

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

PROPOSTA DE DIRETRIZES GERAIS PARA PROJETO DE
TÚNEIS RODOVIÁRIOS

JEAN CARLO TREVIZOLO DE SOUZA

ORIENTADOR: ANDRÉ PACHECO DE ASSIS, PhD

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G.DM-203/12

BRASÍLIA/DF: JANEIRO DE 2012

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**PROPOSTA DE DIRETRIZES GERAIS PARA PROJETO DE
TÚNEIS RODOVIÁRIOS**

JEAN CARLO TREVIZOLO DE SOUZA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.

APROVADA POR:

**ANDRÉ PACHECO DE ASSIS, PhD (UnB)
(ORIENTADOR)**

**LUIS FERNANDO MARTINS RIBEIRO, DSc (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**JOSÉ ALLAN CARVALHO MAIA, DSc (PRODEC)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 19 de JANEIRO de 2012.

FICHA CATALOGRÁFICA

| |
|---|
| SOUZA, JEAN CARLO TREVIZOLO DE Proposta de Diretrizes Gerais para Projeto de Túneis Rodoviários [Distrito Federal] 2012 xxiii, 225 p., 210x297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2012) Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental 1. Projeto e Construção de Túneis 2. Instalações em túneis 3. Obras Subterrâneas 4. Acessórios tuneleiros I. ENC/FT/UnB II. Título (série) |
|---|

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SOUZA, J.C.T. (2012). Propostas de Diretrizes Gerais para Projeto de Túneis Rodoviários. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-203/12, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 225 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Jean Carlo Trevizolo de Souza

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Proposta de Diretrizes Gerais para Construção de Túneis.

GRAU / ANO: Mestre / 2012

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Jean Carlo Trevizolo de Souza

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais Waldir e Marta, que ao lado dos meus irmãos Juninho e Vívian me proporcionaram uma forte estrutura familiar, essencial apoio para todas as minhas realizações, e a minha sempre amiga e companheira Lélia Júlia, pelo insistente incentivo em meu aperfeiçoamento profissional. Sem estas pessoas ao meu lado eu certamente não conseguiria alcançar vãos tão altos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço acima de tudo a Deus, que com sua voz mágica sempre me orientou a seguir pelo melhor caminho e com sua presença invisível sempre esteve comigo, me ajudando a tornar possível todos os meus sonhos.

Também não poderia deixar de agradecer a todos aqueles que me apoiaram na concretização de mais este sonho, como o meu orientador, o Professor André Pacheco de Assis, que com sua habitual paciência, compreensão e muito ensinamento, conduziu esta produção técnica de maneira sempre cordial e com um entusiasmo contagiante.

Agradeço também a todos os meus amigos do DNIT, em especial ao eng^o. Marco Aurélio Fonteles Cabral, à eng^a. Zilda Maria dos Santos Mello e ao eng^o. Marcelo Almeida Pinheiro Chagas por me compreenderem e ajudarem quando surgiam dificuldades com horários, devido às aulas presenciais.

RESUMO

PROPOSTA DE DIRETRIZES GERAIS PARA PROJETOS DE TÚNEIS RODOVIÁRIOS

Embora a construção dos primeiros túneis tenha sido registrada na antiguidade, a exploração do espaço subterrâneo para a finalidade rodoviária desenvolveu-se somente nos últimos séculos, com maior ênfase nas décadas mais recentes devido a explosão tecnológica observada em todo o mundo. Com isso, surgiram várias publicações sobre os mais diversos assuntos, principalmente nos países que detêm maior domínio financeiro e tecnológico, como Japão, países europeus e Estados Unidos. Embora a bibliografia nacional concentrada no estudo de túneis rodoviários ainda apresente abrangência limitada, as pesquisas internacionais são vastas e alcançam os mais diversos temas. Entretanto, normalmente estas publicações são específicas para cada assunto, restando ao interessado procurar pela publicação que esteja interessado. Este trabalho foi elaborado no sentido de reunir os estudos dos mais variados temas em um só material, possibilitando ao interessado, seja um projetista um mero leitor, pesquisar em um só material o funcionamento dos sistemas de iluminação, ventilação, impermeabilização, drenagem, segurança, análise de risco, definição da seção transversal, entre outros. O objetivo inicialmente proposto foi alcançado da maneira satisfatória e, assim, este documento pode ser considerado uma interessante Proposta de Diretrizes Gerais para Projetos de Túneis Rodoviários.

ABSTRACT

PROPOSAL OF GENERAL GUIDELINES FOR ROAD TUNNELS PROJECTS

Although the construction of the first tunnels have been recorded in antiquity, the exploitation of underground space for the purpose of road was developed only in recent centuries, with greater emphasis in recent decades due to technological explosion seen in the world. Therefore, several publications on many subjects has emerged, especially in countries with greater financial and technological domain, such as Japan, European countries and the United States. Although the national literature concentrated on the study of road tunnels provide limited coverage, international researches are vast and delivers the most diverse subjects. However, normally these publications are specific to each theme, hence interested people must look for the intended publication. This was done in bringing together the study of several subjects in one material, enabling any person, since a designer until a mere reader, searching for a single material the functioning of various systems, as operation of lighting systems, ventilation, waterproofing, drainage, safety, risk analysis, definition of the cross section, among others. Finally, observing the success reached, it was suggested the development of similar documents designed specifically for building railway tunnels. The goal initially proposed was achieved in a satisfactory manner and thus this document may be considered as an interesting Proposal of General Guidelines for Road Tunnels Projects.

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1. Problemática | 3 |
| 1.2. Objetivos | 3 |
| 1.3. Metodologia | 4 |
| 1.4. Organização da Dissertação | 4 |
| 2. RAZÕES PARA A EXPLORAÇÃO DO ESPAÇO SUBTERRÂNEO | 6 |
| 2.1. Utilização do Espaço Subterrâneo | 6 |
| 2.2. Aspectos do Espaços Subterrâneo | 7 |
| 2.2.1 Isolamento | 7 |
| 2.2.1.1 Clima | 7 |
| 2.2.1.2 Desastre Natural e Terremoto | 7 |
| 2.2.1.3 Proteção | 7 |
| 2.2.1.4 Contenção | 8 |
| 2.2.1.5 Segurança | 8 |
| 2.2.2 Preservação Ambiental | 8 |
| 2.2.2.1 Estética | 8 |
| 2.2.2.2 Ecologia | 9 |
| 2.2.3 Topografia | 9 |
| 2.2.4 Benefícios Sociais | 9 |
| 2.3. Túneis no Brasil e no Mundo | 11 |
| 2.4. Demandas de Obras de Túneis | 13 |
| 3. ESTUDOS E INVESTIGAÇÕES GEOTÉCNICAS | 18 |
| 3.1. Estudos Iniciais | 20 |
| 3.1.1 Coleta de Informações Disponíveis | 20 |

| | | |
|-------------|---|-----------|
| 3.1.2 | Fotografia Aérea _____ | 21 |
| 3.1.3 | Mapeamento Geológico-Geotécnico _____ | 22 |
| 3.1.4 | Meio Ambiente _____ | 23 |
| 3.1.5 | Sistema de Gestão de Dados Geoespaciais _____ | 24 |
| 3.2. | Investigações de Campo _____ | 25 |
| 3.2.1 | Investigações do Subsolo _____ | 25 |
| 3.2.2 | Sondagens _____ | 27 |
| 3.2.3 | Identificação e Classificação de Solos e Rochas _____ | 31 |
| 3.2.4 | Técnicas de Investigação _____ | 33 |
| 3.2.4.1 | Ensaio in situ _____ | 33 |
| 3.2.4.2 | Ensaio Geofísicos _____ | 35 |
| 3.3. | Investigações Complementares Durante a Construção do Túnel _____ | 38 |
| 3.3.1 | Instrumentação Geotécnica _____ | 39 |
| 3.3.2 | Túneis Pilotos _____ | 40 |
| 4. | <i>SEÇÃO DE TÚNEIS</i> _____ | 41 |
| 4.1. | Largura da Faixa e da Pista de Rodagem _____ | 43 |
| 4.2. | Áreas Adjacentes à Pista de Rodagem _____ | 45 |
| 4.3. | Passeio _____ | 50 |
| 4.4. | Gabarito Vertical _____ | 52 |
| 5. | <i>ILUMINAÇÃO</i> _____ | 55 |
| 5.1. | Projetos de Iluminação de Túneis _____ | 55 |
| 5.1.1 | Iluminação e Equipamentos Auxiliares _____ | 56 |
| 5.1.2 | Sistemas de Iluminação _____ | 59 |
| 5.1.3 | Distância de Segurança (DS) _____ | 61 |
| 5.1.4 | Classe de Iluminação dos Túneis _____ | 62 |
| 5.1.4.1 | Intensidade do Tráfego _____ | 62 |
| 5.1.4.2 | Composição do Tráfego _____ | 62 |
| 5.1.4.3 | Orientação Visual _____ | 63 |
| 5.1.4.4 | Conforto na Condução. _____ | 63 |
| 5.1.5 | Iluminação Diurna _____ | 65 |
| 5.1.6 | Iluminação Noturna _____ | 66 |

| | | |
|--------------|--|-----------|
| 5.2. | Luminância na Zona de Acesso | 67 |
| 5.3. | Luminância na Zona de Entrada | 69 |
| 5.4. | Luminância na Zona de Transição | 70 |
| 5.5. | Iluminação na Zona Interior | 72 |
| 5.6. | Iluminação na Zona de Saída. | 73 |
| 5.7. | Iluminação Noturna. | 73 |
| 5.8. | Túneis de Cumprimento Reduzido | 74 |
| 5.9. | Equipamentos de iluminação | 74 |
| 5.9.1 | Tecnologia Atual e Tendências | 76 |
| 5.9.2 | Dispositivos de Regulação | 76 |
| 5.10. | Manutenção | 77 |
| 5.11. | Revestimento | 77 |
| 6. | <i>VENTILAÇÃO</i> | 79 |
| 6.1. | Sistemas de Ventilação | 79 |
| 6.1.1 | Ventilação Longitudinal | 80 |
| 6.1.2 | Ventilação Transversal | 81 |
| 6.1.3 | Ventilação Semi-Transversal | 83 |
| 6.2. | Tecnologia de Tratamento de Emissões | 84 |
| 6.2.1 | Precipitação Eletrostática | 84 |
| 6.2.2 | Precipitação Eletrostática “Seca” (ESP seca) | 85 |
| 6.2.3 | Precipitação Eletrostática “Úmida” (ESP úmida) | 85 |
| 6.2.4 | Desnitrificação | 86 |
| 6.2.5 | Absorção | 87 |
| 6.2.6 | Biofiltração | 87 |
| 6.2.7 | Aglomeração | 89 |
| 6.2.8 | Purificação | 89 |
| 6.2.9 | Método das Turbinas | 89 |
| 6.3. | Tratamento do Ar em Túneis pelo Mundo | 89 |
| 7. | <i>DRENAGEM E IMPERMEABILIZAÇÃO</i> | 91 |

| | | |
|-------------|--|------------|
| 7.1. | Visão Global | 92 |
| 7.2. | Drenagem durante o Projeto | 93 |
| 7.3. | Estudos Geológico, Geotécnico e Hidrogeológico do Túnel | 94 |
| 7.4. | Impermeabilização e Drenagem | 95 |
| 7.5. | Visão Específica da Drenagem de Túneis | 101 |
| 7.6. | Considerações Práticas | 105 |
| 7.6.1 | Traçado | 105 |
| 7.6.2 | Dispositivos para Drenagem e Impermeabilização | 105 |
| 7.6.2.1 | Geotêxtil | 107 |
| 7.6.2.2 | Geomembrana | 107 |
| 7.6.2.3 | Drenos laterais | 108 |
| 7.6.3 | Sistema de Drenagem | 108 |
| 7.6.3.1 | Tubulação | 108 |
| 7.6.3.2 | Acesso à Tubulação Externa | 109 |
| 7.6.3.3 | Poços de Inspeção | 110 |
| 7.6.3.4 | Teste do Sistema de Drenagem | 111 |
| 7.7. | Visão Específica da Impermeabilização | 112 |
| 8. | SINALIZAÇÃO | 116 |
| 8.1. | Sinalização nos Túneis | 117 |
| 8.1.1 | Sinalização Vertical | 117 |
| 8.1.1.1 | Sinal de Túnel | 117 |
| 8.1.1.2 | Áreas de Parada de Emergência | 118 |
| 8.1.1.3 | Saídas de Emergência | 119 |
| 8.1.1.4 | Postos de Emergência | 119 |
| 8.1.1.5 | Rádiorransmissão | 120 |
| 8.1.1.6 | Sinais Variáveis de Mensagem | 120 |
| 8.1.2 | Sinalização Horizontal | 121 |
| 9. | SEGURANÇA | 122 |
| 9.1. | Gerenciamento Operacional | 123 |
| 9.2. | Situações de Emergência | 123 |

| | | |
|--------|--|-----|
| 9.3. | Plano de Resposta à Emergência _____ | 124 |
| 9.4. | Centro de Controle Operacional _____ | 124 |
| 9.5. | Sistemas de Segurança Contra Incêndio _____ | 125 |
| 9.6. | Efetividade do Sistema de Segurança _____ | 127 |
| 9.7. | Sistema de Hidrantes _____ | 129 |
| 9.8. | Sistema de Extintores _____ | 129 |
| 9.9. | Saídas e Passagens de emergência _____ | 129 |
| 9.10. | Sistemas de Comunicação _____ | 130 |
| 9.11. | Sistema de Energia _____ | 132 |
| 9.12. | Sistema de Coleta de Líquidos _____ | 132 |
| 9.13. | Geometria do Túnel _____ | 133 |
| 9.14. | Ensaio de Equipamentos e Sistemas _____ | 133 |
| 9.15. | Comissionamento do Túnel _____ | 133 |
| 9.16. | Teste Simulado de Incêndio _____ | 134 |
| 10. | ANÁLISE DE RISCOS _____ | 135 |
| 10.1. | Caracterização do Empreendimento Túnel (CT) _____ | 138 |
| 10.2. | Identificação de Perigos em Túneis (IPT) _____ | 139 |
| 10.3. | Análise de Conseqüências e Vulnerabilidade (ACV) _____ | 139 |
| 10.4. | Estimativa de Frequências (EF) _____ | 139 |
| 10.5. | Avaliação de Riscos (AR) _____ | 140 |
| 10.6. | Aceitabilidade de Riscos (ACR) _____ | 140 |
| 10.7. | Gerenciamento de Riscos (GR) _____ | 140 |
| 10.8. | Resposta a Emergências ou Contingências (REC) _____ | 140 |
| 10.9. | Medidas Mitigadoras de Riscos (MMR) _____ | 141 |
| 10.10. | Análise de Conformidade de Segurança (ACS) _____ | 141 |
| 10.11. | Descrição da Técnica <i>Check-List</i> _____ | 142 |

| | | |
|---------------|--|------------|
| 10.12. | Descrição da Técnica APP (Análise Preliminar de Perigo) | 143 |
| 10.13. | Descrição da Técnica <i>What-If</i> (E-Se) | 144 |
| 10.14. | Descrição da Técnica FMEA (<i>Fail mode & Effect Analysis</i>) | 145 |
| 10.15. | Descrição da Técnica Árvore de Eventos (AAE) | 146 |
| 10.16. | Descrição da Técnica Árvore de Falhas (AAF) | 147 |
| 10.17. | Disponibilidade dos Sistemas de Proteção e de Segurança | 147 |
| 10.18. | Aceitabilidade de Riscos | 148 |
| 11. | <i>MANUTENÇÃO</i> | 150 |
| 11.1. | Experiência Internacional com Manutenção de Túneis | 151 |
| 11.1.1 | Estados Unidos | 151 |
| 11.1.2 | Japão | 153 |
| 11.1.3 | Alemanha | 153 |
| 11.1.4 | França | 153 |
| 11.1.5 | República Tcheca | 153 |
| 11.2. | Experiência Brasileira com Manutenção de Túneis | 154 |
| 11.3. | Principais Danos em Túneis | 155 |
| 11.4. | Ensaio | 158 |
| 11.5. | Georadar | 159 |
| 11.6. | Termografia Infravermelha | 160 |
| 11.7. | Análise Multiespectral | 162 |
| 11.8. | Inspeções Rápidas com Equipamentos Instalados em Veículos | 163 |
| 12. | <i>PROPOSTA DE DIRETRIZES GERAIS PARA PROJETO DE TÚNEIS RODOVIÁRIOS</i> | 164 |
| 12.1. | Estudos e Investigações Geotécnicas | 165 |
| 12.2. | Seção de Túneis | 168 |
| 12.3. | Iluminação | 170 |
| 12.4. | Ventilação | 174 |
| 12.5. | Impermeabilização | 175 |

| | | |
|---------------|--|------------|
| 12.6. | Drenagem | 176 |
| 12.7. | Sinalização | 178 |
| 12.8. | Segurança | 182 |
| 12.9. | Análise de riscos | 186 |
| 12.9.1 | <i>Check-List</i> | 188 |
| 12.9.2 | Análise Preliminar de Perigo (APP) | 189 |
| 12.9.3 | <i>What If (E Se...)</i> | 190 |
| 12.9.4 | FMEA (<i>Fail Mode & Effect Analysis</i>) | 191 |
| 12.9.5 | Árvore de Eventos (AAE) | 193 |
| 12.9.6 | Árvore de Falhas (AAF) | 194 |
| 12.10. | Manutenção | 194 |
| 13. | CONCLUSÕES | 196 |
| 13.1. | Razões para Explorar o Espaço Subterrâneo | 196 |
| 13.2. | Regimentos e Normas | 197 |
| 13.3. | Estudo e Investigações Geotécnicas | 197 |
| 13.4. | Seção Transversal | 198 |
| 13.5. | Iluminação | 200 |
| 13.6. | Ventilação | 201 |
| 13.7. | Drenagem e Impermeabilização | 201 |
| 13.8. | Sinalização | 202 |
| 13.9. | Segurança | 203 |
| 13.10. | Análise de Riscos | 203 |
| 13.11. | Sugestões Para Pesquisas Futuras | 204 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 205 |
| | APÊNDICE A - REGULAMENTOS E NORMAS | 210 |

Lista de Tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 2.1 – Maiores túneis rodoviários do mundo (Scabbia, 2007). | 11 |
| Tabela 2.2 – Maiores túneis destinados ao transporte no mundo. | 11 |
| Tabela 2.3 – Maiores túneis do Brasil (Túneis do Brasil, 2006). | 12 |
| Tabela 2.4 – Túneis rodoviários urbanos no Brasil. | 13 |
| Tabela 2.5 – Túneis Rodoviários (não-urbanos) no Brasil. | 14 |
| Tabela 2.6 – Túneis rodoviários e ferroviários sob a responsabilidade do DNIT. | 16 |
| | |
| Tabela 3.1 – Espaçamento sugerido entre sondagens em função do tipo de escavação e das condições previstas para o subsolo a ser atravessado (FHWA, 2009). | 28 |
| Tabela 3.2 – Ensaios <i>in situ</i> para solos (modificado - FHWA, 2009). | 34 |
| Tabela 3.3 – Ensaios <i>in situ</i> para rochas (modificado - FHWA, 2009). | 35 |
| Tabela 3.4 – Técnicas de investigação geofísica (modificado - FHWA, 2009). | 36 |
| Tabela 3.5 – Procedimentos de ensaios geofísicos (FHWA, 2009). | 36 |
| | |
| Tabela 4.1 – Seções Transversais e Métodos de Construção típicos (modificado - PIARC, 2001). | 41 |
| Tabela 4.2 – Comparação internacional entre faixas de rolamento (PIARC, 2001). | 43 |
| Tabela 4.3 – Dimensões área adjacente à pista de rodagem na ausência de faixa de emergência (modificado - PIARC, 2001). | 46 |
| Tabela 4.4 – Dimensões na presença de faixa de emergência (modificado - PIARC, 2001). | 47 |
| Tabela 4.5 – Dimensões da área adjacente à pista de rodagem ao lado da faixa de ultrapassagem (modificado - PIARC, 2001). | 48 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 4.6 – Dimensões dos passeios (modificado - PIARC, 2001). | 49 |
| Tabela 4.7 – Comparação dos gabaritos verticais internacionalmente adotados (PIARC, 2001). | 53 |
| Tabela 5.1 – Coeficiente de atrito (f_i) entre pavimento e roda em função da velocidade (Cano, 2002). | 62 |
| Tabela 5.2 – Fatores de ponderação, de acordo com a intensidade do tráfego (Cano & Sergio, 2002). | 62 |
| Tabela 5.3 – Fator de ponderação em função da composição do tráfego (Cano, 2002). | 63 |
| Tabela 5.4 – Fatores de ponderação em função da orientação visual (Cano, 2002). | 63 |
| Tabela 5.5 – Os fatores de ponderação em termos do conforto na condução (Cano, 2002). | 63 |
| Tabela 5.6 – Classes de iluminação de túneis longos (Cano, 2002). | 64 |
| Tabela 5.7 – Valores de $k \times 10^3$ para a zona de entrada (Cano, 2002). | 64 |
| Tabela 5.8 – Luminâncias máximas na zona de acesso em função das possíveis situações que podem ser observadas. | 67 |
| Tabela 5.9 – Valores de luminância da rodovia e arredores (Kcd/m^2) (Cano, 2002). | 69 |
| Tabela 5.10 – Luminância em cd/m^2 na zona interior. | 73 |
| Tabela 7.1 – Relação espacial-temporal da água com o túnel (Caja, 2005). | 92 |
| Tabela 7.2 – Relação da impermeabilização e drenagem com o sistema construtivo (Caja, 2005). | 99 |
| Tabela 9.1 – Ocorrência de incêndios em túneis. | 122 |
| Tabela 10.1 – Técnicas de análise de riscos para túneis. | 142 |
| Tabela 10.2 – Modelo de planilha a ser utilizada na técnica APP. | 143 |
| Tabela 10.3 – Categorias de Severidade. | 143 |

| | |
|---|-----|
| Tabela 10.4 – Categorias de Probabilidade. _____ | 144 |
| Tabela 10.5 – Modelo de planilha para a técnica <i>What If</i> . _____ | 145 |
| Tabela 10.6 – Modelo de Planilha usada na Técnica FMEA _____ | 145 |
| Tabela 10.7 – Critério de Freqüência. _____ | 146 |
| | |
| Tabela 11.1 – Danos típicos em estruturas de túneis dependendo da sua idade (modificado - Haack, 1998). _____ | 156 |
| | |
| Tabela 12.1 – Técnicas de análise de riscos para túneis. _____ | 188 |
| Tabela 12.2 – Modelo de planilha a ser utilizada na técnica APP. _____ | 189 |
| Tabela 12.3 – Categorias de Severidade. _____ | 190 |
| Tabela 12.4 – Categorias de Probabilidade. _____ | 190 |
| Tabela 12.5 – Modelo de planilha para a técnica <i>What If</i> . _____ | 191 |
| Tabela 12.6 – Modelo de Planilha usada na Técnica FMEA _____ | 191 |
| Tabela 12.7 – Critério de Freqüência. _____ | 193 |
| | |
| Tabela A.1 – Normas e legislações no mundo relacionada às obras subterrâneas (ITA COSUF, 2008). _____ | 211 |
| Tabela A.2 – Principais publicações no mundo (ITA COSUF, 2008). _____ | 218 |
| Tabela A.3 – Principais publicações de organismos internacionais (ITA COSUF, 2008). _____ | 221 |

Lista de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 3.1 – Modelo geológico esquemático (modificado – Gorick, 2006) | 26 |
| Figura 3.2 – Atividades de investigação do subsolo, onde em (a) se apresenta uma sondagem vertical e em (b) sondagem horizontal (FHWA, 2009). | 29 |
| Figura 4.1 – Configuração típica de um túnel rodoviário (modificado - PIARC, 2001). | 42 |
| Figura 4.2 – Gabaritos usualmente adotados em túneis rodoviários (modificado - PIARC, 2001). | 43 |
| Figura 4.3 – Elementos da área adjacente à pista de rodagem (PIARC, 2001). | 45 |
| Figura 4.4 – Rebaixamento de meio-fio para permitir tráfego em situações especiais (PIARC, 2001). | 52 |
| Figura 5.1 – Zonas de Iluminância em Túneis Longos (Cano, 2002). | 58 |
| Figura 5.2 – Zonas de iluminação de um túnel típico em perspectiva. | 59 |
| Figura 5.3 – Sistema Simétrico de Iluminação. | 60 |
| Figura 5.4 – Sistema Assimétrico de Iluminação. | 60 |
| Figura 5.5 – Efeito do buraco negro no portal de um túnel rodoviário. | 65 |
| Figura 5.6 – Níveis de luminância em túneis unidirecionais. | 66 |
| Figura 5.7 – Condições da Zona de Acesso. | 67 |
| Figura 5.8 – Campo de visão cônico, formado por um cone de 20° (Cano, 2002). | 68 |
| Figura 5.9 – Redução da curva de luminância | 70 |
| Figura 5.10 – Curva de adaptação visual (Buraczynski et al., 2010). | 71 |
| Figura 5.11 – Painéis no Interior de um Túnel. | 78 |

| | |
|---|-----|
| Figura 5.12 – Painéis Desde a Zona de Acesso. _____ | 78 |
| Figura 6.1 – Ventilação longitudinal em túneis rodoviários (Child & Associates, 2004). ____ | 80 |
| Figura 6.2 – Perfil esquemático do sistema de ventilação longitudinal em túneis rodoviários (FHWA, 2004). _____ | 81 |
| Figura 6.3 – Ventilação transversal em túneis rodoviários (Child & Associates, 2004). ____ | 82 |
| Figura 6.4 – Perfil esquemático do sistema de ventilação transversal em túneis rodoviários (FHWA, 2004). _____ | 82 |
| Figura 6.5 – Ventilação semi-transversal em túneis rodoviários(Child & Associates, 2004). _ | 83 |
| Figura 6.6 – Perfil esquemático do sistema de ventilação semi-transversal em túneis rodoviários (FHWA, 2004). _____ | 84 |
| Figura 6.7 – Precipitação eletrostática “seca” (Child & Associates, 2004). _____ | 85 |
| Figura 6.8 – Precipitação eletrostática “úmida” (Child & Associates, 2004). _____ | 86 |
| Figura 6.9 – Mecanismo Típico de Biofiltração (Child & Associates, 2004). _____ | 88 |
| Figura 6.10 – Processo Típico de Biofiltração (Child & Associates, 2004). _____ | 88 |
| Figura 7.1 – Pressão da água no túnel (Széchy, 1970)._____ | 97 |
| Figura 7.2 – Casos típicos de soluções de impermeabilização e drenagem (Caja, 2005). ____ | 98 |
| Figura 7.3 – Esquema dos dispositivos de drenagem._____ | 102 |
| Figura 7.4 – Drenagem do pavimento. _____ | 103 |
| Figura 7.5 – Esquema do sistema de drenagem preconizado pela CETU. _____ | 104 |
| Figura 7.6 – Seção tipo do sistema de drenagem e impermeabilização. _____ | 106 |
| Figura 7.7 – Diferença entre o geotêxtil tecido e o não-tecido. _____ | 107 |
| Figura 7.8 – Detalhe do acesso ao dreno lateral (Clay, 1998). _____ | 109 |
| Figura 7.9 – Perfil longitudinal da tubulação externa e dos seus pontos de acesso (Clay, 1998). _____ | 110 |
| Figura 7.10 – Poço de inspeção da tubulação de drenagem (Clay, 1998). _____ | 111 |

| | |
|--|-----|
| Figura 7.11 – Ação da limpeza da bola (Clay, 1998). | 112 |
| Figura 7.12 – Sistema de impermeabilização e drenagem em túneis | 113 |
| Figura 7.13 – Exemplos de geomembranas. | 114 |
| Figura 7.14 – Exemplo de geotêxtil de proteção. | 114 |
| Figura 7.15 – Exemplos de elementos complementares. | 115 |
| | |
| Figura 8.1 – Placa de sinalização de túnel e sua extensão (Diretiva 2004/54/CE do Parlamento europeu). | 118 |
| Figura 8.2 – Sinalização utilizada na identificação das áreas de parada de emergência (Diretiva 2004/54/CE do Parlamento europeu). | 118 |
| Figura 8.3 – Indicação de saída de emergência (Diretiva 2004/54/CE do Parlamento europeu). | 119 |
| Figura 8.4 – Indicação da distância da saída de emergência mais próxima (Diretiva 2004/54/CE do Parlamento europeu). | 119 |
| Figura 8.5 – Sinalização empregada na identificação de postos de emergência (Diretiva 2004/54/CE do Parlamento europeu). | 120 |
| Figura 8.6 – Sinalização sobre rádio e frequência (Diretiva 2004/54/CE do Parlamento europeu). | 120 |
| Figura 8.7 – Sinais de mensagem variável (Diretiva 2004/54/CE do Parlamento europeu). | 121 |
| | |
| Figura 9.1 – Sistema global de segurança contra incêndio. | 128 |
| | |
| Figura 10.1 – Análise de risco. | 136 |
| Figura 10.2. Etapas da MART. | 138 |
| Figura 10.3 – Esquema da técnica de árvore de eventos. | 147 |
| Figura 10.4 – Árvore de falhas - Incêndio no interior do túnel | 147 |
| Figura 10.5 – Gráfico da aceitabilidade de riscos em túneis | 149 |

| | |
|--|-----|
| Figura 11.1 – Exemplo de geo-radar (Esteio, 2004). | 159 |
| Figura 11.2 – Imagem de um túnel com infravermelho (Aperio, 2004). | 162 |
| Figura 11.3 – Protótipo de um sistema de inspeção (Takenaka, 2001). | 163 |
| Figura 12.1 – Dimensões da seção proposta. | 170 |
| Figura 12.2 – Sinal de Túnel. | 179 |
| Figura 12.3 – Placas de sinalização para a Parada de Emergência. | 180 |
| Figura 12.4 – Indicação de saída de emergência. | 180 |
| Figura 12.5 – Indicação da distância da saída de emergência mais próxima. | 180 |
| Figura 12.6 – Sinalização de postos de emergência (telefone de emergência e extintor). | 181 |
| Figura 12.7 – Sinalização para sintonizar o rádio do veículo na frequência indicada. | 182 |
| Figura 13.7 – Sinais de mensagem variável. | 182 |
| Figura 12.9 – Esquema da técnica de árvore de eventos. | 193 |
| Figura 12.10 – Árvore de falhas - Incêndio no interior do túnel | 194 |

ABREVIações, NOMENCLATURAS E SÍMBOLOS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas;
BS - British Standard;
 c' – Coesão Efetiva;
 c_c – Índice de Compressão;
cm – Centímetro;
COSUF – Committee on Operational Safety of Underground Facilities;
CP – Corpo-de-prova;
CTA – Chicargo Transit Authority;
 c_v – Coeficiente de Variação Volumétrica;
 d – diâmetro do corpo-de-prova;
DNER – Departamento Nacional de Estradas e Rodagem;
DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes;
 e_0 – Índice de Vazios Natural;
EUA – Estados Unidos da América;
FHWA – Federal Highway Administration;
GPR – Ground Penetrating Radar;
GPS – Global Positioning System;
 h – Altura do corpo-de-prova;
IP – Índice de Plasticidade;
ISRM – International Society for Rock Mechanics;
ITA – International Tunnelling Association;
KPa – QuiloPascal;
 m – Metro;
METRÔ-DF – Sistema metroviário do Distrito Federal;
Metrô-Rio – Sistema metroviário do Rio de Janeiro;
Metrô-SP – Sistema metroviário de São Paulo;
 mm – Milímetro;
MPa – MegaPascal;

MHz – MegaHertz;
NA – Nível d'água subterrâneo;
NATM – New Austrian Tunnelling Method;
NBR – Norma Brasileira;
nm – Nanômetro;
NYCTA – New York City Transit Authority;
PIARC – Permanent International Association of Road Congress;
SIG – Sistema de Informação Geográfica;
SPT – Standard Penetration Test;
TBM – Tunnel Boring Machine;
UnB – Universidade de Brasília;
VCA – Vala à céu aberto;
w_L – Limite de Liquidez;
w_P – Limite de Plasticidade;
φ' – Ângulo de Atrito Efetivo;
γ_d – Peso específico Seco Natural;
k₀ – Coeficiente de Empuxo no Repouso.

1. INTRODUÇÃO

Conforme Assis (2002), a utilização do espaço subterrâneo não é recente, desde a pré-história os humanos já procuravam abrigos em cavernas e cavidades. O túnel mais antigo que se tem registro foi construído a cerca de 4000 anos na Babilônia sob o leito do rio Eufrates, tendo a finalidade de estabelecer uma comunicação subterrânea entre o palácio real e o templo, separados por uma distância de cerca de um quilômetro (seção 1,5 x 1,5 m). Esta obra impressiona, afinal o túnel seguinte, escavado sob o leito de um rio, só foi executado quatro milênios mais tarde, em 1843, sob o rio Tâmisia em Londres. A 2700 anos, um túnel de adução de água foi construído na ilha grega de Samos, tendo 1,5 km de extensão e seção transversal de 1,8 x 1,8 m. Em Atenas, 1800 anos atrás, outro túnel de adução foi construído, o qual foi reformado em 1925 e ainda opera no sistema de adução de água para a cidade. Ainda na Idade Antiga, a maior rede de túneis foi construída em Roma na época da perseguição aos cristãos. Uma série de câmaras escavadas ao longo de diversos corredores compõe as catacumbas onde cerca de 6 milhões de cristãos estão enterrados.

Na Idade Média, a construção de túneis teve propósito prioritariamente militar. Alguns avanços ocorreram já no final desta fase, principalmente devido à construção dos grandes canais de navegação na Europa (túnel Malpas no Canal de Midi, França, com 161 m de extensão, concluído em 1681). Em 1679, empregou-se, pela primeira vez em obras civis, explosivos (pólvora) para o desmonte da face de escavação. Até então, eram utilizados martelos e cinzéis na abertura de cavidades.

Com a Revolução Industrial e o desenvolvimento das máquinas a vapor, deu-se início a Era das Ferrovias, que foi um dos períodos mais produtivos para a engenharia de túneis. Alguns desenvolvimentos desta fase valem ser lembrados. A construção do túnel sob o leito do rio Tâmisia em Londres, foi iniciado em 1807, sendo sua construção abandonada por cerca de quinze anos devido a dificuldades construtivas e posteriormente concluída em 1843 graças à utilização da primeira couraça (shield) projetada por Marc Brunel. A partir desse período

houve uma rápida evolução nos métodos de abertura de túneis, com a introdução das máquinas de escavação hidráulicas e pneumáticas (1857), da dinamite (1864), do ar comprimido para expulsar a água do lençol freático e dos shields cilíndricos (1869).

No entanto, somente com o advento do NATM (New Austrian Tunnelling Method) é que ocorreu uma mudança na concepção dos sistemas de suporte, que evoluíram até atingir o estágio atual.

Em todas as épocas, observa-se o uso considerável de estruturas subterrâneas de mineração e para finalidades de defesa. No entanto, o aumento mais rápido na utilização de obras subterrâneas só ocorreu nos séculos 19 e, particularmente, no século 20, graças ao impulso do desenvolvimento econômico e o surgimento de tecnologias melhoradas para obras subterrâneas. Durante estes períodos, houve um aumento substancial no uso do espaço subterrâneo, na mineração, na área de transporte com o desenvolvimento de estradas, hidrovias e ferrovias, e em outros campos, como o desenvolvimento de usinas hidrelétricas. Assim, desde os primórdios da atividade humana, de forma mais intensiva durante os últimos séculos, e acima de tudo durante as últimas décadas, inúmeras razões, como geração de energia elétrica, transportes em geral (ferrovia e rodovia), abrigos de segurança (defesa bélica ou para produtos radioativos, por exemplo) ou utilidades públicas diversas (saneamento, cabeamento, tubulações, entre outros) têm incentivado a humanidade na utilização e desenvolvimento do espaço subterrâneo.

Para uma boa compreensão destas razões, é necessário ter em mente certas características fundamentais do espaço subterrâneo.

- ✓ Em primeiro lugar, o subterrâneo é um espaço que pode proporcionar a criação de atividades ou infra-estruturas que são difíceis, impossíveis, ambientalmente indesejáveis ou menos rentáveis para instalar acima do solo;
- ✓ Uma outra característica fundamental do espaço subterrâneo está na proteção natural que se oferece ao que é colocado no subsolo. Essa proteção é, simultaneamente, mecânica, térmica e acústica;
- ✓ Por outro lado, a contenção criada por estruturas subterrâneas tem a vantagem de proteger o meio ambiente contra os riscos superficiais e/ou distúrbios inerentes em certos tipos de atividades;

✓ Por último, outra característica importante do espaço subterrâneo é a sua opacidade. Graças a tela visual natural criada pelo meio geológico, uma estrutura subterrânea é visível apenas no ponto onde se conecta à superfície.

1.1. PROBLEMÁTICA

A exploração do espaço subterrâneo para o transporte viário é um tema que vem ganhando grande expressão nas últimas décadas, principalmente devido ao progresso tecnológico observado recentemente. Isso contribuiu para a elaboração de diversos estudos das mais variadas áreas relacionadas a este tema. Observa-se grande contribuição para a bibliografia tuneleira principalmente nos países mais desenvolvidos e que apresentam topografia irregular, como Suécia, Japão, Noruega, Estados Unidos, França, Itália e recentemente Espanha e Portugal, entre outros.

No Brasil este tema também vem recebendo bastante atenção da área acadêmica e de construção. Já existem várias produções bibliográficas em português no setor, contribuindo de alguma maneira para o contexto internacional no qual estamos vivenciando.

Entretanto, assim como acontece no restante do mundo, existe dificuldade em se encontrar um material completo, com capacidade de fornecer informações dos mais diversos sub-temas existentes aglutinados em uma única obra literária. Um profissional envolvido com um planejamento, projeto ou obra de túnel necessita pesquisar diversas fontes para conseguir entender genericamente a complexidade de uma construção tuneleira, ou seja, precisa procurar separadamente cada tema que pretende entender ou estudar em artigos, livros ou outras obras.

1.2. OBJETIVOS

Este trabalho foi elaborado no intuito principal de auxiliar os profissionais envolvidos com a construção de túneis no desenvolvimento de suas atividades. Pretende-se agrupar os mais diversos temas relacionados com empreendimentos tuneleiros, com maior ênfase para aqueles voltados para o modal rodoviário.

Secundariamente, pretende-se alcançar um material que se aproxime ao máximo de um manual técnico para obras de túneis, no qual o profissional poderá compreender com clareza e riqueza de detalhes o dimensionamento geométrico, as investigações geotécnicas, o funcionamento dos sistemas de iluminação, ventilação, emergência, sinalização, manutenção

e gestão de riscos. Atenta-se que não é objetivo explorar temas voltados às metodologias de construção, para isso a bibliografia nacional e principalmente internacional já está bastante avançada e com grande riqueza de informações.

1.3. METODOLOGIA

O desenvolvimento deste trabalho consistiu basicamente em pesquisa bibliográfica nas mais diversas fontes. Foram explorados artigos técnicos, livros, sítios na internet e produções em congressos e seminários. Para a elaboração de cada capítulo, procedeu-se a uma profunda pesquisa sobre o tema e selecionou-se a essência do que foi considerado de melhor utilidade, qualidade, clareza e riqueza de informações. Portanto, este trabalho é o resultado de uma vasta revisão bibliográfica nacional e internacional.

1.4. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Para possibilitar melhor clareza e compreensão deste trabalho, esta dissertação foi dividida em capítulos e apêndices, sucintamente descritos a seguir.

O Capítulo 1 apresenta o tema a ser explorado ao longo desta dissertação, os objetivos e a metodologia adotada.

No Capítulo 2 discute-se os motivos que têm levado a humanidade atual a explorar o espaço subterrâneo pelo mundo.

As Investigações Geotécnicas voltadas para a construção tuneleira são estudadas com clareza no Capítulo 3.

Já o Capítulo 4 apresenta estudos direcionados para a definição da geometria da seção transversal, onde cada elemento da seção é profundamente discutido.

O Capítulo 5 destina-se aos sistemas de iluminação de túneis, com a separação em zonas de iluminação e luminosidade requerida para cada seção.

No capítulo 6 discute-se os sistemas de ventilação utilizados no controle de poluentes e introdução de ar limpo em túneis.

Ao longo do capítulo 7 buscou-se explorar os estudos referentes aos sistema de drenagem e impermeabilização, uma vez que estes sistemas possuem bastante proximidade e muitas vezes são complementares e, por isso, optou-se por estudá-los em conjunto neste capítulo.

O Capítulo 8 foi dedicado para melhor explorar a sinalização horizontal e vertical voltada para túneis.

No Capítulo 9 exploram-se os diversos itens que estão relacionados com a obtenção de uma melhor condição de segurança. Enquanto o Capítulo 10 aprofunda as pesquisas nos estudos de análise de riscos, que cada vez vem ocupando mais espaço no cenários destes empreendimentos.

O Capítulo 11 dedica-se à estudos de ações que visam a manutenção de túneis rodoviários, apresentando ensaios que podem ser realizados e rotinas adotadas em diversos países, inclusive no Brasil, para a verificação da real condição da estrutura, possibilitando a providência de medidas corretivas tempestivas.

Já no Capítulo 12 o autor apresenta sua proposta para a elaboração de projetos e construção de túneis rodoviários no Brasil. Trata-se de uma sugestão de diretrizes gerais que podem ser adotadas a fim de normatização e padronização de diversos temas correlacionados à construção e projetos de túneis rodoviários.

Por fim, chega-se às conclusões possibilitadas pelo estudo dos diversos temas presentes neste trabalho, no Capítulo 13, onde, ao final, o autor também sugere temas que podem ser pesquisados no futuro, complementando o documento em análise.

Após isso, há somente o Apêndice, elaborado no sentido de apresentar uma relação com várias normas encontradas em todo o mundo que exploram o tema (túneis), assim como as poucas e escassas normas brasileiras existentes até o momento.

2. RAZÕES PARA A EXPLORAÇÃO DO ESPAÇO

SUBTERRÂNEO

2.1. UTILIZAÇÃO DO ESPAÇO SUBTERRÂNEO

Para Sterling & Godard (2000), a utilização do espaço subterrâneo resulta da falta de espaço na superfície. Além disso, o espaço subterrâneo é capaz de comportar atividades ou infraestruturas complexas cuja instalação não é possível na superfície, quer devido a falta de espaço ou por questões ambientais e/ou sociais. Existem muitos tipos de instalações que são melhores ou necessariamente destinados ao espaço subterrâneo, pois sua presença física na superfície é indesejável, por exemplo: utilitários públicos (cabos, fios, tubulações), armazenagem de material menos desejável, e parques de estacionamento.

Além disso, muitas vezes há a necessidade de separar atividades de transporte conflitantes ou fornecer conexões fáceis entre elas. Um exemplo deste tipo de necessidade é a distribuição de pedestres em torno das estações de trem principais, assim como a necessidade de troca de transporte de ônibus para trem, ou vice versa, em transportes intermodais integrados. Em áreas urbanas, diferentes tipos de meios de transporte podem ser adequados juntos aos eixos de transporte mais importantes da cidade.

Este tipo de solução também permite construções nas proximidades de instalações existentes ou, em caso contrário, em locais onde não é permitida ou mesmo possível uma construção civil, oferecendo melhores serviços à comunidade local.

Sterling & Godard (2000) aprofundaram ainda mais os estudos a respeito dos motivos que nos leva a explorar o espaço subterrâneo com a utilização de obras subterrâneas, conforme sintetizado nos itens a seguir.

Em resumo, a seleção de uma obra subterrânea é a solução para um problema específico, que em função da sua complexidade, normalmente é adotada como última alternativa.

2.2. ASPECTOS DO ESPAÇOS SUBTERRÂNEO

2.2.1 ISOLAMENTO

O espaço subterrâneo é maciço e opaco fornecendo assim uma variedade de vantagens em termos de isolamento que, por sua vez, fornece um importante impulso para a instalação de atividades indesejáveis na superfície.

2.2.1.1 CLIMA

A temperatura no interior do maciço terroso ou rochoso oferece um ambiente térmico moderado e uniforme em comparação com a ampla variação das temperaturas observadas na superfície. Estas temperaturas moderadas associadas à lenta resposta da grande massa térmica do solo proporciona uma eficiente e amplas vantagens de armazenamento de energia. Assim, o espaço subterrâneo fornece isolamento de climas adversos e pode fornecer quantidades substanciais de economia de energia.

2.2.1.2 DESASTRE NATURAL E TERREMOTO

Estruturas subterrâneas são naturalmente protegidas contra fenômenos naturais (furacões, tornados, tempestade etc). Estas estruturas podem também resistir danos estruturais causados por enchentes, sempre quando requerimentos especiais de isolamento sejam considerados. Além disso, apresentam várias vantagens intrínsecas no sentido de resistir a terremotos. Elas tendem a ser menos afetadas pela superfície das ondas sísmicas que estruturas de superfície, e, apesar de algumas falhas significativas nas estruturas e equipamentos do transporte subterrâneo, infraestruturas subterrâneas sobreviveram bem aos recentes terremotos de Kobe (Japão) em 1995, e anteriormente em São Francisco (Estados Unidos) e na Cidade do México (México).

2.2.1.3 PROTEÇÃO

Estruturas subterrâneas oferecem vantagens em termos de preservação de objetos ou produtos armazenados em seu interior. Por exemplo, a conservação de alimentos é reforçada pelas condições de temperatura moderadas e constantes, além da garantia de um ambiente selado e fechado. Pequenas coberturas da terra ou rocha são muito eficazes na proteção contra a transmissão de ruído aéreo. Da mesma forma, se as fontes de vibração estão dentro ou perto da superfície do solo, o nível de vibração diminuirá rapidamente com a profundidade abaixo

do solo e distância da fonte. Tal como acontece com o ruído e vibração, o terreno fornece a proteção de absorver o choque e energia vibracional originada por explosivos. Em casos de explosão, precipitação radioativa e acidentes de trabalho, as estruturas subterrâneas podem servir como abrigos de emergência, caso sejam equipadas com equipamentos de extração e injeção de ar exterior livre de contaminantes.

2.2.1.4 CONTENÇÃO

O aspecto de contenção das estruturas indesejáveis é muito importante para proteger a superfície dos incômodos e perigos gerados por estas atividades, como o armazenamento de resíduos nucleares, isolamento de usinas industriais perigosas, estocagem de produtos petroquímicos etc.

2.2.1.5 SEGURANÇA

A vantagem principal de segurança para obras subterrâneas é que os pontos de acesso são geralmente limitados e facilmente protegidos. Mas além disso, túneis rodoviários são considerados mais seguros para o usuário que estradas convencionais na superfície. Isso porque as condições de trafegabilidade para o motorista se aproximam do ideal, pois elementos que provocam acidentes, como cruzamentos, lombadas, animais, pedestres e chuvas são bastante restritos nestes locais.

2.2.2 PRESERVAÇÃO AMBIENTAL

O espaço subterrâneo também fornece uma variedade de vantagens em termos de preservação do meio ambiente. Estes aspectos são especialmente importantes na concepção de estruturas com um baixo impacto ambiental, tais como os túneis rodoviários em contraposição à escavação de grandes cortes rodoviários.

2.2.2.1 ESTÉTICA

Uma estrutura totalmente ou parcialmente subterrânea tem menor impacto visual do que uma estrutura de superfície. Isso pode ser importante para esconder desinteressantes instalações em locais sensíveis ou as instalações industriais localizadas junto às áreas residenciais, além de promover a preservação da paisagem natural. A exigência crescente de todos os serviços de utilidade pública a serem instalados no subsolo resulta essencialmente de considerações sobre o impacto visual.

2.2.2.2 ECOLOGIA

Normalmente as obras subterrâneas ajudam a preservar a vegetação natural. Por meio da redução dos danos causados sobre o ciclo ecológico local e global. Além disso, flora, habitat e passagens de animais, e transpiração e respiração de plantas são mantidas em maior medida do que com a construção de uma estrutura de superfície.

2.2.3 TOPOGRAFIA

Em áreas acidentadas ou montanhosas, o uso de túneis melhora ou torna viável o transporte de diferentes modais, tais como estradas, ferrovias, canais etc. Túneis também são uma opção importante para a travessia de rios. Geralmente a utilização do espaço subterrâneo oferece muitas vantagens, levando em conta o layout das instalações e infraestruturas. Estas vantagens derivam essencialmente de liberdade (dentro das limitações geológicas, de custo e de propriedade da terra) para planejar instalações de três dimensões e da remoção de obstáculos físicos sobre o solo.

2.2.4 BENEFÍCIOS SOCIAIS

As cidades que são capazes de funcionar economicamente, socialmente e ecologicamente proporcionam o pré-requisito para uma melhor qualidade de vida em áreas urbanas. Neste aspecto, o espaço subterrâneo tem um papel importante a desempenhar, ou seja, o alcance de um desenvolvimento ambiental amigável, seja na redução da poluição do ar ou sonora, com o uso eficiente do espaço, no desenvolvimento econômico, na preservação do meio ambiente, promoção da saúde ou segurança pública. Nestas áreas, as obras subterrâneas oferecem inúmeras vantagens:

- ✓ Desempenham um papel ambiental vital, transportando água limpa para as comunidades e transportando as águas residuais provenientes de áreas urbanas para locais mais adequados;
- ✓ Fornecem segurança, ambiente sonoro adequado e sistemas de transporte urbano de massa rápidos e sem obstruções;
- ✓ Os túneis de transporte urbano (metrô, trens, carros etc) reduzem a quantidade de veículos da superfície da cidade, com isso, o ruído do tráfego é reduzido, o ar torna-se menos poluído e as áreas de superfície podem ser parcialmente utilizadas para outros fins, geralmente mais nobres, como moradia, comércio, parques, entre outros;

- ✓ Estacionamentos e centros comerciais subterrâneos em centros urbanos podem liberar espaço para áreas de recreação na superfície;
- ✓ Túneis utilitários multiuso são menos vulneráveis às condições externas do que as instalações de superfície e provoca apenas perturbação insignificante ao solo, quando os equipamentos instalados são submetidos à reparação ou manutenção;
- ✓ Por último, mas não menos importante, o local mais seguro para armazenar os resíduos nucleares e outros materiais indesejáveis ou perigosos são os espaços subterrâneos corretamente projetados para receber esta função.

Os túneis oferecerem as seguintes vantagens:

- ✓ Menor impacto ambiental;
- ✓ Permite a transposição de cidades densamente povoadas sem interferir no já caótico tráfego local;
- ✓ Interliga áreas, encurtando distâncias;
- ✓ Maior segurança no tráfego;
- ✓ Superação de limitações topográficas;
- ✓ Maiores benefícios sociais (ruídos, drenagem, água e esgoto);
- ✓ Tendência a melhorar a qualidade de vida;
- ✓ Superfície liberada para fins mais nobres;
- ✓ Valorização imobiliária local;
- ✓ Diminuição do custo energético;
- ✓ Diminuição da poluição.

Em contrapartida, os túneis também apresentam algumas desvantagens:

- ✓ Maiores riscos associados;
- ✓ Acidentes automobilísticos de maior gravidade;
- ✓ Resistência psicológica;
- ✓ Impacto permanente sobre a natureza do terreno.

2.3. TÚNEIS NO BRASIL E NO MUNDO

A necessidade de construir túneis para transpor obstáculos ambientais no século XXI, período focado na globalização, obriga a aplicação de novos métodos construtivos para ligar dois pontos de difícil acesso. Os maiores túneis rodoviários construídos no planeta estão próximos dos 25.000 m (Tabela 2.1), sendo que para a próxima geração espera-se muito mais, inclusive a interligação de continentes América/Europa e Europa/África.

Tabela 2.1 – Maiores túneis rodoviários do mundo (Scabbia, 2007).

| CONTINENTE | PAÍS | TÚNEL | COMPRIMENTO (m) | INAUGURAÇÃO |
|------------|--------------------|--------------|--------------------|-------------|
| Europa | Noruega | Laerdal | 24.510 | 2000 |
| Ásia | China | Zhongnanshan | 18.040 | 2008 |
| Europa | Suíça | San Gottardo | 16.918 | 1980 |
| Europa | Austria | Arlberg | 13.972 | 1978 |
| Ásia | Taiwan | Hsuehshan | 12.917 | 2006 |
| Europa | França / Itália | Fréjus | 12.895 | 1980 |
| Europa | França / Itália | Mont-Blanc | 11.611 | 1965 |

Entretanto, conforme observado na Tabela 2.2, deve-se ressaltar que atualmente no mundo os maiores túneis destinados ao transporte são destinados ao modal ferroviário e metroviário, enquanto o maior túnel rodoviário não aparece nem mesmo na lista dos dez maiores túneis.

Tabela 2.2 – Maiores túneis destinados ao transporte no mundo.

| POS | PAÍS | TÚNEL | COMPRIMENTO (km) | INAUGURAÇÃO | MODAL |
|-----|------------------------|----------------------------------|---------------------|-------------|-------------|
| 1 | Suíça | Túnel Base de São Gotardo | 57,0 | 2017 | Ferrovário |
| 2 | Japão | Seikan | 53,8 | 1988 | Ferrovário |
| 3 | França / Inglaterra | Eurotúnel | 50,4 | 1994 | Ferrovário |
| 4 | Rússia | Serpukhovsko- Timiryazevskaya | 41,5 | 1983 | Metroviário |
| 5 | Espanha | Linha 07 - metrô Madri | 40,9 | 1999 | Metroviário |
| 6 | Japão | Toei Oedo | 40,7 | 1991 | Metroviário |
| 7 | Rússia | Kaluzhsko- Rizhskaya | 37,6 | 1990 | Metroviário |

| | | | | | |
|----|----------|--|------|------|-------------|
| 8 | Suiça | Base de Lötschberg | 34,5 | 2007 | Ferroviário |
| 9 | Espanha | Linha 07 - metrô Madri: Hospital del Henares - Pitis | 32,9 | 2007 | Metroviário |
| 10 | Alemanha | Rathaus Spandau-Rudow | 31,8 | 1984 | Metroviário |

No Brasil, alguns túneis rodoviários mais antigos, nasceram da adequação de estruturas construídas para circulação de bondes. Entre eles destaca-se o Túnel 9 de Julho, que apesar de possuir apenas 726 m passou por sucessivas recapitações, em função do volume de tráfego, tipo de veículo que circula e cargas transportadas. Aa Tabela 2.3 indica que os maiores túneis no Brasil estão destinados aos modais ferroviários e metroviários, acompanhando o observado no mundo.

Tabela 2.3 – Maiores túneis do Brasil (Túneis do Brasil, 2006).

| ESTADO | TÚNEL | COMPRIMENTO (m) | INAUGURAÇÃO | MODAL |
|--------|--|-----------------|-------------|-------------|
| RJ | Tunelão (Túnel da Mantiqueira - Ferrovia do aço) | 8.645 | 1984 | Ferroviário |
| DF | Túnel Asa Sul | 7.200 | 1999 | Metroviário |
| SP | Linha 2 - Metrô de SP (2 túneis) | 5.400 | 1990 | Metroviário |
| SP | Linha 3 - Metrô de SP (2 túneis) | 3.600 | 1983 | Metroviário |
| SP | Linha 1 - Metrô de SP (2 túneis) | 3.200 | 1974 | Metroviário |
| SP | Rodovia dos Imigrantes (TD1) | 3.146 | 2002 | Rodoviário |
| SP | Rodovia dos Imigrantes (TD3) | 3.045 | 2002 | Rodoviário |
| MG | Contorno de Sabará | 2.910 | 1990 | Ferroviário |
| RJ | Antônio Rebouças | 2.800 | 1965 | Rodoviário |
| RJ | André Rebouças | 2.800 | 1965 | Rodoviário |
| RJ | Eng. R. de Paula Soares | 2.187 | 1997 | Rodoviário |
| SP | Rodovia dos Imigrantes (TD2) | 2.080 | 2002 | Rodoviário |
| MG | Túnel Marembá | 2.112 | 1990 | Ferroviário |
| RS | EF-491 | 2.072 | 1979 | Ferroviário |
| SP | Mário Covas | 1.730 | 2002 | Rodoviário |

2.4. DEMANDAS DE OBRAS DE TÚNEIS

Atualmente, a maior necessidade de obras subterrâneas se concentra na construção de túneis de tráfego e cavernas de estocagem, principalmente em centros urbanos densamente ocupados, liberando espaço na superfície para utilizações mais nobres tais como, áreas para moradia e lazer.

O desenvolvimento sócio-econômico tem gerado um aumento na demanda do transporte tanto de passageiros quanto de mercadorias. Entretanto, obstáculos naturais ou artificiais, podem tornar inviável este transporte pelos meios convencionais. Neste contexto, a execução de obras subterrâneas tem se mostrado uma boa alternativa na solução desta questão.

Túneis são hoje utilizados com as mais diversas finalidades. Pode-se citar, como exemplo, a escavação de túneis em montanhas que reduzem significativamente as distâncias a serem cobertas por vias de transporte, satisfazendo a inclinação máxima permitida. Outras utilizações são adução de água, esgoto, transportes urbanos, passagem de cabos, mineração, reservatórios etc.

A Tabela 2.4 apresenta os túneis urbanos nas principais cidades brasileiras.

Tabela 2.4 – Túneis rodoviários urbanos no Brasil.

| TÚNEIS URBANOS | | | |
|-----------------------|---------------------------|-------------------------|--------------------|
| CIDADE | TÚNEL | EXTENSÃO (m) | INAUGURAÇÃO |
| Salvador | Américo Simas | 300 | 1969 |
| | Luís Eduardo Magalhães | 300 | - |
| | Teodoro Sampaio | 100 | - |
| Belo Horizonte | Prefeito Souza Lima | 435 | 1981 |
| | Presidente Tancredo Neves | 435 | 1984 |
| Rio de Janeiro | Rua Alice | 220 | 1887 |
| | Alaor Prata | 182 | 1892 |
| | Engenheiro Coelho Cintra | 250 | 1906 |
| | João Ricardo | 293 | 1921 |
| | Engenheiro Marques Porto | 250 | 1949 |
| | Sá Freire Alvim | 326 | 1960 |
| | Major Rubens Vaz | 220 | 1963 |
| | Santa Bárbara | 1357 | 1963 |
| | Rebouças | 2800 | 1967 |
| | Acústico | 550 | 1971 |
| | Zuzu Angel | 1590 | 1971 |
| | São Conrado | 260 | 1971 |
| Joá | 426 | 1971 | |

| | | | |
|-----------|---------------------------------|------|------|
| | Martim de Sá | 304 | 1977 |
| | Noel Rosa | 720 | 1978 |
| | Eng. Raimundo de Paula Soares | 2187 | 1997 |
| | Eng. Enaldo Cravo Peixoto | 153 | 1997 |
| | Geólogo Enzo Totis | 165 | 1997 |
| | Mergulhão | 100 | 1997 |
| Niterói | Raul Veiga | 620 | 1981 |
| | Roberto Silveira | 260 | - |
| São Paulo | Dr. Euclides de Jesus Zerbini | 420 | 1993 |
| | Sebastião Camargo | 1170 | 1995 |
| | Jânio Quadros | 1900 | 1994 |
| | Tribunal de Justiça | 824 | 1994 |
| | Ayrton Senna | 1950 | 1995 |
| | Sena Madureira | 205 | 1996 |
| | Tom Jobim | 329 | 1995 |
| | Maria Maluf | 1020 | 1994 |
| | Escola de Engenharia Mackenzie | 180 | 1996 |
| | Dr. Antônio Bias da Costa Bueno | 360 | 1973 |
| | Noite Ilustrada | 884 | 1973 |
| | Francisco Matarazzo | 120 | 1970 |
| | Presidente Roosevelt | 1120 | 1971 |
| | Takeharu Akagawa | 393 | 1969 |
| | Daher E. Cutait | 1060 | 1938 |
| | Papa João Paulo II | 582 | 1988 |
| | Jorn. Fernando Vieira de Melo | 583 | 2004 |
| | Max Feffer | 756 | 2004 |
| | Odon Pereira | 180 | 2006 |
| | Paulo Autran | 150 | 2008 |
| Barueri | Complexo Viário Yojiro Takaoka | 250 | - |
| Campinas | Joá Penteadof[1] | 370 | 2009 |
| | Joá Penteadof[2] | 450 | 1992 |
| Guarujá | Juscelino Kubitschek | 355 | - |
| Santos | Rubens Fereira Martins | 385 | 1950 |
| Taubaté | Visconde de Tremembé | 300 | 1996 |

Tabela 2.5 – Túneis Rodoviários (não-urbanos) no Brasil.

| ESTADO | TÚNEL | EXTENSÃO (m) | INAUGURAÇÃO |
|----------------|------------------------|-----------------|-------------|
| Pará | Tucuruí | 100 | - |
| Pernambuco | Cascavel | 370 | - |
| Rio de Janeiro | Saí-Mangaratiba | 474 | 1970 |
| | Muriqui-Itacuruçá | 528 | 1970 |
| | Lídice-Angra dos Reis | 100 | - |
| | Túnel da Estrada Velha | 340 | 1928 |

| | | | |
|-------------------|----------------------|-------|------|
| | Túnel do Quitandinha | 268 | 1928 |
| | Túnel de Descida 1 | 220 | 1950 |
| | Túnel de Descida 2 | 112 | 1950 |
| Rio Grande do Sul | Túneis de Reversão | 445 | - |
| | Túnel do Morro Alto | 1662 | 2009 |
| Santa Catarina | Morro do Boi | 1.001 | - |
| São Paulo | TA-0 | - | 1974 |
| | TA-1 | - | 1974 |
| | TA-2 | - | 1974 |
| | TA-3 | - | 1974 |
| | TA-4 | - | 1974 |
| | TA-5 | - | 1974 |
| | TA-6 | - | 1974 |
| | TA-7 | - | 1974 |
| | TA-8 | - | 1974 |
| | TA-9 | - | 1974 |
| | TA-10 | - | 1974 |
| | TD-0 | 110 | 2002 |
| | TD-1 | 3146 | 2002 |
| | TD-2 | 2080 | 2002 |
| | TD-3 | 3009 | 2002 |
| | TN-1 | 270 | 1947 |
| | TN-2 | 170 | 1947 |
| | TS-1 | 230 | 1947 |
| | TS-2 | 170 | 1947 |
| | T1 | 510 | 1998 |
| | T2 | 390 | 1998 |
| | T3 | 680 | 1998 |
| | Túnel | 250 | - |
| | Mata Fria | 250 | 1958 |
| | Quilombos | 940 | 1998 |
| | TI-0/TE-0 | 1710 | 2001 |
| | TI-1/TE-1 | 680 | 2001 |
| TI-2/TE-2 | 465 | 2001 | |

É importante observar que no novo milênio a demanda por obras subterrâneas vem crescendo ainda mais. Alguns túneis já foram inaugurados no final da década de 1990, a partir do ano de 2000 vários já foram inaugurados e muitos outros devem ser inaugurados em breve.

Na Tabela 2.6, elaborada a partir de informações obtidas junto ao Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), observa-se que vários túneis devem ser inaugurados no Brasil em um futuro próximo.

Tabela 2.6 – Túneis rodoviários e ferroviários sob a responsabilidade do DNIT.

| | UF | OBRA - VIA | FINALIDADE | SITUAÇÃO | EXTENSÃO | SEÇÃO |
|-----------------|----------------|----------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|---|---------------------|
| ESTUDOS | SC | Ferrovia do Frango (Leste-Oeste) | Ferroviário | Em fase de Estudo de Viabilidade | "em estudo" | "em estudo" |
| | | EF-116 e EF-499 | | | (96 túneis previstos, totalizando em 53.000 km de extensão) | |
| | RJ | Acesso Angra dos Reis | Rodoviário | Em fase de Estudo de Viabilidade | "em estudo" | "em estudo" |
| | | BR-101 | | | | |
| | MG | L03 – Prainha I | Rodoviário | Prestes a contratar Projeto | 600 m | ~120 m ² |
| | | BR-381/MG | | | | |
| | MG | L03 – Prainha II | Rodoviário | Prestes a contratar Projeto | 720 m | ~120 m ² |
| | | BR-381/MG | | | | |
| BA | São Félix | Ferroviário | Obra paralisada | "em estudo" | "em estudo" | |
| | EF-025 | | (Projeto em revisão) | | | |
| PROJETOS | SC | Morro Formigão | Rodoviário | Obra a iniciar | 500 m | 120 m ² |
| | | BR-101 | | (Projeto Aprovado) | | |
| | SC | Morro dos Cavalos | Rodoviário | Obra a iniciar | 2 x 1.440 m | ~120 m ² |
| | | BR-101 | | (Projeto em elaboração) | | |
| | PE | Variante Toritama | Rodoviário | Obra a iniciar | 360 m | 120 m ² |
| | | BR-104 | | (Projeto Aprovado) | | |
| | MG | Itaúna I | Ferroviário | Projeto em execução | m | 41 m ² |
| | EF-116 | | | | | |
| | MG | Itaúna II | Ferroviário | Projeto em execução | m | 41 m ² |
| | EF-116 | | | | | |
| MG | Divinópolis | Ferroviário | Obra a iniciar | 440 m | 41 m ² | |
| | EF-116 | | Licitação concluída | | | |
| MG | L03 – Ferrovia | Rodoviário | Estudo de viabilidade – túnel x corte | 2 x 290 m | ~120 m ² | |
| | BR-381/MG | | | | | |

| | | | | | | |
|--------------|----|-------------------------------------|------------|--|-------------|---------------------|
| | MG | L06 – Corte grande BR-381/MG | Rodoviário | Estudo de viabilidade – túnel x corte | 260 m | ~120 m ² |
| | MG | L09 – <i>vários</i> BR-381/MG | Rodoviário | Estudo de viabilidade – túnel x corte, estacas 85, 193, 350, 385 | | ~120 m ² |
| | MG | L10 – Santa Bárbara I BR-381/MG | Rodoviário | Prestes a contratar Projeto | 2 x 350 m | ~120 m ² |
| | MG | L10 – Santa Bárbara II BR-381/MG | Rodoviário | Prestes a contratar Projeto | 2 x 550 m | ~120 m ² |
| | MG | L10 – <i>vários</i> BR-381/MG | Rodoviário | Estudo de viabilidade – túnel x corte, estacas 700 e 785 | | ~120 m ² |
| | SC | Translitorânea EF-140 | Ferrovário | Projeto em execução | ~10,5 km | ~ 60 m ² |
| | SC | Morro Vieira BR-280 | Rodoviário | Obra a iniciar (Projeto em elaboração) | 2 x ~1,1 km | 120 m ² |
| OBRAS | RS | Morro Alto BR-101 | Rodoviário | Obra em execução | 2 x 1.840 m | 120 m ² |
| | SC | Morro Agudo BR-101 | Rodoviário | Obra em execução | 990 m | 120 m ² |
| | BA | Via Portuária BR-324 | Rodoviário | Obra a iniciar - contrato assinado | 2 x 130 m | 120 m ² |
| | CE | Transnordestina EF-232 | Ferrovário | Obra a iniciar (Projeto Aprovado) | 120 m | 50 m ² |

3. ESTUDOS E INVESTIGAÇÕES GEOTÉCNICAS

O planejamento, projeto e construção de um túnel rodoviário exige um amplo estudo e trabalho de investigações para obter um espectro pertinente de dados e informações, tais como, topográficas, geológicas, de subsolo, hidrogeológicas, estruturais e etc. Embora a maioria das técnicas e procedimentos sejam similares àquelas aplicadas para estradas e projetos de ponte, no âmbito específico das obras subterrâneas, os objetivos e focos das investigações são consideravelmente diferentes e podem variar significativamente com as condições geológicas e métodos de escavação.

Um programa de investigação geotécnica para um projeto tuneleiro deve utilizar os meios e métodos adequados para obter as informações necessárias para o planejamento, projeto e construção do túnel e de suas instalações auxiliares, para identificar os riscos potenciais da construção e para estabelecer uma realista estimativa de custo e cronograma.

A extensão da investigação deve ser coerente com o escopo do projeto (localização, dimensão e orçamento), os objetivos do projeto (tolerância ao risco e desempenho a longo prazo), e as restrições do projeto (geometria, construção, os impactos de terceiros, estética e impacto ambiental). É importante que as partes envolvidas tenham um entendimento comum das bases geotécnicas para o projeto, e que todos estejam conscientes do inevitável risco de não se poder definir completamente as condições existentes do subsolo ou prever totalmente o comportamento do solo durante a escavação.

De acordo com o FHWA (2009), um programa de investigação para o planejamento e concepção de um projeto de túnel (rodoviário) poderá incluir a seguintes componentes:

- ✓ Coleta das informações existentes;
- ✓ Pesquisas e reconhecimento do local das obras;
- ✓ Mapeamento geológico;
- ✓ Investigações do subsolo;

- ✓ Estudos ambientais;
- ✓ Pesquisas sobre atividades tectônicas da região;
- ✓ Gestão de dados geoespaciais.

Em meio ao elevado custo de um programa de investigação geotécnica completo para um projeto de um túnel viário (geralmente cerca de 3% a 5% do custo de construção), é mais eficiente realizar investigações geotécnicas em fases para concentrar os esforços nas áreas e profundidades que são importantes. Especialmente para um túnel rodoviário através de terreno montanhoso ou abaixo do lençol freático, o alto custo, a longa duração, o acesso limitado e a cobertura limitada das investigações de campo podem exigir que os estudos sejam realizados em várias fases, com o intuito de se obter as informações necessárias em cada estágio do projeto de maneira mais eficiente ao menor custo.

Além disso, não é incomum levar-se várias décadas para um projeto de túnel ser conceituado, desenvolvido, projetado e eventualmente construído. Assim, as fases típicas de projeto de túnel, desde a concepção até a conclusão são basicamente:

- ✓ Planejamento;
- ✓ Estudos de alternativas e viabilidade dos diversos traçados;
- ✓ Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e desenvolvimento do anteprojeto;
- ✓ Projeto Preliminar;
- ✓ Projeto Básico;
- ✓ Projeto Executivo; e
- ✓ Construção.

Ao longo do desenvolvimento do projeto, o alinhamento final do túnel e o perfil longitudinal podem muitas vezes se afastar dos inicialmente previstos. As investigações geotécnicas podem oferecer informações preciosas para a execução destas alterações de projeto.

As investigações iniciais para o planejamento e estudos de viabilidade podem ser resumidas aos estudos de informações e reconhecimento preliminar. Mapeamento geológico e as mínimas investigações preliminares de subsolo são tipicamente necessários para o EIA, estudos de alternativas e concepção de projeto. O EIA também pode incluir limitadas investigações topográficas e ambientais para identificar potenciais "falhas fatais", o que pode levar à paralisação dos projetos em uma data posterior. Uma parcela substancial dos esforços

de investigação geotécnica deve ir para a fase de projeto preliminar para refinar o alinhamento do túnel e o perfil uma vez que traçado geral é selecionado, e fornecer as informações detalhadas necessárias para o projeto. Como o projeto final progride, testes adicionais com perfurações podem ser necessários para a cobertura completa do traçado final e para os locais onde serão instalados os portais.

No Brasil, o Capítulo 12 da Norma NBR 8044 (ABNT, 1983) aborda os estudos geotécnicos que devem ser realizados para um projeto de túnel em solo ou em rocha. Trata-se de um documento de relevante importância para profissionais que atuam no ramo por ser um raro regulamento para obras subterrâneas, mas é uma Norma que necessita de atualizações, pois desde a sua elaboração já houve muitos progressos tecnológicos, que contribuem sobremaneira para a realização de estudos e investigações geológico-geotécnicas.

Mesmo estando desatualizada e apresentando um conteúdo bem generalizado, essa Norma possui uma interessante divisão dos estudos e investigações, mostrando resultados que devem ser encontrados em cada etapa de projeto, desde estudos de viabilidade até o projeto executivo.

3.1. ESTUDOS INICIAIS

3.1.1 COLETA DE INFORMAÇÕES DISPONÍVEIS

A primeira fase de um programa de investigação para um projeto de túnel começa com a coleta e análise de informações disponíveis para desenvolver uma compreensão global das condições do local e com poucas restrições de custo. Os dados existentes podem ajudar a identificar as condições existentes e as características que podem afetar o projeto e a construção do túnel proposto, também pode orientar no planejamento do escopo e detalhes do programa de investigação do subsolo.

Publicações topográficas, hidrológicas, geológicas, geotécnicas, ambientais, de zoneamento e outras informações devem ser recolhidas, organizadas e avaliadas. Em áreas onde a condição sísmica pode governar ou influenciar o projeto, os registros sísmicos históricos são utilizados para avaliar os riscos de terremotos. Os registros de deslizamentos de terra provocados por terremotos podem ser úteis para evitar destinar portais do túnel e poços nessas áreas potencialmente instáveis.

Além disso, relatos de casos de obras subterrâneas na região são, por vezes, disponíveis através de rodovia, ferrovia e túneis de água que já foram executados. Outras fontes de informações locais podem incluir pedreiras nas proximidades, minas e poços de água, publicações da universidade também podem fornecer informações úteis.

Atualmente, os dados existentes são frequentemente disponibilizados eletronicamente, tornando-os mais fáceis de acessar e gerenciar. A maioria das informações existentes, tais como fotografias aéreas, mapas topográficos etc, pode ser obtida em formato GIS com baixo ou nenhum custo. Diversos órgãos estaduais estão desenvolvendo sistemas de gestão geotécnica (GMS). Uma visão integrada de projetos geo-referenciados (geoespacial) em breve se tornará essencial no início do projeto e durante a construção para armazenar e gerenciar estes dados extensivos, em vez de registros em papel. Tal sistema de gestão eletrônica de dados após a conclusão do projeto continuará a ser benéfico para a operação e manutenção.

3.1.2 FOTOGRAFIA AÉREA

Mapas topográficos e fotografias aéreas atualmente podem ser facilmente obtidos e são úteis para mostrar o terreno e as características geológicas (falhas, canais de drenagem, buracos). Quando sobrepostos com mapas geológicos podem, muitas vezes, por interpretação, mostrar estruturas geológicas. Fotografias aéreas tiradas em datas diferentes podem revelar a história do local em termos de terraplenagem, erosão e construções executadas.

Um levantamento preliminar será necessário para o desenvolvimento do conceito e projeto preliminar para expandir dados topográficos existentes e incluir dados de levantamentos de campo e um reconhecimento do local inicial. Os estudos iniciais no local devem começar com um reconhecimento cuidadoso sobre o traçado do túnel, com especial atenção para o portal e poços. Características identificadas nos mapas e fotografias aéreas deverão ser verificadas. Afloramentos rochosos, frequentemente expostos em cortes de rodovias e estradas de ferro, fornecem uma fonte de informação sobre fraturas do maciço rochoso e a localização dos limites do tipo de rocha, falhas, diques e outras características geológicas. Características identificadas durante o reconhecimento do local devem ser fotografadas, documentadas e, se possível, locadas manualmente através de equipamento GPS.

3.1.3 MAPEAMENTO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO

Após a coleta e análise de mapas geológicos existentes, fotografias aéreas, as referências e os resultados de um reconhecimento do local preliminar, o mapeamento geológico superficial de afloramentos rochosos disponíveis deve ser realizado por um geólogo de engenharia experiente para obter informações detalhadas sobre o local específico a respeito da qualidade da rocha e estrutura. Segundo o FHWA (2009), o mapeamento geológico local, dados geológicos detalhados de forma sistemática, é usado para caracterizar e documentar a condição do maciço rochoso ou afloramento para a classificação do maciço rochoso, tais como:

- ✓ Tipo de descontinuidade;
- ✓ Orientação da descontinuidade;
- ✓ Preenchimento da descontinuidade;
- ✓ Espaçamento da descontinuidade;
- ✓ Persistência da descontinuidade; e
- ✓ Intemperismo.

A ISRM (1981) sugeriu medidas quantitativas para descrever as descontinuidades do maciço rochoso (ISRM, 1981). Ele fornece descrições padrões para fatores como persistência, rugosidade, espessura de parede, abertura, enchimento, escoamento e tamanho do bloco.

Ao interpretar e extrapolar todos estes dados, o geólogo deve ter uma melhor compreensão das condições da rocha que possam estar presentes ao longo do túnel proposto, no portal e nas escavações dos shafts. Os mapeamentos de dados coletados podem ser usados em projeções estereográfica para análise estatística usando-se um software de computador adequado, além de dados obtidos a partir de investigações do subsolo.

Além disso, as características da superfície a seguir devem ser observadas e documentadas durante a execução do mapeamento geológico:

- ✓ Deslizamentos, particularmente em áreas propostas para o portal e o para o eixo;
- ✓ Falhas, intemperismo, depressões e terrenos cársticos;
- ✓ Intemperismo da rocha;
- ✓ Escadouros e terrenos cársticos;

- ✓ Nascentes, águas termais e gás;
- ✓ Atividade vulcânica;
- ✓ Rachaduras de alívio de tensão;
- ✓ Presença de pedregulhos;

Os dados do mapeamento geológico também contribuirão para a orientação das perfurações de investigação do subsolo e ensaios *in situ* em áreas de interesse (portais, poços, zonas de falhas etc).

3.1.4 MEIO AMBIENTE

Embora os túneis sejam geralmente considerados estruturas ambientalmente corretas, alguns impactos ambientais durante a construção são inevitáveis. Impactos a longo prazo a partir do próprio túnel e dos portais, poços de ventilação e abordagens sobre as comunidades locais, sítios históricos, zonas úmidas, e outras áreas estéticas, ambientais e ecologicamente sensíveis devem ser identificadas e investigadas cuidadosamente durante o planejamento do projeto e a fase de viabilidade, e devidamente abordada nos estudos ambientais e projeto executivo. Investigação e soluções de questões ambientais é um objetivo essencial para qualquer projeto de obras subterrâneas, afinal condições inesperadas descobertas tardiamente durante o projeto ou construção podem comprometer o empreendimento.

Os dados ambientais específicos necessários para um projeto de obra subterrânea dependem muito do ambiente geológico e geográfico e das exigências funcionais das instalações subterrâneas. Alguns problemas comuns estão identificados abaixo:

- ✓ Infraestruturas existentes e interferências no subsolo;
- ✓ Estruturas da superfície na área de influência;
- ✓ Proprietários da terra local e usos (públicos e privados);
- ✓ Impactos nos ecossistemas;
- ✓ Contaminação do solo e/ou das águas subterrâneas;
- ✓ Impacto, a longo prazo, nos lençóis freáticos, aquíferos e na qualidade da água;
- ✓ Controle do escoamento e da erosão durante a construção;
- ✓ Solos naturalmente gasosos, ou com dejetos químicos nas águas subterrâneas;

- ✓ Restrições de acesso para áreas de trabalho e vias de transporte;
- ✓ Áreas de bota-fora;
- ✓ Ruído e vibrações das operações de construção e do tráfego futuro;
- ✓ Qualidade do ar durante a construção;
- ✓ Manutenção de tráfego de veículos durante a construção;
- ✓ Manutenção de serviços públicos e outras instalações existentes durante a construção;
- ✓ Acesso a propriedades residenciais e comerciais;
- ✓ Controle de pragas durante a construção;
- ✓ Impactos na comunidade a longo prazo;
- ✓ Impactos do tráfego a longo prazo;
- ✓ Caminhos de serviço temporários e permanentes;
- ✓ Segurança contra incêndio nos túneis;
- ✓ Restrições legais e ambientais.

3.1.5 SISTEMA DE GESTÃO DE DADOS GEOESPACIAIS

O Sistema de Informação Geográfica (SIG) é projetado para gerenciar uma grande quantidade de dados em um complexo ambiente, e é uma ótima ferramenta para a tomada de decisões, planejamento, projeto, construção e programa de gestão. O SIG aceita todos os tipos de dados, tais como digital, texto, gráficos, quadros, imagens etc, e organizar esses dados em uma série de camadas inter-relacionadas para pronta recuperação. As informações armazenadas no sistema podem ser seletivamente recuperadas, em comparação, sobrepostas em outros dados, compostas com várias camadas de outros dados, atualizadas, removidas, revistas, plotadas, transmitidas etc.

O georreferenciamento pode fornecer um meio para entrar e recuperar rapidamente uma ampla gama de informações de utilidade, incluindo a sua localização, altitude, tipo, tamanho, data da construção e reparação, de propriedade, direito de passagem etc. Estas informações são armazenadas em camadas dedicadas aos dados, e podem ser facilmente acessadas para mostrar e imprimir informações técnicas ou demográficas.

Informações típicas que poderiam ser inseridas em um banco de dados SIG para um projeto de túnel podem incluir:

- ✓ Redes de rua;
- ✓ Dados topográficos;
- ✓ Linhas de propriedade;
- ✓ Limites da faixa de domínio;
- ✓ Construções locais existentes, tipo de construção, alturas, elevações, o estado da construção etc;
- ✓ Traçado do túnel proposto e informações do perfil;
- ✓ Fundações abandonadas e outras interferências subterrâneas;
- ✓ Alinhamento e elevações existentes para os túneis;
- ✓ Estruturas propostas, incluindo os portais, eixos, rampas, edifícios etc;
- ✓ Layout da linha de utilidade e altitudes, locais e profundidades da abóbada;
- ✓ Informações de sondagens e outras informações da investigação do subsolo;
- ✓ Dados geofísicos;
- ✓ Informações da superfície de várias camadas de solo e rocha;
- ✓ Áreas de lençol freático ou solo contaminado.

Dependendo da situação a que se está exposta, outros dados podem ser inseridos para o monitoramento e acompanhamento do empreendimento. Afinal, os dados geo-referenciados podem ser o mais completo possível, pois pode-se selecionar a visualização apenas dos itens de interesse.

3.2. INVESTIGAÇÕES DE CAMPO

3.2.1 INVESTIGAÇÕES DO SUBSOLO

As condições do solo, incluindo as condições geológicas, geotécnicas e hidrológicas, têm um impacto importante sobre o planejamento, concepção, construção e custo de um túnel rodoviário, e normalmente determina a sua viabilidade e o seu traçado

final. Fundamentalmente, a investigação do subsolo é o tipo mais importante de investigações para a obtenção das condições do solo, pois é o principal meio de:

- ✓ Definir o perfil do subsolo (estratigrafia, estrutura e principais tipos de solo e de rocha);

- ✓ Determinação do solo e as propriedades do material da rocha e as características de massa;

Identificar anomalias geológicas, zonas de falhas e outros perigos (solos expansivos, gás metano);

- ✓ Definir condições hidrogeológicas (níveis freáticos, aquíferos, a pressão hidrostática);

- ✓ Identificar os riscos potenciais de construção (pedras).

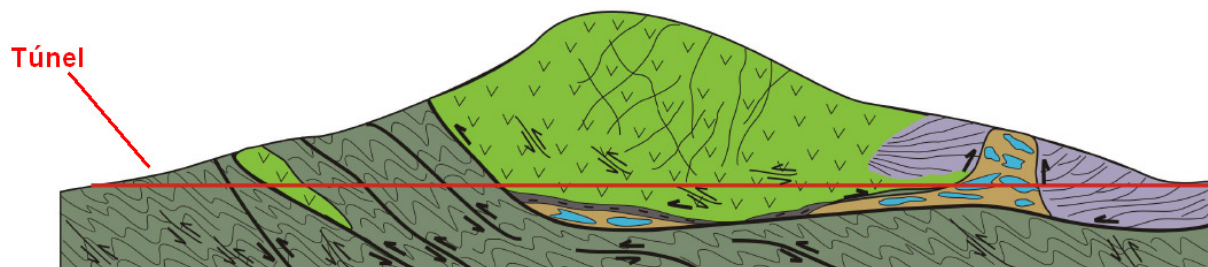


Figura 3.1 – Modelo geológico esquemático (modificado – Gorick, 2006)

Investigações de subsolo tipicamente consistem de sondagens, amostragem, ensaios *in situ*, investigações geofísicas e ensaios de materiais em laboratório. Os objetivos principais dessas técnicas de investigação estão resumidos abaixo:

- ✓ Sondagens são usadas para identificar a estratigrafia do subsolo, e para obter amostras deformadas e indeformadas para a classificação visual e ensaios laboratoriais;

- ✓ Ensaios *in situ* são comumente utilizados para a obtenção de propriedades e índices testando o material no local, a fim de evitar a perturbação causada, inevitavelmente, por amostragem, transporte e manipulação de amostras obtidas a partir de furos. Ensaios *in situ* também podem auxiliar na definição de estratigrafia;

- ✓ Ensaios geofísicos rapidamente e economicamente obtém informações de subsolo (estratigrafia e características gerais de engenharia) sobre uma grande área para ajudar a definir a estratigrafia e identificar locais adequados para realização de sondagens; e

✓ Ensaios de laboratório fornecem uma ampla variedade de propriedades de engenharia e índices através de amostras de solo e rochas representativas recuperadas das perfurações.

Ao contrário de outras estruturas de rodovia, o solo ao redor de um túnel pode funcionar como um mecanismo de suporte, mecanismo de carga, ou ambos, dependendo da natureza do terreno, do tamanho, método e seqüência de construção do túnel. Assim, para os projetistas do túnel e empreiteiros, a rocha ou solo em torno de um túnel é um material de construção, tão importante quanto o concreto e o aço utilizados no trabalho.

Uma vez que as condições do solo são as mais inesperadas, muitas vezes a razão para atrasos onerosos, reclamações e disputas durante a construção do túnel, um projeto com um programa mais completo de investigação de subsolo, provavelmente tem menos problemas e reduz o custo final. Portanto, idealmente, a extensão de um programa de exploração deve ser baseada em requisitos específicos do projeto e complexidade, ao invés de limites orçamentários rigorosos. No entanto, para a maioria dos túneis rodoviários, especialmente túneis em zonas montanhosas ou de travessias de água, o custo de um programa de investigação do subsolo global pode ser proibitivo. O desafio para os profissionais geotécnicos é desenvolver um programa de investigação adequado do subsolo que pode melhorar a previsibilidade das condições do solo dentro de um orçamento razoável e nível de risco aceitável.

3.2.2 SONDAGENS

As perfurações verticais, ligeiramente inclinadas e as respectivas amostras de solo e de rocha são elementos-chave de quaisquer investigações do subsolo para projetos subterrâneos. A localização, profundidade, tipos de amostras e intervalos entre cada sondagem devem ser selecionados para atender às necessidades específicas do projeto, configuração topográfica e as condições geológicas inicialmente previstas. Diversas técnicas de ensaio de campo também podem ser realizadas em conjunto com as sondagens.

A Tabela 3.1 apresenta o espaçamento sugerido entre sondagens em virtude do tipo de escavação e das condições previstas para o subsolo (rocha, solo etc) a ser atravessado. Contudo, o custo e o prazo de execução são importantes aspectos que governarão o planejamento de uma campanha de sondagens, especialmente em caso de túneis longos escavados através de extensas e elevadas cadeias montanhosas, aqueles projetados para cruzar profundos corpos d'água (lagos, rios, mares) e as obras subterrâneas em centros urbanos densamente ocupados.

Tabela 3.1 – Espaçamento sugerido entre sondagens em função do tipo de escavação e das condições previstas para o subsolo a ser atravessado (FHWA, 2009).

| Tipo de Execução | Condições do Subsolo | Espaçamento entre Sondagens (m) |
|---|-----------------------------|--|
| Cut-and-Cover (Falso Túnel) | - | 30 a 90 |
| Escavação em rocha | Adversa | 15 a 60 |
| | Favorável | 150 a 300 |
| Escavação em solo | Adversa | 15 a 30 |
| | Favorável | 90 a 150 |
| Escavação em terreno misto (rocha/solo) | Adversa | 7 a 15 |
| | Favorável | 15 a 20 |

Em geral, as sondagens devem necessariamente contemplar um comprimento igual ou superior a 1,5 diâmetros da obra subterrânea (ou sua maior dimensão) abaixo de sua seção transversal (piso ou arco invertido).

Assim, o projetista deverá considerar que as sondagens poderão ter um comprimento igual ou superior a 2,0 a 3,0 diâmetros abaixo da seção transversal em consequência dos usuais ajustes no traçado e elevação realizados entre as fases de anteprojeto e projeto executivo.

As perfurações horizontais ao longo do traçado do túnel podem fornecer um registro contínuo das condições do solo e informações que são diretamente relevantes para o traçado. Embora as perfurações horizontais apresentem um custo por metro linear muito maior do que sondagem convencional (vertical/inclinada), uma sondagem horizontal pode até ser mais econômica, especialmente para investigar um túnel localizado em um terreno montanhoso, uma vez que a sondagem horizontal pode substituir muitos poços verticais convencionais e evitar a desnecessária perfuração de materiais sobrecarregados e interrupção das atividades da superfície do terreno (comunitárias e industriais).

A Figuras 3.2 apresenta a utilização de sondagem vertical e horizontal, respectivamente.



(a)



(b)

Figura 3.2 – Atividades de investigação do subsolo, onde em (a) se apresenta uma sondagem vertical e em (b) sondagem horizontal (FHWA, 2009).

O volume de sondagens requeridas para a elaboração de um projeto de túnel rodoviário irá variar para cada tipo de obra, de acordo com a qualidade do maciço rochoso deparado, o que torna impossível a padronização do valor do volume ou quantidade de sondagens que deverão ser executadas.

Vaz (1999) sugere que a quantidade de investigação a ser desenvolvida numa obra subterrânea depende dos seguintes aspectos:

- ✓ Grau de complexidade das condições geológicas locais;
- ✓ Presença de feições geológicas potencialmente críticas tais como falhas e contatos; e
- ✓ Potencial de risco em caso de acidente.

Oliveira (1986) menciona que o comprimento das sondagens executadas deve ser aproximadamente igual ao comprimento do túnel para túneis com menos de 5 km de extensão, diminuindo progressivamente até um limite inferior de 50% do comprimento do túnel para obras muito longas.

As normas do U.S National Committee on Tunnelling Technology de 1985 são mais exigentes, estabelecendo um comprimento de sondagens equivalente a 1,5 vezes o comprimento do túnel.

Nagel (1992) considera que os custos das investigações devem ser relacionados ao custo das contingências do orçamento da obra, ou seja, à possível variação do custo dependa das condições geológicas, estabelecendo o valor a ser despendido em investigações em torno de 20% das contingências.

Nieble (1985) indica que, em relação ao custo da obra, o valor despendido com investigações deve situar-se entre 1 a 3%.

Como orientação, Vaz (1999) estima a metragem de sondagens para a investigação de túneis aplicando as seguintes fórmulas:

$$\text{Emboque:} \quad E = \frac{2d}{g} \quad (3.1)$$

$$\text{Túnel:} \quad E = \frac{e c r}{g} \quad (3.2)$$

Onde, E = comprimento das sondagens no emboque;

T = Comprimento das sondagens no trecho em túnel;

d = extensão ao longo do túnel com cobertura inferior a 5 diâmetros da escavação;

g = grau de complexidade geológica, variável de 0,4 para alta complexidade e 1,0 para baixa complexidade;

e = extensão do túnel, em metros;

c = cobertura ao longo do túnel, variável de 0,5 para alta cobertura (acima de 3 diâmetros) até 0,7 para baixa cobertura (menos de 3 diâmetros da escavação);

r = grau de risco de acidentes com terceiros induzido pela escavação, variável de 1,0 para baixo risco a 2,0 para alto risco;

O plano de sondagem a ser adotado deverá ser elaborado em função da complexidade da geologia local e do risco induzido pela construção do túnel, por isso cronogramas apertados devem ser evitados.

Mesmo com todos os cuidados e precauções, a parcela final da interpretação das condições geológicas deverá ser feita à medida que a escavação progride.

3.2.3 IDENTIFICAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS E ROCHAS

É importante fazer a distinção entre identificação visual e classificação para minimizar os conflitos entre a identificação visual geral das amostras de solo no campo e avaliações mais precisas de laboratório. A identificação visual no campo é muitas vezes submetida a elementos externos que podem influenciar os resultados. É importante enviar as amostras de solo para a análise de um geólogo ou um técnico experiente em trabalho com solos, com isso será possível fornecer informações para futuros ensaios e desenvolvimento do perfil geológico do subsolo.

A classificação do solo em campo para um projeto do túnel é semelhante ao de outros aplicativos geotécnicos, exceto quanto a atenção especial deve ser dada à precisão na definição e documentação características do tamanho dos grãos do solo e de estratificação, uma vez que essas propriedades podem ter maior influência sobre o comportamento do solo e das águas subterrâneas durante a construção do túnel que em outros tipos de construção, como para as fundações, aterros e cortes. Itens de particular importância para projetos de túneis estão listados abaixo:

- ✓ Os níveis das águas subterrâneas, evidências da permeabilidade do solo e condições artesianas;
- ✓ Consistência e resistência dos solos coesivos;
- ✓ Composição, graduação e densidade do solo coesivo;
- ✓ Presença de lentes e camadas de alta permeabilidade;
- ✓ Presença de cascalho, seixos e pedregulhos;
- ✓ Tamanho máximo do grão retirado do núcleo e a resistência à compressão simples de pedregulhos (a partir de ensaios de campo e análises laboratoriais de amostras recuperadas);
- ✓ Presença de solos cimentados;
- ✓ Presença de solos ou águas subterrâneas contaminadas.

Todos os pontos acima influenciam bastante o comportamento do solo durante a construção e na seleção dos equipamentos e métodos de escavação do túnel.

As características do maciço rochoso e das discontinuidades normalmente têm uma influência muito maior no comportamento do solo durante a escavação e no carregamento do túnel do que as propriedades da rocha intacta. Portanto, a classificação deve ser focada nas características do maciço rochoso, bem como sua origem e propriedades intactas para aplicação típica em fundações de estradas. Propriedades da rocha intacta são importantes para a seleção das máquinas de perfuração de túneis (TBM) e outros tipos de escavadeiras, e para prever o desgaste do equipamento.

Itens tipicamente incluídos na descrição da litologia rochosa em geral:

- ✓ Tipo de rocha predominante;
- ✓ Cor;
- ✓ Tamanho e forma do grão;
- ✓ A textura (estratificação, foliação etc);
- ✓ A composição mineral;
- ✓ Dureza;
- ✓ Abrasão;
- ✓ Força;
- ✓ Intemperismo e alteração.

As descrições das discontinuidades no maciço rochoso normalmente incluem:

- ✓ Orientações das discontinuidades predominantes;
- ✓ Rugosidade;
- ✓ Persistência;
- ✓ Espaçamento;
- ✓ Intemperismo e preenchimento.

Outras informações tipicamente observadas durante as investigações do subsolo são:

- ✓ Presença de falhas ou zonas de cisalhamento;
- ✓ Presença de material intrusivo (materiais vulcânicos);

- ✓ Presença de vazios;
- ✓ Nível da água subterrânea, e as evidências de permeabilidade no maciço rochoso.

Muitas vezes, os materiais encontrados durante as investigações do subsolo representam um material de transição (material intermediário) formado pelo Intemperismo local das rochas. Essas condições podem, por vezes, apresentar uma condição complexa, sem limites claros entre os diferentes materiais encontrados. A escavação através de material intermediário pode ser extremamente difícil, especialmente na presença de águas subterrâneas. Nas áreas em que o traçado do túnel deve atravessar essa zona de transição, a investigação do subsolo é conduzida pela rocha, e quando possível amostras são recuperadas e classificadas.

3.2.4 TÉCNICAS DE INVESTIGAÇÃO

As investigações do subsolo incluem duas categorias de ensaios: *in situ* e geofísicos. Ensaios *in situ* são usados para obter, diretamente de medições de campo, propriedades de engenharia. Ensaios geofísicos são métodos indiretos de prospecção, onde mudanças em algumas características físicas, tais como magnetismo, densidade, resistividade elétrica, elasticidade, ou uma combinação destas são utilizadas como auxílio no desenvolvimento de informações do subsolo. Algumas vezes as duas técnicas de ensaio podem ser realizadas a partir de um mesmo aparelho, como por exemplo a CPT sísmica.

3.2.4.1 ENSAIOS *IN SITU*

Em solos, ensaios *in situ* incluem tanto estudos de índices, como o Standard Penetration Test (SPT) como ensaios que determinam as propriedades físicas do solo, como a resistência ao cisalhamento e de penetração de cone (CPT) e as propriedades de deformação do solo a partir de ensaios pressiométricos (PMT). A Tabela 3.2 resume as aplicações dos ensaios *in situ* comumente empregados.

Tabela 3.2 – Ensaios *in situ* para solos (modificado - FHWA, 2009).

| ENSAIO | TIPOS DE SOLOS | PROPRIEDADES |
|-------------------------------------|--|---|
| CPT (piezocone) | siltoso, arenoso, argiloso e turfa. | Estima a estratigrafia do solo. |
| | | Areias: ϕ , D_r , σ_{ho}' Argila: σ_u , σ_p' |
| CPTu (Piezocone com poropressão) | siltoso, arenoso, argiloso e turfa. | Idêntico ao CPT, adicionando: |
| | | Areias: u_0 Argila: c_h , k_h e OCR |
| SCPTu (Piezocone sísmico) | siltoso, arenoso, argiloso e turfa. | Idêntico ao CPTu, adicionando: |
| | | V_s , G_{max} , E_{max} , e_0 |
| DMT (Dilatômetro) | siltoso, arenoso, argiloso e turfa. | Estima a estratigrafia do solo. |
| | | Areias: ϕ , D_r , m_v , E Argila: σ_p' , K_0 , s_u , m_v , E , c_h , k_h |
| PMT (Pressiômetro) | siltoso, argiloso e turfa (arenosos, em alguns casos, apesar de não ser muito indicado). | E , G , m_v , σ_u |
| VST (Vane Shear Test) | argiloso (siltoso e turfa, em condições não drenadas). | σ_u , σ_p' , σ_t |

Ensaios *in situ* normalmente utilizados em rocha para aplicações em túnel estão listados na Tabela 3.3. Uma propriedade importante da rocha é o seu estado de tensão. Tensões horizontais de origem geológica estão normalmente confinadas no interior dos maciços rochosos, resultando em uma razão de tensões (K), muitas vezes superior ao número previsto pela teoria da elasticidade. Dependendo do tamanho e orientação da escavação de túneis, altas tensões horizontais podem produzir compressão favorável de suporte e de confinamento, ou induzir falhas durante e depois da escavação. Salienta-se que tensões *in situ* só podem ser medidas com maior precisão em rochas que apresentem melhores condições. No entanto, apesar de rochas mais fracas serem incapazes de suportar grandes diferenças de tensões desviatórias, as tensões lateral e vertical tendem a se igualar ao longo do tempo geológico.

Tabela 3.3 – Ensaio *in situ* para rochas (modificado - FHWA, 2009).

| PARÂMETRO | MÉTODO DE ENSAIO |
|----------------------------|--|
| Tensão | Faturamento hidráulico Overcoring Drills Flat Jack |
| Módulo de Deformação | Plate bearing Dilatométrico Flat Jack Radial Jacking Test Pressiométrico Medições Dinâmicas |
| Permeabilidade | Slug Test Packer Test Pumping Test |
| Imagens e Descontinuidades | Ultra-som Sondagens de Vídeo |

3.2.4.2 ENSAIOS GEOFÍSICOS

Métodos geofísicos proporcionam um meio rápido e econômico de informação complementar obtido por métodos diretos de exploração, tais como, furos, poços de sondagem e ensaios *in situ*, identificando anomalias locais que não puderam ser identificados por outros métodos de investigação e definir os limites entre os estratos fornecendo uma previsão realista do perfil geológico do subsolo. Os usos típicos de ensaios geofísicos incluem a determinação do topo rochoso, a profundidade das águas subterrâneas, os limites de depósitos orgânicos, a presença de vazios, a localização e profundidade de interferências, a localização e profundidade das fundações existentes e a localização e profundidade dos outros obstáculos. Ensaio geofísico também podem pesquisar a rigidez e as propriedades dinâmicas e podem ser realizados na superfície, em poços ou na frente do TBM durante a construção. As aplicações típicas para os ensaios geofísicos são apresentadas na Tabela 3.4. A Tabela 3.5 sintetiza os procedimentos utilizados para realizar estes ensaios geofísicos, e as suas respectivas limitações.

Tabela 3.4 – Técnicas de investigação geofísica (modificado - FHWA, 2009).

| CONDIÇÕES GEOLÓGICAS A INVESTIGAR | TÉCNICA DE INVESTIGAÇÃO | |
|---|---|------------------------------|
| | SUPERFÍCIE | SUBSOLO |
| Estratificação do solo (espessura e profundidade das camadas) | Refração sísmica | Propagação de ondas sísmicas |
| Profundidade da rocha-sã | Refração sísmica Resistência elétrica Geo-radar | Propagação de ondas sísmicas |
| Profundidade do lençol freático | Refração sísmica Resistência elétrica Geo-radar | |
| Localização de zonas de falhas ou fraturas | Resistência elétrica | Sondagem com câmara de TV |
| Topografia da rocha-sã | Refração sísmica Sondagem gravimétrica | |
| Localização de intrusões | Refração sísmica Sondagem gravimétrica Sondagem magnética | |
| Cavidades | Resistência elétrica Georadar Sondagem gravimétrica | Sondagem com câmara de TV |
| Localizações isoladas de materiais orgânicos e granulares | Resistência elétrica | Propagação de onda sísmica |
| Permeabilidade da rocha e camadas de solos | Resistência elétrica | Propagação de onda sísmica |
| Mudanças na litologia da rocha ou das camadas de solos | Refração sísmica Resistência elétrica | |

Tabela 3.5 – Procedimentos de ensaios geofísicos (FHWA, 2009).

| MÉTODO | PROCEDIMENTO | OBSERVAÇÕES |
|------------------|--|--|
| Refração Sísmica | <p>Detectores (geofones) são posicionados na superfície do solo em distâncias determinadas da fonte de impulsos sísmicos, também posicionada na superfície. Registra-se o tempo em que cada geofone capta os impulsos.</p> | <p>A distância entre o geofone mais próximo e o mais distante deve ser entre 3 a 4 vezes a profundidade a ser investigada. Algumas condições podem afetar a interpretação: reflexão em camadas mais duras podem ser confundidas com camadas mais profundas, contraste de densidade insuficiente entre camadas, topografia de superfície irregular, presença de camadas de baixa densidade.</p> |

| | | | |
|----------------------------|----------------------|--|--|
| | | Impulsos são aplicados a partir de um ponto que emite e recebe ondas. Registra-se e analisa-se o tempo em que a onda sísmica é emitida e recebida. | A posição e direção do ponto de impulso deve ser adequadamente determinada, utilizando-se GPS ou instrumento equivalente. Reflexão de camadas duras podem dificultar a identificação de camadas profundas. |
| | | Quatro eletrodos são posicionados em linha e equidistante. Uma corrente de baixa magnitude atravessa os eletrodos externos e a queda de potencial é medida pelos eletrodos internos. O espaçamento entre eletrodos varia, o que possibilita melhor definição de variações nas camadas do solo. | O resultado pode ser influenciado por interferências existentes no subsolo (tubulações, tanques etc). |
| Propagação de Onda Sísmica | Cross-Hole | Pelo menos dois furos de sondagem devem ser executados: uma perfuração onde os impulsos sísmicos são gerados e uma perfuração para receber os sinais, onde um geofone registra compressões geradas e ondas cisalhantes. Mais furos de sondagem podem ser executados para melhorar a performance das medidas. | Deve-se utilizar inclinômetro em sondagens com profundidade maior que 10 m para se determinar a distância de viagem entre as perfurações. |
| | Up-Hole or Down-Hole | Realizada em apenas uma perfuração. No método Up-Hole um sensor é posicionado na superfície e ondas cisalhantes são geradas em várias profundidades. No método Down-Hole, geram-se ondas sísmicas na superfície e um ou mais sensores são posicionados ao longo da perfuração. | Os dados obtidos limitam-se à área adjacente ao furo de sondagem. |
| | Sísmica Paralela | Utilizada para determinar a profundidade de fundações existentes. Um impulso de onda é gerado no topo da fundação e um sensor posicionado em um furo de sondagem adjacente registra as ondas de tensões que chegam em profundidades determinadas. | Requer o acesso ao topo da fundação, o que muitas vezes não é possível. |

| | | |
|--------------|---|---|
| Geo-radar | Impulsos eletromagnéticos são gerados na superfície e o tempo em que sua reflexão é registrada é analisada. | A presença de uma camada de argila pode mascarar as características abaixo desta camada. |
| Gravimétrico | Gravímetros são posicionados na superfície para avaliar as variações do campo gravitacional local, causadas por mudanças de densidade do material existente ou por cavidades presentes. | Podem não identificar pequenas variações de densidade. Podem ser influenciados por características da superfície ou subsolo das proximidades (montanhas, cavidades, vales). |
| Magnético | Equipamentos (magnetômetros) registram a mudança do campo magnético ao longo de uma determinada linha de pesquisa. | Correções devem ser feitas para apurar a variação diurna do campo magnético. |

3.3. INVESTIGAÇÕES COMPLEMENTARES DURANTE A CONSTRUÇÃO DO TÚNEL

Em projetos de túneis geralmente é essencial realizar investigações complementares de subsolo e da caracterização do terreno (solo ou rocha) durante a construção. Esta fase de investigações de construção fornece informações importantes para:

- ✓ Projetista e construtores de estruturas temporárias;
- ✓ Definição de anomalias e de imprevistos identificados após o início da construção;
- ✓ Registro das condições de solo existente para comparação com as condições de referência estabelecidas inicialmente, assim formando a base para qualquer ajuste de custo devido às diferentes condições locais;
- ✓ Avaliar as condições do terreno e das águas subterrâneas no avanço do túnel no sentido de reduzir os riscos e melhorar a eficiência das operações de escavação;
- ✓ Ajuste do sistema de suporte e apoio inicial a ser instalado, e os locais onde o sistema de apoio pode ser alterado;
- ✓ Avaliar a resposta do solo, das estruturas existentes e instalações para operações de escavação;
- ✓ Avaliar a resposta do lençol freático para as operações de escavação e rebaixamento;
- ✓ Determinar a localização e profundidade das interferências existentes e outras instalações subterrâneas.

Um programa típico de investigação em fase de construção deve incluir alguns ou todos os seguintes elementos:

- ✓ Sondagens do subsolo a partir da superfície do solo;
- ✓ Observação do comportamento do lençol freático, por meio de poços e piezômetros;
- ✓ Ensaios laboratoriais complementares de amostras de solo e rocha;
- ✓ Mapeamento geológico das faces expostas do túnel;
- ✓ Instrumentação geotécnica;
- ✓ Túneis pilotos;
- ✓ Ensaios ambientais do solo e amostragem de águas subterrâneas suspeitos de estarem contaminados.

Alguns dos elementos de investigação acima, tais como instrumentação geotécnica, podem ser incluídos no contrato do projetista, enquanto outros, como perfurações exploratórias adicionais, podem ser deixados a critério do contratante conforme a oportunidade e conveniência. O mapeamento facial do túnel e o monitoramento das águas subterrâneas deverão ser elementos necessários para qualquer projeto de túnel já que a informação obtida a partir desses registros serão a base de avaliação de diferentes condições geológicas-geotécnicas ao longo do túnel.

3.3.1 INSTRUMENTAÇÃO GEOTÉCNICA

A instrumentação geotécnica é utilizada durante a construção para acompanhar as respostas do terreno e da estrutura, na superfície e próximo ao túnel, a deformação do suporte inicial e final do túnel, níveis das águas subterrâneas, o carregamento de elementos estruturais dos sistemas de suporte de escavação e vibrações da estrutura e do solo, entre outros. Essa instrumentação é um elemento fundamental de qualquer programa de manutenção e proteção das estruturas e instalações existentes. Além disso, fornece informação quantitativa para avaliar os procedimentos de escavação durante a construção, e pode ser utilizada ajustes no ciclo de trabalho em tempo hábil, de forma a reduzir os impactos da construção. A instrumentação é também utilizada para monitorar a deformação e a estabilidade da abertura do túnel, para avaliar a adequação dos sistemas de suporte inicial do túnel e os métodos e seqüência de escavação, em especial para os túneis construídos pelo Método de Escavação Sequencial (SEM) e túneis em zonas de cisalhamento ou em solos compressíveis.

3.3.2 TÚNEIS PILOTOS

São túneis de pequena dimensão utilizados ocasionalmente para investigação do subsolo a ser atravessado por túneis de grande porte em condições geológico-geotécnicas complexas. Além disso, quando utilizados, geralmente são realizadas em um contrato separado antes do contrato do túnel principal e fornecem aos licitantes uma compreensão mais clara das condições do solo que serão encontradas.

Apesar de túneis piloto serem muito dispendiosos, a utilização dos mesmos pode resultar em considerável benefício financeiro ao cliente, tais como, processos construtivos e sistema de suporte otimizado devido o prévio conhecimento das condições geológico-geotécnicas identificadas.

Adicionalmente, as informações coletadas fornecem aos licitantes a oportunidade de observar diretamente e avaliar as condições da rocha existentes, assim como:

- ✓ Informações mais completas e confiáveis para o projeto do sistema de suporte do túnel, caso existam;
- ✓ Acesso para a realização de ensaios *in situ* da rocha ao longo do túnel proposto;
- ✓ Informação para especificar e selecionar os métodos adequados de construção e equipamento de escavação;
- ✓ Instrumento eficaz de pré-drenagem das águas subterrâneas, além de auxiliar nas medidas de controle a curto e longo prazo das águas subterrâneas;
- ✓ Meio eficaz para a identificação e ventilação de solos em condições gasosas;
- ✓ Testar e avaliar o desempenho dos métodos e equipamentos de escavação;
- ✓ Acesso para a instalação de alguns dos suportes iniciais (geralmente na área da coroa do túnel), antes da escavação do túnel principal.

A localização do túnel piloto pode ser convenientemente adotada junto ao túnel proposto, utilizando-o para saída de emergência, drenagem ou ventilação do túnel, ou para outros fins, de modo a aproveitar esta estrutura no projeto final.

4. SEÇÃO DE TÚNEIS

Para os túneis destinados ao transporte rodoviário, o formato da seção transversal é normalmente retangular ou circular e depende principalmente do método de construção. Na Tabela 4.1 são indicadas algumas seções transversais típicas e métodos construtivos correspondentes. As dimensões das formas empregadas são dependentes das dimensões da seção necessária para o tráfego.

Tabela 4.1 – Seções Transversais e Métodos de Construção típicos (modificado - PIARC, 2001).

| Nº | Tipo de Seção | Método Construtivo | Observações |
|----|---------------|--------------------------------|--|
| 1 | Circular | Tuneladora (TBM) | O Japão utilizou recentemente tuneladoras com seção retangular |
| 2 | Retangular | Túnel submerso | Nos EUA é comum adotar-se seção circular |
| 3 | Retangular | Falso túnel | A tecnologia disponível pode conduzir à utilização de seção circular acima da faixa de rolamento |
| 4 | Ferradura | Perfuração e detonação | Aplicado em rochas duras |
| 5 | Elíptica | Método de Escavação Sequencial | Em rocha dura o formato ferradura é usual |

Para a Piarc (2001), estas dimensões variam devido a:

- ✓ Volumes de tráfego, tipos de veículos e a importância do túnel;
- ✓ Velocidades de projeto, distâncias de frenagem do veículo e distâncias de visibilidade;
- ✓ Espaço para equipamentos do túnel, tais como: sinalização, tráfego e monitoramento;
- ✓ O gerenciamento do tráfego necessário para responder a um incidente no túnel;
- ✓ As normas locais habituais e as possibilidades financeiras.

Internacionalmente, a resposta para os diversos fatores anteriormente apresentados podem variar de país para país, assim acabam por gerar soluções variadas, que ainda costuma ser modificadas com o tempo

As Figuras 4.1 e 4.2 apresentam os principais elementos a serem considerados na definição da seção transversal de um túnel rodoviário e que serão amplamente discutidos ao longo deste capítulo.

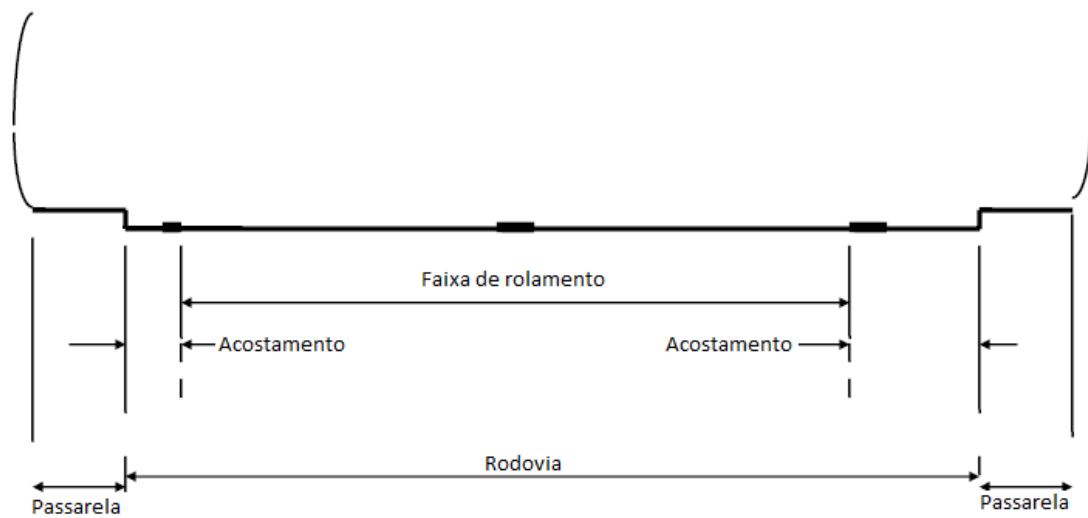
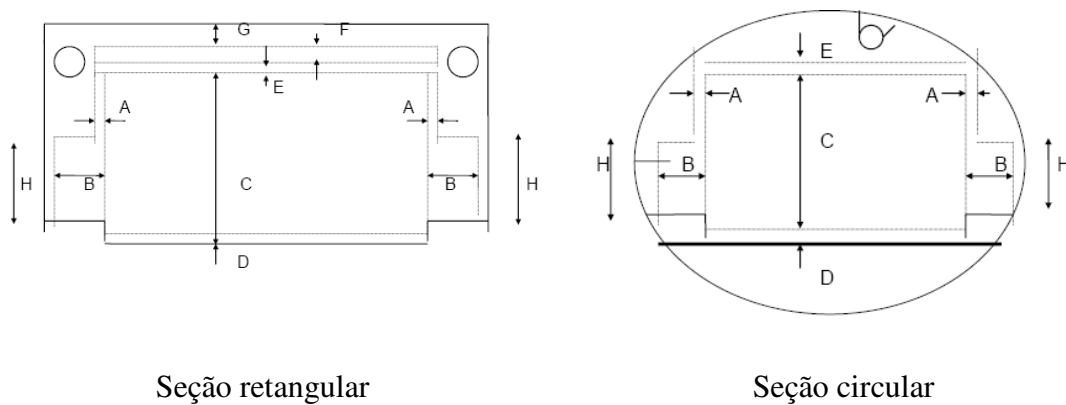


Figura 4.1 – Configuração típica de um túnel rodoviário (modificado - PIARC, 2001).



Seção retangular

Seção circular

- A. Distância lateral entre os limites das bordas da pista de rodagem e acessórios, tais como equipamentos de detecção, os ventiladores, sinalização etc;
- B. Passeio;

- C. Gabarito Vertical da faixa de rodagem;
- D. Espaço adicional para possibilitar o recapeamento da faixa, mantendo o gabarito vertical;
- E. Espaçamento vertical entre o gabarito vertical e acessórios, tais como equipamentos de detecção, os ventiladores, a sinalização etc;
- F. Espaçamento destinado à construção do teto;
- G. Espaçamento para dispositivos elétricos como equipamento de detecção, os ventiladores, sinalização etc; e
- H. Gabarito vertical do passeio.

Figura 4.2 – Gabaritos usualmente adotados em túneis rodoviários (modificado - PIARC, 2001).

4.1. LARGURA DA FAIXA E DA PISTA DE RODAGEM

A Tabela 4.2 apresenta uma lista com as larguras de faixa e pista de rodagem aplicada em vários países. Algumas vezes essas larguras dependem da velocidade de projeto ou velocidade de referência.

Tabela 4.2 – Comparação internacional entre faixas de rolamento (PIARC, 2001).

| País e Regulamento | Velocidade de Projeto (km/h) | Largura da faixa de rolamento (m) | Largura da Linha de Marcação da Faixa de Rolamento (m) | Largura da Rodovia (m) |
|--|-------------------------------------|--|---|-------------------------------|
| Áustria RVS 9 232 | 80 - 100 | 3,50 | 0,15 | 7,00 |
| Dinamarca (prática) | 90 - 120 | 3,60 | 0,10 | 7,20 |
| France CETU | 80 - 100 | 3,50 | - | 7,00 |
| Alemanha RAS-Q 1996 | 100 70 | 3,50 3,50 | 0,15 0,15 | 7,00 7,00 |
| RABT 94 | 110 | 3,75 | 0,15 | 7,50 |
| Japão Ordenamento Estrutural Rodoviário | 80 - 120 60 | 3,50 3,25 | - | 7,00 6,50 |
| Holanda ROA | 120 90 | 3,50 3,25 | 0,15 0,15 | 7,00 6,50 |

| | | | | |
|---|----------------|--------------|----------------------|--------------|
| Noruega Manual de Projetos de Túneis Rodoviários | 80 - 100 | 3,45 | 0,10 | 6,90 |
| Espanha Instrução 3.1 | 90 - 120 | 3,50 | 0,10 | 7,00 |
| Suécia Túnel 99 | 70 90 - 110 | 3,50 3,75 | 0,10 ou 0,15 0,15 | 7,00 7,50 |
| Suíça (túneis retangulares) | 80 - 120 | 3,50 - 3,75 | 0,20 | 7,75 |
| Suíça (SN 640201) | 80 - 120 | 3,50 - 3,75 | 0,20 | 7,75 |
| Reino Unido TD27(DMRB 6.1.2) | 110 | 3,65 | 0,10 | 7,30 |
| EUA AASHTO | - | 3,60 | - | 7,20 |

Por motivos econômicos nem sempre é viável manter a mesma velocidade adotada nas rodovias em túneis. Geralmente, a velocidade de referência adotadas em projetos de túneis rodoviários costuma ser de 10 a 20 km/h inferior à velocidade de projetos rodoviários. Isso permite a redução da largura da área adjacente à pista de rodagem (acostamento, passeio, barreira etc). A redução da velocidade de projeto implica em aumento de segurança no tráfego ao reduzir diferenças de velocidade.

As normas adotadas nos Estados Unidos e a American Highway Capacity Manual indicam que faixas de trânsito com 3,60 m de largura proporcionam capacidade ótima de tráfego.

Entretanto, alguns países obtiveram resultados positivos com larguras variando de 3,25 a 3,75 metros. Em alguns locais, como no Japão, com velocidades limitadas a 60 km/h faixas com larguras pequenas, 3,25 m por exemplo, apresentam ótimo desempenho quanto à segurança do tráfego.

Dessa forma, em túneis localizados em áreas urbanas, onde normalmente a velocidade não supera os 80 km/h, faixas com larguras estreitas podem ser satisfatoriamente adotadas. Contudo, em túneis localizados em rodovias, onde geralmente a velocidade supera os 100 km/h, é aconselhada a largura não inferior a 3,50 m. As normas brasileiras adotam a largura de 3,60 m para as rodovias federais e a maiorias das rodovias estaduais e municipais.

Na fase de projeto de túneis com mão dupla, é importante considerar que o gerenciamento do tráfego em situações de manutenção e reparos pode promover alterações na largura normal da faixa de rodagem, adotando-se temporariamente larguras mais estreitas.

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

4.2. ÁREAS ADJACENTES À PISTA DE RODAGEM

Esta área compreende o espaço destinado à passeio, barreiras, acostamento e etc. A principal diferença entre acostamentos e pistas de ultrapassagem é que geralmente o acostamento, localizado ao lado da pista de rodagem, possui uma largura apenas necessária para acomodar um veículo eventualmente parado devido à falhas de funcionamento ou acidente. Nas autoestradas localizadas em áreas urbanas e sem interrupção do tráfego (semáforos, cruzamentos etc), onde elevadas velocidades são permitidas, é comum planejar uma pista de emergência.

A largura dos acostamentos em túneis é restringida muitas vezes por razões econômicas. Esta restrição pode tornar impossível a acomodação de veículos ao lado da faixa de rodagem sem ocupar parte desta faixa e, assim, o fluxo de tráfego poderá sofrer interrupções.

A Figura 4.3 e Tabelas 4.3 a 4.6 a seguir apresentam as dimensões adotadas em vários países para o espaço adjacente à pista de rodagem.

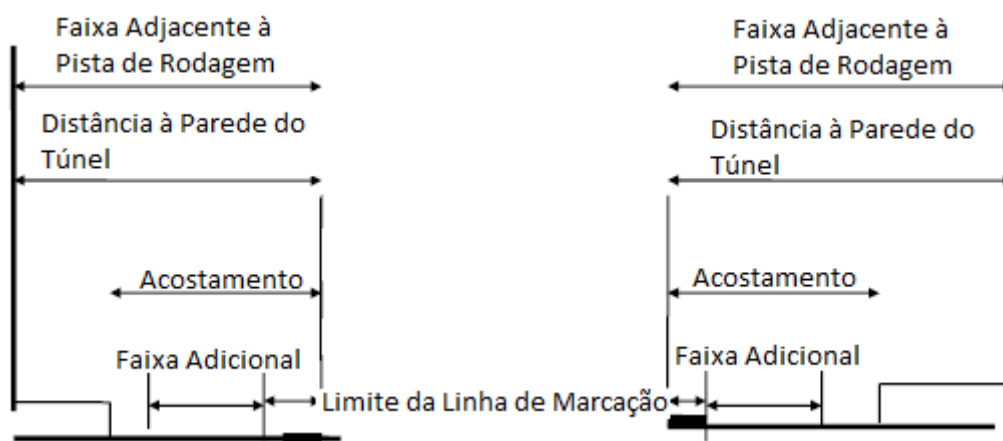


Figura 4.3 – Elementos da área adjacente à pista de rodagem (PIARC, 2001).

Tabela 4.3 – Dimensões área adjacente à pista de rodagem na ausência de faixa de emergência (modificado - PIARC, 2001).

| País e Regulamento | Velocidade de Projeto (km/h) | Largura do Acostamento (m) | Largura do passeio (m) ou Barreira de Segurança (bs) | Largura da Faixa Adjacente à Pista de Rodagem (m) |
|--|-------------------------------------|-----------------------------------|---|--|
| Áustria RVS 9.232 | 80 - 100 | > 0,25 | 1,00 | > 1,25 |
| Dinamarca (prática) | 90 - 120 | 0,50 | 1,00 | 1,50 |
| França CETU | 80 - 100 | 1,00 0,30 | 0,75 | 1,75 1,05 |
| Alemanha RABT 94/RAS-Q 1996 | 70 - 100 70 - 100 | 0,25 1,75 | 1,00 1,00 | 1,25 2,75 |
| Japão Ordenamento Estrutural Rodoviário | 80 - 120 60 - 80 | 1,00 0,75 | 0,50 0,25 | 1,50 1,00 |
| Holanda ROA | 120 90 | 1,50 0,80 1,00 0,50 | bs bs bs bs | 1,50 + bs 0,80 + bs 1,00 + bs 0,50 + bs |
| Noruega Manual para Projeto de Túneis Rodoviários | 80 - 100 | 0,30 | 0,75 1,25 | 1,05 1,55 |
| Espanha Instrução 3.1 | 90 - 120 | 1,00 | 0,75 | 1,75 |
| Suécia Túnel 99 | 70 90 110 | 2,00 2,00 2,75 | bs bs bs | 2,00 + bs 2,00 + bs 2,75 + bs |
| Suíça | 80 - 120 | - | 1,00 | 1,00 |
| Reino Unido TD27(DMRB 6.1.2) | 110 | 1,00 | 0,70 | 1,70 |
| EUA AASHTO | Não especificado | 0 - 1,50 | 0,50 - 0,70 | 0,50 - 2,20 |

Tabela 4.4 – Dimensões na presença de faixa de emergência (modificado - PIARC, 2001).

| País e Regulamento | Velocidade de Projeto (km/h) | Largura do Acostamento (m) | Largura do passeio (m) ou Barreira de Segurança (bs) | Largura da Faixa Adjacente à Pista de Rodagem (m) |
|--|-------------------------------------|-----------------------------------|---|--|
| Áustria RVS 9.232 | 80 - 100 | - | - | - |
| Dinamarca (prática) | 90 - 120 | 3,00 | 1,00 | 4,00 |
| França CETU | 80 - 100 | 2,00 | bs | 2,00 + bs |
| Alemanha RABT 94/RAS-Q 1996 | 70 - 100 (26 t) | 2,50 | 1,00 | 3,50 |
| | 70 - 100 (26Tr) | 3,25 | 1,00 | 4,25 |
| Japão Ordenamento Estrutural Rodoviário | 80 - 120 | | | 2,50 |
| | 60 - 80 | - | - | |
| Holanda ROA | 120 | 3,95 | bs | 3,95 + bs |
| | 90 | 3,95 | bs | 3,95 + bs |
| Noruega Manual para Projeto de Túneis Rodoviários | 80 - 100 | Não possui faixa de emergência | - | Não possui faixa de emergência |
| Espanha Instrução 3.1 | 90 - 120 | 2,50 | 0,75 | 3,25 |
| Suécia Túnel 99 | 70 | 2,00 | bs | 2,00 + bs |
| | 90 | 2,00 | bs | 2,00 + bs |
| | 110 | 2,75 | bs | 2,75 + bs |
| Suíça (túneis retangulares) | 80 - 100 | 3,00 | 1,00 | 4,00 |
| Suíça (túneis circulares) | 80 - 120 | Não possui faixa de emergência | - | Não possui faixa de emergência |
| Reino Unido TD27(DMRB 6.1.2) | 110 | 3,30 | 0,70 | 4,00 |
| | cidade | 2,00 | 0,70 | 2,70 |
| EUA AASHTO | Não especificado | 3,00 | 0,70 | 3,70 |

Tabela 4.5 – Dimensões da área adjacente à pista de rodagem ao lado da faixa de ultrapassagem (modificado - PIARC, 2001).

| País e Regulamento | Velocidade de Projeto (km/h) | Largura do Acostamento (m) | Largura do passeio (m) ou Barreira de Segurança (bs) | Largura da Faixa Adjacente à Pista de Rodagem (m) |
|--|-------------------------------------|-----------------------------------|---|--|
| Áustria RVS 9.232 | 80 - 100 | > 0,25 | 1,00 | > 1,25 |
| Dinamarca (prática) | 90 - 120 | 0,50 | 1,00 | 1,50 |
| França CETU | 80 - 100 | 0,50 0,30 | | 0,50 0,30 |
| Alemanha RABT 94/RAS-Q 1996 | 100 (26T) | 0,50 | 1,00 | 1,50 |
| | 100 (26Tr) | 0,25 | 1,00 | 1,25 |
| | 70 (26t) | 0,25 | 1,00 | 1,25 |
| | 110 (29,5T) | 0,75 | 1,00 | 1,75 |
| Japão Ordenamento Estrutural Rodoviário | 80 - 120 | 1,00 | 0,50 | 1,50 |
| | 60 - 80 | 0,75 | não especificado | |
| Holanda ROA | 120 | 1,50 | bs | 1,50 + bs |
| | 90 | 0,80 | bs | 0,80 + bs |
| | | 1,00 | bs | 1,00 + bs |
| | | 0,50 | bs | 0,50 + bs |
| Noruega Manual para Projeto de Túneis Rodoviários | 100 | 0,25 | 0,75 | 1,00 |
| Espanha Instrução 3.1 | 90 - 120 | 1,00 | 0,75 | 1,75 |
| | | 0,50 | | 1,25 |
| Suécia Túnel 99 | 70 | 1,00 | bs | 1,00 + bs |
| | 90 | 1,50 | bs | 1,50 + bs |
| | 110 | 2,00 | bs | 2,00 + bs |
| Suíça (túneis retangulares) | 80 - 120 | - | 1,00 | 1,00 |
| Suíça (túneis circulares) | 80 - 120 | - | 1,00 | 1,00 |
| Reino Unido TD27(DMRB 6.1.2) | 110 | 0,30 | 0,70 | 1,00 |
| EUA AASHTO | - | 0 - 1,50 | 0,50 - 0,70 | 0,50 - 2,20 |

Tabela 4.6 – Dimensões dos passeios (modificado - PIARC, 2001).

| País e Regulamento | Altura do passeio (m) | Largura do passeio (m) | Largura da Margem de Segurança (m) | Largura Destinada para Pedestres (m) |
|--|------------------------------|---------------------------------|---|---|
| Áustria RVS 9.232 | 0,18 | 1,00 | 0,30 | 0,70 |
| Dinamarca (prática) | - | 1,00 | - | 1,00 |
| França CETU | max. 0,25 | min. 0,66 (ao nível do solo) | 0,06 | 0,60 (ao nível do solo) |
| Alemanha RABT 94/RAS-Q 1996 | 0,07 | 1,00 | - | 1,00 |
| Japão Ordenamento Estrutural Rodoviário | 0,25 | 0,25 ou 0,50 | - | 0,25 ou 0,50 |
| Holanda ROA | - | - | - | - |
| Noruega Manual para Projeto de Túneis Rodoviários | 0,10 | 0,75 | - | 0,75 |
| Espanha Instrução 3.1 | 0,15 - 0,20 | 0,75 | - | 0,75 |
| Suécia Túnel 99 | | 1,00 | - | 1,00 |
| Suíça (Túnel Retangular) | 0,18 | 1,00 (mínimo) | 0,30 | 0,70 |
| Suíça (Túnel circular) | - | | - | - |
| Reino Unido TD27(DMRB 6.1.2) | 0,075 | 1,00 | - | 1,00 |
| EUA AASHTO | - | 0,50 - 0,70 | - | 0,50 - 0,70 |

Segundo (PIARC, 2001) em túneis os motoristas preferem manter uma certa distância da parede lateral do túnel (ou passeio, ou guard-rail ou barreira de segurança) devido ao restrito ângulo de visão. Experiências tem mostrado que os motoristas tendem a mudar o trajeto de direção de seus veículos quando adentram em túneis cuja a distância até a parede lateral, ou

outro objeto fixo, como passeio, meio-fio, guard-rail ou barreira de segurança, é menor que na via adjacente.

Experimentos no Japão e Espanha concluíram que a linha demarcatória que delimita a pista de rodagem é menos frequentemente atravessada quando esta é pintada de forma mais visível e com elementos que causem barulho e vibração.

O acostamento deve possibilitar o estacionamento de veículos, eventualmente com problemas de funcionamento, além dos limites da faixa de rodagem. Contudo, é aconselhável que esta faixa tenha no mínimo a largura de um carro de passageiros (1,75 m) adicionado de uma distância mínima que possibilite ao motorista a saída de seu veículo (0,50 m) e uma pequena distância adicional de segurança (0,20 m), resultando em uma largura mínima de acostamento de 2,45 m. Caso a via seja destinada à circulação de caminhões pesados sugere-se a distância mínima do acostamento de 3,20 m, pois a largura deste tipo de veículo é de 2,50 m.

Como já citado acima, pode-se destinar uma faixa de emergência no túnel, o que não elimina a necessidade do acostamento. Esta faixa normalmente é dedicada para o tráfego de equipes de resgate e segurança, como polícia, ambulância e bombeiros. Para uma velocidade de 90 km/h, indica-se uma largura de 3,45 m para esta faixa de emergência. Contudo, em alguns países, como na Holanda, projeta-se uma faixa adicional destinada a uma futura ampliação da malha rodoviária, mas até que isso aconteça esta faixa é utilizada como faixa de emergência. Isso acontece porque o custo para ampliação do túnel é normalmente muito superior, sendo preferível construir o túnel com uma faixa adicional a ser utilizada no futuro.

Devido aos custos, normalmente não se costuma projetar faixa de emergência em túneis com o princípio único de circulação de veículos de resgate, segurança e apoio.

Conforme Redaelli (1999), no lado esquerdo do túnel, no sentido do trânsito, a seção inicia com uma valeta para drenagem superficial, com uma largura interna geralmente de 30 cm e uma barreira simples de concreto padronizada (New Jersey), com 35 cm de largura.

4.3. PASSEIO

Em túneis, os passeios são destinadas aos pedestres em situações especiais, como em serviços de manutenção e reparo, condução dos usuários a telefones ou pontos de emergência.

Para Redaelli (1999) a largura de 1 metro é suficiente para a utilização de pedestres, mas é recomendável uma largura adicional de 0,80 m destinado ao trânsito de bicicletas (ciclovias). Além disso, o passeio deverá ter sobrelevação de no mínimo 1 metro e que o espaço inferior

deve ser utilizado para as instalações e infraestrutura do túnel ou utilidades públicas, como cabos de telefonia, tubulações de gás, água, esgoto, drenagem, entre outros.

A altura e largura deste dispositivo variam bastante para cada país. Em alguns países não são necessários os passeios em níveis elevados caso exista faixa de emergência. Aliás, a adoção de passeios em nível superior ao da via ou com largura estreita (inferior a 1,20 m) inibe a utilização por cadeirantes, isso está provocando a revisão de normas em vários países, como na Suécia, por exemplo.

Os passeios possibilitam a abertura das portas das saídas de emergência sem interferir no desempenho do tráfego local.

De acordo com PIARC (2001), em alguns países (França e Japão) este dispositivo é utilizado somente para melhor orientar o motorista dentro do túnel e proteger as paredes de uma eventual colisão. Neste caso, adotam-se meio-fios salientes e de visão facilitada, utilizando-se dispositivos reflexivos e que atraiam a atenção dos motoristas. Geralmente, a altura do meio-fio adotada é de 0,25 m, assim como a distância entre a face externa e a parede do túnel. Entretanto, frisa-se que para este fim de proteção outros elementos, como guard-rail e barreiras de segurança, são mais efetivos.

Em alguns países, como na Noruega, o meio-fio é especialmente projetado com rebaixamentos para tornar possível o tráfego de veículos especiais, como ambulâncias, viaturas da polícia e bombeiros, sobre o passeio, como indica a Figura 4.4. Este tipo de dispositivo também é utilizado para auxiliar o fluxo de veículos no caso de acidentes dentro do túnel.

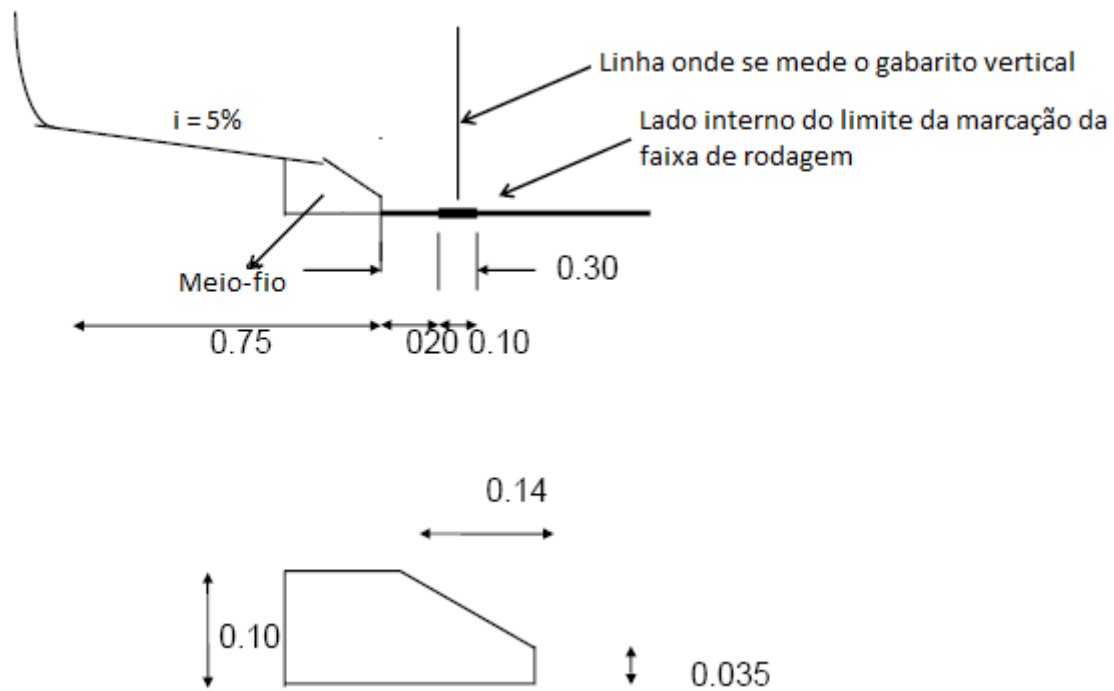


Figura 4.4 – Rebaixamento de meio-fio para permitir tráfego em situações especiais (PIARC, 2001).

A largura total do passeio costuma ser de 1,00 m, sendo 0,75 destinado ao pedestre e 0,25 m é a margem de segurança. Entretanto, não existe uma conclusão científica que comprove qual o melhor tipo de passeio a se adotar e suas dimensões.

É importante observar que normalmente a linha divisória entre o passeio e o acostamento é utilizada para acomodar o sistema de drenagem do túnel. Por isso, deve-se executar inclinações, tanto no passeio como na pista de rodagem, conduzindo fluidos líquidos porventura existentes para o sistema de drenagem.

4.4. GABARITO VERTICAL

No caso de vias destinadas ao uso rodoviário, as normas existentes no Brasil indicam um gabarito vertical de 5,50 m (gabarito vertical estático) para rodovias onde é permitido o tráfego de caminhões pesados. Nos túneis deve-se manter o mesmo gabarito, ou seja, deve-se prever um gabarito vertical mínimo de 5,50 m da pista de rodagem. Salienta-se que existe um espaçamento entre o teto do túnel e este limite de 5,50 m, destinados a equipamentos, construção e dispositivos.

Na Figura 4.2 o gabarito vertical corresponde a letra C. Na Tabela 4.7 as letras existentes nas colunas referem-se às citadas Figuras, esta Tabela apresenta uma comparação internacional entre os gabaritos adotados em vários países.

Tabela 4.7 – Comparação dos gabaritos verticais internacionalmente adotados (PIARC, 2001).

| País e Regulamento | Gabarito Vertical Mínimo sobre a Pista de Rodagem (m) | Gabarito Vertical de Projeto C sobre a Pista de Rodagem (m) | Espaçamento Adicional E para a Segurança de Luminárias, Sinalização, Ventiladores etc. (m) | Espaçamento G para Luminárias, Sinalização, Ventiladores etc. (m) | Espaçamento D e F para Pavimento e Construção (m) |
|--|--|--|---|--|--|
| Áustria RVS 9.232 | - | 4,70 | não especificado | min. 0,20 | não especificado |
| Dinamarca (prática) | não especificado | 4,60 | 0,20 | não especificado | não especificado |
| França (CETU) | - | 4,50 (rodovias internacionais) 4,75 (rodovias de maior importância) | 0,10 | não especificado | 0,05 - 0,10 |
| Alemanha RABT 94/RAS-Q 1996 | 4,20 | 4,50 | não especificado | não especificado | não especificado |
| Japão Ordenamento Estrutural Rodoviário | - | 4,50 | não especificado | não especificado | não especificado |
| Holanda ROA | 4,20 | 4,50 | 0,20 | 0,30 | não especificado |
| Noruega Manual para Projeto de Túneis Rodoviários | não especificado | 4,60 | 0,10 | não especificado | 0,10 |
| Espanha | - | 5,00 | - | - | - |

| | | | | | |
|------------------------------------|-------------------------|------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Instrução 3.1 | | | | | |
| Suécia Túnel 99 | - | 4,50 | 0,20 | 0,40 | - |
| Suíça (Túnel Retangular) | não especificad o | 4,50 | 0,20 | 0,40 | - |
| Suíça (Túnel Oval) | não especificad o | 4,50 | - | - | - |
| Reino Unido TD27(DMRB 6.1.2) | 5,1 | 5,35 | 0,25 | 0,40 | não especificado |
| EUA AASHTO | não especificad o | 4,90 | não especificado | não especificado | não especificado |

A Figura 4.2 apresenta graficamente o gabarito vertical e espaçamento mencionados.

Nos túneis rodoviários o gabarito vertical deve ser no mínimo igual ao adotado na via adjacente para o trânsito de veículos pesados para transporte de mercadorias, no caso europeu a comunidade européia permite um gabarito vertical máximo de 4,00 m. A este gabarito deve-se somar um espaçamento destinado a absorver movimentos verticais do maciço, neste caso 0,20 m. Além disso, é indicado uma distância vertical adicional (0,30 m) destinada à uma direção mais confortável do motorista destes veículos pesados. Assim, o gabarito vertical mínimo considerado para os túneis europeus é de 4,50 m.

Nota-se que este comprimento não é igual ao gabarito vertical mínimo adotado nas rodovias brasileiras (5,50 m). Salienta-se que a este valor é recomendável adicionar a este gabarito um espaçamento destinado a acomodar os sistemas de ventilação, sinalização, iluminação, entre outros, e imperfeições construtivas do túnel.

5. ILUMINAÇÃO

De acordo com a publicação “*Tunnel Luminaires*” da empresa SITECO, os olhos dos motoristas têm que realizar uma tarefa complexa quando os seus veículos se aproximam de um túnel, de repente eles devem ser capazes de identificar quaisquer obstáculos no interior do túnel escuro embora seus olhos estejam sujeitos às condições do dia no exterior do túnel.

Neste sentido, o interior do túnel deve estar iluminado de uma maneira que os usuários não tenham o campo de visão comprometido.

Aliás, durante este período a iluminação necessária no túnel depende da luminância no campo de visão dos motoristas quando se aproximam do túnel e entram nas condições de tráfego.

Este nível de iluminação e os critérios de qualidade a serem cumpridos no projeto de iluminação devem ser especificados em técnicas. No Brasil estes critérios podem ser encontrados bem como na NBR 5181, como em normas estaduais, como a do Departamento de Estradas e Rolagem do Estado de São Paulo (DER/SP).

5.1. PROJETOS DE ILUMINAÇÃO DE TÚNEIS

Para Programas usuais de cálculo do tipo usado para iluminação de estradas não podem ser utilizados no projeto de sistemas de iluminação para túneis. De acordo com Buraczynski et al. (2010), as ferramentas numéricas 3D são comumente utilizados nos projetos de iluminação de túneis para análise do sistema de iluminação projetado. Fatores como as reflexões provocadas pelas paredes devem ser consideradas nos cálculos das condições físicas prevalentes nos túneis. O sentimento de segurança dos usuários das rodovias acaba por exigir uma eficiente iluminação das paredes dos túneis.

Em zonas de transição, as luminárias podem ser instaladas em intervalos regulares, mas na zona de entrada a iluminação deve variar sua intensidade de acordo com a adaptabilidade do

olho humano. Algoritmos especiais são necessários para obter este posicionamento, mas isso não está incluído em programas convencionais.

5.1.1 ILUMINAÇÃO E EQUIPAMENTOS AUXILIARES

Segundo Cano (2002) embora os túneis sejam apenas seções especiais de estradas, problemas relacionados com sua iluminação excedem significativamente os de iluminação de estradas em geral. Em primeiro lugar, enquanto estas vias requerem apenas iluminação noturna, os túneis requerem também iluminação diurna, sendo precisamente durante o dia quando se requerem maiores níveis de iluminação (zonas de emboque), pois os olhos dos condutores devem adaptar-se rapidamente ao contraste entre a alta luminância do exterior e as condições de quase escuridão no interior. Além disso, o fato de manter permanentemente acesa a iluminação, com um reforço significativo durante o dia, faz com que os custos de alimentação de energia sejam muito importantes comparativamente com o custo total do túnel propriamente dito, podendo acontecer de adotar-se uma solução tecnicamente adequada, porém anti-econômica, especialmente no caso de pequenos túneis e de pouco tráfego.

Neste contexto, a primeira questão que se coloca é a necessidade ou não de instalação de um sistema de iluminação artificial em um túnel. De acordo com Cano (2002), os fatores mais importantes que devem ser considerados na tomada desta decisão são o comprimento do túnel, a separação dos sentidos de circulação (um túnel bidirecional exige uma iluminação mais potente que um unidirecional), o volume de tráfego e a localização do túnel (em túneis urbanos a iluminação é quase obrigatória).

A NBR 5181 (ABNT, 1976) separa os túneis em curtos e longos e a iluminação em noturna e diurna, sendo considerado túnel curto aquele que, na ausência de tráfego, a saída é plenamente visível antes de sua penetração, para objetivos de iluminação túnel curto tem o comprimento até 50 m. Não obstante ao anteriormente discutido, um túnel de até 100 m de comprimento nivelado, reto e cuja saída é claramente visível antes da entrada também é considerado curto. Nos casos contrários, o túnel é considerado longo.

A norma brasileira também define a iluminação de túneis curtos no período diurno, onde em situações normais geralmente não há previsão de sistema de iluminação, exceto em casos em que há obstrução à entrada da luz solar. No período noturno há uma preocupação maior com o posicionamento das luminárias externas aos portais do túnel, indicando-se a utilização de

luminárias no interior do túnel em situações especiais, como na presença de colunas no centro ou em rodovias com largura maior que 15 m.

Como já era de se esperar a norma brasileira dedica maior atenção para túneis longos no período diurno, dividindo-o em três zonas: zona do quebra-luz (optativo), zona de entrada e zona central. A iluminação noturna é mais simples, uma vez que o túnel não é dividido em zonas e apenas tratado como um conjunto de luminárias capazes de fornecer uma iluminância da ordem de 40 a 60 lux.

Depois de ser decidido sobre a necessidade de iluminação de um túnel, a segunda questão que se coloca é como e quanto é necessário iluminar. Em geral, a iluminação de um túnel é dimensionada para que ao longo de todo o comprimento do túnel o motorista, viajando à velocidade máxima permitida, disponha em todos os momentos da distância de visibilidade de parada, que lhe permita parar antes de qualquer obstáculo, cuja presença pode ser detectada se o contraste de luminância entre o objeto e seu fundo (a própria pista de rolagem) excede um limite mínimo (contraste limite). Afinal, o condutor deve ser capaz de distinguir os obstáculos dentro do túnel, quando passa das condições de alta luminosidade exterior durante o dia para a situação de reduzida iluminação no seu interior.

Segundo Cano (2002), quando a mudança em termos de luminosidade (intensidade de luz por unidade de área, refletida na direção do olho) é muito grande, aciona-se o mencionado mecanismo de adaptação, que permite ao olho humano manter a percepção, mas com a desvantagem de necessitar-se de um tempo considerável para que isto ocorra (tempo de adaptação), o que tem como seu primeiro efeito uma cegueira momentânea até que se possa perceber os objetos. O tempo de adaptação que transcorre desde que o motorista entra no túnel determina o salto de luminância que a visão é capaz de suportar para que se possa continuar a perceber os objetos e, portanto, a iluminação que deve ser fornecida em cada zona do túnel.

Como consequência ao discutido anteriormente, diferentes zonas de iluminação (Figura 5.1) são estabelecidos durante o desenvolvimento de um projeto de iluminação de um túnel considerado longo. Essas zonas são conhecidas como:

- ✓ *Zona de Acesso* ou aproximação, situado antes da entrada do túnel, é igual à distância de parada de um automóvel até o portal do túnel. Deve ser possível enxergar o interior do túnel a partir desta área, de maneira que o condutor mantenha a mesma velocidade ao adentrá-lo.

- ✓ *Zona de Entrada*, que é a primeira seção interior do túnel, onde deve ser fornecido os maiores valores de luminância.
- ✓ *Zona de Transição*, situado entre a zona de entrada e a zona interior ou central, onde se obtém as mais baixas luminâncias de todo o interior do túnel.
- ✓ *Zona Interior* ou central, localizado entre a zona de transição e a zona de saída
- ✓ *Zonas de Saída*, que é a extremidade interna do túnel, onde começa a adaptar o visão do condutor sobre a luminosidade externa.

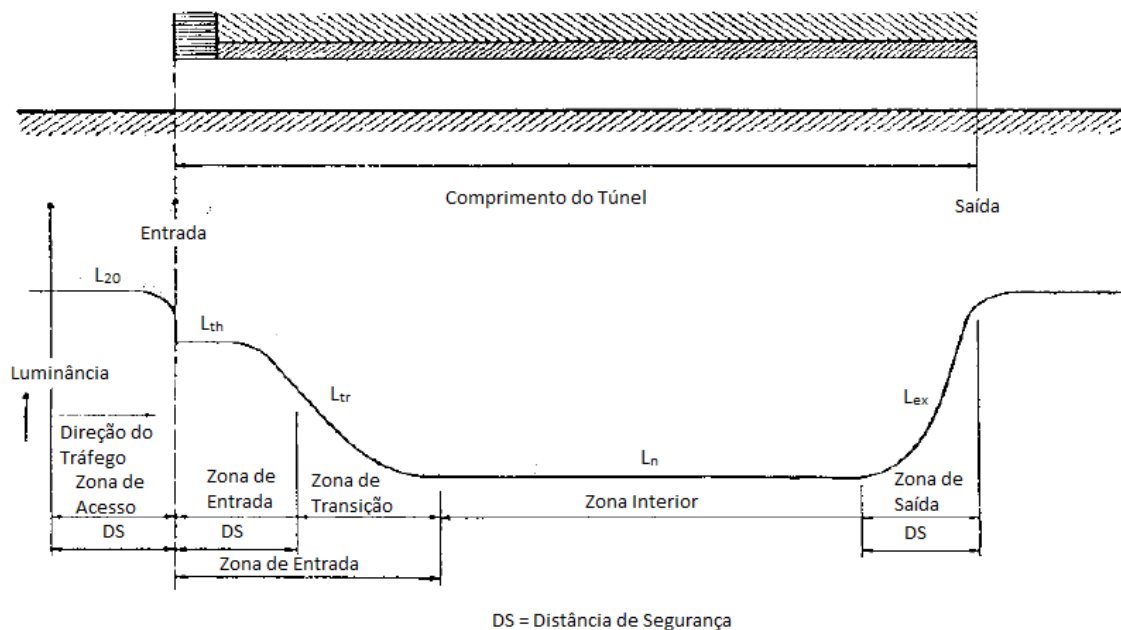


Figura 5.1 – Zonas de Iluminância em Túneis Longos (Cano, 2002).

Como mencionado anteriormente, o problema fundamental da visão em um túnel é a adaptação dos olhos do condutor desde os níveis de alta iluminação na zona exterior até os níveis de nula ou baixa iluminação na zona de entrada do túnel.

De acordo com Cano (2002), quanto maior a velocidade do veículo, maior será a distância de parada de um veículo até a boca do túnel, o que torna a zona de acesso de maior comprimento.

Para complicar o processo de adaptação, o nível na zona externa do túnel é normalmente muito elevado, chegando a 100.000 lux, e os olhos dos condutores já estão adaptados a este altíssimo nível. Isso gera a principal dificuldade no planejamento de iluminação de um túnel: definir o nível adequado de iluminação na zona inicial do túnel que faz com que o usuário

tenha uma entrada mais segura, e conseqüentemente definir os níveis e comprimentos das zonas subsequentes, do ponto de vista da segurança visual.

Na Figura 5.2 observa-se em perspectiva um típico túnel longo, com a representação das citadas zonas. A nomenclatura dos níveis de luminância nas distintas zonas é a seguinte:

- ✓ L_{20} - Luminância da zona acesso
- ✓ L_{th} - Luminância da zona de entrada;
- ✓ L_{tr} - Luminância da zona de transição;
- ✓ L_n - Luminância da zona interior; e
- ✓ L_{ex} - Luminância da zona de saída.

Mais adiante será discutido detalhadamente o nível de luminância de cada zona, assim como qual o comprimento e forma de iluminação que proporciona uma condução mais segura, do ponto de vista do conforto visual.

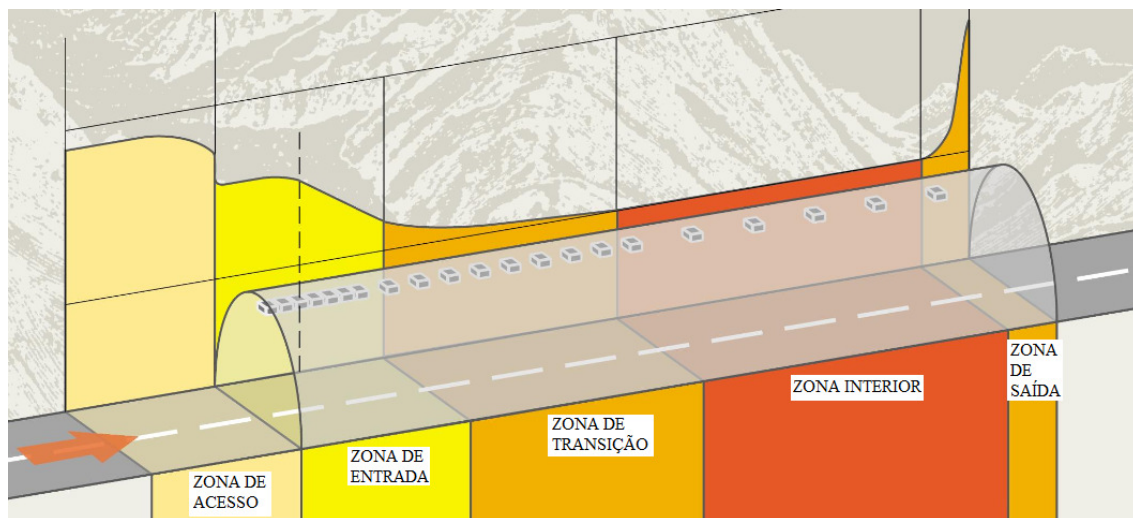


Figura 5.2 – Zonas de iluminação de um túnel típico em perspectiva.

5.1.2 SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO

Para Cano (2002), existem atualmente dois sistemas de iluminação artificial de túneis: o simétrico (Figura 5.3), que é normalmente utilizado, e o assimétrico (também chamado contraluz), em que as luminárias têm uma distribuição assimétrica da intensidade de luz no plano perpendicular ao eixo do túnel, que está posicionada em sentido contrário ao da circulação (Figura 5.4). Estes sistemas assimétricos proporcionam contrastes negativos

(objetos escuros se destacam contra um fundo claro) relativamente alto para a maioria dos objetos, com um rendimento da iluminação maior do que na distribuição simétrica usual, com benefícios econômicos significativos.

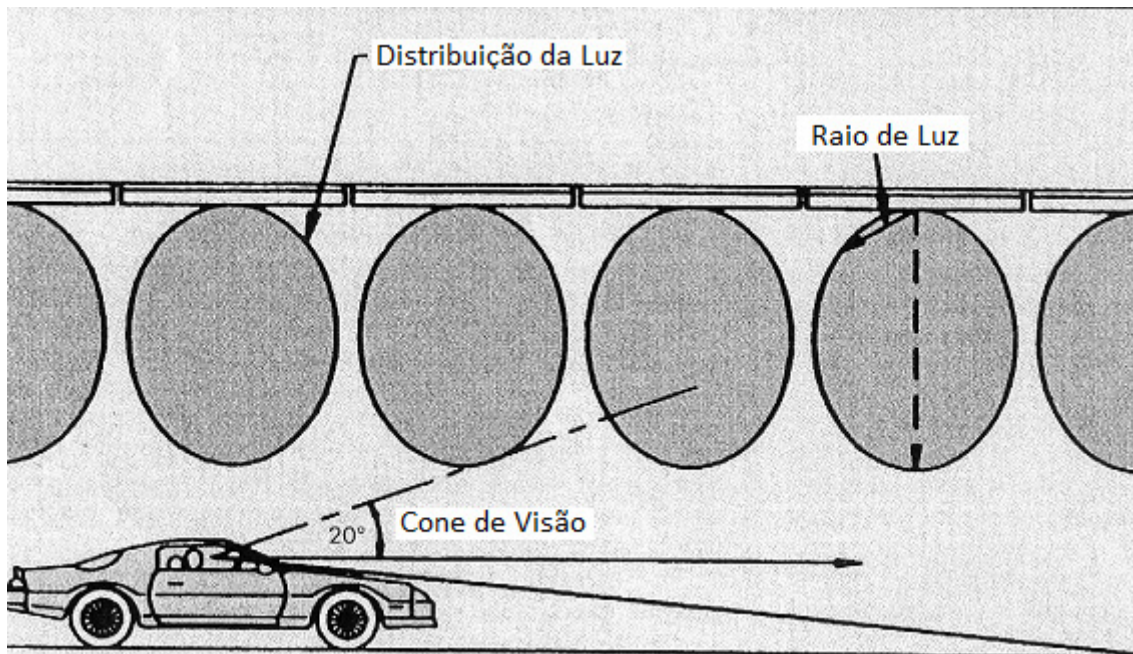


Figura 5.3 – Sistema Simétrico de Iluminação.

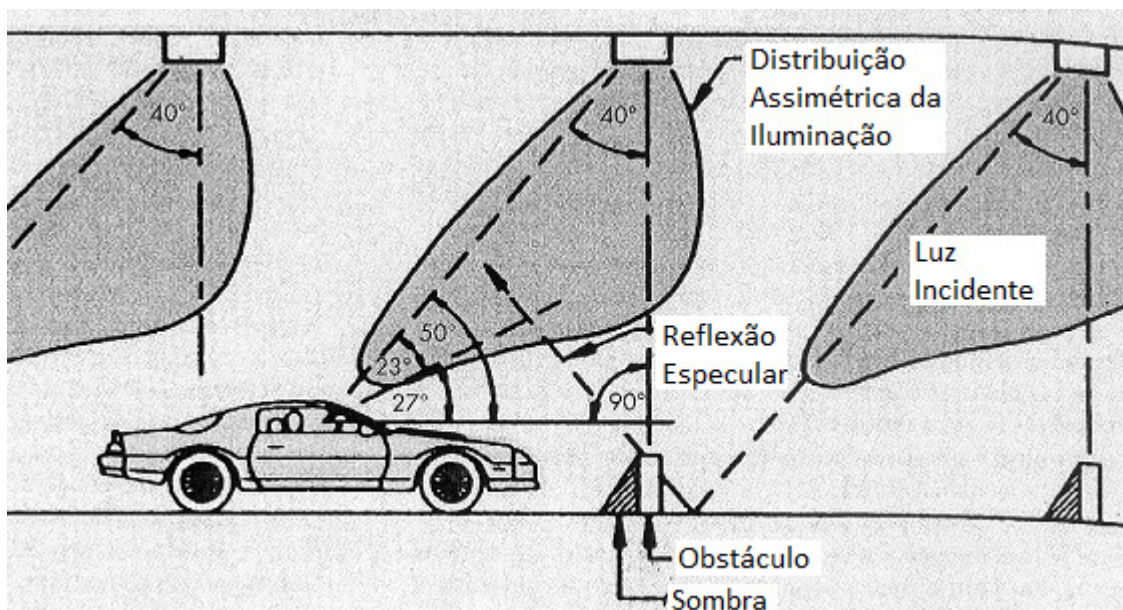


Figura 5.4 – Sistema Assimétrico de Iluminação.

Contudo, conforme enfatiza Cano (2002), os sistemas assimétricos não são amplamente utilizados, pois apresentam algumas desvantagens, tais como, sensação de desconforto visual durante a condução, inadequados quando os portais do túnel permitem a entrada de luz natural com facilidade. Além disso, sua eficácia é menor com altas intensidades de circulação e altas porcentagens de veículos, assim como seus benefícios são anulados para túneis bidirecionais.

Finalmente, referindo-se aos equipamentos de iluminação de um túnel, enfatiza-se que as luminárias, onde se alojam as lâmpada, devem ser herméticas, capazes de suportar um jato de água sob pressão (utilizado para a limpeza), e deve ser fabricado com materiais que suportem as condições adversas no interior do túnel (poeira, fumaça, materiais de limpeza), assim como deve ser resistente à corrosão.

5.1.3 DISTÂNCIA DE SEGURANÇA (DS)

Distância necessária para que um condutor de um veículo viajando a uma determinada velocidade possa parar antes de atingir um obstáculo na pista desde o momento em que o veja. Para o cálculo desta distância apresenta-se a seguinte equação:

$$D_p = \frac{Vt_p}{3.6} + \frac{V^2}{254 \cdot (f_i + i)} \quad (6.1)$$

D_p = Distância de parada.

V = Velocidade do veículo.

f_i = Coeficiente de atrito entre pavimento e roda (Tabela 6.1)

i = Inclinação da pista.

t_p = Tempo de percepção e reação do condutor, geralmente 2s.

Tabela 5.1 – Coeficiente de atrito (f_i) entre pavimento e roda em função da velocidade (Cano, 2002).

| | | | | | | | | | |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| V (km/h) | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 110 | 120 |
| f_i | 0.432 | 0.411 | 0.390 | 0.369 | 0.348 | 0.334 | 0.320 | 0.306 | 0.291 |

5.1.4 CLASSE DE ILUMINAÇÃO DOS TÚNEIS

De acordo com Cano (2002), os túneis podem ser divididos em classes, de 1 a 7. Esta classificação depende de fatores de ponderação, que serão discutidos a seguir.

5.1.4.1 INTENSIDADE DO TRÁFEGO

Existe uma relação entre a intensidade de tráfego e o número de acidentes. Nesta relação, o risco de acidente pode ser compensado em parte pelo aumento do nível de iluminação do túnel (Tabela 5.2).

Tabela 5.2 – Fatores de ponderação, de acordo com a intensidade do tráfego (Cano & Sergio, 2002).

| INTENSIDADE DE TRÁFEGO (vei./hora por faixa) | | FATORES DE PONDERAÇÃO |
|--|--------------|-----------------------|
| Unidirecional | Bidirecional | |
| <60 | <30 | 0 |
| 60-100 | 30-60 | 1 |
| 100-180 | 60-100 | 2 |
| 180-350 | 100-180 | 3 |
| 350-650 | 180-350 | 4 |
| 650-1200 | 350-650 | 5 |
| >1200 | 650-1200 | 6 |
| | >1200 | 7 |

5.1.4.2 COMPOSIÇÃO DO TRÁFEGO

O projeto do sistema de iluminação deve levar em conta a composição do tráfego: porcentagem de caminhões, motocicletas/motociclistas etc (Tabela 5.3).

Tabela 5.3 – Fator de ponderação em função da composição do tráfego (Cano, 2002).

| Composição do Tráfego | Fator de Ponderação |
|---|---------------------|
| Motorizado | 0 |
| Motorizado porcentagem de caminhões > 15% | 1 |
| Misto | 2 |

5.1.4.3 ORIENTAÇÃO VISUAL

Uma orientação visual adequada é especialmente importante e esta pode ser obtida por meio da sinalização horizontal, dispositivos refletivos etc. (Tabela 5.4).

Tabela 5.4 – Fatores de ponderação em função da orientação visual (Cano, 2002).

| ORIENTAÇÃO VISUAL | FATOR DE PONDERAÇÃO |
|-------------------|---------------------|
| Adequada | 0 |
| Inadequada | 2 |

5.1.4.4 CONFORTO NA CONDUÇÃO.

Entende-se como conforto na condução a facilidade e mínimo esforço que usuários devem realizar para conduzir seus veículos, devido às informações completas recebidas e à ausência de complexidade no campo visual (Tabela 5.5).

Tabela 5.5 – Os fatores de ponderação em termos do conforto na condução (Cano, 2002).

| CONFORTO NA CONDUÇÃO | FATOR DE PONDERAÇÃO |
|----------------------|---------------------|
| Baixo | 0 |
| Médio | 2 |
| Elevado | 4 |

Com essas ponderações pode-se definir a classe de iluminação do túnel, conforme a Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Classes de iluminação de túneis longos (Cano, 2002).

| Soma de Fatores de Ponderação | Classe de Túnel |
|-------------------------------|-----------------|
| 0-3 | 1 |
| 4-5 | 2 |
| 6-7 | 3 |
| 8-9 | 4 |
| 10-11 | 5 |
| 12-13 | 6 |
| 14-15 | 7 |

Uma vez definido o Sistema de Iluminação, a Distância de Segurança e a Classe de Iluminação do túnel, pode-se, por meio da Tabela 5.7 obter o valor k recomendado, que é a relação que deve existir entre a luminância das zonas de entrada e de acesso, de modo que a entrada do motorista no túnel seja segura. A luminância média das paredes até 2 m de altura, deve ser semelhante à média do pavimento.

Tabela 5.7 – Valores de $k \times 10^3$ para a zona de entrada (Cano, 2002).

| Classe de Iluminação | SISTEMA DE ILUMINAÇÃO | | | | | |
|----------------------|------------------------|-------|-------|------------------------|-------|-------|
| | ASSIMÉTRICO | | | SIMÉTRICO | | |
| | Distância de Segurança | | | Distância de Segurança | | |
| | 60m. | 100m. | 160m. | 60m. | 100m. | 160m. |
| 1 | 10 | 15 | 30 | 15 | 20 | 35 |
| 2 | 15 | 20 | 40 | 20 | 25 | 40 |
| 3 | 20 | 25 | 45 | 25 | 35 | 45 |
| 4 | 25 | 30 | 50 | 30 | 40 | 50 |
| 5 | 30 | 35 | 55 | 35 | 50 | 65 |
| 6 | 35 | 40 | 60 | 40 | 55 | 80 |
| 7 | 40 | 45 | 70 | 45 | 60 | 100 |

Na iluminação de túneis e viadutos, e em geral para pista coberta, buscam-se condições seguras de trabalho, visibilidade, economia e suavidade adequadas para o tráfego. Em túneis curtos não se verifica a necessidade de iluminação artificial, exceto durante a noite ou em condições de pouca visibilidade. Já em túneis longos, deve-se fazer um estudo individual de cada caso. Isso exige analisar os problemas prováveis provocados pelos túneis aos condutores

durante o dia ou a noite, a necessária manutenção e as características dos equipamentos de iluminação instalados.

5.1.5 ILUMINAÇÃO DIURNA

Quando nos aproximamos de um túnel durante o dia, a primeira dificuldade que encontramos é o chamado efeito de buraco negro (Figura . A entrada do túnel é apresentada como uma mancha escura na qual não podemos distinguir nada. Este problema, conhecido como fenômeno da indução, se apresenta quando estamos a uma distância considerável do túnel, e deve-se à luminosidade do ambiente no exterior (zona de acesso) é muito maior que a luminosidade da zona de entrada.

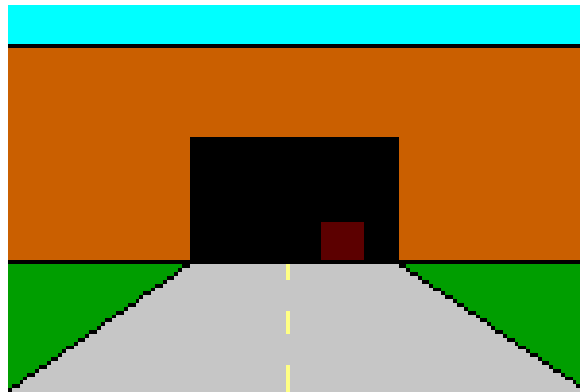


Figura 5.5 – Efeito do buraco negro no portal de um túnel rodoviário.

A medida que um condutor se aproxima da entrada, esta vai ocupando uma parcela maior do seu campo visual e os olhos procuram adaptar-se progressivamente ao nível de iluminação no interior do túnel. Mas se a transição é muito rápida, comparado com a diferença de luminância entre o exterior e o interior, o condutor sofrerá “cegueira” temporária, com visão embaçada, até sua adaptação visual. A mesma coisa acontece quando, em um dia ensolarado, entramos por uma porta escura e por um momento não vemos com clareza.

É, portanto, um problema causado pelos níveis de contraste de luminância entre o exterior (3000-8000 cd/m²) e o interior do túnel (5-10 cd/m²). Isto pode conduzir a um pensamento de que mantendo um valor de luminância, no interior do túnel, próximo ao exterior em toda a sua extensão se resolveria esse problema, o que até chega a ser correto mas certamente não é nada econômico. O que é feito em túneis ou viadutos de grande extensões, com densidade de

tráfego elevada ou qualquer outra circunstância que impede a visão, é reduzir progressivamente o nível de iluminação desde a entrada até a zona interior. Na zona de saída essa preocupação não tem a mesma intensidade, pois a adaptação de níveis baixos de luminância a níveis altos é muito rápida. Assim, os túneis podem ser divididos em diversas zonas segundo a iluminação exigida, conforme ilustra a Figura 5.6.

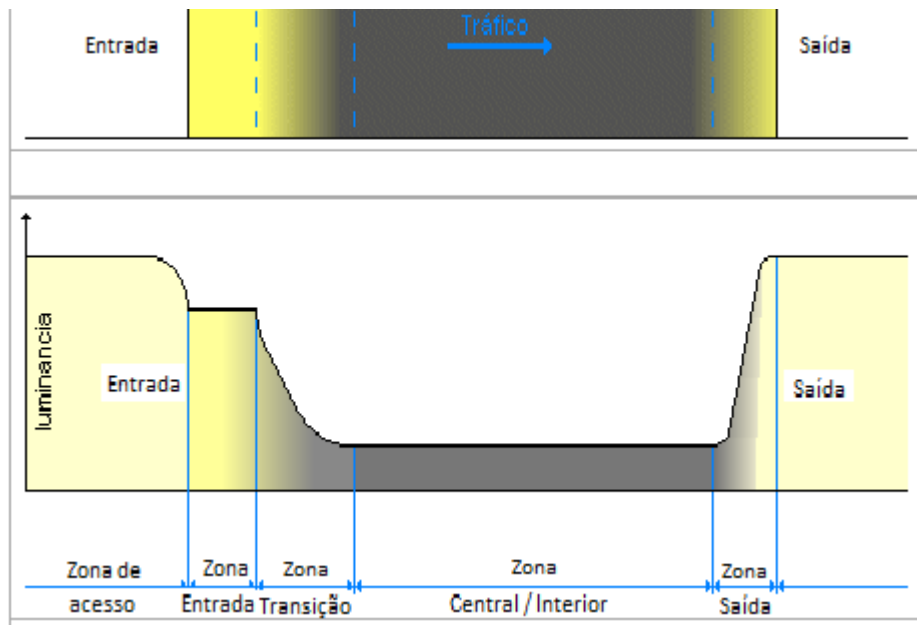


Figura 5.6 – Níveis de luminância em túneis unidirecionais.

5.1.6 ILUMINAÇÃO NOTURNA

Na ausência da luz diurna, iluminar um túnel é uma tarefa muito mais fácil. Ou seja, basta reduzir o a iluminação no túnel até o nível de iluminação da estrada onde o túnel está localizado. Caso a estrada não esteja iluminada, a relação entre a iluminação interior e exterior do túnel não deve ultrapassar a relação 3:1, isso evita problemas de adaptação. Neste último caso, recomenda-se um valor aproximado para a luminância interna entre 2 e 5 cd/m^2 . Deve-se ter em mente que mesmo que o efeito de buraco negro não se apresente na entrada este pode se apresentar na saída. Por isso, é aconselhável iluminar o caminho da saída em pelo menos 200 m, para ajudar na adaptação visual.

5.2. LUMINÂNCIA NA ZONA DE ACESSO

Antes de estabelecer a iluminação necessária na entrada do túnel, temos de determinar o nível médio de iluminação na zona de acesso ou de ajuste de luminosidade externa. Este valor é calculado a partir da luminância dos elementos do campo visual do condutor, que pode ser o céu, edifícios, montanhas, árvores, estradas etc. e seu valor varia entre 3.000 e 10.000 cd/m². A Figura 5.7 ilustra algumas destas situações possíveis na zona de acesso.



Área plana e descoberta

Área montanhosa

Área edificada

Figura 5.7 – Condições da Zona de Acesso.

A Tabela 5.8 indica que em áreas planas e descobertas, onde o céu ocupa a maior parte do campo visual, pode-se adotar um máximo de 8.000 cd/m². Enquanto que em zonas montanhosas ou edificadas adota-se um valor de 10.000 cd/m². No entanto, estes valores de orientação não excluem um cálculo mais rigoroso da iluminação desta zona conforme recomendações e regulamentos locais.

Tabela 5.8 – Luminâncias máximas na zona de acesso em função das possíveis situações que podem ser observadas.

| ÁREA | LUMINÂNCIA MÁXIMA (cd/m ²) |
|-------------------------|--|
| Plana e descoberta | 8.000 |
| Montanhosa ou edificada | 10.000 |

A luminância na zona de acesso (L_{20}) é a média contida em um campo de visão cônico com o vértice no olho do motorista, a uma distância do túnel igual ao DS, formando um cone de 20° orientado para um ponto a uma altura de 1/4 do portal túnel.

A determinação desse valor é crucial para o projeto do túnel. A luminância na zona de entrada está relacionada com este valor, através de um parâmetro k , que será discutido mais adiante.

É necessário avaliar qual o valor L_{20} máximo que ocorre com maior frequência ao longo do período de um ano. Esse valor é dependente tanto das condições sazonais como das meteorológicas.

Existem dois métodos para avaliar o valor L_{20} . Se trata, simplificando muito o tema, de avaliar dentro do cone de visão de 20° (Figura 5.8), qual a percentagem de céu, rodovias e áreas adjacentes, para ponderar as distintas luminâncias que elas representam (Tabela 5.9) e, com isso, chegar a uma luminância média do cone visão.

Intuitivamente, pode-se concluir que ao se projetar uma boca de um túnel e arredores o mais escuro possível, o L_{20} fica significativamente reduzido, o que é altamente desejável do ponto de vista da iluminação, devido aos impactos sobre o investimento e custos operacionais.

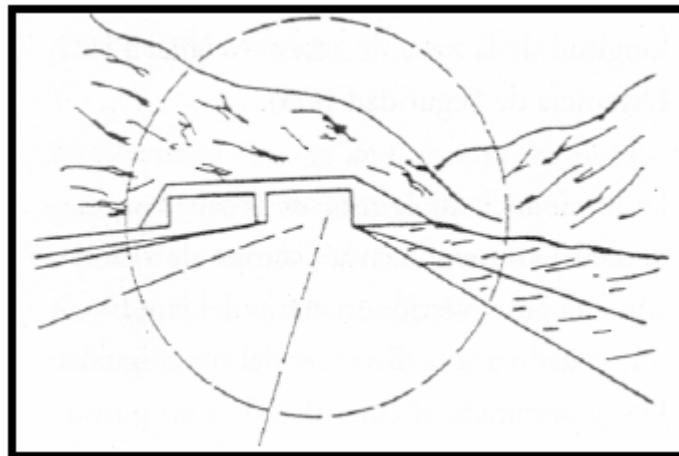


Figura 5.8 – Campo de visão cônico, formado por um cone de 20° (Cano, 2002).

Tabela 5.9 – Valores de luminância da rodovia e arredores (Kcd/m^2) (Cano, 2002).

| Céu (L_c) | Rodovia (L_r) | Le (proximidades) | | | |
|---------------|-------------------|-------------------|-----------|-------|--------|
| | | Rochas | Edifícios | Neve | Campos |
| 8 | 3 | 3 | 8 | 15(V) | 2 |
| | | | | 15(H) | |
| 12 | 4 | 2 | 6 | 10(V) | 2 |
| | | | | 15(H) | |
| 16 | 5 | 1 | 4 | 5(V) | 2 |
| | | | | 15(H) | |

5.3. LUMINÂNCIA NA ZONA DE ENTRADA

Corresponde à área localizada imediatamente após a entrada do túnel. O nível exigido no início desta área é proporcional ao L_{20} através um fator k .

Para proporcionar ao condutor uma informação visual adequada na entrada, a iluminação deve ser pelo menos 10% da iluminação da área de acesso em um trecho de comprimento aproximadamente igual à distância de frenagem do veículo (entre 40 e 80 m para velocidades entre 50 e 100 km/h). Como ainda assim a luminosidade exigida é muito alta e representa um consumo de energia relevante, pode-se tentar impor medidas especiais para reduzi-la, como por exemplo a construção de um sistema de quebra-luz.

O fator k de relação entre os níveis na zona de acesso (L_{20}) e o nível na zona de entrada (L_{th}) depende de:

- ✓ O sistema de iluminação adotado: simétrico ou a contrafluxo;
- ✓ distância de segurança – DS;
- ✓ tipo de iluminação.

A luminância no ponto médio da zona de entrada (L_{th}), para a iluminação de classe superior, deverá estar entre 5% (para velocidade de projeto de 60 km/h) e 10% (para uma velocidade de aproximação de 100 km/h) da luminância de adaptação, para iluminação simétrica.

Outra medida poderia ser diminuir o limite de velocidade no túnel e fazer com que os veículos utilizem suas próprias luzes. Isto facilitará o processo de adaptação e reduz a distância de frenagem e, portanto, o comprimento da zona de entrada. Além disso, a utilização de materiais não reflexivos na pista de rolamento e nas fachadas da zona de acesso é conveniente para diminuir a luminosidade e outros brilhos de propriedades reflexivas na entrada, visando

maximizar a zona. Também é desejável evitar que a luz direta do sol atue como um fundo da entrada do túnel. Para isso deve-se cuidar da orientação geográfica, evitando quando possível o alinhamento leste-oeste dos portais porque esta é a trajetória natural (com variação ao longo do ano) do sol durante o período diurno, maximizar o tamanho da entrada, plantar árvores e arbustos que forneçam sombra sobre a estrada ou adotar outros artifícios. Finalmente, é possível criar uma zona iluminada, com refletores acesos, antes da entrada para incentivar o acompanhamento visual e capturar a atenção do motorista no túnel.

5.4. LUMINÂNCIA NA ZONA DE TRANSIÇÃO

A zona de transição corresponde à área seguinte à zona de entrada e termina no início da zona interior. O problema básico consiste em definir os níveis de iluminação que deverá ser fornecido ao motorista durante toda esta área, de modo que sua visão adapte-se gradualmente de forma segura a níveis cada vez mais baixos.

Como no final da zona de entrada o nível de luminância é ainda elevado, há a necessidade de reduzi-la aos níveis da zona central (ou interior). Para evitar os problemas de adaptação, esta diminuição ocorre gradualmente segundo um gradiente de redução ou na falta deste através de uma curva progressiva com relação 3:1 entre luminâncias. Esta curva (Figura 5.9), obtida empiricamente, depende da velocidade dos veículos e da diferença entre as luminâncias das zonas de entrada e central.

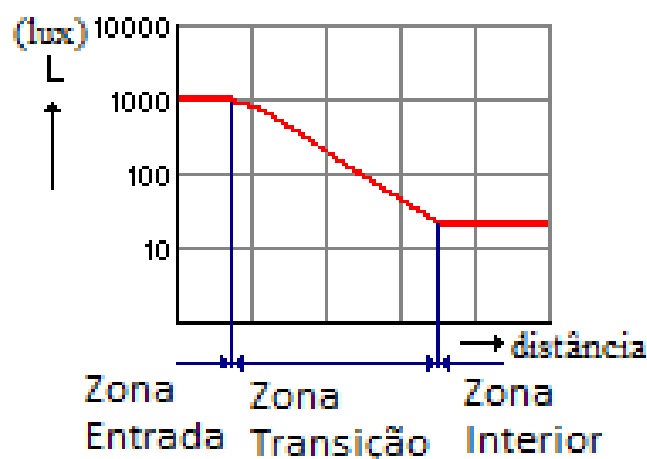


Figura 5.9 – Redução da curva de luminância

Segundo Cano (2002), a Figura 5.10 apresenta um exemplo de curva empírica indicando o valor mínimo de luminância que deve haver em relação ao nível da zona de entrada (100% L segundo a curva), a uma determinada distância desde o portal do túnel. A recomendação estabelece um conjunto de orientações para não haver saltos bruscos entre os diferentes níveis de iluminação.

A partir dos valores acima indicados para a luminância do pavimento no ponto médio da zona de entrada, estabelece-se uma lei da diminuição da luminosidade ao longo do túnel, que adapta as curvas de adaptação visual fisiológica, e é dada por:

$$L_{tr} = L_{th} \cdot (1.9 + t)^{-1.428} \quad (6.2)$$

Onde:

L_{tr} = Luminância da zona de transição

L_{th} = Luminância da zona de entrada

t: tempo em segundos.

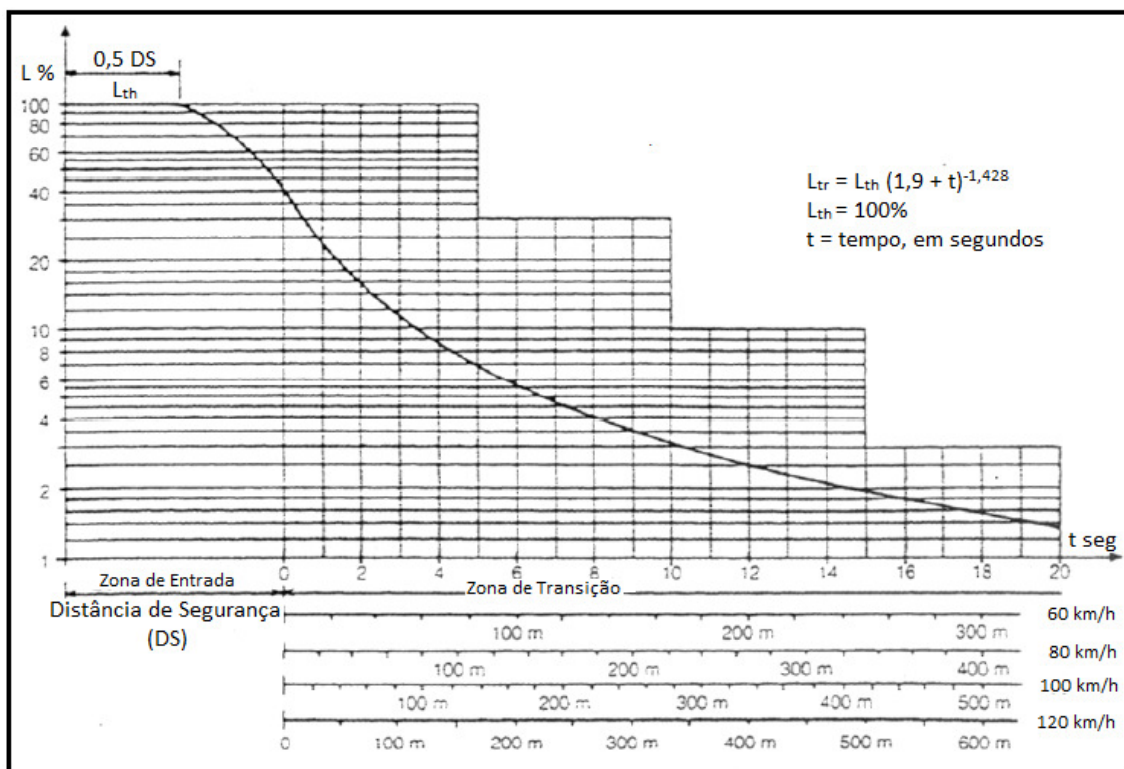


Figura 5.10 – Curva de adaptação visual (Buraczynski et al., 2010).

Normalmente no final da zona de entrada, a luminância do pavimento é de 40% da que existia em seu início, e a partir de então, já na zona de transição, reduz-se progressivamente o nível de luminosidade (L_{tr}) em 2 ou 3 etapas até se alcançar o nível da zona central ou interior. A redução da luminância entre cada duas etapas sucessivas não deve exceder 3:1. O comprimento de cada etapa é aproximadamente a distância de parada do veículo. O fim da zona de transição é alcançado quando a luminância é 3 vezes maior que da zona interior.

A luminância do piso e paredes (até uma altura de 2 m), da zona interna alcança o valor mínimo dentro do túnel, e seu nível continua constante em toda a área, pois presume-se que o condutor teve tempo de se adaptar a estes baixos níveis luminosidade. Os valores fixados para a luminância pavimento nesta área (L_{int}), em função da distância de parada, variam de 0,5 cd/m² (para iluminação de classe inferior e $V = 60$ km/h) e 10 cd/m² (para a classe superior e $v = 100$ km/h).

5.5. ILUMINAÇÃO NA ZONA INTERIOR

Na zona interior dos túneis a luminância permanece constante em baixos valores oscilando entre 0,5 e 10 cd/m², conforme a velocidade máxima permitida e a densidade de tráfego existente. Também é aconselhável que as paredes tenham uma luminosidade pelo menos igual à da pista, para não comprometer o nível de iluminação no interior.

Quando o condutor atinge esta zona, os olhos já foram adaptados desde os altos níveis de iluminação da área imediatamente externa do túnel aos baixos níveis da zona interior, de uma forma segura.

A luminância média das paredes de até 2 m de altura deve ser semelhante a iluminação do pavimento nesta parte do túnel.

O nível recomendado (Tabela 5.10) para a zona interior depende de:

- ✓ Distância de Segurança (DS); e
- ✓ Classe Iluminação.

Tabela 5.10 – Luminância em cd/m² na zona interior.

| Classe de Iluminação | Distância de Segurança | | |
|----------------------|------------------------|-------|-------|
| | 60m. | 100m. | 160m. |
| 1 | 0,5 | 2 | 3 |
| 2 | 1 | 2 | 4 |
| 3 | 2 | 3 | 5 |
| 4 | 2 | 3 | 6 |
| 5 | 2 | 4 | 6 |
| 6 | 3 | 5 | 8 |
| 7 | 3 | 6 | 10 |

5.6. ILUMINAÇÃO NA ZONA DE SAÍDA.

As condições de iluminação da zona de saída é menos críticas, isso porque a visão se adapta muito rapidamente ao passar de ambientes escuros para claros. Os veículos ou outros obstáculos são facilmente distinguidos porque suas silhuetas se destacam claramente sobre o fundo luminoso que forma a saída. Isto é ainda mais evidenciado se as paredes possuírem um elevado coeficiente de reflexão. Nestas condições, a iluminação serve mais como uma referência e na maioria dos casos níveis de 20 cd/m² é suficiente para se obter bons resultados.

O problema que surge na saída do túnel não é um problema de adaptação aos níveis exteriores, pois a mudança de luminosidade interna baixa para a externa alta não levanta problemas de adaptação ao olho.

O problema é a entrada da luz diurna na saída. Desse modo, deve ser reforçada iluminação em certos casos, para iluminar diretamente os veículos de modo que os menores fiquem perfeitamente visíveis, não aparecendo escondido atrás de veículos grandes, devido ao reflexo da luz do dia na saída do túnel.

5.7. ILUMINAÇÃO NOTURNA.

Cano (2002) recomenda que o valor mínimo para as classes 1 e 2 é de 0,5 cd/m² e para as classes 3 a 7 é de 1 cd/m².

Se o túnel está em uma rodovia bem iluminada recomenda-se uma iluminação de 1,5 a 2 vezes a do exterior.

Se a rodovia não é iluminada, recomenda-se iluminar a área imediatamente fora da do túnel com um comprimento igual a 2 vezes o DS ou, pelo menos, 200 m, com um nível mínimo de 1/3 da iluminação da zona de saída do túnel.

5.8. TÚNEIS DE CUMPRIMENTO REDUZIDO

O caso dos túneis curtos, que são uma parte significativa dos túneis da rede viária existente, é especial, afinal estes túneis curtos seriam quase que totalmente constituídos pela zona de entrada, o que levaria a uma iluminação muito potente e, portanto, com custos muito elevados. Por isso, recorre-se a soluções mais econômicas para reduzir a iluminação e/ou em certas condições, evitar a sua instalação.

Para túneis curtos que necessitam de iluminação durante o dia, a solução proposta nas recomendações da DGC é uma iluminação limitada durante o dia, com um nível igual ao maior dos seguintes: 3 vezes a luminosidade da zona interior de um túnel longo ($3xL_{int}$) ou 15 cd/m². Esta iluminação estará trabalhando somente quando a luminosidade da zona de acesso do túnel cair para níveis abaixo de 150 cd/m². Estes túneis requerem iluminação de noite apenas se as vias de acesso são iluminadas.

5.9. EQUIPAMENTOS DE ILUMINAÇÃO

As lâmpadas usadas em túneis caracterizam-se por uma elevada eficiência luminosa e longa vida útil. Para isso, utilizam-se normalmente lâmpadas fluorescentes ou de vapor de sódio de baixa pressão em linhas contínuas nas paredes ou no teto. Na entrada, onde as exigências luminosas são maiores, instalam-se lâmpadas halógenas de metal ou de vapor de sódio de alta pressão.

No caso das luminárias, estas devem ser robustas, impermeáveis, resistentes à agressão dos gases de escape e produtos de limpeza. Além de ser de fácil instalação, acesso e manutenção. Devido aos gases e partículas em suspensão é recomendável uma limpeza periódica. Este momento pode também ser aproveitado para a substituição das lâmpadas desgastadas, ainda que seja bastante aconselhável estabelecer um plano de substituição regular de todas as luzes ao mesmo tempo, conforme o ciclo de vida das mesmas para garantir um nível de iluminação ótima.

A distribuição das luminárias é muito importante para assegurar a distribuição uniforme de luz sobre a pista de rolamento, controlar o nível de luminosidade, e assim por diante. Mas,

além disso, os túneis têm duas dificuldades adicionais: o efeito zebra e o efeito de cintilação ou *flicker*. O efeito zebra é produzido pelo aparecimento sucessivo de áreas claras e escuras onde o condutor pode sentir uma sensação de tontura devido a baixa uniformidade de iluminação no túnel. O efeito de cintilação ou flicker é causado por mudanças periódicas dos níveis de luminância (reflexos, luzes) no campo visual de acordo com frequências críticas (entre 2,5 e 15 ciclos por segundo) que causam desconforto e tontura. Isso pode ser evitado colocando-se as luminárias em linhas contínuas ou com uma separação adequada.

As condições de iluminação no exterior variam com o tempo e a hora do dia, por isso é aconselhável instalar um sistema de ajuste automático da iluminação interior. Este ajuste deve ser feito de forma gradual, com variações entre os estados inicial e final, abaixo de 3 para 1. Para simplificar, distingue-se três níveis de iluminação: diurno, noturno e crepuscular para dias nublados.

De acordo com o USDOT Federal Highway Administration, lâmpadas fluorescentes produzem maior distribuição uniforme de iluminação quando comparado com iluminação de fonte pontual. As maiores vantagens das lâmpadas fluorescentes são a rápida inicialização e a alta reprodução de cores. No entanto, seu grande tamanho dificulta o trabalho de manutenção, e lâmpadas com tempo de vida maiores requerem investimentos especiais e de maior custo inicial. Lâmpadas fluorescentes tradicionais possuem baixa eficácia (Lumens/watt); mais lâmpadas são necessárias para criar os mesmos níveis de iluminação de outras fontes de luz. Além disso, seu grande porte e vulnerabilidade faz com que a manutenção se torne mais difícil e cara.

Desde que as normas em vigor nos Estados Unidos passaram a exigir níveis de luminosidade elevados na zona de entrada, a iluminação por fontes pontuais tem sido preferível na iluminação linear. A iluminação por fonte pontual pode ser facilmente controlada e redirecionada, além de proporcionar as lâmpadas mais eficazes do mercado atual. Os tipos mais comuns de iluminação por fonte pontual são as que adotam lâmpadas de alta pressão de vapor de sódio e as lâmpadas halógenas metálicas. Lâmpadas de sódio de alta pressão apresentam muitas vantagens, tais como o prolongamento da vida da lâmpada, a mínima depreciação do fluxo luminoso e o tamanho reduzido da lâmpada, o que favorece os serviços de manutenção. Seu uso, porém, é limitado pela pobre reprodução de cores. As lâmpadas halógenas metálicas fornecem luz branca com boa reprodução de cores, aparência atraente, alta eficácia e longa vida útil da lâmpada. Estas lâmpadas são adequadas para intervalos de baixa iluminação e baixa altura de montagem.

Embora a fonte pontual seja o sistema preferido para a iluminação do túnel, a sua descontinuidade cria o citado “efeito flicker” causado por alterações de luminosidade periódica e o espaçamento das luminárias. Isso pode ser reduzido com o devido ajuste do espaçamento entre luminárias.

5.9.1 TECNOLOGIA ATUAL E TENDÊNCIAS

Segundo Buraczynski et al. (2010), LEDs e lâmpadas de eletrodos são as tecnologias mais recentes e a expectativa é que sejam o futuro potencial de sistemas de iluminação de túneis.

LEDs são diodos semicondutores que convertem energia elétrica em luz visível e são capazes de reproduzir muitas faixas de cores, sem filtros de cor. Eles operam em baixa tensão, apresentam alta eficácia, e acendimento instantâneo. No entanto, os LEDs ainda não são adequados para a iluminação de túneis por causa de sua configuração complexa, e as inconsistências de cor, vida útil das lâmpadas e segurança.

Lâmpadas de eletrodo funcionam sob uma combinação de indução e de descarga de gás com uma alta reprodução de cor de luz branca. Estas lâmpadas possuem uma vida mais longa devido à falta de filamentos e uso de indução magnética. Dois tipos de lâmpadas de eletrodo em uso nos Estados Unidos são os IcetronTM e a lâmpada de indução QLTM. Em vez do uso de eletrodos, a IcetronTM produz luz com a excitação de um campo magnético de rádio-frequência. Em uma lâmpada de indução QLTM, o núcleo e a potente bobina acopladora produz um campo magnético que é então usado para ativar uma corrente elétrica secundária em um vapor de mercúrio contido em um bulbo.

5.9.2 DISPOSITIVOS DE REGULAÇÃO

A programação automática ou regulagem do sistema de iluminação do túnel será normalmente baseado na iluminação dos acessos (ligada ao nascer e pôr do sol), e visibilidade na zona interior do túnel. Contudo, convém considerar a possibilidade de combinar este tipo de regulagem com uma manual para unidades em circunstâncias especiais.

O sistema de iluminação pode ser controlado por células fotoelétricas ou luminômetros situados no exterior do túnel, em uma ou ambas as zonas de acesso do túnel, a uma distância do portal igual à de frenagem (na ordem de 50 a 100 m), ou no interior do túnel para

monitorar os sistemas de iluminação e ventilação. No caso de túneis curtos seria suficiente a instalação de detectores mais simples, como relógios astronômicos.

Recomenda-se que esses detectores sejam temporizados para acionar a mudança de iluminação com vários minutos de retardo, em respeito a variação de iluminação exterior, assim evitando mudanças muito rápidas, freqüentes e desnecessárias, devido a circunstâncias fortuitas e ocasionais (ocultação de luz natural no fotômetro devido a passagem de uma nuvem, a luz direta do farol de um veículo durante a noite etc).

É importante frisar que é mais conveniente a utilização de luxímetros do que células fotoelétricas, porque reproduz mais fielmente o campo de visão do condutor. Salienta-se que todos estes dispositivos requerem uma revisão e calibração, pelo menos anualmente.

5.10. MANUTENÇÃO

Nos túneis, visando garantir em bom estado de conservação do sistema de iluminação e manter níveis ótimos, faz-se necessário realizar uma série de operações regulares, como limpeza das lâmpadas e luminárias, paredes e pavimento. Além disso, os níveis de visualização são garantidos por um sistema de ventilação eficaz que remova fumaças, gases e partículas em suspensão que dispersam a luz. Ressalta-se que para maximizar a iluminação interior do túnel deve-se adotar materiais para o teto, paredes e pavimento que sejam altamente reflexivos, sem brilho, de fácil limpeza e resistentes a condições adversas (poeira, fumaça, material de limpeza, vandalismo etc).

5.11. REVESTIMENTO

Paredes de concreto ou outros materiais de capacidade de reflexão de raios luminosos reduzida costumam causar problemas para o trânsito nos túneis e passagens inferiores devido ao baixo nível de iluminação proporcionado, ocasionando acidentes na região do túnel. As paredes do túnel devem possuir capacidade reflexiva igual ou superior ao material utilizado no piso, a fim de otimizar o sistema de iluminação do túnel, beneficiando a segurança dos condutores.

A Figura 5.11 apresenta um sistema de revestimento por meio da instalação de painéis nas paredes de um túnel. Estes painéis devem possuir coloração clara, propiciando melhor

reflexão dos raios luminosos, beneficiando o sistema de iluminação, além de também provocar uma benéfica sensação psicológica de bem estar no interior do túnel.



Figura 5.11 – Painéis no Interior de um Túnel.

Se possível e caso seja viável, é recomendável que as paredes do túnel não sejam revestidas diretamente de concreto, pois este material está inevitavelmente sujeito a absorver a poeira e fuligem da combustão de veículos usados. Dessa forma, sua superfície, que já é cinza, torna-se ainda mais escura ao longo do tempo, prejudicando o perfeito funcionamento do sistema de iluminação.

É recomendável que os painéis de revestimento de túnel sejam constituídos de materiais resistentes (poeira, vandalismo, fuligem, fumaça etc), laváveis e, se possível, recicláveis.

A Figura 5.12 ilustra a instalação de painéis na região de emboque de um túnel.



Figura 5.12 – Painéis Desde a Zona de Acesso.

6. VENTILAÇÃO

O Japão e a Noruega são os países que mais evoluíram na tecnologia de ventilação de túneis rodoviários, por isso este capítulo foi elaborado a partir de interessantes contribuições das técnicas de ventilação que estes dois países apresentam.

O objetivo principal da ventilação de um túnel, conforme Child & Associates (2004), é o de assegurar que os poluentes potencialmente perigosos, incluindo monóxido de carbono e partículas em suspensão, que estão presentes nas emissões dos veículos a motor, serão diluídos e eliminados, e que os níveis nocivos destas substâncias não se desenvolverão.

Túneis curtos podem ser adequadamente, e com segurança, ventilados pelo fluxo de ar natural, sem a instalação de um sistema de ventilação mecânico. A Child & Associates (2004) fornecem uma regra simplificada, porém efetiva, para avaliar a necessidade de ventilação mecânica:

- ✓ Para rodovias de mão dupla, com duas faixas de rolamento: $L \times N > 600$, e
- ✓ Para rodovias de mão única, com duas faixas de rolamento: $L \times N > 2000$

Onde, L = comprimento do túnel (km),

N = volume do tráfego (veículos por hora)

Usando esta orientação, e considerando condições de tráfego em uma rodovia uni-direcional (mão única) com duas faixas de rolamento, um túnel de dois quilômetros suportando mil veículos por hora provocaria a exigência de alguma forma de sistema de ventilação mecânica.

6.1. SISTEMAS DE VENTILAÇÃO

Para melhor compreensão deste tópico, será apresentada a seguir uma descrição generalizada dos sistemas de ventilação atualmente empregados no mundo.

6.1.1 VENTILAÇÃO LONGITUDINAL

Na análise de Child & Associates (2004), o sistema de ventilação longitudinal baseia-se no princípio da transmissão por impulso. Em túneis de ventilação longitudinal, a circulação natural do ar ao longo do túnel é forçada por meio de ventiladores instalados na abóbada. Isto tem o efeito de injetar energia cinética no fluxo de ar do túnel, facilitando o movimento do ar em direção à saída ou pontos específicos previamente definidos em projeto.

A ventilação longitudinal é geralmente empregada em túneis rodoviários com até 2 quilômetros de comprimento, mas é eficaz nos túneis de até cinco quilômetros de comprimento, onde o tráfego no túnel é unidirecional. Se o sistema de ventilação geral do túnel puder ser dividido em várias seções, comprimentos maiores de túnel podem ser efetivamente ventilados por um sistema longitudinal.

As Figuras 6.1 e 6.2 apresentam de forma esquemática este tipo de ventilação.

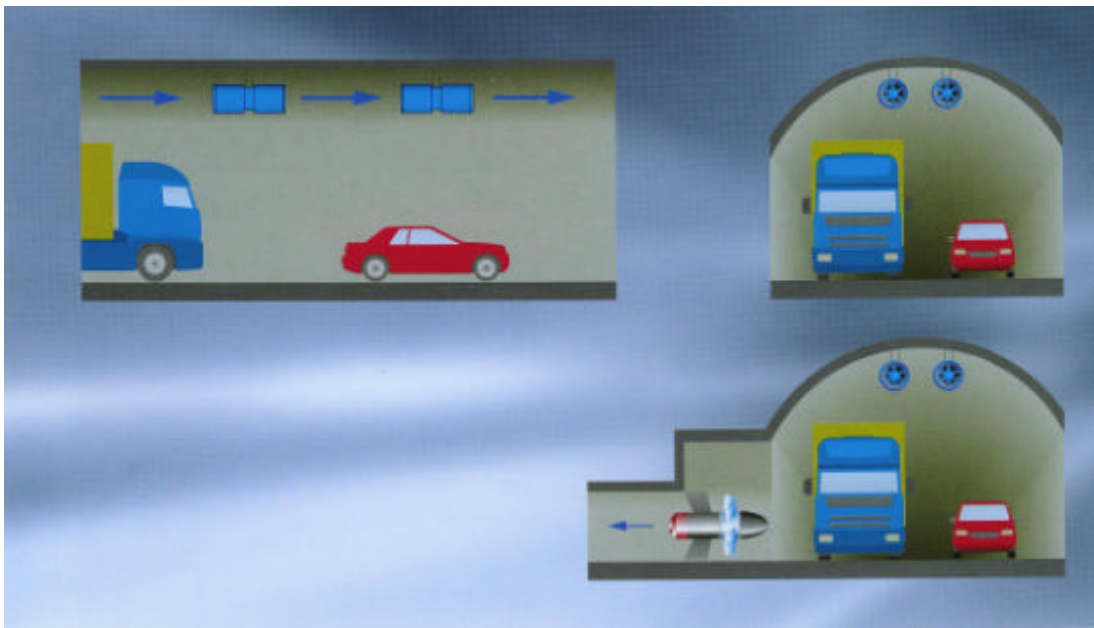


Figura 6.1 – Ventilação longitudinal em túneis rodoviários (Child & Associates, 2004).

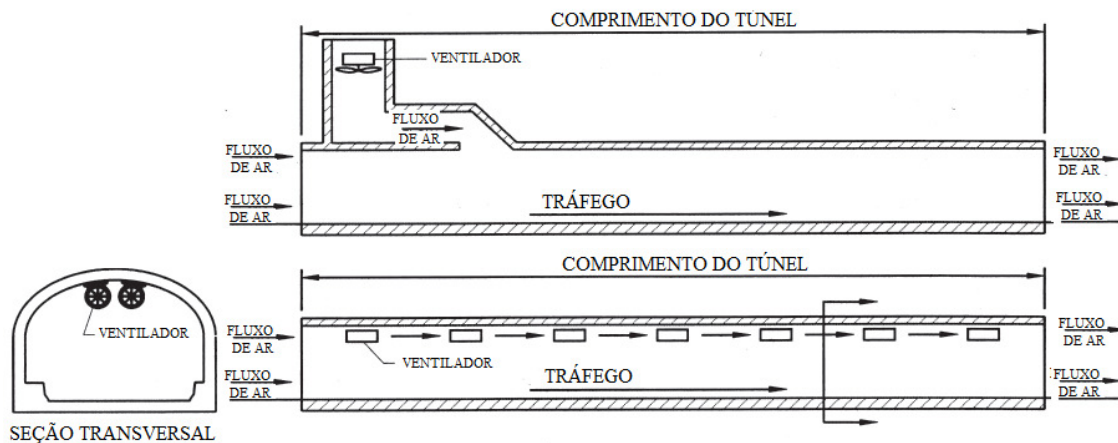


Figura 6.2 – Perfil esquemático do sistema de ventilação longitudinal em túneis rodoviários (FHWA, 2004).

Para Redaelli (1999), em túneis com até 1 km de comprimento recomenda-se a utilização da ventilação do tipo longitudinal, por desempenhar competentemente as funções de ventilação e eliminação de gases nocivos a um menor custo.

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

6.1.2 VENTILAÇÃO TRANSVERSAL

O sistema de ventilação transversal, segundo Child & Associates (2004), difere da longitudinal ao passo que o ar fresco é injetado e extraído uniformemente ao longo do túnel. O nome do sistema deriva do fato de que o ar flui transversalmente à circulação do tráfego, ao invés de longitudinalmente, ou na direção do espaço de tráfego. A injeção de ar fresco é realizada por aberturas nas laterais do piso do túnel, assim como a extração do ar viciado é feita pelo teto.

Segundo Redaelli (1999), o sistema de ventilação transversal é amplamente empregado em túneis rodoviários com tráfego pesado e de grande extensão (acima de 1 km). Além disso,

esse sistema de ventilação pode ser utilizado em túneis curtos, cujo volume de tráfego seja muito intenso.

As Figuras 6.2 e 6.3 apresentam um esquema desse tipo de ventilação.

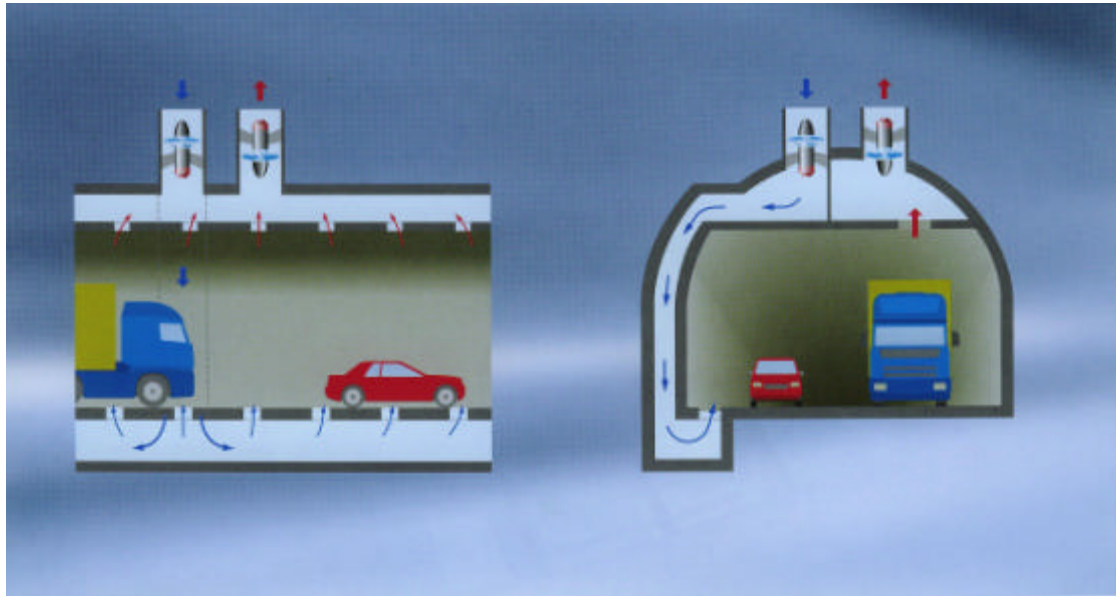


Figura 6.3 – Ventilação transversal em túneis rodoviários (Child & Associates, 2004).

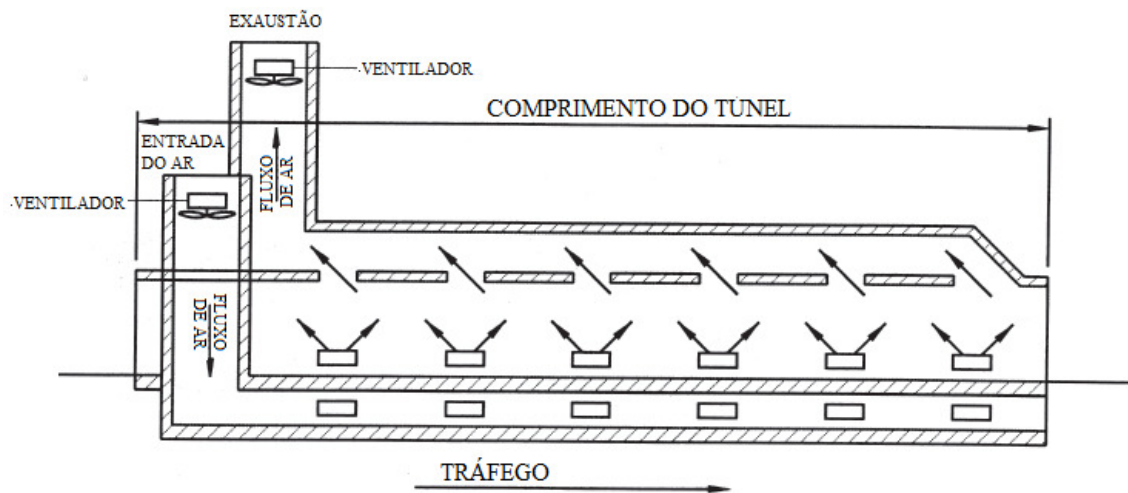


Figura 6.4 – Perfil esquemático do sistema de ventilação transversal em túneis rodoviários (FHWA, 2004).

Neste tipo de ventilação, um forro falso acima da abóbada é dividido em dois septos: um destinado à insuflar ar puro e outro à aspirar o ar poluído (ver figura 6.3). No portal do túnel

(Figura 6.4) são situados ventiladores centrais com torres de extração para o ar poluído e de aspiração de ar puro. A regulagem da ventilação é feita da mesma maneira, ou seja, ligando ou desligando um certo número de ventiladores ou aumentando ou diminuindo a velocidade de rotação

6.1.3 VENTILAÇÃO SEMI-TRANSVERSAL

Como bem analisou Child & Associates (2004), o sistema de ventilação semi-transversal envolve uma combinação de ventilação longitudinal e transversal. Uma aplicação comumente utilizada é o sistema semi-transversal de injeção, em que o ar fresco é fornecido uniforme (e transversalmente) ao longo do comprimento do túnel, e o ar de escape é removido longitudinalmente através dos portais do túnel. Uma opção alternativa seria o sistema semi-transversal de exaustão, onde o ar fresco é fornecido "longitudinalmente" desde os portais e o ar viciado é removido de maneira uniforme (e transversalmente) ao longo do comprimento do túnel.

Esse sistema é comumente empregado em túneis de médio comprimento, com volume de tráfego de médio a pesado. As Figuras 6.5 e 6.6 apresentam simplificada este tipo de tecnologia.

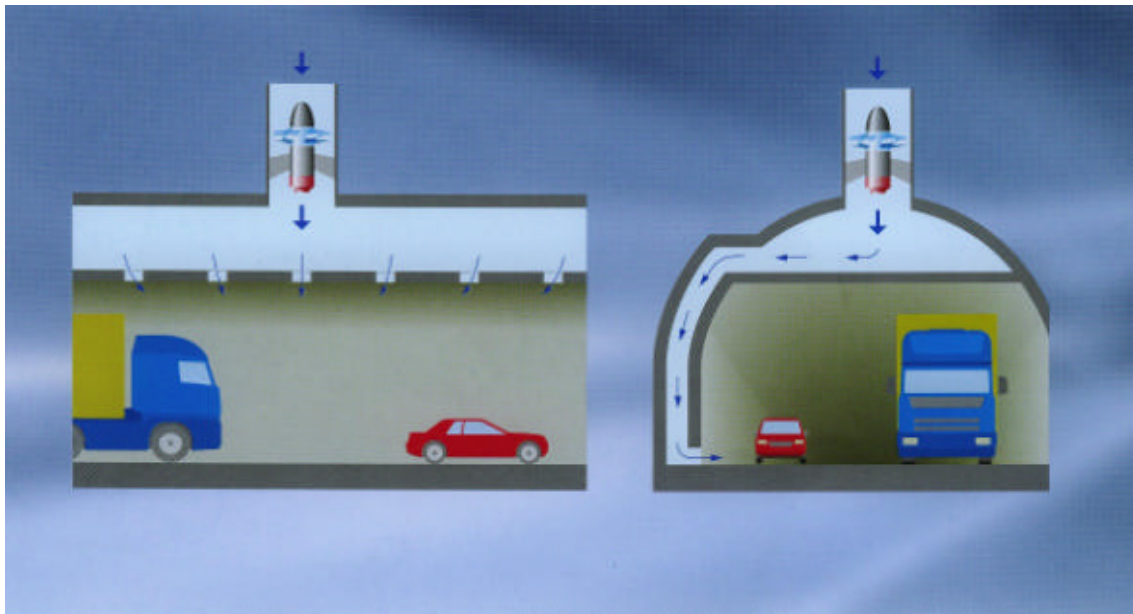


Figura 6.5 – Ventilação semi-transversal em túneis rodoviários(Child & Associates, 2004).

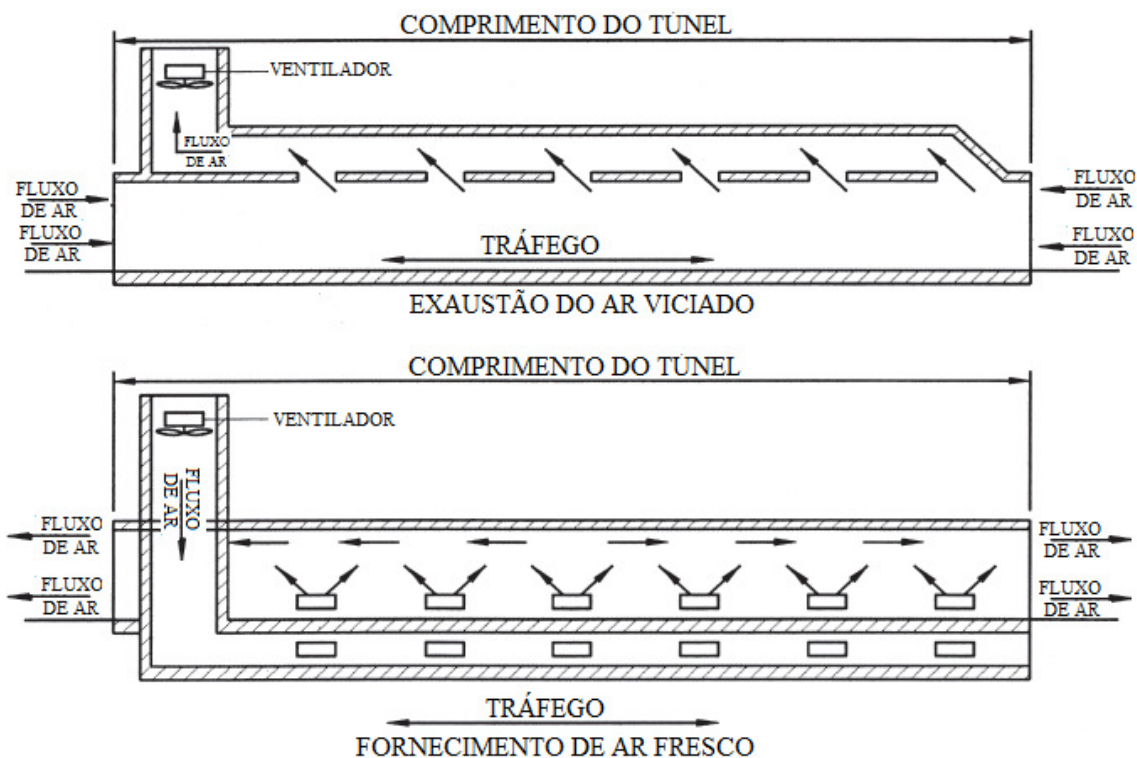


Figura 6.6 – Perfil esquemático do sistema de ventilação semi-transversal em túneis rodoviários (FHWA, 2004).

6.2. TECNOLOGIA DE TRATAMENTO DE EMISSÕES

6.2.1 PRECIPITAÇÃO ELETROSTÁTICA

Precipitadores eletrostáticos (normalmente conhecidos como ESP's ou EP) são utilizados para controle de emissão de partículas por mais de 90 anos e possuem várias aplicações industriais. ESP's normalmente são bastante eficazes para remover partículas do fluxo de ar. Contudo, esta tecnologia também vem sendo bastante empregada em países mais desenvolvidos para a remoção de sujeiras e partículas nocivas presentes no ar em túneis rodoviários.

Segundo Child & Associates (2004), este tipo de tratamento envolve três passos básicos:

- i. Aplicação de carga elétrica nas partículas a serem coletadas através de descargas elétricas de alta voltagem;
- ii. Coleta das partículas carregadas na superfície através de eletrodos carregados eletricamente com carga oposta;
- iii. Remoção das partículas coletadas por algum processo adequado.

6.2.2 PRECIPITAÇÃO ELETROSTÁTICA “SECA” (ESP SECA)

A precipitação eletrostática seca (ESP “seca”) é constituída por duas fases, uma fase que apresenta uma coroa de fios e uma fase de placas coletoras, conforme ilustrado na Figura 6.4. Os fios são mantidos em vários milhares de volts, o que produz uma coroa que libera elétrons para o fluxo de ar. Estes elétrons anexam-se às partículas de poeira, dando a elas uma carga líquida negativa. As placas coletoras são estrategicamente instaladas no solo para atrair as partículas de poeira carregadas.

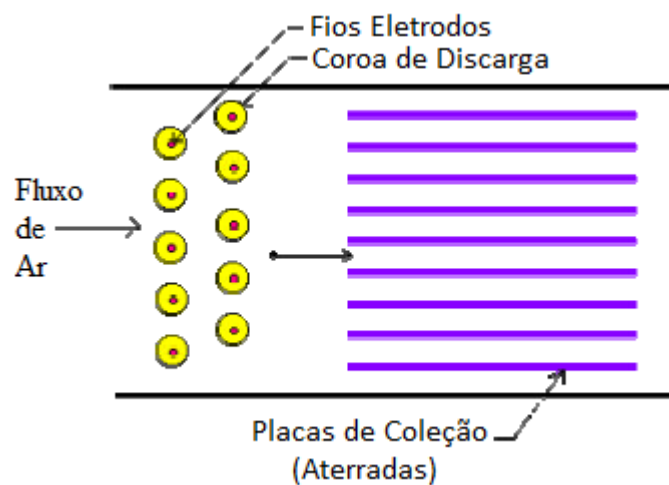


Figura 6.7 – Precipitação eletrostática “seca” (Child & Associates, 2004).

As placas coletoras devem ser periodicamente limpas por agitação mecânica para remover a poeira coletada, que em seguida cai em funis localizados logo abaixo. A maioria dos sistemas de precipitação eletrostática também requerem um procedimento regular de lavagem e limpeza das placas de coleta para remover partículas recolhidas, e manter a eficiência operacional. Processos convencionais ou ESP seco são eficazes na remoção de partículas entre 1 e 10 microns de diâmetro. Variados resultados foram eficientemente observados e relatados em relação a remoção de partículas sub-mícron.

6.2.3 PRECIPITAÇÃO ELETROSTÁTICA “ÚMIDA” (ESP ÚMIDA)

A precipitação eletrostática “úmida” difere da ESP seca, principalmente no mecanismo pelo qual os eletrodos de coleta são limpos, e as partículas coletadas são removidas. Em uma típica ESP úmida, como o ilustrado na Figura 6.5, um processo de lavagem contínuo é utilizado para

limpar os eletrodos de coleta, em substituição da agitação mecânica adotada na ESP seca. O ambiente úmido também cria um potencial favorável para a remoção total ou parcial de gases solúveis poluentes, e auxilia na retenção e remoção de partículas ultra-finas.

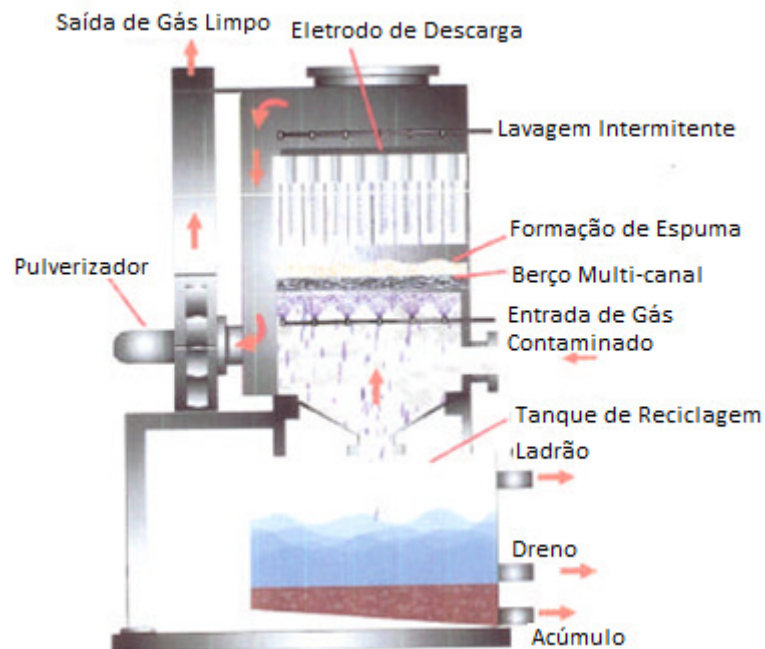


Figura 6.8 – Precipitação eletrostática “úmida” (Child & Associates, 2004).

Alguns sistemas convencionais de ESP's envolvem um processo de lavagem automático para a limpeza periódica das placas de coleta, e removem as partículas coletas. Entretanto, este método não se confunde com a ESP úmida, pois este último requer um ambiente continuamente úmido.

6.2.4 DESNITRIFICAÇÃO

Desnitrificação, ou "DeNOX", refere-se a sistemas ou processos de remoção de dióxido de nitrogênio, e outros óxidos ou nitrogênios, presentes no ar de túneis rodoviários. Existem uma série de sistemas alternativos para esta técnica que podem ser adotadas, mas a maioria dos sistemas de DeNOX fundamentam-se em absorção química ou em processos catalíticos.

Absorção química envolve o uso de uma substância química que é capaz de remover o gás contaminante por absorção ou "ligação" do poluente. Por exemplo, hidróxido de potássio pode ser usado para absorver dióxido de nitrogênio. O dióxido de nitrogênio é um gás ácido

que combina quimicamente com o hidróxido de potássio, que por sua vez é um óxido alcalino.

Carvão ativado é um material que pode ser utilizado para absorver uma gama de gases contaminantes, incluindo os hidrocarbonetos.

Processos catalíticos envolvem a utilização de materiais conhecidos como catalisadores. Estes materiais, que incluem metais como platina, iniciam a conversão de gases contaminantes para menos nocivos ou gases benignos. Os catalisadores não são alterados ou consumidos pelo processo, por isso um processo contínuo e de longo prazo é possível.

6.2.5 ABSORÇÃO

A absorção química foi mencionada no tópico acima, em relação a desnitrificação. Absorção também pode ser usada para remover uma série de outros poluentes. Por exemplo carbono ativado, que tem uma elevada área superficial, tem a capacidade de absorver um grande número de gases poluentes.

Materiais como zeolita também têm a capacidade de absorver espécies poluentes, e são utilizados para este fim em uma série de aplicações de filtração.

6.2.6 BIOFILTRAÇÃO

Este é o termo geral utilizado para descrever processos em que o ar contaminado é passado sobre ou através de algum meio contendo microorganismos capazes de consumir, converter ou remover alguns ou todos os poluentes nocivos presentes.

As Figuras 6.6 e 6.7 ilustram os princípios básicos do processo.

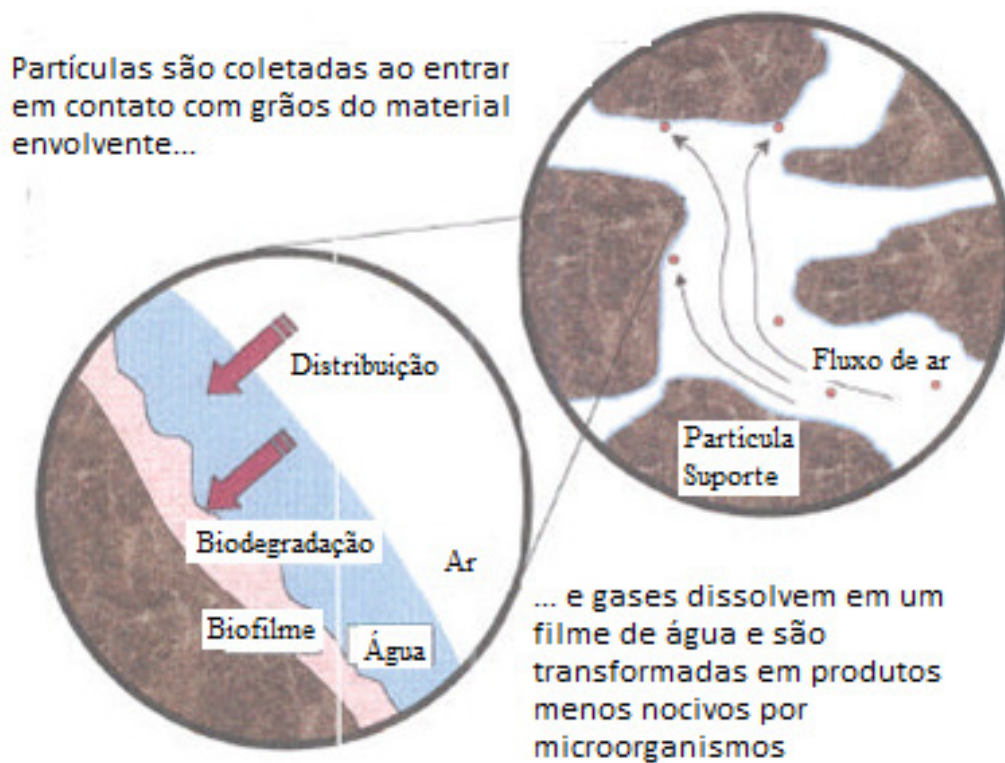


Figura 6.9 – Mecanismo Típico de Biofiltração (Child & Associates, 2004).

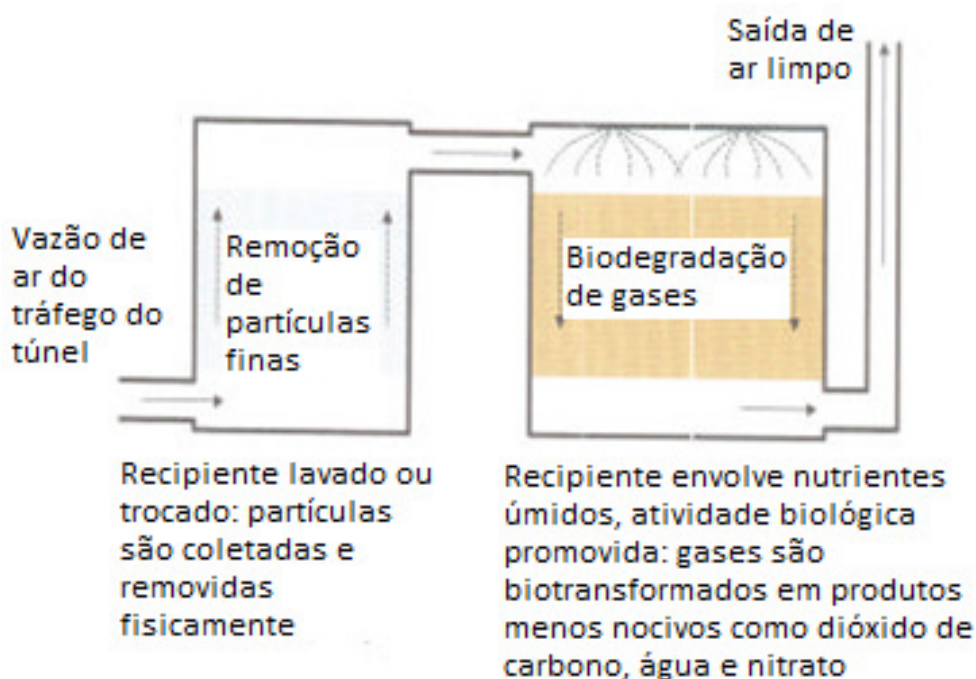


Figura 6.10 – Processo Típico de Biofiltração (Child & Associates, 2004).

6.2.7 AGLOMERAÇÃO

Aglomeração é um processo eletrostático pelo qual as cargas elétricas opostas são aplicadas a partículas muito finas suspensas no ar, levando-as a combinar ou "aglomerar" em partículas maiores, que podem ser mais facilmente removidas por outros processos.

6.2.8 PURIFICAÇÃO

O método de purificação representa uma série de processos em que o ar contaminado é forçado a atravessar um líquido de lavagem, e os poluentes são arrastados ou dissolvidos no líquido.

6.2.9 MÉTODO DAS TURBINAS

O método das turbinas se refere ao uso de micro-turbinas de alta eficiência que removem uma série de poluentes provenientes dos processos de combustão. Em termos gerais, o fluxo de ar contaminado atravessa uma turbina, e o processo de alta temperatura de combustão é utilizado para converter poluentes em gases menos nocivos ou benignos. Por exemplo, a combustão a alta temperatura tem o potencial para converter o prejudicial monóxido de carbono em dióxido de carbono, relativamente benigno, e gases hidrocarbonetos em dióxido de carbono e água.

Esse método requer a injeção de um gás combustível, como o metano (gás natural), e gera grandes quantidades de calor, produzindo óxidos de nitrogênio, como resultado da combustão a altas temperaturas. Esses fatores requerem projetos e sistemas de controles específicos. Turbinas também podem ser utilizadas para gerar eletricidade, o que contribui para reduzir o custo operacional líquido do tratamento de emissões e sistema de ventilação geral.

6.3. TRATAMENTO DO AR EM TÚNEIS PELO MUNDO

Existem diversas tecnologias de tratamento de emissões de gases no interior de túneis em aplicação em vários países. A tecnologia adotada em cada país tende a seguir seu nível de desenvolvimento tecnológico e financeiro.

No Japão, a RTA (2004) registra que precipitadores eletrostáticos têm sido empregados em mais de quarenta túneis rodoviários. Seu uso baseia-se em vários fatores, incluindo o

desenvolvimento de técnicas que aprimoram a visibilidade e a performance da ventilação associada. Tecnologias de remoção de dióxido de nitrogênio e de outros óxidos de nitrogênio têm sido desenvolvidas e testadas neste país, e o uso dessas tecnologias estão sendo aprovadas para a utilização nos túneis rodoviários japoneses. Esses fatores contribuem para o aumento da performance de sistemas de ventilação longitudinal e para os fins ambientais e de controle de poluição.

Na Noruega, a Public Road Administration (2001) noticiou que foram instaladas recentemente tecnologias híbridas de equipamentos de precipitação eletrostática. Entretanto, os dados da performance destes equipamentos ainda não são conhecidos.

As autoridades francesas do ramo rodoviário estão considerando a utilização de tecnologias de tratamento de emissões no maior túnel rodoviário de Paris.

Os italianos instalaram em cada portal do túnel Cesena a primeira tecnologia de tratamento de emissões em um túnel rodoviário europeu, fora da Europa Escandinávia.

Nos Estados Unidos não a ocorrência de sistemas de tratamento de emissões é recente. Recentemente, autoridades americanas consideraram a utilização destes sistemas no projeto das Artérias de Boston, e no túnel rodoviário que está em construção em Chicago destinado ao tráfego pesado.

Apesar de contar com uma extensa malha rodoviária e várias centenas de quilômetros de túneis, não há registros de equipamentos de limpeza do ar ou tecnologias de filtração nos túneis alemães.

Não há registros de sistemas de tratamento do ar em túneis brasileiros. Algumas normas brasileiras abordam de forma superficial as exigências quanto ao controle de fumaça e de qualidade do ar.

7. DRENAGEM E IMPERMEABILIZAÇÃO

A drenagem e impermeabilização de túneis é um conceito complexo pelo número de fatores que podem ser envolvidos. Estritamente poderia compreender somente medidas destinadas a canalizar e conduzir as águas que podem afetar o túnel. Entretanto, adverte-se que as implicações do método construtivo e do meio-ambiente são numerosas e importantes e não podem ser ignoradas. Ademais, é importante observar que os sistemas de drenagem e impermeabilização possuem bastante proximidade, tanto no que se refere a conceito quanto a função. Por isso, esses dois temas são tratados de forma harmônica dentro de um só capítulo.

Para Caja (2005), deve-se ter em mente o período da vida útil do túnel considerado, ou seja, suas etapas de projeto, construção e operação, pois cada etapa apresenta circunstâncias referentes à ação a ser tomada na gestão das águas. Entretanto, é necessário prever em cada etapa o que pode acontecer nas etapas seguintes.

Por outro lado, a construção do túnel pode afetar algum espaço do ponto de vista hidráulico, seja na superfície ou entre esta e o túnel, e isso pode levar a uma série de alterações no entorno ou causar problemas no próprio túnel, que devem ser levados em conta.

Além da dupla dimensão espacial-temporal indicados acima, existem outras variáveis que podem também influenciar na drenagem do túnel, como a funcionalidade ou o uso a que está destinado e o método construtivo adotado.

Dessa forma, observa-se a multiplicidade de fatores envolvidos no tema, por isso este capítulo foi elaborado para fornecer uma visão sintética dos problemas a este respeito e os tratamentos normalmente adotados em suas soluções.

7.1. VISÃO GLOBAL

A Tabela 7.1 apresenta a relação espacial-temporal os possíveis aspectos que podem estar relacionados com a drenagem de um túnel. Entretanto deve-se ter sempre em mente que dependendo da funcionalidade e das características do terreno em que o túnel será executado, outros aspectos podem ser analisados. Contudo, os aspectos resumidos na Tabela 7.1 são os mais frequentemente encontrados.

Tabela 7.1 – Relação espacial-temporal da água com o túnel (Caja, 2005).

| ETAPA | LOCALIZAÇÃO | | |
|------------|---|--|---|
| | SUPERFÍCIE | ENTRE O TÚNEL E A SUPERFÍCIE | TÚNEL (INTERIOR) |
| PROJETO | Estudos de drenagem relacionados com o abatimento do nível freático. | Estudo hidrogeológico. | Estudos dos dispositivos de impermeabilização e drenagem de líquidos oriundos do solo ou de veículos. |
| | Possível interferência em edificações, infraestruturas ou instalações. | Possível interferência em aquíferos. | |
| | Possível interferência em massas de água (recreação, correntes fluviais etc). | Possível contaminação do solo ou aquíferos. | |
| CONSTRUÇÃO | Monitoramento e controle de fluxos de águas superficiais. | Confirmação das estimativas de projeto (controle e monitoramento da vazão de infiltração). | Medidas para minimizar a interferência nos trabalhos durante a obra. |
| | Possíveis medidas | Se necessário, possibilidade de novas | Utilização dos elementos de drenagem |

corretivas,

| | | | |
|-----------------|---|--|--|
| | contempladas ou não no projeto. | | |
| | Monitoramento do controle de edificações ou serviços (relacionados com o nível freático). | medidas de drenagem e reestudos de interferências no aquífero. | previstos no projeto. |
| OPERAÇÃO | Monitoramento dos movimentos permanentes do solo. | Controle e manutenção das medidas de drenagem e impermeabilização. | Manutenção de todos os dispositivos de drenagem. |
| | Obras de reforço ou recuperação, se necessário. | Obras de reparação se necessário. | Manutenção dos dispositivos de armazenamento e tratamento das vazões acidentais. |

Nos itens a seguir será desenvolvido um estudo relacionando a drenagem dos túneis com as etapas de sua execução no tempo, ou seja, projeto, construção e operação, enfatizando-se os aspectos predominantes em cada uma destas etapas, sabendo-se que cada etapa está condicionada pela anterior.

7.2. DRENAGEM DURANTE O PROJETO

Resumidamente, pode-se afirmar que o estudo da drenagem do túnel durante o projeto baseia-se fundamentalmente em seus estudos hidrogeológicos.

Ainda segundo Caja (2005), deve-se considerar, nesta etapa, principalmente, dois fatores:

- ✓ A estreita conexão que se observa entre os aspectos geológicos, geotécnicos e hidrogeológicos; e
- ✓ A complexa relação no aspecto hidráulico do túnel com o terreno em que se escava.

Quanto ao primeiro fator, está claro que os acidentes geológicos estão estreitamente relacionados com uma possível vazão de água em direção ao túnel. Também fica evidente que um dos principais objetivos das investigações geotécnicas se destina ao estudo da permeabilidade das formações atravessadas pelo túnel, além dos próprios acidentes geológicos. É, portanto, evidente a relação entre os lados do triângulo geologia-geotecnia-hidrogeologia e, por isso, é necessário realizar o estudo conjunto dos mesmos, de maneira equilibrada.

No que se refere ao segundo fator, deve-se considerar que o túnel atua como um dreno capaz de captar as águas do solo que atravessa e, também, pode conectar uns aquíferos com outros ou proporcionar, devidos às descargas que ocorrem dentro do túnel, água ou outros líquidos ao solo. Isso pode provocar problemas, tanto durante a construção quanto na operação, não somente para o túnel, mas para todo o entorno. Por isso, faz-se necessário um estudo rigoroso de toda esta problemática ao projetar o túnel.

7.3. ESTUDOS GEOLÓGICO, GEOTÉCNICO E HIDROGEOLÓGICO DO TÚNEL

É conveniente o planejamento conjunto dos estudos geológicos, geotécnicos e hidrológicos devido à estreita relação existente entre eles.

Assim, desde o princípio dos estudos geológicos e geotécnicos deve-se prestar atenção especial aos aspectos hidrogeológicos que afetará o fluxo atravessado pelo túnel. O mapeamento geológico deve recolher com detalhe a presença de dobras, falhas, diques e contatos entre formações de diferentes permeabilidades, e analisar a consequência dos mesmos, não somente do ponto de vista geomecânico, mas também hidráulico.

Dessa forma, no estudo geológico, deve-se demandar uma atenção especial aos seguintes aspectos:

- ✓ A litologia, estratigrafia e acidentes geológicos (principalmente dobras e falhas) das formações rochosas afetadas pelo túnel, uma vez que são fatores que influem de maneira decisiva os fluxos captados;
- ✓ O fraturamento, dado que nas rochas ígneas e metamórficas com pequeno grau de alteração a maior parte dos fluxos chega por estas fraturas e a permeabilidade medida na direção do mergulho é também superior à média do maciço;
- ✓ Em todas as formações, as dobras e as falhas são zonas de fragilidade, onde podem se concentrar fluxos localizados. Nos primeiros, as dobras sinclinares costumam ser

problemáticos por cruzarem possíveis pontos baixos de estratos apoiados em outros mais impermeáveis, já as falhas são acidentes potencialmente mais perigosos. Por um lado, atuam como barreiras hidráulicas ao colocar em contato camadas permeáveis como outras impermeáveis, podendo dar lugar a fortes diferenças piezométricas localizadas e, por outro lado, o plano de falha pode atuar como condutor, ou como interceptor, no caso de uma milonita.

O objetivo principal dos estudos hidrogeológicos é avaliar os fluxos que se direcionam ao túnel e as pressões hidráulicas que serão geradas no entorno do revestimento.

Os estudos geológicos, geotécnicos e hidrogeológicos são fundamentais para o projeto do túnel mas eles também devem ser considerados durante a construção e operação.

Enfim, os estudos dos dispositivos disponíveis para a drenagem e condução dos fluxos acidentais serão realizados durante o projeto. Entretanto, sua influência será notadamente mais observada durante a operação.

7.4. IMPERMEABILIZAÇÃO E DRENAGEM

Como em qualquer estrutura em contato com o solo, existem duas maneiras a se reagir à ação da água. Uma consiste em reforçar ao máximo a impermeabilização da estrutura, impedindo-se a ação da água. A outra, ao contrário, consiste em permitir a passagem da água, controlando a sua entrada com o uso de dispositivos de drenagem, visando conduzi-la ao exterior.

Observa-se que as estratégias são opostas, entretanto, igualmente como ocorre em outras estruturas em contato com o solo, como muros e pilares de pontes, a tendência atual não é optar por umas destas alternativas, mas conciliá-las. Neste sentido, são elementos complementários que colaboram para garantir a durabilidade da estrutura.

No caso dos túneis a solução é ainda mais complexa porque está condicionada a vários fatores (Caja, 2005):

- ✓ Existência de aquíferos e correntes de águas superficiais;
- ✓ Método construtivo;
- ✓ Funcionalidade do túnel.

Quanto ao primeiro, uma maior sensibilidade à captação de águas, seja por razões ambientais, por possíveis problemas construtivos ou por outros motivos particulares, faz-se necessário dar uma ênfase maior à impermeabilização.

O mesmo ocorre com o terceiro fator, já que, segundo a funcionalidade do túnel, pode-se admitir maiores ou menores infiltrações durante a operação do túnel mas, logicamente, em uma grande quantidade de túneis é preciso assegurar reduzidas infiltrações durante o período de vida útil do túnel.

Métodos convencionais de escavação permitem o fluxo de água sem nenhum impedimento ou apenas com a resistência que a fina camada de concreto projetado pode oferecer. Neste período e até que se disponha da lâmina impermeabilizante, as medidas de drenagem podem ser decisivas para se poder construir a obra.

Como indicado na Figura 7.1, podemos pensar em duas situações limites, uma onde o túnel é perfeitamente permeável, oferecendo resistência mínima à passagem de água e suportando pequenas pressões hidráulicas. Por outro lado, podemos pensar em um túnel perfeitamente impermeabilizado, que não permite nenhuma infiltração e, por conseqüência, suporta maiores cargas hidráulicas.

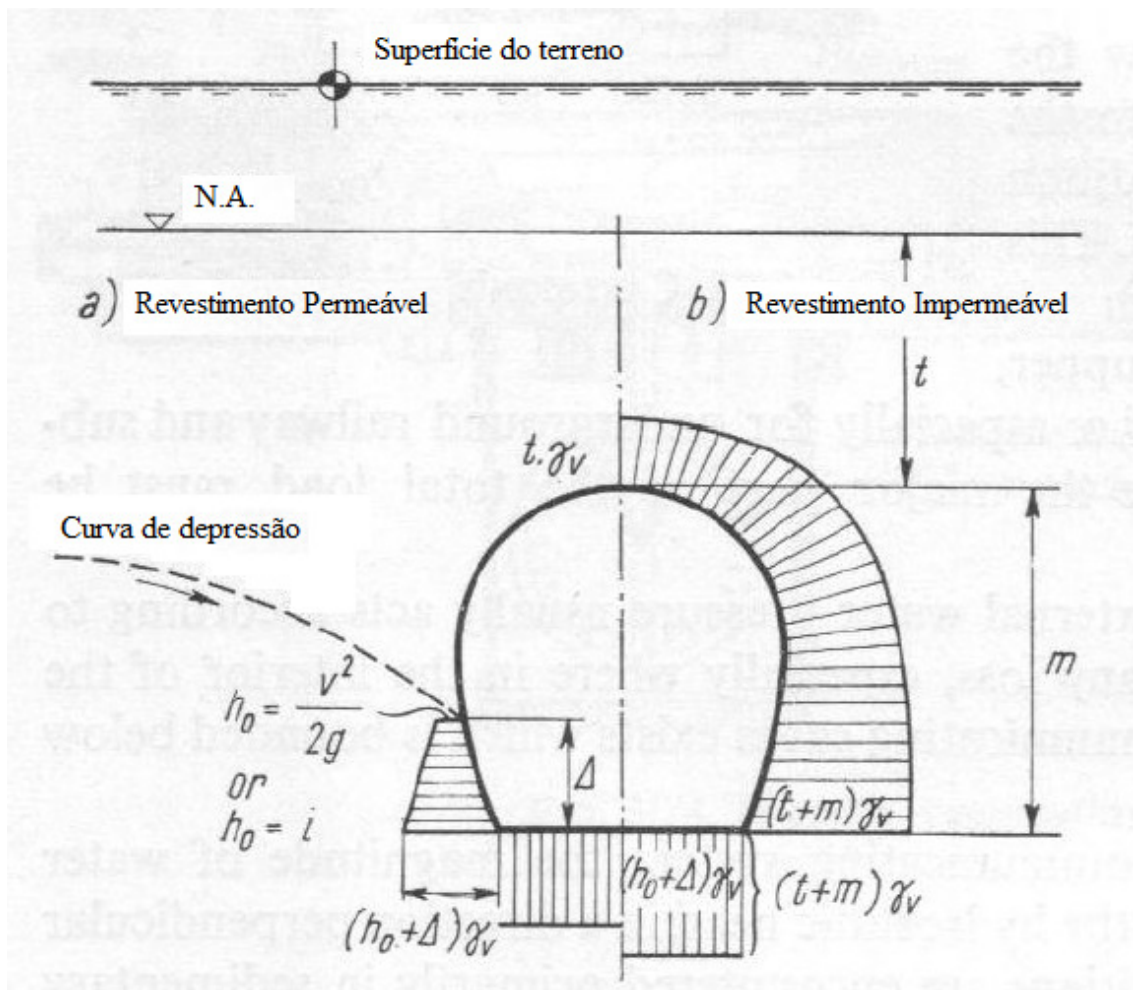


Figura 7.1 – Pressão da água no túnel (Széchy, 1970).

Apesar da influência do fluxo captado pelo túnel e das pressões transmitidas ao seu revestimento, não se pode esquecer que a drenagem pode ter influência sobre o aquífero próximo, e isso algumas vezes pode ser determinante. Ou seja, a efeito drenante provocado pelo surgimento de um suposto túnel pode afetar o aquífero atravessado, provocando rebaixamento do lençol freático. Esse efeito deve ser analisado cuidadosamente, pois pode ser necessário promover alguns ajustes no projeto do túnel.

A Figura 7.2 sintetiza de maneira esquemática alguns conceitos com relação à drenagem e impermeabilização de um túnel, onde:

- ✓ Caso a (Pressões hidrostáticas nulas): dispõe-se de um elemento impermeabilizante no teto, de concreto convencional ou projetado, para assegurar a funcionalidade do túnel, acompanhada de uma simples drenagem na base.

- ✓ Caso b (Pressões hidrostáticas baixas): admite-se um pequeno abatimento dos níveis freáticos e se considera suficiente o efeito impermeabilizante provocado por uma capa de concreto projetado em todo o perímetro do túnel, acompanhado de uma simples drenagem na base.
- ✓ Caso c (Pressões hidrostáticas moderadas): se permite um abatimento limitado do nível freático, recorrendo-se à colocação de uma primeira capa de concreto projetado, membrana impermeabilizante e uma segunda capa de revestimento de concreto projetado ou convencional, acompanhada de uma drenagem especial para as águas do solo e exterior.
- ✓ Caso d (Pressões hidrostáticas elevadas): não se permite influência no nível freático nem entrada de água no túnel, o que se consegue com uma membrana impermeabilizante e um revestimento de concreto convencional dimensionado para suportar a pressão hidrostática.

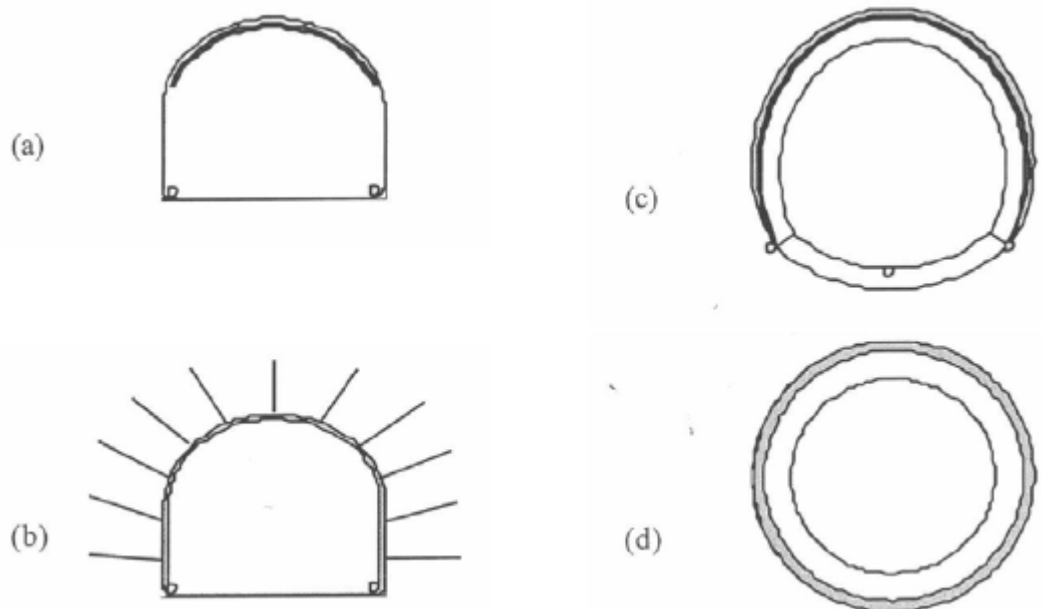


Figura 7.2 – Casos típicos de soluções de impermeabilização e drenagem (Caja, 2005).

A Tabela 7.2 resume os aspectos relativos à drenagem e impermeabilização, relacionadas com procedimentos construtivos.

Tabela 7.2 – Relação da impermeabilização e drenagem com o sistema construtivo (Caja, 2005).

| MÉTODO CONSTRUTIVO | | POSSÍVEIS MEDIDAS ADICIONAIS | DRENAGEM | IMPERMEABILIZAÇÃO | VANTAGEM | DESvantAGEM |
|--------------------|---------------------------------------|---|---|---|---|---|
| CONVENCIONAL | Revestimento em concreto convencional | Geotêxtil e lâmina ou camada impermeabilizante | Captação e evacuação da água, tanto durante como após a construção com geotêxtil | Normalmente uma lâmina impermeabilizante sob o revestimento de concreto | Boa combinação do efeito drenante com a impermeabilização | Efeito drenante durante ou após a obra (abatimento do nível freático) |
| | | Eventualmente galerias e dispositivos drenantes | | | | |
| | Revestimento em concreto projetado | Eventualmente pré-injeção (injeção de solo - sistema norueguês) | Controle de água durante a construção a valores da ordem de 2-10 l/min a cada 100 m | Sistema de pré-injeção | Econômica | Menor garantia de impermeabilização dentro do túnel |
| | | | Capas ou lâminas impermeabilizantes entre camadas de concreto projetado | Menores filtrações durante a obra | As injeções podem interferir negativamente no meio-ambiente | |

| | | | | | | |
|--------------------|-------------------------------------|--|--|---|---|---|
| TUNELADORAS | Revestimento com shield (escudo) | Compensação da pressão da frente mediante a pressão da câmara (trabalho em modo fechado) | Somente em casos especiais, dispositivos sistemáticos de drenagem | Injeção entre o solo e a face do shield (escudo) | Impermeabilização de qualidade e a curto prazo | Dificuldade de acesso à frente |
| | | | Drenagens localizadas durante a construção | Excepcionalmente, impermeabilização adicional posterior | | |
| | Revestimento com concreto projetado | Pré-injeção (países nórdicos) | Captação e evacuação da água, tanto durante como após a construção com geotêxtil | Possibilidade da mesma sistemática do procedimento convencional a partir de uma certa distância de frente | Boa combinação do efeito drenante com a impermeabilização, com maior velocidade na colocação da impermeabilização | Efeito drenante durante ou após a obra (abatimento do nível freático) |

7.5. VISÃO ESPECÍFICA DA DRENAGEM DE TÚNEIS

Para túneis viários, e em especial aqueles localizados em rodovias, que devido à heterogeneidade das instalações se tornam mais complexos, as águas podem proceder de três grupos:

- ✓ Infiltrações;
- ✓ Águas introduzidas por veículos em tempos de chuva ou neve, ou por operações de limpeza do túnel ou do pavimento;
- ✓ Fluxos acidentais de diversas substâncias.

O início deste capítulo orientou maior ênfase nos estudos de captação e evacuação mais apropriada das águas citadas primeiro grupo.

O segundo grupo requer um sistema próprio de captação e evacuação, ainda que, em princípio, pode ser realizado em conjunto com o mesmo sistema projetado para as águas provenientes do grupo 1.

As do terceiro grupo são as que requerem um tratamento mais específico e as que obrigam maior eficiência dos dispositivos de drenagem para evitar um perigo iminente provocado pelo fluxo de substâncias perigosas ou contaminantes, que é similar a situação que existe na área externa aos túneis quando se considera uma possível contaminação dos aquíferos por substâncias tóxicas e corrosivas. Entretanto, dentro do túnel atenção especial deve ser destinada ao tratamento de substâncias inflamáveis, devido ao risco de incêndio e suas conseqüências no interior dos mesmos.

Estas circunstâncias são as que tem motivado nas obras mais recentes a adoção de um sistema separativo para a captação, evacuação e tratamento de efluentes.

A partir dos estudos do *Centre d'Etudes des Tunnels* (CETU) da França chegou-se a uma série de recomendações que, ainda que na prática possam se materializar de diversas maneiras, podem concentrar-se em:

- ✓ Dispositivo de captação de águas ou produtos sobre o pavimento;
- ✓ Dispositivo de drenagem das águas que provém da infiltração do solo;
- ✓ Dispositivo de drenagem de captação de águas que infiltram pelo pavimento;
- ✓ Dispositivo de canalização ou coletor principal.

A Figura 7.3 mostra de maneira esquemática os dispositivos acima descritos.

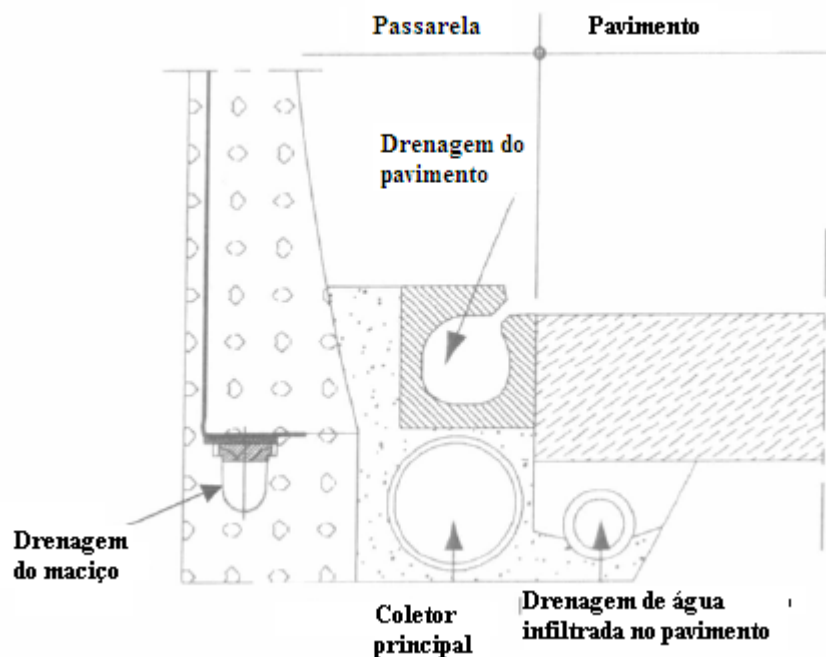


Figura 7.3 – Esquema dos dispositivos de drenagem.

Por outro lado, o funcionamento correto do sistema separativo obriga alguns túneis (com comprimento superior a 400 m, segundo CETU) a dispor de um sistema de canaletas com sifão, que devem trabalhar totalmente inundada para se obter o efeito anti-incêndio.

O sistema de drenagem preconizado pela CETU adota cinco dispositivos:

- ✓ Dreno de captação da infiltração do solo;
- ✓ Dispositivo de captação no nível do pavimento;
- ✓ Caixas sifonadas;
- ✓ Coletor geral;
- ✓ Dispositivo de retenção na saída do túnel.

A Figura 7.4 mostra resumidamente alguns dos dispositivos descritos acima, como o dispositivo de captação no nível do pavimento e o dreno de captação da infiltração do solo. Os outros dispositivos serão apresentados em figuras mais a frente, ainda nesse capítulo.

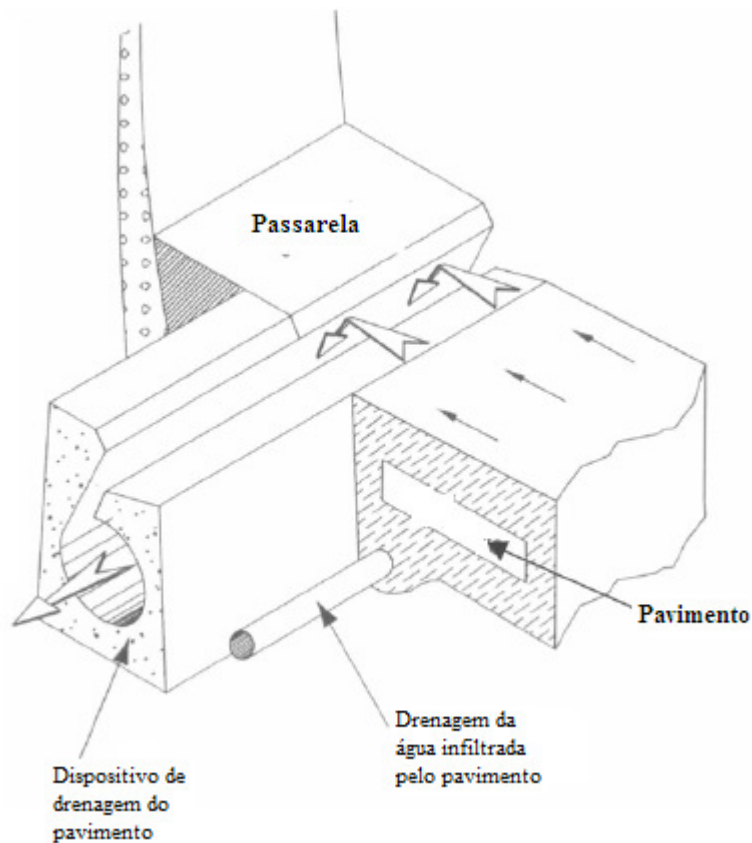


Figura 7.4 – Drenagem do pavimento.

O funcionamento do sistema preconizado pela CETU está ilustrado na Figura 7.5, onde se mostra a chegada dos distintos condutos ao dispositivo sifonado. O dreno que capta a água do maciço deságua no coletor principal, que atravessa a primeira câmara do dispositivo, a qual capta o líquido proveniente da drenagem superficial do pavimento. Estes estão em contato com a segunda câmara através de um sifão que atua como anti-incêndio (para o qual o dispositivo deve estar sempre inundado), impedindo que o fogo se propague.

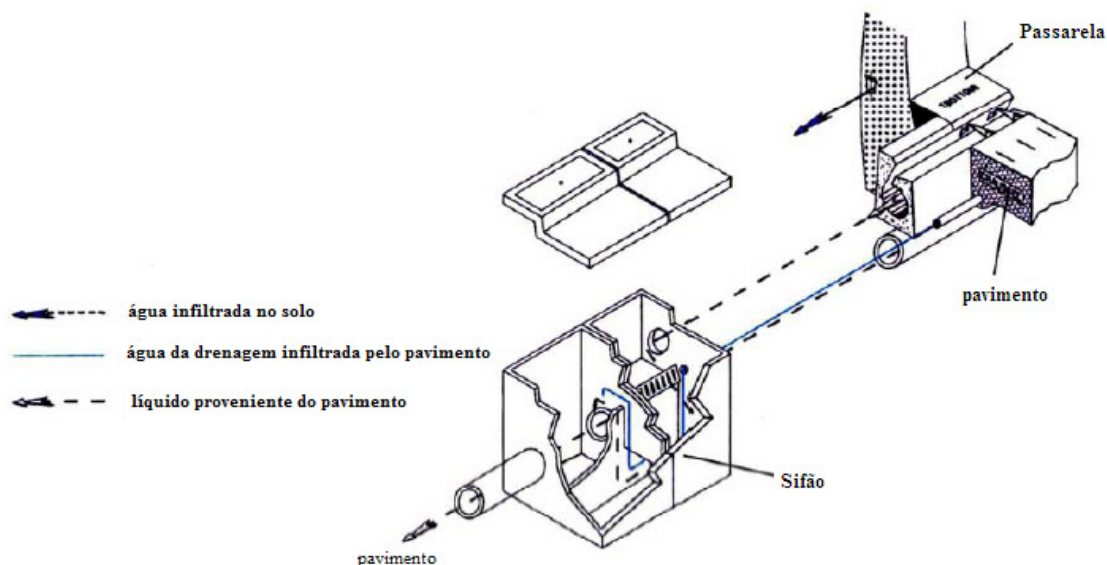


Figura 7.5 – Esquema do sistema de drenagem preconizado pela CETU.

A maneira que se assegura a inundação do dispositivo sifonado pode dar lugar a diversas soluções mas nunca deve-se confiar somente na água proveniente da infiltração do solo, pois esta geralmente apresenta muita irregularidade de fluxo.

Algumas condições devem ser sempre consideradas:

- ✓ Instalar os condutos preferivelmente abaixo do passeio (calçada) para perturbar o mínimo possível a circulação e facilitar a manutenção. Deve-se tomar o cuidado de instalar a caixa sifonada de maneira que ocupe o menor espaço possível abaixo do pavimento;
- ✓ Conduzir preferencialmente a drenagem para apenas um dos lados do túnel, exceto se necessário promover uma mudança na curvatura ou por dificuldades devido a necessidade de se manter determinados gabaritos (horizontal ou vertical), ou mesmo se, em um caso raro, uma grande vazão de água motivar a drenagem por ambos os lados;
- ✓ Para a inundação da caixa sifonada, pode-se fazer uso de águas provenientes de infiltrações ou de mesclas com os líquidos de efluentes. Entretanto, em caso de túneis longos ou com tráfego intenso isso muitas vezes não é possível, dessa forma é necessário recorrer-se a outros procedimentos (sistema de abastecimento de água potável, reserva de incêndio ou outros). Lembrando-se que, neste último caso, deve-se conduzir os efluentes para um depósito de armazenamento para seu tratamento posterior.

Em túneis ferroviários, ou em alguns casos de túneis rodoviários, pode-se dispor de coletores no centro, que se comunicam com drenos laterais em determinadas distâncias.

7.6. CONSIDERAÇÕES PRÁTICAS

Algumas práticas devem ser consideradas para a obtenção de um sistema de drenagem mais eficiente, que vão desde o planejamento do traçado do túnel até cuidados especiais com os dispositivos de impermeabilização e drenagem.

7.6.1 TRAÇADO

Os traçados mais frequentemente adotados em túneis viários consistem em um alinhamento reto único ou dois paralelos únicos. Para assegurar a evacuação das águas, o CETU recomenda rampas mínimas de 0,2% a 0,4%. Internacionalmente, as rampas mínimas adotadas são similares a esta, variando de 0,2% a 0,5%.

A inclinação vertical do traçado é importante para conduzir a água até o exterior por gravidade. Em túneis longos, a drenagem em ambos os lados apresenta uma vantagem adicional, pois permite a condução dos líquidos por gravidade tanto durante a construção quanto durante a operação.

7.6.2 DISPOSITIVOS PARA DRENAGEM E IMPERMEABILIZAÇÃO

Como já discutido anteriormente, existe bastante proximidade entre o sistema de impermeabilização e o de drenagem, principalmente no período de construção. Isso porque ambos os sistemas objetivam proteger a estrutura das conseqüências maléficas que o fluxo de água poderia ocasionar. Há muitos casos em que a melhor solução é conciliar estes sistemas, na busca da melhor eficiência, como ilustra a Figura 7.6. Neste contexto, a drenagem tem a missão de recolher e conduzir as águas que afloram durante a escavação e, por outro lado, proteger a impermeabilização.

É habitual o uso de tubulação do tipo meia-cana de PVC ou fibrocimento, protegidas com pasta de cimento com acelerador de pega ultra-rápido e que, em função da quantidade e da área a drenar, podem adotar uma disposição sistemática a base de drenos em forma de espinha de peixe, que conduz a água à meia-cana principal, que por sua vez deságua em um dreno lateral e este ao coletor principal (sistema Oberhasli).

Esta drenagem deve ser protegida por uma camada de concreto projetado que, além da sua função de sustentação, tem a função de proteger a impermeabilização.

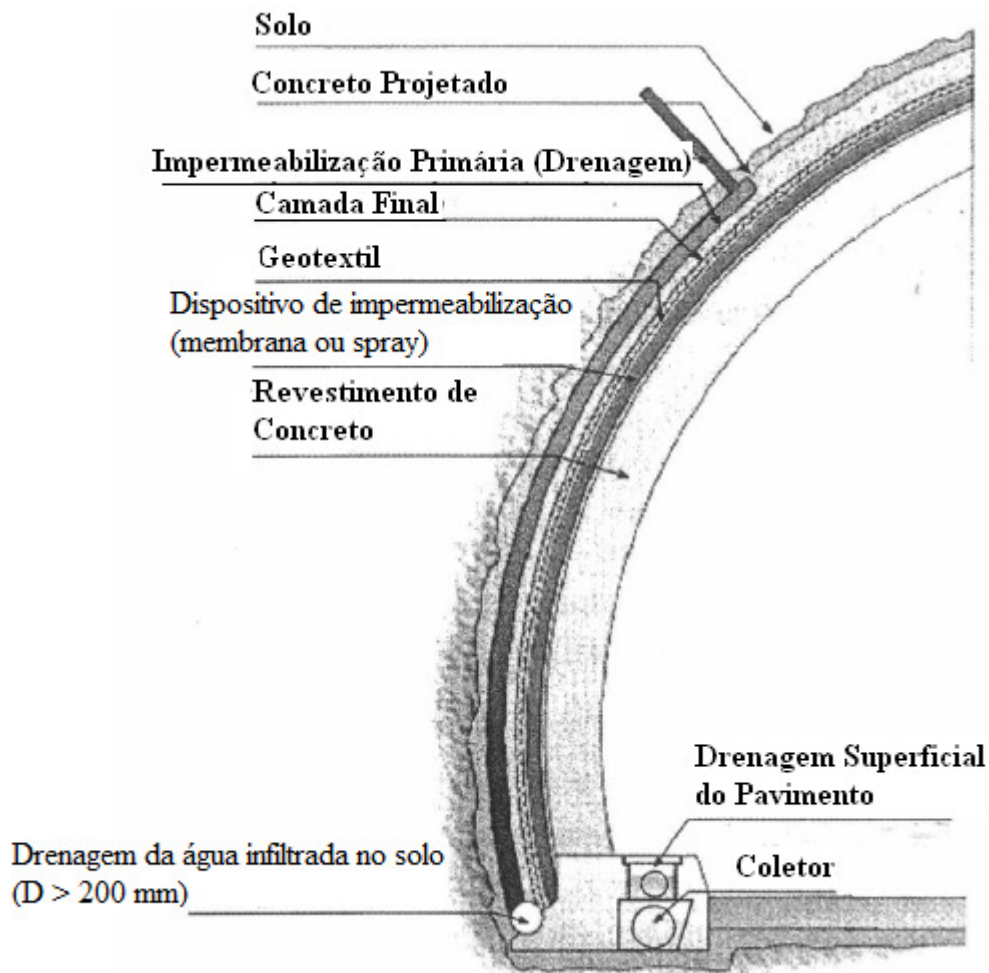


Figura 7.6 – Seção tipo do sistema de drenagem e impermeabilização.

A impermeabilização se compõe de geotêxtil, cuja função é, por um lado, proteger a membrana de impermeabilização da irregularidade da camada de concreto projetado e, por outro, evacuar a água para que possa ser infiltrada.

Observa-se, na Figura 7.6, que logo após o solo existe uma camada de sustentação, normalmente de concreto projetado, que visa obter um acabamento melhorado para a próxima camada ao reduzir imperfeições e efeitos maléficos de sobrecavações. Em seguida, a camada de drenagem (impermeabilização primária), sobre a qual se executa uma camada final, normalmente de concreto projetado. Continuando, executa-se a impermeabilização

propriamente dita (secundária), composta por geotêxtil e membrana de impermeabilização, e sobre esta o revestimento final de concreto.

A seguir, discute-se algumas características importantes dos materiais normalmente adotados no sistema de drenagem e impermeabilização.

7.6.2.1 GEOTÊXTIL

O geotêxtil empregado é usualmente do tipo não-tecido, como indicado na Figura 7.7, geralmente de polipropileno, não regenerado, para assegurar uma alta durabilidade. Normalmente não se usa o poliéster devido a sua baixa resistência aos álcalis.

A seleção do geotêxtil é condicionada pela sua capacidade de permeabilidade e resistência mecânica, não pelo peso. No caso de vazão alta, pode-se instalar geocompostos drenantes.

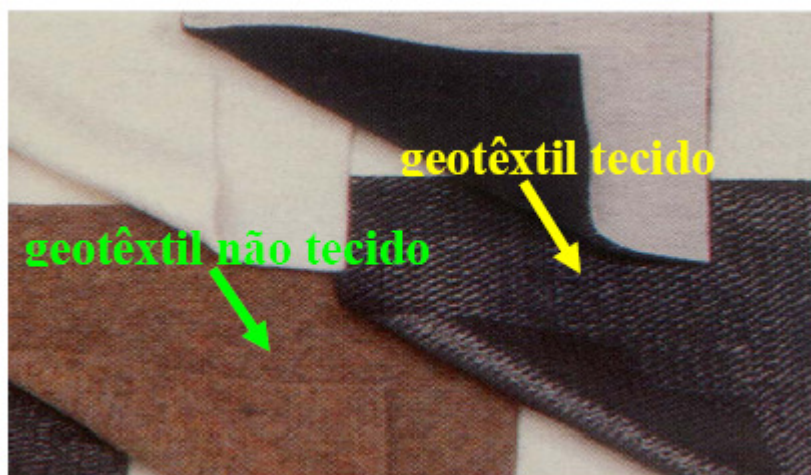


Figura 7.7 – Diferença entre o geotêxtil tecido e o não-tecido.

7.6.2.2 GEOMEMBRANA

A geomembrana utilizada normalmente são de PVC por terem maior flexibilidade, o que permite adaptá-las mais facilmente à superfícies irregulares. Além de sua resistência mecânica, que deve ser mantido dentro de um intervalo importante de variações térmicas, deve ser imputrescível (não apodrecer), resistente ao envelhecimento, ao fogo (auto-extinguível), ataque de microorganismos e, quando apropriado, para as águas agressivas que possam surgir no solo.

Normalmente sua espessura varia de 2 a 3 mm e a soldagem dos rolos se faz termicamente, sendo aconselhável uma sobreposição mínima de 10 cm.

7.6.2.3 DRENOS LATERAIS

O dreno que se disponibiliza nas laterais para conduzir as águas provenientes da impermeabilização primária deve ter um diâmetro superior a 20 cm. Esta é uma medida razoável, tendo em conta que trata-se de uma tubulação que pode entupir com relativa facilidade por transportar água carregada de partículas. Além disso, maiores diâmetros acabam por facilitar os trabalhos posteriores de manutenção e conservação.

Além disso, é necessário que os drenos laterais estejam suficientemente protegidos durante a obra para evitar que o barro ou detritos os deixem inservíveis. Por isso, eles devem ser instalados poucos momentos antes de se proceder a impermeabilização e executar a envoltória de concreto o mais rápido possível, o que os protegerá.

7.6.3 SISTEMA DE DRENAGEM

Após discutidas algumas características desejáveis dos materiais adotados nos procedimentos de drenagem e impermeabilização, sugere-se, a seguir, uma breve discussão a respeito das características que dizem respeito especificamente à drenagem interna e externa do túnel.

É bastante comum, principalmente em túneis de longo comprimento, a separação da drenagem externa, dedicada à captação e condução da água presente no subsolo, da interna, responsável pela orientação de líquidos provenientes da superfície do pavimento.

7.6.3.1 TUBULAÇÃO

Os drenos utilizados para a drenagem do subsolo normalmente são de polietileno, com um diâmetro mínimo de 200 mm, disposto ao longo de todo o túnel. Tratam-se de tubos perfurados nos lados e no topo, envolvidos com uma camada de concreto poroso, o que permite o livre fluxo de água proveniente do subsolo pela tubulação (dreno).

É usual adotar-se, em rodovias ou outras obras superficiais, um sistema de drenagem semelhante, com a utilização de brita e/ou areia no lugar do concreto poroso. Entretanto, em obras subterrâneas este sistema pode não ser muito eficiente, uma vez que normalmente esses drenos estão submetidos a maiores quantidades de água e maiores níveis de pressão, o que

induz a colmatção dos materiais de maneira mais rápida e, por este motivo, não são recomendáveis nas construções de túneis.

7.6.3.2 ACESSO À TUBULAÇÃO EXTERNA

Segundo Clay (1998), é aconselhável destinar pontos de inspeção com uma certa frequência (normalmente a cada 50 m), como ilustram as Figuras 7.8 e 7.9.

Observa-se que estes pontos de acesso consistem de uma tubulação quase vertical, que se conecta ao dreno, normalmente abaixo da calçada (passarela), onde é difícil o acesso. A entrada é curva para facilitar a passagem de equipamentos de inspeção e manutenção, o que, por outro lado, também traduz a dificuldade de se observar o que acontece dentro dos drenos durante a limpeza e testes do sistema. Também torna-se difícil a tarefa de remover os detritos da tubulação.

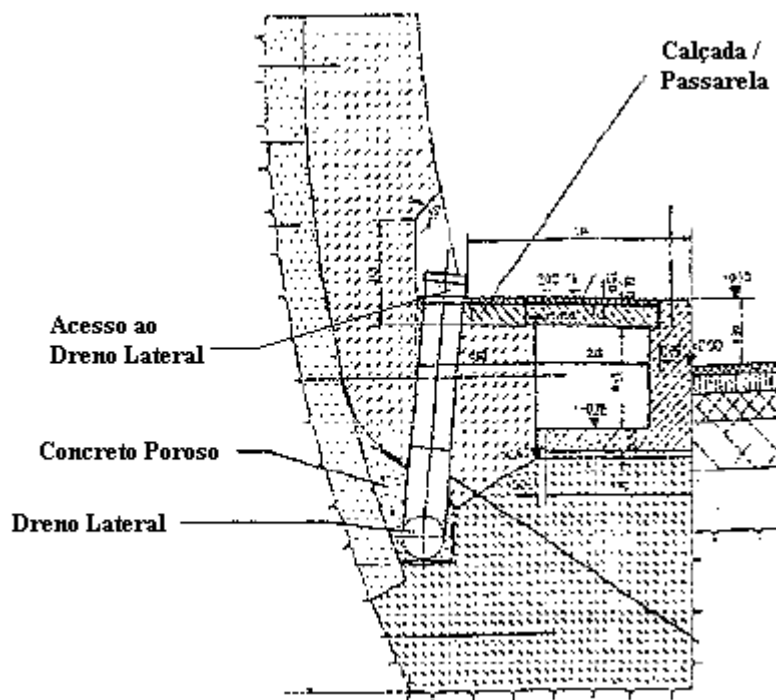


Figura 7.8 – Detalhe do acesso ao dreno lateral (Clay, 1998).

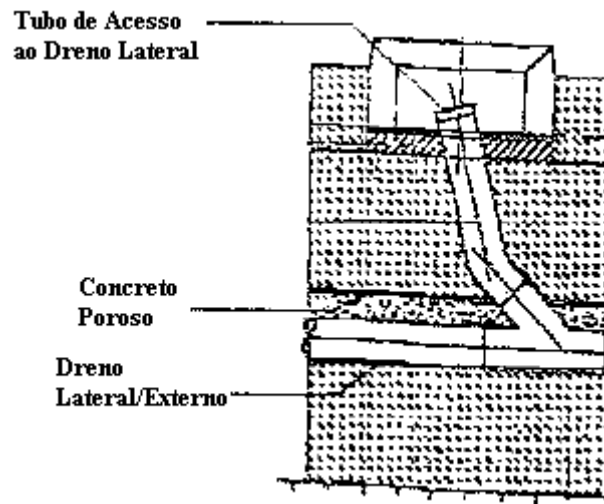


Figura 7.9 – Perfil longitudinal da tubulação externa e dos seus pontos de acesso (Clay, 1998).

7.6.3.3 POÇOS DE INSPEÇÃO

Para Clay (1998), tanto a drenagem externa (dreno lateral) quanto a interna (drenagem do pavimento) dividem o mesmo poço de inspeção. Conforme pode-se ver na Figura 7.10 este sistema de acesso à tubulação é um pouco diferente do anteriormente discutido, onde o acesso ao poço de inspeção ocorria pela passarela. Estes poços devem ter dimensões suficientes para permitir os trabalhos de manutenção, limpeza e testes. Os procedimentos de limpeza e de teste da eficiência da tubulação serão realizados por um ou mais operários, por isso o poço de inspeção deve ser capaz de abrigá-los.

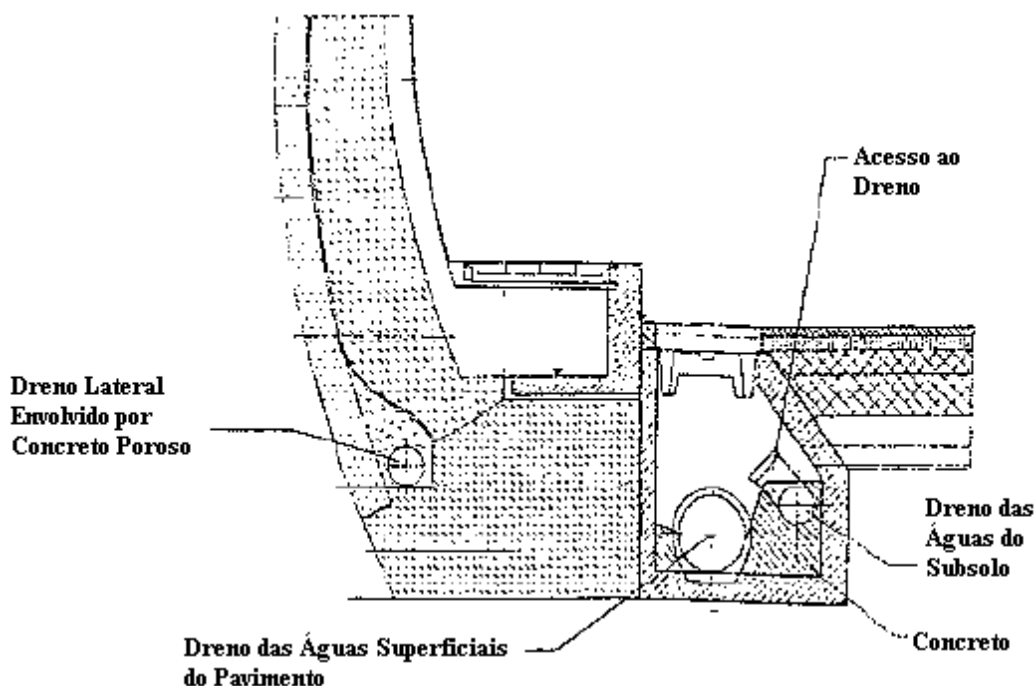


Figura 7.10 – Poço de inspeção da tubulação de drenagem (Clay, 1998).

7.6.3.4 *TESTE DO SISTEMA DE DRENAGEM*

O teste mais comum para se verificar o funcionamento do sistema de drenagem é mediante testes de pressão através da tubulação, seja por injeção de água ou ar. Obviamente, nos drenos porosos esta tarefa não é possível.

Clay (1998) registrou que o teste adotado no túnel T4 da rodovia Trans-Européia, localizado no sudeste da Turquia foi realizado com a utilização de uma bola através do tubo. Tratava-se de uma bola plástica de futebol, comprada em super-mercado, com um diâmetro 4 cm menor que o do dreno. A bola foi colocada dentro da tubulação e logo após foi empurrada com jato d'água, através de um caminhão-pipa. Quando o tubo estava limpo e desobstruído, a bola o atravessava rápida e suavemente.

Quando não atravessava por uma região suja a bola flutuava no interior da tubulação, como ilustrado esquematicamente na Figura 7.11, do contrário, era necessário aumentar a vazão da água ou a força do jato empurrar a bola até a saída. Esse processo acabou resultando na limpeza de siltes e outros pequenos detritos com o avanço da bola,.

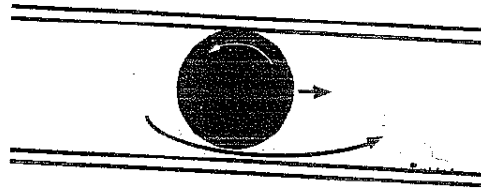


Figura 7.11 – Ação da limpeza da bola (Clay, 1998).

Houve uma tendência da bola retornar em cada ponto de acesso, o que acabou não sendo um inconveniente, pois era uma maneira eficaz de verificar o progresso da bola. Quando havia uma obstrução no tubo a bola parava, entretanto a água vertia pelos furos dos drenos e penetrava o concreto poroso, por isso não era possível perceber alguma diferença.

Quando a bola parou completamente dentro do dreno, houve bastante dificuldade em recuperá-la. Com isso, observou-se que a tubulação havia sido assoreada durante a construção. Ao final, foi possível concluir que a utilização da bola possibilitou observar se a tubulação estava obstruída mas não o nível de assoreamento existente, e que o tradicional método de limpeza por jatos de água continua ser uma maneira bem eficiente de promover a limpeza dos drenos.

7.7. VISÃO ESPECÍFICA DA IMPERMEABILIZAÇÃO

Muito embora a construção de obras subterrâneas seja muito antiga, a preocupação efetiva com a sua impermeabilização é bastante recente. Internacionalmente, de maneira generalizada, só há cerca de uma década, ou pouco mais, é que grande parte dos túneis em escavação contempla um sistema de impermeabilização contínuo.

Como este tema já vem sendo discutido em profundidade desde o começo deste capítulo, devido sua íntima relação com o sistema de drenagem, optou-se por abordar, neste item, apenas aspectos mais específicos, que dizem respeito somente à impermeabilização, para evitar tornar este capítulo exaustivo e facilitar a compreensão.

Nas obras subterrâneas, as anomalias dos sistemas de impermeabilização e drenagem associada são, regra geral, difíceis de solucionar pela dificuldade de acesso aos materiais que compõem os sistemas. Por sua vez, as intervenções de caráter corretivo são extremamente onerosas e pouco confiáveis. Neste sentido, é imprescindível, para assegurar a funcionalidade e durabilidade destes sistemas, a existência de um controle adequado das atividades relativas à instalação dos materiais que os constituem.

Os sistemas de impermeabilização e drenagem são constituídos essencialmente por elementos de drenagem, impermeabilização e proteção dos elementos de impermeabilização. Na Figura 7.12, apresenta-se a título de exemplo a constituição esquemática deste sistema em túneis em escavação.

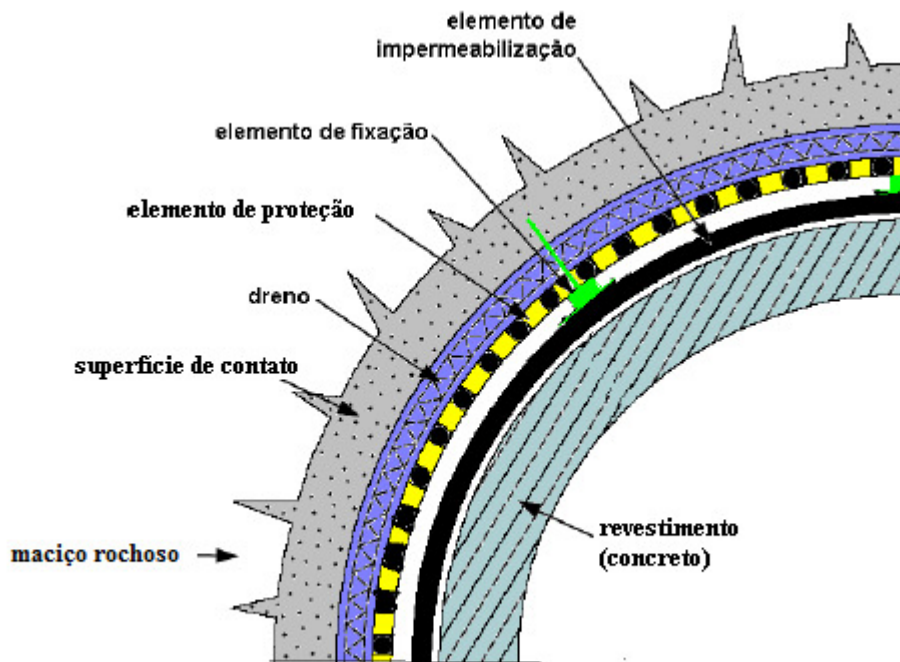


Figura 7.12 – Sistema de impermeabilização e drenagem em túneis

A impermeabilização é geralmente assegurada por geomembranas (Figura 7.13), que têm por função evitar que a penetração das águas de infiltração cause danos no revestimento definitivo (pelo efeito do gelo/degelo ou lixiviação) e nos pavimentos.

As geomembranas mais aplicadas em túneis efetuados por escavação são as poliméricas sintéticas, nomeadamente as de policloreto de vinil plastificado (PVC) e as poliolefinas, que incluem por sua vez as de polietileno de alta densidade (PEAD), polietileno de baixa densidade (PEBD) e poliolefina modificada com etileno propileno (EPR-TPO).



Figura 7.13 – Exemplos de geomembranas.

Os elementos de proteção podem ser colocados entre a geomembrana (impermeabilização) e a superfície da camada onde aquela é fixada, para evitar que irregularidades excessivas ou outros defeitos da superfície dessa camada danifiquem a geomembrana, como bem ilustra a Figura 7.14.

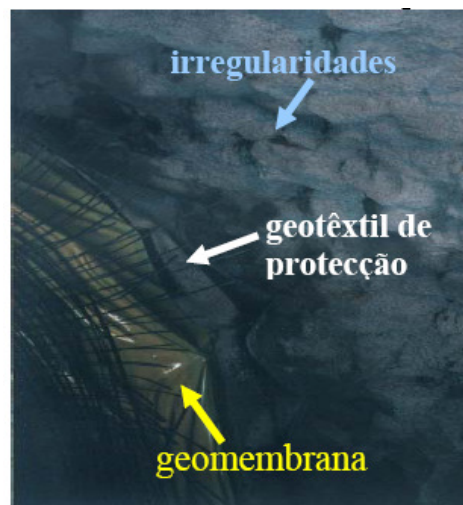


Figura 7.14 – Exemplo de geotêxtil de proteção.

Estes elementos de proteção também podem ser colocados sobre a geomembrana para evitar a sua perfuração no decorrer das operações subsequentes de colocação das armaduras. Os materiais de proteção, além de evitarem a perfuração da geomembrana nas arestas e pontos salientes, facilitam também a criação de uma superfície de deslizamento evitando que o material de impermeabilização seja solicitado por possíveis movimentos do suporte. Os

materiais de proteção usualmente utilizados são os geotêxteis e os geocompostos constituídos por uma geomembrana fina em PVC ou polietileno (normalmente de cor clara) ligada a um geotêxtil.

Existem ainda elementos complementares que ajudam a melhorar o funcionamento do sistema e a minimizar danos, tanto na fase de instalação como de serviço. São exemplos desses elementos complementares as juntas de compartimentação (para confinar danos ou patologias e, conseqüentemente, a sua reparação), as juntas de remate, as juntas de dilatação, os tubos de injeção (para injeção de caldas ou resinas de impermeabilização), os drenos pontuais e as peças de suspensão de armaduras, entre outros (Figura 7.15).



Figura 7.15 – Exemplos de elementos complementares.

A garantia de qualidade da construção das obras subterrâneas é da maior importância, pois a sua deficiente construção pode pôr em risco a utilização ou funcionamento de certas zonas ou inviabilizar os fins previstos para as mesmas.

O controle de qualidade da construção pretende contribuir para um melhor comportamento da obra e, embora envolva alguns custos, decorrentes da supervisão e realização de ensaios, o seu objetivo final é a minimização dos custos decorrentes de reparações posteriores (de execução extremamente difícil e onerosa), de queixas e de eventuais litígios.

Por este motivo todos os materiais utilizados nos sistemas de drenagem e impermeabilização devem ser ensaiados de acordo com normas nacionais ou, no caso de falta destas, através de normas internacionais ou outras referências.

8. SINALIZAÇÃO

A segunda metade do século passado caracterizou-se, sobretudo, pelo elevado incremento técnico dos veículos automotores potencialmente capazes de atingir altas velocidades, limitadas, quase que exclusivamente, pelas nem sempre compatíveis condições técnicas das rodovias oferecidas ao tráfego. A conjugação desses fatores conduziu, de maneira categórica para o alarmante número de vítimas fatais em acidentes de trânsito no mundo inteiro e, em especial, no Brasil.

A qualidade crescente dos veículos produzidos no país, aliada ao significativo aumento da frota de veículos importados nos últimos anos, tem implicado numa extraordinária elevação de seu desempenho, com repercussão não só nas velocidades finais por eles alcançadas, como principalmente nas acelerações e retomadas de velocidade, o que veio a exigir reflexos cada vez mais apurados e menos tempo para tomada de decisões no tráfego rodoviário.

Além disso, o aumento acentuado da frota nacional e o fato de não ter havido uma evolução da malha rodoviária do país compatível com a dos veículos e a do tráfego, fez com que a sinalização assumisse uma importância crescente na segurança viária.

No Brasil existem algumas normas que abordam este tema, entretanto há uma carência em normas que visem a sinalização especificamente relacionada a túneis, sejam rodoviários ou ferroviários. No geral, o que se faz é uma adaptação de normas estrangeiras e das normas nacionais utilizadas no setor rodoviário.

As normas de sinalização existentes no país baseam-se na experiência positiva de órgãos internacionais voltados para a operação de tráfego, com destaque para o FHWA (*Federal Highway Administration - U.S. Department of Transportation*).

Abordando especificamente a sinalização rodoviária em operação de túneis, observou-se recentemente uma positiva contribuição da comunidade européia, que baseou-se na sinalização que consta da Convenção de Viena relativa à sinalização e balizagem rodoviária.

Por isso, este capítulo foi elaborado baseando-se principalmente nos aspectos divulgados pela União Européia, na Diretiva 2004/54/CE.

Dependendo do número de veículos que trafegam por um túnel e de sua extensão, alguns itens de projeto podem ser negligenciados, como iluminação, ventilação, comunicação, incêndio, e outros, por exemplo, no caso de túneis curtos, com extensão até 25 m.

O projeto de sinalização, por sua vez, jamais poderá ser ignorado, afinal a própria rodovia, mesmo que não fosse atravessada por túnel algum, já deveria apresentar projeto de sinalização horizontal e vertical.

8.1. SINALIZAÇÃO NOS TÚNEIS

Neste capítulo não há a intenção de se discutir a sinalização de rodovias ou vias urbanas, mas somente aquela especificamente associada com a presença do túnel. Serão discutidas as sinalizações horizontal e vertical mais usuais.

8.1.1 SINALIZAÇÃO VERTICAL

Consiste na sinalização que não está marcada no solo (pavimento), mas representadas por placas, semáforos ou sinais luminosos.

Na sinalização vertical, deve ser utilizado material retro-refletivo de alta qualidade e com uma capacidade ótima de percepção:

- ✓ Dentro do túnel, os sinais devem ser em material com retro-reflexão máxima e permanentemente iluminados, para uma capacidade ótima de percepção quer de dia quer de noite;
- ✓ Os materiais utilizados tanto no túnel como na sua zona de aproximação devem corresponder ao nível máximo de desempenho em termos de reflectividade especificado nas normas nacionais de sinalização rodoviária, com utilização de chapas retro-refletivas por tecnologia de microcubos, que garante visibilidade noturna em caso de falha na alimentação elétrica.

8.1.1.1 SINAL DE TÚNEL

Deve ser colocada sinalização em cada entrada do túnel, onde, conforme ilustra a Figura 8.1, a extensão deve ser indicada na parte inferior da placa ou em uma placa adicional. Para túneis

extensos, com comprimento superior a 3.000 m, deve ser indicada a extensão restante do túnel de mil em mil metros. Poderá igualmente ser indicado o nome do túnel.

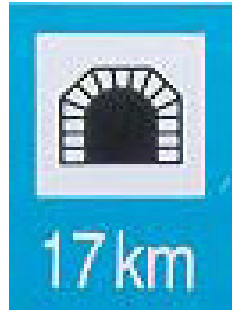


Figura 8.1 – Placa de sinalização de túnel e sua extensão (Diretiva 2004/54/CE do Parlamento europeu).

8.1.1.2 ÁREAS DE PARADA DE EMERGÊNCIA

Os sinais utilizados para indicar as áreas de parada de emergência devem ser acompanhados por sinais do tipo “Permitido Estacionar – E” e sinalizados com placas próprias, como ilustra a Figura 8.2. Os telefones e os extintores deverão ser indicados por um painel adicional ou incorporados no próprio sinal.

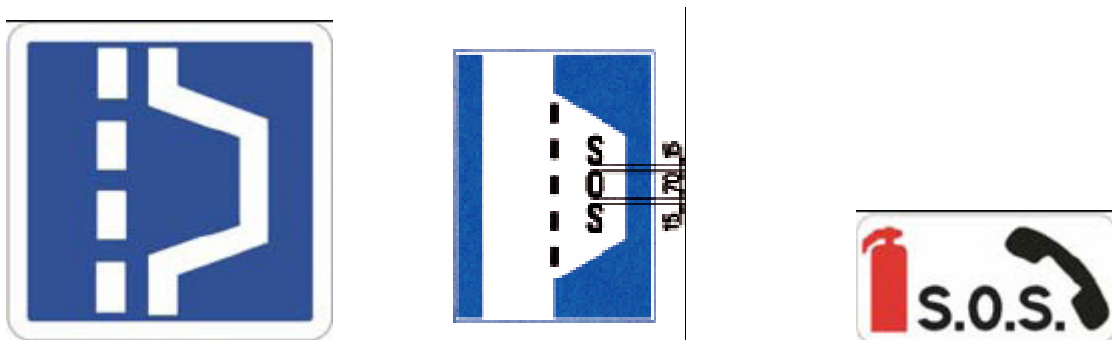


Figura 8.2 – Sinalização utilizada na identificação das áreas de parada de emergência (Diretiva 2004/54/CE do Parlamento europeu).

8.1.1.3 SAÍDAS DE EMERGÊNCIA

Deve ser usado o mesmo sinal para todos os tipos de saídas de emergência. As placas devem ser alocadas próximo às saídas e deve-se tomar cuidados no sentido de facilitar sua leitura pelo usuários. É também necessário sinalizar as duas saídas mais próximas nas paredes laterais, em distâncias não superiores a 25 m e a uma altura de 1,0 a 1,5 m acima do nível das vias de evacuação, com indicação das distâncias até as saídas. As Figuras 8.3 e 8.4 abaixo apresentam exemplos destes sinais.



Figura 8.3 – Indicação de saída de emergência (Diretiva 2004/54/CE do Parlamento europeu).

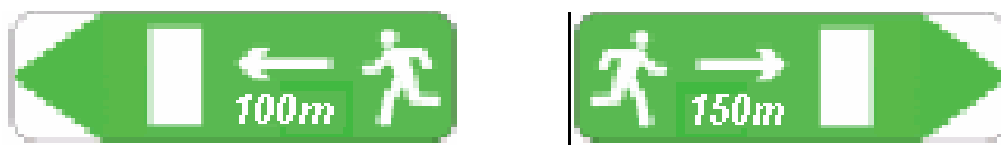


Figura 8.4 – Indicação da distância da saída de emergência mais próxima (Diretiva 2004/54/CE do Parlamento europeu).

8.1.1.4 POSTOS DE EMERGÊNCIA

Sinalização com indicação da presença de um telefone de emergência, de extintores de incêndio e de hidrante (Figura 8.5). Estes postos deverão ostentar sinais informativos e indicarão o equipamento à disposição dos usuários. Visando evitar confusões capazes de provocar danos às vidas das pessoas, é aconselhável que se coloque placas neste postos de emergência informando que este local não garante proteção em caso de incêndio, e que neste caso o usuário deve dirigir-se à saída de emergência mais próxima.

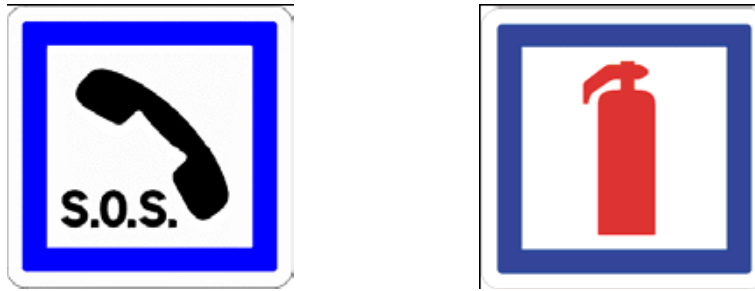


Figura 8.5 – Sinalização empregada na identificação de postos de emergência (Diretiva 2004/54/CE do Parlamento europeu).

8.1.1.5 RÁDIOTRANSMISSÃO

Nos túneis onde os usuários podem receber informações através dos rádios dos seus veículos, deve ser colocada sinalização adequada à entrada, e em distâncias frequentes (a cada 1000 m, por exemplo) no caso de túneis extensos, informando a rádio e a frequência em que os usuários podem receber essas informações. Um exemplo é apresentado na Figura 8.6.



Figura 8.6 – Sinalização sobre rádio e frequência (Diretiva 2004/54/CE do Parlamento europeu).

8.1.1.6 SINAIS VARIÁVEIS DE MENSAGEM

Em túneis que possuam centro de controle e monitoração do tráfego, devem ser utilizados sinais variáveis de mensagens à entrada do túnel e, se possível, na zona de acesso, para que em caso de incidente no interior do túnel seja realizada uma eficiente gestão do tráfego e/ou sua interrupção frente uma emergência. Estes dispositivos devem ser instalados a certa frequência de distância em caso de túneis muito extensos (a cada 1.000 m, por exemplo).

Os sinais e pictogramas utilizados para os sinais variáveis de mensagem nos túneis devem ser harmonizados e de fácil compreensão do condutor. Um exemplo de sinalização (Figura 8.7) são as informações repassadas aos usuários sobre as condições de utilização das pistas de rolamento do túnel.



Figura 8.7 – Sinais de mensagem variável (Diretiva 2004/54/CE do Parlamento europeu).

8.1.2 SINALIZAÇÃO HORIZONTAL

A sinalização horizontal consiste na marcação do pavimento, com linhas contínuas, tracejadas e informações diversas (sentido do tráfego, velocidade da rodovia etc). Essa sinalização já está presente na rodovia, independentemente da existência do túnel. Entretanto, dentro do túnel deve-se observar alguns cuidados especiais para garantir a segurança no tráfego dos veículos.

Nos limites laterais da faixa de rodagem, deve-se marcar linhas horizontais a uma certa distância do limite da via de circulação.

Para os túneis com tráfego em ambos os sentidos, devem ser utilizados retro-refletores (*olho de gato*) em ambos os lados da linha mediana (simples ou dupla) que separa os dois sentidos. Os retro-refletores, que devem cumprir a regulamentação nacional em matéria de dimensões e alturas máximas, devem ocorrer a intervalos máximos de 20 m. Se o túnel for em curva, este intervalo será reduzido até 8 m para os primeiros 10 retro-refletores a contar da entrada do túnel.

Na marcação da sinalização horizontal, deve ser utilizado material retro-reflectivo de alta qualidade e com uma capacidade ótima de percepção:

- ✓ A marcação do pavimento deve garantir visibilidade 24 horas por dia;
- ✓ A marcação deve proporcionar alta capacidade de percepção, mesmo com o piso molhado
- ✓ os retro-refletores devem possibilitar a máxima visibilidade noturna.

9. SEGURANÇA

Incêndios em túneis, principalmente viários, podem provocar elevados danos às vidas humanas, além de danificar a infraestrutura existente, provocando grandes prejuízos financeiros.

Incêndios em túneis rodoviários provocam interrupções no tráfego e apresentam-se nas estatísticas de política de transportes como grandes perdas econômicas.

Acidentes em túneis não são tão raros como deveriam, existem vários registros de acidentes em túneis pelo mundo, acompanhados de incêndios, como pode ser visualizado na Tabela 9.1.

Tabela 9.1 – Ocorrência de incêndios em túneis.

| LOCAL | MORTES |
|--------------------------------|--------|
| Salang, Afeganistão | 700 |
| Kaprun, Áustria | 155 |
| Túnel Vierzy | 108 |
| Mont Blanc, França | 39 |
| Bosnia | 35 |
| Hokuriku, Japão | 34 |
| King Cross, Inglaterra | 31 |
| Túnel O'Shimizu | 16 |
| Túnel Tauern, Áustria | 12 |
| São Gotardo, Suíça | 11 |
| Túnel Pecorile | 8 |
| Nihonzaka, Japão | 7 |
| Velsen, Holanda | 5 |
| Isola delle Femmine, Itália | 5 |
| Túnel Pfänder, Áustria | 3 |
| Túnel Huguenot | 3 |

Somente na última década já foram relatadas mais de 50 ocorrências de incêndios em túneis, causados por colisões de veículos, curto-circuito e falhas das mais diversas. Por isso, o estudo de proteção contra incêndio em túneis vem tendo bastante avanço no contexto internacional.

Diferentemente dos outros temas em estudo nesta dissertação, este é bastante explorado pela normatização nacional e internacional. Existem várias normas, desde aquelas publicadas pelos corpos de bombeiros estaduais até a ABNT (NBR 15661:2009 e NBR 15775:2009), que exploram e detalham o sistema de proteção dos túneis brasileiros contra uma eventual ocorrência de fogo. No contexto internacional também observa-se bastante rigor no estudo do tema, como na Diretiva 2004/54/EC do parlamento europeu e nos estudos da PIARC (05.05.B:1999).

A rapidez de atendimento em caso de risco de incêndio efetivo, por meio do envio dos recursos necessários, é condição essencial para o controle do evento e, portanto para a segurança do usuário e proteção das estruturas e dos equipamentos nos túneis. O melhor dispositivo na luta contra o incêndio está baseado na rapidez do atendimento inicial, mediante os procedimentos operacionais adotados. Tudo deve ser feito para evitar que a situação torne-se crítica, controlando o incidente, antes de assumirem proporções catastróficas.

Assim será inútil dispor de sofisticados sistemas de detecção, controle e extinção de incidentes quaisquer que sejam, sem a aplicação correta de mínimos procedimentos operacionais, previamente definidos, para as situações anormais que possam ocorrer, em um trecho rodo-ferroviário e metrô atendido por túneis.

9.1. GERENCIAMENTO OPERACIONAL

Os operadores do túnel devem prever e desenvolver os procedimentos operacionais para a ação emergencial envolvendo o sistema. Recomenda-se que as agências participantes sejam convidadas para auxiliar na preparação dos procedimentos operacionais.

9.2. SITUAÇÕES DE EMERGÊNCIA

As ocorrências e situações a seguir devem ser consideradas e apresentadas durante o desenvolvimento dos procedimentos operacionais:

- ✓ Foco de fogo ou fumaça em um ou mais veículos ou nas instalações;
- ✓ Foco de fogo ou fumaça em regiões adjacentes às instalações;
- ✓ Colisão envolvendo um ou mais veículos;
- ✓ Queda da energia elétrica, resultando em perda da iluminação, ventilação ou outros sistemas de proteção à vida humana;

- ✓ Resgate ou abandono de local pelos usuários sob condições adversas, mantendo a continuidade operacional mesmo que degradada;
- ✓ Veículos parados na pista;
- ✓ Alagamento das pistas ou das rotas de fuga;
- ✓ Infiltração e derramamento de produtos derivados de petróleo, vapores inflamáveis, tóxicos ou irritantes;
- ✓ Materiais perigosos;
- ✓ Acidentes com vítimas;
- ✓ Danos às estruturas causados por impacto e exposição ao calor;
- ✓ Vandalismo ou outros atos criminosos;
- ✓ Atendimento médico e de primeiros socorros aos usuários;
- ✓ Condições meteorológicas extremas, que causem interrupções na operação;
- ✓ Pedestres/ciclistas na via;
- ✓ Operação do Sistema de Ventilação em caso de emergência;
- ✓ Volume de carga por passageiro (coletivos; metrô; trem).

9.3. PLANO DE RESPOSTA À EMERGÊNCIA

Devido a grande variação de fatores locais e características de cada túnel, os procedimentos do plano de resposta à emergência devem ser elaborados conforme as necessidades específicas. Além disso, esses procedimentos devem ser concisos e tão breves quanto possível, identificando de forma clara os papéis e responsabilidades de cada um, bem como apontar se há necessidade de treinamento especial a alguma equipe.

9.4. CENTRO DE CONTROLE OPERACIONAL

O Centro de Controle Operacional (CCO), bem como o Centro de Controle Auxiliar, deve estar equipado e capacitado para atender e apoiar as equipes em situações de emergência.

Quando necessário, uma agência participante (bombeiros, polícia, ambulância, defesa civil, empresas de transportes coletivos, departamento de obras, serviços de guincho etc) que não

esteja no comando pode estabelecer um posto de comando auxiliar para apoiar a supervisão e a coordenação de suas equipes de trabalho e de seus equipamentos.

É recomendável que as agências participantes como o corpo de bombeiros, a polícia e os serviços médicos e de ambulância possuam linhas telefônicas diretas ou números de telefone designados que devem ser utilizados nas emergências envolvendo as instalações.

A equipe do centro de controle deve estar totalmente familiarizada com os Planos Operacionais e treinada para implementá-los efetivamente.

O operador do túnel deve manter uma lista atualizada de todos os membros das equipes de contato das agências participantes, que deve ser incluída no Procedimento Operacional e revisada com frequência, por exemplo a cada 3 meses.

O Operador do Túnel, bem como as equipes das agências participantes devem receber treinamento com o intuito de agir eficientemente durante as emergências.

A fim de otimizar a execução dos Planos Operacionais, devem ser conduzidos programas completos de treinamento para todos os membros das equipes e das agências que trabalharão nas emergências pelo menos duas vezes ao ano, sendo que após os exercícios, treinamentos e situações reais deve-se reavaliar a conduta de trabalho.

Deve-se manter no centro de controle, registros escritos e gravações de comunicações via telefone, rádio e Circuito Fechado de Televisão (CFTV).

9.5. SISTEMAS DE SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO

A estrutura do túnel e seus sistemas devem ser projetados para resistir, controlar, remover o calor, gases tóxicos e a fumaça gerada durante o incêndio. É importante a escolha do projeto de incêndio e os cenários que podem ocorrer nos túneis.

Os acidentes com a ocorrência de incêndios no interior de túneis não são muito comuns, apesar de também não serem raros como deveriam, no entanto os efeitos podem ser devastadores ocasionando elevado número de vítimas fatais, danos materiais e interrupção do tráfego por longos períodos com prejuízos nacionais e internacionais.

A estrutura do túnel, os sistemas de combate a incêndio, controle, remoção dos gases tóxicos e fumaça devem ser projetados considerando:

- ✓ Tipos de veículos e cargas associadas;

- ✓ Volume de tráfego (TV);
- ✓ Comprimento do túnel;
- ✓ Quantidade de túneis - simples ou gêmeos;
- ✓ Sentido do tráfego – unidirecional ou bidirecional;
- ✓ Material de construção do túnel;
- ✓ Operação do túnel;
- ✓ Disponibilidade de equipamentos de combate a incêndio;
- ✓ Disponibilidade de equipamentos de detecção de incêndio;
- ✓ Tempo estimado para chegada ao local do incidente da brigada de incêndio;
- ✓ Disponibilidade de saídas;
- ✓ Capacidade do sistema de ventilação;
- ✓ Disponibilidade de pista de acesso de viaturas de primeiros socorros;
- ✓ Gradiente do túnel;
- ✓ Potência do incêndio (MW).

Deve-se ressaltar que o comprimento do túnel é o fator determinante para a definição dos sistemas de combate a incêndio e as condições do túnel durante a sua ocorrência.

As saídas de emergência devem conduzir os usuários do túnel ao exterior com a maior eficiência e rapidez possível. Não é recomendável a previsão de abrigos de segurança, pois em uma situação emergencial o mais recomendável é a evacuação total do local para a área externa ou túnel paralelo, afinal as consequências com o passar do tempo tornam-se cada vez mais imprevisíveis.

Para uma construção segura contra incêndio, há grande probabilidade de os ocupantes sobreviverem sem sofrer ferimentos, e os danos à localidade se limitarem às cercanias imediatas do fogo.

O projeto de proteção contra incêndio em túneis deve considerar a seguinte geração máxima de energia decorrente de incêndio de veículos, conforme o tipo de veículo em circulação pelo túnel:

a) Túnel rodoviário

- carros de passeio: 3 – 5 MW;
- vans: 10 MW
- caminhões / ônibus: 15 – 20 MW;
- carretas tanques: 50 – 100 MW.

b) Túnel metrô / ferroviário

- vagões de passageiros: 15 – 20 MW;
- vagões de carga combustível: 300 MW.

Para o planejamento e projeto seguro de túneis rodoviários, metrô e ou ferroviário deve-se considerar a geração média de energia de 100 MW a 300 MW em caso de incêndio dentro do túnel. Esses valores também são válidos para os casos de restrições de circulação produtos perigosos em túneis.

É interessante que o material de composição de cada elemento componente do túnel, como fixadores, chapas metálicas, dutos e outros, sejam adotados de forma a suportar situações de calor intenso e desgaste provocados pela sua exposição ao ambiente. Para isso, prioriza-se a utilização de materiais anti-corrosivo, resistente a altas temperaturas e a impactos. Caso o material não possua estas características, o mercado já oferece produtos, como tintas, vernizes, fibras e outros, capazes de suprir essas carências.

9.6. EFETIVIDADE DO SISTEMA DE SEGURANÇA

Para a avaliação do sistema de segurança aplica-se uma equação simples, indicada a seguir (Equação 9.1), que pode ser melhor entendida a partir da Figura 9.1.

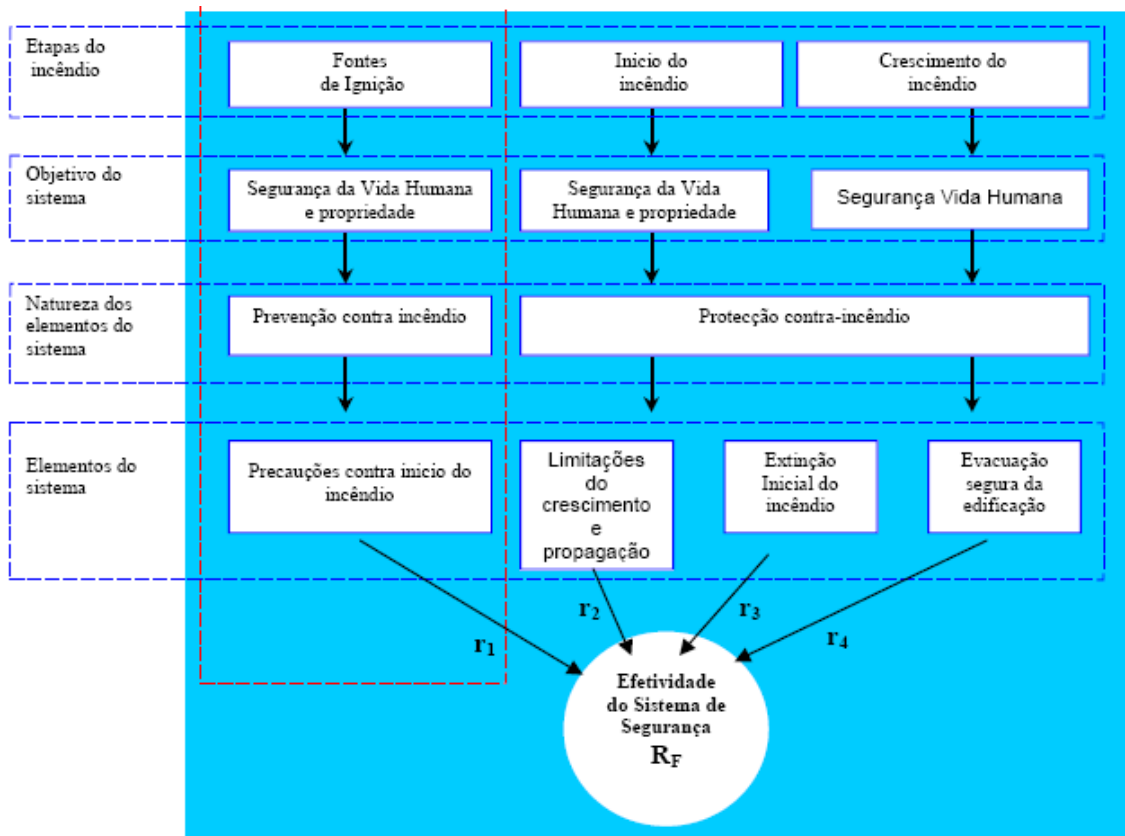


Figura 9.1 – Sistema global de segurança contra incêndio.

A efetividade final do sistema pode ser expressa pela fórmula:

$$R_F = 1 - ((1-r_1) \times (1-r_2) \times (1-r_3)) \times (1-r_4) \quad (9.1)$$

Sendo:

R_F = efetividade do sistema de segurança (final);

r_i = efetividade de cada um de seus elementos;

$i = 1$ até 4

Considerando a Equação 9.1, caso ocorra a efetividade de um dos elementos (r_i) de 100 % ou 1, a efetividade total do sistema será 100 % ou 1,0.

9.7. SISTEMA DE HIDRANTES

Túneis com extensão a partir de 200 m até 500 m, devem ser providos de sistema de hidrantes com tubulação que pode permanecer seca, porém com controle de abastecimento em ambas as extremidades do túnel.

Túneis com extensão acima de 500 m, devem ser providos com sistema de proteção por hidrantes com reserva de incêndio que propicie o combate a incêndio por 30 min, com previsão de dois hidrantes funcionando simultaneamente, com uma pressão de 15 kPa no hidrante mais desfavorável. Os sistemas devem possuir bomba atuante e reserva e mangotinhos, conforme o caso.

A distância máxima entre dois pontos de hidrantes deve ser de 60 m, prevendo-se um lance de mangueira de 30 m para cada hidrante.

Túneis com extensão acima de 2.000 m devem atender aos itens anteriores e ter sua proposta de proteção por hidrantes analisada por Comissão Técnica.

9.8. SISTEMA DE EXTINTORES

Características requeridas para o sistema de extintores:

- ✓ Tipo ABC;
- ✓ Distância de 30 m entre os extintores;
- ✓ Sinalização;
- ✓ Para túneis metroviários, são exigidos extintores do tipo BC-20B;

Túneis com extensão acima de 2.000 m requerem maiores cuidados, por isso, além dos itens indicados acima, podem ser indicados sistemas especiais, principalmente no caso de transporte de cargas perigosas nestes túneis.

9.9. SAÍDAS E PASSAGENS DE EMERGÊNCIA

O projeto do túnel deve prever de acordo com as características específicas de cada túnel a necessidade de saídas e passagens de emergência, constituindo rotas de fuga.

As saídas e passagens de emergência devem ser pressurizadas em relação a área de fogo. Recomenda-se, neste caso, o controle da velocidade mínima de ar em relação à região do fogo de 3 m/s para saídas e passagens de emergência.

Recomenda-se um espaçamento de 100 m a 700 m entre passagens cruzadas em túneis rodoviários com pistas paralelas. Esta distância é dependente do volume de tráfego, do tipo de estrutura do túnel e de seu comprimento.

Túneis metroviários devem ser providos de passeio lateral, com corrimão, na altura das portas do trem, ou caminhos no nível da via permanente, desde que o trem possua dispositivos que permitam a descida segura dos passageiros, propiciando a fuga de pessoas a pé, a retirada de vítimas e acesso das equipes de emergência.

Essas saídas devem ser mantidas livres e desimpedidas, de acesso facilitado, de forma que os passageiros não tenham dificuldade de abandonar o túnel, no caso de acidente.

Como relatado acima, não é recomendável a execução de abrigos de emergência.

9.10. SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO

Para túneis extensos recomenda-se, além da sinalização vertical adicional de segurança, a utilização de equipamentos eletrônicos de sinalização e segurança, tais como:

- ✓ **PMV** – Painéis de Mensagem Variável: Permitem emitir informações em tempo real aos usuários da rodovia em seus diferentes pontos. A operação deste importante recurso deverá ser realizada pelo Centro de Controle Operacional (CCO), no qual através de um software aplicativo, o operador do sistema tem acesso a todos os PMV's podendo editar ou alterar mensagens de texto que serão exibidas aos usuários do túnel;
- ✓ **Triedros**: Os painéis de mensagem variáveis mecânicos, quando necessários, devem ser instalados em locais operacionais estratégicos, contemplando a possibilidade de apresentação de avisos dinâmicos pré-definidos sobre a situação operacional do túnel, com monitoramento a partir do CCO, possibilitando a alternância de três mensagens definidas;
- ✓ **Megafonia**: Esse sistema tem por objetivo apresentar instruções e informações sonoras durante a ocorrência de eventos de emergência ao longo do túnel. O operador do CCO veicula avisos e informações através de auto-falantes instalados dentro dos túneis e em suas imediações;
- ✓ **Balizadores 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, quando existir, para os casos de acidentes ocorridos no interior dos mesmos, ou qualquer outro tipo de incidente, afim de não permitir a entrada de veículos, até o total controle da situação e posterior liberação do trecho envolvido ao tráfego normal;
- ✓ **Sinalização de Abandono do Local:** São painéis de sinalização luminosa que devem ser instalados no máximo a 1,50 m do piso da rota de fuga, no sentido do tráfego, informando aos usuários, em caso de emergência, o sentido do emboque ou saída de emergência mais próxima para abandono do local.

O projeto para túneis com extensão acima de 500 m deve-se prever um sistema de comunicação instalados 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 o CCO do túnel -.

Devido a complexa natureza dos túneis os recursos de comunicação são de fundamental importância aos usuários e operadores. O sistema de comunicação deve ser projetado para permitir ainda a troca de informações sobre o sistema de detecção de incêndio, controle da fumaça e controle de tráfego com a equipe de emergência.

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 serão o único vínculo entre os usuários e o pessoal que se encontra no lado externo do túnel. Desta forma a infraestrutura de comunicação deve ser instalada no interior do túnel de forma a garantir uma operação contínua do sistema.

As operadoras de telefonia móvel vêm contribuindo bastante neste sentido, ou seja, na comunicação entre usuários e o exterior. Com a instalação de postos ou estações de emissão e ampliação de ondas, os telefones celulares podem ser utilizados dentro dos túneis. Isso já está ocorrendo em vários túneis pelo mundo, inclusive no Brasil, principalmente naqueles localizados dentro de grandes centros urbanos.

Para os túneis com extensão superior a 1.000 m devem ser instalados, além do sistema de comunicação, sistema interno de TV, com a instalação de câmeras, no interior do túnel. Deve

haver manutenção preventiva periódica nos sistemas de câmeras para evitar acúmulo de fuligem em suas lentes.

Quanto à distância entre as câmeras, devem estar a uma distância que permita a perfeita identificação do veículo e de detalhes do acidente, cujo objetivo é visualizar e gerenciar ocorrências, da central de TV.

9.11. SISTEMA DE ENERGIA

O suprimento de energia é vital e deve ser confiável, com redundâncias múltiplas e fontes alternativas. A infraestrutura destinada ao suprimento de energia deve proteger e suportar os incidentes e situações de emergência. Os cabos que alimentam os sistemas de emergência devem ser projetados e fabricados para suportarem elevadas temperaturas no interior do túnel.

Os componentes de alimentação dos equipamentos envolvidos com o sistema de proteção contra incêndio, instalados no interior do túnel, devem estar protegidos dos efeitos da combustão, de forma que permaneçam acondicionados em dutos que os protejam contra deformação ou colapso resultantes do incêndio.

O suprimento de energia deve possuir múltiplas fontes alternativas que sejam redundantes, como por exemplo, através de grupo moto-gerador ou captada de concessionária.

9.12. SISTEMA DE COLETA DE LÍQUIDOS

O projeto do túnel deve prever um sistema de drenagem para coleta, armazenagem e descarga ou combinação entre quaisquer destas funções de líquidos efluentes no interior do túnel. Esses efluentes podem ser águas do sistema de proteção anti-incêndio, líquidos provenientes de acidentes nos veículos, águas de limpeza e de infiltração.

O sistema de drenagem de líquidos, em toda a extensão do túnel, deve ser feito através de grelhas de escoamento, situadas nas laterais da pista, possibilitando o rápido escoamento do interior do túnel para bacias de contenção.

As bacias de contenção, por sua vez, devem ser projetadas de modo que tenham capacidade para conter no mínimo 15 m³, associadas a um sistema de bombeamento de no mínimo 45 m³/h, ou capacidade para conter até 45 m³ no mínimo.

Esse sistema deve possibilitar a retirada de líquidos das bacias de contenção através de caminhões-tanque, evitando danos ao meio ambiente.

9.13. GEOMETRIA DO TÚNEL

Deve-se prestar atenção à segurança ao conceber a geometria da seção transversal do túnel, tamanha é a relevância deste tema que neste trabalho o Capítulo 4 foi elaborado com o intuito de aprofundar e explorar ao máximo os estudos acerca da seção transversal. Também deve-se ter bastante cuidado na definição do alinhamento horizontal e vertical do mesmo e das respectivas rodovias de acesso, dado que estes parâmetros têm grande influência na probabilidade e gravidade dos acidentes.

Declividades muito altas podem afetar o ângulo de visão dos motoristas, além de prejudicar a frenagem e aceleração dos veículos, principalmente dos mais pesados. Essa situação deve ser evitada, no intuito de se promover um tráfego mais seguro e com menor probabilidade de acidentes. Por isso, não é recomendável declives longitudinais superiores a 5%, nos túneis com declives superiores a 3%, devem ser tomadas e registradas medidas adicionais para melhorar a segurança do sistema.

9.14. ENSAIOS DE EQUIPAMENTOS E SISTEMAS

Devem ser realizados e registrados todos os ensaios individualmente com todos os equipamentos e sistemas operacionais, de modo a comprovar o atendimento dos projetos e das especificações técnicas.

Os ensaios realizados nos equipamentos utilizados no túnel consistem da verificação das condições de conservação e funcionamento, tendo como objetivo padronizar os procedimentos para avaliação e análise dos sistemas, além de eliminar pendências de modo a viabilizar o comissionamento. Devem ser testados os sistemas críticos, inclusive os planos de trabalho alternativos (contingências), simulando casos de falhas nos sistemas, inclusive falta de energia elétrica.

Os ensaios nos sistemas devem ser realizados sistematicamente, mesmo após a liberação comercial do túnel, de modo a verificar-se a manutenção do sistema, nos mesmos moldes do início da operação comercial.

9.15. COMISSIONAMENTO DO TÚNEL

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 seqüência de eventos 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. Os cenários devem ser simulados nas diversas combinações de eventos prováveis de ocorrerem nas situações de emergência.

Todos os equipamentos principais, sistemas operacionais e testes simulados de incidentes do túnel devem ser submetidos a testes de comissionamento, de forma a que seja apresentado às autoridades competentes um laudo técnico assinado por responsável técnico competente, comprovando que os equipamentos, sistemas operacionais e os testes simulados de incidentes estão de acordo com os critérios do projeto, de suas especificações técnicas e dos manuais técnicos.

9.16. TESTE SIMULADO DE INCÊNDIO

A realização de testes de incêndio no interior do túnel com a potência do incêndio de projeto pode causar danos nos equipamentos e estruturas do túnel, este teste pode ser realizado com produção de fumaça fria, com volume de fumaça gerado igual ou superior ao volume estimado de fumaça produzido pela potência de incêndio de projeto. O comportamento da fumaça fria gerada e as velocidades do ar no interior do túnel deve ser observado e medido com o sistema de ventilação projetado operando de acordo com o programa automático operacional de combate a incêndio.

As equipes de combate a incêndio, emergência e primeiros socorros devem ser submetidas a constantes treinamentos, atualizações teóricas e técnicas de seus equipamentos. Os sistemas operacionais e seus equipamentos devem ser mantidos em perfeito estado de funcionamento, através de um rigoroso cronograma de manutenção.

É importante estabelecer uma comunicação entre os operadores do túnel, os serviços de emergência e o usuário com o objetivo de informar sobre os procedimentos em caso de emergência e familiarização com os sistemas de proteção e segurança disponíveis no túnel.

10. ANÁLISE DE RISCOS

A Metodologia de Análise de Riscos para Túneis (MART) deve ser aplicada para túneis rodoviários e/ou metro/ferroviários e deve ser efetuada pelo projetista do túnel a partir da fase de viabilidade de projeto e construção do túnel. Túneis já em operação também devem ser submetidos ao MART. Para os túneis já em operação, essa metodologia deve ser aplicada a partir da fase de projeto de modificação do túnel.

As fases, técnicas e relações da MART com as fases de projeto do túnel em análise estão descritas a seguir. Na Figura 10.1 apresentam-se as principais fases da Metodologia de Análise de Riscos para Túneis (MART).

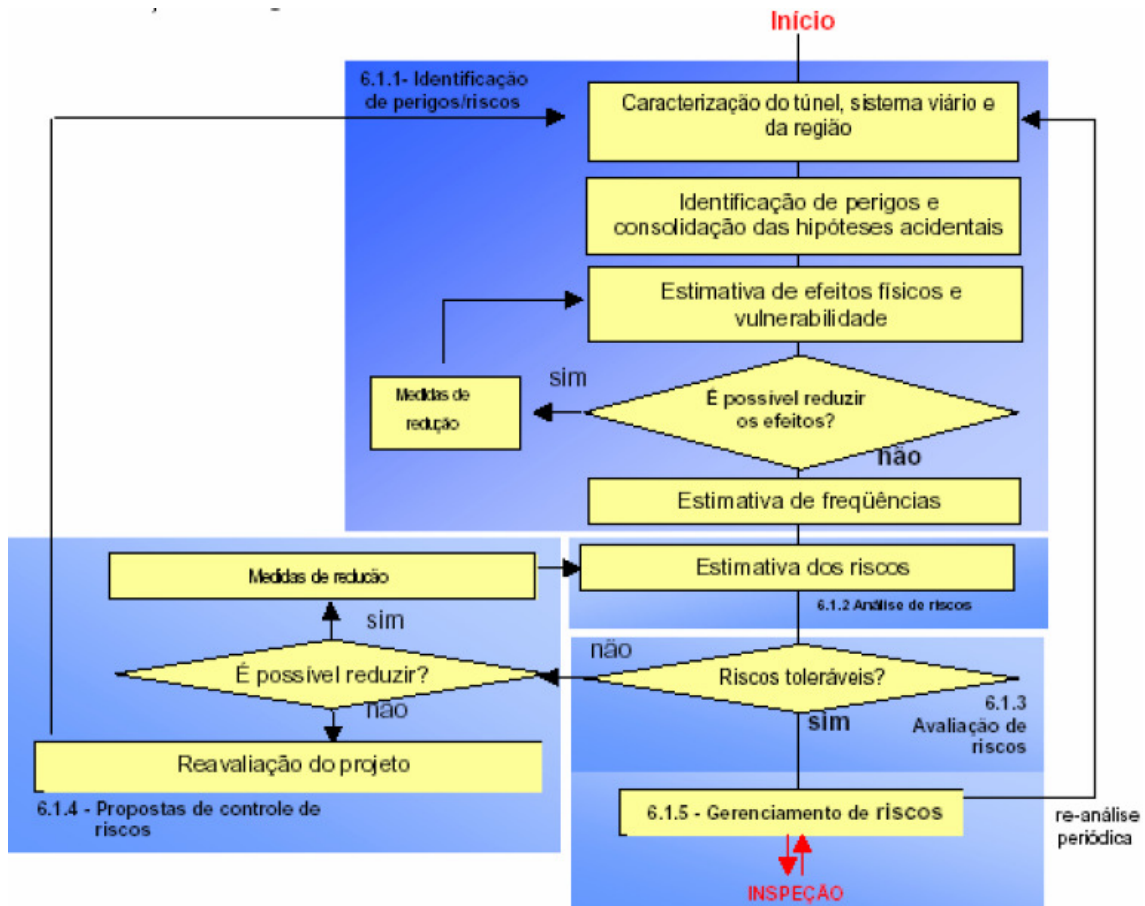


Figura 10.1 – Análise de risco.

i) Identificação de perigos/riscos em túneis é qualitativa e tem o objetivo de:

- ✓ Caracterizar o sistema viário;
- ✓ Identificar os perigos possíveis de ocorrer dentro de túneis;
- ✓ Definir os parâmetros iniciais de cenários de acidentes maiores;
- ✓ Indicar medidas de segurança para mitigar os níveis de risco identificados pela análise;
- ✓ Estimar a frequência de incidentes e acidentes.

ii) Análise dos riscos

- ✓ Identificar o cenário acidental de conseqüências mais severas para a estrutura do túnel e seus usuários.

iii) A avaliação de risco em túneis é quantitativa e tem o objetivo de:

- ✓ Selecionar os cenários de acidentes mais severos identificados anteriormente;
- ✓ Determinar o nível de conseqüências referentes a radiação térmica de um incêndio, as sobrepressões de uma explosão e os níveis de concentração tóxica emitida durante o desenvolvimento do cenário acidental selecionado;
- ✓ Desenvolver a seqüência de ocorrência ou mecanismo do cenário acidental;
- ✓ Quantificar a freqüência de ocorrência do cenário em análise;
- ✓ Apresentar medidas mitigadoras de risco para a redução dos efeitos da ocorrência do cenário.

iv) Proposta de controle dos riscos

- ✓ Em função dos riscos inerentes propor sistema ou procedimentos que supervisionem e controlem esses risco.

v) O gerenciamento de risco em túneis tem como objetivo:

- ✓ Selecionar atividades de gestão para controlar os riscos da possível ocorrência dos cenários analisados;
- ✓ Implantar procedimentos de gestão de riscos;
- ✓ Transformar os resultados pontuais da análise e avaliação de riscos em atividades dinâmicas de gestão de riscos;
- ✓ Desenvolver plano de ação de emergência e auditorias periódicas de segurança.

A Metodologia de Análise de Riscos para Túneis (MART) é composta das etapas apresentadas na Figura 10.2. A seguir discute-se separadamente e resumidamente cada etapa.

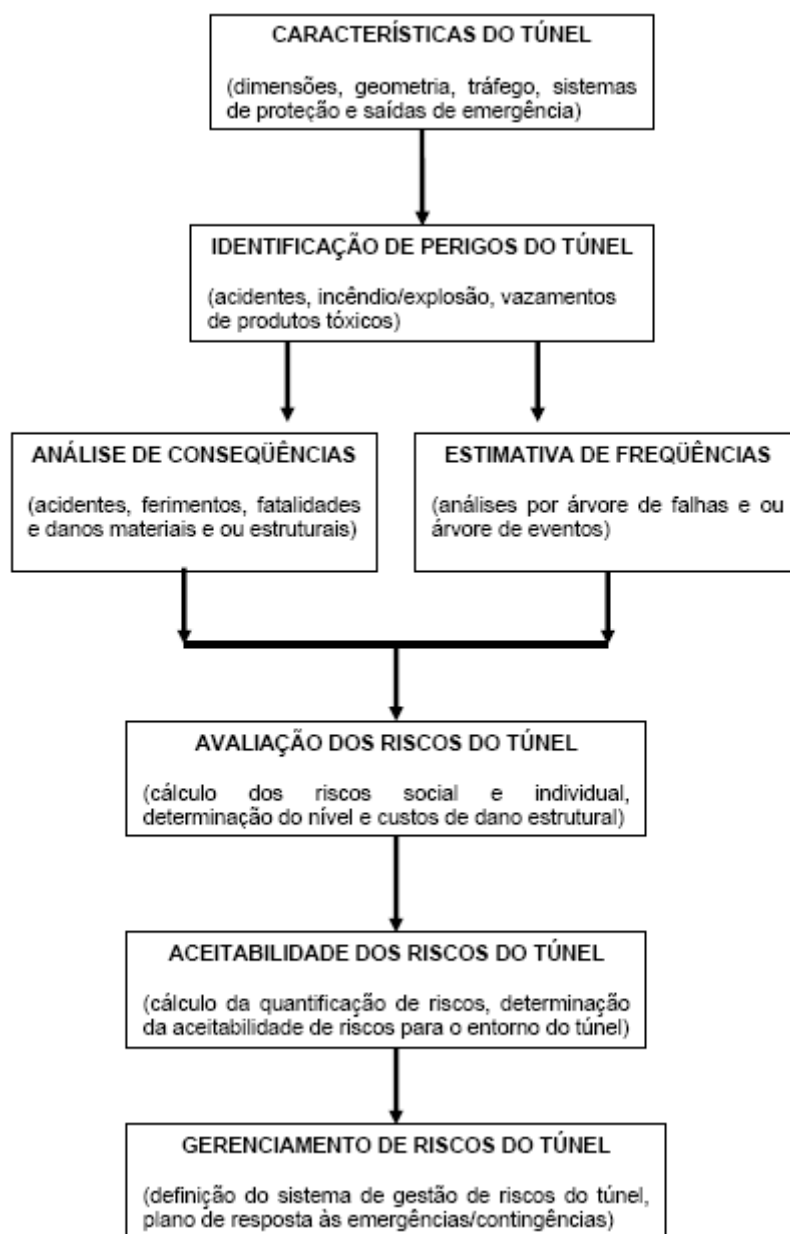


Figura 10.2. Etapas da MART.

10.1. CARACTERIZAÇÃO DO EMPREENDIMENTO TÚNEL (CT)

Na caracterização do empreendimento é importante descrever a localização geográfica, a meteorologia local, população usuária do túnel, acessos, descrição física e dimensões do túnel, geometria do túnel, produtos em circulação, sistemas de segurança e de resposta a emergências/contingências do túnel.

10.2. IDENTIFICAÇÃO DE PERIGOS EM TÚNEIS (IPT)

A identificação dos perigos potenciais em um empreendimento túnel é realizada pelo emprego de técnicas de análise de risco, como: APP (análise preliminar de perigos), *What-if* (questionamentos do tipo o que aconteceria se...) e FMEA (análise de modos de falhas e seus efeitos). Os perigos identificados são classificados com relação a sua gravidade e probabilidade de ocorrência, conforme a uma matriz de risco previamente elaborada para a análise de risco. É nessa fase que se definem os potenciais de perigos encontrados no túnel e que serão objeto de estudos quantitativos posteriores, se necessários.

10.3. ANÁLISE DE CONSEQÜÊNCIAS E VULNERABILIDADE (ACV)

Com base na classificação de perigos realizada na etapa de identificação de perigos, selecionam-se cenários potenciais de acidente. Com os cenários definidos, realizam-se as simulações de ocorrência de cenários, através de programas de computador para se determinar a extensão dos efeitos danosos a vida, meio ambiente e patrimônio do empreendimento. Nesta fase também avalia-se a vulnerabilidade das pessoas e dos materiais e estruturas aos efeitos desses acidentes. Essa avaliação é efetuada para se determinar o nível de radiação térmica absorvida por elas durante um incêndio e o nível de sobre-pressão recebido durante uma explosão no interior do túnel em análise. Estudos de dispersão atmosférica de nuvens tóxicas devem ser elaborados para os casos de produtos tóxicos emitidos durante o acidente no interior do túnel.

10.4. ESTIMATIVA DE FREQÜÊNCIAS (EF)

A análise de riscos até aqui efetuada tem características qualitativas, com a estimativa de freqüências de riscos se inicia a quantificação de seus riscos. A quantificação de riscos é realizada pelo emprego de técnicas do tipo árvore de falhas (AAF) e de eventos (AAE). A técnica árvore de falhas considera a probabilidade de ocorrência do evento topo (acidente indesejável) e de suas causas. A construção da árvore de falhas se baseia na determinação de portas de ocorrência de causas do tipo E / OU. Para essa quantificação, usam-se conceitos de álgebra *Booleana* para a determinação da freqüência de ocorrência do evento topo a ser estudado. A árvore de eventos estuda a seqüência de ocorrência de um evento indesejável, aplicando a teoria de *Delphi*.

Os dados utilizados neste estudo devem ser compatíveis a estruturas já existentes, ou que possuem a mesma vulnerabilidade (volume de veículos, carga transportada, geometria do túnel).

10.5. AVALIAÇÃO DE RISCOS (AR)

A avaliação dos riscos é determinada através do cálculo dos riscos sociais e individuais decorrentes do potencial de acidente. Para essa avaliação é necessário o uso de programa de computador.

10.6. ACEITABILIDADE DE RISCOS (ACR)

O nível de segurança do túnel deve atender ao critério de aceitabilidade de riscos adotado pela legislação vigente de segurança. A conformidade de segurança do túnel às medidas de mitigadoras de riscos recomendadas anteriormente deve ser efetuada nessa etapa.

10.7. GERENCIAMENTO DE RISCOS (GR)

Ao terminar o estudo de análise de riscos, deve-se criar um sistema de gestão de riscos para transformar o estudo MART em um sistema dinâmico. No gerenciamento de riscos é importante definir a política de segurança, saúde ocupacional e meio ambiente da empresa proprietária do túnel e, em seguida, estabelecer e implantar os procedimentos internos dos seguintes sistemas: política SSMA (segurança, saúde ocupacional e de meio ambiente) da empresa responsável pelo túnel, análise e revisão de riscos do túnel, análise de modificações, análise de sistemas críticos para a segurança, sistemas de manutenção de sistemas de segurança, projeto de modificação no túnel, programa de investigação de acidentes, treinamento pessoal e reciclagem em segurança, ações de respostas às emergências/contingências e sistema de auditorias de segurança no túnel.

10.8. RESPOSTA A EMERGÊNCIAS OU CONTINGÊNCIAS (REC)

Estabelecer o plano de ação de emergências através da definição dos cenários de emergência, da equipe de emergência (inclusive organograma), suas funções e responsabilidades, procedimentos de emergência, descrição dos sistemas de combate a emergências, sistema de comunicação de emergências, estabelecimento de rotas de fuga, saídas de emergência, pontos de encontro e telefones importantes para situações de emergências no túnel.

10.9. MEDIDAS MITIGADORAS DE RISCOS (MMR)

O encerramento da aplicação da metodologia de análise de riscos para túneis se dá pela recomendação de medidas de segurança que mitigam os perigos encontrados ao longo do trabalho. Essas medidas podem ser de caráter administrativo ou técnico. Sua implementação é vital para garantir a redução dos riscos encontrados no túnel e devem ser implementadas antes do início da operação do túnel. Nos casos dos túneis em operação, as medidas de segurança resultantes da aplicação do MART ao túnel, por ocasião de modificações no túnel, devem ser implantadas ao túnel antes desse entrar de novo em operação.

10.10. ANÁLISE DE CONFORMIDADE DE SEGURANÇA (ACS)

A segurança implantada em túneis, resultante das recomendações de segurança descritas na aplicação das técnicas de análise de riscos em túneis, deve ser verificada “*in loco*” por meio de uma auditoria técnica de segurança antes do início de operação do túnel.

A Tabela 10.1 apresenta de forma esquemática as técnicas de análises de riscos recomendadas pela ABNT para túneis relacionadas com cada fase, desde os estudos iniciais até as operações e manutenções.

Tabela 10.1 – Técnicas de análise de riscos para túneis.

| ETAPAS <i>MART</i> | FASES DE PROJETO DO TÚNEL | | | | | |
|------------------------------------|---|-------------------------------|-------------------|--------------------|--------------------------|-----------------------------------|
| | Técnicas de análise de riscos para túneis | Estudo de viabilidade técnica | Estudo conceitual | Projeto básico | Detalhamento/ Construção | Operação/ Manutenção/ Modificação |
| "Check list" de segurança | SIM | | | | | |
| "What-If" (E-Se) | | SIM | | | | |
| APP | | | | SIM | | SIM |
| ACV | | | | SIM | | SIM |
| EF (AAE, AAF) | | | | SIM ⁽²⁾ | SIM ⁽²⁾ | SIM ⁽²⁾ |
| Avaliação de riscos | | | | | SIM | SIM |
| Aceitabilidade de riscos | | | | | SIM ⁽²⁾ | SIM ⁽²⁾ |
| Gerenciamento de riscos | | | | | SIM | SIM |
| Plano de emergência/ Contingências | | | | SIM ⁽³⁾ | SIM ⁽³⁾ | SIM ⁽³⁾ |
| Medidas de segurança | SIM | SIM | SIM | SIM | SIM | SIM |
| Conformidade de segurança | | | | | SIM | SIM |

Notas:

1 - quadro em branco: não se aplica as técnicas da *MART*.

2 - a análise de frequência e a estimativa de aceitabilidade de riscos só devem ser aplicadas para os casos de acidentes maiores determinados pela APP e análise de conseqüências.

3 - o plano de emergência ou contingências deve ser iniciado no projeto básico e concluído no detalhamento, antes do início da operação do túnel.

10.11. DESCRIÇÃO DA TÉCNICA *CHECK-LIST*

É importante a verificação do nível de segurança de itens do túnel a serem projetados. Nesta técnica alguns dos itens devem ser verificados sob a ótica da segurança, como: extensão do túnel; número de galerias e faixas, inclusive largura das faixas; geometria de corte transversal; alinhamento vertical e horizontal; tipo de construção do túnel; características do tráfego, inclusive idade da frota, velocidade e risco de congestionamento; presença de veículos a passeio, pesados e de cargas perigosas; características das rodovias de acesso ao túnel; situação geográfica e meteorológica; serviços de infra-estrutura do túnel (ventilação, controle de fumaça, drenagem, alimentação de água, sistema de energia elétrica, iluminação, sistemas de comunicação e outros).

10.12. DESCRIÇÃO DA TÉCNICA APP (ANÁLISE PRELIMINAR DE PERIGO)

Uma planilha pode ser elaborada para a aplicação deste método com o objetivo de reunir informações a respeito de cada incidente verificado no túnel. Na Tabela 10.2 apresenta-se um modelo sugerido de planilha a ser utilizada com esta técnica. Para completar esta tabela utilizam-se as Tabelas 10.3 e 10.4.

Tabela 10.2 – Modelo de planilha a ser utilizada na técnica APP.

| Hipótese | | Perigo (Ponto crítico) | Causas possíveis | Conseqüências | Categoria de probabilidade | Categoria de conseqüência | Risco | Medidas mitigadoras |
|------------------|----------------------------|---|---------------------|---------------|-------------------------------|------------------------------|-------|------------------------|
| Ponto notável | Ponto controle | | | | | | | |
| motorista | Perdeu o controle do carro | Chocou-se com outro veículo e depois com o hidrante | embriagues | incêndio | | | | |

Tabela 10.3 – Categorias de Severidade.

| CATEGORIAS PROBABILIDADE | CATEGORIAS DE SEVERIDADE | | | |
|-----------------------------|--------------------------|----|----|----|
| | A | B | C | D |
| 1 BAIXA | RB | RB | RM | RA |
| 2 MÉDIA | RB | RM | RA | RA |
| 3 ALTA | RM | RM | RA | RA |

Tabela 10.4 – Categorias de Probabilidade.

| CATEGORIA DE SEVERIDADE | DESCRIÇÃO |
|-------------------------|---|
| A DESPREZIVEL | Nenhum dano ou dano não mensurável. |
| B MARGINAL | Danos irrelevantes aos usuários do túnel, ao meio ambiente e à comunidade mais próxima ao túnel. |
| C CRÍTICA | Pesados danos ao túnel, lesões graves e morte aos usuários do túnel, ao meio ambiente devido a liberações de substâncias químicas, tóxicas ou inflamáveis, alcançando até áreas externas ao túnel. Pode provocar lesões de gravidade moderada na população externa ao túnel ou impactos ambientais com reduzido tempo de recuperação. |
| D CATASTRÓFICA | Destruição do túnel. Impactos ambientais devido a liberações de substâncias químicas, tóxicas ou inflamáveis, atingindo áreas externas às instalações do túnel. Provocar mortes ou lesões graves na população externa ou impactos graves ao meio ambiente, com tempo de recuperação elevado. |

10.13. DESCRIÇÃO DA TÉCNICA *WHAT-IF* (E-SE)

A técnica *What-If* é um procedimento de revisão de riscos em túneis que se desenvolvem através de reuniões de questionamento de procedimentos, instalações, sistemas etc. de um túnel, gerando também soluções para os problemas levantados. Seu principal objetivo é a identificação de potenciais de riscos que passaram despercebidos em outras fases do estudo de segurança. O conceito é conduzir um exame sistemático de uma operação ou processo através de perguntas do tipo “*O que aconteceria se...?*”.

Os riscos, causas, conseqüências, ações existentes e recomendações de segurança correspondentes às questões *What-If* (E-SE) devem ser registradas em planilha de trabalho, como ilustra a Tabela 10.5.

Tabela 10.5 – Modelo de planilha para a técnica *What If*.

| Questão "What – If" (E-SE) | Causas possíveis | Conseqüências | Categoria de severidade | Medidas preventivas ou corretivas | |
|------------------------------------|---------------------|---------------|----------------------------|--------------------------------------|-------------|
| | | | | Existentes | A Implantar |
| | | | | | |

10.14. DESCRIÇÃO DA TÉCNICA FMEA (*FAIL MODE & EFFECT ANALYSIS*)

Essa técnica permite analisar o modo de falha, ou seja, como pode falhar os componentes de um equipamento ou sistema do túnel, estimar as taxas de falhas, determinar os efeitos que poderão advir e, conseqüentemente, estabelecer mudanças a serem realizadas para aumentar a confiabilidade do sistema ou do equipamento em análise para que funcione realmente de maneira satisfatória e segura.

A FMEA é geralmente efetuada de forma qualitativa na forma de planilha de trabalho, como mostra a Tabela 10.6. As conseqüências de falhas humanas no sistema em estudo não são consideradas, uma vez que poderão ser analisadas em análise de erro humano e em ergonomia. A quantificação da FMEA é utilizada para se estabelecer o nível de confiabilidade de um sistema ou subsistema do túnel.

Tabela 10.6 – Modelo de Planilha usada na Técnica FMEA

| Modos de Falha | Causas da Falha | Conseqüências da Falha | Categoria de Frequência | Medidas Preventivas ou Corretivas | |
|----------------|--------------------|---------------------------|----------------------------|--------------------------------------|-------------|
| | | | | Existentes | A Implantar |
| | | | | | |

Para se aplicar a FMEA é necessário se conhecer em detalhes e compreender a missão do sistema no túnel, suas restrições e seus limites de falha e sucesso. O sistema em análise pode ser dividido em subsistemas que possam ser controlados, a seguir traçam-se os diagramas de blocos funcionais do sistema e de cada subsistema, a fim de determinar o seu inter-relacionamento e de seus componentes e preparam-se listas completas dos componentes de cada subsistema e suas funções e, finalmente, pela análise do projeto e diagrama se estabelecem os modos de falhas que poderiam afetá-los e suas respectivas gravidades, as taxas de falhas e se propõem medidas de segurança. As taxas de falhas podem ser classificadas nos seguintes grupos: freqüente, provável, razoavelmente ou pouco provável, conforme indicado na Tabela 10.7. A estimativa das taxas de falhas é obtida em banco de dados de confiabilidade desenvolvidos em testes realizados por fabricantes de componentes ou pela comparação com sistemas semelhantes.

Tabela 10.7 – Critério de Freqüência.

| CATEGORIA | FREQUÊNCIA (oc./ano) | DESCRIÇÃO |
|---------------------|-------------------------|---|
| 1 Pouco provável | $f < 10^{-4}$ | Ocorrência teoricamente possível, porém tecnicamente improvável. |
| 2 Provável | $10^{-1} > f > 10^{-4}$ | Provável de ocorrer durante a vida útil do túnel. |
| 3 Frequente | $f > 10^{-1}$ | Possível de ocorrer mais de uma vez durante a vida útil do túnel. |

10.15. DESCRIÇÃO DA TÉCNICA ÁRVORE DE EVENTOS (AAE)

A seguir, apresenta-se um exemplo geral de uma árvore de eventos para o caso de vazamento de produto inflamável. Esta técnica é mesmo muito simples, observando-se a Figura 10.3 percebe-se essa simplicidade. Contudo, é uma técnica que deve ser apresentada nas fases de projeto básico e executivo e mantida na etapa de operação e manutenção.

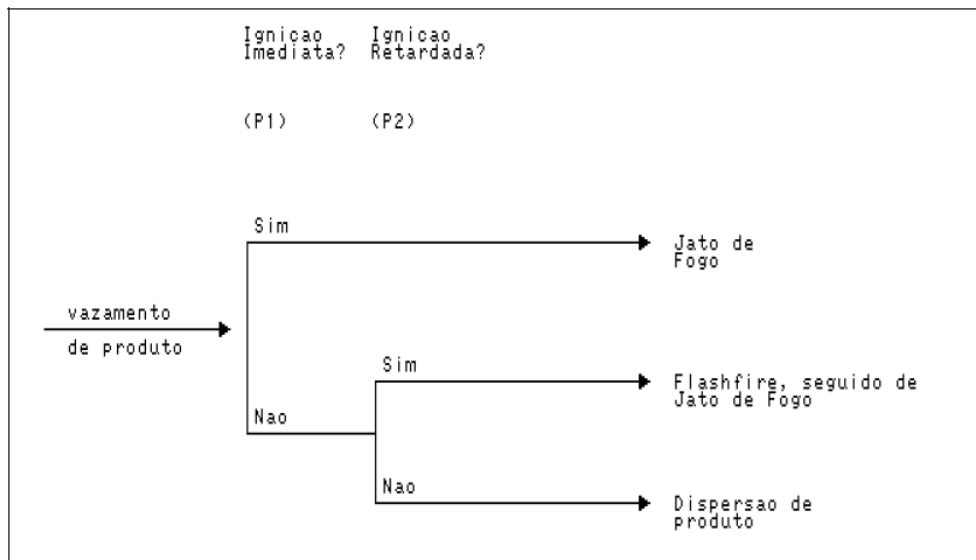


Figura 10.3 – Esquema da técnica de árvore de eventos.

10.16. DESCRIÇÃO DA TÉCNICA ÁRVORE DE FALHAS (AAF)

Tem como objetivo a análise das causas de um só evento, por exemplo: incêndio ou explosão ou vazamento de produto tóxico, inflamável/explosivo no interior do túnel. Na Figura 11.4 apresenta-se um exemplo geral de árvore de falhas em túnel.

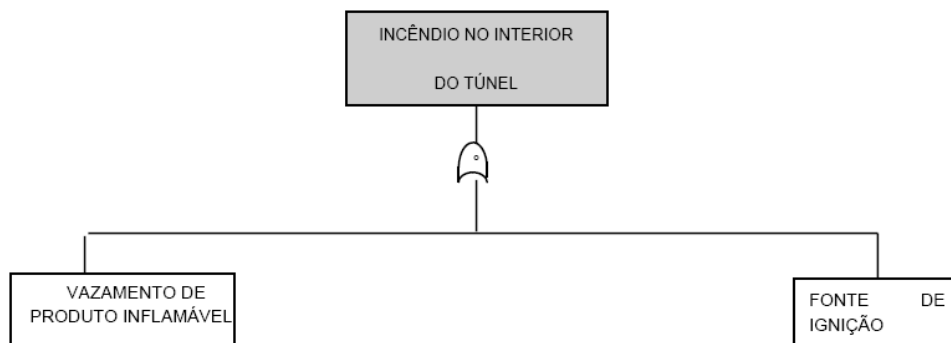


Figura 10.4 – Árvore de falhas - Incêndio no interior do túnel

10.17. DISPONIBILIDADE DOS SISTEMAS DE PROTEÇÃO E DE SEGURANÇA

Para efeito de análise de risco em túneis, é necessário estabelecer o nível de disponibilidade do sistema de proteção e dispositivos de segurança da unidade que se está estudando.

Entende-se por sistema de proteção, todos os equipamentos, malhas de controle e instrumentação, inter-travamentos que tem como função atuar na supervisão do túnel e no caso de ocorrência de uma emergência no interior do túnel e, por sistemas de segurança.

A determinação da disponibilidade destes sistemas fornece a probabilidade destes estarem em condições de funcionamento quando requeridos.

A indisponibilidade (falha não auto-evidenciável) pode ser obtida através da Equação 10.1:

$$I = \lambda (\theta/2 + MTTR) \quad (10.1)$$

onde:

I = Indisponibilidade

λ = taxa de falha do equipamento em estudo (número de falhas/ano)

θ = período entre testes (meses)

MTTR= tempo médio de reparo (h)

10.18. ACEITABILIDADE DE RISCOS

O critério de aceitabilidade de riscos se baseia no cálculo do risco social e pode ser demonstrado pela Figura 10.5.

Define-se Risco Social como sendo o risco da população presente na área de abrangência do acidente e indica o grau do dano catastrófico e é normalmente representado através de diagramas F x N, onde F é a frequência acumulada ou ocorrências acidentais e N é o número de fatalidades.

Como critério para a avaliação do Risco Social utiliza-se a curva F-N . São duas retas que definem três regiões de aceitabilidade de riscos em túneis: região “intolerável”, região “gerenciável” e região “negligenciável”. Os riscos situados na região entre as curvas limites dos riscos intoleráveis e negligenciáveis, embora situados abaixo da região de intolerância, devem ser reduzidos tanto quanto praticável por meio de medidas de segurança.

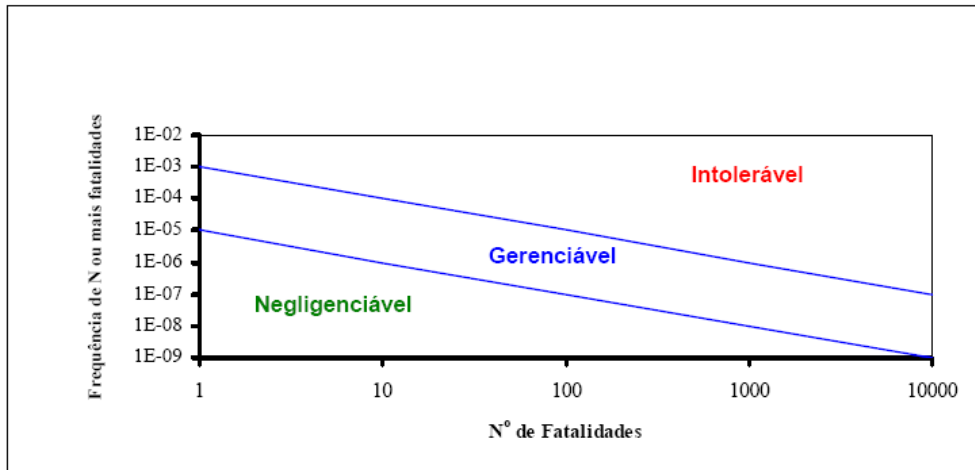


Figura 10.5 – Gráfico da aceitabilidade de riscos em túneis

Por fim, é importante citar a existência de um documento elaborado pela *The International Tunnelling Insurance Group* (ITIG), o *A Code of Practice for Risk Management of Tunnel Works*, que orienta as empresas de seguros a exigirem certas ações para a segurança de seus trabalhos. Este Código está bastante difundido internacionalmente, o que lhe deu um certo status de manual ou guia.

Trata-se de um documento que objetiva alcançar a maneira mais segura de se construir túneis, através de medidas que contemplam o empreendimento em todas as suas etapas (estudos de viabilidade, projetos, construção, operação, manutenção). Este manual também indica os cuidados que o cliente e o contratante devem adotar na elaboração do contrato, seja de projeto ou de construção.

Apesar de seu caráter genérico, por não possuir instruções específicas como em normas, este documento apresenta bastante riqueza de informações, além disso, sua flexibilidade, característica que permite sua utilização em qualquer túnel no mundo, ajuda a explicar a razão pela qual este documento recebeu tamanha credibilidade internacional.

Comparando as intruções contidas neste Código com a presente dissertação, observa-se que ao se obedecer as orientações aqui apresentadas, principalmente no presente capítulo, também respeita-se as orientações contidas no citado Código. A única exceção concentra-se na elaboração do contrato do cliente, que não foi objeto explorado ao longo deste estudo.

11. MANUTENÇÃO

Estruturas subterrâneas necessitam de serviços de manutenção e, se necessário recuperação, uma vez que podem sofrer danos estruturais durante a sua construção, quando a obra fica parada e sem manutenção, ou durante a sua vida útil pelo desgaste natural ou ataque de água subterrânea. Especialmente aquelas em meios urbanos devem ter um plano de manutenção, e se necessário de reabilitação, pois acidentes nestas estruturas levariam a grandes transtornos e prejuízos.

Ainda falta ao Brasil uma cultura de manutenção de suas obras de arte, a exemplo de túneis, pontes, viadutos, entre outras. O que acontece em boa parte dos casos é um quase ou total abandono dessas estruturas, chegando a atingir um alto grau de deterioração e só então elas são recuperadas, gerando assim um custo alto se comparado a manutenções preventivas e pequenos reparos.

Os problemas patológicos ocasionados por manutenção inadequada, ou mesmo pela ausência total de manutenção, têm sua origem no desconhecimento técnico, na incompetência, no desleixo e em problemas econômicos. A falta de alocação de verbas para manutenção pode vir a se tornar um fator responsável pelo surgimento de problemas estruturais de maiores proporções, implicando gastos significativos e, no limite, a própria demolição da estrutura (Souza & Ripper, 1998).

A manutenção e reparos de estruturas subterrâneas têm se tornado um tópico de importância crescente para a engenharia de túneis nas últimas décadas. Segundo Richards (1998), as razões para esse interesse são:

✓ Custo de recuperação e manutenção - Devido aos altos custos para execução de reparos, levando em consideração os custos com transtornos, em alguns casos, a construção de um novo túnel seria mais econômica do que executar maiores reparos. No entanto, uma inspeção bem planejada e um programa de manutenção preventiva podem prolongar consideravelmente a vida útil do túnel, ao mesmo tempo atrasar ou evitar totalmente a necessidade de maiores trabalhos de recuperação.

- ✓ Idade - Muitos túneis no momento têm mais de 100 anos de idade e os sistemas de transporte cresceram em termos de tamanho, frequência e velocidade ao longo desse período. Conseqüentemente, os túneis ficaram sujeitos a situações para os quais não foram originalmente projetados, o que gera a necessidade de grandes reparos ou total recuperação dos sistemas de suporte dos mesmos.
- ✓ Demanda sub-dimensionada - Com o crescimento populacional, o avanço tecnológico e industrial, entre outros fatores, vem a crescente necessidade de infraestrutura.
- ✓ Novas tecnologias – Tem havido significativo avanço no projeto de suportes de túneis. Novos materiais têm sido desenvolvidos para a construção e reparos de túneis.

Para Souza & Ripper (1998), a manutenção de uma estrutura é o conjunto de atividades necessárias para a garantia do seu desempenho satisfatório ao longo do tempo, ou seja, o conjunto de rotinas que tenham por finalidade o prolongamento da vida útil da obra, a um custo compensador. Os mesmos ressaltam que um bom programa de manutenção implica na definição de metodologias adequadas de operação, controle e execução da obra, e na análise custo-benefício desta manutenção. E ainda em termos de manutenção fica clara a co-responsabilidade, pois o proprietário, investidor e usuário sempre deverão estar dispostos a arcar com o custo do sistema de manutenção concebido pelos projetistas, que deverá ter sido respeitado e viabilizado pelo construtor.

11.1. EXPERIÊNCIA INTERNACIONAL COM MANUTENÇÃO DE TÚNEIS

11.1.1 ESTADOS UNIDOS

A Síntese No. 23, desenvolvida pelo Programa de Pesquisas Cooperativas das Agências de Transportes dos EUA em 1997, propõe revisar as políticas e práticas de inspeção existentes de alguns órgãos, para desenvolver um claro entendimento de técnicas de engenharia e gerenciamento utilizadas para inspecionar os túneis e as estruturas enterradas. A síntese foi desenvolvida a partir de duas pesquisas de informações: uma delas obtida de quatorze empresas que responderam à pesquisa encaminhada a 47 empresas de transporte, nos EUA, Europa e Ásia; sendo a outra, um estudo de caso de cinco empresas, com diferentes abordagens, sendo selecionadas pelo grau de informação, permitindo profundidade de pesquisa, e por serem exemplos de como podem ser diferentes as práticas de inspeção entre as

empresas (TCRP,1997). Por meio dos dados dos questionários respondidos, a síntese chegou às seguintes informações:

- ✓ Há interesse de utilizar cada vez mais a prática de inspeções técnicas seqüenciais (continuadas), por meio de um programa gerencial;
- ✓ Busca de identificação dos problemas prioritários das estruturas, com discussões e tratamentos dirigidos, porém totalmente integrados num gerenciamento completo, com as outras ações também prioritárias do sistema;
- ✓ As empresas pesquisadas apresentam forte variação nas frequências, requisitos de testes e procedimentos, não sendo possível reunir os padrões em um único. Não havendo, portanto, padrão universal para procedimentos de inspeções em túneis;
- ✓ O problema No. 1 é a infiltração e vazamento (entrada de água do maciço) nas estruturas;
- ✓ Não há regulamentação federal para processos de inspeções e padronizações para reparos e reabilitações de túneis;
- ✓ Há latente possibilidade de exploração técnica e comercial do tema: Padronização Universal de Inspeção em Túneis, dada a complexidade do próprio tema e do volume de recursos envolvidos.

Nos Estados Unidos, utilizando-se dados apresentados em TCRP (1997), foram obtidas informações referentes às seguintes companhias de metrô:

- ✓ Em Chicago, a CTA (Chicago Transit Authority), que possui 157 km de linhas e transporta 436.750 usuários por dia, realiza inspeções a cada seis anos do tipo programada com relatórios prévios, inspeções visuais, sondagens, ensaios e avaliação de engenharia, gerando formulários, fotos, diário e registro em banco de dados. Pode realizar inspeções especiais conforme necessidade.
- ✓ Em São Francisco, a BART (Bay Area Rapid Transit District) possui 115 km de linhas, transportando 255.000 usuários por dia. A frequência de inspeções é a cada dois anos, do tipo programada, com exceções conforme a idade, solicitações ou defeitos verificados. São utilizados relatórios prévios, designando códigos de prioridade e inspeção completa, gerando relatórios para cada estrutura e registro em banco de dados.
- ✓ Para Nova York, a NYCTA (New York City Transit Authority), com 398 km de extensão e transportando 1.700.000 usuários por dia útil, realiza inspeções com frequência

anual, com exceção de túneis sob rios, acontecendo nestes casos a cada seis meses. O tipo de inspeção utilizado é a programada visual, com definição de áreas específicas, procedimentos de inspeção estrutural e gerando planilha de anomalias, registro em banco de dados, resumo e planos diários, semanais e anuais.

11.1.2 JAPÃO

No Japão as inspeções do sistema de suporte de túneis são divididas em inspeção primária e secundária. Novas tecnologias de inspeção não-destrutivas estão sendo utilizadas, entre elas veículos equipados com sistemas de georadar e câmeras de infravermelho que executam inspeções rápidas (Asakura & Kojima, 2003).

11.1.3 ALEMANHA

Os túneis ferroviários são inspecionados por especialistas a cada três anos. É utilizado um carro móvel com plataforma de trabalho para inspeção visual dos túneis, são realizados ensaios com martelo para determinar vazios no suporte (Haack et al., 1995). São utilizadas técnicas sonoras e radar, para localizar reforço metálico e detectar áreas danificadas, métodos elétricos para determinar corrosão, métodos magnéticos para detectar rupturas nos elementos metálicos e scanner a laser para executar inspeções rápidas em túneis rodoviários (Naumann & Haardt, 2003).

11.1.4 FRANÇA

Na França a experiência prática com ensaios não destrutivos iniciou em meados dos anos 80 do século passado, especialmente no que diz respeito a investigações em túneis rodoviários. São utilizados principalmente ensaios como o georadar, métodos ultrasônicos, termografia infravermelha.

11.1.5 REPÚBLICA TCHECA

A frequência e natureza de investigações executadas nos túneis diferem das investigações em túneis similares em outros países. No caso específico de túneis de metrô, a frequência das inspeções é semanal, mensal e anual. Entre os métodos de inspeção estão checar e medir a capacidade do sistema de suporte do túnel, porém não são aplicados ensaios não-destrutivos especiais. Nos túneis ferroviários a frequência de inspeções é mensal e anual com uma

inspeção principal a cada cinco anos. Os métodos de inspeção são os mesmos daqueles utilizados para túneis de metrô. Nos túneis rodoviários as inspeções são realizadas duas vezes ao ano, com inclusão de inspeções especiais quando necessário. São verificados o estado do suporte, a presença de fluxo de água, trincas visíveis e medidas de temperatura (Haack et al., 1995).

11.2. EXPERIÊNCIA BRASILEIRA COM MANUTENÇÃO DE TÚNEIS

Lemos (2005) observou que, no Brasil, os túneis que apresentam programas de manutenção são em sua maioria os metroviários. Entre os metrôs que estão em operação atualmente, aqueles que apresentam trechos subterrâneos são: o Metrô de São Paulo, Metrô do Rio de Janeiro e Metrô de Brasília.

O Metrô do Rio de Janeiro (Metrô-Rio), inaugurado em março de 1979, é constituído de duas linhas, a Linha 1 com 13,2 km de vias subterrâneas e a Linha 2 com 1,6 km em vias subterrâneas, 3,7 km em elevado e 18,0 km em vias de superfície (Metrô-Rio, 2005).

O Metrô de São Paulo (Metrô-SP), que teve sua inauguração em 1974, possui hoje quatro linhas em operação: Linha Azul, Linha Verde, Linha Vermelha e Linha Lilás, totalizando 57,6 km de extensão, onde 30 km correspondem ao trecho subterrâneo (Metrô-SP, 2005).

O Metrô do Distrito Federal (Metrô-DF) inaugurado em março de 2001 possui 42 km de extensão tendo um trecho totalmente subterrâneo de 7,2 km de extensão (Metrô-DF, 2005).

Os sistemas de Metrôs brasileiros vêm se preocupando cada vez mais em manter as suas estruturas: material rodante (trens), equipamentos fixos (escadas rolantes, ventilação, subestação etc.), edificações e estruturas civis (túneis, entre outros). No Metrô do Distrito Federal, o plano de manutenção previsto para os túneis é simplificado, consistindo apenas de inspeção visual periódica e lavagem da estrutura. Uma empresa de consultoria já foi contratada para realizar um diagnóstico da estrutura dos túneis.

No Metrô-Rio existe uma equipe voltada para realizar a manutenção nas estruturas civis, além das outras estruturas.

No Metrô-SP também há uma equipe voltada exclusivamente para a manutenção das estruturas civis, e a frequência das inspeções é a cada cinco anos, sendo estas completas, ou mensal, do tipo superficial juntamente com a via permanente. As exceções acontecem conforme necessidade ou solicitação quando então, são realizadas inspeções especiais. As

inspeções são feitas utilizando relatórios prévios, inspeção visual, ensaios, monitoramentos e avaliação de engenharia e por fim são gerados relatórios de cada trecho, com croquis, formulário, fotos, planilha de anomalias e registro em banco de dados (Fernandes et al., 2001).

O sistema informatizado implantado no Metrô-SP, denominado Maubermam, é uma ferramenta básica para gerenciamento desse universo de informações obtido nas inspeções e apresenta características em tempo real, constituindo-se em um adequado dispositivo para suporte operacional das atividades relacionadas à manutenção civil, e sendo um eficaz processador de informações gerenciais. Esse sistema é composto de banco de dados alfanumérico, aplicativo para cadastro e consultas das informações alfanuméricas e georeferenciadas (Fernandes et al., 2001).

11.3. PRINCIPAIS DANOS EM TÚNEIS

Segundo o DNER (1994), os principais efeitos dos problemas patológicos que conduzem à deterioração da estrutura são:

- ✓ Degradação da aparência da estrutura em função das manchas, eflorescências, estalactites e fissuras no concreto, além de deformações excessivas na estrutura;
- ✓ Perda da rigidez e resistência da estrutura em função da presença de fissuras, do destacamento ou desagregação do concreto ou de corrosão de armaduras;
- ✓ Diminuição da vida útil da estrutura, quando os efeitos anteriormente citados atingem um nível de comportamento que impede a continuação do uso da estrutura.

A maior parte da bibliografia consultada relata principalmente danos e degradação nas estruturas subterrâneas causadas pela infiltração de água. Estes danos são classificados de acordo com a ITA (1991) em três diferentes categorias:

- ✓ Efeitos externos (no entorno do túnel, mas não afetando sua estrutura);
- ✓ Efeitos estruturais (afetando a capacidade estrutural do túnel);
- ✓ Efeitos funcionais (afetando a funcionalidade do túnel).

A Tabela 11.1 apresenta os danos típicos observados em túneis rodoviários em função da sua idade.

Tabela 11.1 – Danos típicos em estruturas de túneis dependendo da sua idade (modificado - Haack, 1998).

| Ano | Tipo de dano típico |
|-------|--|
| 0 | Aprovação da obra |
| 0-5 | Garantia |
| 5-25 | Surgimento de danos causados por má execução (danos devido a congelamento, ataque químico da água etc.) |
| 50-70 | Danos devido ao projeto errado ou dimensionamento insuficiente (pressão de expansão, efeitos de variadas condições da água subterrânea, formação de cavidades fora do suporte do túnel etc.) |
| 80 | Começam os danos devidos ao envelhecimento (erosão de juntas em alvenaria, destruição de partes do sistema de suporte, aumento do número de casos devido à idade do túnel dependendo da qualidade e características da estrutura e maciço circundante) |

Em suportes de concreto em particular, a deterioração ocorre principalmente devido aos seguintes fatores: desgaste superficial, sobrecarga mecânica, corrosão da armadura, carbonatação e ataque químico por sulfato (AFTES, 1999). Para o DNER (1994) os tipos de causas de danos às estruturas de concreto podem ser divididos em:

- ✓ Causas humanas;
- ✓ Causas acidentais;
- ✓ Causas naturais - física, química e biológica.

Entre as causas humanas, estão os erros que podem ocorrer ainda na fase de projeto, na fase de execução e na fase de utilização. Na fase de projeto os erros mais comuns são: inadequação de projeto ao ambiente, má concepção estrutural do projeto, projeto incompleto, erros de cálculo ou de detalhamento, modelo de análise inadequado, especificação de materiais inadequados. Na fase de execução eles são: adoção de materiais inadequados ou de baixa qualidade, despreparo técnico para a execução, execução em desacordo com o projeto, negligência na execução. E por último estão os erros ocorridos na fase de utilização, sendo o principal deles, a falta de programa de manutenção.

Atividade sísmica, ambiente operacional agressivo, interno ou externo, e acidentes durante a operação, tais como incêndios, também podem ser citados como causadores em potencial de danos a estruturas subterrâneas. Com relação à deterioração do concreto devido ao fogo, como no caso de incêndios nos túneis, Mehta & Monteiro (1994) afirmam que diferentemente do aço, quando sujeito a temperaturas da ordem 700 a 800°C, o concreto é capaz de manter resistência suficiente por períodos relativamente longos, permitindo assim operações de resgate pela redução de risco de colapso estrutural. O comportamento real de um concreto exposto à alta temperatura é o resultado de muitos fatores que interagem simultaneamente e que são muito complexos para uma análise exata.

Segundo Souza & Ripper (1998), entende-se por causas naturais, aquelas que são inerentes ao próprio material concreto e a sua sensibilidade ao ambiente e aos esforços solicitantes, não resultando, portanto, de falhas humanas ou de equipamento.

Entre as causas naturais está a deterioração por ataque biológico provocado por fungos ou bactérias. Alguns fungos podem se alimentar de hidrocarbonetos e, no metabolismo de digestão e excreção, propiciar a produção de ácidos que atacam o concreto. Portanto, é interessante verificar a presença de combustíveis junto às estruturas de concreto, uma vez que eles funcionam como uma fonte de alimentos para bactérias, ou também devido ao risco de incêndio ou explosão (Fernandes et al, 2000).

Ainda entre as causas naturais, a deterioração do sistema de suporte em concreto de túneis pode ser decorrente de reações químicas e ações mecânicas. Entretanto, Mehta & Monteiro (1994) enfatizam que a distinção entre as causas físicas e químicas da deterioração é puramente arbitrária; na prática, as duas frequentemente se sobrepõem.

É possível que o dano na estrutura do túnel tenha sua origem em reações químicas. A resistência do concreto a processos destrutivos iniciados por reações químicas envolve geralmente, mas não necessariamente, interações químicas entre agentes agressivos presentes no meio externo e os constituintes da pasta de cimento. Entre as exceções estão as reações álcali-agregados, que ocorrem entre os álcalis na pasta de cimento e certos materiais reativos presentes no agregado, hidratação retardada do CaO e MgO cristalinos, se presentes em quantidades excessivas no cimento Portland, e corrosão eletroquímica da armadura no concreto (Mehta & Monteiro, 1994).

Os elementos estruturais, quando submetidos a solicitações maiores do que aquelas previstas em projeto, deformam-se excessivamente, provocando fissuras ou trincas, implicando na perda de resistência e rigidez da peça (Serrano et al., 2004).

A deterioração do concreto devido ao desgaste superficial ocorre principalmente em túneis que compõem sistemas de captação de esgoto ou água bruta. Contribuem para o desgaste superficial produtos químicos adicionados ao líquido transportado, sedimentos presentes e a permanente passagem de líquidos permitindo que a superfície do concreto fique sujeita à abrasão, aumentando a perda da camada de cobrimento do concreto, facilitando acesso às armaduras (Serrano et al., 2004).

A pasta de cimento endurecida não possui alta resistência ao atrito. A vida útil do concreto pode ser seriamente diminuída sob condições de ciclos repetidos de atrito, principalmente quando a pasta de cimento do concreto possui alta porosidade ou baixa resistência, e é inadequadamente protegida por um agregado que não possui resistência ao desgaste (Meththa & Monteiro, 1994).

11.4. ENSAIOS

Para elaborar um diagnóstico de uma estrutura é preciso obter informações complementares, além das inspeções rápidas que detectam locais que ficaram ou estão submetidos a agressões, que determinem a qualidade do concreto e que defina o comprometimento da durabilidade do suporte de concreto, ou seja forneça uma avaliação mais detalhada da estrutura. Essas informações são obtidas por meio de ensaios destrutivos, semi-destrutivos ou mesmo, não-destrutivos, realizados em testemunhos extraídos da estrutura ou realizados “in loco”.

Haack et al. (1995) apresentam onze ensaios não destrutivos, sendo agrupados em quatro técnicas, que são oscilação mecânica, radiação, elétrico-eletrônicas e ópticas. Apenas três dos ensaios são considerados como de alto ou de muito alto potencial para aplicação em túneis sendo eles o georadar, a termografia infravermelha e a análise multiespectral. Essa classificação se refere principalmente à rapidez na execução da inspeção e à eficiência do método em detectar anomalias no sistema de suporte. A seguir são apresentados alguns detalhes sobre esses principais ensaios para inspeção em túneis.

11.5. GEORADAR

O GPR (Ground Penetrating Radar) ou Georadar, como também é conhecido, é um método geofísico de investigação que opera na faixa de rádio-frequência (MHz) emitindo e recebendo ondas eletromagnéticas através de antenas transmissoras e receptoras conectadas a uma unidade de controle. Esse método se baseia nas reflexões que ondas eletromagnéticas sofrem ao encontrarem descontinuidades, que correspondem a mudanças de propriedades dielétricas. A dieletricidade é o fenômeno que governa a velocidade de difusão de ondas eletromagnéticas em diferentes materiais. Outra propriedade que influencia na difusão de ondas eletromagnéticas em um meio é a condutividade, que representa a habilidade do material para conduzir eletricidade (Celestino, 1997).

O Georadar, assim como diversos equipamentos de pesquisa, foi inicialmente desenvolvido para fins militares na segunda grande guerra, onde era utilizado para localizar armas, bombas e galerias subterrâneas. Atualmente, o GPR é considerado o equipamento mais sofisticado para sondagens e investigações de baixa profundidade (Esteio, 2004). Um exemplo de georadar é apresentado na Figura 11.1.



Figura 11.1 – Exemplo de geo-radar (Esteio, 2004).

A profundidade de penetração da onda eletromagnética na estrutura do túnel depende principalmente de três fatores: frequência, reflexão e condutividade. Por meio desse método é possível determinar anomalias estruturais (vazios), variações de espessura e materiais constituintes do sistema de suporte do túnel (reforço, arcos etc.), vazios entre o suporte e o

maciço, as condições de maciço circundante, detectando a presença de vazios no mesmo, variação na sua constituição e anomalias (Naumann et al., 2003).

Segundo Haack et al. (1995) a antena do aparelho de georadar tem um ângulo de reflexão de 60°, portanto as anomalias são identificadas antes que a antena esteja localizada diretamente abaixo delas. À medida que a antena é guiada pela superfície da estrutura em direção ao defeito, o tempo de transmissão do sinal se torna cada vez menor, até que a antena esteja localizada exatamente abaixo da anomalia. Quando a antena vai se afastando, o sinal volta a crescer, portanto, quando uma anomalia está presente, é obtida uma curva hiperbólica de tempo, facilitando a identificação de anomalias que porventura estejam presentes em determinado local.

As limitações encontradas com o uso do georadar são:

- ✓ A dificuldade de determinar trincas com espessura entre 0,3 e 3 mm em superfícies secas;
- ✓ A presença de armadura no concreto, o que dificulta a detecção de defeitos, por ser uma superfície refletora;
- ✓ A presença de umidade altera a constante dielétrica do meio, influenciando assim a velocidade de propagação da onda e o tempo de reflexão da mesma;
- ✓ Geralmente requer calibração através de outros métodos.

As principais vantagens do geo-radar, segundo (Esteio, 2004) são:

- ✓ Possibilidade de executar perfis contínuos do suporte do túnel e do solo;
- ✓ Rapidez e baixo custo nos levantamentos, se comparado a sondagens, que geralmente são estudos pontuais;
- ✓ Resultados rápidos e de alta resolução.

11.6. TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA

A termografia infravermelha capta e mede a radiação térmica, também conhecida como radiação infravermelha emitida pela superfície a ser estudada. Essa técnica permite uma representação visual da distribuição de temperatura na superfície, através de fotografia ou digitalização da superfície utilizando filmes ou filtros sensíveis aos comprimentos de ondas. A temperatura detectada na superfície é governada pelo fluxo térmico através da

superfície, ou seja, troca de energia térmica entre o maciço e a parte interna do suporte em contato com o interior do túnel (Celestino, 1997).

O fluxo térmico através da superfície, por sua vez, é influenciado por discontinuidades mecânicas e/ou hidráulicas, como vazios, trincas e zonas saturadas. A termografia infravermelha é indicada para determinar regiões com presença de umidade, locais com baixa aderência entre o suporte externo e o maciço, mudanças nas condições geológicas do maciço circundante em contato com o suporte e defeitos neste último. Algumas limitações do método, segundo Haack et al. (1995) são:

- ✓ É necessário ter um fluxo estacionário através do suporte do túnel, e esse deve ser constante além do período de medida para avaliar mudanças nas condições, e o gradiente entre o maciço e a superfície do suporte deve ser de pelo menos 2 a 4° C, dependendo da acurácia do "scanner".
- ✓ A termografia geralmente não penetra profundamente no concreto e a acurácia é questionável se o maciço estiver na mesma temperatura que o ar ambiente dentro do túnel.
- ✓ Variações no teor de umidade ao longo do tempo podem causar distúrbios nos resultados.
- ✓ O suporte do túnel não deve ter instalação ou revestimento (cobertura) que irá impedir a penetração da radiação térmica.

Os instrumentos de termografia ou de imageamento térmico utilizam um sistema ótico para captar e focalizar a energia infravermelha, capturada pelo sistema, para o detector do aparelho. O detector converte a energia infravermelha em um sinal elétrico, proporcional ao qual ele é então amplificado. Esse sinal amplificado é enviado para um processador de vídeo e então para um display visual, similar a um tubo de raios catódicos ou um visor de cristal líquido. A imagem mostrada no display é um mapa de temperatura no qual as suas variações, num nível de cinzas até imagens coloridas, correspondem às diferenças de energias radiantes. Esse mapeamento térmico é chamado de termograma (REM, 2004). Na Figura 11.2 pode-se observar um termograma de um túnel.

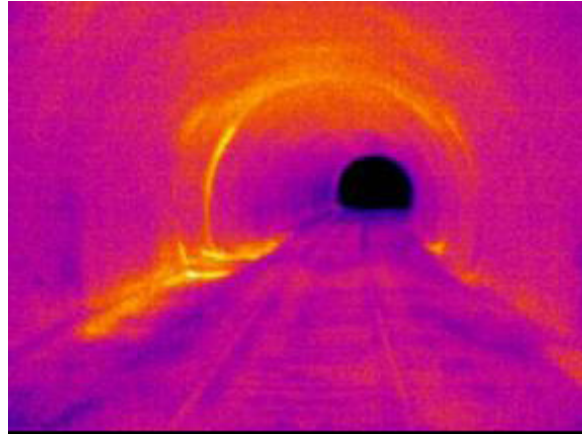


Figura 11.2 – Imagem de um túnel com infravermelho (Aperio, 2004).

Alguns instrumentos medem a intensidade de brilho, o mapeamento de imagem e fornecem uma medição de temperatura em qualquer ponto da imagem. A imagem térmica pode ser gravada em vídeo, fotografada ou armazenada num sistema de pós-processamento digital e posteriormente analisadas por meio de softwares desenvolvidos para esse fim (REM, 2004).

11.7. ANÁLISE MULTIESPECTRAL

Na análise multiespectral são tiradas fotografias da superfície a ser estudada de maneira similar a fotografia colorida, sendo que a principal diferença entre a fotografia colorida e a análise multiespectral é que nesta última, o espectro luminoso não é registrado todo de uma só vez, ao invés disso, pequenas áreas do espectro luminoso são filtradas.

Um espectro luminoso é a decomposição da luz em frequência e comprimento de onda. Algumas cores produzidas por pigmentos são os resultados da reflexão de vários comprimentos de onda. Porém, cada frequência corresponde a uma única cor (Nuclio, 2004).

Um projetor multiespectral é usado para avaliar o filme fotográfico. O filme preto e branco visto contra um fundo colorido, permite que uma sombra cinzenta se torne visível e por superposição das fotos com diferentes filtros, é possível tornar visível as diferenças espectrais, provenientes de umidade, depósitos de carbonato e outros defeitos na superfície.

Esse método não permite detectar vazios no suporte, porém através do mesmo é possível detectar trincas secas com aberturas maiores que 0,5 mm (Richards, 1998).

11.8. INSPEÇÕES RÁPIDAS COM EQUIPAMENTOS INSTALADOS EM VEÍCULOS

Alguns países já utilizam equipamentos como câmeras infravermelhas e/ou georadar acoplados a veículos sob trilhos, no caso de metrôs.

Sistemas interessantes de inspeção que utilizam um carro sob trilhos consistem geralmente em uma câmera de alta definição, para checar os defeitos na superfície de concreto como trincas ou juntas frias, um termógrafo e um radar do túnel, para detectar os danos dentro do concreto (Figura 11.3). Enquanto o carro está se movendo a cinco quilômetros por hora, a câmera de alta definição, o termógrafo e o georadar executam a inspeção sem contato e não destrutiva. Os dados de cada equipamento passam por avaliação e um programa de diagnóstico, classificando a urgência de reparos em três níveis: muito urgente, urgente e sem defeito (Takenaka , 2001). Existem softwares especialmente desenvolvidos para processarem os dados captados.

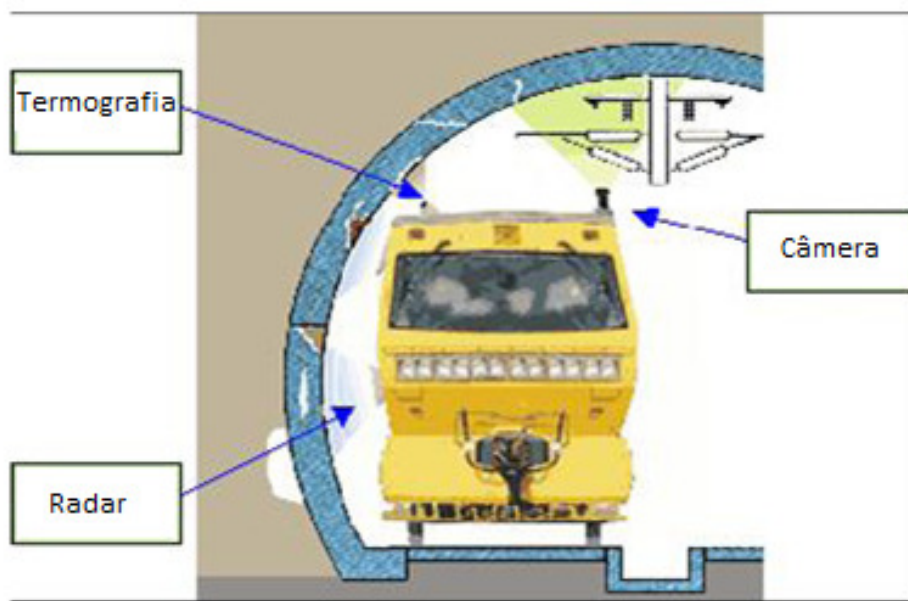


Figura 11.3 – Protótipo de um sistema de inspeção (Takenaka, 2001).

12. PROPOSTA DE DIRETRIZES GERAIS PARA PROJETO DE TÚNEIS RODOVIÁRIOS

O objetivo central deste trabalho é a proposta de diretrizes gerais para a elaboração de projetos de túneis rodoviários. A partir dos capítulos anteriores foi possível extrair a essência de cada tema e indicar os principais itens a serem considerados na elaboração de projetos, estudos ou construções de túneis destinados ao modal rodoviário.

Portanto, os itens a seguir representam a mais pura essência deste trabalho, que é a proposta do autor a respeito do que deve ser considerado na elaboração de projetos, estudos ou construções de túneis rodoviários.

Como em alguns temas há a recepção “*Ipsis Litteris*” da abordagem realizada na pesquisa bibliográfica, por ter sido considerada completa e suficiente, haverá neste capítulo a repetição de trechos de capítulos anteriores. Esse artifício será utilizado para evitar que o leitor possa compreender com perfeição a proposta apresentada, recorrendo o mínimo possível a capítulos anteriores, tornando a leitura compreensível, direta e agradável.

É importante ressaltar que as diretrizes propostas a seguir não devem ser consideradas inflexíveis. Ou seja, casos específicos poderão ter tratamento diferenciados, pois não há a intenção de inviabilizar a execução de um bom projeto de obra subterrânea por conta de dificuldades no atendimento de questões pontuais da diretrizes propostas neste trabalho.

Entretanto, em um contexto geral e considerando a dificuldade que um projetista, auditor, consultor ou analista tem em encontrar referências bibliográficas, esse material pode ser considerado um excelente ponto de apoio, ou mesmo um guia para os interessados, tendo sempre em mente que algumas situações reais podem exigir soluções diferenciadas das aqui propostas.

12.1. ESTUDOS E INVESTIGAÇÕES GEOTÉCNICAS

Um programa de investigação para o planejamento e concepção de um projeto de túnel viário (rodoviário, ferroviário ou metroviário) deverá incluir a seguintes componentes:

- ✓ Coleta das informações existentes;
- ✓ Pesquisas e reconhecimento do local das obras;
- ✓ Mapeamento geológico;
- ✓ Investigações do subsolo;
- ✓ Estudos Ambientais;
- ✓ Pesquisas sobre atividades tectônicas na região;
- ✓ Gestão de dados geoespaciais.

Primeiramente deve-se ressaltar que um bom programa de investigações geotécnicas é realizado em parcelas, jamais todo de uma só vez. Isso garante ao projetista a possibilidade de se melhorar e refinar os estudos nas áreas e profundidades que mereçam maior atenção.

As investigações iniciais para o planejamento e estudos de viabilidade podem ser direcionadas aos estudos de informações já existentes, em obras eventualmente localizadas nas proximidades (rodovias, ferrovias, barragens) ou em publicações diversas (revistas técnicas, artigos, monografias, dissertações e teses), e reconhecimento preliminar. Na etapa de estudos de alternativas e de impacto ambiental deve-se realizar o mapeamento geológico e investigações mínimas de subsolo, de forma que se permita estudar o alinhamento e o perfil das alternativas, possibilitando, com isso, a avaliação da opção mais adequada ao subsolo local.

Na etapa de projeto básico, ou seja, após selecionado o traçado, os estudos devem ser refinados de forma a garantir que todo o traçado esteja coberto com um programa de investigação geológico-geotécnica satisfatório, incluindo sondagens rotativas mistas e investigações geofísicas. O objetivo central nesta etapa é obter informações completas do subsolo a ser atravessado pela obra subterrânea, de forma que se possa conhecer o perfil geológico e as propriedades geotécnicas dos materiais da área e profundidade que circunda o túnel.

Na etapa de projeto executivo deve-se interpretar os resultados obtidos até o momento e concentrar os estudos em regiões específicas, onde pairam maiores dúvidas, realizando-se os últimos ensaios adicionais, como em regiões de transição entre diferentes tipos de solo ou

rocha e local onde serão instalados os portais. Como as informações completas do subsolo já foram obtidas na fase anterior, na etapa de projeto executivo o objetivo é detalhar os locais de maior interesse, de forma a se tornar possível o dimensionamento da estrutura do túnel em toda a sua extensão da maneira mais econômica e segura possível .

Na etapa de construção, um programa de investigação deve incluir alguns ou todos os seguintes elementos:

- ✓ Sondagens e trincheiras a partir da superfície e/ou local da escavação;
- ✓ Observação do comportamento do lençol freático, por meio de poços ou piezômetros;
- ✓ Ensaios laboratoriais complementares;
- ✓ Mapeamento geológico-geotécnico da frente de escavação;
- ✓ Acompanhamento do comportamento do terreno por meio dos dados obtidos da instrumentação geotécnica;
- ✓ Túneis pilotos e/ou sondagens horizontais desde a frente de escavação para a confirmação ou antecipação das condições geológico-geotécnicas e verificação de “bolsões” de águas subterrâneas;
- ✓ Ensaios ambientais do solo e amostragem de águas subterrâneas suspeitos de estarem contaminados.

Alguns dos elementos de investigação acima citados, tais como instrumentação geotécnica, podem e devem ser incluídos no contrato de construção, enquanto outros, como perfurações exploratórias adicionais, podem ser deixados a critério do contratante conforme a oportunidade e conveniência. O mapeamento da frente de escavação do túnel e o monitoramento das águas subterrâneas deverão ser elementos necessários para qualquer projeto de obras subterrâneas já que a informação obtida a partir desses registros serão a base de avaliação de diferentes condições geológico-geotécnicas ao longo do traçado.

O volume de sondagens requeridas para a elaboração de um projeto de túnel rodoviário irá variar para cada tipo de obra, de acordo com a qualidade do maciço rochoso deparado, o que torna impossível a padronização do valor do volume ou quantidade de sondagens que deverão ser executadas.

Entretanto, a título de orientação, três métodos devem ser efetuados para a determinação da quantidade de sondagem a ser executada:

a) O comprimento total das sondagens deve obedecer à seguinte fórmula:

$$\text{Emboque:} \quad E = \frac{2d}{g} \quad (12.1)$$

$$\text{Túnel:} \quad E = \frac{e c r}{g} \quad (12.2)$$

Onde, E = comprimento das sondagens no emboque;

T = Comprimento das sondagens no trecho em túnel;

d = extensão ao longo do túnel com cobertura inferior a 5 diâmetros da escavação;

g = grau de complexidade geológica, variável de 0,4 para alta complexidade e 1,0 para baixa complexidade;

e = extensão do túnel, em metros;

c = cobertura ao longo do túnel, variável de 0,5 para alta cobertura (acima de 3 diâmetros) até 0,7 para baixa cobertura (menos de 3 diâmetros da escavação);

r = grau de risco de acidentes com terceiros induzido pela escavação, variável de 1,0 para baixo risco a 2,0 para alto risco;

b) O comprimento total das sondagens deve estar entre 1,5 a 2 vezes o comprimento total do túnel.

c) O custo total das sondagens deve estar compreendido entre 1 e 3% do orçamento destinado à construção do túnel.

O plano de sondagem a ser adotado deverá ser elaborado em função da complexidade da geologia local e do risco induzido pela construção do túnel, por isso cronogramas apertados devem ser evitados. Entretanto, deverá, preferencialmente, atender o indicado nas equações 12.1 e 12.2, em caso negativo verificar se atende aos outros requisitos respectivamente, e justificar porque foi adotado o plano de sondagem alternativo ao apontado pelos cálculos indicados.

12.2. SEÇÃO DE TÚNEIS

Para os túneis destinados ao transporte rodoviário, o formato da seção transversal é normalmente retangular, circular ou elíptico, dependendo principalmente do método construtivo e do volume de tráfego (número de pistas e tipo de veículos). Túneis construídos pelo método cut-and-cover (falso túnel) tendem a possuir seção do tipo retangular, enquanto aqueles que adotam a técnica do NATM ou de perfuração e detonação, no caso de túneis em rocha, costumam apresentar formato circular ou elíptico. Já os escavados por máquinas tuneladoras (TBM) terão o formato da frente da máquina, que geralmente é circular.

Sugere-se, sempre que possível e principalmente a grandes profundidades (cobertura superior a cinco diâmetros) adotar formatos circulares para a seção de escavação. Este tipo de seção tende a submeter os elementos estruturais às tensões de compressão, reduzindo bastante as tensões de tração, o que poderá resultar em maior economia na construção da estrutura.

Túnel do tipo ferradura é comumente empregado no transporte ferroviário devido às dimensões do trem, não sendo muito indicado ao transporte rodoviário.

Para definir a seção a ser adotada em um túnel rodoviário, deve-se inicialmente analisar o meio em que esta estrutura será inserida. Túneis localizados em meio rural normalmente fazem parte de alguma rodovia, seja municipal, estadual ou federal e a projeção do tráfego nessa região para o futuro não deverá apresentar aumentos tão significativos quanto aqueles completamente inseridos em meios urbanos.

Por isso, sugere-se analisar a projeção do tráfego, no mínimo, para os próximos 20 anos e definir a quantidade de pistas necessárias, caso a projeção indique a necessidade de mais faixas que as atualmente disponíveis nos arredores (rodovias ou avenidas de acesso) indica-se, caso estudos confirmem a viabilidade, a execução de uma faixa adicional de emergência com o mesmo gabarito das demais, do lado esquerdo no caso de túnel mono-direcional, que futuramente deverá ser utilizada como uma faixa normal para o tráfego. No entanto, deve-se ter muito cuidado com essa análise, pois a escavação de um túnel com faixas previstas para serem utilizadas somente no futuro também podem inviabilizar a obra, pois aumentariam a seção de escavação e, conseqüentemente, pode haver reflexos expressivos no custo total do túnel

Sempre que possível, deve-se evitar a utilização de túneis bidirecionais, por motivos de segurança do usuário, pois uma possível colisão frontal dentro de um túnel poderia causar prejuízos não somente às vidas humanas mas também à estrutura do túnel, além de dificultar o

acesso de equipes de salvamento e a liberação do tráfego para a normalidade. Por isso, no caso de se adotar túneis bidirecionais é recomendável providenciar estruturas de separação da direção do tráfego, como a execução de dois níveis de pavimento (separação horizontal) ou estrutura vertical de separação (paredes), de modo que um nível fique isolado do outro, destinando cada nível a uma direção, beneficiando, assim, a segurança dos usuários.

Sugere-se que sejam disponibilizados passeios nas duas laterais do túnel, uma preferencialmente à direita com largura de 1,80 metro destinada à circulação de pedestres e ciclovia e outra à esquerda com apenas 1,00 metro de largura destinada somente à circulação de pedestres. Além disso, o piso do passeio deverá estar em um nível superior ao pavimento de, no mínimo 50 cm, e, no máximo, 1,00 m. O passeio deverá ser provida de guarda corpo e o espaço inferior poderá ser destinado para a passagem de tubulações, dutos e demais utilidades públicas ou da própria estrutura do túnel.

Ainda quanto as passarelas dois comentários devem ser tecidosas dimensões deverão também respeitar a NBR 5020 (acessibilidade a edificações, mobiliário, espaços e equipamentos urbanos); além disso, novamente deve-se destacar o cuidado que estes estudos requerem, pois a instalação de passarelas nos dois lados do túnel podem onerar e inviabilizar a obra pelos mesmos motivos citados anteriormente, repercutindo ainda mais no caso de haver a necessidade de destinar uma das passarelas para ciclovia.

O lado esquerdo, no sentido da direção do tráfego e ao lado do passeio, caso exista, deve iniciar com o dispositivo de drenagem (canaleta) com formato e dimensões indicados pelos estudos de drenagem. Após isso, deve-se destinar um espaço de 30 cm para o início da demarcação das faixas de rodagem. A largura de cada faixa e da linha demarcatória deve seguir o padrão estipulado pelo DNIT (faixas com 3,60 m de largura e linhas demarcatórias com 15 cm de largura).

O lado direito deve apresentar um espaçamento de 30 cm do passeio e já deve iniciar com a faixa de rodagem ou faixa de emergência, que possui as mesmas dimensões e especificações, pois no futuro poderá funcionar como faixa de rodagem. Não se recomenda acostamento ao longo do túnel, por motivos de segurança, o que se indica é utilização de baias de estacionamento (abrigos) a cada 500 m com comprimento entre 20 a 100 m. O que definirá o comprimento de cada abrigo será o tipo de tráfego previsto, rodovias com grande circulação de tritrem, rodotrem ou treminhão deverão ter o comprimento de abrigo máximo. A Figura 12.1 mostra esquematicamente como ficaria a seção conforme as indicações propostas.

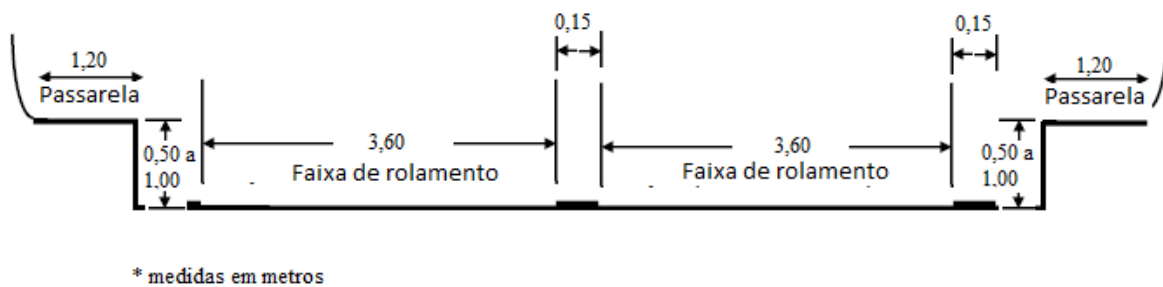


Figura 12.1 – Dimensões da seção proposta.

A altura do túnel será definida em função do gabarito vertical requerido pelo DNIT (altura de 5,50 m sobre faixas de rodagem) somados com espaçamento destinado para acomodar instalações de ventilação, sinalização e iluminação (geralmente de 40 a 60 cm é suficiente), espaçamento para conforto de motoristas de veículos pesados (20 a 30 cm), espaço para absorver movimentos verticais do maciço (20 cm) e para construção e manutenção de pavimentos (20 cm).

12.3. ILUMINAÇÃO

Para facilitar o entendimento e para efeitos de projeto de iluminação de túneis, define-se túneis curtos como aqueles que tenham um comprimento máximo de 50 m ou túnel de até 100 m nivelado, reto e cuja saída é visível antes da entrada. Túneis longos são aqueles com extensão superior a 100 m ou com comprimento maior que 50 m desde que a saída não seja visível antes da entrada ou não seja reto ou não seja nivelado.

O projeto de iluminação de túneis curtos é demasiadamente simples. Neste caso, o interior do túnel só deverá ser iluminado se houver, durante o dia, obstrução à penetração da luz solar, ou em situações especiais, como na presença de colunas no centro ou em rodovias com largura maior que 15 m. Caso contrário, o sistema de iluminação durante o dia pode contar somente com a luz solar (iluminação natural).

Embora o projeto de iluminação nos casos acima não apresente muitas restrições é recomendável adotar algumas medidas para potencializar o benefício da iluminação interior. Nestes casos simplificados sugere-se adotar um iluminamento noturno de, no mínimo, 25 lux ou que garanta níveis iguais a, aproximadamente, duas vezes ao fornecido pela rodovia ou

avenida adjacente, porém não deve haver uma diferença superior a 3:1 entre as iluminâncias das zonas de acesso e interior.

Para o período noturno, túneis curtos, cujo comprimento seja inferior a 25 m, não exigem sistemas de iluminação, promovendo-se apenas adaptações no sistema de iluminação dos acessos de maneira em que os raios da iluminação artificial possam penetrar o túnel de maneira mais eficiente, exceto em situações especiais, como na presença de colunas no centro ou em rodovias com largura maior que 15 m.

Em qualquer caso, cuidados especiais devem ser tomados na seleção das luminárias e no seu posicionamento dentro do túnel de modo a evitar o ofuscamento dos motoristas. É recomendável adotar luminárias foscas, de forma que evitem ao máximo a existência de fontes de luz capazes de causar desconforto visual aos usuários. Também sugere-se posicionar preferencialmente as luminárias em uma única linha central, se possível. Assim, o sistema de iluminação acaba funcionando também como um guia visual. Se não for possível utilizar uma única linha, pode-se utilizar mais linhas, tomando o cuidado de posicioná-las em distâncias equidistantes à linha central da pista de rodagem e não ao eixo do túnel, pois o eixo do túnel pode não coincidir com o centro da pista de rodagem, e desta forma não funcionará como um guia visual.

Ainda no intuito de otimizar o efeito da iluminação no interior dos túneis, indica-se que o revestimento das paredes seja de cor clara não reflexiva. Não é necessário que o revestimento do teto seja igual ao das paredes, porém, caso seja, poderá beneficiar a iluminação.

Sugere-se que, se possível, o túnel inicie com uma curva de leve raio e termine também com uma curva de leve raio. Isso reduz o efeito de ofuscamento que os altos níveis de iluminação exterior provocam aos olhos dos motoristas ao entrar e sair do túnel. Além disso, evita um efeito psicológico, indesejado à segurança dos usuários, de elevar a velocidade do automóvel, buscando sair o mais rápido possível.

O cálculo da iluminação de túneis longos, no período diurno, é um pouco mais complexo, nesta situação o túnel deve ser dividido em cinco zonas:

✓ A *Zona de Acesso* ou aproximação, está localizada antes da entrada do túnel, sua extensão é igual à distância de parada de um automóvel até o portal do túnel e pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$D_p = \frac{Vt_p}{3.6} + \frac{V^2}{254 \cdot (f_i + i)} \quad (12.3)$$

Onde:

D_p = Distância de parada;

V = Velocidade do veículo;

f_i = Coeficiente de atrito entre pavimento e roda (Tabela 5.1);

i = Inclinação do terreno;

t_p = Tempo de percepção e reação, geralmente 2s.

A iluminação desta área (L_{20}) é a média contida em um campo de visão cônico com o vértice no olho do motorista, a uma distância igual ao DS, formando um cone de 20° orientado para um ponto a uma altura de 1/4 da boca túnel. Este valor geralmente não excede 8 ou 10 Kcd/m² (Tabela 5.10).

É importante definir este valor de luminância para se calcular o nível de iluminamento das próximas zonas.

✓ A área seguinte corresponde à *Zona de Entrada* (L_{th}). O nível exigido no início desta área é proporcional ao L_{20} através um fator k .

Para proporcionar ao condutor uma informação visual adequada na entrada, a iluminação deve ser pelo menos 10% da iluminação da área de acesso em um trecho de comprimento aproximadamente igual à distância de parada do veículo (entre 40 e 80 m para velocidades entre 50 e 100 km/h). Como ainda assim a luminosidade exigida é muito alta e representa um consumo de energia relevante, pode-se tentar impor medidas especiais para reduzi-la, como por exemplo a construção de um sistema de quebra-luz.

O fator K de relação entre os níveis na zona de acesso (L_{20}) e o nível na zona de entrada (L_{th}) depende de:

- ✓ O sistema de iluminação adotado: simétrico ou a contrafluxo;
- ✓ distância de segurança – DS;
- ✓ tipo de iluminação.

A luminosidade no ponto médio da zona de entrada (L_{th}), para a iluminação de classe superior, deverá estar entre 5% (para velocidade de projeto de 60 km/h) e 10% (para uma velocidade de aproximação de 100 km/h) da luminância de adaptação, para iluminação simétrica.

Alguns cuidados adicionais podem auxiliar para a redução do nível de iluminamento desta zona, caso necessário, como diminuir o limite de velocidade no túnel e incentivar que os veículos utilizem suas próprias luzes. Isto facilitará o processo de adaptação e reduz a distância de parada e, portanto, o comprimento da zona de entrada. É conveniente a utilização de materiais não reflexivos na pista de rolamento e nas fachadas da zona de acesso para diminuir a luminosidade e outros brilhos de propriedades reflexivas na entrada, visando maximizar a zona. Também é desejável evitar que a luz direta do sol atue como um fundo da entrada do túnel. Para isso deve-se cuidar da orientação geográfica, maximizar o tamanho da entrada, plantar árvores e arbustos que forneçam sombra sobre a estrada ou adotar outros artificios. Finalmente, é possível criar uma zona iluminada, com faróis acesos, antes da entrada para incentivar o acompanhamento visual e capturar a atenção do motorista no túnel.

Após esta área chega-se à *Zona de Transição*, cuja extensão (L_{tr}) vai depender da velocidade dos veículos e da diferença entre os níveis de luminância das zonas de entrada e central. O iluminamento deve ser reduzido até os níveis da zona central, esta diminuição ocorre gradualmente segundo um gradiente de redução ou na falta deste através de uma curva progressiva com relação 3:1. Normalmente no final da zona de entrada, a luminância do pavimento é de 40% da que existia em seu início, e a partir de então, já na zona de transição, reduz-se progressivamente o nível de luminosidade (L_{tr}) em 2 ou 3 etapas até se alcançar o nível da zona central ou interior. A redução da luminância entre cada duas etapas sucessivas não deve exceder 3:1. O comprimento de cada etapa é aproximadamente a distância de parada do veículo. O fim da zona de transição é alcançado quando a luminância é, no máximo, 3 vezes maior que da zona interior.

Critérios mais complexos para a redução da iluminação nesta zona também podem ser adotados, com a utilização de curvas, como a da Figura 6.5, e fórmulas empíricas, como a apresentada no capítulo 5.

✓ Finalmente alcança-se a *Zona Central* ou interior (L_n), onde se observam os menores índices de luminância do túnel. Nesta seção, a luminância permanece constante em baixos valores oscilando entre 0,5 e 10 cd/m^2 , conforme a velocidade máxima permitida e a

densidade de tráfego existente (Tabela 5.9). As paredes devem ter luminosidade pelo menos igual a da pista, para maximizar a iluminação no interior.

✓ A última área é a Zona de Saída, esta zona possui comprimento (L_{ex}) igual ao calculado na zona de acesso. O nível de luminância a ser garantido nesta região pode ser de 50 lux. Apesar do alto nível de iluminamento no exterior, os olhos dos motoristas se adaptam rapidamente quando se atravessa de ambientes escuros para claros. Entretanto, a iluminação na saída do túnel deve ser reforçada, para iluminar diretamente os veículos de modo que os menores fiquem perfeitamente visíveis, não aparecendo escondido atrás de veículos grandes, devido ao reflexo da luz do dia na saída do túnel. A utilização de painéis na parede, capazes de aumentar o grau de reflexão da luz, também é eficiente para auxiliar na obtenção deste efeito.

A iluminação noturna é mais simplificada, o valor mínimo para a iluminação das classes 1 e 2 (ver classes de iluminação na Tabela 5.6) é de 0,5 cd/m² e para as classes 3 a 7 é de 1 cd/m². Se o túnel está em uma estrada bem iluminada o nível de luminância adotado será de 1,5 a 2 vezes a do exterior. Caso a estrada não seja iluminada, ilumina-se a área de acesso ao túnel com um comprimento igual a 2 vezes o DS ou, pelo menos, 200 m, com um nível mínimo de 1/3 da iluminação da zona de saída do túnel.

12.4. VENTILAÇÃO

Túneis com comprimento até 200 m não necessitam de sistema de ventilação mecânico especial projetado, uma vez que a ventilação natural é suficiente para garantir o fluxo de ar e direcionar os gases tóxicos para o exterior do túnel. A necessidade pode ser avaliada através das seguintes expressões:

- ✓ Para rodovias de mão dupla, com duas faixas de rolamento: $L \times N > 600$, e
- ✓ Para rodovias de mão única, com duas faixas de rolamento: $L \times N > 2000$

Onde, L = comprimento do túnel (km), e

N = volume do tráfego (veículos por hora)

Em túneis unidirecionais com até 1 km de comprimento recomenda-se a utilização da ventilação do tipo longitudinal, por desempenhar competentemente as funções de ventilação e

eliminação de gases nocivos com menor custo, este tipo de ventilação também pode ser indicado para túneis bidirecionais com tráfego de leve a médio.

Nesse tipo de ventilação, pares de ventiladores do tipo turbina (“Jet fan”) são posicionados na abóbada a cada 100 a 200 m, forçando a circulação do ar no sentido da circulação dos veículos. Ventiladores mais modernos são do tipo reversível (com a inversão da rotação ou do ângulo das pás) para compensar eventuais reversões do trânsito. A regulação da quantidade de ventilação necessária é feita ligando ou desligando um certo número de ventiladores e, em alguns tipos de ventiladores, aumentando ou diminuindo a velocidade de rotação.

A ventilação transversal deve ser adotada em túneis com mais de 1 km de extensão e com tráfego pesado, ou em túneis mais curtos caso o volume de tráfego seja muito intenso.

Nesse tipo de ventilação, um forro falso acima da abóbada é dividido em dois septos: um destinado à injetar ar fresco e outro a extrair o ar viciado. No portal do túnel são situados ventiladores centrais com torres de extração do ar poluído e de injeção de ar fresco. A regulação da quantidade de ventilação é feita da mesma maneira, ou seja, ligando ou desligando um certo número de ventiladores ou aumentando ou diminuindo a velocidade de rotação.

A situação intermediária é a ventilação semi-transversal, utilizada normalmente em túneis de médio porte e com tráfego de médio a pesado.

A concentração de CO_2 deve ser monitorada a fim de possibilitar a regulação da velocidade de rotação dos ventiladores. Pontos de medição devem ser instalados a 100 m do portal do túnel e a cada 200 m no seu interior, em nichos situados nas paredes do túnel. Fora de cada boca do túnel devem ser instaladas pequenas estações meteorológicas, registrando intensidade e direção do vento e a temperatura em cada zona de portal.

Os dados coletados (analisadores de gás, índice de opacidade do ar, temperatura, intensidade e direção do vento) devem ser analisado no Centro de Controle Operacional (CCO), visando otimizar a intensidade da ventilação (e eventualmente também a direção).

12.5. IMPERMEABILIZAÇÃO

Desde o princípio dos estudos geológicos deve-se prestar atenção especial aos aspectos hidrogeológicos que afetarão o fluxo atravessado pelo túnel. O mapeamento geológico deve recolher com detalhe a presença de dobras, falhas, diques e contatos entre formações de

diferentes permeabilidades, e analisar a consequência dos mesmos, não somente do ponto de vista geomecânico, mas também hidráulico.

O objetivo principal dos estudos hidrogeológicos é avaliar os fluxos que se direcionam ao túnel e as pressões hidráulicas que serão geradas no entorno do revestimento.

Os sistemas de impermeabilização e drenagem externa associada são constituídos essencialmente por:

✓ Elementos de drenagem, compostos normalmente por mantas geotêxtil, envolvendo todo o teto e as paredes (Figura 7.6), e drenos laterais, com diâmetros a partir de 200 mm, instalados nas bases das paredes ao longo de todo o túnel, e que são geralmente envolvidos com uma camada de concreto poroso. Aconselha-se a instalação de poços de inspeção a cada 50 m para o acesso aos drenos laterais. As mantas geotêxtil devem ser do tipo não tecido, selecionadas pela capacidade de permeabilidade e não pelo peso. Caso o fluxo de água apresente intensidade elevada pode-se optar por geocompostos drenantes;

✓ Elementos de impermeabilização, que são geralmente assegurados por geomembranas. As geomembranas mais aplicadas em túneis são as poliméricas sintéticas, de PVC e as poliolefinas, que incluem por sua vez as de polietileno de alta densidade (PEAD), polietileno de baixa densidade (PEBD) e poliolefina modificada com etileno propileno (EPR-TPO);

✓ Elementos de proteção, normalmente instalados entre a geomembrana (impermeabilização) e a superfície da camada onde aquela é fixada, para evitar que irregularidades excessivas ou outros defeitos da superfície dessa camada danifiquem a geomembrana (Figura 7.14), e também podem ser colocados sobre a geomembrana para evitar a sua perfuração no decorrer das operações subsequentes de colocação das armaduras. Os materiais usualmente utilizados para este fim são os geotêxteis e os geocompostos constituídos por uma geomembrana fina em PVC ou polietileno (normalmente de cor clara) ligada a um geotêxtil.

12.6. DRENAGEM

A drenagem interna do túnel não possui a mesma função de conduzir águas provenientes do subsolo para o exterior, como o observado na drenagem externa, associada com o sistema de impermeabilização.

Neste sistema, a preocupação é com a drenagem de líquidos oriundos dos veículos ou dispersos sobre o pavimentos, e inicia-se na concepção do traçado do túnel. Este deve ter um

alinhamento reto único ou dois paralelos únicos com um arco convexo. Para assegurar a evacuação das águas recomendam-se rampas mínimas de 0,2 a 0,5%.

É recomendável que a inclinação do pavimento de rodagem de veículos dentro do túnel seja direcionada para apenas um dos lados, direcionando os líquidos coletados a apenas uma canaleta. Também é interessante que líquidos oriundos do passeio sejam direcionados para a mesma canaleta.

O sistema de drenagem deve essencialmente ser composto por cinco dispositivos (Figura 7.3):

- ✓ Dreno de captação da água infiltrada no solo;
- ✓ Dispositivo de captação no nível do pavimento;
- ✓ Caixas sifonadas (Figura 7.5);
- ✓ Coletor geral;
- ✓ Dispositivo de retenção na saída do túnel.

O funcionamento deste sistema sugere a chegada dos distintos condutos ao dispositivo sifonado. O dreno que capta a água do maciço deságua no coletor principal, que atravessa a primeira câmara do dispositivo, a qual capta o líquido proveniente da drenagem superficial do pavimento. Estes estão em contato com a segunda câmara através de um sifão que atua como anti-incêndio (para o qual o dispositivo deve estar sempre inundado), impedindo que o fogo se propague.

Algumas condições devem ser sempre consideradas:

- ✓ Instalar os condutos preferivelmente abaixo do passeio, deve-se tomar o cuidado de instalar a caixa sifonada de maneira que ocupe o menor espaço possível abaixo do pavimento;
- ✓ Conduzir preferencialmente a drenagem para apenas um dos lados do túnel;
- ✓ Para a inundação da caixa sifonada, pode-se fazer uso de águas provenientes de filtrações ou de mesclas com os líquidos de efluentes. Entretanto, em caso de túneis longos ou com tráfego intenso isso muitas vezes não é possível, dessa forma é necessário recorrer-se a outros procedimentos (sistema de abastecimento de água potável, reserva de incêndio ou outros). Lembrando-se que, neste último caso, deve-se conduzir os efluentes para um depósito de armazenamento para seu tratamento posterior.

12.7. SINALIZAÇÃO

A sinalização no interior do túnel não deverá ser muito diferente daquela existente na rodovia ou avenida de acesso. Entretanto, dentro do túnel deve-se observar alguns cuidados especiais, como marcar linhas horizontais a uma certa distância do limite da via de circulação, nos limites laterais da via de circulação (30 cm da canaleta ou do passeio – Item 14.2).

Para os túneis com tráfego em ambos os sentidos (bidirecionais) com linha singela, devem ser utilizados retro-refletores (*olho de gato*) em ambos os lados da linha mediana (simples ou dupla) que separa os dois sentidos. Os retro-refletores, que devem cumprir a regulamentação nacional em matéria de dimensões e alturas máximas, devem ocorrer a intervalos máximos de 20 m. Se o túnel for em curva, este intervalo será reduzido para até 8 m para os primeiros 10 retro-refletores a contar da entrada do túnel.

Na marcação da sinalização horizontal, deve ser utilizado material retro-reflectivo de alta qualidade e com uma capacidade ótima de percepção:

- ✓ A marcação do pavimento deve ser da melhor qualidade, para garantir visibilidade 24 horas por dia;
- ✓ A marcação deve proporcionar a mais alta capacidade de percepção possível com o piso molhado;
- ✓ Os retro-refletores devem ser da melhor qualidade, de forma a garantir a máxima visibilidade noturna;

O material utilizado para a sinalização vertical também não se difere muito daquele utilizados em rodovias, ou seja, deve ser fabricado com material retro-reflectivo de alta qualidade e com uma capacidade ótima de percepção:

- ✓ Dentro do túnel, os sinais devem ser em material com retro-reflexão máxima e permanentemente iluminados, interna ou externamente, para uma capacidade ótima de percepção quer de dia quer de noite;
- ✓ Os materiais utilizados tanto no túnel como na sua zona de aproximação devem corresponder ao nível máximo de desempenho em termos de reflectividade especificado nas normas nacionais de sinalização rodoviária, com utilização de chapas retro-reflectivas por tecnologia de microcubos, que garante visibilidade noturna em caso de falha na alimentação elétrica.

A sinalização vertical consiste basicamente de:

✓ **Sinal de Túnel:** Colocado a cada entrada do túnel, onde, como indicado na Figura 12.2, a extensão deve ser indicada na parte inferior da placa. Para túneis extensos, com comprimento superior a 3000 m, deve ser indicada a extensão restante do túnel de mil em mil metros. Poderá igualmente ser indicado o nome do túnel.



Figura 12.2 – Sinal de Túnel.

✓ **Parada de Emergência:** Sinais utilizados para indicar as áreas de paragem de emergência, devem ser acompanhados por sinais “Permitido Estacionar – E” e sinalizados com placas próprias (Figura 12.3). Os telefones e os extintores deverão ser indicados por um painel adicional ou incorporados no próprio sinal. Não se recomenda acostamento ao longo do túnel, por motivos de segurança, o que se indica é utilização de Parada de Emergência a cada 500 m com comprimento entre 20 a 100 m. O que definirá o comprimento de cada abrigo será o tipo de tráfego previsto, rodovias com grande circulação de tritrem, rodotrem ou treminhão deverá ter o comprimento de abrigo máximo.



Figura 12.3 – Placas de sinalização para a Parada de Emergência.

✓ **Saídas de Emergência:** Deve ser usado o mesmo sinal para todos os tipos de saídas de emergência. As placas devem ser alocadas próximo às saídas e deve-se tomar cuidados no sentido de facilitar sua leitura pelo usuários. É também necessário sinalizar as duas saídas mais próximas nas paredes laterais, em distâncias não superiores a 25 m e a uma altura de 1,0 a 1,5 m acima do nível das vias de evacuação, com indicação das distâncias até as saídas. As Figuras 12.4 e 12.5 apresentam exemplos destes sinais.



Figura 12.4 – Indicação de saída de emergência.



Figura 12.5 – Indicação da distância da saída de emergência mais próxima.

✓ **Postos de Emergência:** Sinalização com indicação da presença de um telefone de emergência, de extintores de incêndio e de hidrantes (Figura 12.6). Estes postos deverão ostentar sinais informativos e indicarão o equipamento à disposição dos usuários. Visando evitar desentendimentos capazes de provocar danos às vidas das pessoas, é aconselhável que se coloque placas neste postos de emergência informando que este local não garante proteção em caso de incêndio, e que neste caso o usuário deve dirigir-se à saída de emergência mais próxima. Os Postos de Emergência devem ser posicionados em intervalos de até 200 m e identificados com placas nas paredes acima do passeio e nas cabines S.O.S informando a posição e o número da cabine S.O.S. para permitir rápida identificação do local da emergência. É interessante posicionar estes postos em ordenamento alternado em relação ao ventiladores, a fim de evitar a poluição sonora provocada pela rotação dos ventiladores.

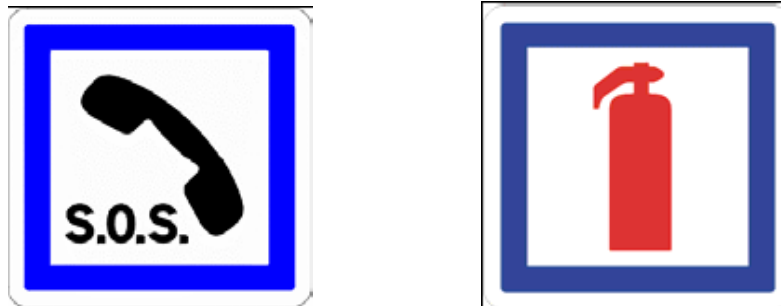


Figura 12.6 – Sinalização de postos de emergência (telefone de emergência e extintor).

✓ **Radiotransmissão:** Em túneis com comprimento superior a 5 km, ou 2 km em caso de túneis urbanos, deve ser colocada sinalização adequada à entrada, e em distâncias frequentes (no caso de túneis longos a cada 1000 m, por exemplo) informando a frequência que os motoristas podem sintonizar o rádio de seus veículos para receberem informações sobre o tráfego (Figura 12.7).



Figura 12.7 – Sinalização para sintonizar o rádio do veículo na frequência indicada.

✓ **Sinais Variáveis de Mensagem:** Para túneis com extensão superior a 2 km recomenda-se a utilização de sinais variáveis de mensagens à entrada do túnel e, se possível, antes da entrada, pois em caso de incidente no túnel pode-se interromper antecipadamente o tráfego devido a uma emergência. Estes dispositivos devem ser instalados a certa frequência de distância em caso de túneis muito extensos (a cada 1000 m, por exemplo). Os sinais e pictogramas (Figura 12.8) utilizados para os sinais variáveis de mensagem nos túneis devem ser harmonizados e indicam as faixas de rolamento que o usuário deve utilizar para trafegar no túnel.



Figura 13.7 – Sinais de mensagem variável.

12.8. SEGURANÇA

Os procedimentos de resposta à emergência devem ser concisos e tão breves quanto possível, identificando de forma clara os papéis e responsabilidades de cada um, bem como apontar se há necessidade de treinamento especial a alguma equipe.

Quando existentes, o Centro de Controle Operacional (CCO) e o Centro de Controle Auxiliar, estes devem estar equipados e capacitados para atenderem e apoiarem as equipes em situações de emergência. Quando necessário, as agências participantes (bombeiros, polícia, ambulância,

defesa civil, empresas de transportes coletivos, departamento de obras, serviços de guincho etc) que não estejam no comando podem estabelecer um posto de comando auxiliar para apoiar a supervisão e a coordenação de suas equipes de trabalho e de seus equipamentos. É recomendável que algumas agências participantes, como o corpo de bombeiros, a polícia e os serviços médicos e de ambulância, possuam linhas telefônicas diretas ou números de telefone designados que devem ser utilizados nas emergências envolvendo as instalações.

O Operador do Túnel deve manter uma lista atualizada de todos os membros das equipes de contato das agências participantes, que deve ser incluída no Procedimento Operacional e revisada com frequência, por exemplo a cada 3 meses.

O Operador do Túnel, bem como as equipes das agências participantes devem receber treinamento com o intuito de agirem eficientemente durante as emergências.

A fim de otimizar a execução dos Planos Operacionais, devem ser conduzidos programas completos de treinamento para todos os membros das equipes e das agências que trabalharão nas emergências pelo menos duas vezes ao ano, sendo que após os exercícios, treinamentos e situações reais deve-se reavaliar a conduta de trabalho.

Deve-se manter no centro de controle, registros escritos e gravações de comunicações via telefone, rádio e Circuito Fechado de Televisão (CFTV).

A estrutura do túnel, os sistemas de combate a incêndio, controle, remoção dos gases tóxicos e fumaça devem ser projetados considerando:

- ✓ Tipos de veículos e cargas associadas;
- ✓ Volume de tráfego (TV);
- ✓ Comprimento do túnel;
- ✓ Quantidade de túneis - simples ou gêmeos;
- ✓ Sentido do tráfego – unidirecional ou bidirecional;
- ✓ Material de construção do túnel;
- ✓ Operação do túnel;
- ✓ Disponibilidade de equipamentos de combate a incêndio;
- ✓ Disponibilidade de equipamentos de detecção de incêndio;
- ✓ Tempo estimado para chegada ao local do incidente da brigada de incêndio;

- ✓ Disponibilidade de saídas;
- ✓ Capacidade do sistema de ventilação;
- ✓ Disponibilidade de pista de acesso de viaturas de primeiros socorros;
- ✓ Gradiente do túnel;
- ✓ Potência do incêndio (MW).

As saídas de emergência devem conduzir os usuários do túnel ao exterior com a maior eficiência e rapidez possível, não sendo recomendável a previsão de abrigos de segurança, mas caminhos de segurança. Ou seja, caminhos que os usuários poderão utilizar de forma segura para se dirigir ao exterior. Geralmente, estes caminhos são túneis paralelos de emergência ou saídas para um túnel rodoviário paralelo, comum em caso de túneis monodirecionais com tráfego intenso.

É interessante que o material de composição de cada elemento componente do túnel, como fixadores, chapas metálicas, dutos e outros, sejam adotados de forma a suportar situações de calor intenso e desgaste provocados pela sua exposição ao ambiente. Para isso, prioriza-se a utilização de materiais anti-corrosivo, resistente a altas temperaturas e a impactos. Caso o material não possua estas características deve-se buscar por produtos, como tintas, vernizes, fibras e outros, capazes de suprir essas carências.

Túneis com extensão a partir de 200 m até 500 m, devem ser providos de sistema de hidrantes com tubulação que pode permanecer seca, porém com controle de abastecimento em ambas as extremidades do túnel.

Túneis com extensão acima de 500 m, devem ser providos com sistema de proteção por hidrantes com reserva de incêndio que propicie o combate a incêndio por 30 min, com previsão de dois hidrantes funcionando simultaneamente, com uma pressão de 15 kPa no hidrante mais desfavorável. Os sistemas devem possuir bomba atuante e reserva e mangotinhos, conforme o caso. Túneis com extensão acima de 2.000 m devem atender aos itens anteriores e ter sua proposta de proteção por hidrantes e por extintores analisada por Comissão Técnica especializada.

A distância entre dois pontos de hidrantes deve ser de 50 m com lance de mangueira de 25 m.

Saídas e passagens de emergência devem ser pressurizadas em relação a área de fogo. Recomenda-se, neste caso, o controle da velocidade mínima de ar em relação à região do fogo de 3 m/s para saídas e passagens de emergência.

Recomenda-se um espaçamento de 100 a 500 m entre passagens cruzadas em túneis rodoviários com pistas paralelas. Esta distância é dependente do volume de tráfego, do tipo de estrutura do túnel e de seu comprimento.

As saídas do passeio devem ser mantidas livres e desimpedidas, de acesso facilitado, de forma que os passageiros não tenham dificuldade de abandonar o túnel, no caso de acidente.

Devem ser instalados no teto um cabo detetor de incêndios, dotado de células termosensíveis a cada 10 m.

Em túneis com extensão acima de 500 m é interessante 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.

Para os túneis urbanos, ou não urbanos de maior importância, com extensão superior a 1.000 m devem ser instalados, além do sistema de comunicação, sistema interno de TV, com a instalação de câmeras, no interior do túnel, cujo espaçamento e definição devem permitir a identificação detalhada de veículos. Deve-se prever a manutenção preventiva periódica nos sistemas de câmeras para evitar acúmulo de fuligem em suas lentes.

Além disso, o sistema de comunicação também deve prever painéis de mensagem variáveis mecânicos e/ou eletrônicos, auto-falantes e/ou megafones, semáforos (balizadores de faixa), cancelas e sinalização de abandono do local.

Os cabos que alimentam os sistemas de emergência devem ser projetados e fabricados para suportarem elevadas temperaturas no interior do túnel, assim como os componentes de alimentação dos equipamentos envolvidos com o sistema de proteção contra incêndio, instalados no interior do túnel, devem estar protegidos dos efeitos da combustão. Além disso, o suprimento de energia deve possuir múltiplas fontes alternativas que sejam redundantes, como por exemplo, através de grupo moto-gerador ou captada de concessionária.

Devem ser realizados e registrados todos os ensaios individualmente com todos os equipamentos e sistemas operacionais, de modo a comprovar o atendimento dos projetos e das especificações técnicas.

Os ensaios nos sistemas devem ser realizados sistematicamente, mesmo após a liberação comercial do túnel, de modo a verificar-se a manutenção do sistema, nos mesmos moldes do início da operação comercial.

Os testes de incêndio no interior do túnel devem ser realizados com fumaça fria, com volume de fumaça gerado igual ou superior ao volume estimado de fumaça produzido pela potência de incêndio de projeto. O comportamento da fumaça fria gerada e as velocidades do ar no interior do túnel deve ser observado e medido com o sistema de ventilação projetado operando de acordo com o programa automático operacional de combate a incêndio.

As equipes de combate a incêndio, emergência e primeiros socorros devem ser submetidas a constantes treinamentos, atualizações teóricas e técnicas de seus equipamentos. Os sistemas operacionais e seus equipamentos devem ser mantidos em perfeito estado de funcionamento, através de um rigoroso cronograma de manutenção.

12.9. ANÁLISE DE RISCOS

A partir dos estudos de viabilidade o projetista deve apresentar a Metodologia de Análise de Riscos para Túneis (MART), o que não significa dizer que um túnel já em construção deve ignorar a elaboração deste Relatório, nem mesmo naqueles em operação.

Esta metodologia deve conter as seguintes etapas:

- ✓ **Caracterização do Túnel (CT):** Descrever a localização geográfica, a meteorologia local, população usuária do túnel, acessos, descrição física e dimensões do túnel, geometria do túnel, produtos em circulação, sistemas de segurança e de resposta a emergências/contingências do túnel;
- ✓ **Identificação de perigos para o Túnel (IPT):** Classificar perigos relacionando a sua gravidade e probabilidade de ocorrência, adotando, preferencialmente, técnicas de análise de riscos como : APP (análise preliminar de perigos), *What-if* (questionamentos do tipo o que aconteceria se...) e FMEA (análise de modos de falhas e seus efeitos);
- ✓ **Análise de Conseqüências e Vulnerabilidade (ACV):** Selecionar cenários potenciais de acidente, com base na identificação do perigo (IPT), e simular ocorrência de cenários previstos. Avaliar a vulnerabilidade de pessoas e patrimônios;
- ✓ **Estimativa de Frequências (EF):** Quantificar, adotando preferencialmente técnicas do tipo árvore de falhas (AAF) e de eventos (AAE), a estimativa de frequência de riscos;
- ✓ **Avaliação de Riscos (AR):** Calcular riscos sociais e individuais decorrentes do potencial de acidente;

✓ **Aceitabilidade de Riscos (ACR):** Analisar se os perigos existentes estão enquadrados em níveis toráveis;

✓ **Gerenciamento de Riscos (GR):** Estabelecer e implantar os procedimentos internos dos seguintes sistemas: política SSMA (segurança, saúde ocupacional e de meio ambiente) da empresa responsável pelo túnel, análise e revisão de riscos do túnel, análise de modificações, análise de sistemas críticos para a segurança, sistemas de manutenção de sistemas de segurança, projeto de modificação no túnel, programa de investigação de acidentes, treinamento pessoal e reciclagem em segurança, ações de respostas às emergências/contingências e sistema de auditorias de segurança no túnel.

A Tabela 12.1 apresenta de forma esquemática as técnicas de análises de riscos recomendadas para túneis relacionadas com cada fase do projeto, desde os estudos iniciais até as operações e manutenções.

Tabela 12.1 – Técnicas de análise de riscos para túneis.

| ETAPAS <i>MART</i> | FASES DE PROJETO DO TÚNEL | | | | | |
|------------------------------------|---|-------------------------------|-------------------|--------------------|--------------------------|-----------------------------------|
| | Técnicas de análise de riscos para túneis | Estudo de viabilidade técnica | Estudo conceitual | Projeto básico | Detalhamento/ Construção | Operação/ Manutenção/ Modificação |
| "Check list" de segurança | SIM | | | | | |
| "What-If" (E-Se) | | SIM | | | | |
| APP | | | | SIM | | SIM |
| ACV | | | | SIM | | SIM |
| EF (AAE, AAF) | | | | SIM ⁽²⁾ | SIM ⁽²⁾ | SIM ⁽²⁾ |
| Avaliação de riscos | | | | | SIM | SIM |
| Aceitabilidade de riscos | | | | | SIM ⁽²⁾ | SIM ⁽²⁾ |
| Gerenciamento de riscos | | | | | SIM | SIM |
| Plano de emergência/ Contingências | | | | SIM ⁽³⁾ | SIM ⁽³⁾ | SIM ⁽³⁾ |
| Medidas de segurança | SIM | SIM | SIM | SIM | SIM | SIM |
| Conformidade de segurança | | | | | SIM | SIM |

Notas:

1 - Quadro em branco: não se aplica as técnicas da *MART*.

2 - A análise de frequência e a estimativa de aceitabilidade de riscos só devem ser aplicadas para os casos de acidentes maiores determinados pela APP e análise de consequências.

3 - O plano de emergência ou contingências deve ser iniciado no projeto básico e concluído no detalhamento, antes do início da operação do túnel.

Deve-se estabelecer o plano de ação de emergências através da definição dos cenários de emergência, da equipe de emergência (inclusive organograma), suas funções e responsabilidades, procedimentos de emergência, descrição dos sistemas de combate a emergências, sistema de comunicação de emergências, estabelecimento de rotas de fuga, saídas de emergência, pontos de encontro e telefones importantes para situações de emergências no túnel.

12.9.1 CHECK-LIST

Trata-se da verificação do nível de segurança de itens do túnel a serem projetados. A seguir, alguns dos itens que devem ser verificados sob a ótica da segurança:

- ✓ Extensão do túnel;
- ✓ Número de galerias e faixas, inclusive largura das faixas;
- ✓ Geometria de corte transversal;
- ✓ Alinhamento vertical e horizontal;
- ✓ Tipo de construção do túnel;
- ✓ Características do tráfego, inclusive idade da frota, velocidade e risco de congestionamento;
- ✓ Presença de veículos a passeio, pesados e de cargas perigosas;
- ✓ Características das rodovias de acesso ao túnel;
- ✓ Situação geográfica e meteorológica;
- ✓ Serviços de infra-estrutura do túnel, como: ventilação, controle de fumaça, drenagem, alimentação de água, sistema de energia elétrica (inclusive de emergência), iluminação, sistemas de comunicação e supervisão do túnel, centro de controle do túnel, sinalização rodoviária e de segurança, resistência das estruturas ao incêndio, sistemas proteção ao incêndio, saídas, áreas e postos de emergências e tempo de acesso dos serviços de emergência.

12.9.2 ANÁLISE PRELIMINAR DE PERIGO (APP)

Com o objetivo de reunir informações a respeito de cada incidente verificado no túnel, sugere-se as Tabelas 12.2, 12.3 e 12.4. Na Tabela 12.2 apresenta-se um modelo sugerido de planilha a ser utilizada com esta técnica.

Tabela 12.2 – Modelo de planilha a ser utilizada na técnica APP.

| Hipótese | | Perigo (Ponto crítico) | Causas possíveis | Conseqüências | Categoria de probabilidade | Categoria de conseqüência | Risco | Medidas mitigadoras |
|------------------|----------------------------|---|---------------------|---------------|-------------------------------|------------------------------|-------|------------------------|
| Ponto notável | Ponto controle | | | | | | | |
| motorista | Perdeu o controle do carro | Chocou-se com outro veículo e depois com o hidrante | embriagues | incêndio | | | | |

Tabela 12.3 – Categorias de Severidade.

| CATEGORIAS PROBABILIDADE | CATEGORIAS DE SEVERIDADE | | | |
|-----------------------------|--------------------------|----|----|----|
| | A | B | C | D |
| 1 BAIXA | RB | RB | RM | RA |
| 2 MÉDIA | RB | RM | RA | RA |
| 3 ALTA | RM | RM | RA | RA |

Tabela 12.4 – Categorias de Probabilidade.

| CATEGORIA DE SEVERIDADE | DESCRIÇÃO |
|-------------------------|---|
| A DESPREZIVEL | Nenhum dano ou dano não mensurável. |
| B MARGINAL | Danos irrelevantes aos usuários do túnel, ao meio ambiente e à comunidade mais próxima ao túnel. |
| C CRÍTICA | Pesados danos ao túnel, lesões graves e morte aos usuários do túnel, ao meio ambiente devido a liberações de substâncias químicas, tóxicas ou inflamáveis, alcançando até áreas externas ao túnel. Pode provocar lesões de gravidade moderada na população externa ao túnel ou impactos ambientais com reduzido tempo de recuperação. |
| D CATASTRÓFICA | Destruição do túnel. Impactos ambientais devido a liberações de substâncias químicas, tóxicas ou inflamáveis, atingindo áreas externas às instalações do túnel. Provocar mortes ou lesões graves na população externa ou impactos graves ao meio ambiente, com tempo de recuperação elevado. |

12.9.3 WHAT IF (E SE...)

O principal objetivo desta técnica é a identificação de potenciais de riscos que passaram despercebidos em outras fases do estudo de segurança. O conceito é conduzir a um exame sistemático de uma operação ou processo através de perguntas do tipo “*O que aconteceria se...?*”.

A Tabela 12.5 apresenta um modelo sugerido para a utilização desta técnica.

Tabela 12.5 – Modelo de planilha para a técnica *What If*.

| Questão “ <i>What – If</i> ” (E-SE) | Causas possíveis | Conseqüências | Categoria de severidade | Medidas preventivas ou corretivas | |
|---|---------------------|---------------|----------------------------|--------------------------------------|-------------|
| | | | | Existentes | A Implantar |
| | | | | | |

12.9.4 FMEA (*FAIL MODE & EFFECT ANALYSIS*)

Técnica que permite analisar como pode falhar os componentes de um equipamento ou sistema do túnel, estimar as taxas de falhas, determinar os efeitos que poderão advir e, conseqüentemente, estabelecer mudanças a serem realizadas para aumentar a confiabilidade do sistema ou do equipamento em análise para que funcione realmente de maneira satisfatória e segura.

É geralmente efetuada de forma qualitativa na forma de planilha de trabalho, como mostra a Tabela 12.6, sugerida para a utilização desta técnica. As conseqüências de falhas humanas no sistema em estudo não são consideradas, uma vez que poderão ser analisadas em análise de erro humano e em ergonomia. A quantificação da FMEA é utilizada para se estabelecer o nível de confiabilidade de um sistema ou subsistema do túnel.

Tabela 12.6 – Modelo de Planilha usada na Técnica FMEA

| Modos de Falha | Causas da Falha | Conseqüências da Falha | Categoria de Frequência | Medidas Preventivas ou Corretivas | |
|----------------|--------------------|---------------------------|----------------------------|--------------------------------------|-------------|
| | | | | Existentes | A Implantar |
| | | | | | |

A Categoria de Frequência, conforme sugere a Tabela 12.7, é obtida em banco de dados de confiabilidade desenvolvidos em testes realizados por fabricantes de componentes ou pela comparação com sistemas semelhantes.

Tabela 12.7 – Critério de Frequência.

| CATEGORIA | FREQUÊNCIA (oc./ano) | DESCRIÇÃO |
|---------------------|-------------------------|---|
| 1 Pouco provável | $f < 10^{-4}$ | Ocorrência teoricamente possível, porém tecnicamente improvável. |
| 2 Provável | $10^{-1} > f > 10^{-4}$ | Provável de ocorrer durante a vida útil do túnel. |
| 3 Frequente | $f > 10^{-1}$ | Possível de ocorrer mais de uma vez durante a vida útil do túnel. |

12.9.5 ÁRVORE DE EVENTOS (AAE)

Técnica essencialmente simples, mas que deve ser apresentada nas fases de projeto básico e executivo e mantida na etapa de operação e manutenção, pois através de uma linguagem bem simples pode-se identificar os perigos potenciais. O exemplo apresentado pela Figura 12.9 mostra como esta técnica é utilizada.

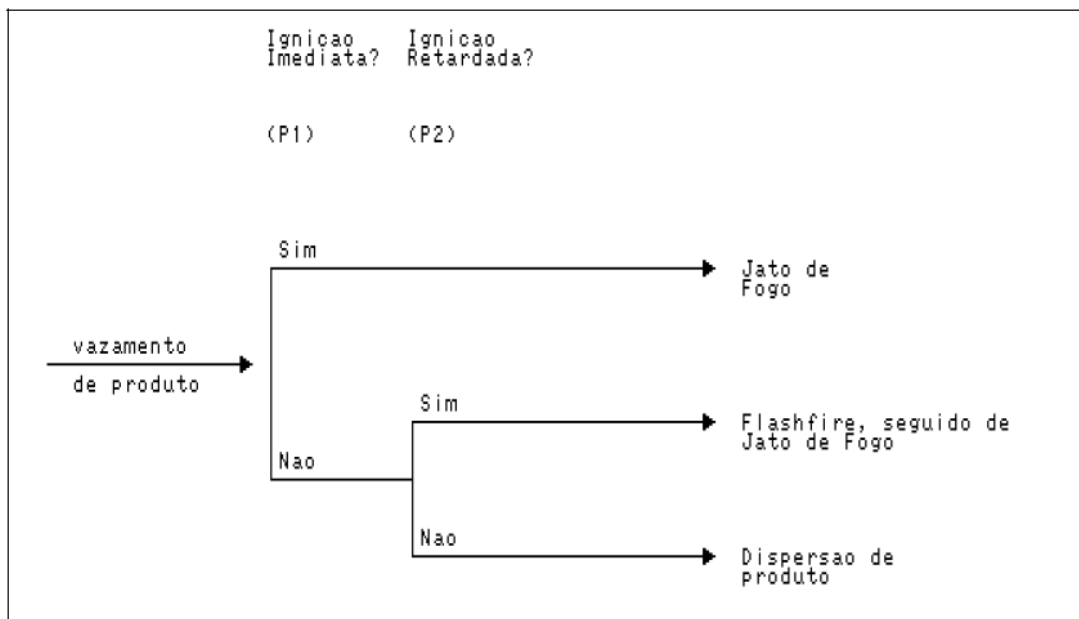


Figura 12.9 – Esquema da técnica de árvore de eventos.

12.9.6 ÁRVORE DE FALHAS (AAF)

Esta técnica tem como objetivo a análise das causas de um só evento, por exemplo: incêndio ou explosão ou vazamento de produto tóxico, inflamável/explosivo no interior do túnel. A Figura 12.10 apresenta um exemplo geral de árvore de falhas em túnel.

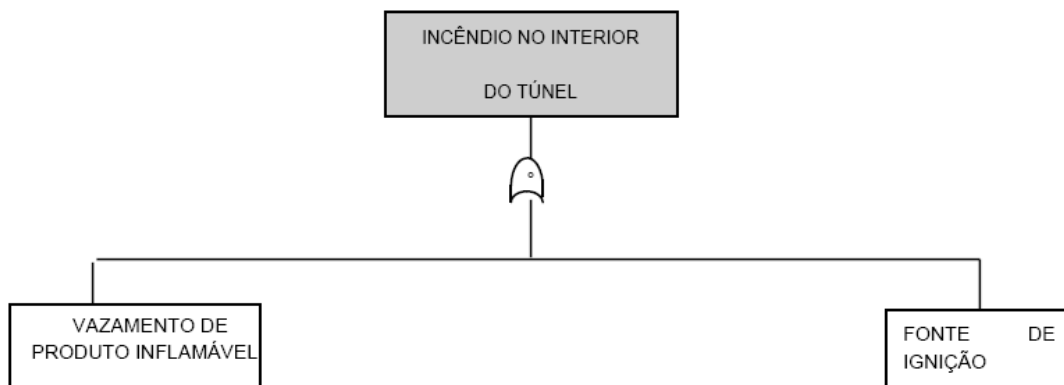


Figura 12.10 – Árvore de falhas - Incêndio no interior do túnel

O encerramento da aplicação da metodologia de análise de riscos para túneis (MART) se dá pela recomendação de medidas de segurança que mitigam os perigos encontrados ao longo do relatório.

A fim de se alcançar a maneira mais segura de se construir túneis, recomenda-se recorrer ao documento elaborado pela *The International Tunnelling Insurance Group (ITIG)*, o *A Code of Practice for Risk Management of Tunnel Works*, que orienta as empresas de seguros a exigirem certas ações para a segurança de seus trabalhos. Este Código está bastante difundido internacionalmente, o que lhe deu um certo status de manual ou guia, e adotam medidas que contemplam o empreendimento em todas as suas etapas (estudos de viabilidade, projetos, construção, operação, manutenção). Este manual também indica os cuidados que o cliente e o contratante devem adotar na elaboração do contrato, seja de projeto ou de construção.

12.10. MANUTENÇÃO

A manutenção consiste no diagnóstico do comportamento global da estrutura e do empreendimento de forma a possibilitar a adoção medidas corretivas tempestivas. O plano de inspeção dedicado aos túneis podem ser variados, mas basicamente consistem em inspeções

simplificadas (secundárias), com maior frequência, e inspeções completas (principais), com menor frequência. Esses trabalhos estão diretamente relacionados com a função do túnel, túneis onde há maior circulação de pessoas exigem inspeções mais frequentes.

Não é objetivo deste trabalho fixar os ensaios a serem realizados durante a vida útil do túnel, a fim de verificar a real situação da estrutura, pois esta será a função de equipe técnica especializada para o gerenciamento do túnel construído.

Entretanto, de forma genérica, sugere-se, para túneis rodoviários urbanos, inspeções principais a cada 2 anos e secundárias a cada semestre, enquanto os não urbanos podem ser inspecionados a cada 3 ou 5 anos (principal) e anualmente (secundária).

Inspeções secundárias consistem na verificação observacional do comportamento de toda a estrutura, registrando e analisando a necessidade de correções ou reforços em pontos de interesse e agindo rápida e preventivamente, caso necessário. Enquanto que inspeções principais consistem na verificação do comportamento de toda a estrutura com o auxílio de equipamentos e aparelhos capazes de informar com maior precisão a exata situação da estrutura, tornando possível uma imediata intervenção a fim de evitar precocemente qualquer dano que possa ocorrer à estrutura no futuro.

Geralmente, inspeções principais são auxiliadas por equipamentos instalados em veículos, como georadares, termografia infravermelha ou análise multiespectral. Os dados coletados são processados, em softwares especialmente desenvolvidos para este tipo de análise, e passam por avaliação e um programa de diagnóstico, classificando a urgência de reparos em três níveis: muito urgente, urgente e sem defeito.

13. CONCLUSÕES

Diante de tudo o que foi exposto nesta dissertação, pode-se inferir algumas conclusões de cada tema apresentado. Por este motivo este capítulo será dividido em sub-itens, onde se discutirá separadamente as conclusões sugeridas para cada capítulo, ou seja, para cada tema. Ao final, após uma avaliação geral das conclusões anteriores obtidas, serão apresentadas sugestões para próximas pesquisas, com a finalidade de orientar a produção de um documento ainda mais completo ou que complemente esta dissertação na tentativa de orientar ou conduzir a elaboração de um verdadeiro manual para profissionais envolvidos com obras de túneis.

13.1. RAZÕES PARA EXPLORAR O ESPAÇO SUBTERRÂNEO

Há muito a humanidade vem explorando o espaço subterrâneo, na antiguidade apesar dos procedimentos rudimentares e arcaicos há registros de túneis de adução de água, de fins militares para rotas alternativas de fuga e outras formas de utilização deste espaço, como construção de abrigos, tumbas ou templos.

Após a revolução industrial observou-se um grande progresso tecnológico, principalmente nas últimas décadas, que culminou em maiores avanços na escavação de túneis, diminuindo seu custo. Isso influenciou sobremaneira a exploração de construções subterrâneas, chegando a um nível atual onde observa-se a utilização de túneis para as mais diversas finalidades, como adução de água potável, águas pluviais, esgoto, tubulações elétricas, entre outros.

Nota-se que o setor que apresentou mais evolução foi o de transporte viário, com maior ênfase ao rodoviário. Isso porque com o crescimento da população mundial, principalmente nos grandes centros urbanos, os sistemas de transporte começaram a entrar em colapso e a não suportar o modelo até então unicamente explorado: o espaço superficial.

Neste contexto, impulsionado por uma maior exigência da sociedade a opção por túneis passou a ser notavelmente mais explorada. Afinal, como discutido intensamente no Capítulo

2, existem grande vantagens ao se explorar o subterrâneo, como proteção contra temperaturas indesejadas e desastres naturais, o que promove maior conforto ao usuário, também obtém-se maior nível de segurança que em estradas na superfície, além de contribuir significativamente para a preservação do meio ambiente. Mas talvez a maior contribuição dos túneis viários concentram-se nos benefícios sociais advindos, como a utilização da superfície para fins mais nobres (moradia, parques ou outros), melhor qualidade de vida, redução de poluição visual, sonora e do ar, entre outros. E há ainda aqueles locais em que devido às condições topográficas esta é a única maneira viável de se conectar regiões desejadas.

13.2. REGIMENTOS E NORMAS

Embora a bibliografia brasileira não seja ainda tão vasta e existam pouquíssimas normas destinadas à construção de túneis, o acervo internacional já está alcançando um patamar interessante. A maioria dos países, assim como o Brasil, necessita recorrer a normas, manuais e regulamentos internacionais para a execução de seus empreendimentos. Afinal, nações como França, Inglaterra, Suécia, Noruega, Japão e Estados Unidos são exceções por contarem com uma razoável quantidade de normas e regulamentos ao seu dispor. Ainda assim, até mesmo nestes é necessário recorrer-se a normas adotadas em outros países.

Separadamente, os diversos temas relacionados com as construções tuneleiras, inclusive os apresentados nos capítulos desta dissertação, podem ser satisfatoriamente pesquisados em várias fontes, até mesmo em português. Entretanto, a dificuldade em se conseguir um material que contemplasse estes variados temas agrupados em um único documento motivou a presente pesquisa.

Observa-se que seja na bibliografia internacional ou na brasileira a maioria dos regulamentos, normas, manuais e publicações, voltados especificamente para empreendimentos que envolvam túneis, concentram-se na proteção contra incêndio ou para medidas de segurança, o que demonstra a importância e a preocupação com que este tema é tratado em todo o mundo.

13.3. ESTUDO E INVESTIGAÇÕES GEOTÉCNICAS

Todo projeto de túnel deverá ser precedido por uma satisfatória investigação geotécnica, pois é de suma importância o conhecimento detalhado do maciço que será futuramente trabalhado. Isso evita ou pelo menos diminui futuras necessidades de ajustes do projeto, contribuindo sobremaneira para a economicidade do empreendimento. Afinal, a experiência tem mostrado

que os custos com uma criteriosa investigação geológico-geotécnica, geralmente da ordem de 3 a 5 % do custo total da obra, são bastante reduzidos se comparados com os custos provenientes de alterações de projeto no momento da construção.

Ainda que exista alguma semelhança com obras rodoviárias de estradas ou de ponte deve-se atentar que as investigações em obras subterrâneas possuem um aspecto particular e não devem seguir o mesmo modelo. Até mesmo duas obras de túneis distintas, localizadas em locais diferentes, podem necessitar de programas de investigação diferenciados entre si. Isso porque as condições do subsolo e os métodos construtivos podem variar significativamente.

Por estes motivos, um programa de investigações para obras subterrâneas geralmente apresenta um custo mais elevado e duração maior, além de muitas vezes serem de difícil acesso devido à conformação do relevo local. Por isso, não é incomum que estes tipos de empreendimento levem anos ou mesmo décadas para serem concebidos. Entretanto, deve-se ter sempre em mente que a variação do custo final do empreendimento estará sempre diretamente ligado à qualidade das investigações que conduziram a elaboração do projeto.

Entretanto, as recentes inovações tecnológicas neste setor influenciam positivamente a realização das investigações necessárias. Além disso, já existem uma série de ensaios e pesquisas que apresentam boa qualidade de informações e baixo custo, o que incentiva ainda mais os profissionais do setor a obterem o melhor trabalho dentro das condições financeiras e temporais normalmente impostas.

O plano de sondagem a ser adotado deverá ser elaborado em função da complexidade da geologia local e do risco induzido pela construção do túnel, por isso cronogramas apertados devem ser evitados.

Finalmente, também ficou demonstrado no decorrer do Capítulo 3 que apesar das investigações mais criteriosas ocorrerem sempre na fase inicial do empreendimento, investigações durante a etapa de construção também são de suma importância, pois torna possível o controle da obra para que esta se aproxime ao máximo do projetado.

13.4. SEÇÃO TRANSVERSAL

O formato da seção transversal de túneis destinados ao modal rodoviário varia basicamente em função do método construtivo, sendo geralmente retangular ou circular. Vários fatores, como volume de tráfego, velocidade, espaço para equipamentos, segurança e custos,

determinam a dimensões de cada elemento do túnel (largura da faixa de rodagem, gabarito vertical, largura do passeio etc).

Internacionalmente a resposta para estes fatores varia, embora a ordem de grandeza das dimensões de cada elemento se aproxime de uma constante. Com isso, existem soluções variadas para cada país, o que dificulta a definição de um padrão a ser adotado. Ainda, estas soluções tendem a evoluir com o tempo e serem modificadas.

Nota-se que os gabaritos utilizados nos túneis brasileiros são próximos aos adotados em outros países. A largura da faixa de rodagem, que internacionalmente oscila entre 3,50 e 3,75 m, no Brasil é de 3,60 m.

Há uma tendência mundial em se conceber uma faixa de emergência no planejamento de túneis rodoviários urbanos, além de acostamentos e passeios. Essa faixa destina-se a veículos especiais, utilizados em situações de emergência, e ainda pode ser utilizada, no futuro, em caso de necessidade de ampliação devido a aumento no volume de tráfego. Essa prática contribui para a redução de custos a longo prazo, pois a construção de túneis adjacentes ou ampliação dos existentes normalmente apresentam custos bastante elevados.

Algumas técnicas também podem contribuir para a obtenção de um empreendimento de custos e operações mais racionalizados, como por exemplo a execução de meios-fios rebaixados, que facilitam o trânsito de veículos de emergência ou normais, caso a equipe responsável pelo gerenciamento do tráfego conclua ser necessário. Afinal, os meios-fios apenas separam o passeio de pedestres, geralmente muito pouco utilizada, da pista.

Enfim, embora as dimensões dos elementos apresentem mundialmente valores aproximados, algumas atitudes simples no projeto podem resultar em um empreendimento mais racional, otimizando-se benefícios e reduzindo-se custos a curto e longo prazo.

Ao lado esquerdo do túnel, no sentido do trânsito, ao lado do passeio, a seção inicia com uma valeta para drenagem superficial, com uma largura interna geralmente de 30 cm e uma barreira simples de concreto padronizada (New Jersey), com 35 cm de largura.

É interessante espaçamento adicional de 0,80 m para os passeios, objetivando a utilização desta estrutura como ciclovia. Além disso, recomenda-se a construção de passeios em nível superior ao pavimento, visando a proteção de pedestres ou ciclistas de possíveis colisões contra automóveis. O espaço inferior poderá ser utilizado para acomodação de acessórios da infraestrutura do túnel (cabos, tubulações) ou para utilidades públicas (telefonia, gás, esgoto, cabos de fibra óptica, entre outros).

Por motivos de segurança, não se recomenda a utilização de faixas de acostamento, pois motoristas tendem a utilizar esta faixa em caso de engarrafamentos ou simplesmente a presença de veículos parados desperta a curiosidade de outros motoristas, reduzindo a velocidade no interior do túnel e aumentando o risco de acidentes.

Entretanto, a fim de não prejudicar motoristas que necessitem parar seus veículos por alguma razão (danos ou avarias, por exemplo), pode-se apelar para a utilização de áreas de parada de emergência (bairros), devidamente espaçadas ao longo de toda a extensão do túnel, e com comprimento suficiente para abrigar os maiores veículos que podem trafegar. Esta tem sido a tendência na recente engenharia de túneis européia.

13.5. ILUMINAÇÃO

O grande desafio de um projeto de iluminação concentra-se na dificuldade de acomodação dos olhos dos usuários que provém de uma região externa, durante o dia, que apresenta alta luminosidade, da ordem de até 10.000 cd/m², para uma zona central do túnel com baixíssima luminosidade, aproximadamente 5 cd/m².

Para tanto, o que se faz, através de metodologias e cálculos discutidos no capítulo 6, é reduzir progressivamente a iluminação do túnel. As saídas, apesar de também serem importantes, não apresentam grandes dificuldades pois as experiências mostram que os olhos dos motoristas tendem a se acomodar facilmente quando passam de um região de baixa para alta luminância. Mesmo assim, há de se ter cuidados especiais para evitar ofuscamentos indesejados.

Como não há muita diferença entre a luminância interna e externa ao túnel no período noturno, o processo é bem mais facilitado, onde apenas uma proporção 3:1 já atende satisfatoriamente. Assim, basta que a equipe de gerenciamento controle os níveis de luminosidade interna, mantendo acesa e apagadas as luminárias necessárias para atingir este objetivo.

O projeto deve conter também um sistema de iluminação de emergência, capaz de atender aos usuários em caso de falhas no sistema principal.

Finalmente, cabe ressaltar que a utilização de algumas técnicas de iluminação podem promover maior segurança aos usuários, como a adoção de sistemas anti-ofuscantes e painéis claros instalados nas paredes dos túneis e camadas asfálticas com maior capacidade de reflexão.

13.6. VENTILAÇÃO

Os túneis brasileiros ainda não estão no mesmo patamar de evolução que apresentam os japoneses e europeus no tocante a sistema de tratamento de emissões. Conseqüentemente, a bibliografia brasileira referente a este tema ainda é pobre, diferentemente do observado nos países citados.

Seja qual for o sistema adotado, a ventilação deve ser projetada para eliminar ou diminuir os níveis de poluentes presentes no ar, liberados nos processos de combustão nos motores dos veículos.

Existem várias tecnologias de tratamento de emissões disponíveis, desenvolvido por um seleto grupo de países para a solução de suas realidades. Entretanto, seria interessante o desenvolvimento de uma tecnologia nacional a ser adotada nos túneis brasileiros, ou mesmo o aprimoramento das técnicas existentes. Providências podem ser tomadas pela sociedade científica nacional e pelos projetistas e construtores afim de se modificar esta atual realidade e inserir o Brasil em um contexto mais evoluído no que diz respeito a este tema.

13.7. DRENAGEM E IMPERMEABILIZAÇÃO

Existe uma íntima relação entre os sistemas de drenagem e impermeabilização, muitas vezes estes são complementares ou até mesmo concorrentes. Afinal, o objetivo central de ambos é proteger a estrutura da ação maléfica da água, que muitas vezes pode trazer dano de difícil reparação e bastante oneroso.

Existem duas maneiras conceituais de tratar a água existente no subsolo: impedindo completamente que ela adentre o túnel, sem interferir no nível freático, ou controlando e direcionando a entrada de água corretamente, o que provoca o rebaixamento do lençol freático.

Observou-se também três maneiras distintas de drenagem no túnel, uma referente às águas subterrâneas, conduzidas pelos drenos laterais, outra que capta líquidos porventura existentes no pavimento e ainda a drenagem da água que infiltra pelo pavimento.

Discutiu-se também sobre a necessidade de se prever pontos de acesso à drenagem externa, para possibilitar o monitoramento de testes de funcionamento e serviços de manutenção. O mesmo pensamento se aplica aos poços de visita, que devem ser instalados em determinada freqüência de distância e possuir dimensões suficientes para permitir o abrigo adequado de operários de manutenção.

No tocante à impermeabilização, apresentou-se a importância das geomembranas e geocompostos, além do elemento de proteção, normalmente um geotêxtil para garantir a qualidade deste sistema.

Por fim, conclui-se que estes sistemas precisam ser rigorosamente estudados e detalhados, pois normalmente sua implementação após o período de construção, quando possível, é bastante onerosa e de difícil trabalho. Também devido a estes fatores deve-se atuar com rigor no controle de qualidade dos materiais elementos que compõem estes sistemas. Procedendo dessa forma, certamente a qualidade final da obra e sua durabilidade serão positivamente afetadas.

13.8. SINALIZAÇÃO

Vários fatores têm contribuído para o aumento da insegurança no trânsito, baseando-se principalmente nas constantes inovações tecnológicas. O projeto de sinalização das obras viárias visa impor alguns limites aos veículos diversos, buscando, com isso, promover maior segurança para condutores, transeuntes e meio ambiente. Assim, uma rodovia deve ser satisfatoriamente sinalizada, independentemente da existência de túneis. Contudo, a presença destes requer normas específicas de sinalização, pois há uma série de medidas a serem tomadas, como informações de altura máxima permitida, comunicação, saídas de emergência, entre outros.

Embora a normatização nacional ainda seja carente para este tipo de obra, pode-se recorrer a normas estrangeiras, pois no caso da sinalização dificilmente um país apresentará condições específicas. Diferentemente de outros temas, como iluminação, ventilação, condições geológico-geotécnicas etc, há uma convergência que poderia fazer, até mesmo, que o projeto de sinalização venha a ser internacionalmente padronizado, caso haja interesse dos países. Entretanto, enquanto isso não ocorre, vale ressaltar que o projeto de sinalização nos túneis jamais deverá ser ignorado.

O projeto de sinalização deve contemplar necessariamente a sinalização horizontal e a vertical. Em túneis longos, a utilização de sinais variáveis de mensagem atua positivamente na orientação dos condutores e é aconselhável sempre que possível.

Enfim, existem vários sinais a serem adotados e utilizados para a orientação dos usuários. É certo que uma grande quantidade de sinais pode atuar negativamente, se houver uma poluição

visual, mas tomando-se o devido cuidado várias normas existentes dentro e fora do Brasil podem ser consideradas na elaboração de um projeto de sinalização de um túnel rodoviário.

13.9. SEGURANÇA

Observa-se que a maioria das normas, regulamentos e publicações existentes refere-se a segurança e proteção contra incêndios. Não há dificuldades em se pesquisar o tema, seja na bibliografia nacional ou internacional.

A segurança começa com a concepção do túnel na etapa de projeto, algumas medidas na definição da geometria contribuem com a segurança. Outras medidas dizem respeito ao plano de segurança e distribuição de hidrantes, extintores e saídas de emergência.

Acidentes no túnel não são tão raros como deveriam e podem resultar em prejuízos algumas vezes fatais, por isso providências devem ser tomadas no sentido de se buscar a mais rápida resposta a uma situação de emergência. Para isso, estudos devem ser orientados também para o gerenciamento operacional e comissionamento do túnel.

Não se deve esquecer dos testes e ensaios de equipamentos e sistemas, pois estes podem detectar falhas e incorreções, permitindo uma ação preventiva, o que pode contribuir para a redução de custos de manutenção, mas principalmente na otimização da segurança, preservando-se, dessa forma, o bem mais valioso dos usuários: a vida.

13.10. ANÁLISE DE RISCOS

Embora estes estudos devam ser realizados a partir da fase de viabilidade de projeto, também é indicado para túneis já em operação ainda omissos neste quesito.

A Metodologia de Análise de Risco para Túneis (MART) compreende vários passos e técnicas. Resumidamente, o objetivo desta metodologia é identificar, qualificar e quantificar os riscos existentes para que se torne possível o seu controle e monitoramento. Com isso, os riscos podem ser eliminados ou mantidos em níveis toleráveis.

Todas as etapas da análise de risco devem ser rigorosamente e detalhadamente estudados. Essas análises não podem ser ignoradas em hipótese alguma, pois a qualidade, ou até mesmo a continuidade, da obra estão diretamente relacionadas com o risco existente.

Procedendo dessa maneira, certamente se atuará em benefício da segurança dos usuários e na proteção do erário público, afinal um túnel inseguro induziria vários custos indiretos do

governo com equipes de salvamento, hospitais e medicamentos. Com isso, defende-se o interesse coletivo com maior propriedade e a população se beneficiará com aumento da qualidade de vida. Todos estes aspectos demonstram a grande importância deste tema nas obras de túneis atuais e ajudam a explicar o motivo pelo qual os estudos de análise de riscos vêm sendo explorado com tanta intensidade.

13.11. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Esta dissertação voltou-se principalmente para o estudo de vários temas ligados à construção de túneis rodoviários. A partir deste trabalho pode-se sugerir a elaboração de um manual de construção de túneis rodoviários. Obviamente, um manual ou publicação semelhante poderá aprofundar-se ainda mais em cada tema e ainda adicionar algum outro porventura não tratado neste estudo, como, por exemplo, métodos construtivos e elementos estruturais, que não foram intencionalmente focalizados aqui, mas que poderiam perfeitamente ser contemplados em uma produção mais ampla e abrangente.

Também sugere-se um estudo comparativo entre as propostas apresentadas nessa dissertação com casos reais, a fim de verificar os pontos das propostas que são usualmente aplicados em projetos.

Outra sugestão é a realização de estudo semelhante, mas com ênfase maior concentrada no transporte ferroviário. Este modal vem recebendo grande incentivo do governo brasileiro nos últimos anos e há uma expectativa de maiores investimentos para este setor em um futuro próximo, uma vez que o Brasil ainda apresenta um grande déficit de desenvolvimento nesta área.

Considerando que as composições ferroviárias de carga admitem pequenos raios de curva e rampas limitadas a no máximo 2%, e considerando o aspecto acidental da topografia brasileira em várias regiões, espera-se que os próximos anos sejam promissores para a construção de túneis ferroviários no país.

Entretanto, existem algumas peculiaridades do sistema ferroviário, como o projeto de iluminação, ventilação, proteção contra incêndio, entre outros, que desaconselham a utilização de um padrão rodoviário. Por isso, sugere-se uma pesquisa específica para a construção de túneis no modal ferroviário.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (1983). NBR 8044 – Projeto Geotécnico. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT (1976). NBR 5181 - Iluminação de Túneis. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT (2009). NBR 15661 - Proteção Contra Incêndio em Túneis. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ.
- ABNT (2009). NBR 15775 – Sistemas de Segurança Contra Incêndio em Túneis: Ensaios, Comissionamentos e Inspeções. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ.
- APERIO (2004). Sítio Eletrônico
“www.railwaytechnology.com/contractors/infrastructure/aperio”. APERIO Limited - Geophysical and Non-Destructive Surveys. Cambridge, United Kingdom (acessado em abril de 2004).
- ASSIS, A.P. (1999). Panorama Internacional de Túneis Urbanos. Artigo publicado no 3º Simpósio sobre Túneis Urbanos – TURB 1999, São Paulo, SP. 163 – 172.
- ASSIS, A.P. (2002). Mecânica das Rochas: Obras Subterrâneas, Belo Horizonte. 5 - 11.
- BURACZYNSKI, J.J., L.I, T.K., KWONG, C. & LUTKEVICH P.J. (2010). Tunnel Lighting Systems. 4th International Symposium on Tunnel Safety and Security, Frankfurt, Hessian, Germany, 553 - 556.
- CAJA, E.B. (2005). El Drenaje de los Túneles. Implicaciones Constructivas y Medioambientales. Artigo publicado na Coleção Ingeotúneles. E.T.S.I. Minas. Volume 10. Capítulo 5. Madrid. 1 – 29.
- CANO, F.S.E. (2002). Túneles Viários Urbanos: Diseño, Instalaciones y Elementos de Seguridad. Departamento de Transporte e Planejamento, Universidade Politécnica da Catalunha, Barcelona, Espanha, 251p.

- CBPM/GO (2007). Norma Técnica nº 35/2007. Túnel Rodoviário. Corpo de Bombeiros Militar. Secretaria de Segurança Pública do Estado de Goiás.
- CBPM/SP (2004). Instrução Técnica nº 35/2004. Túnel Rodoviário. Corpo de Bombeiros. Polícia Militar do Estado de São Paulo.
- CBPM/SP (2004). Instrução Técnica nº 15/2004. Controle de Fumaça. Parte I – Regras Gerais. Corpo de Bombeiros. Polícia Militar do Estado de São Paulo.
- CELESTINO, T.B. (1997). Auscultação de Longo Prazo e Manutenção de Túneis. 2º Simpósio de Túneis Urbanos (TURB97), São Paulo, SP, 101-120.
- CHILD & ASSOCIATES (2004). M5 East Free Way: A Review of Emission Treatment, Technologies, Systems & Applications. NSW Roads and Traffic Authority. 15 – 46.
- CLAYTON, C.R.I., MATTHEWS, M.C. & SIMONS, N.E. Site Investigation. Second Edition. 1 – 5.
- CLAY, B.B. (1998). Drainage Maintenance. Artigo publicado na coleção Tunnels and Metropolises. Rotterdam. 521-526
- CPT (2010). 2º Curso da CPT. Túneis e Obras Subterrâneas em Meio Urbano. Comissão Portuguesa de Túneis.
- ESTEIO (2004). Sítio eletrônico “www.esteio.com.br”. Esteio Engenharia e aerolevamentos S.A., Curitiba, PR (acessado em agosto de 2004).
- FERNANDES, C.A.M., STEINER, A.F., SCANDIUZZI, L., OLIVAN, L.I., BORELLI, N.L.M. & GARCES, M.A.C. (2000). Ensaio Especiais Realizados nas Estruturas das Linhas 1-Azul e 3- Vermelha do Metrô de São Paulo. 42º Congresso Brasileiro do Concreto, IBRACON, Fortaleza, CE, 17 p.
- FHWA (2009). Design and Construction of Road Tunnels. Civil Elements. Technical Manual. FHWA-NHI-09-010, US. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Washington D. C., USA, 694 p.
- GORICKI, A., RACHANIOTIS, N., HOEK, E., MARINOS, P., TSOTSOS, S. & SCHUBERT, W. (2006) Support Decision for Tunnels in Fault Zones. Felsbau: Rock and Soil Engineering, 24(5): 51 – 57.

- HAACK, A., SCHREYER, J. & JACKEL, G. (1995). State-of-the-art on Non-Destructive Testing Methods for Determining the State of a Tunnel Lining. *Tunnelling & Underground Space technology*, 413-431.
- ISRM (1981). Rock Characterization Testing and Monitoring. International Society for Rock Mechanics – ISRM, ISRM Suggested Method, Commission on Testing Methods, E.I. Brown (ed.) Pergamon Press, London, UK, 211p.
- ITA (2009). General Report on Conventional Tunnelling Method. ITA Working Group: Conventional Tunnelling. Publicação ISBN: 978-2-9700624-1-7. 8 -15.
- ITA COSUF (2008). Survey of Existing Regulations and Recognised recommendations (road tunnels). International Tunneling Association. 48p.
- ITIG (2006). The International Tunnelling Insurance Group. A code of Practice for Risk Management fo Tunnel Works. 28p.
- LEMOS, K.B.Q. (2005). Manutenção e Reabilitação de Túneis, Brasília, DF. 5-43.
- LEMKE, S., ENCISO J.L., REY A. (2008). Impermeabilización de Túneles: especificación y estado del arte. *Obras Urbanas*. ISSN 0211-8173, Año nº 028, nº 298, 64 – 69.
- MEHTA, P. K., MONTEIRO, P.J.M. (1994). *Concreto: estrutura, propriedades e materiais*. Ed. Pini, São Paulo, SP, 572 p.
- NAGEL, K.H. (1992). Limits of the Geological Predictions Constructing the Samanalawewa Pressure Tunnel, Sri Lanka. 97 – 110.
- NAUMANN, J. & HAARDT, P.(2003). Non-Destructive Testing in Civil Engineering 2003 . International Symposium (NDT – CE2003), Berlin, Germany, 16-19.
- NIEBLE, C.M. (1985). Análise Comparativa entre Obras Subterrâneas e a Céu Aberto. In: 2º Simpósio de Escavações Subterrâneas. ABGE, v.2. Rio de Janeiro. 37 – 54.
- NUCLIO (2004). Sítio Eletrônico “www.portaldoastronomo.org, 2004”. Núcleo Interactivo, Carcavelos, Portugal.
- OLIVEIRA, R. (1986). Engineering Geological Investigations of Rock Masses for Civil Engineering Projects and Mining Operations. In: 5º Congresso Internacional IAEG, v.4. Buenos Aires. 2467 – 2484.
- PARLAMENTO EUROPEU E CONSELHO DA UNIÃO EUROPÉIA (2004). Directiva 2004/54/CE . Publicado no Jornal Oficial da União Européia de 30.04.2004, 87 – 91.

- PIARC (2001). Technical Committee 5 Road Tunnels. Cross Section Geometry in Unidirectional Road Tunnels. Reference 05.11.B. World Road Association, 35 - 72
- PIARC (2008). Technical Committee C3.3 Road Tunnel Operation. Risk Analysis For Road Tunnels. Reference 2008R02. World Road Association, 124p.
- PUBLIC ROAD ADMINISTRATION (2001). Road Tunnel Ventilation in Norway. Oslo, Norway, 6p.
- REDAELLI, L.L. (1999). Sistemas Operativos de Túneis Rodoviários. Artigo publicado no 3º Simpósio sobre Túneis Urbanos – TURB 1999. 49 – 64.
- RTA (2004a). Eletrostatic Precipitators and Ventilation in Roads Tunnels in Japan. NSW Roads and Traffic Authority, 17 p.
- RTA (2004b). Review of Emission Treatment Systems & Technologies – Road Tunnel Applications. NSW Roads and Traffic Authority, 17 p.
- SCABBIA, A.L.G. (2007). Túneis Rodoviários. Proposta de Avaliação de Conformidade para Liberação ao Uso e Operação Comercial. Tese de Doutorado. 1 – 25.
- SERRANO, E.A, HATORI, A.C.A. & NEGRO, A.(2004). Técnicas de Inspeção de Revestimentos de Concreto em Túneis. 1º Congresso Brasileiro de Túneis e Estruturas Subterrâneas, CBT, São Paulo, SP, CD ROM, 6 p.
- SOUZA, V.C. & RIPPER T. (1998). Reforço, Patologia e Recuperação de Estruturas de Concreto. Ed Pini, São Paulo,SP, 255 p.
- STERLING, R.L. & GODARD, J.P. (2001). Geoengineering Considerations in the Optimum Use of the Underground Space. 1 – 15.
- Trauzzola, N.M & Palermo, G. (2002). Contribuição para Sistemas Impermeabilizantes: Obras Subterrâneas. Artigo publicado no 4º Simpósio sobre Túneis Urbanos – TURB 2002, São Paulo, SP. 185-190.
- SZÉCHY, K. (1970). The Art Of Tunnelling. Akadémiai Kiadó, Budapest, Hungary, 259 – 523.
- U. S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION (2009). Federal Highway Administration. Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels – Civil Elements. FHWA-NHI-09-010. 3-1 – 3-31.

VAZ, L.F. O Efeito das Condições Geológicas na Economia das Obras Subterrâneas. Artigo publicado no 3º Simpósio sobre Túneis Urbanos – TURB 1999, São Paulo, SP. 100 – 108.

VEDACIT Impermeabilizantes (2000). Impermeabilização de Estruturas, 17ª Edição.

YUAN, Y. (2000). Tunnel Waterproofing Practices in China. Publicado no congresso mundial de túneis. Durban, África do Sul, 573 – 578.

APÊNDICE A - REGULAMENTOS E NORMAS

A construção e desenvolvimento de tecnologias para a execução de túneis no mundo é um tema que começou a ser explorado apenas recentemente, se comparado com outros campos da construção civil. Somente a partir de meados do século passado a construção de túneis passou a ser largamente difundida.

Devido a isso, as publicações destinadas à construção tuneleira também são recentes e escassas. A maioria dos países não possui legislação ou normatização adequada, os países que possuem maior número de normas, leis ou outras publicações são basicamente aqueles que possuem melhores estruturas financeiras e tecnológicas, aliados com suas condições geográficas. Neste sentido, observa-se maior destaque para países como, Japão, Noruega, Suécia, Itália, Alemanha, Estados Unidos, Espanha, França e Reino Unido.

No Brasil, como na maioria dos países, a normatização e legislação relacionada a túneis é escassa, existindo apenas quatro normas da ABNT sobre o assunto:

- ✓ NBR 5181 (ABNT, 1976) – Iluminação de Túneis;
- ✓ NBR 15661 (ABNT, 2009) – Proteção Contra Incêndio em Túneis;
- ✓ NBR 15775 (ABNT, 2009) – Sistemas de Segurança Contra Incêndio em Túneis – Ensaio Comissionamentos e Inspeções; e
- ✓ NBR 8044 (ABNT, 1983) – Projeto Geotécnico (capítulo 12).

Obviamente, para a construção de um túnel necessita-se recorrer a normas e publicações internacionais. Felizmente, no contexto internacional, pode-se dizer que há uma rica gama de publicações referentes a túneis. Na Tabela A.1 apresentam-se as principais normas e legislações no mundo abordando o assunto. Já a Tabela A.2 apresenta as principais publicações em cada país, assim como a Tabela A.3 que resume as publicações dos principais organismos internacionais.

Tabela A.1 – Normas e legislações no mundo relacionada às obras subterrâneas (ITA COSUF, 2008).

| Local | Título | Referência | Última Versão | Conteúdo |
|----------------|---|--|----------------------|---|
| União Européia | Diretiva 2004/54/EC do Parlamento Europeu e do Conselho de 29 de abril de 2004. | 2004/54/EC (Publicado no Jornal da União Européia em 07/06/2004) | 29/6/2004 | Define os requisitos mínimos de segurança para os túneis da rede rodoviária Trans-européia. |
| Áustria | Guidelines and Regulations for Road Construction: | RVS ref: | - | Tratam-se de normas para a construção rodoviária |
| | 1. Tunnel cross section | 09.01.22 | 1994 | Aborda um estudo sobre a geometria da seção transversal de túneis |
| | 2. Interior Construction | 09.01.23 | 2001 | Define métodos e procedimentos da construção de túneis |
| | 3. Ventilation, Fundamentals | 09.02.31 | 2001 | Estudo sobre métodos e princípios fundamentais de ventilação de túneis |
| | 4. Ventilation, Calculation of fresh air demand | 09.02.32 | 2005 | Orienta cálculos de demanda de ar puro no interior dos túneis e de poluentes |
| | 5. Lighting | 09.02.41 | 2007 | Define métodos e procedimentos de iluminação ao longo do túnel |

| | | | |
|---|----------|------|---|
| 6. Operational and safety measures, Structure | 09.01.24 | 2007 | Métodos e procedimentos relacionados com a segurança da estrutura do túnel |
| 7. Operational and safety measures, Equipment | 09.02.22 | 2007 | Métodos e procedimentos relacionados com a segurança de equipamentos no túnel |
| 8. Operational and safety measures, Radio equipment | 09.02.61 | 1987 | - |
| 9. Monitorings, control and test - Structurally constructive parts | 13.03.31 | 1995 | Orienta ensaios, controle e monitoramento de elementos construtivos estruturais |
| 10. Maintenance of tunnel equipment | 13.03.41 | 1999 | - |
| 11. Training matters – Qualifications and training of staff involved in the operation of tunnels and above-ground tunnels | 14.02.15 | 2007 | - |
| 12. Constructional fire protection in transportation buildings for roads | 09.01.45 | 2006 | - |

| | | | | |
|------------------|---|------------------|------|---|
| República Tcheca | 1. Design of the road tunnels | ČSN 73 75 07 | 2005 | Padrões básicos para construção, arranjo espacial dos equipamentos, segurança e equipamentos tecnológicos |
| | 2. Road Tunnel Equipment | TP 98 | 2004 | Normas com instruções básicas sobre projetos de equipamentos tecnológicos de túneis rodoviários |
| | 3. Operation, administration and maintenance of road tunnels | TP 154 | 2002 | Norma para preparação da operação e plano de emergência, documentos de segurança e plano de manutenção |
| | 4 . Safety | TP ***** | 2008 | Define metodologia de análise de risco |
| França | 1. Circular Inter-Ministerial n° 2000-63 | Circ2000-3A2 | 2000 | Define parâmetros de segurança dos túneis da rede rodoviária francesa |
| | 2. Lei de segurança de infraestrutura e sistemas de transportes | Lei 2002-J2 | 2000 | O art. 2 possibilita a imposição de procedimentos similares para túneis concedidos pelo Estado ou não |
| | 3. Decreto de segurança de | Decreto 2005-701 | 2006 | Decreto aplicado a túneis com comprimento |

elementos da rede

superior a 300 m

| | | | | |
|----------|--|---------------------|------|---|
| | rodoviária | | | |
| | 4. Circular N° 2006-20 (29/03/06) | Circular N° 2006-20 | 2006 | O apêndice 1 aborda procedimentos operacionais dos túneis da rede rodoviária |
| | 5. Decreto | Decreto 2006-1354 | 2006 | Procedimentos de adaptação para túneis de comprimento superior a 300 m |
| | 6. Ordem Interministerial | Ordem 18/04/07 | 2007 | Norma sobre atualização de documentação de segurança |
| Alemanha | 1. Manuais para Equipamentos e Operação de Túneis Rodoviários (RABT) | RABT 02 | 2002 | Controle de fumaça e incêndio, saídas de emergência, comunicações, barreiras de emergência etc. |
| | 2. Condições Técnicas Adicionais para a Construção de Túneis Rodoviários | ZVT - Tunnel | 1999 | Apêndice técnico voltado para a construção de túneis rodoviários |
| Grécia | 1. Túneis (serviços civis) | O.M.O.E. | 2003 | Define seção transversal, saídas de emergência etc |
| | 2. Túneis (serviços eletromecânicos) | O.M.O.E. | 2003 | Ventilação, iluminação, equipamento de segurança etc |
| | 3. Manual de Manutenção | - | 2004 | Decreto interministerial que inclui normas de |

| | | | | |
|---------|--|---------------------------|------|--|
| | Rodoviária | | | rotinas de manutenção de equipamentos eletromecânicos de túneis |
| | 4. Transporte de Carga Perigosa em Túneis Rodoviários | - | 2004 | Define as formas de transporte de carga perigosa e prevenção de acidentes |
| Itália | 1. Segurança de Tráfego em Túneis Rodoviários com Particularidade no Transporte de Materiais Perigosos | Circ. 06.12.1999 | 1999 | Aborda somente o transporte de cargas perigosas. |
| | 2. Normas Geométricas e Funcionais para a Construção de Rodovias | Norma 05.11.2001 | 2001 | Decreto ministerial que inclui 4 páginas destinadas à definição da seção transversal de túneis |
| | 3. Luz e Iluminação em Túneis | UNI 29000240 | 2003 | Norma destinada somente a iluminação de túneis |
| Holanda | 1. A Lei dos Túneis Holandeses | WARVW- BARVW- RARVW | 2006 | Lei que orienta a construção de túneis com comprimento superior a 250 m |
| | 2. Recomendações para Ventilação de Túneis Rodoviários | ISBN 90-369- 0001-8 | 2005 | Trata-se de recomendação para todos os túneis mas não tem força de lei ou norma |

| | | | | |
|---------|---|---|------|---|
| | 3. Manuais de Segurança - Parte C, Medidas Básicas de Segurança em Túneis | NL-Safe | 2004 | Manual para segurança técnica e operacional de túneis |
| | 4. Proteção Contra Incêndio em Túneis | GT-98036-a | 1999 | Exigências de ensaios. |
| | 5. Manual para Documentação de Segurança | ISBN 9789036900102 | 2007 | - |
| | 6. Manual para Análise de Risco | | 2005 | Define os requisitos necessários para estudos de análise de risco devido à presença de túnel |
| | 7. Manual para Análise de Cenário, Parte 1 - Túneis Rodoviários | ISBN 90- 77374-03-5 COB J304-W- 04-130 RWS 4818- 2004-0103 | 2003 | Manual que complementa o estudo de análise de riscos |
| Polônia | 1. Legislação Sobre Rodovias Públicas | D.U 204-2086 | 2004 | Lei em vigor desde 2008 que orienta construções rodoviárias em geral, incluindo tópicos destinados especificamente a túneis |
| | 2. Decreto - Requisitos Técnicos para Localização e Estruturas | Decreto 63-735 | 2000 | Decreto que define requisito técnicos para construção de auto-estradas, inclui tópicos |

| | Rodoviárias | | | destinados especificamente a túneis |
|------------|--|--------------|------|---|
| Espanha | 1. Manual para Projetos, Construção e Operação de Túneis Rodoviários | IOS-98 | 1998 | O texto necessita de nova atualização pois não é totalmente suficiente para vários itens, como segurança, operação, ventilação, sinalização e outros. |
| Suécia | 1. Requerimentos Técnicos para Serviços de Construção | SFS 1994:847 | 1994 | Lei atualizada em 2007 (SFS 2007:457) inclui tópicos destinados exclusivamente a túneis rodoviários |
| | 2. Ato de Proteção Civil | SFS 2003:778 | 2003 | Lei atualizada em 2006 (SFS 2006:547) |
| Inglaterra | 1. Manual para Projetos de Rodovias e Pontes | BD 78/99 | 1999 | Diretriz que contempla um capítulo destinado a Obras de Arte Especiais que contém tópicos específicos para a construção de túneis rodoviários |
| Japão | 1. Norma Nacional de Segurança de Instalações de Emergência em | - | 1981 | Instrução do governo japonês, escrito somente em japonês |

| | | | | |
|---------|--------------------------------|---|------|---|
| | Túneis Rodoviários | | | |
| Noruega | 1. Norma de Segurança de Túnel | - | 2007 | Lei que adapata a Diretiva Européia e inclui alguns ajustes necessários para harmonizar com a realidade dos túneis na Noruega |

Tabela A.2 – Principais publicações no mundo (ITA COSUF, 2008).

| Local | Título | Referência | Última Versão | Conteúdo |
|---------|---|------------------------|---------------|---|
| França | 1. Guia Para Documentação de Segurança de Túneis Rodoviários | - | 2003 | Manual que aborda itens referentes a documentação de segurança de túneis rodoviários como análise de riscos, investigações de perigos submetidos, planos de emergência, métodos e objetivos da documentação de segurança. |
| | 2. Curso de Operações de Emergência em Caso de Incêndio em Túneis Rodoviários | Nota Informativa n. 13 | 2003 | Nota técnica que define medidas a serem adotadas em túneis caso ocorram incêndios |
| | 3. Comportamento de Túneis Rodoviários a Incêndios | - | 2005 | Recomendação escrita apenas em francês para análise do comportamento de túneis rodoviários quando submetidos a incêndios |
| Espanha | 1. Instrução de Rodovias | Norma 3.1 | 1999 | Norma direcionada para definição do traçado de rodovias, inclui tópicos |

destinados especialmente a seção transversal de túneis e estabilidade da

| | | | | |
|-----------|---|--------------------|------|---|
| | | | | estrutura |
| | 2. Instrução de Rodovias | Norma 8.1 | 1999 | Norma destinada especificamente para a sinalização vertical de túneis rodoviários |
| Suécia | 1. Túnel 2004 | 2004:124 | 2004 | Manual que define especificações técnicas gerais relacionados a túneis rodoviários elaborado pela Administração Rodoviária Nacional Sueca |
| | 2. Projeto de Rodovias e Ruas, VGU | 2004:80 | 2004 | Manual de regulamentação interna que contém itens relacionados a túneis rodoviários voltados para a utilização das municipalidades suecas |
| | 3. Segurança em Túneis Rodoviários | ISBN 91-7147-893-0 | 2005 | Diretriz que define itens de segurança de túneis rodoviários suecos |
| | 4. Conceito de Segurança 2004 em Túneis Rodoviários | Pub. 3:2004 | 2004 | Diretriz elaborada pela Associação Rodoviária Nórdica também relacionada a conceitos de segurança em túneis rodoviários |
| Austrália | 1. Manual de Projetos de Túneis Rodoviários | RTA/Pub 06.357A | 2006 | Diretriz que detalha as fase de um projeto de túnel rodoviário, além disso este documento também trata com profundidade temas relacionados com segurança a incêndio de túneis rodoviários |
| Japão | 1. Tecnologia de Túnel Rodoviário no Japão | PWRI 3023 | 1991 | Artigo que informa o resumo de normas rodoviárias aplicada aos túneis rodoviários japoneses |
| | 2. Estado de Equipamentos Tecnológicos dos | PWRI Vol. 61 | 1993 | Artigo que apresenta o estado de equipamentos de ventilação, iluminação e equipamentos de segurança nos túneis |

| | | | | |
|----------------|---|--------------------|------|---|
| | | | | |
| | 3. Princípios de Projetos de Ventilação de Túneis | - | 1993 | Artigo que se aproxima de uma norma técnica para construção e manutenção de equipamentos de ventilação de túneis para a Rodovia Metropolitana (Express Highway) |
| Noruega | 1. Guia de Projeto Noruegueses, Túneis Rodoviários | Handbok 021 | 2008 | Manual que define os procedimentos necessários para a elaboração de túneis rodoviários na Noruega |
| | 2. Guia para Análise de Riscos para Túneis Rodoviários | TS 2007:11 | 2007 | Artigo voltado especificamente para o tema de análise de riscos para túneis rodoviários |
| | 3. Água e Infiltração em Túneis | Handbok 163 | 2006 | Diretriz escrita somente na língua local |
| Suiça | 1. Diretrizes para o Projeto de Túneis Rodoviários | ASTRA Road Tunnels | 1995 | Diretrizes utilizadas nos projetos de rodovias federais, possui itens destinados especificamente a túneis |
| | 2. Ventilação de Túneis Rodoviários, Seleção de Projetos, Sistemas e Operação | ASTRA Ventilation | 2004 | Diretrizes utilizadas nos projetos de rodovias federais, possui itens destinados especificamente a túneis |
| Estados Unidos | 1. Proteção Contra Incêndio. Norma para Túneis Rodoviários, Pontes e Outras Estradas de Acesso Limitado | NFPA 502 | 2008 | Norma elaborada pelo Conselho da Associação de Proteção a Incêndio Nacional e aprovada pelo American National Standard |
| | 2. Manual ASHRAE | ASHRAE TC 5.9 | 2007 | Manual referenciado pela NFPA 502 voltado para as especificações de instalações veiculares. |

Tabela A.3 – Principais publicações de organismos internacionais (ITA COSUF, 2008).

| Autor | Título | Referência | Última Versão | Conteúdo |
|------------------------------------|--|---------------------------|----------------------|---|
| ITA | 1. Diretrizes de Resistência a Incêndio em Túneis Rodoviários | ITA | 2004 | Diretriz que aborda basicamente a resistência estrutural de túneis rodoviários quando submetidos a incêndio. |
| | 2. Desenvolvimento Ambiental e Sustentável - Razões para explorar o espaço subterrâneo | ISBN 978-2-9700624-2-4 | 2010 | Este artigo ilustra mais de 100 túneis e projetos de utilização do espaço subterrâneo em todos os continentes, apresentando oportunidades e benefícios para se explorar o subterrâneo visando redução de impacto ambiental para a sociedade |
| | 3. Métodos Convencionais de Escavação de Túneis | ISBN 978-2-9700624-1-7 | 2009 | Artigo que se aproxima de um guia para engenheiros tuneleiros, clientes e contratantes no sentido de promover a compreensão internacional através de unificação de terminologias e princípios, sem entrar em detalhes |
| | 4. Diretrizes para Saúde Ocupacional e Práticas Seguras na Construção de Túneis | ISBN 978-2-9700624-0-0 | 2008 | Com este artigo não se pretende substituir a atual regulamentação nacional ou orientação, mas apenas fornecer orientações sobre boas práticas básicas, onde não existe nenhuma |
| NVF NORDIC ROAD ASSOCIATION | 1. Ventilação de Túneis Rodoviários | NVF Sub-comitê 61: túneis | 1993 | Manual traduzido para o Inglês que descreve as melhores práticas deste tema nos países nórdicos |
| | 2. Iluminação de Túneis Rodoviários | NVF Sub-comitê 61: túneis | 1995 | Manual traduzido para o Inglês que descreve as melhores práticas deste tema nos países nórdicos |
| | 3. Operação e Manutenção de Túneis Rodoviários | NVF Sub-comitê 61: túneis | 1996 | Manual traduzido apenas para as línguas nórdicas que descreve as melhores práticas deste tema nos países nórdicos |

| | | | | |
|--------------|---|---------------------------|------|---|
| | 4. Conceito de Segurança 2000 | NVF Sub-comitê 32: túneis | 2000 | Manual traduzido apenas para as línguas nórdicas que descreve as melhores práticas deste tema nos países nórdicos |
| | 5. Conceitos de Segurança 2004 para Túneis Rodoviários | NVF Sub-comitê 32: túneis | 2004 | Manual traduzido apenas para as línguas nórdicas que descreve as melhores práticas deste tema nos países nórdicos |
| PIARC | 1. Guia para Organização de Recrutamento e Treinamento da equipe de Operação de Túneis Rodoviários | 2007R04 | 2007 | Recomendação que orienta os procedimentos de contratação e treinamento da equipe técnica responsável pela operação de túneis rodoviários |
| | 2. Aproximação Integrada para Segurança de Túneis Rodoviários | 2007R07 | 2007 | Artigo técnico que propõe princípios gerais e perspectivas correntes a serem adotados para a segurança de túneis rodoviários. Apresenta as melhores práticas correntes em vários países |
| | 3. Sistemas e Equipamentos para Controle de Fumaça e Incêndio em Túneis Rodoviários | 05.16.B | 2007 | Artigo Técnico que apresenta os princípios básicos de propagação de fumaça e calor no começo de um incêndio |
| | 4. Efeitos de Incêndios em Pavimentos de Túneis Rodoviários | RR 334-054 | 2007 | Artigo técnico que apresenta estudo específico do comportamento do pavimento de um túnel rodoviário quando submetido a incêndio |
| | 5. Modelo de Quantificação de Riscos para Transporte de Mercadorias Perigosas em Túneis Rodoviários | RR 39-086 | 2006 | Artigo elaborado com a finalidade de definição de um modelo de risco para o transporte de mercadorias na França, Áustria e Reino Unido |

| | | | |
|--|-----------|------|--|
| 6. Boas Práticas para a Operação e Manutenção de Túneis Rodoviários | 05.13.B | 2004 | Artigo que objetiva a continuidade da gestão de segurança, componentes e valor de um Sistema de Gestão de Túneis (SGT) para a operação e manutenção, modo como os equipamentos devem ser manipulados pela equipe técnica que opera os túneis, assim como orientação de treinamentos a serem realizados para esta equipe |
| 7. Projeto de Seção Transversal de Túneis Rodoviários Bidirecionais | 05.12.B | 2004 | Artigo técnico elaborado a partir de normas e recomendações adotadas em vários países visando a obtenção de parâmetros que auxiliem a definir a seção transversal de túneis rodoviários bidirecionais. |
| 8. Túneis Rodoviários: Emissões Veiculares e Demanda de Ar para Ventilação | 05.14.B | 2004 | Artigo técnico que faz referências aos sistemas de ventilação longitudinal e transversal. Também é uma atualização do artigo anterior que abordava os fatores de emissão de veículos para túneis rodoviários, necessária devido ao grande avanço tecnológico observado na indústria de veículos auto-motores a partir deste novo milênio |
| 9. Critério de Projeto PIARC Para Resistência a Incêndios Pelas Estruturas de Túneis Rodoviários | RR324-064 | 2004 | Artigo |
| 10. Sistemas de Gestão de Incidentes de Tráfego Adotados em Túneis Rodoviários | 05.15.B | 2003 | Artigo técnico que identifica e verifica sistemas de detecção de incidentes em uso em túneis para orientar os operadores a reagirem diante de situações imprevistas e se comunicarem com os motoristas |

| | | | |
|---|---------|------|--|
| 11. Seção Transversal de Túneis Uni-Direcionais | 05.11.B | 2002 | Artigo Técnico cujo objetivo é desenvolver princípios de segurança e custo efetivo da seção transversal, levando em consideração a sinalização e requisito de gerenciamento de tráfego |
| 12. Controle de Incêndio e de Fumaça em Túneis Rodoviários | 05.05.B | 1999 | Artigo Técnico que estuda particularmente emissões de gases de veículos e o consequente tratamento a ser dado (ventilação), também aborda as consequências de incêndios em veículos |
| 13. Segurança Rodoviária em Túneis | 05.04.B | 1996 | Artigo Técnico realizado a partir de uma pesquisa em escala global visando atualizar dados de segurança em túneis rodoviários |
| 14. Análise de Risco para Túneis Rodoviários | 2008R02 | 2008 | Artigo Técnico que apresenta análise, reconhecimento e técnicas de gerenciamento de riscos associados a túneis rodoviários |
| 15. Gestão de Equipe de Emergência em Túneis Rodoviários | 2008R03 | 2008 | Artigo Técnico voltado para orientação de equipes de operação de emergência em túneis rodoviários |
| 16. Túneis Rodoviários: Sistemas de Combate a Incêndios | 2008R07 | 2008 | Artigo Técnico que apresenta um estudo sobre a avaliação de sistemas fixos de combate a incêndios |
| 17. Fatores Humanos e Segurança dos Túneis Rodoviários para os Usuários | 2008R17 | 2008 | Relatório que visa melhorar a compreensão do comportamento do usuário em túneis rodoviários, tanto normais como em situações críticas e apresentar recomendações para a concepção e funcionamento do túnel |

| | | | |
|--|---------|------|--|
| 18. Túneis Rodoviários: um guia para otimizar o impacto na qualidade do ar no ambiente | 2008R04 | 2008 | Relatório sobre o conhecimento e os regulamentos em matéria de impacto do tráfego rodoviário na qualidade do ar. |
| 19. Ferramentas para Gestão de Segurança de Túneis Rodoviários | 2009R08 | 2009 | Este relatório é dedicado às ferramentas básicas necessárias para a gestão e apoio à decisão sobre questões de segurança rodoviária túnel. |
| 20. Túneis Rodoviários Urbanos - Recomendações para os gerentes e os órgãos operacionais para a concepção, gestão, operação e manutenção | 2008R15 | 2008 | Neste artigo técnico são apresentadas recomendações aos gestores e órgãos operacionais, não só para a operação dos túneis existentes, mas também para a concepção, gestão, operação e manutenção dos túneis rodoviários urbanos. |