (uma) hora, de 400 (quatrocentos) microgramas por metro cúbico;
6. concentração de partículas inaláveis, média de 24 (vinte e quatro) horas, de 250 (duzentos e cinquenta) microgramas por metro cúbico;
7. concentração de fumaça, média de 24 (vinte e quatro) horas, de 250 (duzentos e cinquenta) microgramas por metro cúbico.
8. concentração de dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>), média de 1 (uma) hora, de 1130 (hum mil cento e trinta) microgramas por metro cúbico.

Na realidade, devido ao caráter de confinamento dos túneis, estes padrões (do Nível de Atenção) são facilmente atingidos, embora, admite-se, possam não representar algo destacadamente significativo, pois são ambientes de uso (supostamente) transitório, com permanência provisória. Por outro lado, uma vez atingido o Nível de Alerta, deve se recorrer às medidas mitigadoras de poluição, de forma a recuperar a qualidade ambiental de imediato.

Neste caso, os padrões estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 03/90, correspondentes ao Nível de Alerta, são os seguintes:

“§6º - O Nível de Alerta será declarado quando, prevendo-se a manutenção das emissões, bem como condições meteorológicas desfavoráveis à dispersão de poluentes nas 24 (vinte e quatro) horas subseqüentes, for atingida uma ou mais das condições a seguir enumeradas:

1. concentração de dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), média de 24 (vinte e quatro) horas, 1.600 (um mil e seiscentos) microgramas por metro cúbico;
2. concentração de partículas totais em suspensão, média de 24 (vinte e quatro) horas, de 625 (seiscentos e vinte e cinco) microgramas por metro cúbico;
3. produto, igual a 261 x 103, entre a concentração de dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) e a concentração de partículas totais em suspensão - ambas em microgramas por metro cúbico, média de 24 (vinte e quatro) horas;
4. concentração de monóxido de carbono (CO), média de 8 (oito) horas, de 34.000 (trinta e quatro mil) microgramas por metro cúbico (30 ppm);
5. concentração de ozônio, média de 1 (uma) hora, de 800 (oitocentos) microgramas por metro cúbico;
6. concentração de partículas inaláveis, média de 24 (vinte e quatro) horas, de 420 (quatrocentos e vinte) microgramas por metro cúbico.
7. concentração de fumaça, média de 24 (vinte e quatro) horas, de 420 (quatrocentos e vinte) microgramas por metro cúbico.
8. concentração de dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>), média de 1 (uma) hora de 2.260 (dois mil, duzentos e sessenta) microgramas por metro cúbico”.

A título ilustrativo, à seguir, são listados alguns dos principais poluentes atmosféricos relacionados ao funcionamento dos veículos automotores como: SO<sub>x</sub>, MP, CO e NO<sub>x</sub> e suas principais características, incluindo consequentes sintomas ocasionados por concentrações consideradas inadequadas à saúde<sup>71</sup>:

- **SO<sub>x</sub>**: Os óxidos de enxofre resultam da oxidação do enxofre existente no combustível. Podem provocar tosse, sensação de falta de ar, respiração ofegante, rinofaringites, diminuição da resistência orgânica às infecções, bronquite crônica e enfisema pulmonar.
- **Material Particulado (MP)**: É constituído de partículas diminutas, que se formam da queima incompleta dos combustíveis e de seus aditivos bem como do desgaste de pneus e freios. As partículas inaláveis podem ainda ser classificadas como partículas inaláveis finas – MP<sub>2,5</sub> (<2,5µm) e partículas inaláveis grossas (2,5 a 10µm). Os particulados finos apresentam uma grave ameaça à saúde ao se instalarem nos tecidos pulmonares e podem atuar a nível local, regional e continental.
- **CO**: O monóxido de carbono resulta da oxidação parcial do carbono. Esta substância é reconhecida pelo efeito letal quando inalada, pois combina com a hemoglobina do sangue, diminuindo a capacidade de oxigenação do cérebro, do coração e de outros orgânicos.

O CO é assim é descrito pela PIARC (2008):

“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 o oxigênio. O CO, portanto, substitui o oxigênio em humanos, formando carboxihemoglobina (COHb) e interfere no metabolismo humano”<sup>72</sup>.

- **NO<sub>x</sub>**: Os óxidos de nitrogênio resultam da combinação do oxigênio e nitrogênio presentes no ar admitido pelo motor, em condições de altas temperaturas e pressões. Os NO<sub>x</sub> podem provocar irritação e constricção das vias respiratórias, diminuem a resistência orgânica, participam do desenvolvimento do enfisema pulmonar (...).

De acordo com a Resolução CONAMA nº 03/90, na seção relativa aos “critérios para episódios agudos de poluição do ar”, os parâmetros a serem seguidos são os seguintes<sup>73</sup>:

Tabela 6 – Parâmetros gerais - CONAMA nº 03/90

PARÂMETROS	ATENÇÃO	ALERTA	EMERG.
dióxido de enxofre ( SO <sub>2</sub> ) (µg/m <sup>3</sup> ) - 24h	800	1600	2100
partículas totais em suspensão (µg/m <sup>3</sup> ) - 24h	375	625	875
monóxido de carbono (CO) (ppm) - 8h	15	30	40

Devido às características de confinamento dos túneis, é importante reforçar que os limites mostrados neste estudo não consideram certos poluentes frequentes nas grandes cidades, mas não corriqueiros em túneis, já que alguns destes poluentes são sujeitos às condicionantes atmosféricas (externas) para se efetivarem de forma mais completa.

No túnel Rebouças, em pesquisa realizada pela PETROBRÁS, constata-se, por exemplo, uma maior concentração da ordem de dez vezes de NO do que de NO<sub>2</sub>.<sup>74</sup>

Por outro lado, a concentração de NO<sub>2</sub> nas grandes cidades é explicada principalmente pelo seguinte motivo:

a) NO<sub>2</sub>, resultado da fotooxidação do NO:

“Atividades antrópicas são as principais responsáveis pela emissão de nitrogênio reativo para a atmosfera, especialmente óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub> = NO + NO<sub>2</sub>) e amônia (NH<sub>3</sub>). Dentre os óxidos de nitrogênio, o principal composto emitido é o NO, o qual é rapidamente oxidado a NO<sub>2</sub>. Processos diversos de combustão são as principais fontes de NO<sub>x</sub> para a atmosfera (...). Em áreas urbanas isso se deve ao grande e crescente número de veículos de transporte individual (...).”<sup>75</sup>



b) O<sub>3</sub> em níveis troposférico, resultado de reações que envolvem compostos orgânicos voláteis (COV) e óxidos de nitrogênio (NO), em presença de luz solar.

### 1.3.1 Sistema de Ventilação e Exaustão – NBR-15661/2009

A NBR-15661/2009 determina as características do sistema de ventilação dos túneis destinados a veículos automotivos, em função de suas particularidades, e devem atender às seguintes características:

a) Ventilação Natural (para túneis com comprimento  $\leq 500\text{m}$ ):

Utilizado para túneis de pequenos comprimentos, dependendo, no entanto, do tipo de tráfego unidirecional/bidirecional, da inclinação e do volume do tráfego. A ventilação natural pode ser adotada para a renovação do ar.

b) Ventilação longitudinal (por jatos-ventiladores) até 3.000 m:

A ventilação longitudinal mecanizada produz um fluxo de ar uniforme ao longo de toda a extensão do túnel, sempre na mesma direção. Este tipo de ventilação é obtido utilizando-se em geral jatos-ventiladores. Este sistema é adequado para túneis com fluxo de veículos unidirecional, podendo ser utilizado em situações especiais em túneis com fluxo de veículos bidirecional de pequeno comprimento.

c) Ventilação forçada, semilongitudinal (por ventiladores axiais), horizontais e verticais:

Na ventilação forçada, tipo semilongitudinal, existe um poço ou abertura intermediária, provido de equipamentos de ventilação, por onde o ar é exaurido ou insuflado no interior do túnel.

Os emboques ou aberturas nas extremidades do túnel são as tomadas ou saídas do ar, conforme o tipo de ventilação adotada e é aplicável para qualquer extensão de túnel.

Para este sistema, em situação de emergência, devem ser considerados:

- ventiladores reversíveis (fluxo);
- velocidade do ar em emergência;
- tempo necessário 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.

d) 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.

e) Potência e volume de fumaça gerada em um incêndio:

“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<sup>3</sup>/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 10,0 m/s.

Quando a potência de incêndio for superior a 30MW, a circulação [do] veículo deve ser realizada após a análise de risco específica e com circulação isolada dos demais veículos”<sup>76</sup>.

A presente norma faz referência ainda ao:

- “Controle de fumaça: O projeto deve prever um sistema de controle de fumaça adequado às características do túnel, para extração de fumaça, possibilitando uma evacuação segura dos usuários, deve permitir que as brigadas de incêndio se aproximem o máximo possível do local e ainda deve oferecer a oportunidade de controle e extinção do incêndio.

A atuação do sistema manual ou automático deve minimizar os efeitos adversos do incêndio no interior do túnel, criando um maior tempo para evacuação dos usuários, manutenção das proteções das estruturas e diminuição dos riscos de uma prolongada interrupção dos negócios pela propagação do incêndio”<sup>77</sup>.

### 1.3.2 Sistema de ventilação e exaustão - NFPA 502 (2008)<sup>78</sup>

Neste segmento, um resumo da norma americana *NFPA 502* no que concerne à disciplina de ventilação e exaustão. Para testagem dos sistemas de ventilação, no caso de incêndio em túneis, foi desenvolvido um programa denominado *Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program (MTFVTP)*<sup>79</sup>, cujas conclusões são objetivamente referenciadas a seguir:

- Sistemas de ventilação longitudinal de túneis:

Um sistema de ventilação longitudinal de túneis que emprega ventiladores de ar é muito eficiente para direcionar a fumaça em incêndio até 100 MW.

Ventiladores localizados à 170pés (51,8m) do foco do fogo foram submetidos às seguintes temperaturas de teste:

- (1) 204°C – 20 MW.
- (2) 332°C – 50 MW
- (3) 677°C – 100 MW.

Velocidades do ar entre 2,54 m/s e 2,95 m/s foram suficientes para evitar o refluxo de fumaça em testes de incêndio entre 10 MW e 100 MW.

- Sistemas de ventilação transversal de túneis:

Em um sistema de ventilação transversal, o ar é fornecido e retirado por exaustão através de dutos. O *MTFVTP* demonstrou que o fluxo de ar longitudinal é um importante fator de gerenciamento e controle do movimento da fumaça e dos gases gerados em um incêndio. A extração e o fluxo de ar longitudinal, quando combinados, podem melhorar a performance do sistema de ventilação de túneis rodoviários para controlar e gerenciar o movimento da fumaça.

- Sistemas de ventilação transversal por zonas múltiplas:

O *MTFVTP* apurou controle sobre a direção e a magnitude do fluxo de ar longitudinal. A taxa de fluxo de 0,155 m<sup>3</sup> continha altas temperaturas de incêndio de 20 MW à distância de 30 m nos níveis mais baixos da pista e fumaça à 60 m.

- Movimento da fumaça e dos gases quentes:

A dispersão da fumaça e dos gases quentes foi grande em função de ventiladores. Camadas de fumaça quente se dispersam bastante rapidamente, em níveis de 490 m a 580 m, nos dois minutos iniciais de um incêndio.

O tempo decorrido para que a fumaça descenda até níveis aceitáveis de segurança sobre a pista depende da intensidade do incêndio e de sua geometria, sobretudo da altura do túnel. No entanto, a norma *NFPA 502*, ao destacar que “a restrição de visibilidade causada pelo movimento da fumaça ocorre mais rapidamente que o aumento da temperatura (ainda que esta seja alta demais para ser debelada)”, pontua a necessidade de existência de um sistema de gerenciamento da fumaça:

“Em túneis rodoviários, o gerenciamento da fumaça necessita da extração direta (da fumaça) ou a geração de velocidade longitudinal no túnel capaz de transportar a fumaça e os gases quentes na direção desejada, para um ponto de extração ou descarte externo ao túnel. Sem um sistema de gerenciamento de fumaça, a direção e o grau de movimento da fumaça e dos gases quentes são determinados pelas dimensões do incêndio, da inclinação (declive ou aclive, se existente) do túnel, das condições anteriores ao incêndio e das condições meteorológicas externas”<sup>80</sup>.

O capítulo 10 da *NFPA 502* também discorre sobre o controle de fumaça em relação a dois tipos de túneis:

A) Túneis com tráfego bidirecional: onde os motoristas podem estar nos dois lados do local do incêndio, os seguintes objetivos devem ser perseguidos:

- a) A estratificação da fumaça não deve ser desfeita.
- b) A velocidade longitudinal do ar deve ser mantida em níveis baixos.
- c) A estratificação da fumaça através de aberturas no teto ou em aberturas altas ao longo do túnel é efetiva e deve ser considerada.
- d)

B) Túneis com tráfego unidirecional: onde os motoristas podem estar adiante do local do incêndio, os seguintes objetivos devem ser perseguidos:

B.1) Sistemas longitudinais:

- Prevenir a reversão pela produção de uma velocidade longitudinal do ar maior que a velocidade crítica na direção do fluxo viário (tráfego).
- Evitar a ruptura das camadas de ar, inicialmente pela não operação dos ventiladores para circulação de ar localizados próximos ao incêndio. Acionar primeiramente os ventiladores distantes.

B.2) Sistemas transversais ou semitransversais reversíveis:

- Maximizar as taxas de exaustão na zona de ventilação que contém o incêndio e minimizar a quantidade de ar externo que é introduzido pelo sistema transversal.
- Criar um fluxo de ar longitudinal na direção do fluxo de veículos através da operação da zona de ventilação (com insuflamento) a frente do incêndio e na seção anterior ao incêndio o máximo de exaustão.

Os ventiladores do sistema de ventilação devem resistir a um tempo mínimo de uma hora a uma temperatura de 250°C, com previsão de redundância de equipamentos.

### 1.3.3 Sistema de ventilação e exaustão – U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration

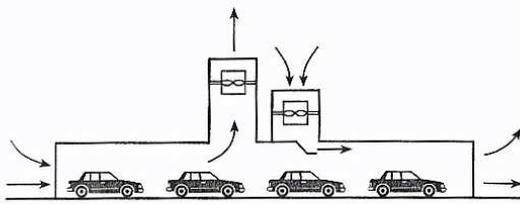
As informações contidas neste documento complementam os dados fornecidos acima. Assim, é relatado que:

“Os dois principais sistemas de ventilação utilizados em túneis são a ventilação longitudinal e ventilação transversal. O sistema longitudinal introduz ar ou o remove do túnel rodoviário, com o fluxo longitudinal do tráfego, em números limitados de pontos como em shafts de ventilação ou portal [de acesso]. Pode haver uma sub-classificação seja utilizando ventiladores ou um sistema central de ventiladores com alta velocidade.

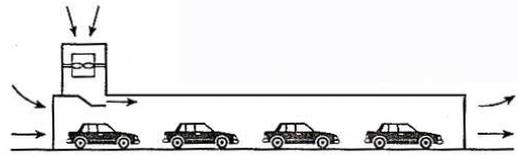
O sistema de ventilação transversal pode ser total ou semi-total. No caso do transversal total, os dutos de ar injetam ar fresco em intervalos regulares, acima, abaixo ou nas laterais do túnel. Dutos de extração de ar e contaminantes são localizados acima ou nas laterais do túnel. No caso de ventilação semi-transversal, o duto de suprimento de ar é eliminado (...). Quando os dutos de insuflamento ou exaustão são utilizados, o fluxo é gerado por ventiladores agrupados em edificações adjacentes”<sup>81</sup>.

No Anexo I da *NFPA 502*, há algumas ilustrações referentes à situações de cortes transversais que se referem ao sistema de ventilação e exaustão de túneis, embora seja ressaltado que este material formalmente não faz parte do referido dispositivo normativo<sup>82</sup>.

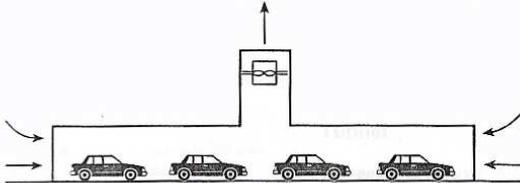
Figura 7 - Sistema de ventilação e exaustão



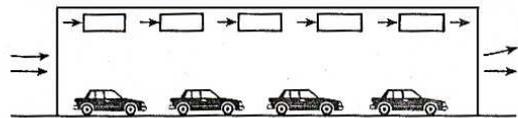
**Sistema de ventilação longitudinal com bico Saccardo e shaft.**



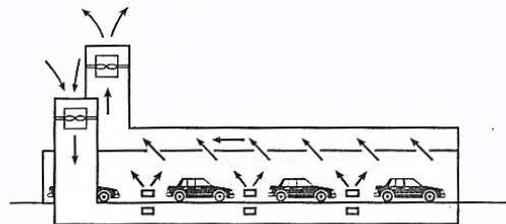
**Sistema de ventilação longitudinal com ventiladores centrais e bico Saccardo**



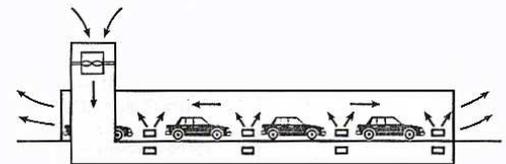
**Sistema de ventilação longitudinal com shaft e ventiladores centrais**



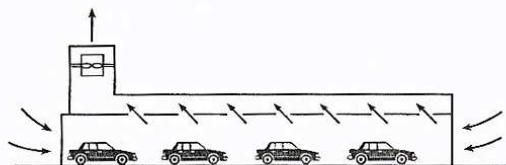
**Sistema de ventilação longitudinal com ventiladores direcionados**



**Sistema de ventilação totalmente transversal**



**Sistema de ventilação semi-transversal**



**Sistema de exaustão semi-transversal**

*National Fire Protection Association (NFPA). NFPA 502 – Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways, Anexo I, 2008.*

#### 1.3.4 Sistema de ventilação e exaustão – Directiva 2004/54/CE do Parlamento Europeu e do Conselho da União Européia

Em linhas gerais, assim são descritas estas diretrizes europeias para o sistema de ventilação em túneis<sup>83</sup>:

a) 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, em média anual].

b) Nos túneis com tráfego em ambos os sentidos e/ou tráfego congestionado num único sentido, só será autorizada a ventilação longitudinal se uma análise de risco (...) demonstrar que a mesma é aceitável e/ou se forem tomadas medidas específicas, tais como uma gestão adequada do tráfego, menores distâncias entre as saídas de emergência, ou extratores de fumaça a intervalos regulares.

c) Nos túneis em que seja necessário um sistema de ventilação mecânico e não seja autorizada a ventilação longitudinal, de acordo com o [item acima] devem ser usados sistemas de ventilação transversal ou semi-transversal. Esses sistemas devem ser capazes de extrair a fumaça em caso de incêndio.

d) Nos túneis de extensão superior a 3.000 m 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 mínimas no que se refere à ventilação:

d.1) instalação de registros de extração de ar e fumaça que possam funcionar separadamente ou em grupos;

d.2) monitoramento permanente da velocidade longitudinal do ar e ajuste do processo de comando do sistema de ventilação (registros, ventiladores, etc.) em conformidade [com os padrões determinados].

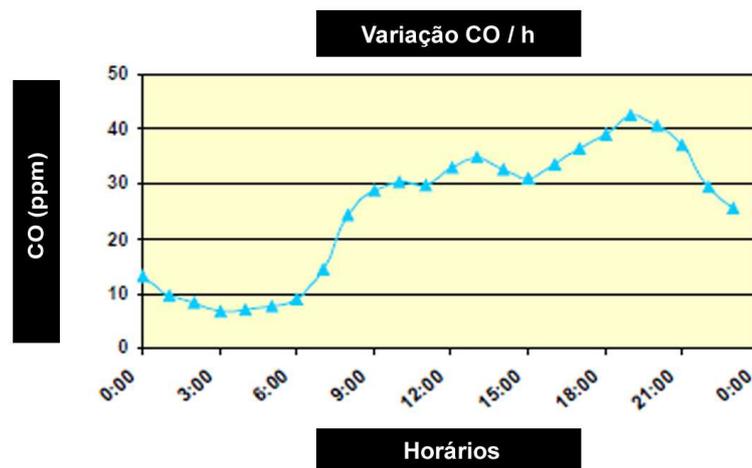
#### 1.3.5 Discussão sobre o sistema de ventilação e exaustão

Objetivamente, devem ser buscadas técnicas e padrões amplamente testados e aprovados, conforme as características particulares do túnel, contexto e região de entorno, e se manter monitoramento constante da qualidade do ar no interior dos túneis, através de automação sensível e adequada.

Almeida<sup>84</sup>, por exemplo, em “estudo do comportamento dos poluentes em ambientes confinados” no ano de 2005, revela que no túnel Rebouças, há 78 ventiladores instalados na parte superior que conduzem o ar na direção do fluxo de veículos. (Estes números serão comentados na seção “Resultados e Considerações Gerais e Específicas”.) O autor, sem destacar dados suplementares ou fontes bibliográficas, relata que, na época de construção do túnel, seria instalado sistema de troca de ar externo “similar aos sistemas usualmente utilizados em túneis americanos”, mas, por razões orçamentárias, esta intenção não foi materializada.

O gráfico a seguir<sup>85</sup> é ilustrativo da ineficiência do sistema de ventilação e exaustão do túnel Rebouças, pois se depreende que há “um vício de cumulatividade” (acumulação) de poluentes ao longo do dia, ao invés de uma dispersão dos poluentes proporcional às emissões verificadas (em função da unidade de tempo):

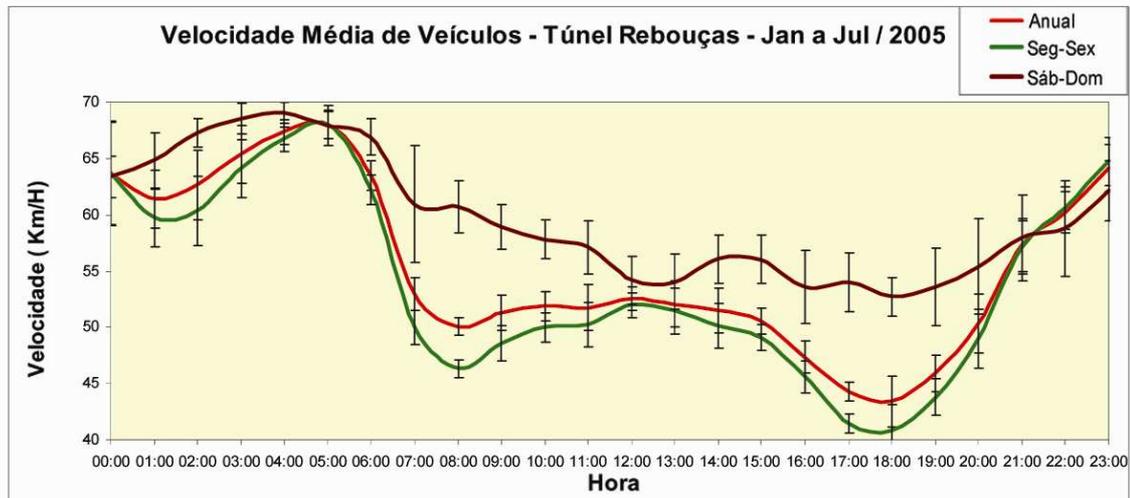
Gráfico 2 – Concentração de CO no túnel Rebouças ao longo do dia



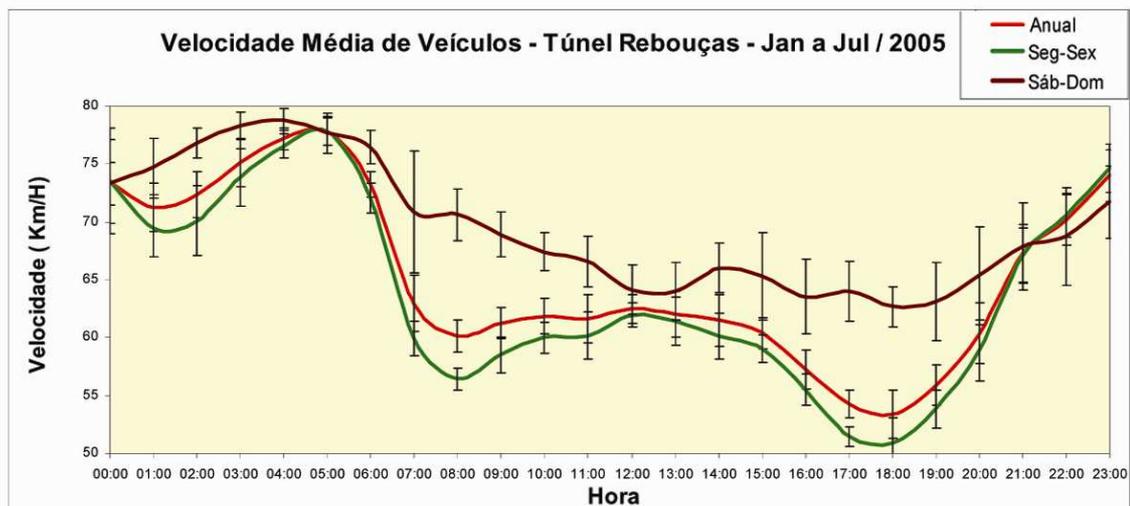
Destaca-se que de acordo com a Resolução CONAMA nº 03/1990, os níveis de concentração de monóxido de carbono (CO), em média de 8 (oito) horas, atingem o Nível de Atenção em 15ppm, o Nível de Alerta em 30ppm e o Nível de Emergência em 40ppm.

A fim de que seja compreendida a compatibilidade entre os níveis de emissão de CO e o fluxo de veículos, serão apresentados os seguintes gráficos:

Gráfico 3 – Velocidade média dos veículos, ao longo do dia, no túnel Rebouças



**Valores mínimos por faixa de velocidade**



**Valores máximos por faixa de velocidade**

Como conclusão do estudo relacionado a esta seção, primeiramente, revela-se que a necessidade de monitoramento constante é fundamental para a identificação qualitativa das emissões atmosféricas presentes, principalmente em locais com restrição de dispersão e limitação de controle de poluentes.

A má ventilação e exaustão de túneis podem acarretar ou potencializar os problemas acima relacionados. Para melhor se compreender como esta condição de confinamento influi na concentração de poluentes, Almeida (2004) realizou estudo comparativo entre ambientes de grande fluxo de veículos, confinados e não-

confinados (ambientes externos).

Nesta pesquisa de comparação direta, os experimentos realizados<sup>86</sup> em ambiente externo estavam localizados em estações posicionadas na avenida Presidente Vargas (1) e na Fundação Oswaldo Cruz (2), - nas imediações da movimentada avenida Brasil<sup>87</sup>, próximo à avenida Leopoldo Bulhões. Por outro lado, o ambiente confinado é o túnel Rebouças (3), a principal via arterial de ligação das zonas norte e sul da cidade do Rio de Janeiro. Assim, foi possível se constatarem os seguintes dados gerais, em relação à(o):

- a) **SO<sub>2</sub>**: concentração máxima de 50 ppm, é aproximadamente a metade da registrada dentro do túnel no período diurno;
- b) **MP<sub>10</sub>**: valor máximo médio registrado foi 100 µg/m<sup>3</sup>, aproximadamente a metade do valor obtido no túnel.
- c) **CO**: concentração média máxima de 2 ppm, valor 10 vezes inferior às concentrações registradas dentro do túnel Rebouças;
- d) **NO**: pico de aproximadamente 350 ppb, valor 10 vezes inferior ao registrado dentro do túnel.

Deve-se destacar, todavia, uma pequena ressalva em relação ao trabalho desenvolvido por Almeida.

O levantamento de dados ocorreu há alguns anos atrás (2002) e, possivelmente, por este motivo, houve a conclusão de que há uma forte relação entre CO/HCT e CO/NO. Isso significa que estes resultados podem sugerir que o monitoramento exclusivo de CO ainda é suficiente para a determinação do nível de outros tipos de poluentes.

Na realidade, em tempos mais recentes, sabe-se que a baixa emissão de CO dos veículos automotivos atuais inviabiliza esta prática, pois não há correspondência forte e confiável entre este poluente e as demais emissões. O que pode se afirmar é que, de forma geral, houve uma significativa redução de todos os poluentes relacionados às emissões veiculares.

A CETESB, “o órgão técnico conveniado pelo IBAMA para assuntos de homologação de veículos em âmbito nacional, tendo também a responsabilidade pela implantação e operacionalização do Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE”, destaca, por exemplo, que desde de 1986, houve uma redução de “emissão de poluentes de veículos novos em cerca de 97% (...)”<sup>88</sup>.

Por outro lado, os procedimentos parecem ter sido realizados de forma criteriosa e pode ser constatada uma forte correlação entre o fluxo veicular e as emissões levantadas (SO<sub>2</sub>, MP<sub>10</sub>, CO, NO etc.).

Um importante estudo realizado pela PETROBRÁS no âmbito do túnel Rebouças, a ser referenciado por algumas vezes nesta pesquisa, realizou registros e medições das concentrações dos seguintes poluentes: SO<sub>2</sub>, MP<sub>10</sub>, CO e NO<sub>x</sub> (NO e NO<sub>2</sub>) e Hidrocarbonetos Totais, entre março/2002 e dezembro/2005.

Segundo documento emitido pela PIARC (2008), intitulado “*Road Tunnels: A Guide to Optimising the Air Quality Impact Upon the Environment*”, “os contaminantes que devem ser submetidos ao controle regulatório de qualidade do ar [em túneis] são: benzeno, chumbo, SO<sub>2</sub>, MP<sub>10</sub>, CO, NO<sub>2</sub> e Ozônio”<sup>89</sup>. Mas, como o próprio texto destaca, “em projetos específicos, outros contaminantes podem ser importantes. Cada projeto deve ser considerado sob uma perspectiva de performance ambiental (...)”<sup>90</sup>.

Nóbrega, por exemplo, aponta, em estudo relativo ao “(...) material particulado (MP) e gases emitidos por motores Diesel”, que os níveis de dibenzo-para-dioxinas policloradas (PCDD) e os dibenzo-furanos policlorados (PCDF), chamados dioxinas e furanos, não são significativos, mas, face à importante contribuição de motores Diesel para a formação de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (PAH), deve-se conduzir estudo mais apurado deste poluente para implementação de regulamentação mais rigorosa.

Foram detectados nos estudos de Nóbrega a presença dos seguintes compostos: naftaleno, acenaftileno, acenafteno, fluoreno, fenantreno, antraceno, fluoranteno, pireno, benzo[a]antraceno, criseno, benzo[b]fluoranteno e benzo[k]fluoranteno, “resultando numa importante fonte de exposição humana devido à ação mutagênica e carcinogênica de vários compostos dessa classe”<sup>91</sup>.

Outro estudo, realizado em São Paulo<sup>92</sup>, no túnel Jânio Quadros, com 1,9 km, e utilizado principalmente por veículos leves, e o túnel Maria Maluf, com 0,845 km, e utilizado por veículos leves e pesados (à diesel), com o objetivo de pesquisar a qualidade do ar da região metropolitana de São Paulo, em função dos fatores de emissão dos veículos, também conclui sobre a gravidade de toxicidade dos veículos à diesel.

O constrangimento físico-espacial dos túneis possibilita a análise qualitativa dos tipos de poluentes veiculares, já que a dispersão das emissões é limitada. O quadro a seguir resume os fatores de emissão (FE) referenciados aos veículos pesados e veículos leves, a partir das duas situações distintas acima explicitadas:

Tabela 7 - Fatores de emissão (FE) referenciados aos veículos pesados e veículos leves nos túneis Jânio Quadros e Maria Maluf

Fatores de emissões (FE) calculados (e desvio padrão) nos túneis Jânio Quadros e Maria Maluf e a relação de FE entre Veículos Pesados e Veículos Leves						
	<i>Black Carbon</i> (mg km <sup>-1</sup> )	PM <sub>10</sub> (mg km <sup>-1</sup> )	PM <sub>2,5-10</sub> (mg km <sup>-1</sup> )	PM <sub>2,5</sub> (mg km <sup>-1</sup> )	NO <sub>x</sub> (g km <sup>-1</sup> )	CO (g km <sup>-1</sup> )
Túnel Jânio Quadros (Veículos leves)	16	197	127	92	1,6	15
Túnel Maria Maluf (Veículos pesados)	462	755	715	588	22	21
Relação Veículos pesados/Veículos leves	29	4	6	6	14	1,4

Desta forma, destaca-se a importância de um eficiente sistema de ventilação e exaustão em túneis e da necessidade de avaliação pontual acerca da real necessidade de tráfego de veículos pesados em túneis.

Por fim, partindo-se da premissa de que “a redução da poluição advinda dos motores dos veículos é a chave para uma melhor qualidade do ar das cidades”, chega-se à uma conclusão quase paradoxal, em se tratando de um ambiente de clausura, inóspito e sujeito à uma alta concentração de poluentes, como no caso dos túneis:

“Tão pronunciado são os benefícios da qualidade do ar em túneis projetados e operados adequadamente que um número de ambientes urbanos de vias de superfície estão sendo encapsulados em “túneis” para redistribuir as emissões veiculares. Esses novos túneis estão sendo construídos exclusivamente para atingir os padrões ambientais locais através do refreamento e do aumento da dispersão das emissões dos veículos (da superfície)”<sup>93</sup>.

É fato que, na comparação entre rodovias abertas e rodovias cobertas (túneis), com grau semelhante de tráfego, as emissões atmosféricas são inegavelmente mais nocivas no primeiro caso. Neste caso, conclui-se que o lançamento direto dos poluentes (em rodovias abertas), sem qualquer tipo de tratamento, resulta em um impacto muito mais significativo para as regiões próximas.

De outra feita, ainda que se considere que “o método mais comum de dispersão de emissões em túneis é através dos portais (entradas)”<sup>94</sup> e que, portanto, nestes pontos haveria, supostamente, uma situação especialmente crítica, é

necessário observar outros aspectos importantes. Em primeiro lugar, deve ser ponderado que há uma óbvia necessidade de previsão de um controle da concentração dos poluentes no interior do túnel. Em segundo lugar, atualmente, há algum – mas, crescente - controle de poluentes a serem lançados no ar exterior (ao contrário de alguns anos atrás, quando o controle era exclusivamente interno). Em terceiro lugar, como parte significativa das emissões é direcionada para as aberturas (portais), é necessário que haja um cuidado específico com este segmento, inclusive com restrições urbanísticas de uso e ocupação das imediações.

Ao longo da análise desta seção, não houve uma pormenorização em relação à forma de ventilação semi-transversal. Neste caso, deve ser considerado, de acordo com documento emitido pelas Nações Unidas que “em sistemas reversíveis semi-transversais, o mesmo duto é utilizado para suprir ar novo (fresco) em condições normais e para realizar a exaustão da fumaça em caso de incêndio. Devido ao tempo necessário para se reverter o fluxo de ar no caso de incêndio, este sistema não deve ser mais utilizado e dutos individualizados devem ser construídos (para suprir ar fresco e extrair fumaça)”<sup>95</sup>.

Para melhor esclarecer, é possivelmente oportuno adicionar o seguinte dado: “nos sistemas semi-transversais tradicionais sob operação normal, o ar novo (fresco) é insuflado ao longo de todo o comprimento do túnel para diluir os poluentes emitidos pelos veículos; o ar viciado não é extraído, mas flui para os portais”<sup>96</sup>.

Nos sistemas de ventilação transversais, todavia, a grande diferença é que, em condições normais, “o ar novo é insuflado e o ar poluído é retirado ao mesmo tempo (através de dois dutos distintos), ao longo do túnel. Este método é utilizado principalmente em túneis longos com tráfego pesado”<sup>97</sup>.

Documento emitido pela *PIARC* (2004) admite que a velocidade do ar em sistemas longitudinais de ventilação de túneis seja de 1,5 m/s<sup>98</sup>. Os padrões da *NFPA 502*, conforme visto, determinam valores da ordem de 2,54 m/s e 2,95 m/s para se evitar refluxo de fumaça em testes de incêndios de 10 MW e 100 MW respectivamente.

Na publicação *Road Tunnels: A Guide to Optimising the Air Quality Impact Upon the Environment* (2008), há relatos sobre as novas tecnologias de remoção de material particulado (MP) em que se afirma que, por força da grande evolução dos últimos cinco anos, a eficiência (de remoção) em relação aos precipitadores eletrostáticos em MP<sub>10</sub> é da ordem de 90% ou mais a uma velocidade de 10 m/s e

para partículas ultra-finas, a eficiência é de 50 à 60%<sup>99</sup>.

Em relação ao óxido de nitrogênio (NO), há informações de que durante os anos 90s não houve redução significativa nas concentrações de emissões veiculares em razão de novos processos catalíticos ou biológicos. Recentemente, contudo, foram desenvolvidos sistemas por adsorção e absorção, no Japão, que garantem uma eficiência da ordem de 90%<sup>100</sup>.

Em outro estudo analisado, há algumas informações complementares relevantes passíveis de ocorrência em túneis. De acordo com o *Summary of International Road Tunnel Fire Detection Research Project – Phase II*<sup>101</sup>:

a) O cenário mais desfavorável em relação à temperatura e concentração de material particulado é quando o foco de incêndio encontra-se sob o veículo, pois há forte restrição de ventilação neste caso.

b) Dentre os esquemas de ventilação considerados, o sistema de ventilação semi-transversal é o que resulta em maior temperatura e fração volumétrica de fuligem. Além disso, ao sistema de ventilação longitudinal corresponde, nos ensaios, à menor temperatura média no teto do túnel.

c) O comprimento do túnel possui limitado efeito na temperatura do teto e na densidade da fumaça.

Na mesma publicação desenvolvida pela *PIARC* (2004) há uma explanação geral sobre as variáveis consideradas para o cálculo dos padrões de ventilação em túneis<sup>102</sup>, principalmente as emissões (CO, HC, NO<sub>x</sub>, HC + NO<sub>x</sub>) e MP<sub>2,5</sub> e MP<sub>10</sub> (emissões por exaustão: através do motor e por não-exaustão: pneus, freios, abrasão da superfície viária e ressuspensão de poeira), referenciados à velocidade média dos veículos, altitude do local etc.

Embora não esteja diretamente relacionado com o sistema de ventilação e exaustão dos túneis, há uma série de medidas que podem contribuir para a melhoria da qualidade do ar dos túneis como, por exemplo:

a) “Limpeza regular do túnel de forma a evitar a alta concentração de pequenas partículas;

b) Uso de detergente desionizante nos revestimentos das paredes e teto para evitar o acúmulo de partículas finas;

c) Uso de líquido, no piso do túnel, com capacidade de aderência de poeira, formando um filme que captura partículas pequenas”<sup>103</sup>.

Um importante dado conclusivo que deve ser observado com mais atenção e servir como premissa para a instalação de futuras normas relativas aos túneis que lidem assertivamente com a qualidade ambiental é a seguinte:

“Entre os milhares de túneis do mundo apenas uma pequena parte (estimada em menos de 1%) possui dispersão de ar vertical (chaminé) e menos de 0,01% (estimado) possui tecnologia de remoção de contaminantes para extrair a poluição do ar dos túneis com ventilação”<sup>104</sup>.

Por fim, embora o objeto da presente pesquisa não esteja relacionado ao período anterior à operação do túnel, ou seja, à linha do tempo relativa aos cuidados e aos procedimentos inerentes à execução da obra em túneis, pode-se afirmar que o caráter inóspito dos túneis se evidencia precocemente. Vale destacar que relativamente poucos tipos de execução de obra prevêm uma normatização tão específica.

Neste caso, segundo documento expedido pela *U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration*, deve ser previsto, por exemplo, o fornecimento de 200 pés cúbicos de ar por minuto por pessoa (ou 5,66 m<sup>3</sup> de ar por minuto por pessoa) durante a execução da obra. Além disso, há determinações rigorosas em relação às características dos equipamentos, que frequentemente utilizam o uso de diesel como combustível, para que seja possível a troca de ar adequada<sup>105</sup>.

#### 1.4 Sistema de iluminação

Devido às características intrínsecas aos túneis, é fundamental para a visibilidade, o conforto e a segurança dos usuários e funcionários, um sistema de iluminação adequado, sobretudo em túneis urbanos considerados longos. A fase de transição do ambiente externo ao interno é crítica, pois a fração de tempo necessário para a adaptação do olho humano às novas condições fragiliza a perícia na condução do veículo e pode resultar em acidentes de largas proporções. Outrossim, a distância entre as extremidades (entrada e da saída) dos túneis inviabiliza a possibilidade de iluminação natural e, portanto, exige um nível de iluminamento (através de recursos artificiais) suficiente para permitir o tráfego seguro ao longo de

todo o percurso.

O estudo destes aspectos é fundamental para que se minimizem os acidentes e, conseqüentemente, se evite o agravamento das condições inóspitas típicas dos ambientes enclausurados dos grandes túneis.

#### 1.4.1 Sistema de iluminação – NBR-5181/1976

De acordo com a NBR-5181/1976<sup>106</sup>, considera-se um iluminamento externo médio de 54.000 lux. A seguir, “a zona de entrada do túnel para efeitos de iluminação, pode ser dividida em três ou mais zonas” de forma, por exemplo, a se evitar ao máximo o efeito de “buraco-negro”: “Logo após o portal principal, na entrada do túnel, o iluminamento médio deve ser de 2.700 lux constantes para as zonas adjacente, observada a relação de redução máxima de 3:1 entre o iluminamento máximo e o mínimo de cada zona”, conforme tabela abaixo:

Tabela 8 - Zona de aproximação e de entrada nos túneis para efeitos de iluminação

<b>ENTRADA DO TÚNEL</b>	
<b>Primeiro Tempo 2 s</b>	<b>2.700 lux</b>
<b>Segundo Tempo 2 s</b>	<b>900 lux</b>
<b>Terceiro Tempo 2 s</b>	<b>300 lux</b>
<b>PARTE CENTRAL</b>	<b>100 lux</b>

Os parâmetros de cálculo de tempo relacionam-se à “velocidade máxima permitida para o tráfego veicular” e devem ser consideradas eventuais contribuições de iluminamento externo, no caso de túneis parcialmente encobertos. Contudo, “devem ser evitadas: alta luminância das fontes de luz, variações no tipo e padrão das fontes de luz e mudanças repentinas nos padrões de luminância”.

Ainda de acordo com a NBR-5181/1976, no caso de túneis longos, com mais de 50 m de extensão, deve-se procurar o enfileiramento de luminárias, através de todas as zonas do túnel, a fim de que se possa ser obtido um guia ótico, com atenção especial às pistas de rolamento vizinhas às paredes do túnel e definição das pistas através de marcações coloridas claras.

Por fim, destaca-se que “com paredes de 70% ou mais de refletância e uso de

luminárias que iluminem as pistas e as paredes do túnel, o iluminamento horizontal especificado normalmente produzirá visibilidade satisfatória. Sob tais condições, considera-se que o iluminamento horizontal adequado proporcionará também adequado iluminamento vertical<sup>107</sup>.

Tecnicamente, “deve ser evitado o espaçamento entre luminárias que provoque uma frequência de intermitência entre 5 e 10 ciclos/segundos nos veículos que trafegam à velocidade para o qual o túnel é projetado”.

As principais regiões a serem consideradas no túnel são:

1) Durante o dia:

- Zona do quebra-luz/pérgola<sup>108</sup> (opcional);
- Zona de entrada;
- Zona central.

2) Durante a noite:

- O túnel é considerado como uma única zona em toda sua extensão.

Um artifício comumente utilizado para que se evite o problema de transição entre o ambiente exterior e interior é a instalação de cabines de pedágio nas proximidades da entrada do túnel. Neste caso, a velocidade e o fluxo de veículos é atenuado e há tempo suficiente para se compatibilizar o fluxo, a iluminação e o organismo humano.

#### 1.4.2 Discussão sobre o Sistema de iluminação

Ao se considerar que “logo após o portal principal, na entrada do túnel, o iluminamento médio deve ser de 2.700 lux constantes para as zonas adjacente, observada a relação de redução máxima de 3:1 entre o iluminamento máximo e o mínimo de cada zona”, pode-se concluir que em velocidade máxima de 90 km/h, por exemplo, um veículo em velocidade constante percorrerá a seguinte distância a cada 2s:

$$\begin{aligned}\Delta x &= vt \\ v &= 90\text{km/h,} \\ t &= 2\text{s, ou seja, } t = 0,0005\text{h,} \\ \Delta x &= 90 \times 0,0005 = 0,045\text{km}\end{aligned}$$

$$\Delta x = 45\text{m.}$$

Ou seja, nos primeiros 45m, deve haver um iluminamento médio de 2.700 lux. Nos 45m seguintes, 900 lux, e nos 45m subsequentes, 300 lux. A partir deste instante o iluminamento médio pode passar a ser de valores mínimos de 100 lux.

O quadro abaixo sintetiza esta situação determinada pela NBR-5181/1976:

Tabela 9 – Conclusão da situação determinada pela NBR-5181/1976

<b>ENTRADA DO TÚNEL</b>		
	<b>Primeiro Tempo 45m</b>	<b>2.700 lux</b>
	<b>Segundo Tempo 45m</b>	<b>900 lux</b>
	<b>Terceiro Tempo 45m</b>	<b>300 lux</b>
<b>PARTE CENTRAL</b>		<b>100 lux</b>

## 1.5 Sistema de fiscalização e orientação de tráfego, comunicação e sinalização

O “sistema de fiscalização e orientação de tráfego, comunicação e sinalização”, principalmente através de recursos de áudio e visão, pode ser composto de um aparato que proporcione agilidade fundamental nos casos de sinistro, incluindo incêndio, além de cumprir papel indispensável na prevenção de acidentes, no auxílio ao fluxo seguro de veículos, na orientação de usuários etc.

A automação tecnológica e o controle central permitem otimizar recursos (técnicos, humanos etc.), através do monitoramento e controle sistêmico de um determinado túnel urbano, permitindo integrá-lo à estrutura viária das regiões próximas ou consideradas dentro das áreas de abrangência.

De acordo com o grupo de especialistas da ONU, “para se evitar alguma possível má interpretação na tomada de decisão e para se assegurar a máxima assistência de emergência, é fortemente recomendável designar um único centro de controle para túneis operados por diferentes autoridades”<sup>109</sup>.

Segundo este mesmo documento, além da alocação de “equipes distintas nas extremidades do túnel”<sup>110</sup>, para se buscar um pronto atendimento, algumas sinalizações podem ser úteis para a segurança em túneis como, por exemplo<sup>111</sup>: a) Indicação de restrição de acesso de veículos transportadores de materiais perigosos; b) Velocidade máxima permitida; c) Distância prudente entre veículos (da ordem de 20 à 50m) etc.

### 1.5.1 Sistema de fiscalização e orientação de tráfego, comunicação e sinalização – NBR-15661/2009

Conforme será analisado nesta seção, a NBR-15661/2009 trata primacialmente de “proteção contra incêndio em túneis” e talvez seja a referência mais adequada, em âmbito brasileiro, aos casos de sinistro ou situação de perigo que demandem aparato de tecnologia de comunicação de forma a se estabelecer contato (pedido de socorro, alerta etc.). Entretanto, além desse aspecto, há na referida norma a indicação de diversas instalações e equipamentos atinentes ao sistema de comunicação que podem prevenir e minimizar situações de perigo e exposição excessiva aos poluentes, normalmente encontrados de forma

concentrada nos grandes túneis.

Preliminarmente, podem ser citados:

- Painéis de mensagens variável (PMV): Para túneis com extensão superior a 1.500m, estes instrumentos permitem emitir informações atualizadas aos usuários da rodovia em seus diferentes pontos.

- Triedros: É conveniente que os painéis de mensagem variáveis mecânicos, quando necessários, sejam instalados em locais operacionais estratégicos, contemplando a possibilidade de apresentação de avisos dinâmicos predefinidos sobre a situação operacional do túnel (...).

- Megafonia: Esse sistema tem por objetivo apresentar instruções e informações sonoras durante a ocorrência de eventos de emergência ao longo do túnel.

- Balisadores de faixa: São semáforos (verde e vermelho) para fechamento da faixa de rolamento em caso de veículos ou obstáculos parados sobre a faixa, indicando a interdição da faixa para o condutor do veículo.

- Cancelas: Equipamentos destinados a bloquear os emboques dos túneis e a saída de emergência do túnel, (...) para os casos de acidentes ocorridos no seu interior, ou qualquer outro tipo de incidente, a fim de não permitir a entrada de veículos, até o controle da situação e posterior liberação do trecho envolvido ao tráfego normal.

- Sinalização de abandono do local: Convém que os painéis de sinalização luminosa sejam instalados no máximo a 1,50m do piso da rota de saída, no sentido do tráfego, informando aos usuários, em caso de emergência, o sentido do emboque ou saída de emergência mais próxima do local.

- Sistema de comunicação: O projeto para túneis acima de 500m deve prever um sistema de comunicação instalado no interior e exterior do túnel, de forma a permitir a troca de dados e informações entre os usuários, pessoal de serviço e equipes de emergência com os centros de controle e operação do túnel (CCO).

(...) O sistema de comunicação do túnel deve ser projetado com um elevado nível de confiabilidade e redundância. Nas situações de emergência as facilidades de comunicação disponíveis são o único vínculo entre os usuários e o pessoal que se encontra no lado externo do túnel.

De acordo com a NBR-15661/2009: Deve-se manter, no centro de controle, registros escritos e/ou eletrônicos, gravações de comunicações via telefone, rádio e

circuito fechado de televisão (CFTV).

### 1.5.2 Sistema de fiscalização e orientação de tráfego, comunicação e sinalização - NFPA 502 (2008)

Segundo a *NFPA 502* dos EUA<sup>112</sup>, há três segmentos principais que envolvem tecnologia de comunicação em túneis:

a) Monitoramento ou observação (CFTV): “Para túneis com extensão superior a 1.000m, devem ser instalados, além do sistema de comunicação, sistema interno de TV, com a instalação de câmeras no interior do túnel”<sup>113</sup>.

b) Troca de instruções e informações sonoras (interfone ou telefone): Nos EUA, a *National Fire Protection Association (NFPA)*<sup>114</sup> indica a necessidade de instalação de rede de rádio dedicada, com comunicação em duas vias, composto de transmissores de base, repetidores e receptores, antenas, transmissores e receptores móveis, transmissores e receptores portáteis e sistema auxiliar.

A *NFPA 502* determina ainda:

“Sistemas de comunicação de rádio, como *highway advisory radio (HAR)* e estações comerciais de AM/FM, podem ser providas aos motoristas para fornecer informações relativas à emergência e ações que devem ser tomadas (pelo motorista). (...) O sistema de comunicação pode também ser composto de uma seleção de mensagens pré-gravadas para transmissão pelo pessoal responsável pelo atendimento de emergência. Áreas de refúgio ou agrupamento de pessoas, se disponíveis, devem ser equipadas com um sistema de comunicação confiável de duas vias (de comunicação) com o centro de controle”<sup>115</sup>.

c) Sinalização (circulação, segurança e emergência): A *NFPA 502* também estabelece no item 7.4.1: “no mínimo dois sistemas para detectar, identificar ou localizar um fogo em túnel deve ser provido, incluindo um sistema manual com caixas de alarme manual de incêndio localizadas em intervalos nunca superiores a 90 metros, com acesso do público e de funcionários e determinação de localização da caixa na estação de monitoramento” e outro sistema que inclua um CFTV ou detecção automática de fogo com raio máximo de 15m em relação ao ponto de localização do incêndio”<sup>116</sup>.

Sobre o controle de tráfego para túneis mais extenso que 240m, “devem ser providos meios para interromper o tráfego de adentrar diretamente o túnel, controlar o tráfego internamente e desviar de áreas em que há a propagação de incêndio”<sup>117</sup>.

A *NFPA 520* prevê também que “a sinalização direcional reflexiva ou luminosa que indica a distância até as duas saídas de emergência mais próximas deve ser fixada nas paredes do túnel a uma distância não superior à 25m”<sup>118</sup>.

### 1.5.3 Sistema de fiscalização e orientação de tráfego, comunicação e sinalização – Fire Safety Guidelines for Road Tunnels (2001)

Nesta referência, há a ênfase na absoluta necessidade de detecção do incidente emergencial. Este documento de orientação destaca a existência de dois tipos de incidentes (em túneis) que podem se tornar um perigo para os usuários (dos túneis): a) Incêndio; b) Qualquer outro (incidente) que provoque a paralisação de veículos (...) dentro do túnel.

“O sistema de detecção de incêndio deve ser capaz de acusar o fogo bastante cedo e também identificar com acuidade a posição do incêndio. Assim, a coexistência do CFTV com um sistema de detecção de incidente é considerado vital, juntamente com um sistema de detecção de incêndio.

Um sistema de detecção de incidente deve incorporar os seguintes itens:

- a) Um sistema de detecção de incidente automático conectado ao CFTV, que permita a visualização (automática), em caso de veículo estacionado ou em velocidade destacadamente lenta, diretamente nos monitores da sala de controle do túnel. Além de um alarme sonoro automático para alertar os operadores.
- b) Devido ao ofuscamento, as câmeras devem ser instaladas no sentido do fluxo de veículos.
- c) Sistema de rastreamento e detecção de calor.
- d) Conexão direta com o Corpo de Bombeiros.
- e) O sistema de detecção deve ser concebido para acionar os *sprinklers* (chuveiros) e o gerenciador de fumaça.
- f) O sistema de CFTV deve ter câmeras suficientes (...) para:
  - Permitir que o operador examine qualquer parte da pista.
  - Para visualização detalhada dos veículos, o espaçamento entre as câmeras dependerá das características dos equipamentos. No entanto, não deve haver distanciamento superior à 150m de intervalo (entre as câmeras)<sup>119</sup>.

#### 1.5.4 Discussão sobre o Sistema de fiscalização e orientação de tráfego, comunicação e sinalização

Um dado indireto importante que concerne à fiscalização é a da vistoria veicular. Antes de mais nada, é importante pontuar que, evidentemente, um veículo em bom estado de conservação tende a ser menos poluidor. Estima-se que “automóveis cujo conversor catalítico tenha sido danificado ou adulterado produzem a maior parte das emissões: 50% dos hidrocarbonetos e monóxido de carbono são liberados por 10% dos veículos em circulação”<sup>120</sup>. Acredita-se que uma criteriosa vistoria periódica pelo órgão fiscalizador responsável deva ser necessária e fundamental para que a frota de veículos circulante seja cada vez menos responsável pela emissão de poluentes.

Em complementação aos dados acima expostos, no contexto japonês, em análise do documento *National Safety Standard* [Padrões Nacionais de Segurança]<sup>121</sup>, destaca-se, além da importância de sistema de detecção de incêndio, a necessidade do(a): a) cabeamento dos sistemas de sinalização e iluminação serem resistentes ao fogo; b) integração do departamento de polícia e corpo de bombeiros; c) melhoria da sinalização de indicação de fuga; d) equipamento de retransmissão de rádio (capaz de interromper as frequências de rádio); e) equipamentos de caráter áudio-visual para informação geral dos usuários.

Além disso, o documento *Fire Safety Guidelines for Road Tunnels* acrescenta outros elementos<sup>122</sup> e destaca a necessidade de provimento de equipamentos de redirecionamento de telefonia celular e linhas dedicadas à polícia, corpo de bombeiros e ambulância.

Algumas medidas suplementares devem ser tomadas como, por exemplo, a limitação da velocidade. De acordo com documento disponibilizado pela PIARC (2008), “a redução da velocidade de tráfego reduz as emissões”. Além disso, “a manutenção de uma velocidade constante reduz as emissões, se comparado com o tráfego do tipo “acelera e freia”. O comportamento de direção pode ser melhorado permitindo velocidades mais baixas nos horários de *rush*”<sup>123</sup>.

A limpeza regular dos revestimentos das paredes e do teto dos túneis, adotada em alguns países, reduz significativamente a concentração de material particulado (MP). Além disso, com este mesmo objetivo, a limpeza do piso também pode ser incluída como iniciativa a ser adotada.

## 1.6 Sistema de segurança contra sinistro e incêndio

Em relação ao sistema de segurança, há duas dimensões de objetivos<sup>124</sup>:

- 1) Objetivos primários: prevenção [de eventos críticos];
- 2) Objetivos secundários: redução de consequências (de eventos) como acidentes e incêndio.

Em geral, os equipamentos devem atender às demandas previamente determinadas e aferidas pelo comissionamento, a fim de que sejam analisadas: a) a qualidade das instalações; b) a adequação do sistema; c) a relação de expectativas; d) a compatibilidade de usos; e) a avaliação de performance etc. no que concerne à segurança:

“O comissionamento dos sistemas de segurança de um túnel é ditado pela natureza dos sistemas instalados. Todos os sistemas devem ser comissionados individualmente antes do início da operação do túnel. Os cenários relevantes e a sequência de eventos definidos pela análise dos riscos e que melhor represente uma situação de emergência devem ser simulados de forma a que se possa efetuar o comissionamento dos procedimentos aplicados nessa situação emergencial e nas diversas combinações de eventos prováveis de ocorrerem em situações de emergência”<sup>125</sup>.

Como pode ser concluído ao longo do desenvolvimento desta pesquisa, os eventos relacionados à emergência em túneis comumente se reportam a incêndios, face à gravidade desta ocorrência em função dos aspectos físico-espaciais característicos (dos túneis). Assim, é justificável se concentrar este estudo um pouco mais detidamente nesta questão.

Liu (et al.)<sup>126</sup> estabelece três requisitos básicos para um sistema de detecção de incêndio em túneis: capacidade, confiabilidade e disponibilidade.

As situações de emergência previstas na *NFPA 502* são as seguintes<sup>127</sup>:

- (1) Condições de fogo ou fumaça em um ou mais veículos ou no túnel;
- (2) Condições de fogo ou fumaça nas proximidades do túnel;
- (3) Colisão envolvendo um ou mais veículos;
- (4) Perda da energia elétrica que resulte em deficiência de iluminação, ventilação ou outros sistemas de segurança;

- (5) Resgate ou evacuação dos [usuários] sob condições adversas;
- (6) Veículos avariados;
- (7) Inundação do túnel ou de uma rota de fuga;
- (8) Derrame de líquidos ou emissão de gases inflamáveis, tóxicos ou irritantes;
- (9) Incidentes múltiplos;
- (10) Sinistro da estrutura por impacto ou exposição ao calor;
- (11) Vandalismo ou ato criminoso, como bombas, ameaças ou terrorismo;
- (12) Primeiros socorros ou atendimento médico para [usuários];
- (13) Condições meteorológicas que causem descontinuidade de operação (...);
- (14) Materiais perigosos acidental ou intencionalmente descartados no túnel.
- (15)

Além disso, de acordo com a *NFPA 502*, os requisitos básicos e fundamentais para proteção ao fogo e segurança da vida devem ser considerados.

São eles:

- (1) Proteção da vida;
- (2) Acesso e saída de veículos restritos;
- (3) Emergências de incêndio oscilando entre pequenos incidentes e grandes catástrofes;
- (4) Emergências de incêndio ocorrendo em um ou mais locais;
- (5) Emergências de incêndio em locais distantes dos instrumentos de atendimento (às emergências);
- (6) Exposição da estrutura à altas temperaturas;
- (7) Congestionamento de tráfego durante uma emergência;
- (8) Instrumentos de proteção ao fogo, como os seguintes:

- (a) Sistemas de alarme de incêndio;
  - (b) Sistemas de exaustão;
  - (c) Sistemas de chuveiros (*sprinklers*);
  - (d) Sistemas de ventilação.
- (9) Proteção dos equipamentos;
- (10) Requisitos para evacuação e resgate;
- (11) Tempo de resposta à emergência;
- (12) Pontos de acesso exclusivo dos veículos de emergência;
- (13) Comunicação de emergência para os locais adequados;
- (14) Proteção dos veículos e do patrimônio sendo transportados;
- (15) Localização das instalações:
- (a) Urbano;
  - (b) Rural.
- (16) Dimensões físicas.

Atualmente, modelos computacionais antecipam problemas, ao simular virtualmente os ambientes, equipamentos, formas de uso etc., diante de diferentes situações em que as características físicas, químicas etc. são conduzidas aos extremos. Evidentemente, uma simulação é passível de integrar limitações que somente são visualizáveis em situação real, mas, pelo menos, parte significativa das questões envolvidas pode ser equacionada sem riscos à vida, ao meio-ambiente e às instalações construídas.

O sistema de detecção de incêndio deve ser o primeiro instrumento relacionado à mitigação de sinistros em túneis. Em função de sua eficiência, medidas preliminares podem ser tomadas e se tornarem fundamentais em todo o processo. Desta forma, há uma tendência a se evitar o alastramento do fogo e a propagação da fumaça, ao mesmo tempo em que se trabalha para o rápido e providencial escoamento dos usuários e funcionários. Assim, o sistema de detecção

deve ser capaz de identificar o ponto específico vitimado por um possível incêndio, incluindo suas dimensões e direções (de alastramento).

Em segundo lugar, a confiabilidade do sistema não deve ser influenciada, por exemplo, por poluentes dos veículos ou má performance de ventilação e exaustão. Como se pode prever, um falso alarme pode ter implicações graves no sistema de segurança de um túnel.

Por último, deve ser assegurado que o ambiente normalmente hostil dos túneis não seja impeditivo para a boa performance dos equipamentos, já que, quase necessariamente, há uma variação de concentração de poluentes, temperatura etc., ao longo de todo o dia, que são prejudiciais ao funcionamento dos aparelhos necessários.

Na realidade, a taxa média de incêndio em túneis é bastante baixa (25 incêndios por  $10^8$  veículos x (túnel) km)<sup>128</sup>. A maior parte dos eventos de incêndio em veículos não ocorre em função de acidentes, mas devido problemas no sistema elétrico, super-aquecimento em motores etc. Entretanto, em relação aos grandes incêndios com fortes consequências (vítimas, óbitos ou grandes estragos materiais), na maior parte das vezes, é causada por acidentes<sup>129</sup>.

A AFAC (2001) relata alguns registros de testes em relação ao comportamento de veículos em incêndios em que algumas importantes conclusões são realizadas:

a) *Australian Building Code*: Em garagens fechadas, onde foram realizados nove testes com cinco veículos de tipos variados, colocados a uma distância entre 400 e 500 mm, pode-se constatar a importância do sistema de *sprinkler* para o extermínio do fogo, limitação do lançamento de fumaça e redução da temperatura.

b) Japão: Em uma garagem com quatro pavimentos com pés-direitos de 2,9m, foram colocados 12 veículos de tipos variados. A temperatura chegou à 700°C e houve propagação de fogo entre os veículos com relativa facilidade (em menos de dez minutos, entre um e outro).

Liu<sup>130</sup> (et al.) ilustra os principais pontos relativos ao tema, da seguinte forma:

Figura 8 – Uma visão geral de um estudo investigativo sobre um sistema de detecção de incêndio em túneis automotivos internacionais



Liu, Z. (et al.). An overview of the international road tunnel fire detection research project. 10th Fire Suppression and Detection Research Application Symposium, Orlando, Florida, EUA, 2006.

É importante ainda que o sistema elétrico, em situações de emergência, se mantenha em funcionamento para assegurar as operações de “ventilação, iluminação, comunicação, drenagem e suprimento de água. Além disso, deve identificar áreas de refúgio, saídas, rotas de fuga (...) e alarme”<sup>131</sup>.

A tabela a seguir, baseada em estudos realizados em diversos países (Bélgica, EUA, Finlândia, França e Noruega), fornece esclarecimentos em relação às taxas de liberação de calor, em caso de incêndio<sup>132</sup>:

Tabela 10 - Taxas de liberação de calor, em caso de incêndio

Tipo de Veículo	Taxa de Calor Liberada (MW)	Temperatura Máxima nas Paredes (°C)
Carro de passeio pequeno	2,5	400
Carro de passeio grande	5	500
Van	15	NI (Não Informado)
Ônibus	20	800
Veículo Pesado	20 - 30	1.000
Veículo pesado e com produtos perigosos	100 - 120	1.200 - 1.400
Caminhão tanque com 50 m <sup>3</sup> de gasolina	1.500.000	NI (Não Informado)

As alternativas de escape e refúgio que tem sido utilizadas em túneis, segundo o documento *Fire Safety Guidelines for Road Tunnels*, incluem:

- a) Conexão de cruzamento que leve ao túnel adjacente ou ar livre;
- b) Conexão à saída de pedestres do túnel;
- c) Refúgios, especialmente equipados com ar limpo, comunicação e água;
- d) Galerias de retorno para veículos;
- e) Escadas de escape<sup>133</sup>.

Em 1999, em uma primeira fase, concluída em 2003, o *Fire Protection Research Foundation* criou um grupo técnico para pesquisar sistemas de detecção de incêndio em túneis rodoviários cujos objetivos eram:

- a.1) Investigar os atributos de desempenho das tecnologias atuais para detecção de incêndio;
- a.2) Desenvolver critérios de funcionamento de sistemas de detecção de fogo e fumaça;

- a.3) Contribuir para a otimização de requisitos técnicos de especificação e instalação.

Em uma segunda fase, os objetivos do programa de pesquisa foram:

- b.1) Desenvolver projetos adequados para cenários de incêndio e testar protocolos para avaliação de desempenho de detectores em túneis rodoviários;
- b.2) Conduzir testes de incêndio em túneis em escala real para avaliação de desempenho de detectores disponíveis em túneis rodoviários sob o desafio de cenários de incêndio;
- b.3) Analisar os dados técnicos e conduzir simulações numéricas para compreender e otimizar requisitos técnicos de especificação e instalação para a aplicação de tecnologias de detecção de incêndio em túneis rodoviários;
- b.4) Avaliar os efeitos ambientais no desempenho dos sistemas em relação ao protocolo de operação de túneis;
- b.5) Confrontar cenários de pesquisa em escala real e dados obtidos em testes em túneis rodoviários;
- b.6) Prover dados técnicos para as normas e padrões para o desenvolvimento de linhas de orientação para a aplicação de tecnologias de detecção de incêndio em túneis rodoviários.

#### 1.6.1 Sistema de segurança contra sinistro e incêndio – NBR-15661/2009

De acordo com a ABNT 15661/2009, “o projeto de proteção contra incêndio em túneis deve considerar a geração máxima de energia decorrente de incêndio de veículos, conforme o tipo de veículo em circulação pelo túnel (rodoviário):

- Carro de passeio: 3 MW – 5MW;
- Vans: 10 MW;
- Caminhões/ônibus: 15 MW – 20 MW;
- Carretas tanques: 50 MW – 100 MW (tráfego isolado)”<sup>134</sup>.

Alguns outros aspectos relevantes em relação ao acionamento do sistema de extinção de incêndio: “O projeto deve prever um sistema de acionamento de extinção adequado às características do túnel, para controle do desenvolvimento do incêndio, possibilitando uma evacuação segura dos usuários, deve permitir que as brigadas de incêndio se aproximem o máximo possível do local e ainda deve oferecer a oportunidade de controle e extinção do incêndio”.

Há também necessidade de atenção especial aos seguintes temas relacionados aos incêndios em túneis:

- Proteção para estruturas de concreto (incluindo revestimento do túnel);
- Proteção para estruturas de aço (incluindo revestimento do túnel), através de intumescentes, placas, isolantes térmicos para altas temperaturas (acima de 1.100°C);
- Proteção para bandejamento de cabos;
- Proteção para dutos metálicos;
- Selagens corta-fogo.

Em complementação aos dispositivos eletroeletrônicos que compõem o sistema de informação já acima destacados, podem ser citados aqueles especificamente destinados ao sistema de segurança contra incêndios, de acordo com a NBR-15661/2009<sup>135</sup>:

O sistema de detecção de incêndio, em função do tráfego de veículos pelo túnel, deve ser determinado por meio da aplicação da NBR-11836, que define: oito tipos de fogo padrões (denominados TF1 a TF8); a característica das fumaças possíveis de serem produzidas e o melhor sistema (de detecção).

Complementarmente deve ser previsto um sistema de detecção automática de incêndio (DAI), composto por câmeras de circuito fechado de televisão, interligadas por software que permita verificar o trajeto e/ou a posição dos veículos no interior do túnel. Devem ser considerados os seguintes recursos:

- Acionamento do sistema de extinção de incêndio: O projeto deve prever um sistema de acionamento de extinção adequado às características do túnel, para controle do desenvolvimento do incêndio, possibilitando uma evacuação segura dos usuários; deve permitir que as brigadas de incêndio se aproximem o máximo possível do local e ainda deve oferecer a oportunidade de controle e extinção de incêndio.

A atuação do sistema manual ou automático pode minimizar os efeitos adversos do incêndio no interior do túnel, criando um maior tempo para evacuação dos usuários, manutenção das proteções das estruturas e diminuição dos riscos de uma prolongada interrupção do uso devido à propagação do incêndio.

- Controle de fumaça: O projeto deve prever um sistema de controle de fumaça adequado às características do túnel, para extração de fumaça, que

possibilite uma evacuação segura dos usuários, deve permitir que as brigadas de incêndio se aproximem o máximo possível do local e ainda deve oferecer a oportunidade de controle e extinção de incêndio.

- Hidrantes (túnel com  $L \geq 200m$ ): Túneis com extensão entre 200m e 500m devem ser providos de sistema de hidrantes com tubulação que pode permanecer seca, porém com controle de abastecimento em ambas as extremidades do túnel.

É importante sublinhar que túneis com extensão acima de 500m devem ser providos de sistema de hidrantes, conforme NBR-13714, considerando-se sistema Tipo 3 ou maior, (...) com reserva de incêndio que propicie o combate a incêndio por 30 minutos, com previsão de dois hidrantes funcionando simultaneamente, com uma pressão de 15 kPa no hidrante mais desfavorável.

A distância máxima entre dois pontos de hidrantes deve ser de 60m, prevendo-se quatro lances de mangueira de 15m para cada coluna de hidrante.

- Extintores em túneis devem atender: tipo ABC, distância de 30m entre extintores e sinalização.

Deve-se dedicar ainda particular atenção à resistência da estrutura ou equipamento em função de um incêndio. Desta maneira, determina-se o tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF) como o tempo decorrido entre o início do incêndio e o momento em que a estrutura e/ou o equipamento não mais exerce(m) a função para a qual foi projetada, devido aos excessos de deformação ou colapso.

Segundo a NBR-15661/2009, os equipamentos de segurança devem ser projetados, instalados e construídos de forma a suportarem temperaturas adequadas (sic) nas situações de incêndio e devem permanecer em funcionamento nestas condições por períodos [tão] prolongados [quanto 120 minutos, exceto nos casos de “bandejamento de cabos elétricos e de controle” (iluminação de emergência) de 60 minutos]<sup>136</sup>.

Desta forma, a infra-estrutura prevista para o suprimento de energia deve ser protegida a fim de que possa suportar elevadas temperaturas no interior do túnel.

### 1.6.2 Sistema de segurança contra sinistro e incêndio – Instrução Técnica nº 35/2004

Por outro lado, segundo ainda a Instrução Técnica nº 35/2004<sup>137</sup> elaborada pela Polícia Militar do Estado de São Paulo, especificamente destinada à túneis rodoviários, determina com maior rigor que: “O sistema de iluminação de emergência deverá ter proteção contra os efeitos do calor por no mínimo quatro horas”.

Além de serem previstas “múltiplas fontes alternativas [de energia], que sejam redundantes”. Também deve ser considerada a complementação à (energia) fornecida pela concessionária através, por exemplo, de grupo motogerador e/ou baterias”.

Devem ser consideradas as rotas para veículos (de socorro) e para fuga (de pedestres) para túneis com extensão superior à 500m:

As laterais do túnel devem ser providas de defensas dotadas de corredor, situado a uma altura de 1,50m, com largura mínima de 1,00m, que permita a proteção do usuário de um possível abalroamento de veículos, propiciando a fuga de pessoas a pé, a retirada de vítimas e o acesso das equipes de emergência. Essas saídas devem ser mantidas livres e desimpedidas, com acesso facilitado por rampas, a cada 100 m, de forma que os ocupantes não tenham dificuldade de sair da pista de rolamento, adentrar ao corredor de proteção e abandonar o túnel, no caso de acidente.

É também necessária uma faixa de uso exclusivo para veículos de emergência, localizada na lateral do túnel, provida de rede de hidrantes, devidamente sinalizada, permitindo que ao início do sinistro o Corpo de Bombeiros tenha acesso facilitado através desta faixa.

O quadro a seguir resume também algumas das determinações previstas no Decreto Estadual SP 46.076/2001<sup>138</sup>, - Regulamento de Segurança contra Incêndio das edificações e áreas de risco, - especificamente para túneis:

Tabela 11 – Resumo do Regulamento de Segurança -  
Decreto Estadual SP 46.076/2001

Divisão	TÚNEL (M-1)			
	Extensão em metros (m)			
	Até 200	De 200 à 500	De 500 à 1000	Acima de 1000
Segurança estrutural nas edificações	■	■	■	■
Saídas de emergência nas edificações	■ <sup>1</sup>	■ <sup>1</sup>	■ <sup>1</sup>	■ <sup>1</sup>
Controle de fumaça em espaços comuns e amplos			■ <sup>3</sup>	■ <sup>3</sup>
Plano de Intervenção de incêndio		■	■	■
Brigada de Incêndio		■ <sup>2</sup>	■ <sup>2</sup>	■ <sup>2</sup>
Sistema de Iluminação de Emergência		■	■	■
Sistema de Comunicação			■	■
Sistema Circuito de TV				■
Sistema de proteção por extintores		■	■	■
Sistema de hidrantes e de mangotinhos		■ <sup>4</sup>	■ <sup>5</sup>	■ <sup>5</sup>

NOTAS ESPECÍFICAS:

1 – Considerar saídas como sendo passarelas laterais (corredores de circulação, com guarda-corpo em ambos os lados) com largura mínima de 1,00m;

2 – A brigada de incêndio deve ser pessoal treinado da companhia de tráfego ou Administradora da via;

3 – Deve ser ligado a sistema automático de acionamento (ex. detector de incêndio);

4 – Rede de hidrante seca; e

5 – Rede de hidrante completa (bomba; reserva; mangueiras, etc.).

NOTAS GENÉRICAS:

a – Todos os túneis em paralelo devem ter interligação conforme Instrução Técnica de “Proteção Contra Incêndio em Túnel”; e

b – Os túneis com extensão superior a 1000m devem ser submetidos a análise em Comissão Técnica, além das exigências acima.

Por fim, deve ser destacado que o sistema de água para combate a incêndios deve prever a quantidade e a pressão necessárias aos objetivos.

### 1.6.3 Sistema de segurança contra sinistro e incêndio – NFPA 502 (2008)

Segundo a *NFPA 502*, deverá ser prevista uma caixa de alarme de incêndio com acionamento manual a cada 90m, - no máximo, - e em todas as saídas (transversais) de escape do túnel, com acesso livre ao público e aos funcionários. Da mesma forma, extintores portáteis de incêndio devem distar 90m, - no máximo, - e pesar até 9kg. Outrossim, a *NFPA 502* determina que nenhum ponto deve estar a mais de 45m do ponto de conexão da mangueira de incêndio e que a distância dos pontos de conexão (da mangueira) não devem estar a mais de 85m de afastamento um do outro. Todos devem estar devidamente protegidos de colisão com os carros<sup>139</sup>.

Deve ser previsto um sistema de detecção automática de incêndio capaz de identificar a localização de um foco de incêndio em um raio de 15m. Além disso, o sistema deve ser dividido em zonas correspondentes às mesmas do sistema de ventilação.

Um sistema de combate à incêndio com água em pontos fixos deve também ser previsto em túneis, de acordo com a *NFPA 502*.

Além disso, deve-se atentar para o fato de que a integridade do sistema elétrico deve ser assegurada ao máximo, com resistência mínima à temperatura de 316°C por um período de uma hora<sup>140</sup>.

O sistema de segurança é implicitamente relacionado com o sistema de emergência no que tange às seguintes disciplinas<sup>141</sup>:

- a) Iluminação de emergência;
- b) Controle de tráfego;
- c) Sinalização de saída;
- d) Comunicação;
- e) Drenagem;
- f) Ventilação;
- g) Detecção de incêndio;
- h) Segurança;
- i) CFTV.

A iluminação de emergência, além de contemplar a sinalização (de emergência), não deve ser “interrompida (...) por mais de 0,5 segundo” e “a uniformidade de iluminação não deve exceder os níveis de 40:1”<sup>142</sup>.

#### 1.6.4 Sistema de segurança contra sinistro e incêndio – *Australasian Fire Authorities Council*

Esta publicação considera alguns pontos fundamentais que parecem omissos nos documentos anteriormente listados. Ao estabelecer certos pontos de alerta, destaca:

a) “O uso de passagens transversais (movimento de transferência de um túnel para outro) requererá que o tráfego no túnel adjacente seja paralisado para evitar que se coloquem em risco usuários que estejam em situação de escape do túnel atingido pelo incêndio;

b) Em túneis com tráfego ameno, as baias de veículos poderão ser previstas permitindo que os carros façam um volta em “U”. [Evidentemente, este procedimento] não é recomendável para túneis com tráfego com grande densidade.

c) Diretrizes européias recomendam corredores de escape para túneis com alta densidade de tráfego, instalados em intervalos regulares de 100-200m.

d) Refúgios não são o ideal, entretanto se são os únicos meios de se prover um lugar seguro para os usuários no caso de um incidente, eles devem ser equipados com ar fresco e conexão de serviço de telefone de emergência com o [centro] de operação e controle. Devem ser à prova de fumaça e fogo e projetados para abrigar pessoas em situação provisória entre a saída de emergência e o ponto de refúgio.

e) Sinalização de padrão internacional é importante, contudo também necessita que seja adequada aos túneis. A sinalização deve estar conectada com uma fonte de força elétrica ininterrupta. Assim como a sinalização nos pontos de escape, iluminação de baixa luminosidade deve ser provida. [A sinalização deve possuir adequada localização e conseqüentemente boa visibilidade, com afastamento estratégico das camadas altas de fumaça].

f) O sistema de evacuação deve estar sempre iluminado, de forma a que os usuários se sintam familiarizados com os pontos e rotas de evacuação.

g) (...) Os planos de provisão de escape e gerenciamento devem ser inclusivos com os portadores de necessidades especiais”<sup>143</sup>.

### 1.6.5 Discussão sobre o Sistema de segurança contra sinistro e incêndio

Dentre alguns episódios exemplares, há duas ocorrências trágicas, recorrentes na bibliografia relacionada ao tema de segurança ao fogo em túneis: Mont Blanc (1999) e St. Gottard (2001). O quadro de destruição, em ambos os casos, evidenciou o relativo despreparo das instalações existentes para a proteção e combate aos incêndios.

No caso do incêndio no túnel de Montblanc, que possui cerca de 11,6km de extensão, com saídas na França e na Itália, reporta-se que a temperatura chegou à 1000°C. Houve 39 mortes, muitas pessoas feridas e intoxicadas, 36 veículos totalmente destruídos e a concentração de CO atingiu 150ppm. Deve-se notar que havia uma série de recursos para o combate ao incêndio que, embora tenha se mostrado ineficiente, comparativamente à realidade brasileira, seria considerado destacável. O quadro<sup>144</sup> a seguir demonstra estas condições em função do ano de 1999, quando houve o sinistro:

Quadro 1 – Comparação entre instalações e procedimentos antes e depois do incêndio no túnel de *Montblanc*

<b>ANTES DE 1999</b>	<b>DEPOIS DE 2002</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nichos de segurança a cada 100m, com caixa de emergência e 2 (dois) extintores de incêndio.</li> <li>• Nichos de combate a incêndio a cada 150m com ponto de água para combate a incêndio.</li> <li>• Sistema de detecção de incêndio e alarme.</li> <li>• Refúgio de segurança pressurizado ou abrigo de emergência a cada 600m com 2 (duas) horas de resistência ao fogo.</li> <li>• Sistema de ventilação obsoleto com dutos sob a rodovia e capacidade limitada de extração de fumaça.</li> <li>• 2 (dois) centros de comando e controle com uma brigada de combate a incêndio na entrada do lado francês.</li> <li>• Sinalização de tráfego a cada 1,2km.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Revestimento das paredes em aço inoxidável resistente ao fogo.</li> <li>• Refúgio de segurança pressurizado em concreto a cada 300m com portas de segurança conectados a um corredor de segurança paralelo ao túnel.</li> <li>• Um total de 116 extratores de fumaça a cada 100m.</li> <li>• Detectores de calor em cada uma das extremidades para identificar caminhões super-aquecidos.</li> <li>• 3 (três) centros de comando e controle com brigada de combate a incêndio 24 horas por dia.</li> <li>• Mais itens de sinalização de tráfego e de segurança.</li> </ul>

O túnel de St. Gotthard que liga a Suíça à Itália é o segundo maior túnel do mundo com 16,3 km, somente superado pelo túnel Laerdal na Noruega. Diariamente, cerca de 18.000 veículos o atravessam.

Em 2001, um incêndio de largas proporções o atingiu, vitimando cerca de 10 pessoas. A gravidade da tragédia é fortemente atribuída à duas características principais existentes: a) Apesar de haver túnel de emergência, a seção era por demais estreita para possibilitar a passagem de veículos de socorro; b) Não havia barreira entre as duas pistas com tráfego em sentidos opostos, fato que dificulta exponencialmente a exaustão dos poluentes e da fumaça<sup>145</sup>.

Durante muitos anos, a *PIARC* foi contrária à utilização de sistema de *sprinkler* em túneis. Os argumentos para que fosse desconsiderado o uso de *sprinklers* eram de diversas escalas e ordens:

- a) A maior parte dos incêndios se inicia nos motores dos veículos e o sistema de *sprinkler* somente é acionado quando o incêndio já atingiu proporções maiores;
- b) A água pode causar explosão ao entrar em contato com a gasolina e outras substâncias químicas;
- c) Há o risco de que, mesmo com a extinção do fogo, gases inflamáveis permaneçam em produção e possam causar explosão;
- d) Vapor d'água;
- e) Manutenção custosa etc.

Somente em 2008, esta posição foi reconsiderada e este recurso passou a ser visto como um elemento importante de combate ao incêndio. Alguns países como o Japão e a Austrália, por exemplo, utilizam este sistema há bastante tempo. Anteriormente, na presente pesquisa, foram relatadas as experiências realizadas em edifícios-garagem em que era constatada a importância de *sprinklers* para o controle da temperatura (*vide* 2.6. Sistema de segurança contra sinistro e incêndio). Estes testes foram realizados como forma de se traçar um paralelo entre ambientes segregados na relação com o controle de incêndio.

Outro ponto fundamental, segundo estudo realizado por Oddny Indrehus<sup>146</sup>, se refere às “emissões dos veículos [automotores] de  $\text{NO}_x$  que consiste na mistura de monóxido de nitrogênio (NO) e dióxido de nitrogênio ( $\text{NO}_2$ ). Se a atmosfera do túnel contiver oxidantes, ozônio ( $\text{O}_3$ ) ou radicais [ $\text{XO}_2^\bullet$ , onde X = H ou R (parte de uma molécula orgânica)], ocorrerá as seguintes reações:



As reações (1) e (2) podem explicar os altos índices de  $\text{NO}_2 / \text{NO}_x$ , em situações com baixas concentrações de  $\text{NO}_x$ . Assume-se que as concentrações de oxidantes  $\text{O}_3$  ou radicais  $\text{XO}_2\bullet$  são baixas na atmosfera do túnel (as concentrações  $\text{O}_3$  no ar ambiente é usualmente menor que 0,05 ppm). Em altas concentrações de  $\text{NO}$ , quando não houver mais oxidantes para as reações (1) e (2), a oxidação por oxigênio no ar será mais importante:



Até o final do século XX, se considerava que:

“Os sistemas de ventilação (de túneis) eram dimensionados para diluir o CO a níveis aceitáveis e para reduzir a opacidade devido a emissão de fuligem de motores movidos à diesel (...). O fluxo de ar necessário para a diluição de CO era supostamente a garantia de diluição dos demais poluentes, em particular óxido de nitrogênio, sem a necessidade por maiores considerações. Deve ser destacado que não havia critérios concernentes ao sistema de ventilação, nem aos limites admissíveis para o óxido de nitrogênio, durante a operação [do túnel]”<sup>147</sup>.

No entanto, a diminuição de emissão de CO por parte dos veículos fez com que os padrões de controle relacionados com outros poluentes ficassem defasados.

Em linhas gerais, o estudo realizado pela *PIARC* intitulado *Pollution by nitrogen dioxide in road tunnels* conclui que:

“Os níveis de  $\text{NO}_2$  devem ser considerados para o dimensionamento do sistema de ventilação de túneis. Além disso, o limite recomendado para pessoas saudáveis é de 2.000  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (1ppm) para  $\text{NO}_2$ ; esses valores limites conduzem a um razoável e coerente dimensionamento do sistema de ventilação quando comparado com as necessidades dos critérios de opacidade”<sup>148</sup>.

O *Fire Safety Guidelines for Road Tunnels* (2001) estabelece padrões semelhantes à NBR-15661/2009 no que concerne às distâncias de extintores, hidrantes e mangueiras. A *Australasian Fire Authorities Council* (2001) complementa pequenos detalhes que podem ser importantes no gerenciamento ambiental de túneis<sup>149</sup>. Assim, é estipulada a localização ideal para hidrantes e mangueiras, nas entradas/saídas dos túneis e em intervalos regulares de 60m. Os extintores químicos em cada nicho de equipamento e extintores de  $\text{CO}_2$  adjacentes a todos os quadros de elétrica, painéis de controle etc. Esses equipamentos devem estar localizados no

túnel em caixas numeradas, sinalizadas e facilmente visíveis e acessíveis para motoristas e serviços de emergência.

A publicação elaborada pela *United Nations* (2001) é um pouco mais tolerante que as diretrizes acima descritas, inclusive em relação aos parâmetros indicados pela *Australasian Fire Authorities Council* (2001), e preconiza a existência de:

“Saídas de emergência em intervalos compreendidos entre 200 m e 500 m (ou menos), com a utilização de curtas galerias de escape para uma área aberta, quando a topografia permitir, ou uma galeria de segurança paralela. Uma galeria de escape sob a via pode ser uma solução aceitável, se justificável por análises técnicas e econômicas”.

Se for técnica e economicamente muito difícil (...) construir rotas de fuga, as análises de cenários de incêndio devem assegurar a segurança do usuário com a dispensa deste artifício. Neste caso, o próprio túnel é utilizado como rota de fuga. [Contudo], se isso não for demonstrado (provado), estes elementos devem ser construídos”<sup>150</sup>.

Segundo este mesmo documento, “em túneis duplos, em caso de um incidente em um dos tubos, o outro deve ser utilizado como uma rota de escape e resgate ou, alternativamente, saídas diretamente direcionadas para áreas ao ar livre devem ser disponibilizadas”. (...) Neste caso, em intervalos entre 600 m e 1.500 m, uma interligação transversal deve ser projetada para a passagem de veículos de serviços de emergência”<sup>151</sup>.

De acordo ainda com o documento emitido pelo Parlamento Europeu<sup>152</sup>:

“As saídas de emergência devem permitir que os utentes (usuários) do túnel o abandonem sem os seus veículos e alcancem um local seguro em caso de acidente ou incêndio, e devem proporcionar também o acesso a pé ao túnel para os serviços de emergência. Como exemplos de saídas de emergência, citem-se os seguintes:

- Saídas diretas do túnel para o exterior.
- Ligações transversais entre tubos dos túneis.
- Saída para uma galeria de emergência.
- Abrigos com uma via de evacuação independente dos tubos do túnel”.

Nesta mesma publicação, além de se determinar que, “saídas de emergência devem ser previstas sempre que o volume de tráfego for maior que 2.000 veículos por faixa de rolamento”, se aponta também a distância máxima de 500m entre saídas de emergência e se destaca que:

“Devem ser utilizados meios adequados, como portas, para impedir a propagação da fumaça e do calor para dentro das vias de evacuação por trás das saídas de emergência, por forma a que os utentes (usuários) do túnel alcancem o exterior e os serviços de emergência possam aceder ao túnel”<sup>153</sup>.

Os documentos acima destacados são bastante precisos nas descrições das situações emergenciais e instalações a serem previstas. Entretanto, deve-se enfatizar, a importância das normas referentes à acessibilidade. No caso do Brasil, recomenda-se fortemente a consulta à NBR-9050 para que se verifiquem os padrões

de acessibilidade que permitam o perfeito uso das instalações gerais, incluindo as áreas de escape (no caso de sinistro).

## 1.7 Sistema de drenagem

A umidade dos túneis pode ser um problema, pois, através da matéria líquida, há o transporte de compostos poluentes concentrados naquele ambiente restrito, principalmente advindos das emissões dos veículos ou ainda ocasionados por derramamento de combustível ou atrito dos pneus etc.:

“A maior parte dos túneis é escavada abaixo do nível da água. A abertura do túnel atua como um grande dreno e toda a água que está correndo através das rochas ou contidas no solo tende a ser coletada no túnel”<sup>154</sup>.

De acordo com a NBR-15661/2009, o projeto de um túnel rodoviário deve prever a coleta, armazenagem e descarga de efluentes que se façam presentes no interior do túnel, principalmente em função das seguintes ocorrências: a) água para combate a incêndios; b) líquidos originados por incidentes; c) águas de limpeza e d) infiltração.

Um fator que deve ser considerado positivo em relação às condicionantes (variáveis) de implementação de eficientes sistemas de drenagem em túneis baseia-se no pressuposto de que há mais facilidade de coleta de líquidos em ambientes restritos. Em documento emitido por um grupo de especialistas da ONU, se considera a condição mais favorável de controle dos líquidos oriundos de drenagem em túneis na relação comparativa com estradas abertas (ao ar livre), pois se assume como básico (ou prosaico) que “os fluídos existentes e as águas usadas para extinção de incêndio [sejam] coletados pelo sistema de drenagem dos túneis e nos seus portais [de acesso]”<sup>155</sup>.

### 1.7.1 Sistema de drenagem – NBR-15661/2009

Desta forma, ao longo de toda a extensão do túnel, deverá haver “grelhas de escoamento, situadas nas laterais da pista, possibilitando o rápido escoamento do interior do túnel para bacias de contenção”<sup>156</sup>, através de redes coletoras subterrâneas. Neste caso, um aspecto importante a ser considerado é que, no caso de derramamento de efluente inflamável, não haja propagação do fogo ao

longo do túnel através do sistema coletor (drenagem).

As bacias de contenção devem ser projetadas de modo que tenham capacidade para conter no mínimo  $15\text{m}^3$ , associadas a um sistema de bombeamento de no mínimo  $45\text{m}^3/\text{h}$ , ou capacidade para conter até  $45\text{m}^3$  no mínimo<sup>157</sup>.

### 1.7.2 Sistema de drenagem – U.S.Department of Transportation Federal Highway Administration (2009)

Há basicamente dois tipos de sistemas de proteção à água: com dreno (aberto) e sem dreno (fechado):

#### - Aberto:

“O sistema de proteção à água do tipo aberto permite que a umidade do solo penetre no sistema de drenagem do túnel. [Neste caso,] normalmente a área da abóbada é provida com um sistema de proteção à umidade que forma um guarda-chuva de proteção que drena a água de maneira que ela penetre nas cavidades em volta do arco em um sistema (de drenagem) que se localiza na base das laterais dos túneis na face exterior. O sistema aberto é frequentemente utilizado em túneis em rocha onde as taxas de infiltração são baixas. (...) Este sistema é normalmente instalado entre o apoio inicial (revestimento inicial) do túnel e o apoio final (revestimento permanente) do túnel. O sistema aberto geralmente permite um apoio final mais econômico (...) já que a pressão hidrostática é grandemente reduzida ou eliminada”<sup>158</sup>.

#### - Fechado:

“O sistema de proteção à água do tipo fechado, frequentemente referenciado como sistema em reservatórios, se estende por todo o perímetro do túnel e objetiva excluir completamente a [possibilidade de] penetração da umidade do solo no sistema de drenagem do túnel. (...) O apoio final deve ser projetado para receber toda a pressão hidrostática da água. Este sistema é aplicado frequentemente em solos permeáveis onde o descarte da umidade do solo no túnel poderia ser significante [e poderia modificar o nível do] lençol freático (...)”<sup>159</sup>.

Ou seja, neste caso, pode se concluir que “um sistema de proteção à água é usado para prevenir que a umidade do solo penetre através de aberturas no subsolo”.

Baseado em estudos realizados em diversos países (Alemanha, Austrália, China, EUA etc.), o limite consensual de infiltração permitida em túneis é:  $\leq 10 \text{ ml}/0,09\text{m}^2/\text{dia}$  ( $0,002 \text{ gal}/\text{pés}^2/\text{dia}$ )<sup>160</sup>. O que equivale a algo próximo de  $110\text{ml}/\text{m}^2/\text{dia}$ . A preocupação é como evitar que esta quantidade relativamente grande de água, repleta de material poluente advindas dos próprios automóveis, seja despejada diretamente na rede de drenagem da cidade, sem qualquer tipo ou nível de tratamento.

Por fim, destaca-se que:

“A drenagem deve ser prevista em túneis para atender às águas de superfície, assim como recolher águas oriundas de infiltração (vazamento). Entretanto, as linhas de drenagem e os poços coletores e as bombas devem ser dimensionados para acomodar a intrusão da água e/ou água utilizada em combate a incêndio. Eles devem ser desenhados de forma que o fogo não se espalhe através do sistema de drenagem em tubos adjacentes, através do isolamento. Por razões de segurança, PVC, fibra de vidro em tubulações ou outros materiais combustíveis não devem ser utilizados”<sup>161</sup>.

### 1.7.3 Sistema de drenagem – NFPA 502 (2008)

De acordo com a *NFPA 502*, “um sistema de drenagem deve ser provido em túneis para coletar, armazenar ou descartar efluentes do túnel ou para desempenhar a combinação destas funções”.

“O sistema de drenagem deve ser desenhado de forma que o derramamento de líquidos perigosos ou inflamáveis não se propague ao longo do túnel”.

Os materiais devem ser não-combustíveis: aço, ferro ou concreto.

“O sistema de coleta de drenagem deve drenar ou transferir [o líquido] através de bomba[s] para um reservatório (...) sem causar alagamento da rodovia”<sup>162</sup>.

### 1.7.4 Discussão sobre o Sistema de drenagem

Menezes<sup>163</sup> em pesquisa para “avaliação da qualidade de águas de drenagem urbana correlacionada aos poluentes originados pelo tráfego de veículos automotores” descreve algumas fontes de poluição difusa urbana em função da “lavagem” como, por exemplo: a) da deposição atmosférica; b) de resíduos (ferrugem, borracha dos pneus etc.) deixados por veículos; c) derramamento de combustível e óleo lubrificante; d) metais pesados como chumbo, cobre, zinco etc.

O objetivo primacial do autor era determinar o tipo de contribuição de poluentes dos veículos automotores à drenagem urbana, face à situação de segregação do túnel, distante de influências de outras fontes móveis ou fixas de poluição, livre de variações meteorológicas etc. O túnel Rebouças foi utilizado como estudo de caso e serve de alerta como fato específico e sistêmico.

Como metodologia, o autor utilizou a característica de isolamento do túnel de forma a coletar “amostragens em áreas não atingidas por eventos naturais de precipitação pluviométrica”. Assim, através de coleta de amostras em pontos fixos, no interior e no exterior (no sentido da drenagem) do túnel, foi possível se

estabelecer uma correlação entre a utilização existente (tráfego de veículos) e o material poluente produzido, em função de criteriosos procedimentos.

Os diferentes tipos de piso (asfalto e concreto) das galerias permitiram que fosse concluído que, embora mais custoso, o piso em concreto (nas galerias menores, nos dois sentidos), por oferecer menos resistência mecânica e, portanto, produzir e reter menos poluentes, é do ponto de vista ambiental mais indicado.

“Os parâmetros escolhidos foram: sólidos totais, sólidos suspensos totais, condutividade, pH, alcalinidade total, óleos e graxas, DQO, nitrogênio amoniacal, fósforo total, BTEX, cromo, cádmio, cobre, chumbo, zinco, níquel, ferro e manganês”<sup>164</sup>.

As principais conclusões de Menezes são:

“Nas águas de lavagem de piso, observa-se que o pH varia e indica sempre valores na faixa ácida independente do número de veículos que circularam e o tempo, uma explicação plausível está na possibilidade de ocorrer reações entre os gases (óxidos) da combustão e o vapor d’água da própria descarga e mesmo do ar confinado no interior do túnel, produzindo ácidos fixos que precipita e ataca as superfícies do túnel.

A condutividade relativamente alta é outro indicativo de que pode estar havendo deposição de substâncias dissociadas ou de agregados iônicos na pista, originados por hipótese em acidentes no trânsito, eventuais derrames no túnel ou mesmo da própria deposição seca e a umidade relativa do túnel. (...) O parâmetro óleos e graxas registrou valores acima dos limites estabelecidos pela legislação”<sup>165</sup>.

Embora com objetivos distintos daqueles levantados e discutidos no presente trabalho, pode-se concluir que a falta de tratamento primário da água de “lavagem” (drenagem) de túneis automotivos pode impactar negativamente nos ambientes do entorno (na bacia correspondente), ao produzir um efluente com considerável carga poluidora.

Menezes, por fim, completa:

“Como forma de minimizar os impactos causados (...), sugere-se verificar a possibilidade de fazer um tratamento primário no sentido de reduzir a carga orgânica e diminuir os sólidos totais do efluente”<sup>166</sup>.

O quadro a seguir mostra a situação levantada no túnel Rebouças, segundo a referida pesquisa:

Tabela 12 – Quantidade de poluentes depositados por veículo/dia – Túnel Rebouças

<b>Quantidades de poluentes depositados por veículo/dia</b>	
Poluente	Massa (mg) de poluente por veículos/dia
Óleos e Graxas	1,20
DQO	2,70
Sólidos Totais (ST)	9,40
Sólidos Totais em Suspensão (ST)	0,90

Como, no caso, os dados se relacionam à cidade do Rio de Janeiro e especificamente em relação ao túnel Rebouças, há a possibilidade de transporte dos efluentes considerados para o emissário submarino que interliga diversos bairros da Zona Sul da cidade. Neste sentido é possível que o tratamento primário seja considerado aceitável por muitos, pois parte-se da premissa de que os esgotos sanitários são lançados em mar aberto e que a capacidade de auto-depuração das águas marinhas é alta. Entretanto, sublinha-se que o emissário submarino deveria ser considerado apenas um elemento complementar do sistema de tratamento e disposição de efluentes.

O ideal seria que, em um futuro não muito distante, se considerasse um nível de tratamento primário e secundário para todos os efluentes de drenagem da cidade e que não fosse necessário simplesmente se considerar uma alternativa entre a poluição pontual (emissário submarino) e a poluição difusa (drenagem para a bacia da Lagoa Rodrigo de Freitas).

## 1.8 Sistema de gerenciamento de resíduos sólidos

Na literatura internacional pesquisada não foi encontrada nenhuma referência aos resíduos sólidos depositados nos túneis urbanos. Em linhas gerais, conclui-se que este é um problema de países em desenvolvimento com baixa civilidade de sua população em relação ao espaço público. Conformer uma base de análise sobre este tema se faz possível somente através do levantamento dos procedimentos adotados pelos gestores de grandes túneis no Brasil, particularmente nos dois casos destacados como estudos de caso.

Em primeiro lugar, torna-se interessante destacar-se qual a amplitude e o significado da expressão “lixo”, ainda que de forma pouco aprofundada, mas suficiente para a compreensão da disciplina:

“O lixo depositado nas ruas e avenidas é [uma] grande fonte de poluição. De forma geral, entre os principais resíduos sólidos urbanos lançados nas vias públicas incluem-se: embalagens, matéria orgânica como cascas de fruta, dejetos de animais, folhas secas, grama cortada e lixo deixado por descuido na coleta. A quantidade de lixo deixada nas ruas depende da densidade de ocupação da área, do movimento de pedestres e de veículos e, principalmente, da educação da população. Esse tipo de poluição é, facilmente, visível e acarreta danos pela obstrução de canalizações, gerando cargas significativas de matéria orgânica e bactérias”<sup>167</sup>.

A responsabilidade sobre o destino final do lixo coletado nas galerias dos túneis da cidade do Rio de Janeiro parece recair sobre a firma terceirizada responsável pela coleta. Não há qualquer atitude manifesta por parte dos gestores contatados em se estabelecer triagem dos tipos de resíduos sólidos e, nem tampouco, o acompanhamento de suas deposições (aterro sanitário, incineradores etc.).

## 2 RESULTADOS E CONSIDERAÇÕES GERAIS E ESPECÍFICOS

### 2.1 Resultados e considerações gerais

No estado do Rio de Janeiro, não há exemplares de túneis rodoviários urbanos que atendam as diretrizes previstas na NBR-9050/2004 (Acessibilidade a edificações, mobiliário, espaços e equipamentos urbanos) e NBR-9077/2001 (Saída de emergência em edificações), conforme recomendação da NBR-15661/2009, em relação “a necessidade de saídas e passagens de emergência, constituindo rotas de saída”. Em realidade, possivelmente, no Brasil, não há indícios de que existam unidades que realmente correspondam às normas e recomendações de padrão internacional.

Em geral, nos túneis destinados aos veículos automotivos no Brasil, verifica-se a carência de equipamentos de comunicação e monitoramento de poluentes. A administração pública, nos casos em que atua como administradora e mantenedora do túnel, em alguns casos, responsabiliza o vandalismo e o roubo como causas para a inexistência de material de iluminação e comunicação, por exemplo. No entanto, na medida em que estes desvios de conduta são inegavelmente existentes no contexto brasileiro, deveria desenvolver recursos de maneira a minimizar ou coibir estas ações e almejar a disponibilização dos serviços e materiais necessários ao pleno e seguro funcionamento dos túneis urbanos.

Da mesma forma, o monitoramento por CFTV, pouco verificado em túneis destinados a veículos automotivos, além de permitir um atendimento (socorro) mais eficaz e rápido em caso de sinistro, pode ser um aliado na redução de lançamento de resíduos sólidos dos automóveis que pode ocasionar incidentes e acidentes graves. Além disso, no caso do Brasil, poderia contribuir para a segurança patrimonial.

Ainda no âmbito brasileiro, é inadmissível que não haja uma maior atenção aos recursos tecnológicos atualmente utilizados em diversos países, no que concerne, por exemplo, à(o): a) controle de poluentes tipicamente oriundos de veículos automotivos; b) sinalização de conteúdo variável; c) retransmissão de rádio; d) alarmes; e) sistemas de detecção de incidentes automático conectado ao CFTV; f) sistema de rastreamento de calor; g) gerenciador de fumaça; h) sistema de *sprinklers* etc. conforme visto ao longo da presente pesquisa.

Na Directiva 2004/54/CE do Parlamento Europeu e do Conselho da União Europeia, relativa aos requisitos mínimos de segurança para os túneis da Rede Rodoviária Transeuropeia, é estabelecida a necessidade de faixas específicas para socorro de sinistros. A própria NBR-15661/2009, aliás, determina parâmetros para as rotas de fuga de pedestres em túneis. Todavia, estas implementações são raríssimas em território brasileiro. Além disso, a existência de acostamento é praticamente desconsiderada. Uma medida paliativa seria a previsão de baias equipadas com extintor, hidrantes e interfones ligados diretamente ao centro de controle e operação, mas há poucos túneis no Brasil com este recurso.

De forma geral, a limitação de emissão de poluentes por veículos automotivos poderia ser mais eficiente, se os estados e municípios brasileiros, por meio de seus respectivos órgãos ambientais, se responsabilizassem por inspeções periódicas.

Apesar do Instituto Estadual do Ambiente (INEA) – antiga FEEMA – relatar que “o Rio de Janeiro é o único estado do país que implantou o Programa de Inspeção e Manutenção de Veículos em Uso - Programa de I/M, em 1997, por meio de convênio de cooperação técnica entre a Feema e o Detran-RJ”<sup>168</sup>, frequentemente há discontinuidade deste controle nas vistorias anuais de veículos. Ou seja, este que poderia ser um avanço legal e ambiental importante é tratado de forma pouco rigorosa, em desacordo com o próprio Código de Trânsito Brasileiro (CTB) que em seu artigo 104, determina que:

“Os veículos em circulação terão suas condições de segurança, de controle de emissão de gases poluentes e de ruído avaliadas mediante inspeção, que será obrigatória, na forma e periodicidade estabelecidas pelo CONTRAN para os itens de segurança e pelo CONAMA para emissão de gases poluentes e ruído”.

§ 5º Será aplicada a medida administrativa de retenção aos veículos reprovados na inspeção de segurança e na de emissão de gases poluentes e ruído”<sup>169</sup>.

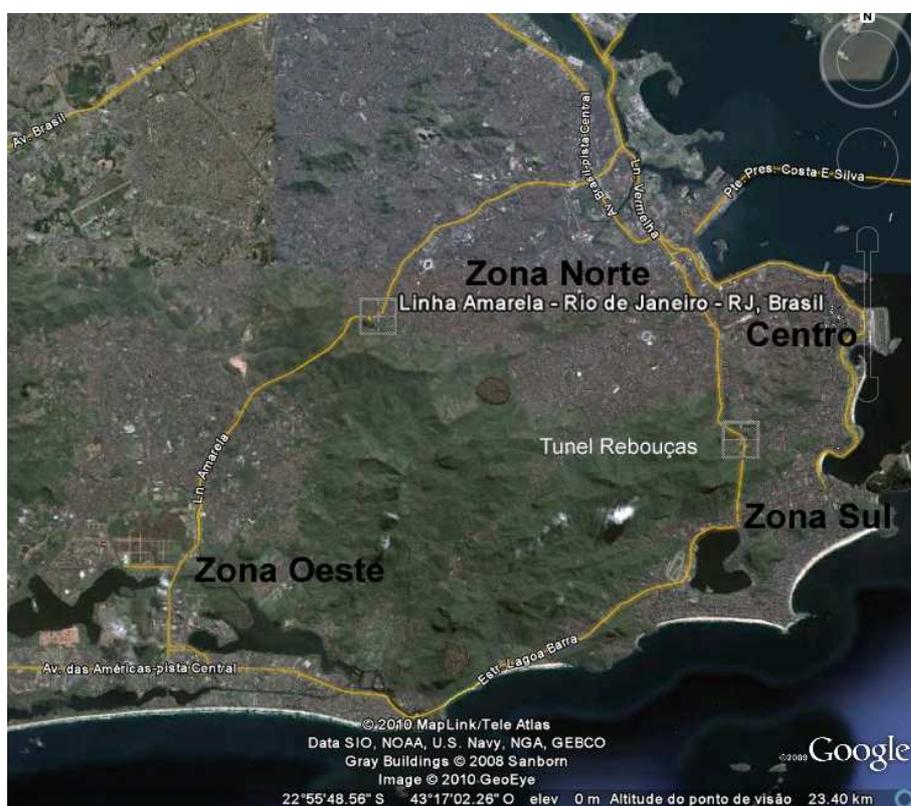
É fundamental que exista um centro de controle e operação dotado de equipamentos modernos e conduzido por pessoal altamente qualificado para atendimento de sinistros, orientação de condutores, provimento de máxima segurança para usuários e funcionários, manutenção preventiva, planejamento proativo etc.

## 2.2 Resultados e considerações específicos

Como estudo de caso, dois grandes túneis urbanos são objetos de análise particular, que permitem a interpretação de aspectos gerais que norteiam todo o desenvolvimento deste trabalho: Túnel Rebouças (1962-1965) e Túnel Engenheiro Raymundo de Paula Soares (1995-1997).

Ambos localizados na cidade do Rio de Janeiro são reconhecidos como exemplos característicos de túneis rodoviários urbanos, no contexto de seus tempos (época).

Figura 9 – Localização do túnel Rebouças



Google earth, acesso: outubro/2010

Figura 10 - – Localização do túnel Eng. Raymundo de Paula Soares



Google earth, acesso: outubro/2010.

## 2.2.1 Estudo de Caso – Túnel Rebouças (1962-1965)

Este túnel ostentou durante alguns anos o título de maior túnel urbano do mundo. É composto por dois segmentos de 760 m e 2.040 m e serve de instrumento de conexão fundamental e indispensável entre a Zona Sul e o Centro (em cuja adjacência há ligações importantes para a Zona Norte e a periferia da cidade).

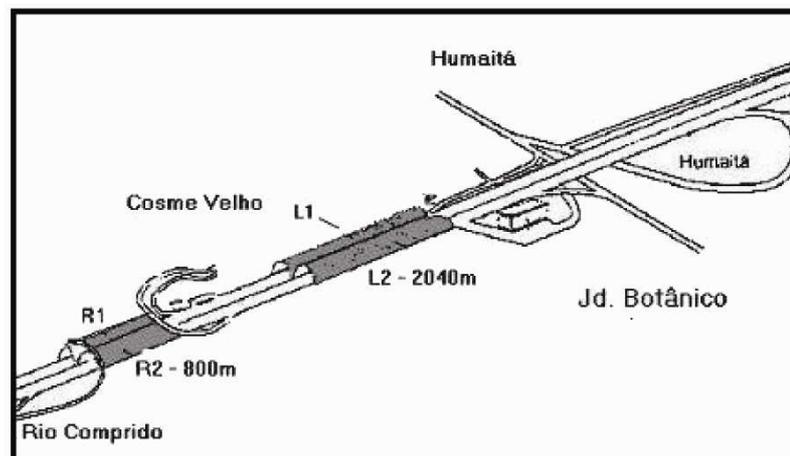
Foi projetado para receber duas faixas de rolamento por galeria. Entretanto, poucos anos mais tarde, já contava com três faixas de rolamento, em função da demanda relativa ao fluxo excessivo de veículos. O gerenciamento deste túnel é realizado pela Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro.

### 2.2.1.1 Características físico-espaciais

#### 2.2.1.1.1 Extensão do túnel

Há um total de 2,8km, distribuído em duas galerias e dois tubos, de acordo com a NFPA 502 é um túnel da Categoria D em que deveriam ser aplicados todos os procedimentos de proteção de incêndio em túneis (vide seção 3.1.1.).

Figura 11 – Túnel Rebouças



Túnel Rebouças.

R1-L1, sentido Jardim Botânico-Rio Comprido.

R2-L2, sentido Rio Comprido-Jardim Botânico.

*Moreira, Andréa C. de Castro Araújo (et al.). Op. Cit., p. 18, 2007.*

#### 2.2.1.1.2 Número de tubos

O túnel Rebouças possui tubos independentes. Ou seja, não há compartilhamento bidirecional em uma seção única.

#### 2.2.1.1.3 Número de galerias

Há duas galerias para cada tubo, com interligação: a) entre os bairros da Lagoa e o Cosme Velho e b) entre os bairros do Cosme Velho e Rio Comprido.

#### 2.2.1.1.4 Número de faixas

O número de faixas de rolamento original era de duas em cada sentido. Posteriormente, adotou-se a configuração atual com três faixas em cada sentido.

Em 1979, houve um estudo para a superposição de pistas. Essa idéia, possivelmente de difícil exequibilidade, foi desconsiderada, após ter sido amplamente divulgada<sup>170</sup>.

#### 2.2.1.1.5 Largura das faixas

A largura de faixa de rolamento padrão para túneis, segundo a NFPA 502, por exemplo, é de 3,6m. No túnel Rebouças, as faixas laterais tem apenas 3,0m e, a largura da pista de rolamento central é de 2,9m. Estas dimensões devem ser consideradas como extremamente estreitas. Pode-se dizer que estão no limite da viabilidade de uso do túnel, principalmente ao se considerar que os ônibus somente podem circular por esta faixa (central), em função da altura do próprio túnel.

O maior problema, entretanto, deve-se à proximidade excessiva com as laterais do túnel que pode implicar em acidentes e que inviabiliza o estacionamento (temporário) de veículos avariados. Deveria haver, portanto, um limite mínimo (*minimum minimorum*) de cerca de 1,8m entre a linha mais extrema da faixa de rolamento e o limite físico do túnel, preferencialmente nas duas laterais. Esta característica, evidentemente, tornaria o túnel mais seguro.

Em 1996, houve um início de obras para que fossem previstos acostamentos nos dois sentidos, conforme pode ser confirmado em visita técnica. No entanto, essa idéia parece ter sido descartada de forma definitiva<sup>171</sup>.

#### 2.2.1.1.6 Altura do túnel

De acordo com o corpo técnico que administra o túnel Rebouças, há duas alturas principais: a) No trecho entre o Rio Comprido e o Cosme Velho (R1/R2), cerca de 6,80m; b) No trecho entre a Lagoa Rodrigo de Freitas e o Cosme Velho (L1/L2), cerca de 9,00m.

#### 2.2.1.1.7 Alinhamento horizontal e vertical

É temerário se afirmar que o projeto de alinhamento do túnel Rebouças foi realizado em função de condições geológicas, geotécnicas, por exemplo, ou quaisquer outras condicionantes, sem dados complementares. Percebe-se que os raios das curvas existentes são relativamente amenos. A mudança de direção mais significativa ocorre nas proximidades do bairro do Cosme Velho, nas imediações do intervalo entre as seções.

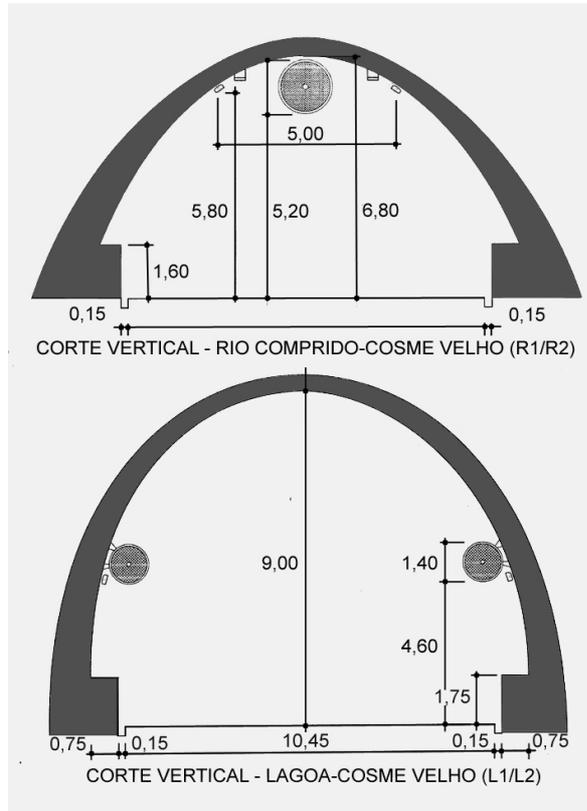
#### 2.2.1.1.8 Tipo de construção e dos materiais de acabamento

A estrutura do túnel Rebouças é totalmente baseada em concreto armado. Inexiste o que pode ser considerado um material de acabamento. Houve apenas o jateamento de concreto nas superfícies internas.

#### 2.2.1.1.9 Existência de tráfego em um ou dois sentidos

Há tráfego nos dois sentidos. No entanto, os tubos são segregados e não há qualquer influência entre eles, exceto os de caráter de fornecimento de energia e controle dos equipamentos.

Figura 12 - Corte vertical Rio Comprido-Cosme Velho, Lagoa-Cosme Velho



Fornecida pelo corpo técnico do túnel Rebouças, 2010.

#### 2.2.1.1.10 Aclives ou declives, no interior do túnel

Entre o acesso Lagoa Rodrigo de Freitas e o Cosme Velho, há uma diferença da ordem de 40 m de altura distribuídos em quase 2 km de comprimento deste trecho (L1). Portanto, há uma inclinação de quase 2% entre um extremo e outro.

Isso significa que no sentido do aclive, há uma maior solicitação dos veículos. Neste caso, esta sobrecarga acarreta uma maior emissão de poluentes pelos veículos automotivos e, conseqüentemente, há uma maior demanda de equipamentos de exaustão e ventilação.

De acordo com a NBR 15661/2009, deve-se atentar para a necessidade de medidas adicionais para inclinações superiores à 3% em túneis. Além disso o *U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration* (2009), determina que as inclinações não devam exceder 4%, ainda que reconheça serem recorrentes inclinações de até 6%.

Os estudos realizados pela PETROBRÁS (2007) indicam a presença de maior concentração de poluentes no sentido Lagoa-Rio Comprido. Além disso, a própria distribuição de ventiladores, em maior número neste trecho, ratifica a interferência lógica de aclives na exigência dos equipamentos dos veículos, em paralelo ao maior gasto de combustível.

#### 2.2.1.1.11 Características físicas das vias à montante e à jusante (ao túnel)

Consideram-se todos os acessos (à montante) inadequados. As faixas de rolamento são estreitas. Outrossim, as faixas principais concorrem com as (faixas) secundárias, pois não há uma faixa de aceleração (para as faixas secundárias) suficientemente longa e de convergência gradual. Isso ocorre na entrada do túnel Rebouças no sentido Centro, Zona Sul e no Cosme Velho (na pista no sentido Zona Sul).

A publicação Directiva 2004/54/CE, Jornal oficial da União Europeia (2004), indica, por exemplo, “que qualquer alteração do número de faixas deverá ocorrer a uma distância suficiente a montante da entrada do túnel, esta distância deve corresponder, pelo menos, à distância percorrida em 10 segundos por um veículo [em circulação em] velocidade máxima controlada”.

No caso do túnel Rebouças, em que a velocidade máxima permitida é de 90Km/h, tem-se a seguinte distância mínima:

$$\Delta x = 90 \times 0,0025 = 0,225\text{km}$$

$$\Delta x = 225\text{m.}$$

Este fato que não é observado na prática, nos referidos locais.

À jusante, há problema semelhante, pois os veículos tem dificuldade em se direcionarem para as faixas de rolamento laterais. Isso ocorre na saída sentido Centro (Rio Comprido), na saída sentido Zona Sul (Jardim Botânico) e na saída sentido Centro (Cosme Velho), haja vista que a geometria das vias é inapropriada, possivelmente em função da ampliação do número de faixas de rolamento (inicialmente prevista para duas faixas e adaptada para três).

#### 2.2.1.1.12 Características da sinalização das vias à montante, no interior e à jusante (ao túnel)

De forma geral, as placas fixas de sinalização são escassas, mal localizadas e de dimensões reduzidas. As que se encontram à montante podem ser consideradas adequadas. No entanto, no interior, as indicações de destino são excessivamente próximas dos pontos de desvio e são relativamente pequenas. Isso repercute na fluidez do tráfego nas saídas do túnel, pois os condutores tem dificuldade em se anteciparem aos acessos disponíveis.

Ao longo do túnel, há somente algumas (poucas) placas de velocidade máxima permitida (90 Km/h).

A argumentação de que a geometria do próprio túnel inviabilizaria a instalação de placas maiores é desmedida, pois a altura interna é suficientemente grande. Além disso, seria possível a instalação de placas individuais de orientação somente na parte mais alta, em diversas partes do percurso.

Outrossim, inexistente sinalização luminosa de conteúdo variável. Este tipo de sinalização poderia trazer benefícios significativos aos usuários, pois disciplinaria o tráfego e disponibilizaria informações que caráter crucial no tocante à: a) mitigação de acidentes; b) aumento da concentração de poluentes; c) diminuição de engarrafamentos etc.

#### 2.2.1.1.13 Existência de alternativas de rota de resgate, socorro e fuga, além de áreas de segurança para espera por socorro, dotada de instrumentos para a prevenção de acidentes e de intoxicação

Não há previsão de rota de resgate, socorro e fuga. Além disso, não há acostamento ou baias de segurança equipadas com telefone, hidrante e extintor. Em caso de necessidade de escape de pedestres, os veículos são abandonados nas próprias faixas de rolamento e a fuga ocorre entre os outros veículos (em geral, em movimento). Além disso, não é possível se estabelecer qualquer tipo de comunicação com o centro de controle e operação.

Um sobressalto existente nas laterais das galerias é comumente utilizado como rota de escape, sem que tenha sido construído com esta finalidade. Assim, além de suas alturas serem excessivas – até 1,70m, - não há facilidades de acesso

(acessibilidade), continuidade, proteções laterais e larguras adequadas - de acordo com a NFPA 502 (2008), de no mínimo 1,12m.

O documento emitido pela *United Nations* (2001), conforme visto, prevê baias com sinalização indicativa em túneis, em intervalos entre 500m e 1.000m. No túnel Rebouças inexistia baia, embora o túnel meça cerca de 2.000m em sua maior seção.

#### 2.2.1.1.14 Tempo estimado para atendimento ao sinistro

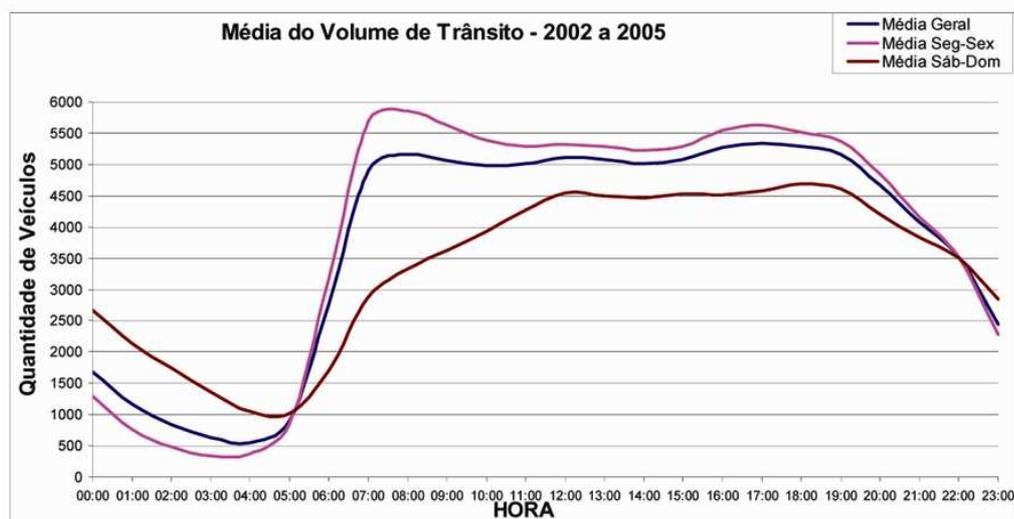
Esta informação não foi fornecida. Sabe-se apenas que há o atendimento da ordem de 800 sinistros por mês, mas parece não haver estatística relativa ao controle de tempo de atendimento de sinistro.

#### 2.2.1.2 Formas de uso

##### 2.2.1.2.1 Volume de tráfego por galeria por faixa de horário

Deve-se atentar para o grande fluxo de veículos no Túnel Rebouças, principalmente no horário compreendido entre 6h30min e 20h, da ordem de 5.000 à 5.500 veículos por hora, conforme pode ser visto no gráfico a seguir.

Gráfico 4 – Média do Volume de Trânsito – 2002 a 2005

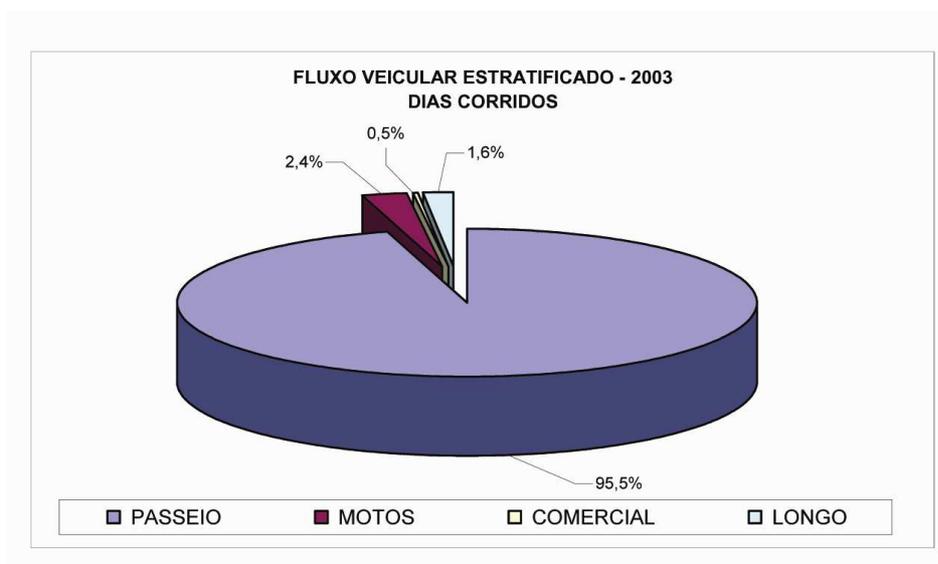


### 2.2.1.2.2 Presença de veículos pesados (caminhões e ônibus) e motocicletas e suas consequências

O uso do túnel Rebouças é restringido a caminhões em geral. Portanto, o número de veículos com combustível a óleo diesel é relativamente pequeno. O que torna o ambiente menos poluído principalmente em relação ao  $\text{NO}_x$ , MP e, de certa forma,  $\text{SO}_2$ .

De acordo com o Relatório Técnico “Monitoramento dos poluentes atmosféricos emitidos pela frota circulante no túnel Rebouças – Consolidação dos resultados da SE-04 de 2002 a 2005”, a extratificação do fluxo veicular, em números médios para o ano de 2003, possuía as seguintes características:

Gráfico 5 – Fluxo veicular estratificado – 2003 – dias corridos



Nesta pesquisa, realizada entre 2002 e 2005, relatava-se:

“É sabido da literatura que a produção do SO<sub>2</sub> tem ampla vinculação com o teor de enxofre do combustível, sendo o diesel o combustível automotivo de maior teor de S [enxofre] na frota local. No mercado brasileiro o diesel é comercializado com até 2000 ppm de teor de enxofre (ANP 310, 2001) e a gasolina com 1000 ppm de teor de enxofre (ANP 309, 2001)”<sup>172</sup>.

Atualmente, caminha-se para uma situação ambientalmente mais adequada, em conformidade com a ANP nº 26/2010:

“A partir de janeiro de 2012, somente serão fabricados veículos ciclo diesel dotados de motores com tecnologia que atendam as exigências da fase P-7 do Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores - PROCONVE, abrangendo veículos rodoviários automotores de carga, de passageiros ou de uso misto, com capacidade para transportar massa total superior a 2,8 toneladas ou mais de 12 passageiros. Óleos diesel com baixo teor de enxofre (S50 e S10) abastecerão a nova frota de caminhões e ônibus fabricados de 2012 em diante. O óleo diesel S50 será obrigatório a partir de janeiro de 2012. Já o óleo diesel S10 terá obrigatoriedade a partir de 2013”<sup>173</sup>.

Em função destes novos parâmetros determinados pelo Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE, os níveis de enxofre deverão ter redução significativa nos centros urbanos, com benefícios imediatos em ambientes de confinamento como nos túneis rodoviários. Ou seja, em 10 anos, haverá uma redução no teor de enxofre em óleo diesel de 2000 ppm para 10 ppm. O que significa, em termos comparativos, uma redução do teor de enxofre em óleo diesel de 200 vezes. Evidentemente, até que toda a frota seja substituída, os níveis das emissões de enxofre terão reduções gradativas, pois os veículos produzidos até 2011 ainda utilizarão o S500 e S1800, como destaca o próprio site da ANP.

#### 2.2.1.2.3 Proteção contra ruídos

Não há qualquer forma de atenuação de ruído no interior do túnel Rebouças. Apenas o jateamento de concreto nas superfícies internas do túnel é que contribui de maneira relativa para a mitigação da reverberação dos sons dos veículos.

Os túneis se beneficiam dos avanços tecnológicos da indústria automobilística. O mercado oferta veículos muito mais silenciosos do que outrora, conforme visto anteriormente nesta pesquisa. Por este motivo, os túneis são relativamente pouco afetados pelos ruídos, na comparação com um passado recente e demandam menos soluções de proteção acústica, a despeito do usual aumento de tráfego de veículos verificado ano a ano no Brasil.

### 2.2.1.3 Sistema de ventilação e exaustão

De acordo com Almeida (2005), “há 78 ventiladores instalados na parte superior que conduzem o ar na direção do fluxo de veículos”. Em visita realizada em setembro/2010, foi informado que há 109 ventiladores, distribuídos em 17 grupos de 6 ventiladores e um grupo de 7 ventiladores.

Não há ventilação semi-transversal ou transversal e tampouco exaustão. A troca de ar é realizada através dos portais de acesso. Em caso de sinistro de larga proporção, principalmente incêndio, acredita-se que a instalação existente é inadequada para garantir tempo suficiente para escape, sem que a concentração de poluentes atinja níveis excessivos.

Em pesquisa realizada pela PETROBRÁS em 2007 no túnel Rebouças, constatou-se uma situação relativamente crítica em relação aos padrões determinados pela resolução CONAMA 03/1990. É possível que atualmente os níveis de concentração dos poluentes tenham sido reduzidos, haja vista que os veículos possuem melhor padrão de controle de emissões atmosféricas. De toda forma, na média do chamado horário comercial (6h às 22h), os poluentes analisados ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{MP}_{10}$ , CO e NO) revelam que os parâmetros  $\text{MP}_{10}$  e NO ultrapassam os limites estabelecidos pela resolução CONAMA nº 03/1990.

Há que se salientar que não há controle de fumaça no túnel Rebouças.

A planilha a seguir reproduz esta realidade, em função de estudo realizado pela PETROBRÁS no túnel Rebouças, de forma a avaliar os níveis de poluição obtidos a partir dos combustíveis (produzidos pela PETROBRÁS) disponíveis no mercado.

Tabela 13 – Monitoramento dos poluentes atmosféricos emitidos pela frota circulante – Túnel Rebouças

MONITORAMENTO DOS POLUENTES ATMOSFÉRICOS EMITIDOS PELA FROTA CIRCULANTE NO TÚNEL REBOUÇAS - RELATÓRIO TÉCNICO/PETROBRÁS (2007)				
HORÁRIO COMERCIAL (06:00 às 22:00 horas)				
SO <sub>2</sub>	Segunda-Sexta	Sábado-Domingo	CONAMA 03/1990	
	(DS)	(FS)	Tempo de Amostragem	Padrão Primário (µg/m <sup>3</sup> )
Média da Concentração Horária (µg/m <sup>3</sup> )	314	270	24 horas	365
			MAA (3)	80
Máximo Valor da Concentração Horária (µg/m <sup>3</sup> )	769	619		
Mínimo Valor da Concentração Horária (µg/m <sup>3</sup> )	15,71	54,32		
HORÁRIO COMERCIAL (06:00 às 22:00 horas)				
MP10	Segunda-Sexta	Sábado-Domingo	CONAMA 03/1990	
	(DS)	(FS)	Tempo de Amostragem	Padrão Primário (µg/m <sup>3</sup> )
Média da Concentração Horária (µg/m <sup>3</sup> )	<b>204</b>	<b>151</b>	24 horas	150
			MAA (3)	50
Máximo Valor da Concentração Horária (µg/m <sup>3</sup> )	565	343		
Mínimo Valor da Concentração Horária (µg/m <sup>3</sup> )	23	37,87		
HORÁRIO COMERCIAL (06:00 às 22:00 horas)				
CO	Segunda-Sexta	Sábado-Domingo	CONAMA 03/1990	
	(DS)	(FS)	Tempo de Amostragem	Padrão Primário (µg/m <sup>3</sup> )
Média da Concentração Horária (µg/m <sup>3</sup> )	37635	28668	1 hora (1)	40.000
			8 horas	10.000
Máximo Valor da Concentração Horária (µg/m <sup>3</sup> )	102852	89862		
Mínimo Valor da Concentração Horária (µg/m <sup>3</sup> )	629,86	658,49		
HORÁRIO COMERCIAL (06:00 às 22:00 horas)				
NO	Segunda-Sexta	Sábado-Domingo	CONAMA 03/1990*	
	(DS)	(FS)	Tempo de Amostragem	Padrão Primário (µg/m <sup>3</sup> )
Média da Concentração Horária (µg/m <sup>3</sup> )	<b>3689</b>	<b>3218</b>	MAA (3)	100
			1 hora (1)	320
Máximo Valor da Concentração Horária (µg/m <sup>3</sup> )	6756	6037		
Mínimo Valor da Concentração Horária (µg/m <sup>3</sup> )	74,85	96,93		
(1) Não deve ser excedido mais que uma vez ao ano.				
(2) Média geométrica anual.				
(3) Média aritmética anual.				
*A Resolução CONAMA 03/1990 faz referência ao NO <sub>2</sub> e não ao NO.				

#### 2.2.1.4 Sistema de iluminação

Segundo informações obtidas, há aproximadamente 1.253 luminárias com lâmpadas de vapor de sódio de 250W (VS-250), assim distribuídas: L1 (487), L2 (422), R1 (167) e R2 (177). A gradação de iluminamento determinada pela norma NBR-5181/1976, embora indicada como presente, aparenta inexistir ou foi implantada de forma deficiente. É necessário, um estudo específico, pois este fato pode ser extremamente perigoso nos casos em que o tráfego esteja paralisado logo no início da galeria. Além disso, há visivelmente uma grande falta de manutenção, pois há diversas luminárias em péssimo estado de conservação.

#### 2.2.1.5 Sistema de segurança contra sinistro e incêndio

Apesar de se saber que o sistema de detecção de incêndio deve ser o primeiro instrumento relacionado à mitigação de sinistros em túneis, o túnel Rebouças também funciona com precariedade neste quesito. Não há câmeras em quantidade suficiente, nem tampouco sensores para detecção de alteração de fluxo de veículos.

Não há previsão de áreas de escape e proteção para pedestres (em caso de necessidade de fuga). Inexistem extintores, sensores (fumaça, temperatura etc.) e *sprinklers*. Estes instrumentos poderiam combater incêndios em seus momentos iniciais, como pode ser visto ao longo da presente pesquisa.

A *Australasian Fire Authorities Council* (2001) estipula que devam “existir hidrantes e mangueiras, nas entradas/saídas dos túneis e em intervalos regulares de 60m” e não há qualquer vestígio destes equipamentos.

São realizados cerca de 800 à 900 atendimentos de veículos avariados por mês. Em agosto/2010, houve 835 atendimentos. Poderia haver mais eficiência na prestação de socorro, caso fossem utilizados recursos tecnológicos avançados. Como trata-se de um conjunto de procedimentos, funcionários e equipamentos para atendimento aos sinistros e incêndios, diversos aspectos são discutidos nos vários sistemas abordados por esta pesquisa.

### 2.2.1.6 Sistema de fiscalização e orientação de tráfego, comunicação e sinalização

Em desacordo com normas e diretrizes como, por exemplo, o documento *Fire Safety Guidelines for Road Tunnels* (2001), deveria haver um sistema preventivo (pro-ativo) para casos de incêndio e de qualquer outro incidente que possa provocar a paralisação de veículos dentro do túnel. Consta-se a inexistência de qualquer instrumento que atenda à estas necessidades: a) sinalização de modificação de velocidade máxima, com acionamento semi-automático; b) possibilidade de interferência no conteúdo das transmissões de rádio (com informes sobre situações emergenciais); c) equipamentos de comunicação disponíveis para o público e funcionários etc.

Vale lembrar que a NFPA 502 indica a necessidade de “no mínimo dois sistemas para detectar, identificar ou localizar um fogo em túnel, incluindo um sistema manual com caixas de alarme manual de incêndio localizadas em intervalos nunca superiores a 90 metros, com acesso do público e de funcionários e determinação de localização da caixa na estação de monitoramento” e outro sistema que inclua um CFTV ou detecção automática de fogo com raio máximo de 15m em relação ao ponto de localização do incêndio. No túnel Rebouças não há qualquer aparato desta natureza e porte.

A própria NBR 13714/2003 estabelece que “a distância máxima entre dois pontos de hidrantes deve ser de 60m, prevendo-se quatro lances de mangueira de 15m para cada coluna de hidrante”.

Em visita técnica realizada em setembro/2010, constatou-se a precariedade do sistema de CFTV. Os equipamentos existentes são antigos, obsoletos e com baixa resolução de imagem. Havia duas câmeras em funcionamento em um dos sentidos (sentido Zona Sul) e uma única câmera no outro sentido (sentido Zona Norte). De acordo com a (mesma) publicação acima destacada, deveria haver uma câmera a cada 150m. Em alguns países, adota-se inclusive um sistema em que a simples paralisação de um veículo enseja um alarme no centro de controle (e/ou operação) que alerta para a possibilidade de um sinistro.

No passado, havia interfones com conexão direta ao centro de controle e operação, mas, gradativamente, os equipamentos foram eliminados, o que contraria todas as normas internacionais pertinentes ao assunto. Como descrito acima, no caso de “projeto para túneis acima de 500m deve[-se] prever um sistema de

comunicação instalado no interior e exterior do túnel, de forma a permitir a troca de dados e informações entre os usuários, pessoal de serviço e equipes de emergência com os centros de controle e operação do túnel (CCO)”, conforme NBR-15661/2009.

A fiação existente é aparente e sustentada em bandejas. Embora não tenham sido fornecidos dados, pode se afirmar que não há qualquer proteção que a preserve de incêndios pelo tempo mínimo estipulado pelas normas internacionais de 120 minutos.

Figura 13 – Fiação existente (desprotegida) no túnel Rebouças



Autor da fotografia: James Miyamoto, outubro/2010.

Como visto anteriormente, a instalação de sinalização luminosa de conteúdo variável seria fundamental. Atualmente, em caso de sinistro ou congestionamento, por exemplo, não há qualquer elemento preventivo que possa minimizar problemas maiores.

Há poucas placas indicativas de destino – somente em dois pontos, - e apenas duas outras determinantes de velocidade máxima (90Km/h). Existem dois equipamentos com câmeras de registro que auxiliam no controle do excesso de velocidade dos veículos: a) no sentido Zona Norte, nas proximidades do trecho ao ar livre que segmenta as duas galerias existentes; b) no sentido Zona Sul, próximo ao emboque da saída na Lagoa Rodrigo de Freitas.

As placas deveriam enfatizar destinos de forma gradativa, ao longo do percurso da galeria principal (nos dois sentidos), e possuir dimensões mais significativas.

Conforme descrito na seção específica, painéis de sinalização luminosa deveriam ser instalados “no máximo a 1,50m do piso da rota de saída, no sentido do

tráfego, informando aos usuários, em caso de emergência, (...) a saída de emergência mais próxima do local. No túnel Rebouças não se tem orientação, salvo nas proximidades das extremidades.

Por fim, antes que se conclua esta seção, deve-se ressaltar que independente da disciplina envolvida, o suprimento de energia deve ser confiável, com redundâncias previstas para os casos emergenciais:

“O suprimento de energia deve possuir múltiplas fontes alternativas que sejam redundantes, como, por exemplo, linhas distintas e independentes de distribuição de energia elétrica ou de diferentes concessionárias. Também deve ser considerada a diversidade de alimentação de energia elétrica em complementação à fornecida pela concessionária, como, por exemplo, grupo de motogerador e/ou baterias”<sup>174</sup>.

#### 2.2.1.7 Sistema de drenagem

Há duas calhas abertas localizadas nas laterais da pista imediatamente próximas às sinalizações horizontais das faixas de rolamento, usualmente repletas de resíduos sólidos lançados dos veículos em movimento. Como há forte percolação neste túnel, as calhas normalmente permanecem cheias de água em relativo forte fluxo e grande volume no sentido da Lagoa Rodrigo de Freitas.

Como visto, esta água que transporta material poluente e combustível é lançada de forma praticamente direta na bacia da Lagoa Rodrigo de Freitas. Seria fundamental que houvesse um tratamento pelo menos primário dos efluentes gerados, eliminação completa das ligações clandestinas e (re)composição do cinturão que deveria circundar completamente a Lagoa Rodrigo de Freitas, antes do transporte dos efluentes até o emissário submarino localizado na praia de Ipanema.

Figura 14 – Calhas do sistema de drenagem da pista



Autor da fotografia:  
James Miyamoto,  
outubro/2010

Expõe-se o usuário a uma situação de perigo, pois a água percolada transporta óleo, graxas, gasolina etc. Estes elementos são combustíveis e ficam excessivamente expostos em qualquer tipo de incidente, desde fagulhas até mesmo no caso de cigarros acesos que são irresponsavelmente lançados pela janela dos veículos.

A água percolada é redirecionada para as laterais do túnel através de telhas. Esta situação de precariedade pode ser perigosa, pois expõe os materiais ao desgaste e à fadiga.

#### 2.2.1.8 Sistema de gerenciamento de resíduos sólidos

Cada tubo é fechado para manutenção duas noites por semana: a) entre 23h30min e 5h, no sentido Zona Norte, às terças-feiras; b) entre 24h e 5h, no sentido Zona Sul, às quintas-feiras. Nesta ocasião é realizada a limpeza da pista (além de serviços de manutenção em geral).

Embora não tenha sido possível o levantamento preciso sobre a quantidade e o tipo de resíduo coletado nestas ocasiões, em reportagem de 1998<sup>175</sup>, era estimado pela Comlurb que mensalmente cerca de 12 toneladas de lixo, em sua maioria latas de refrigerantes e cervejas, copos e embalagens etc., eram lançados pelas janelas dos veículos. O fato é que, apesar de existir um lixo antropogênico significativo, há uma grande quantidade de resíduos derivada do transporte de folhas, terra etc. devido à água percolada.

Figura 15 – Amostra dos resíduos sólidos encontrados nas calhas



Autor da fotografia:  
James Miyamoto,  
outubro/2010

## 2.2.2 Estudo de Caso – Túnel Eng. Raymundo de Paula Soares (Linha Amarela - Túnel da Covanca) (1997)

Este túnel faz parte de um complexo que compõe a Linha Amarela do qual fazem parte dois outros túneis menores: túnel Geólogo Enzo Totis (165m) e túnel Eng. Enaldo Cravo Peixoto (153m), que poderiam ser interpretados como pequenas galerias de um único túnel. Esta via arterial serve de instrumento de conexão entre a Zona Oeste e a Zona Norte, com interligações importantes a outras vias de ligação intermunicipal e interestadual, e foi inaugurada em 1997. O gerenciamento desta via é realizado pela concessionária privada LAMSA (Linha Amarela S.A.).

### 2.2.2.1 Características físico-espaciais

#### 2.2.2.1.1 Extensão do túnel

Há um total de 2,187Km. Assim como o túnel Rebouças, de acordo com a NFPA 502 é um túnel da Categoria D em que devem ser aplicados todos os procedimentos de proteção de incêndio em túneis (vide seção 3.1.1.).

#### 2.2.2.1.2 Número de tubos

O túnel eng. Raymundo de Paula Soares possui tubos independentes. Ou seja, não há compartilhamento bidirecional em uma seção única.

#### 2.2.2.1.3 Número de galerias

Como os outros dois túneis existentes são considerados de forma autônoma, pode-se dizer que o túnel eng. Raymundo de Paula Soares possui somente uma galeria.

#### 2.2.2.1.4 Número de faixas

Há três faixas de rolamento em cada sentido.

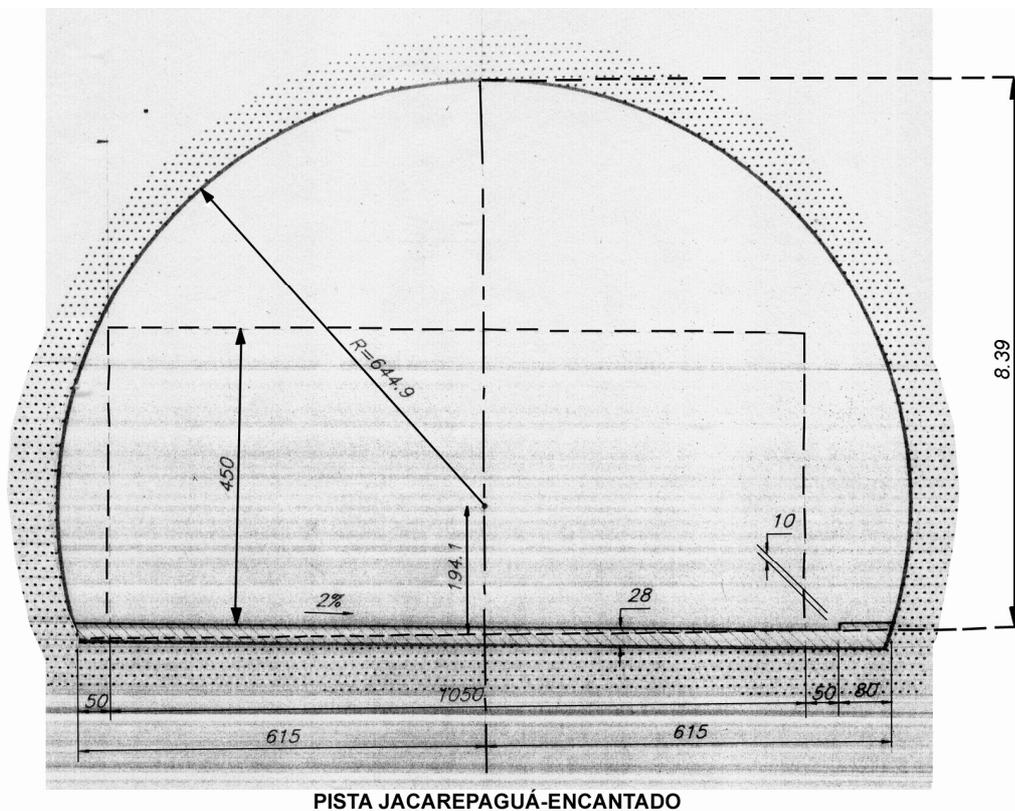
### 2.2.2.1.5 Largura das faixas

A largura de faixa de rolamento padrão para túneis, segundo a NFPA 502, é de 3,6m. No túnel eng. Raymundo de Paula Soares as três faixas tem aproximadamente 3,5m, segundo informações fornecidas.

### 2.2.2.1.6 Altura do túnel

A altura média do túnel Eng. Raymundo de Paula Soares é de 8,39m.

Figura 16 – Túnel Eng. Raymundo de Paula Soares: Jacarepaguá - Encantado



Fornecida pelo engenheiro Anníbal Coelho, 2010.

#### 2.2.2.1.7 Alinhamento horizontal e vertical

De forma geral, pode-se dizer que o túnel Eng. Raymundo de Paula Soares é bastante linear, com rigorosa seção transversal.

#### 2.2.2.1.8 Tipo de construção e dos materiais de acabamento

A estrutura é em concreto armado. De acordo com a LAMSA, o revestimento interno é em concreto projetado com espessura média de 0,20 metros, com resistência de 25 MPa.

#### 2.2.2.1.9 Existência de tráfego em um ou dois sentidos

Há tráfego nos dois sentidos. No entanto, os tubos são segregados e não há qualquer influência entre eles, exceto os de caráter de fornecimento de energia e controle dos equipamentos.

#### 2.2.2.1.10 Aclives ou declives, no interior do túnel

De acordo com a LAMSA, a diferença de níveis entre os emboques e de aproximadamente 36 metros, ou seja 1,6%.

#### 2.2.2.1.11 Características físicas das rodovias à montante e à jusante (ao túnel)

No sentido Fundão, à montante, não há alteração das características físicas das vias. No sentido Barra, à montante, há a praça de pedágio que desempenha um papel de atenuador ou disciplinador de fluxos e usos.

No sentido Fundão, à jusante, a praça de pedágio permite um direcionamento gradativo e relativamente lento em direção às faixas de rolamento. No sentido Barra, à jusante, não há alterações das características físicas das vias.

#### 2.2.2.1.12 Características da sinalização das vias à montante, no interior e à jusante (ao túnel)

Há placas indicativas e faixas de sinalização horizontal com dimensões adequadas e com suficiente distanciamento dos destinos orientados, além disso há painéis de conteúdo variável (ainda que com recursos técnicos limitados).

Figura 17 – Sinalização no túnel Eng. Raymundo de Paula Soares



Autor da fotografia: James Miyamoto, outubro/2010

#### 2.2.2.1.13 Existência de alternativas de rota de resgate, socorro e fuga, além de áreas de segurança para espera por socorro, dotada de instrumentos para a prevenção de acidentes e de intoxicação

Há nas laterais uma pequena passagem de cerca de 80cm que serve para trânsito de emergência para pedestres. No entanto, não há guarda-corpos que protejam o usuário. Outrossim, o nível desta passagem não é elevado, conforme é recomendado pelas normas internacionais, e não há segregação entre a parte destinada ao pedestre e a área de tráfego dos veículos.

Há três refúgios abertos (baias) em cada tubo do túnel Engenheiro Raymundo de Paula Soares com *call-boxes* interligados diretamente com o centro de controle e operação. Não há hidrantes, mangueiras ou extintores disponíveis.

Figura 18 - Túnel Engenheiro Raymundo de Paula Soares - call-boxes



Autor da fotografia:  
James Miyamoto,  
outubro/2010.

Segundo a LAMSA, em caso de sinistro em que haja a necessidade de escape de pedestres, os emboques das galerias são bloqueados para permitir o trânsito pedonal mais seguro. O problema que se verifica é que até que se restrinja o tráfego de veículos, é possível que ocorra uma situação dramática de conflito entre pedestres e veículos.

#### 2.2.2.1.14 Tempo estimado para atendimento ao sinistro

De acordo com a LAMSA, até setembro/2010, assim se realizava o atendimento de emergência:

- a) O tempo médio de plotagem (identificação do acidente ou incidente através do CFTV) é de 1min08seg.
- b) O tempo médio de resposta do serviço de inspeção (chegada ao local do acidente) é de 3min32seg.
- c) O tempo médio de resposta do SOS mecânico é de 6min51seg.
- d) O tempo médio de resposta do resgate médico é de 6min02seg.
- e) O tempo médio de desobstrução da via após a plotagem é de 15min40seg.
- f) O tempo médio de desobstrução da via após o fato gerador é de 16min40seg.

## 2.2.2.2 Formas de uso

### 2.2.2.2.1 Volume de tráfego por galeria por faixa de horário

Sabe-se que em média transitam cerca de 15.000 veículos por faixa por dia. Em um total de aproximadamente 45.000 veículos por tubo em cada sentido por dia.

### 2.2.2.2.2 Presença de veículos pesados (caminhões e ônibus) e motocicletas e suas consequências

A LAMSA informa que transitam pela Linha Amarela cerca de 90% de veículos de passeio, 4% de motocicletas e 6% de veículos pesados.

### 2.2.2.2.3 Proteção contra ruídos

Não há atenuadores de ruídos.

### 2.2.2.3 Sistema de ventilação e exaustão

Em quaisquer publicações abordadas nesta pesquisa, a máxima tolerância para que não haja a previsão de ventilação mecânica é de 700 metros, na Alemanha.

Segundo a LAMSA, o sistema de ventilação é longitudinal e possui as seguintes características:

Tabela 14 - Sistema de ventilação – Túnel Eng. Raymundo de Paula Soares

Quantidade de motoventiladores:	Sentido Fundão: 17 unidades
	Sentido Barra: 24 unidades
Fabricante:	ABB Fläkt Industri
Modelo:	AXIJET FRCA 140-2-68-76
Empuxo nominal	2.246 N
Velocidade de descarga	35,5 m/s
Potência do motor	66 kW
Diâmetro interno	1.400 mm
Comprimento	2.910 mm
Nível de pressão sonora máxima	85 ± 3 dB(A)
Instalação	Fixação no teto
Resistência em caso de incêndio	Resistência a 250 °C @ 2 horas

De acordo com informações obtidas, os sensores de CO (monóxido de carbono) acusam a concentração e, a critério do operador, os moto-ventiladores podem ser acionados. Vale lembrar que de acordo com a “Resolução CONAMA nº 03/1990, os níveis de concentração de monóxido de carbono (CO), em média de 8 (oito) horas, atingem o Nível de Atenção em 15ppm, o Nível de Alerta em 30ppm e o Nível de Emergência em 40ppm”.

Não há controle da concentração de outros poluentes típicos associados aos veículos urbanos.

A presença de fumaça está destacada nos postes localizados no sentido de exaustão do ar, no emboque (saída) do túnel engenheiro Raymundo de Paula Soares. Pode-se comparar na foto a seguir, postes higienizados no início do ano de 2010 (no plano posterior, na cor prata) e outros (postes) sem manutenção recente (na parte mais próxima do observador, na cor escura).

Figura 19 - Túnel engenheiro Raymundo de Paula Soares – Emboque (saída)



Autor da fotografia: James Miyamoto, outubro/2010.

#### 2.2.2.4 Sistema de iluminação

A LAMSA informa que os projetores são do tipo Radial da empresa Schröder. Além disso, destaca que há atenção à NBR-5181/1976 (*vide* 2.4.1. Sistema de iluminação – NBR-5181/1976) em que foi considerada a velocidade de 100Km/h para cálculo da distribuição de luminárias e respectivas potências nos emboques do túnel, de forma a se evitar o efeito “buraco negro”.

Tabela 15 – Sistema de Iluminação – Túnel Eng. Raymundo de Paula Soares

Localização	Potência das Lâmpadas	Quantidade de Projetores/Lâmpadas	Total de Projetores por Potência das Lâmpadas
Pista Sentido Barra	VS - 250W	349	453
	VS - 400W	104	
Pista Sentido Fundão	VS - 250W	349	453
	VS - 400W	104	

#### 2.2.2.5 Sistema de segurança contra sinistro e incêndio

Segundo informações contidas no sítio (*site*) da Linha Amarela:

“A Linha Amarela conta com uma experiente equipe de operação viária, que zelam pela fluidez e segurança do tráfego. Em caso de pane ou acidente, os inspetores sinalizam a área, alertam os demais veículos e contactam o Centro de Controle Operacional - CCO, que por sua vez aciona o atendimento complementar necessário, isto é, reboque, serviço médico de emergência, Corpo de Bombeiros ou a Polícia.  
(...) Para o monitoramento da via, no CCO trabalham cinco profissionais por turno. Eles levam em torno de 1 minuto e 38 segundos para identificar uma anormalidade viária (média de janeiro a dezembro de 2009)”.

Conforme relatado no tópico 3.2.2.1.n. (Tempo estimado para atendimento ao sinistro), há atenção e controle em relação ao tempo que decorre para o socorro em situações de sinistro.

Contudo:

Não há sensores para detecção de alteração de fluxo de veículos.

As áreas de escape e proteção para pedestres (em caso de necessidade de fuga), embora existentes, são pouco adequadas. Ao longo do túnel, inexistem extintores, sensores (fumaça, temperatura etc.) e *sprinklers*.

A *Australasian Fire Authorities Council* (2001) estipula que devam “existir hidrantes e mangueiras, nas entradas/saídas dos túneis e em intervalos regulares de 60m” e, como parece ser uma rotina em túneis brasileiros, não há esta previsão.

De acordo com a NBR-15661/2009, deve ser previsto “um sistema de detecção automática de incêndio (DAI), composto por câmeras de circuito fechado de televisão, interligadas por software que permita verificar o trajeto e/ou a posição dos veículos no interior do túnel”. Ressalta-se, contudo, que o CFTV tem relativa eficiência.

Em resumo, conforme visto anteriormente, deveriam ser considerados os seguintes recursos:

- Acionamento do sistema de extinção de incêndio, manual ou automático;
- Controle de fumaça;
- Hidrantes (túnel com  $L \geq 500m$ ): Devem ser providos de sistema de hidrantes, conforme NBR-13714, considerando-se sistema Tipo 3 ou maior, (...) com reserva de incêndio que propicie o combate a incêndio por 30 minutos, com previsão de dois hidrantes funcionando simultaneamente, com uma pressão de 15 kPa no hidrante mais desfavorável (...).
- Extintores em túneis devem atender: tipo ABC, distância de 30m entre extintores e sinalização.

Como pode ser observado em visita técnica realizada em novembro/2010, não há quaisquer instalações ou equipamentos que se aproximem das determinações dos dispositivos normativos pertinentes.

#### 2.2.2.6 Sistema de fiscalização e orientação de tráfego, comunicação e sinalização

Há CFTV que conta com 16 câmeras (8 por galeria) localizadas em intervalos de 300m aproximadamente. Além disso, há seis *call-boxes* (três por galeria), localizados nos refúgios (baías). Toda a Linha Amarela dispõe de sinalização de conteúdo temporário para alertar para possíveis ocorrências imprevistas.

Embora (bem) melhor equipado que o túnel Rebouças, há relativamente poucas câmeras (CFTV). De acordo com o *Fire Safety Guidelines for Road Tunnels* (2001), haveria necessidade de um distanciamento máximo de 150m entre cada uma das câmeras. Isso significaria algo como 14 câmeras em cada um dos sentidos do túnel Engenheiro Raymundo de Paula Soares.

De acordo com o NFPA 502, como visto na análise do túnel Rebouças, devem ser previstos “no mínimo dois sistemas para detectar, identificar ou localizar um fogo em túnel deve ser provido, incluindo um sistema manual com caixas de alarme manual de incêndio localizadas em intervalos nunca superiores a 90 metros, com acesso do público e de funcionários e determinação de localização da caixa na estação de monitoramento”. O que implicaria em um número superior à 25 caixas de alarme manual de incêndio em cada um dos tubos considerados.

#### 2.2.2.7 Sistema de drenagem

A LAMSA informa que a drenagem é subterrânea com caixas coletoras. Não há calhas aparentes. O destino final é o mesmo das águas pluviais, sem tratamento prévio. Neste caso, há maior segurança em relação ao efluente drenado, pois o risco de exposição de um material combustível ao fogo é bastante reduzido.

O efluente gerado pela percolação deveria ser tratado antes de ser lançado na rede coletora urbana.

#### 2.2.2.8 Sistema de gerenciamento de resíduos sólidos

De acordo com a LAMSA, não há triagem de resíduos sólidos. A coleta e o descarte dos resíduos é terceirizado. As empresas responsáveis fornecem os manifestos dos descartes.

### 3 INSTRUMENTO BÁSICO DE *CHECK-LIST* DE CONTEÚDOS NECESSÁRIOS

A planilha a seguir apresentada é baseada em diversos instrumentos normativos, todas descritas ao longo da presente pesquisa. O objetivo deste instrumento é orientar as diretrizes básicas a serem adotadas na gestão ambiental de grandes túneis urbanos e, de certa forma, contribuir para intervenções congêneres no contexto brasileiro.

Evidentemente, face a multidisciplinaridade do tema, diversos profissionais seriam necessários à elaboração deste instrumento. Outrossim, sabe-se que diversas publicações<sup>176177178</sup> relacionadas à segurança e poluição em túneis estabeleceram quadros comparativos entre instrumentos diretores ou normativos. Atualmente, muitos países do mundo reconhecem a importância do tema e inúmeros autores se referenciam às disciplinas voltadas para este objetivo.

Por limitações intrínsecas, na planilha a seguir fornecida - seccionada em duas partes para facilitar a visualização, -, há tão somente uma minuta indicativa de campos disciplinares e grupamentos temáticos que poderá servir de base para documentos mais abrangentes e completos. Destaca-se novamente, que esta compilação de segmentos referenciais foi realizada, contudo, em função de algumas importantes e reconhecidas bibliografias nacionais e internacionais analisadas neste estudo - como destacado acima.

Tabela 16 – Túneis Urbanos – *check-list* de conteúdos necessários

TÚNEIS URBANOS - CHECK-LIST DE CONTEÚDOS NECESSÁRIOS - BRASIL (2010)										
Nome do túnel:	Ano Construção:				Extensão total (túnel)		km			
Localização:	Fluxo diário (médio):				Número de galerias		unid.			
Construtora:	Material da estrutura:				Número de faixas:					
Proprietário:	Utilização (tipo veículo):				Categorias de Túneis					
Concessionário:	Seção transversal:				X	A	B	C	D	
<b>Sistema de ventilação e exaustão</b>										
Ventilação natural por shafts					-	-	-	N	N	
Ventilação longitudinal					-	-	-	N	M	
Ventilação transversal					-	-	-	N	N	
Sensores de controle de ventilação					-	-	-	N	M	
<b>Sistema de iluminação</b>										
Iluminação geral (de acordo com as normas pertinentes)					M	M	M	M	M	
Iluminação de emergência					N	N	M	M	M	
Iluminação secundária					N	N	M	M	M	
Iluminação de acesso às saídas de emergência e resgate					-	-	-	-	M	
<b>Sistema de segurança contra sinistros e incêndio</b>										
Aparato de combate a incêndio (a)					-	N	N	N	N	
Bomba para incêndio (b)					-	M	M	M	M	
Caixas de alarme (alarme de incêndio manual)					-	-	M	M	M	
Conexão telefônica com o Corpo de Bombeiros					-	M	M	M	M	
Conectores de mangueiras					-	M	M	M	M	
Defletores e abafadores de ruído					-	-	N	M	M	
Detectores automáticos de fogo e fumaça					-	-	M	M	M	
Detectores de hidrocarbonetos					-	N	N	N	M	
Extintores portáteis					-	-	M	M	M	
Facilidades de acessibilidade (de acordo com a NBR-9050)					-	-	-	M	M	
Faixa de escape de pedestre paralela à pista com proteção e acessos regulares					-	-	M	M	M	
Hidrantes com mangueiras em intervalos regulares					-	-	-	M	M	
Painel de controle de fogo					-	-	M	M	M	
Saída de emergência com ventilação para o acesso de resgate					-	-	M	M	M	
Sistema fixo de supressão de fogo (c)					-	-	M	M	M	
Suprimento de água					-	N	N	N	M	
Ventilação de emergência (d)					-	-	-	M	M	

<b>Sistema de fiscalização e orientação de tráfego, comunicação e sinalização</b>				
Alarme automático dos equipamentos	-	-	-	M
Centro de controle de operação	-	-	-	M
Circuito Fechado de TV (CFTV)	-	-	M	M
Controle remoto de barreiras	-	-	-	M
Cruzamento (passagem) de pedestres entre os tubos (nos dois sentidos dos túneis)	-	-	M	M
Deteção automática de incidente	-	-	-	M
Monitoramento de velocidade e intensidade de tráfego	-	M	M	M
Paralisação do tráfego nas proximidades do portal	-	M	M	M
Porta(s) de emergência com sinalização para acesso ao ambiente protegido e saídas externas	-	N	N	N
Retransmissão de rádio	-	-	-	N
Sinalização fixa orientadora (dos elementos estáveis)	-	M	M	M
Sinalização variável	-	-	-	N
Telefones de emergência em intervalos regulares	-	-	-	M
<b>Sistema de drenagem</b>				
Calhas fechadas (protegidas de material combustível carreado)	-	-	M	M
Tratamento primário dos efluentes	-	N	N	N
Tratamento secundário dos efluentes	-	-	-	N
<b>Sistema de gerenciamento de resíduos sólidos</b>				
Coleta regular de resíduos sólidos	-	M	M	M
Disposição seletiva de resíduos sólidos	-	M	M	M
<b>Sistema de Eletricidade</b>				
Luzes de emergência	-	M	M	M
Força	-	M	M	M
Força redundante	-	-	-	M
Plano de segurança	-	M	M	M
<b>Plano de atendimento de emergência</b>				
- M M M M				
Categoria X: Menos de 90 m				
Categoria A: A partir de 90 m				
Categoria B: A partir de 240 m e onde a distância máxima de qualquer ponto no interior do túnel até um local seguro não exceda 120 m				
Categoria C: A partir de 300 m				
Categoria D: A partir de 1000 m				
M: Mandatório				
N: Não-Mandatório				
C: Condicionalmente Mandatório				
(a): Não-mandatório; contudo, deve estar próximo para minimizar tempo de resposta				
(b): De acordo com o documento, deve seguir a NFPA 20.				
(c): Pontos fixos de combate a incêndio devem ser permitidos em túneis como parte integrada do gerenciamento de incêndio e segurança à vida. Deve ser implantado de acordo com a NFPA 11, NFPA 13, NFPA 15, NFPA 16, NFPA 18, NFPA 25 e NFPA 750.				
(d) Sistemas de ventilação de emergência e procedimentos de operação de túneis devem ser desenvolvidos para maximizar o uso do sistema de ventilação de túneis para a remoção e controle de fumaça e gases quentes que resultam de emergência em incêndio.				

## 5 CONCLUSÕES

A evolução do projeto e da capacidade de gestão operacional e ambiental de túneis, nas últimas décadas, foi significativa. Alguns rigorosos, mas pertinentes, parâmetros, em âmbito internacional, foram adotados para eliminar riscos desnecessários e não expor negativamente a saúde de funcionários e usuários dos túneis. Como visto, os eventos relacionados aos túneis: Mont Blanc (1999) e St. Gottard (2001), redimensionaram as questões e provocaram uma significativa mudança de paradigma no que tange aos aspectos de segurança dos túneis.

Da mesma forma, considerados como significativos exemplares nacionais, ao se correlacionar os túneis Rebouças (1962-1965) e Engenheiro Raymundo de Paula Soares (1997), distantes no tempo por mais de três décadas, percebem-se imbricações que atestam coincidências e revelam diferenças. Em uma relação comparativa entre os dois casos, nota-se que há, sem dúvida, uma evolução administrativa, técnica, operacional, comercial etc. que repercute positivamente, mas que não deveria se traduzir em uma diferença de níveis qualitativos tão acentuada, pois ambos servem à sociedade e deveriam se manter atualizados, eficientes e seguros.

O túnel Engenheiro Raymundo de Paula Soares é claramente mais funcional e resultado de um planejamento mais apurado. Conta com diversas implementações técnicas contemporâneas importantes, mas ainda carece de diversos instrumentos como, por exemplo: a) Hidrantes e extintores; b) Sensores de alteração de fluxo de veículos; c) Sensores de fumaça; d) Possibilidade de interferência no conteúdo das transmissões de rádio (com informes sobre situações emergenciais); e) Controle de outros poluentes normalmente associados a veículos automotivos, além do CO (monóxido de carbono), como, por exemplo, NO<sub>x</sub>, MP<sub>10</sub> e SO<sub>2</sub>; f) equipamentos de comunicação disponíveis para o público e funcionários etc.

Por outro lado, as condições de funcionamento do túnel Rebouças são extremamente precárias e inversamente proporcionais à sua importância de via arterial fundamental na ligação Zona Sul e Centro. Sua operação pode ser credenciada principalmente à heróicas iniciativas de profissionais técnicos que lidam com eficiência com toda sorte de carência, falta de conformidade das instalações físicas e tecnológicas às normas reconhecidas, limitações técnicas e orçamentárias, defasagem no tempo etc.

Diariamente, a obsolescência da infra-estrutura existente expõe os condutores e passageiros de cerca de 150.000 veículos diretamente aos perigos e poluentes existentes. A falta de investimento no túnel Rebouças é inexplicável e injustificável.

Neste caso, pode-se afirmar que praticamente não há qualquer parâmetro técnico adequado nos diversos sistemas abordados neste estudo a) Características físico-espaciais; b) Formas de uso; c) Sistema de ventilação e exaustão; d) Sistema de iluminação; e) Sistema de segurança contra sinistros e incêndio; f) Sistema de fiscalização e orientação de tráfego, comunicação e sinalização; g) Sistema de drenagem; h) Sistema de gerenciamento de resíduos sólidos.

Outrossim, é igualmente plausível sublinhar que indiretamente toda a cidade do Rio de Janeiro acaba por se expor à irresponsabilidade da gestão pública, pois oferta o túnel Rebouças a todo tipo de incidente possível em um ambiente de confinamento em que há a potencialização dos problemas intrínsecos aos veículos automotores.

Investimentos em manutenção e modernização de equipamentos e treinamento deveriam ser regulares por parte da administração pública, nas situações em que ela mantém a operação de gestão, pois os avanços tecnológicos podem ser determinantes para a segurança dos usuários e funcionários. Nos casos de concessionárias privadas responsáveis pela gestão de túneis, antes do estabelecimento do termo de compromisso junto ao poder público ou mesmo no caso de renovação contratual, há que se estabelecer parâmetros rígidos compatíveis com os padrões ambientais e recursos técnicos existentes.

Em um futuro (provavelmente distante), no Brasil, novos modelos de gestão urbanística imbuídos da busca por qualidade podem conduzir as cidades a outros modelos de política de transporte urbano. A realidade atual é que, dia-a-dia, de forma maciçamente hegemônica, veículos automotivos particulares exigem sistemas estruturais viários, funcionais etc., como viadutos, pontes, estacionamentos etc., - incluindo túneis, - que aguçam a percepção, de longa data, de que a política vigente de transporte de massa é pífia, desprovida de planejamento e desalinhada com a perspectiva de tempo. Este fato é corroborado pela identificação da falta de opções de instrumentos de deslocamento como trens, linhas de metrô, barcas etc. e elementos congêneres, pelo desconforto e longos tempos de espera experimentados pela população em geral, pela falta de opção de intermodalidade de transporte,

pelos valores relativamente altos das passagens, pelos crescentes congestionamentos que se verificam na malha viária da cidade etc.

Salienta-se que algumas referências gerais devem ser consideradas para a minoração dos problemas de tráfego viário potencializados pelo ambiente de confinamento dos túneis. No caso dos túneis destinados a veículos automotivos no Brasil, deve-se estar atento a determinados aspectos que podem aumentar a segurança e minimizar riscos, inclusive à saúde, de forma significativa como, por exemplo: a) comissionamento e ensaios simulados de sinistros; b) treinamento da equipe técnica; c) manutenção preventiva; d) monitoramento de equipamentos, sinistros e poluentes; e) inspeções periódicas e constantes etc.

Por fim, este estudo demonstra a necessidade de uma abordagem multidisciplinar para o monitoramento de túneis automotivos que atenda aos parâmetros previstos e que, desta forma, relativize as situações indesejadas de perigo e toxicidade aos usuários e funcionários. Assim, busca-se administrar os aspectos de gestão ambiental e de saúde ocupacional em grandes túneis urbanos.

## GLOSSÁRIO

Acostamento	Área da plataforma adjacente à pista de rolamento destinada a: estacionamento provisório de veículos, servir de faixa extra de rolamento para emergências, contribuir para proteção da estrutura do pavimento e dos efeitos da erosão. Em rodovias de pista dupla, os acostamentos à direita do sentido de tráfego são denominados externos e aqueles à esquerda, internos.
Black Carbon BC	O aerossol BC é uma espécie de partícula poluente emitida durante a combustão de alguns combustíveis carbonáceos. Sua característica principal é informado (sic) por o anel carbono gráfico de seis membros em uma estrutura micro cristalina que mostra um ordenamento local de curto alcance. Essa estrutura tem uma secção de choque de absorção ótica muito grande, conduzindo à extinção da radiação, tanto no infravermelho quanto no visível do espectro eletromagnético, ( $10 \text{ m}^2/\text{g}$ no visível). (...) O aerossol BC é quimicamente inerte.
Faixa de Segurança	Faixa longitudinal da pista destinada a reduzir a sensação de confinamento provocada por dispositivos muito próximos ao seu bordo e que constituem obstáculos ou depressões aparentes para os condutores dos veículos (barreiras rígidas, sarjetas, meios-fios elevados, etc). Também tem a função de aumentar a segurança na travessia de pontes, viadutos e trechos contínuos sem acostamento.
MP <sub>10</sub>	“Podem ser definidas de maneira simplificada como aquelas cujo diâmetro aerodinâmico é menor que $10 \mu\text{m}$ . As partículas inaláveis podem ainda ser classificadas como partículas inaláveis finas – MP <sub>2,5</sub> ( $<2,5\mu\text{m}$ ) e partículas inaláveis grossas ( $2,5$ a $10\mu\text{m}$ ). As partículas finas, devido ao seu tamanho diminuto, podem atingir os alvéolos pulmonares, já as grossas

ficam retidas na parte superior do sistema respiratório”.  $MP_{10}$  corresponde a  $10\mu\text{m}$  (dez micrômetros) e equivale à dez milésimos de milímetro.

Passarela de emergência	Passagem estreita para pedestres, existente de forma paralela à pista, servindo como rota de saída, manutenção ou resgate, sendo iluminada, sinalizada, monitorada e protegida por guarda-corpos, sem obstáculos, e acessível a partir da própria pista através de instrumentos de deslocamento vertical (rampas ou escadas) previstos.
Rota de saída (ou fuga ou escape)	Passagem para pessoas devidamente sinalizada e monitorada dentro do túnel, que conduz a abrigo ou saída segura em caso de incidente, com ou sem incêndio.
Saída de emergência	Construção que interliga o ambiente interno do túnel com o ambiente externo, sinalizada, iluminada e condicionada ao abandono seguro do túnel, principalmente em caso de incêndio, não possuindo obstáculos à circulação de pessoas.
Tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF)	Tempo decorrido entre o início do incêndio e o momento em que a estrutura e/ou o equipamento não mais exerce(m) a função para a qual foi projetada, devido aos excessos de deformação ou colapso.
Túnel bidirecional	Túnel singelo com tráfego nos dois sentidos.
Túnel de serviço	Túnel de menor porte, interligado ao principal, destinado a manutenção, rota de saída e acesso de socorro.
Túnel unidirecional	Túnel singelo com tubo único para tráfego de veículos, cujo acesso é delimitado por emboques, e somente um sentido.

## REFERÊNCIAS

Almeida, José Claudino Souza. Dissertação de mestrado: Estudo do comportamento de poluentes em ambientes confinados: o caso do túnel Rebouças, Rio de Janeiro, UFRJ, IQ, 2004.

Almeida, José Claudino (et alii.). Primary emission ratios obtained from the monitoring of criteria pollutants in Rebouças Tunnel, Rio de Janeiro, Brasil in Periodico Tche Quimica: orgão de divulgação científica e informativa [recurso eletrônico] / Grupo Tche Quimica – Vol. 1, n. 1 (Jan. 2004)- . – Porto Alegre: Grupo Tche Quimica, 2005.

*American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) Technical Committee for Tunnels. Apud U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration. Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels – Civil Elements, 2009.*

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR-5181, 1976.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR-15661, 2009.

*Australasian Fire Authorities Council – Tunnel Fire Safety Issues Committee. Fire Safety Guidelines for Road Tunnels, 2001.*

Baird, Colin. Química Ambiental. Porto Alegre: Bookman, 2002.

Bardy, Claudio. Histórico da Cidade do Rio de Janeiro in Rio de Janeiro em seus quatrocentos anos. Rio de Janeiro: Record, 1965 Apud Telles, Pedro Carlos da Silva. História da engenharia no Brasil. Rio de Janeiro: Clavero Editoração, 1984-1993.

Brasil. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria Executiva. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Manual de projeto geométrico de travessias urbanas. - Rio de Janeiro, 2010.

Celestino, Tarcísio et al. Túneis do Brasil. São Paulo: DBA Artes Gráficas / CBT – Comitê Brasileiro de Túneis, 2006.

Cetesb – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. Relatório de qualidade do ar no estado de São Paulo. Cetesb: 2009.

Conselho Nacional do Meio-Ambiente (CONAMA). Resolução CONAMA nº 03/90.

Costa Pinto, Paulo Mozart Gonçalves da. Análise das emissões veiculares em regiões urbanas e metodologia para quantificação de poluentes. Dissertação de mestrado. Rio de Janeiro: PEAMB-FEN-UERJ, 2004.

Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. Manual de projeto de interseções. 2.ed. - Rio de Janeiro: DNIT, 2005.

Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. Manual de projeto geométrico de travessias urbanas. , Rio de Janeiro: DNIT, 2010.

Estado de São Paulo. Decreto nº 46.076, de 31 de agosto de 2001.

*European Tunnel Assessment Programme. Tunnel Audit – Final Report*. Munich: Adac, 2009.

Høj, Niels Peter (COWI). Technical Report – Part 2 - Fire Safe Design – road tunnels, Dinamarca.

- Indrehus, Oddny (et al.). CO and NO<sub>2</sub> pollution in a long two-way traffic road tunnel: investigation of NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> ratio and modelling of NO<sub>2</sub> concentration. Faculty of Engineering, Sogn og Fjordane College, N-6800 Førde, Noruega, 2000-2001.

Jornal do Brasil, 03 de maio de 1979.

Jornal O Globo, 28 de novembro de 1996..

Kim, Hak Kuen (et al.). Comparison of road tunnel design guidelines. Suécia: SP Technical Research Institute of Sweden, 2008.

Kim, Hak Kuen (et al.). Comparison and Review of Safety Design Guidelines for Road Tunnels. SP Rapport, Borås, 2007.

Liu. Z. (et al.). An overview of the international road tunnel fire detection research project. 10th Fire Suppression and Detection Research Application Symposium, Orlando, Florida, EUA, 2006.

Mashimo, H. (et alii.). Current state of road tunnel safety in Japan in The 22<sup>nd</sup> PIARC - World Road Congress, Japão, 2003.

Menezes, Flávio Louchard. Avaliação da qualidade de águas de drenagem urbana correlacionada aos poluentes originados pelo tráfego de veículos automotores: Estudo de caso do túnel Rebouças na Bacia contribuinte da Lagoa Rodrigo de Freitas. Rio de Janeiro: PEAMB/FEN/UERJ, 2004.

Moreira, Andréa C. de Castro Araújo (et al.). Monitoramento dos poluentes atmosféricos emitidos pela frota circulante no túnel Rebouças – Consolidação dos resultados da SE-04 de 2002 a 2005. Relatório Técnico – RT AMA 003/2007. Rio de Janeiro: Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo A. Miguez de Mello, 2007.

*National Fire Protection Association (NFPA). NFPA 502 – Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways*, 2008.

Nóbrega, Raimundo Paiva. Investigação de dioxinas, furanos e hidrocarbonetos policíclicos aromáticos no material particulado e gases emitidos por motores Diesel. Tese de doutorado. São Paulo: Faculdade de Saúde Pública da Universidade de São Paulo, 2007.

Parlamento Europeu e do Conselho da União Européia. Directiva 2004/54/CE, Jornal oficial da União Européia, 2004.

PIARC (World Road Association). Pollution by nitrogen dioxide in road tunnels. 2000.

PIARC (World Road Association). Fire and Smoke Control in Road Tunnels, PIARC World Road Congress, 1999 Apud Australasian Fire Authorities Council – Tunnel Fire Safety Issues Committee, 2001.

PIARC (World Road Association) – Technical Committee on Road Tunnel Operation (C5). Road tunnels: Vehicle emissions and air demand for ventilation, 2004.

PIARC (World Road Association) – Technical Committee on Road Tunnel Operation (C5). Cross section design for bi-directional road tunnels, 2004a.

PIARC (World Road Association). Road tunnels: a guide to optimising the air quality impact upon the environment, 2008.

Polícia Militar do Estado de São Paulo. Instrução Técnica nº 35/2004.

Rosasco, Franklin Velarde. Estudo sazonal e caracterização do aerossol black carbon medido no Inpe de São José dos Campos. São José dos Campos: INPE, 2009.

Sillos, Jacques. Túneis urbanos: Conexões e rupturas na estrutura da cidade. Tese de doutorado. Rio de Janeiro: PROURB-FAU-UFRJ, 2006.

Telles, Pedro Carlos da Silva. História da engenharia no Brasil. Rio de Janeiro: Clavero Editoração, 1984-1993.

The Fire Protection Research Foundation. Summary of International Road Tunnel Fire Detection Research Project – Phase II, 2008.

Thewes, Markus (et alii). Integrating existing tunnels into modern facility management systems: a new approach for operating tunnels in 11th ACUUS International Conference. Underground space: expanding the frontiers, Atenas: NTUA Press, 2007.

Transportation Research Board. Highway Capacity Manual. Washington D.C.: Transportation Research Board Publications, 2000.

Ugucione, Cássia (et al.). Avaliação de NO<sub>2</sub> na atmosfera de ambientes externos e internos na cidade de Araraquara in Química Nova, vol.32, no.7, São Paulo, 2009. ([http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-40422009000700027&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-40422009000700027&script=sci_arttext), Acesso em: set. 2010.

United Nations – Economic and Social Council. Recommendations of the group of experts on safety in road tunnels – final report. Genebra: United Nations, 2001.

U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels – Civil Elements, 2009.

## NOTAS REFERENCIAIS

- <sup>1</sup> Este mesmo autor, aliás, em razão de seus objetivos em sua tese de doutorado, desenvolve ampla pesquisa histórica e discute exaustivamente a pertinência das diferentes acepções, utilidades, adaptações evolutivas, conexões culturais etc. relativas ao tema (Sillos, Jacques. Túneis urbanos: Conexões e rupturas na estrutura da cidade. Tese de doutorado. Rio de Janeiro: PROURB-FAU-UFRJ, 2006).
- <sup>2</sup> Celestino, Tarcísio et al. Túneis do Brasil. São Paulo: DBA Artes Gráficas / CBT – Comitê Brasileiro de Túneis, p. 28, 2006.
- <sup>3</sup> Sillos, Jacques. Op. Cit., p. 120-121, 2006.
- <sup>4</sup> Em inglês: *Road tunnels*.
- <sup>5</sup> *American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) Technical Committee for Tunnels*. Apud *U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration. Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels – Civil Elements*, p. 1-1, 2009 (<http://www.fhwa.dot.gov/bridge/tunnel/pubs/nhi09010/index.cfm>, acesso: junho/2010).
- <sup>6</sup> *U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, Op. Cit.*, p. 1-1, 2009.
- <sup>7</sup> Atravessar v. **1 t.d.** e *pron.* Dispor(-se) transversalmente a (algo) **2 t.d.** ir ou passar para o outro lado de (algo), por cima ou através de **3** percorrer de ponta a ponta, de lado a lado, de extremidade a extremidade; cortar, cruzar, transpor **4 t.d.** penetrar, passando de um lado a outro; perfurar, traspasar, transpor (Houaiss, Antonio e Villar, Mauro de Salles. Dicionário Houaiss da Língua Portuguesa, Rio de Janeiro: Objetiva, 2001).
- <sup>8</sup> Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. Manual de projeto geométrico de travessias urbanas. Rio de Janeiro: DNIT, p.367, 2010. (<http://ipr.dnit.gov.br/manuais>, acesso: novembro/2010).
- <sup>9</sup> *United Nations – Economic and Social Council. Recommendations of the group of experts on safety in road tunnels – final report*. Genebra: United Nations, p. 16 e 18, 2001.
- <sup>10</sup> Segundo o Detran-RJ, em janeiro/2010, havia um total de 2.261.808 veículos registrados no município do Rio de Janeiro, sendo: a) álcool, 9,7%; b) gasolina, 54% e c) diesel, 3,8% e d) outros (<http://www.detran.rj.gov.br/estatisticas/veiculos/07.asp>, acesso: janeiro/2010).
- <sup>11</sup> Informações obtidas em Celestino, Tarcísio et al. Op. Cit., 2006.
- <sup>12</sup> De acordo com informações referentes a estudos técnicos da Gerência de Informações de Tráfego (GIT) da CET-Rio disponíveis em <http://www0.rio.rj.gov.br/smtu/ce trio/gfgit03g.htm> (acesso: junho/2010).
- <sup>13</sup> O túnel eng. Raymundo de Paula Soares (túnel da Covanca), na Linha Amarela (RJ), é considerado o 2º. maior túnel urbano do mundo, segundo informações obtidas no site da própria concessionária ([www.lamsa.com.br](http://www.lamsa.com.br), acesso: junho/2010).
- <sup>14</sup> De acordo com informações referentes a estudos técnicos da Gerência de Informações de Tráfego (GIT) da CET-Rio disponíveis em <http://www0.rio.rj.gov.br/smtu/ce trio/gfgit03g.htm> (acesso: junho/2010).
- <sup>15</sup> *Transportation Research Board. Highway Capacity Manual*. Washington D.C.: *Transportation Research Board Publications*, cap. 1, 2000.
- <sup>16</sup> Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR-15661 – Proteção contra incêndio em túneis, p. 28, 2009.
- <sup>17</sup> *U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, Op. Cit.*, p. 1-10, (2009).
- <sup>18</sup> Moreira, Andréa C. de Castro Araújo (et al.). Monitoramento dos poluentes atmosféricos emitidos pela frota circulante no túnel Rebouças – Consolidação dos resultados da SE-04 de 2002 a 2005. Relatório Técnico – RT AMA 003/2007. Rio de Janeiro: Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo A. Miguez de Mello, p. 99, 2007.
- <sup>19</sup> Thewes, Markus (et alii). Integrating existing tunnels into modern facility management systems: a new approach for operating tunnels in 11<sup>th</sup> ACUUS International Conference. Underground space: expanding the frontiers, Athens: NTUA Press, 2007, p. 246.

- 
- <sup>20</sup> Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR-15661, p. 11, 2009.
- <sup>21</sup> O Anexo A da NBR 15661/2009 trata da identificação, análise, avaliação, estabelecimento do plano de ação etc. em relação ao gerenciamento de riscos em túneis.
- <sup>22</sup> Kim, Hak Kuen (et al.). Comparison of road tunnel design guidelines. Suécia: SP Technical Research Institute of Sweden, 2008.
- <sup>23</sup> National Fire Protection Association (NFPA). NFPA 502 – Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways, p. 502-9, 2008.
- <sup>24</sup> Høj, Niels Peter (COWI). Technical Report – Part 2 - Fire Safe Design – road tunnels, pag. 118/329, Dinamarca.
- <sup>25</sup> Embora genericamente não seja feita distinção entre “tubo” e “galeria” e seja utilizada principalmente a expressão “galeria”, optou-se por considerar que “tubo” se refere à seção transversal que define um sentido de fluxo segregado daquele em sentido oposto (ou não). Ou seja, um túnel tem um “tubo” ou dois “tubos”. Já “galerias” são consideradas disposições longitudinais de um mesmo complexo e contabilizadas em função do número de segmentos (interrompidos por intervalos).
- <sup>26</sup> United Nations – Economic and Social Council. Op. Cit., p. 34, 2001.
- <sup>27</sup> Baseado em determinantes da American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). "A Policy on Geometric Design of Highways and Streets", Washington, D.C., 2004.
- <sup>28</sup> Shoulder s. faixa (vedada ao trânsito) à beira de estrada de rodagem (Houaiss, Antonio (editor). Dicionário Inglês-Português. Rio de Janeiro: Record, p. 714, 2002).
- <sup>29</sup> Transportation Research Board. Op. Cit., p. 39, 2000.
- <sup>30</sup> European Tunnel Assessment Programme. Tunnel Audit – Final Report. Munich: Adac, p. 149, 2009.
- <sup>31</sup> Brasil. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria Executiva. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Manual de projeto geométrico de travessias urbanas. - Rio de Janeiro, p. 307, 2010.
- <sup>32</sup> PIARC (World Road Association) – Technical Committee on Road Tunnel Operation (C5). Cross section design for bi-directional road tunnels, p. 51, 2004a.
- <sup>33</sup> U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, Op. Cit., p. 2-8, 2009.
- <sup>34</sup> Parlamento Europeu e do Conselho da União Européia. Directiva 2004/54/CE, Jornal oficial da União Européia, p. 63, 2004.
- <sup>35</sup> U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, Op. Cit., p. 39, 2009.
- <sup>36</sup> U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, Op. Cit., p. 2-3, 2009.
- <sup>37</sup> U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, Op. Cit., p. 2-12, 2009.
- <sup>38</sup> PIARC (World Road Association) – Technical Committee on Road Tunnel Operation (C5). Op. Cit., p. 47, 2004a.
- <sup>39</sup> PIARC (World Road Association) – Technical Committee on Road Tunnel Operation (C5). Op. Cit., p. 45, 2004a.
- <sup>40</sup> Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR-15661, p. 23, 2009.
- <sup>41</sup> Vide National Fire Protection Association (NFPA). Op. Cit., p. 502-9, 2008.
- <sup>42</sup> Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR-15661, p. 22, 2009.
- <sup>43</sup> U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, Op. Cit., p. 1-5, 2009.
- <sup>44</sup> U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration. Op. Cit., p. 1-15, 2009.
- <sup>45</sup> Bardy, Claudio. Histórico da Cidade do Rio de Janeiro in Rio de Janeiro em seus quatrocentos anos. Rio de Janeiro: Record, p. 128, 1965 Apud Telles, Pedro Carlos da Silva. História da engenharia no Brasil. Rio de Janeiro: Clavero Editoração, p. 75, 1984-1993.

- 
- <sup>46</sup> Celestino, Tarcísio et al. Túneis do Brasil. São Paulo: DBA Artes Gráficas / CBT – Comitê Brasileiro de Túneis, p. 80-83, 2006.
- <sup>47</sup> Celestino, Tarcísio et al. Op. Cit., p. 83, 2006.
- <sup>48</sup> *United Nations – Economic and Social Council*. Op. Cit., p. 31, 2001.
- <sup>49</sup> Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR-15661, p. 26, 2009.
- <sup>50</sup> *U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration*, Op. Cit., p.2-3, 2009.
- <sup>51</sup> *United Nations – Economic and Social Council*. Op. Cit., p. 34, 2001.
- <sup>52</sup> *U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration*, Op. Cit., p.1-5, 2009.
- <sup>53</sup> Parlamento Europeu e do Conselho da União Européia. Op. Cit., p. 62, 2004.
- <sup>54</sup> *U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration*, Op. Cit., p.2-8, 2009.
- <sup>55</sup> *National Fire Protection Association (NFPA)*. Op. Cit., p. 502-12, 2008.
- <sup>56</sup> *United Nations – Economic and Social Council*. Op. Cit., p. 37, 2001.
- <sup>57</sup> Parlamento Europeu e do Conselho da União Européia. Directiva 2004/54/CE, Jornal oficial da União Européia, p. 65-66, 2004.
- <sup>58</sup> Parlamento Europeu e do Conselho da União Européia. Op. Cit., p. 62, 2004.
- <sup>59</sup> *NFPA*, Op. Cit., p. 502-15, 2008.
- <sup>60</sup> Em função disso, pode-se concluir que a restrição de trânsito de determinados veículos em (certos) túneis pode assegurar menor poluição sonora como no caso do principal túnel do Rio de Janeiro, o Túnel Rebouças, onde é proibido o trânsito de caminhões.
- <sup>61</sup> "Até 1993, o item ruído veicular estava incluído na regulamentação de trânsito que, além de ser muito permissiva, não era controlada adequadamente pelos órgãos responsáveis. Hoje, como resultado do trabalho desenvolvido, a redução do volume de ruído supera os 90%", ressalta Marcelo Pereira Bales, um dos engenheiros do Setor de Operações, Programas e Regulamentação da CETESB - ETEP. Em termos comparativos, é possível afirmar que um caminhão novo emite o mesmo volume de ruído que oito caminhões fabricados até 1993 e um automóvel emite o mesmo que quatro daquela época" ([http://www.cetesb.sp.gov.br/noticentro/2006/01/31\\_ruído.htm](http://www.cetesb.sp.gov.br/noticentro/2006/01/31_ruído.htm), acesso: janeiro/2010).
- <sup>62</sup> *Australasian Fire Authorities Council – Tunnel Fire Safety Issues Committee*. Fire Safety Guidelines for Road Tunnels, cap. 2, 2001.  
([http://www.afac.com.au/data/assets/pdf\\_file/0009/2412/FireSafetyGuidelinesforRoadTunnels.pdf](http://www.afac.com.au/data/assets/pdf_file/0009/2412/FireSafetyGuidelinesforRoadTunnels.pdf) , acesso: agosto/2010).
- <sup>63</sup> *NFPA*. Op. Cit., p. 502-33, 2008.
- <sup>64</sup> *NFPA*. Op. Cit., p. 502-23, 2008.
- <sup>65</sup> *U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration*. Op. Cit., p. 1-17, 2009.
- <sup>66</sup> *Australasian Fire Authorities Council – Tunnel Fire Safety Issues Committee*. Op. Cit., p. 23-44, 2001.
- <sup>67</sup> *Australasian Fire Authorities Council – Tunnel Fire Safety Issues Committee*. Op. Cit., p. 23-44, 2001.
- <sup>68</sup> *PIARC (World Road Association)*. Road tunnels: a guide to optimising the air quality impact upon the environment. p. 25-27, 2008.
- <sup>69</sup> <http://www.inea.rj.gov.br/fma/qualidade-ar.asp#regiao metropolitana>, acesso: outubro/2010.
- <sup>70</sup> Companhia Estadual do Estado de São Paulo. ([http://www.cetesb.sp.gov.br/Ar/ar\\_saude.asp](http://www.cetesb.sp.gov.br/Ar/ar_saude.asp) , acesso: agosto/2010).

- <sup>71</sup> Baseado em Costa Pinto, Paulo Mozart Gonçalves da. Análise das emissões veiculares em regiões urbanas e metodologia para quantificação de poluentes. Dissertação de mestrado. Rio de Janeiro: PEAMB-FEN-UERJ, p. 8-9, 2004.
- <sup>72</sup> PIARC (World Road Association). Op. Cit., p. 143-145, 2008.
- <sup>73</sup> Cetesb – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. Relatório de qualidade do ar no estado de São Paulo. Cetesb: 2009.
- <sup>74</sup> “(...) [A] preponderância do NO na mistura NOx presente no interior do Túnel (para a média dos dias corridos, durante os 4 anos de monitoramento, a forma NO representou 94,70% em concentração mássica dos NOx, oscilando na faixa de mínimo de 92,59% a máximo de 96% neste período), a decisão tomada foi de apresentar no presente tópico os parâmetros estatísticos apenas da série do NO” (Moreira, Andréa C. de Castro Araújo (et al.). Op. Cit., p. 76, 2007).
- <sup>75</sup> Ugucione, Cássia (et al.) Avaliação de NO<sub>2</sub> na atmosfera de ambientes externos e internos na cidade de Araraquara in Química Nova, vol.32, no.7, São Paulo, 2009. ([http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-40422009000700027&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-40422009000700027&script=sci_arttext), acesso: setembro / 2010.)
- <sup>76</sup> Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR-15661, p. 14, 2009.
- <sup>77</sup> Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR-15661, p. 21, 2009.
- <sup>78</sup> NFPA, Op. Cit., p. 502-32, 2008.
- <sup>79</sup> “O Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program (MTFVTP), um programa de teste em escala real, foi realizado sob os auspícios do United States Federal Highway Administration (FHWA), o Massachusetts Highway Department (MHD), e a American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc. (ASHRAE) para avaliar a efetividade de diversos sistemas de ventilação de túnel e as taxas de fluxo de ar de ventilação para controlar a fumaça e o fogo. Os resultados deste programa tiveram impacto nos critérios de projeto para ventilação de emergência de túneis rodoviários” (National Fire Protection Association (NFPA), Op. Cit., p. 502-23, 2008).
- <sup>80</sup> NFPA, Op. Cit., p. 502-33, 2008.
- <sup>81</sup> U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration. Op. Cit., p. 2-10, 2009.
- <sup>82</sup> NFPA, Op. Cit., Anexo I, p. 502-33, 2008.
- <sup>83</sup> Parlamento Europeu e do Conselho da União Européia. Op. Cit., p. 68, 2004.
- <sup>84</sup> Almeida, José Claudino (et alii.). Primary emission ratios obtained from the monitoring of criteria pollutants in Rebouças Tunnel, Rio de Janeiro, Brasil in Periodico Tche Química: órgão de divulgação científica e informativa [recurso eletrônico] / Grupo Tche Química – Vol. 1, n. 1 (Jan. 2004)- . – Porto Alegre: Grupo Tche Química, p. 13-18, 2005.
- <sup>85</sup> Almeida, Op. Cit., (2005).
- <sup>86</sup> Almeida, José Claudino Souza. Dissertação de mestrado: Estudo do comportamento de poluentes em ambientes confinados: o caso do túnel Rebouças, Rio de Janeiro, UFRJ, IQ, p. 64-70, 2004.
- <sup>87</sup> Segundo informações contidas no site da Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro, a avenida Brasil recebe tráfego superior à 250 mil veículos diariamente (<http://obras.rio.rj.gov.br>, acesso: janeiro/2010).
- <sup>88</sup> <http://www.cetesb.sp.gov.br/ar/emissoes/proconve.asp> , acesso: novembro/2010.
- <sup>89</sup> PIARC (World Road Association). Op. Cit., p. 35, 2008.
- <sup>90</sup> PIARC (World Road Association). Op. Cit., p. 35, 2008.
- <sup>91</sup> Nóbrega, Raimundo Paiva. Investigação de dioxinas, furanos e hidrocarbonetos policíclicos aromáticos no material particulado e gases emitidos por motores Diesel. Tese de doutorado. São Paulo: Faculdade de Saúde Pública da Universidade de São Paulo, p. 30, 2007.
- <sup>92</sup> Sánchez-Ccoyllo, Odón R. (et al.). Vehicular particulate matter emissions in Road tunnels in São Paulo, Brazil in Springer Science + Business Media B. V., 2008. ([http://www.met.igp.gob.pe/personal/osanchez/vehic\\_sanchez.pdf](http://www.met.igp.gob.pe/personal/osanchez/vehic_sanchez.pdf) , acesso: agosto/2010).

- 
- <sup>93</sup> PIARC (World Road Association). Op. Cit., p. 31, 2008.
- <sup>94</sup> PIARC (World Road Association). Op. Cit., p. 55, 2008.
- <sup>95</sup> United Nations – Economic and Social Council. Op. Cit., p. 33, 2001.
- <sup>96</sup> United Nations – Economic and Social Council. Op. Cit., p. 33, 2001.
- <sup>97</sup> United Nations – Economic and Social Council. Op. Cit., p. 33, 2001.
- <sup>98</sup> PIARC (World Road Association) – Technical Committee on Road Tunnel Operation (C5). Road tunnels: Vehicle emissions and air demand for ventilation, p. 17, 2004.
- <sup>99</sup> PIARC (World Road Association). Op. Cit., p. 67, 2008.
- <sup>100</sup> PIARC (World Road Association). Op. Cit., p. 77, 2008.
- <sup>101</sup> The Fire Protection Research Foundation. Summary of International Road Tunnel Fire Detection Research Project – Phase II, p. 24, 2008. (<http://www.nfpa.org/foundation> , acesso: agosto/2010).
- <sup>102</sup> PIARC (World Road Association) – Technical Committee on Road Tunnel Operation (C5). Road tunnels: Vehicle emissions and air demand for ventilation, p. 31-41, 2004.
- <sup>103</sup> PIARC (World Road Association). Op. Cit., p. 51, 2008.
- <sup>104</sup> PIARC (World Road Association). Op. Cit., p. 31, 2008.
- <sup>105</sup> U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration. Op. Cit., p. 14-9, 2009.
- <sup>106</sup> Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR-5181 – Iluminação de túneis, 1976.
- <sup>107</sup> Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR-5181, 1976.
- <sup>108</sup> Segundo a NBR-5181/1976: “O quebra-luz médio poderá reduzir em aproximadamente 70% a luz diurna na entrada do túnel”.
- <sup>109</sup> United Nations – Economic and Social Council. Op. Cit., p. 30, 2001.
- <sup>110</sup> United Nations – Economic and Social Council. Op. Cit., p. 30, 2001.
- <sup>111</sup> United Nations – Economic and Social Council. Op. Cit., p. 24-26, 2001.
- <sup>112</sup> NFPA, Op. Cit., 2008.
- <sup>113</sup> Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR-15661, 2009.
- <sup>114</sup> NFPA, Op. Cit., Capítulo 7, 2008.
- <sup>115</sup> NFPA, Op. Cit., p. 502-22, 2008.
- <sup>116</sup> NFPA, Op. Cit., p. 502-10, 2008.
- <sup>117</sup> NFPA, Op. Cit., p. 502-11, 2008.
- <sup>118</sup> NFPA, Op. Cit., p. 502-12, 2008.
- <sup>119</sup> Australasian Fire Authorities Council – Tunnel Fire Safety Issues Committee, Op. Cit., p. 14-44, 2001.
- <sup>120</sup> Baird, Colin. Química Ambiental. Porto Alegre: Bookman, p. 122, 2002.
- <sup>121</sup> Mashimo, H. (et alii.). Current state of road tunnel safety in Japan in The 22<sup>nd</sup> PIARC World Road Congress, Japão, 2003. (<http://www.pwri.go.jp/eng/activity/pdf/reports/mashimo031018.pdf>, acesso: julho/2010).
- <sup>122</sup> Australasian Fire Authorities Council – Tunnel Fire Safety Issues Committee. Op. Cit., p. 24, 2001.
- <sup>123</sup> PIARC (World Road Association). Op. Cit., p. 81, 2008.
- <sup>124</sup> United Nations – Economic and Social Council. Op. Cit., p. 19, 2001.

- 
- <sup>125</sup> Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR-15661, p. 27, 2009.
- <sup>126</sup> Liu. Z. (et al.). An overview of the international road tunnel fire detection research project. 10th Fire Suppression and Detection Research Application Symposium, Orlando, Florida, EUA, 2006.
- <sup>127</sup> NFPA, Op. Cit., p. 502-17, 2008.
- <sup>128</sup> *Fire and Smoke Control in Road Tunnels*, PIARC World Road Congress, 1999 Apud Australasian Fire Authorities Council – Tunnel Fire Safety Issues Committee. Op. Cit., p. 17, 2001.
- <sup>129</sup> United Nations – Economic and Social Council. Op. Cit., p. 17, 2001.
- <sup>130</sup> Liu. Z. (et al.). Op. Cit., 2006.
- <sup>131</sup> NFPA, Op. Cit., p. 502-15, 2008.
- <sup>132</sup> PIARC (World Road Association). *Fire and Smoke Control in Road Tunnels*, PIARC World Road Congress, 1999 Apud Australasian Fire Authorities Council – Tunnel Fire Safety Issues Committee. Op. Cit., p. 7, 2001. Complementado por United Nations – Economic and Social Council. Op. Cit., p. 18, 2001.
- <sup>133</sup> Australasian Fire Authorities Council – Tunnel Fire Safety Issues Committee. Op. Cit., p. 30, 2001.
- <sup>134</sup> Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR-15661, p. 15, 2009.
- <sup>135</sup> Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR-15661, p. 20, 2009.
- <sup>136</sup> Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR-15661, p. 22, 2009.
- <sup>137</sup> Polícia Militar do Estado de São Paulo. p. 1, Instrução Técnica nº 35/2004.
- <sup>138</sup> Estado de São Paulo. Decreto nº 46.076, de 31 de agosto de 2001.
- <sup>139</sup> NFPA, Op. Cit., p. 502-13 e 502-14, 2008.
- <sup>140</sup> NFPA, Op. Cit., p. 502-16, 2008.
- <sup>141</sup> NFPA, Op. Cit., p. 502-16, 2008.
- <sup>142</sup> NFPA, Op. Cit., p. 502-16, 2008.
- <sup>143</sup> Australasian Fire Authorities Council – Tunnel Fire Safety Issues Committee. Op. Cit., p. 31, 2001.
- <sup>144</sup> <http://www.mace.manchester.ac.uk/project/research/structures/strucfire/CaseStudy/HistoricFires/InfrastructuralFires/mont.htm> (acesso: julho/2010).
- <sup>145</sup> <http://news.bbc.co.uk/2/hi/europe/1617931.stm>, acesso: julho/2010.
- <sup>146</sup> Indrehus, Oddny (et al.). CO and NO2 pollution in a long two-way traffic road tunnel: investigation of NO2/NOx ratio and modelling of NO2 concentration. Faculty of Engineering, Sogn og Fjordane College, N-6800 Førde, Noruega, p. 5, 2000-2001.
- <sup>147</sup> PIARC (World Road Association). Pollution by nitrogen dioxide in road tunnels. p. 9, 2000. ([http://publications.piarc.org/ressources/publications\\_files/2/909.05-09-e.pdf](http://publications.piarc.org/ressources/publications_files/2/909.05-09-e.pdf), acesso: agosto/2010).
- <sup>148</sup> PIARC (World Road Association). Pollution by nitrogen dioxide in road tunnels. Op. Cit., p. 20, 2000.
- <sup>149</sup> Australasian Fire Authorities Council – Tunnel Fire Safety Issues Committee. Op. Cit., p. 32, 2001.
- <sup>150</sup> United Nations – Economic and Social Council. Op. Cit., p. 35, 2001.
- <sup>151</sup> United Nations – Economic and Social Council. Op. Cit., p. 36, 2001.
- <sup>152</sup> Parlamento Europeu e do Conselho da União Européia. Op. Cit., p. 64, 2004.
- <sup>153</sup> Parlamento Europeu e do Conselho da União Européia. Op. Cit., p. 65, 2004.
- <sup>154</sup> U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration. Op. Cit., p. 14-9, 2009.

- 
- <sup>155</sup> *United Nations – Economic and Social Council. Op. Cit.*, p. 18, 2001.
- <sup>156</sup> Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR-15661, p. 25, 2009.
- <sup>157</sup> Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR-15661, p. 26, 2009.
- <sup>158</sup> *U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration. Op. Cit.*, p. 1-14, 2009.
- <sup>159</sup> *U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration. Op. Cit.*, p. 1-14, 2009.
- <sup>160</sup> *U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration. Op. Cit.*, p. 1-14, 2009.
- <sup>161</sup> *U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration. Op. Cit.*, p. 2-9, 2009.
- <sup>162</sup> *NFPA, Op. Cit.*, p. 502-11, 2008.
- <sup>163</sup> Menezes, Flávio Louchard. Avaliação da qualidade de águas de drenagem urbana correlacionada aos poluentes originados pelo tráfego de veículos automotores: Estudo de caso do túnel Rebouças na Bacia contribuinte da Lagoa Rodrigo de Freitas. Rio de Janeiro: PEAMB/FEN/UERJ, 2004.
- <sup>164</sup> Menezes, Flávio Louchard. Op. Cit., p. 91, 2004.
- <sup>165</sup> Menezes, Flávio Louchard. Op. Cit., p. 114-115, 2004.
- <sup>166</sup> Menezes, Flávio Louchard. Op. Cit., p. 115, 2004.
- <sup>167</sup> Menezes, Flávio Louchard. Op. Cit., p. 43, 2004.
- <sup>168</sup> <http://www.inea.rj.gov.br/fma/programa-im.asp>, acesso: outubro/2010.
- <sup>169</sup> <http://www.denatran.gov.br/ctb.htm>, acesso: outubro/2010.
- <sup>170</sup> Jornal do Brasil, 03 de maio de 1979.
- <sup>171</sup> O Globo, 28 de novembro de 1996.
- <sup>172</sup> Moreira, Andréa C. de Castro Araújo (et al.). Op. Cit., p. 80, 2007.
- <sup>173</sup> <http://www.anp.gov.br/s10> , acesso: novembro/2010.
- <sup>174</sup> Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR-15661, p. 25, 2009.
- <sup>175</sup> O Globo, 26 de agosto de 1998, seção Rio, p. 17.
- <sup>176</sup> Kim, Hak Kuen (et al.). Comparison and Review of Safety Design Guidelines for Road Tunnels. SP Rapport, Borås, 2007.
- <sup>177</sup> Eurotap – European tunnel assessment programme. Tunnel Audit Final Report, Munich, 2007.
- <sup>178</sup> *PIARC (World Road Association). Road tunnels: a guide to optimising the air quality impact upon the environment.*, 2008.