

# **SEGURANÇA DE TÚNEIS BRASILEIROS EM RELAÇÃO A INCÊNDIOS**

**LUCAS MOREIRA MADRILES**

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA CIVIL

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

BRASÍLIA / DF: DEZEMBRO – 2018

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

**SEGURANÇA DE TÚNEIS BRASILEIROS EM RELAÇÃO**  
**A INCÊNDIOS**

**LUCAS MOREIRA MADRILES**

**ORIENTADOR: ANDRÉ PACHECO DE ASSIS**

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM GEOTECNIA**

**BRASÍLIA / DF: DEZEMBRO/2018**

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

**SEGURANÇA DE TÚNEIS BRASILEIROS EM RELAÇÃO  
A INCÊNDIOS**

**LUCAS MOREIRA MADRILES**

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.**

**APROVADA POR:**

---

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

---

**Luís Fernando Martins Ribeiro, DSc (UnB)  
(EXAMINADOR INTERNO)**

---

**Diego Almeida Pereira, MSc  
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**DATA: BRASÍLIA/DF, 07 de dezembro de 2018.**

## FICHA CATALOGRÁFICA

MADRILES, LUCAS MOREIRA

Segurança de túneis brasileiros em relação a incêndios 2018.

xiii, 63 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2018)

Monografia de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Obras subterrâneas

2. Túnel

3. Segurança

4. Incêndio

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MADRILES, L.M. (2018). Segurança de túneis brasileiros em relação a incêndios. Monografia de Projeto Final, Publicação G.PF-AA001/18, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 63 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Lucas Moreira Madriles

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: -

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Civil / 2018

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

---

Lucas Moreira Madriles

QNE 21, Casa 30

72125-210 – Taguatinga/DF – Brasil

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, pois é dEle todas as coisas. À Virgem Maria Santíssima e Santa Bárbara pela interseção. À minha família, Flávio, Valéria e André que tornaram todo o meu sonho possível. À Vivian, Catarina e Gustavo, pois sem estes amigos o projeto não seria possível. Ao meu orientador André Assis, compreensivo guia nesta trajetória. Aos amigos que me apoiaram e acreditaram em mim, em especial à Juliana e ao Ian. Aos professores, que serviram de inspiração. A equipe de funcionários do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental e da Faculdade de Tecnologia pelo auxílio e solidariedade neste longo período que passamos juntos.

## **RESUMO**

A crescente demanda pelo uso do espaço urbano, a modernização e crescimento tecnológico e populacional impulsiona a utilização dos espaços subterrâneos, dada que esta é uma boa solução para alguns dos problemas modernos de transporte. Porém, o aumento no uso de túneis traz consigo o aumento das preocupações a respeito das desvantagens que esta modalidade pode gerar, uma vez que os indivíduos serão submetidos a essas desvantagens mais vezes. Observando que uma grande problemática a respeito de túneis é a ocorrência de incêndio, buscou-se estudos que procuram evitar esses acidentes e, caso ocorra, possa ter seus efeitos controlados. Este trabalho busca reunir conhecimentos a respeito desta problemática e, apresentar diretrizes, indicando os melhores modos de aumentar a segurança dos usuários e das estruturas.

## **ABSTRACT**

The increasing demand for the use of urban space, modernization, populational and technological growth, lead to the use of underground spaces, because this is a good solution for some of the modern transportation problems. However, the increased use of tunnels brings with it concerns about the disadvantages that this modality can bring, since individuals will be subjected to these disadvantages more often. Observing that a major problem regarding tunnels is the occurrence of fire, studies were sought to avoid such accidents and, if it occurs, its effects may be controlled. This work seeks to gather knowledge about this problem and present the best ways to increase the safety of users and structures.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Motivação.....	1
1.2. Classificação dos túneis.....	5
1.3. Problemática.....	5
1.4. Objetivos.....	6
1.5. Metodologia.....	7
1.6. Organização da Monografia.....	7
2. CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES.....	9
2.1. Fogo de Dimensionamento.....	9
2.1.1. Abordagem prescritiva.....	12
2.1.2. Abordagem não prescritiva.....	12
2.1.3. Abordagem baseada em performance.....	13
2.2. Comportamento da fumaça.....	16
2.3. Limites sustentáveis.....	17
3. ANÁLISE DE RISCO.....	19
3.1. Visão sistêmica de segurança de incêndio.....	19
3.2. Cenário de perigo.....	19
3.2.1. Prevenção e proteção.....	21
3.2.2. Árvore de falha.....	22
3.2.3. Árvore de eventos.....	23
3.3. Sistema de segurança.....	25
3.4. Aceitabilidade dos riscos.....	26
3.4.1. Matriz de risco.....	27
4. SISTEMAS DE SEGURANÇA.....	28



4.1. Segurança estrutural .....	28
4.1.1. Definição .....	28
4.1.2. Critério de dimensionamento.....	28
4.1.3. Comportamento do Concreto sob Fogo.....	33
4.1.4. Demais diretrizes propostas pela PIARC .....	35
4.2. Segurança operacional.....	37
4.2.1. Definição .....	37
4.2.2. Reação ao fogo .....	37
4.2.3. Sistema de ventilação .....	37
4.2.4. Sistema de detecção.....	39
5. NORMATIVO.....	44
5.1. Análise de riscos.....	44
5.2. Plano de gerenciamento.....	44
5.3. Sistema de segurança.....	45
5.3.1. Sinalização.....	45
5.3.2. Sistema de ventilação .....	45
5.3.3. Sistema de hidrantes .....	46
5.3.4. Extintores.....	46
5.3.5. Saídas e passagens de emergência.....	46
5.3.6. Suprimento de energia elétrica .....	47
5.3.7. Iluminação operacional e de emergência.....	48
5.3.8. Sistemas eletrônicos .....	48
5.3.9. Sistema de coleta de líquidos .....	49
5.4. Materiais submetidos a temperatura .....	52
5.5. Geometria do túnel .....	54
5.6. Ensaio e simulações .....	54
6. DIRETRIZES RECOMENDADAS .....	55

6.1. Informações do túnel .....	55
6.1.1. Tráfego.....	55
6.1.2. Geometria do túnel .....	55
6.1.3. Locação do túnel.....	55
6.2. Escolha do fogo de dimensionamento .....	55
6.3. Objetivos de design .....	56
6.4. Dimensionamento.....	57
6.4.1. Resposta ao incêndio .....	57
6.4.2. Controle de fumaça.....	57
6.4.3. Controle de chamas .....	58
6.4.4. Evacuação.....	58
6.4.5. Controle de tráfego .....	58
6.4.6. Proteção de ativos.....	59
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	61
Referências .....	62

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela</b>	<b>Página</b>
Tabela 1 - Valores máximos de HRR em diferentes países (PIARC adaptado , 2017).	10
Tabela 2 - Valores de pico HRR para diferentes veículos (PIARC adaptado , 2017)...	11
Tabela 3 - Valores experimentais de duração e pico HRR (PIARC , 2017) .....	12
Tabela 4:Curvas recomendadas para cada sistema (ITA, 2004) .....	30
Tabela 5 - Recomendações de curvas de acordo com a categoria do veículo (ITA, 2004) .....	32
Tabela 6 - Curvas HRR simplificadas de recomendação ABNT NBR 15661 .....	44
Tabela 7 - Recomendações de sistemas ABNT NBR 15661.....	50
Tabela 8 - Recomendações de sistemas ABNT NBR 15661 - continuação a .....	51
Tabela 9 - Recomendações de sistemas ABNT NBR 15661 continuação b .....	52
Tabela 10 - Recomendações de curvas HRR ABNT NBR 15661 .....	56

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Página</b>
Figura 1: Modelo tridimensional do metrô de Tóquio (WATANABE, 2016).....	2
Figura 2: Acesso ao Túnel de Monte Russelin – Autoestrada nacional A16 Suíça (GOOGLE, 2013).....	3
Figura 3: Antes e depois- Central Artery Boston (REDDIT, 2017).....	4
Figura 4: Antes e depois Central Artery (WBUR NEWS, 2018).....	4
Figura 5 - Curva HRR simplificada (PIARC , 2017) .....	11
Figura 6 - Etapas de dimensionamento (PIARC adaptado , 2017).....	14
Figura 7 - Movimento da fumaça em túnel plano e com baixa velocidade de ventilação (PIARC , 2004).....	16
Figura 8 - Comportamento da fumaça de acordo com a velocidade crítica (PIARC , 2004) .....	17
Figura 9 - Evento crucial ( (BEARD e SCOTT, 2011) - adaptado .....	20
Figura 10 - Evento crucial como referência (BEARD e SCOTT, 2011).....	21
Figura 11 - Árvore de falhas (BEARD e SCOTT, 2011) - adaptado .....	22
Figura 12 - Árvore de eventos (BEARD e SCOTT, 2011) - adaptado.....	23
Figura 13 - Sistema de segurança (BEARD e SCOTT, 2011) .....	25
Figura 14 - Matriz de risco (Ministério do Planejamento, 2017) .....	27
Figura 15 - Temperaturas máximas na superfície interna do túnel (PIARC, 1999).....	29
Figura 16 - Curvas-padrão Temperatura-tempo (ITA, 2004).....	29
Figura 17 - Comparativo entre curvas-padrão e experimentais (ITA, 2004) .....	30
Figura 18 - Detector óptico de fumaça (MACIOCIA e ROGNER, 2011).....	40
Figura 19 - Detector de feixe (MACIOCIA e ROGNER, 2011).....	41

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>		<b>Significado</b>
CCE	<i>Constitutive crucial event</i>	
ETA	<i>Event-tree analysis</i>	
FTA	<i>Fault-tree analysis</i>	
HCinc	<i>Hydrocarbon increased</i>	
HRR	<i>Heat Release Rate</i>	
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>	
ITA	<i>International Tunneling and Underground Space Association</i>	
FCE	<i>Fundamental Crucial Event</i>	
kg	quilograma	
l	litro	
m	metro	
m <sup>2</sup>	metro quadrado	
m <sup>3</sup>	metro cúbico	
MW	megawatt	
NATM	<i>New Austrian Tunnel Method</i>	
kPa	quilopascal	
PIARC	<i>World Road Association</i>	
RWS	<i>Rijkswaterstaat</i>	
TRRF	Tempo requerido de resistência ao fogo	
ZTV	<i>Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen</i>	

# **1. INTRODUÇÃO**

A utilização de espaços subterrâneos data desde a pré-história com estruturas já presentes na natureza como cavernas e cavidades. Entretanto, a disposição túneis, ou seja, perfuração linear com acessos nos dois extremos, com a finalidade de transporte foi utilizada muito tempo depois. O registro mais antigo de túnel é de, aproximadamente, quatro mil anos atrás – que ligava um palácio a um templo na Babilônia (ASSIS, 2017).

Com o desenvolvimento da civilização – proveniente do comércio, seguido pela industrialização, entre outros eventos – aumentou-se significativamente a urbanização, e com esse evento surgiram várias razões para a utilização do espaço subterrâneo ser mais difundida. Para túneis rodoviários e ferroviários as principais razões são: instalação referente ao uso do espaço urbano, preservação ambiental, motivos topográficos e benefícios sociais.

## **1.1. Motivação**

A tendência de urbanização cresce em ritmo acelerado, causando o problema de uso de espaço principalmente nas grandes cidades, busca-se então uma alternativa para a alocação das atividades urbanas.

Dentre as atividades que melhor podem ser transferidas para o espaço subterrâneo, o transporte se mostra uma boa alternativa devido ao tempo de permanência dos usuários no trânsito ser pequeno em relação à suas residências, escolas e/ou ambientes de trabalho. Há também o fato de que vias e estacionamentos exigem grande espaço dentro da área urbana e, por isso, trariam benefícios ao espaço se for transferido para um ambiente subterrâneo. Uma das metrópoles que adotou a utilização do espaço subterrâneo como transporte foi Tóquio, em que o túnel se estende independente dos obstáculos da superfície (Figura 1).

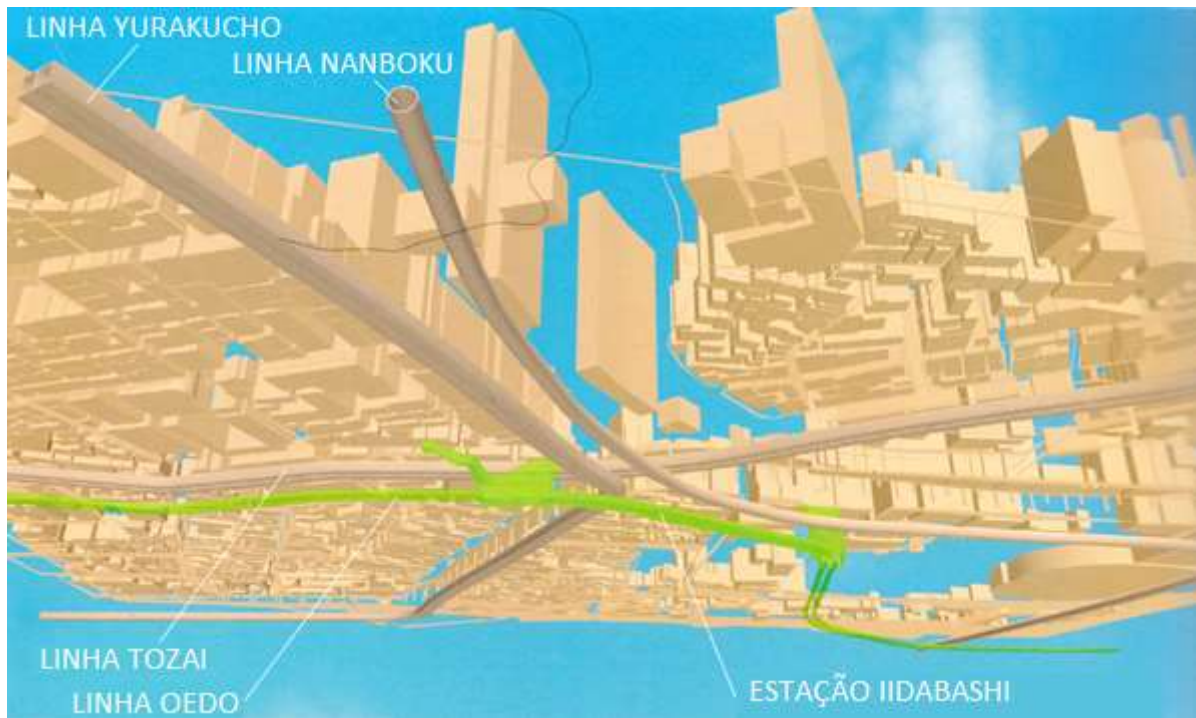


Figura 1: Modelo tridimensional do metrô de Tóquio (WATANABE, 2016)

No entanto, deve-se compreender que existem vários motivos pelos quais é selecionado a utilização de túneis em detrimento de outras modalidades de traçado rodoviários. A seguir, será explanado alguns dos motivos que auxiliam nessa escolha, sendo alguns deles topográficos, sociais, urbanos e ambientais.

Em alguns casos, a escolha de geometria de uma rodovia ou ferrovia se apresenta mais viável adentrar no terreno do que passar pela superfície. Estes casos são motivados por uma característica topográfica. Sabe-se que a geometria de uma rodovia apresenta algumas restrições: valores máximos de inclinação, valores mínimos de raio de curvatura, condições de visibilidade para os usuários, etc. A geometria de ferrovias é ainda mais rígida. Assim, perfurar uma topografia irregular pode promover economia ao projeto, melhorar a segurança do usuário e até reduzir tempo de viagem. A Figura 2 mostra o acesso de um túnel suíço que passa por baixo da superestrutura da metrópole.



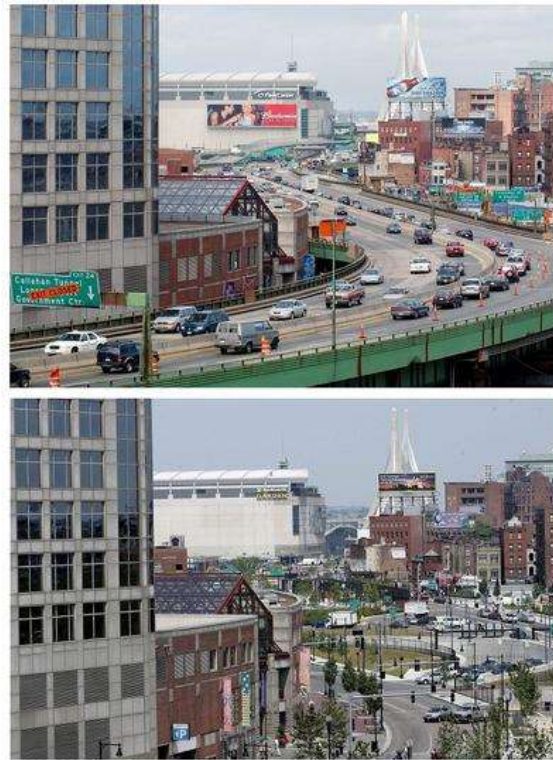
Figura 2: Acesso ao Túnel de Monte Russelin – Autoestrada nacional A16 Suíça (GOOGLE, 2013)

A escolha do uso de túneis por razões sociais costuma envolver questões de paisagismo e urbanismo. Um exemplo desse tipo de decisão é o empreendimento é a Central Artery em Boston (figuras 3 e 4). Chamada popularmente de *Big Dig*, a obra substituiu elevados por túneis e revitalizou a superfície com o espaço arborizado Rose Kennedy Greenway, além de outras estruturas. Um dos objetivos da obra era melhorar a paisagem da região e fornecer um espaço de lazer aos moradores. A Figura 3 e Figura 4 mostram a avenida em momentos antes e depois do empreendimento.





*Figura 3: Antes e depois- Central Artery Boston (REDDIT, 2017)*



*Figura 4: Antes e depois Central Artery (WBUR NEWS, 2018)*

Outras razões podem motivar a escolha de túneis são fatores urbanos, ou seja, a passagem de vias, e a separação de atividades de transporte conflitantes ou fornecer conexões fáceis entre elas (SOUZA, 2012). É a possibilidade de integrar regiões devido a uma necessidade.

Mais um ponto discutido são questões ambientais que envolvem a preservação de ecossistemas, isolamento térmico, acústico ou sísmico (ASSIS, 2017), sendo estes fatores que levam a tomada de decisão.

Em síntese, a seleção de uma obra subterrânea é a solução para problemas específicos, que em função da sua complexidade, normalmente é adotada como última alternativa, devido a seu alto custo de implementação. Pode-se considerar, assim, que a utilização do espaço subterrâneo resulta da falta de espaço na superfície (STERLING e GODARD, 2001).

## 1.2. Classificação dos túneis

Túneis podem ser especificados de diversas formas: quanto seu uso, método de execução e geometria da seção transversal, por exemplo. Entretanto, tipologia da estrutura de contenção e revestimento, bem como a geometria da seção são funções do método de execução escolhido. Os métodos principais são: vala recoberta (*cut and cover*), tubo submerso, tubo perfurado e Novo Método Austríaco (*New Austrian Tunnel Method - NATM*).

- i. Vala recoberta: também chamado de “falso túnel” o túnel é executado através da escavação de uma trincheira no maciço. É então implementada a estrutura de contenção do túnel e, após isso, o solo acima é recolocado. O perfil transversal usual desse tipo de execução é o retangular e seu revestimento é constituído por concreto armado.
- ii. Tubo submerso: o túnel é fabricado em vários segmentos de concreto pré-moldado e são normalmente montados em uma trincheira escavada no leito de rios ou no assoalho oceânico. De forma usual possuem a seção retangular.
- iii. Tubo perfurado: perfuração de rochas ou outro estrato e revestido com seções pré-fabricadas de concreto ou de aço. Costumam ter seção circular ou ovalada.
- iv. New Austrian Tunnel Method: também perfurado, mas o revestimento é formado por concreto projetado (cimento mais agregado graúdo) e executado após cada segmento de perfuração. Costuma ter perfil de ferradura.

(CARVEL e BOTH, 2011)

Um túnel pode ser construído para atender diversas necessidades, algumas delas são: transporte ferroviário e rodoviário, dutos condutores de materiais fluidos e mineração. Este trabalho tratará a respeito de segurança em túneis rodoviários construídos de acordo com diferentes os diferentes métodos descritos acima.

## 1.3. Problemática

Nos últimos anos, a construção de túneis tem suscitado grande interesse em todo o mundo, uma vez que são uma ótima opção para uma maior facilidade no sistema de transportes rodoviário, ferroviário e, mais recentemente metropolitano através do encurtamento de

distâncias (SILVEIRA, 1974). Entretanto, a maior utilização desse tipo de estrutura proporciona uma elevação na probabilidade de ocorrência de acidentes em local subterrâneo e, segundo o relatório da PIARC (1999), incêndios necessitam de maior atenção devido a sua frequência não ser baixa e suas consequências são bem mais graves em ambientes confinados do que na superfície se medidas apropriadas não forem tomadas.

Incêndios resultam de uma reação fortemente exotérmica, com libertação de calor e consumo de oxigênio (processo designado de combustão). Consequência do contato entre um corpo combustível, o oxigênio e uma fonte de calor (Cuoghi e Figueiredo, 2007), a reação desencadeia quando há calor suficiente no sistema para ativá-la.

Ainda segundo PIARC (1999), incêndios causam diferentes ameaças a pessoas, estruturas, equipamentos e veículos. São elas: altas temperaturas, radiação de calor, baixa concentração de oxigênio, baixa visibilidade e liberação de vários gases tóxicos e/ou corrosivos.

A fim de reduzir riscos em caso de acidentes em túneis são realizadas ações que podem ser definidas como passivas e ativas. A primeira corresponde a medidas preventivas como a sinalização, proporcionar uma ampla zona de iluminação e a preocupação com os revestimentos de paredes. Já as ativas são medidas para em casos onde é necessário entrar com um plano de contenção do acidente, no qual os principais instrumentos são: detectores automáticos de incêndios, sensores de gases tóxicos, iluminação de emergência, alarmes, telefones de emergência; cabos resistentes ao fogo; saídas de emergência; hidrantes e extintores de incêndio. (IP, 2007)

#### **1.4. Objetivos**

Os objetivos deste trabalho é coletar e reunir relevantes informações a respeito de segurança estrutural e operacional de túneis quando submetidos a incêndio. A partir dessas informações, avaliar as condições de segurança de túneis brasileiros e, por fim, elaborar uma diretriz de infraestrutura e operação para que tais empreendimentos possam ser mais seguros com relação a este tipo de incidente.

## **1.5. Metodologia**

Para o desenvolvimento deste trabalho será realizada uma metodologia de pesquisa bibliográfica de fontes como artigos técnicos, livros, relatórios de congresso, sítios na internet. Para cada capítulo foram selecionadas informações consideradas mais importantes a respeito dos temas correspondentes.

De forma complementar, realizou-se uma avaliação das práticas adotadas no Brasil e no Mundo e elaborou-se a proposição uma diretriz de execução e operação de túneis com relação à segurança contra incêndios a ser aplicada nos túneis brasileiros.

Essa diretriz busca determinar procedimentos a fim de reduzir os riscos gerados pela ameaça de incêndio e funciona como um guia para dimensionamento das estruturas e sistemas de combate e mitigação do incêndio.

## **1.6. Organização da Monografia**

O trabalho foi dividido em sete principais capítulos. Os cinco primeiros consistem na revisão bibliográfica, no qual abordou-se aspectos conceituais da segurança de incêndio em túneis ferroviários. No segundo, foram tratadas as principais diretrizes nacionais e internacionais relacionadas a proteção e prevenção de incêndios.

No capítulo 1 é introduzido o tema, abordando os conceitos básicos que serão fundamentais para o entendimento do trabalho como o problema que é a ocorrência de incêndio e como foi elaborado este trabalho.

Considerações preliminares é o tema do capítulo 2. São as informações relevantes para se entender o comportamento do incêndio e dos usuários em situação de emergência.

Na análise de risco (capítulo 3) são propostos modelos de gestão de risco, estimação do cenário de emergência e aceitabilidade do dimensionamento.

No capítulo 4 são discutidos os sistemas de segurança operacional e estrutural, onde apresenta-se os sistemas de segurança aplicados na proteção e prevenção de incêndio.

No capítulo 5 apresenta-se um resumo da norma que regula a segurança de incêndio aplicadas a túneis, a ABNT NBR 15661:2012 – Proteção contra incêndio em túneis.

No capítulo 6 são determinadas as diretrizes em si, divididas entre os sistemas principais de segurança.

O capítulo 7 propõe estudos futuros que podem contribuir muito para o tema e para o desenvolvimento das futuras políticas de segurança.

## 2. CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

### 2.1. Fogo de Dimensionamento

Dado que o incêndio é um fenômeno dinâmico, é conveniente que se observe a mudança de suas características ao longo do tempo. Assim, é possível traçar os objetivos e procedimentos para as situações de emergência deste tipo. (PIARC , 2017)

Durante a etapa de estudo de viabilidade e de projeto, é necessário determinar o nível de risco ao qual o empreendimento está submetido. Uma boa estimativa de como o incêndio se desenvolverá possibilita o dimensionamento dos sistemas, equipamentos e equipes. Esta estimativa é denominada de fogo de dimensionamento (*design fire*) e possui três características principais que, de acordo com os objetos em análise.

Utiliza-se uma curva denominada taxa de liberação de calor (HRR), que relaciona a variação da potência instantânea do fogo (em *megawatts*) em função do tempo, para o dimensionamento do sistema de ventilação, de detecção, dos planos de supressão e resposta a emergências. Esta taxa é utilizada pois a potência do incêndio é um parâmetro fortemente ligado à produção de radiação, fumaça e gases tóxicos, os principais impactos nos seres vivos. O pico desta curva é o parâmetro principal para determinar a capacidade de ventilação. (PIARC , 2017)

Para o dimensionamento estrutural e classificação dos equipamentos técnicos de proteção de incêndio, são usadas as curvas temperatura versus tempo no lugar da HRR, já que o principal impacto nas estruturas é oriundo da temperatura.

Os valores de pico utilizados, principal input para o sistema de ventilação, variam de acordo com a regulação de cada país. A tabela 1 abaixo exemplifica alguns valores adotados em diferentes países. (PIARC , 2017)

Tabela 1 - Valores máximos de HRR em diferentes países (PIARC adaptado , 2017)

PAÍS	Design de dimensionamento (MW)	Observações
Austrália	50	Com sistema fixo de combate a incêndio (SFCI), para ventilação única.
Áustria	30	Alto risco de categoria: 50 MW
França	30 - 200	200 MW (quando transporte de cargas perigosas é permitido)
Alemanha	30 -100	Ventilação Longitudinal
Grécia	100	
Itália	20 – 200	
Japão	30	
Países Baixos	100 – 200	100 MW (se caminhões-tanque não são permitidos, se sim 200 MW)
Noruega	20 - 100	Depende da classe do risco, sempre ventilação longitudinal
Portugal	10 - 100	Baseado no tipo de tráfego
Rússia	50 - 100	
Singapura	30 - 200	Depende do tipo de veículo permitido
Espanha	> ou= 30	
Suécia	100	Ventilação longitudinal
Suíça	30	A extração de fumaça é igual a 3,3-4 m/s vezes a sessão transversal
Reino Unido	30 – 100	
Estados Unidos	30 – 300	300 MW se cargas perigosas forem permitidas

Com o objetivo de padronizar as curvas supracitadas para cada tipo de veículo, foram coletados dados de diversos experimentos e situações reais. A tabela 2 abaixo enumera valores máximos de

Tabela 2 - Valores de pico HRR para diferentes veículos (PIARC adaptado, 2017)

Tipo de veículo	Pico HRR (MW)
Carro de passeio	5 – 10
Veículo de serviço leve	15
Ônibus	20
HGV até 25 toneladas	30 – 50
HGV até 50 toneladas	70 – 150
Tanques de combustível	200 – 300

As diferenças observadas se dão pela diferença nas condições em que foram realizados os ensaios, como por exemplo as condições de contorno (geometria do túnel) variar entre os experimentos. Mais uma evidência de que a geometria do túnel é determinante para o comportamento das chamas e fumaça que se desenvolvem em seu interior.

A figura 5 indica uma curva HRR simplificada, com o fim de definir a duração das diferentes etapas do incêndio. Durações essas que foram observadas em experimentos diversos e compiladas na tabela 3, conjuntamente com os valores de pico HRR (taxa de liberação de calor).

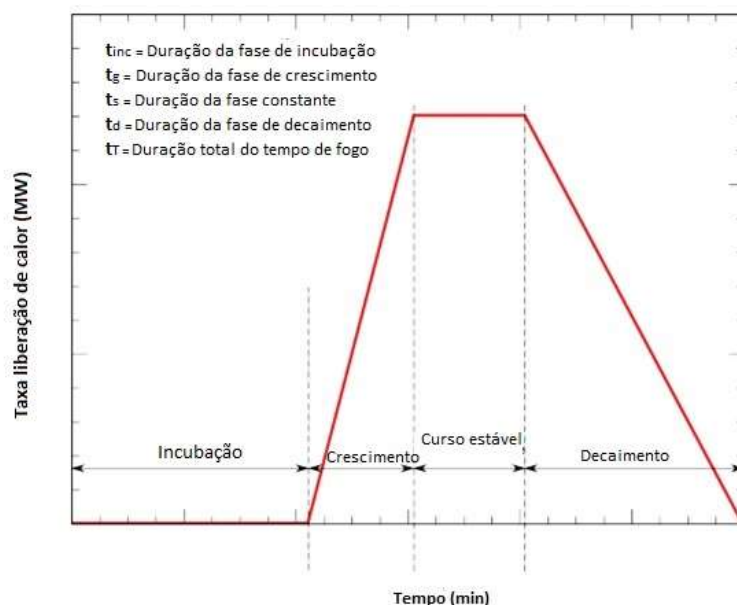


Figura 5 - Curva HRR simplificada (PIARC, 2017)



Tabela 3 - Valores experimentais de duração e pico HRR (PIARC, 2017)

		T(inc) min	Tg min	Ts min	Td min	Tt min	Pico HRR (MW)
Ingasson et al.	Veículos	5	7	36	15	64	1.5 – 8
“	Caçamba de madeira	4	9	62	2	77	9,5 – 27
Eureka ”	Heptano	0	46	35	17	98	12 – 13
“	Onibus/Vans	3	5	48	41	97	6.1 – 28
Benelux	Vans	5	4	12	9	30	16 – 26
Eureka	HGV	8	4	30	15	57	130 – 320
Runehamar	HGV	3	7	30	13	53	69 – 201

A escolha de um fogo de dimensionamento para o projeto definirá todos os sistemas e equipamentos envolvidos na segurança contra incêndio. Segundo PIARC (2017), pode ser feita de três formas principais: abordagem prescritiva, não prescritiva e baseada em performance.

### 2.1.1. Abordagem prescritiva

Esta abordagem envolve a utilização de um fogo de dimensionamento oriundo de alguma padronização ou código. A regulamentação local impõe o nível de risco aceitável para todos os túneis de seu território e, portanto, não há decisão do projetista nesta escolha.

Como foi demonstrado na tabela 1, alguns valores de pico de HRR podem ser um valor fixo ou um intervalo de valores.

Tendo em vista que o cenário do incêndio se desenvolve de formas diferentes em túneis diversos, esta abordagem pode não se encaixar bem nas propostas de sistemas otimizados para circunstâncias específicas.

### 2.1.2. Abordagem não prescritiva

Para este tipo de abordagem, o fogo de dimensionamento é submetido a ajustes de acordo com o nível de aceitação de risco do projeto. É tomado como base um fogo de dimensionamento e, posteriormente, é alterado seu valor de pico ou a duração de suas fases de acordo com as características do sistema de segurança envolvido.

Vale lembrar que aumentar o valor de pico da curva HRR significa diminuir a tolerância do sistema contra o incêndio, tornando-o mais robusto e, na maioria das vezes, mais oneroso.

Alguns fatores que podem ser considerados nesta abordagem são:

- I. Relação de frequência entre incêndios de diferentes magnitudes – incêndios de maiores magnitudes são mais raros de ocorrer do que incêndios menores. A frequência pode ser suficientemente baixa para que seja um risco tolerado pelo sistema, não sendo necessário que o fogo de dimensionamento contemple esse valor de pico de HRR, por exemplo;
- II. A influência da ventilação – a capacidade que o sistema de ventilação tem de minimizar os efeitos do incêndio podem servir para aumentar a tolerância do sistema.
- III. Mitigação: com as possibilidades de mitigação dos grandes incêndios pode ser possível a redução de risco através de medidas operacionais como escolha de cargas perigosas, ou sistemas adicionais como sistema de rápida detecção ou sistema fixo de supressão de chamas.

### **2.1.3. Abordagem baseada em performance**

Na abordagem baseada em performance, o fogo de dimensionamento é desenvolvido especificamente para encontrar um nível aceitável de risco através de um processo de iteração, em que após o dimensionamento e a fase de aceitação dos riscos, com as novas informações de prevenção e proteção, retorna-se ao HRR e aplicam-se alterações de modo a contemplar o novo cenário. Este processo se repete até que o dimensionamento atinja todos os objetivos de segurança do projetista.

Esta abordagem consiste em sete etapas como pode ser visto na figura 6.

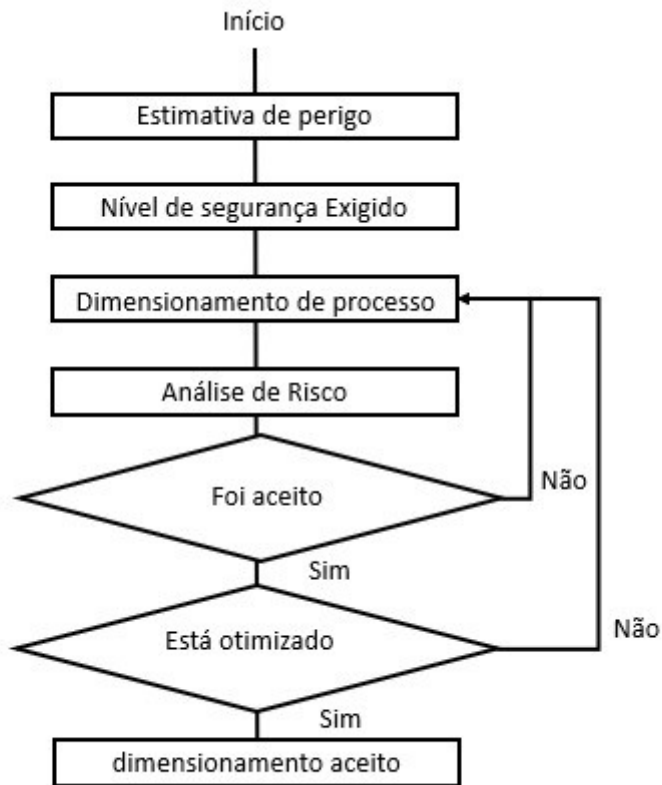


Figura 6 - Etapas de dimensionamento (PIARC adaptado , 2017)

Etapa 1 – Estimacão dos perigos: nesta etapa, devem ser levantadas todas as informaes do empreendimento que possuem relevância para o dimensionamento do sistema de segurança. Normalmente nesta etapa constam informaes fixas e constantes no dimensionamento.

As principais são as informaes de tráfego (frequência de congestionamentos, direo única ou bidirecional, densidade de tráfego, tipo de veículos e cargas e densidade de tráfego), geometria do túnel (seo transversal, altura do teto, declividade, comprimento e intersees), localizao do túnel (rural ou urbana, clima e altitude) e fogo de dimensionamento (curva HRR, pico de HRR e curva temperatura-tempo).

Em contrapartida, as características do fogo de dimensionamento podem ser alteradas após determinadas as características do sistema de segurança, assim como a abordagem não prescritiva descrita no item anterior.

Etapa 2 – Objetivos de dimensionamento: nesta etapa são determinados os objetivos de desempenho e requisitos dos sistemas operacionais. Os objetivos devem estar em conformidade com a legislação local e as normas vigentes e os requisitos operacionais são pautados no tempo e custo de reparos dos impactos gerados por incêndio. Podem se dividir em três categorias: evacuação e segurança do usuário; combate ao incêndio propriamente dito, e proteção dos ativos (estrutura do túnel e vizinhas, meio-ambiente, equipamentos, entre outros).

Etapa 3 – Dimensionamento do sistema de segurança: nesta etapa são selecionados os materiais, equipamentos e procedimentos de resposta ao incêndio, controle de chamas e fumaça, evacuação, gerenciamento de tráfego e proteção dos ativos.

Etapa 4 – Análise de riscos: nesta etapa são efetuadas as avaliações do projeto dimensionado na etapa anterior a fim de fornecer informações que possibilitam as tomadas de decisão. Para o caso de o projeto não atender ao pior cenário previsto, deve ser avaliado o risco residual gerado por essa diferença.

Etapa 5 – Aceitabilidade: nesta etapa são verificados se o nível de segurança avaliado na etapa 4 atendem aos objetivos da etapa 2. No caso de rejeição, retorna-se à etapa 3 de dimensionamento e são elaboradas melhorias. Entretanto, no caso desta abordagem de escolha de fogo de dimensionamento, retorna-se à etapa 1 para reanalisar o fogo de dimensionamento.

Etapa 6 – Otimização: não é obrigatória, mas pode ser utilizada para fins econômicos, onde é avaliado se o sistema atinge os níveis de segurança da forma mais econômica possível. Para o caso de rejeição, assim como na etapa 5, volta-se às etapas 1 e 3 de dimensionamento e redefinidos os parâmetros de segurança.

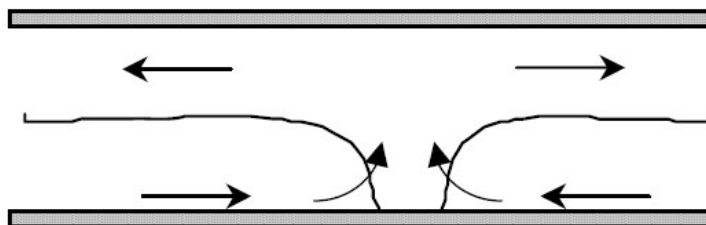
Estas etapas foram descritas a fim de mostrar como esta abordagem pode funcionar no dimensionamento do sistema de segurança. Entretanto, este método pode ser aplicado a qualquer uma das três abordagens.

## 2.2. Comportamento da fumaça

A fumaça gerada em incêndio é proveniente da reação química exotérmica de combustão. A massa de fumaça gerada pode ser obtida através da análise estequiométrica da relação tomando o combustível e o oxigênio presente na atmosfera como reagentes.

A movimentação da fumaça ao longo da seção transversal, desconsiderando influência de sistemas de ventilação, funciona da seguinte forma: devido à diferença de temperatura e o efeito de convecção, a fumaça produzida na base das chamas é elevada até o teto do túnel. O teto redireciona a fumaça para as paredes que, ao trocar calor com a fumaça, a esfria e descende de encontro ao pavimento e provocando um duplo vórtice no meio do túnel. (PIARC, 1999)

A movimentação longitudinal da fumaça sem a influência da ventilação longitudinal e declividade do túnel está ilustrada na figura 7. Em um túnel sem desnível e sem fluxo longitudinal de ar, a fumaça apresenta um comportamento estratificado (formação de duas camadas bem definidas, a camada superior de fumaça e a inferior de ar livre de fumaça). Tal cenário é improvável em um túnel real.



*Figura 7 - Movimento da fumaça em túnel plano e com baixa velocidade de ventilação (PIARC, 2004)*

A figura 8 apresenta o comportamento da fumaça em relação a um referencial de velocidade de fluxo de ar dentro do túnel, chamado de velocidade crítica.

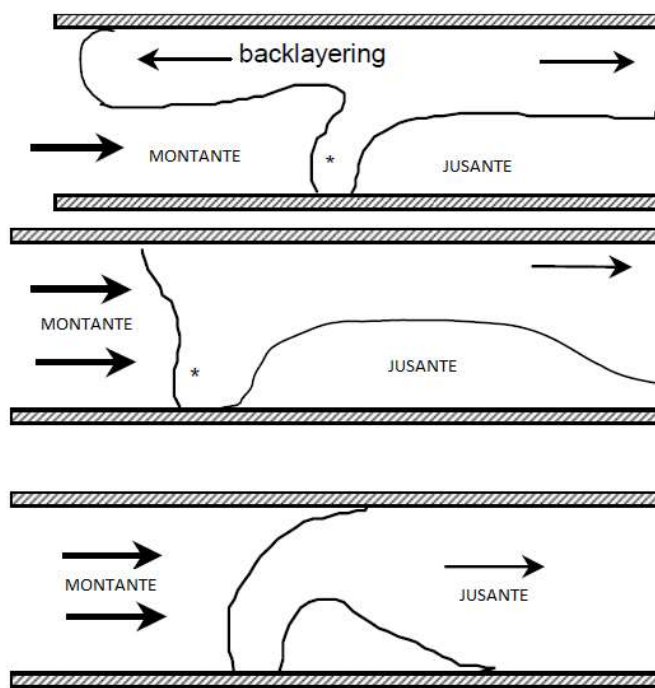


Figura 8 - Comportamento da fumaça de acordo com a velocidade crítica (PIARC, 2004)

A primeira situação descreve o movimento da fumaça em que a velocidade da ventilação está abaixo da velocidade crítica, permitindo assim o fenômeno *backlayering*, fluxo de fumaça na direção contrária à ventilação. Há estratificação da fumaça e a velocidade de propagação é lenta.

O segundo cenário descreve a velocidade longitudinal igual a velocidade crítica. Pode-se observar a formação de uma zona livre de fumaça próxima ao chão.

A última situação ilustra o comportamento da fumaça sob influência de velocidade acima da crítica.

### 2.3. Limites sustentáveis

O relatório PIARC (1999) estabelece recomendações de mínimos que possibilitam a evacuação e o combate ao incêndio. São eles: nível tolerável de radiação de dois a dois e meio quilowatts por metro quadrado para usuários e cinco para bombeiros.

A temperatura máxima tolerável do ar é de 80 °C e pode ser tolerada por quinze minutos.

A distância de visibilidade mínima recomendada é de sete metros para caminhar devagar em uma atmosfera enfumaçada e quinze metros para que seja possível a leitura da sinalização.

O nível de toxicidade aceitável da atmosfera não foi apresentado no relatório, mas foi assumido que obedecendo os critérios de visibilidade, os critérios de toxicidade serão contemplados também. (PIARC, 1999)

### **3. ANÁLISE DE RISCO**

#### **3.1. Visão sistêmica de segurança de incêndio**

O conceito de sistema é definido como qualquer entidade física ou conceitual na qual consiste de partes interdependentes. Desta forma, não se pode considerar fatores de forma isolada, desprezando por exemplo a interação de diferentes materiais influenciando no potencial calorífico ou a integração entre infraestrutura e operação do túnel (BEARD e SCOTT, 2011). Por este motivo, pode-se afirmar, por exemplo, essas três premissas:

- I. Não observar partes do sistema isoladamente;
- II. Risco depende de como o sistema está montado e como opera;
- III. Como o sistema está montado e opera depende de tomadas de decisão.

O sistema analisado neste trabalho será o sistema de segurança contra incêndio dentro de túneis rodoviários. Antes de definirmos tal sistema, será discutido o sistema que caracteriza o fenômeno do incêndio em si, o sistema de desenvolvimento de incêndio dentro do túnel.

A abordagem sistêmica do evento considerado incêndio consiste no reconhecimento da interdependência das partes que compõem o sistema de segurança. Planos de resposta emergenciais como rotas de fuga e combate às chamas dependem de como a trajetória da fumaça se desenvolverá, que é controlada pelo sistema de ventilação, que é influenciado por outros sistemas. Podem ocorrer também relações recíprocas de influência entre os sistemas.

#### **3.2. Cenário de perigo**

A elaboração do cenário de perigo, ou sistema de perigo, é crucial para a etapa do dimensionamento. Neste sistema, ficam contempladas todas as situações de emergência que podem ocorrer, seus riscos podem ser calculados e avaliados quanto a sua aceitabilidade.

Inicialmente deve-se esclarecer o uso dos termos ‘risco’ e ‘perigo’, que usualmente são utilizados para significar a mesma coisa. Perigo denota potencial de prejuízo enquanto



risco está ligado a associação de um prejuízo com sua probabilidade de ocorrência. Desta forma analisamos os mecanismos de falha como um sistema de perigo, observando as diversas situações de falha que possuem potencial de gerar prejuízo do ponto de vista dos *stakeholders*.

Sistema de perigo é todo conjunto de fatores (eventos ou condições) ordenados que estabelecem uma relação de causa e consequência entre si, e contém um potencial evento crucial (BEARD e SCOTT, 2011). Desta maneira, um evento que precede outro nesta cadeia pode ser classificado como causa do evento posterior, bem como um outro dado evento é uma consequência do anterior.

Evento crucial é aquele que tem o potencial de gerar prejuízo de alguma natureza aos interesses dos envolvidos, estabelecendo ligação ao risco no qual o sistema de perigo faz menção.

A figura 9 ilustra uma fração de um sistema que contém um evento crucial e sua relação com os demais fatores. Pode-se observar a relação entre a posição do evento e a etimologia de seu termo significante, uma vez que crucial deriva do termo cruz e que o evento estabelece uma relação de cruz com os fatores que o geram (causas) e suas consequências, ocupando a posição central.

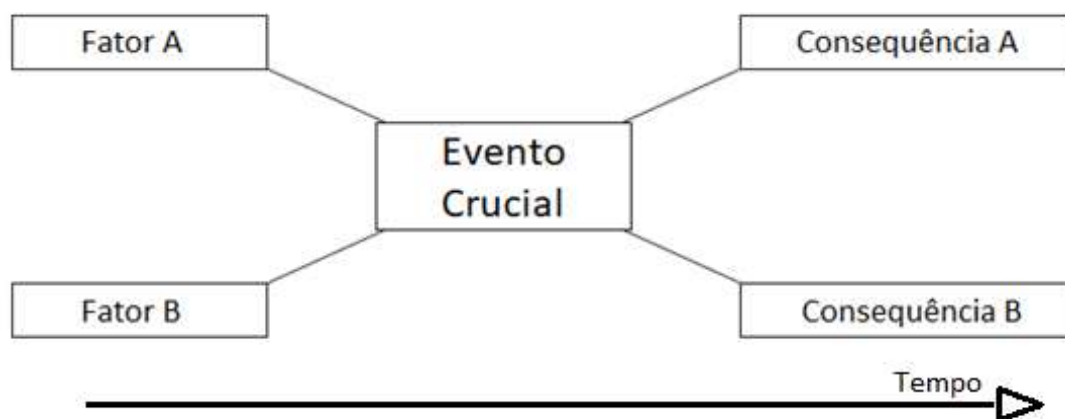


Figura 9 - Evento crucial ( BEARD e SCOTT, 2011) - adaptado

Os fatores A e B da figura simbolizam eventos que, quando ocorrem simultaneamente, causam o evento crucial. Já no lado direito, tem-se os possíveis cenários posteriores ao

evento de referência, que podem ser agrupadas em grandes, médias e pequenas consequências. Elementos que não estabelecem relação de causa ou consequência a um evento crucial não devem ser representados no sistema.

### 3.2.1. Prevenção e proteção

Definido o evento crucial, pode-se estabelecer relações entre os demais fatores do sistema em relação a ele. Elementos do sistema que contribuíram para que o evento crucial aconteça podem ser classificados como causadores. Eventos que são causados pelo evento crucial são classificados como consequência.

Em um sistema de segurança ou sistema de gerenciamento de risco, as tomadas de decisões ou medidas que buscam agir sobre as causas com o objetivo de evitar que o evento crucial aconteça são chamadas de medidas preventivas. Já as medidas que buscam mitigar ou eliminar os impactos do evento crucial são chamadas medidas de proteção.

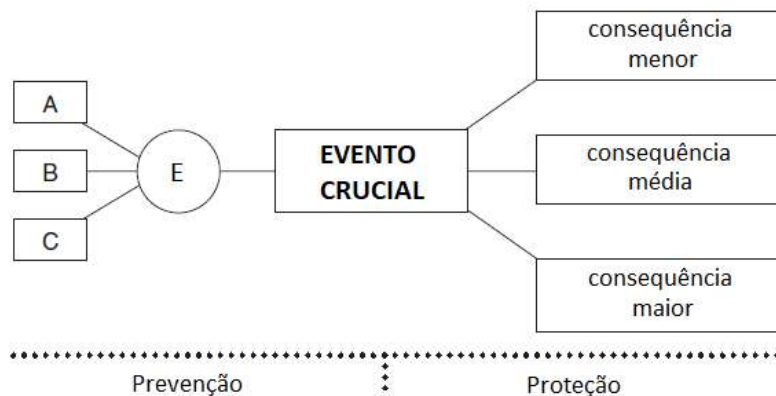


Figura 10 - Evento crucial como referência (BEARD e SCOTT, 2011)

Vale lembrar que em um sistema podem haver mais de um evento crucial. Desta forma, uma medida pode ser de proteção em relação a um evento crucial pode ser de prevenção para um evento crucial mais adiante.

Para que um evento seja considerado crucial é necessário avaliar o contexto em que o sistema está aplicado. Por exemplo, os fatores (condição ou evento) causadores do evento crucial devem ter a possibilidade de ocorrer. Em contrapartida, uma sucessão de eventos pode ter mais de um evento crucial.

Com o objetivo de padronizar todo gerenciamento de segurança de incêndio em túneis rodoviários, define-se um evento crucial fundamental (FCE), no qual a partir dele é possível definir com clareza as medidas preventivas e de proteção a serem aplicadas em todos os túneis. Assim, fica padronizado a classificação das tomadas de decisão entre proteção e prevenção para todos os túneis.

O evento escolhido para ser o FCE é: a existência de fogo dentro do túnel. Portanto, para este estudo, consideramos que qualquer medida que buscam reduzir a probabilidade de ocorrer incêndio dentro do túnel como medida de prevenção. Qualquer medida que busca diminuir ou eliminar os impactos do FCE será denominada medida de proteção.

Destaca-se que algumas medidas podem ter mais de um efeito sobre o FCE, alguns de caráter protetivo e outros de caráter preventivo.

Todos os eventos cruciais anteriores, ou seja, que funcionam como causa para o FCE, são denominados eventos cruciais constitutivos (CCE). A figura abaixo ilustra a relação entre CCEs e o FCE através de uma árvore de falhas.

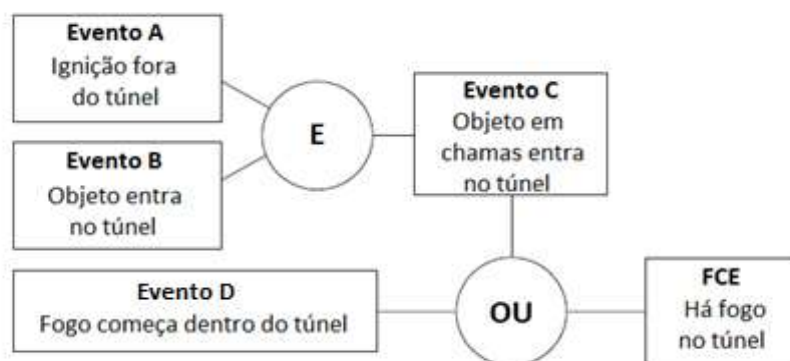


Figura 11 - Árvore de falhas (BEARD e SCOTT, 2011) - adaptado

### 3.2.2. Árvore de falha

A figura 11 exemplifica os dois tipos possíveis de vínculo entre os CCEs. O vínculo E indica que os eventos A e B devem ocorrer simultaneamente para causar o evento C. Já o vínculo OU define que os eventos C e D são independentes entre si para causarem o FCE,

ou seja, é necessário que ocorra apenas algum deles para causar o FCE. Uma análise que utiliza esses vínculos é chamada de árvore de falha.

O método utilizado para a análise da árvore de falha (FTA) é uma técnica dedutiva desenvolvida na indústria nuclear. Contempla o estudo de equipamentos que podem resultar em acidentes (eventos indesejáveis), ou seja, esse estudo auxilia na determinação das causas potenciais de um acidente ocorrer ou de um sistema complexo falhar.

Tal análise consiste em sequenciar eventos que estabelecem uma relação de causa para consequência (da direita para a esquerda), utilizando os vínculos E e OU para determinar a relação entre as causas, se mostrando assim uma boa ferramenta na análise das causas do FCE.

Contempladas todas as diferentes causas aplicáveis ao contexto do FCE, pode-se O conceito de árvore de falha é válido para eventos em geral, não apenas ‘falhas’.

### 3.2.3. Árvore de eventos

Outro procedimento que semelhante que pode ser aplicado para estruturação das causas de um evento crítico é a árvore de eventos (ETA), como exemplificado na figura 12.

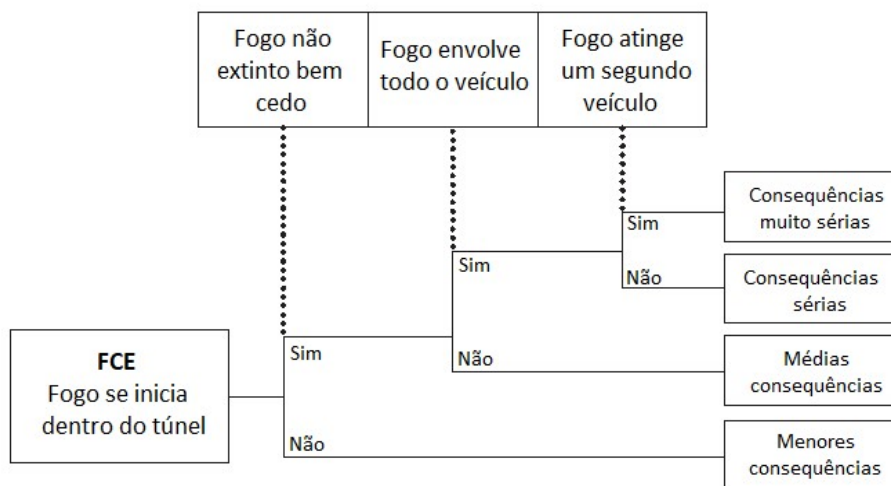


Figura 12 - Árvore de eventos (BEARD e SCOTT, 2011) - adaptado

É um procedimento indutivo que mostra todos os resultados possíveis advindos do FCE, avaliando assim quais impactos decorrentes. Podendo ser entendido como uma metodologia que auxilia o estudo de consequências de um determinado evento, ou seja, auxilia na análise de seus resultados potenciais.

É utilizada para quantificação das frequências de ocorrências de diferentes consequências possíveis de ocorrer a partir dos eventos iniciais considerados como mais significativos. Ou seja, auxilia a determinar a frequência de ocorrências.

Para construção dessa árvore é necessário analisar as consequências de um evento indesejado, descrevendo a sequência temporal dos fatos. Essa árvore deve ser lida da esquerda para a direita, em que a extrema esquerda se inicia com o evento inicial (FCE) e segue com os demais eventos sequenciais. Após cada evento há uma sobreposição de um novo evento ou condição, se o novo evento ocorreu segue-se o caminho SIM, caso não tenha ocorrido, segue-se o caminho NÃO. Cada caminho terminará numa consequência que será resultado das ocorrências ou não das sobreposições. O produtório das probabilidades de o caminho percorrido até chegar em uma consequência é a probabilidade daquela consequência ocorrer.

Existem, entretanto, problemas com a construção de árvores de eventos e árvores de falha para propósitos de segurança de incêndio. Em particular, há a dificuldade de representar a mudança dinâmica do fenômeno, por exemplo a evolução em função do tempo. Isso pode ser superado através do uso de modelos estocásticos. Como será discutido posteriormente nas considerações referentes à escolha de fogo de dimensionamento.

Em síntese, há uma árvore de falha antes e uma árvore de eventos depois de um evento crucial. É proposto que seja feita esta análise para o FCE e classificadas as tomadas de decisão do gerenciamento de segurança com base na posição dos fatores que essas medidas interferem, dando características de prevenção e proteção de acordo com o discutido no item 1.2.2.1 deste capítulo.

### 3.3. Sistema de segurança

Construído os possíveis cenários através das ferramentas discutidas nos itens anteriores, pode-se então fazer o planejamento e as tomadas de decisão para prevenção e proteção em situação de emergência.

Sistema de segurança, definido por Clement e Simmons (1998), são práticas analíticas de gerenciamento que exige que os perigos sejam descobertos e seus riscos controlados, com o objetivo de auxiliar na tomada de decisão. A tomada de decisão deve equilibrar os interesses de todos os *stakeholders*, visando a proteção dos recursos (humanos, equipamentos, estruturas, meio-ambiente, produtividade, reputação, etc).

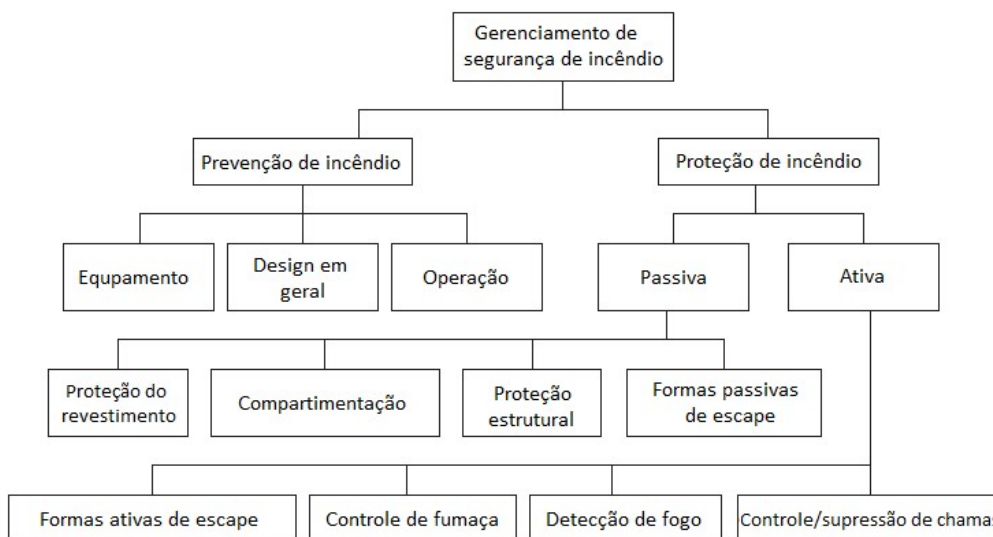


Figura 13 - Sistema de segurança (BEARD e SCOTT, 2011)

Aplicando o conceito de sistema de segurança ao assunto estudado neste trabalho, consideramos falha como um produto do sistema, uma consequência.

### 3.4. Aceitabilidade dos riscos

O conceito de metodologia de gestão de risco, definido em Assis (2018), define uma nova abordagem para a concepção de projetos. Nela são levados em consideração, não só custos de execução, mas possíveis custos potenciais gerados pelo risco.

Esta análise observa o risco de forma quantitativa, transformando-o em valores financeiros seguindo a equação 1.

$$R = P[A] \cdot C$$

Sendo que:

R: é o risco da ameaça em estudo;

A: evento caracterizado como ameaça;

P[A]: probabilidade de ocorrência do evento;

C: consequência do evento.

A ameaça (A) é o evento ou condição que apresenta um potencial de prejuízo de qualquer natureza. A consequência (C) representa um valor financeiro, a soma de todos os custos que a ameaça gera caso ocorra. O risco (R) é a combinação da frequência de ocorrência de uma ameaça determinada e suas consequências e, também, possui a unidade de medida o real, ou qualquer outra corretagem. O alto risco de uma obra significa que o empreendimento pode estar suscetível a altos custos a longo prazo, fator que não costuma ser considerado.

Na etapa de orçamento, pode-se somar o valor do risco com o custo de execução da obra, de forma a obter um custo total que prevê cenários futuros e representa melhor o estado de segurança da obra. Este valor pode ser levado em consideração em processos licitatórios, aprovação de projetos e demais

Na etapa de análise de risco, para avaliar a importância de cada sistema pode-se fazer a avaliação do risco e comparar o custo total antes e depois da implementação do sistema, observando assim se as consequências mitigadas pelo sistema valem a pena serem combatidas.

### 3.4.1. Matriz de risco

Consiste na sobreposição das escalas de probabilidade e consequência de uma dada ameaça a fim de classificá-la com relação a aceitabilidade.

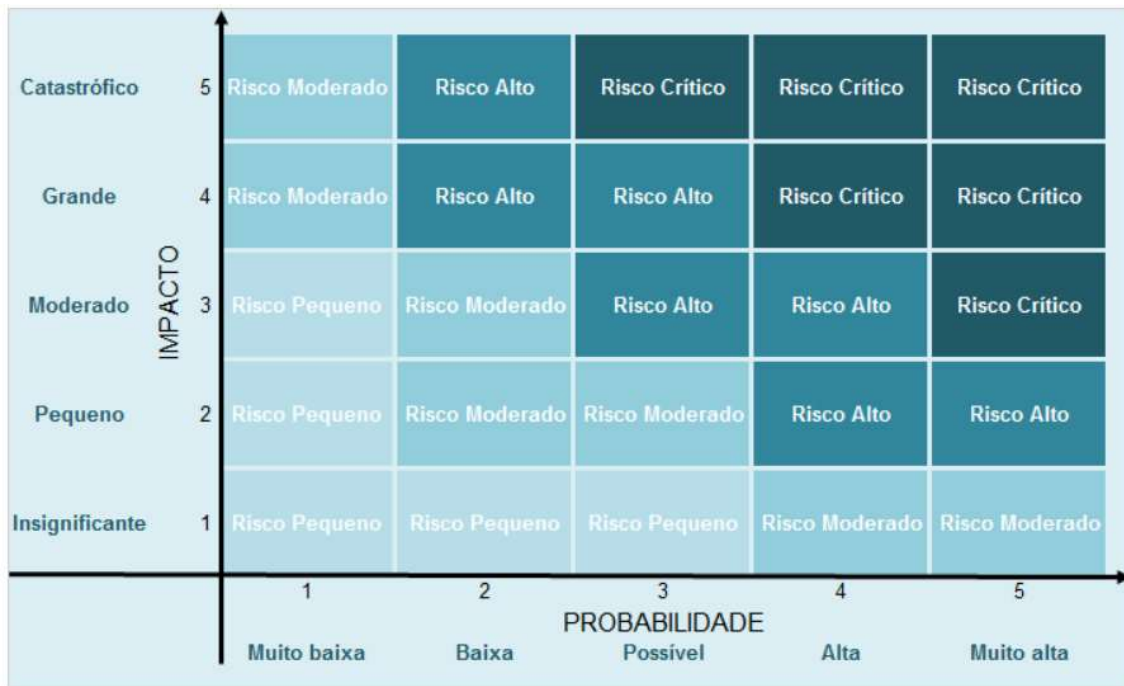


Figura 14 - Matriz de risco (Ministério do Planejamento, 2017)

A matriz representada pela figura 14 consiste em um quadrante em que são representadas ameaças. Suas coordenadas são sua probabilidade e seu impacto ou consequência. No exemplo é utilizada uma matriz 5 por 5, porém pode-se utilizar modelos mais refinados como matrizes maiores ou modelo de gráfico cartesiano se o impacto possui uma medida matemática contínua (como o custo, proposto neste trabalho).

Os eventos de risco pequeno podem ser denominados negligenciáveis na tomada de decisão. O risco moderado pode ser classificado como gerenciável e os eventos que possuem risco crítico e alto podem ser classificados como inaceitáveis.

Para os riscos inaceitáveis devem ser tomadas medidas para reduzir sua probabilidade e seu impacto (prevenção e proteção) para que ele seja posicionado em outra classificação.



## **4. SISTEMAS DE SEGURANÇA**

### **4.1. Segurança estrutural**

#### **4.1.1. Definição**

Segundo ITA (2004), a resistência de uma estrutura a incêndios deve proporcionar que: pessoas dentro do túnel sejam capazes de evacuarem sozinhas ou serem conduzidas a um local seguro, a operação de resgate deve ser possível de ser executada de forma segura e, que sejam tomadas medidas que combatam o extensivo dano à propriedade. Esta última significa que a estrutura não deve colapsar durante um devido tempo ou reduzir o máximo possível prejuízos econômicos. Em túneis submersos, sob alguma superestrutura ou sob terreno instável deve-se dar bastante importância ao colapso da estrutura, pois ele significa problemas de estabilidade global e possíveis prejuízos em grande escala – financeiros ou humanos.

#### **4.1.2. Critério de dimensionamento**

Como mencionado anteriormente, as características do fogo de dimensionamento relevantes são representadas pela curva temperatura *versus* tempo. Alguns padrões são indicados pelo relatório PIARC (1999), outros desenvolvido por colaborações entre várias entidades, como International Standardisation Organisation (ISO) e European Committee for Standardisation (CEN).

A figura 15 ilustra a distribuição de temperatura nas superfícies internas do túnel segundo o relatório PIARC (1999). Nota-se que os valores variam de acordo com o tipo de veículo e aumentam de acordo com a altura do ponto de medição.

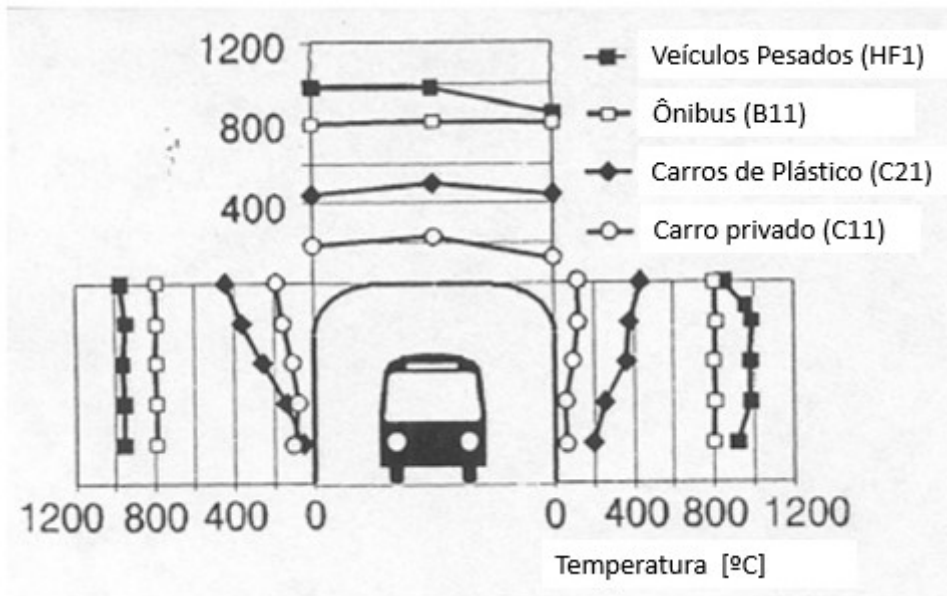


Figura 15 - Temperaturas máximas na superfície interna do túnel (PIARC, 1999)

As contribuições das entidades supracitadas são as curvas temperatura *versus* tempo representadas na figura 16. São padrões de curva desenvolvidas por diferentes códigos e instituições. Tais curvas são consideradas como a situação em que a estrutura será submetida na presença de incêndio no interior do túnel.

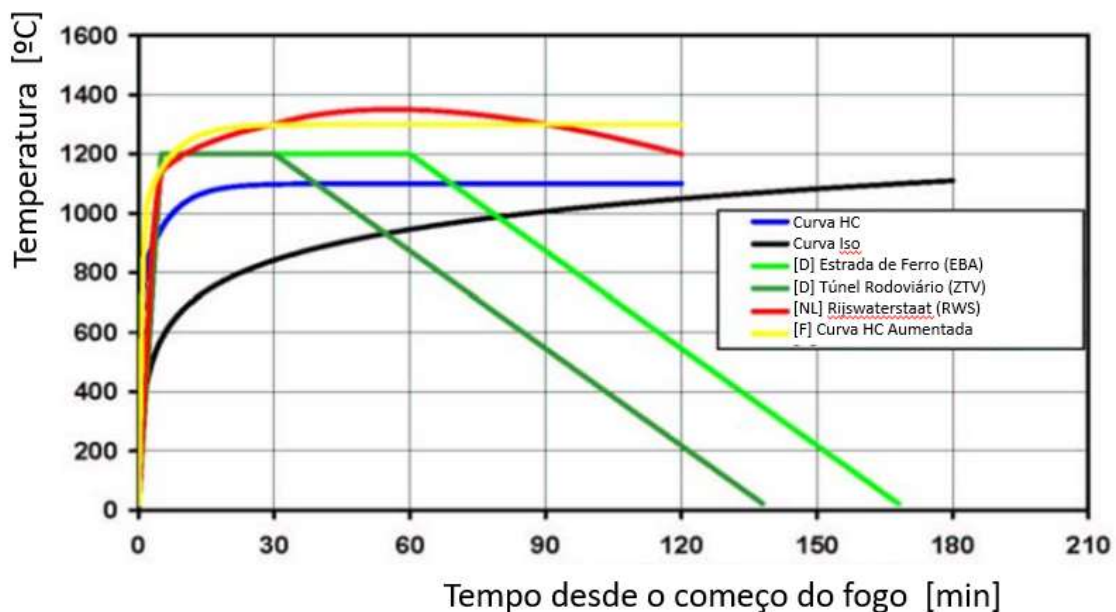


Figura 16 - Curvas-padrão Temperatura-tempo (ITA, 2004)

A figura 17 apresenta um comparativo entre essas curvas padrões e algumas curvas obtidas experimentalmente em testes.

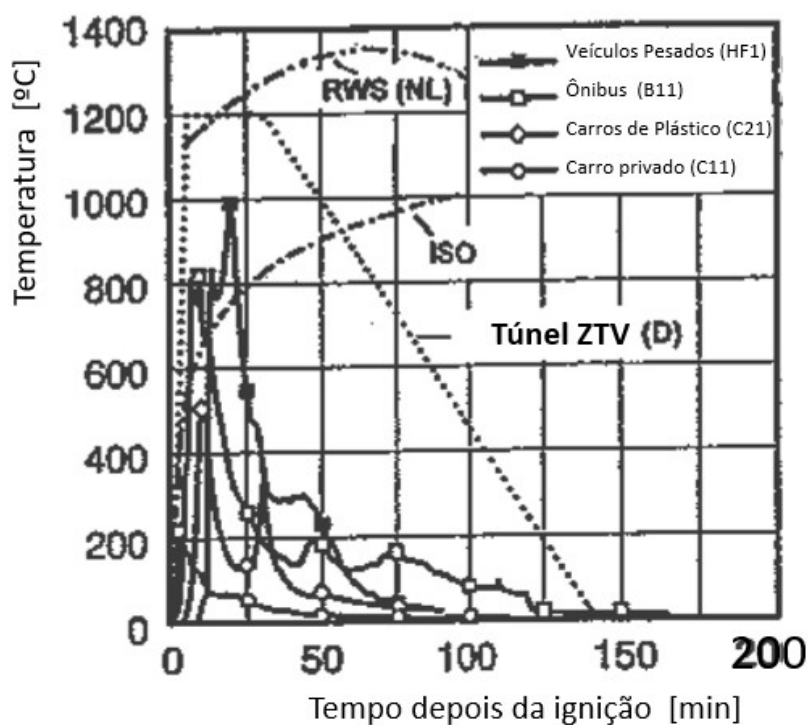


Figura 17 - Comparativo entre curvas-padrão e experimentais (ITA, 2004)

O relatório PIARC (1999) recomenda a adoção das curvas padrão para diferentes situações de tráfego, tipos de execução e função das estruturas secundárias, indicadas na tabela 4.

Tabela 4: Curvas recomendadas para cada sistema (ITA, 2004)

Tipo de tráfego	Estruturas principais				Estruturas secundárias <sup>4</sup>			
	Tuneis submersos/interior a uma superestrutura	Túnel em terreno instável	Túnel em terreno estável	Vala recoberta	Duto de ar <sup>5</sup>	Saída de emergência para ar livre	Saídas de emergência para outro tunel	Abrigo <sup>6</sup>
Carros/vans	ISO 60 minutos	ISO 60 minutos	2	3	ISO 60 minutos	ISO 30 minutos	ISO 60 minutos	ISO 60 minutos
Caminhões/ caminhões tanque	RWS/ HCinc 120 min <sup>1</sup>	RWS/ HCinc 120 min <sup>1</sup>	2	3	ISO 120 minutos	ISO 30 minutos	RWS/ HCinc 120 min	RWS/ HCinc 120 min <sup>7</sup>

Algumas observações foram feitas:

<sup>1</sup> 180 minutos para tráfego pesado de caminhões que transportam combustível.

<sup>2</sup> Este caso não requer resistência ao fogo (além de evitar o colapso). Todavia, considerando outros objetivos, pode ser utilizada a curva ISO 60 minutos para a maioria dos casos. Nenhuma proteção se seu custo for muito mais elevado que o custo de reparos da estrutura após um incêndio.

<sup>3</sup> Este caso não requer resistência ao fogo (além de evitar o colapso). Todavia, considerando outros objetivos, pode ser utilizada a curva - RWC/HCinc 120 min, se for necessária uma proteção forte devido à propriedade (por exemplo, túnel sob um edifício) ou grande influência na rede rodoviária. ISO 120 min na maioria dos casos, quando isso oferece uma proteção razoavelmente barata para limitar estragos à propriedade. Nenhuma proteção se seu custo for muito mais elevado que o custo de reparos da estrutura após um incêndio.

<sup>4</sup> Outras estruturas secundárias devem ser definidas com base no projeto

<sup>5</sup> Em caso de ventilação transversal

<sup>6</sup> Abrigos devem ser conectados ao ar livre

<sup>7</sup> Um tempo mais longo pode ser usado se houver um tráfego muito pesado de caminhões que transportam combustível e a evacuação dos abrigos não for possível dentro de 120 minutos.

ITA (2004) desenvolve também suas recomendações, de acordo com uma classificação própria devido ao uso do túnel. Esta classificação consiste em três categorias de acordo com o tipo de veículo permitido trafegar pelo túnel. Categoria 1 são os túneis em que são permitidos o tráfego apenas de carros, categoria 2 para veículos de carga pesada e categoria 3 para caminhão-tanque. A partir desta classificação, segue a tabela 5.

Tabela 5 - Recomendações de curvas de acordo com a categoria do veículo (ITA, 2004)

Categoria	Número de veículos envolvidos	Túnel Imerso	Túnel em terreno instável	Túnel em terreno estável	Cortar e Cobrir	Ductos de Ar	Sair para abrir	Saída para outro tubo	Abrigo
1	1-2	ISO 60 min	ISO 60 min	(ii)	(ii)	ISO 60 min	ISO 30 min	ISO 60 min	ISO 60 min
1	> Ou = 3	ISO 60 min	ISO 60 min	(ii)	(ii)	ISO 60 min	ISO 30 min	ISO 60 min	ISO 60 min
2,3	1 – 2	RWS/ HC <sub>inc</sub> 2 hrs.	RWS/ HC <sub>inc</sub> 2 hrs.	(iii)	(iii)	ISO 2 hrs.	ISO 30 min	RWS/ HC <sub>inc</sub> 2 hrs.	RWS/ HC <sub>inc</sub> 2 hrs.
2,3	> Ou = 3	RWS/ HC <sub>inc</sub> 3 hrs.	RWS/ HC <sub>inc</sub> 3 hrs.	(iii)	(iii)	ISO 2 hrs.	ISO 30 min	RWS/ HC <sub>inc</sub> 2 hrs.	RWS/ HC <sub>inc</sub> 2 hrs.

Notas :

(i): O alongamento da curva de tempo de projeto de 2 horas para 3 horas pode ser considerado pelos proprietários de túneis que visam proteger o ativo, reduzir os custos de reparo e limitar o tempo de fechamento do túnel, limitando os custos econômicos de fechamento e impactos ambientais do tráfego desviado. Esses cenários de incêndio mais longos correspondem a um incêndio com propagação relevante para vários veículos.

(ii) A segurança de pessoal não é um critério e não requer qualquer resistência ao fogo (além de evitar o colapso progressivo). Levar em conta outros objetivos (proteção de ativos, custos limitados em caso de incêndio ...) pode levar aos seguintes requisitos:

- ISO 60 min na maioria dos casos;
- Nenhuma proteção se a proteção estrutural for muito cara em comparação com o custo e a inconveniência do reparo (por exemplo, cobertura de luz para proteção contra ruído);

(iii) Segurança não é um critério e não requer qualquer resistência ao fogo (além de esvaziar o colapso progressivo). A consideração de outros objetivos pode levar ao seguinte requisitos:

- PWS // HCinc 120 min, se for necessária uma proteção robusta devido à propriedade (por exemplo, túnel sob um edifício) ou grande influência na rede viária;
- ISO 120 min na maioria dos casos, quando isso oferece uma proteção razoavelmente barata para limitar os danos à propriedade;
- Nenhuma proteção se a proteção estrutural for muito cara em comparação com o custo e a inconveniência dos trabalhos de reparo após um incêndio (por exemplo, cobertura de luz para proteção contra ruído).

#### 4.1.3. Comportamento do Concreto sob Fogo

Altas temperaturas provocam diversos efeitos nas propriedades dos materiais, cada um desses efeitos consiste em combinações de vários processos físicos e químicos. É esperado, então, que o comportamento de cada material seja diferente de acordo com as condições da mistura, condições do ambiente, qualidade da matéria-prima, etc. (CARVEL e BOTH, 2011).

Essas propriedades variam de acordo com cada tipo de execução do túnel já exibidos neste trabalho. Normalmente, são usadas misturas de alta resistência, alta densidade e baixa porosidade para concreto em túneis perfurados e, para essa mistura, a ruptura dominante se dá pelo fenômeno de deslocamento explosivo ou *spalling*. É utilizada usualmente misturas de baixa densidade e alta porosidade para túneis de tubo imerso, em que a ruptura predominante é o deslocamento progressivo.

Nunes e Franco (2017) dividem as rupturas causadas por fogo em concreto em dois tipos: deslocamento explosivo ou *spalling* e deslocamento progressivo ou descamação.

O *spalling* – também conhecido na literatura como lascamento – consiste em pedaços de concreto que se desprendem e são projetados com velocidade. Este efeito é observado nos primeiros x minutos de incêndio, ou no momento em que a temperatura está no intervalo de 240 a 280 °C. Segundo Costa et al. (2002) Apesar de ser um fenômeno que ainda não

são foi plenamente compreendido, especula-se que sua ocorrência seja governada pelas seguintes possíveis causas:

Devido à alta densidade, baixa porosidade e permeabilidade do concreto – A elevação da temperatura provoca a mudança de fase da água líquida presente nos poros do concreto. Quando a pressão de vapor ultrapassa a resistência a tração do concreto, há a brusca ruptura local, projetando uma lasca do concreto. Nota-se que para isso, basta que a temperatura nos poros seja maior que 100 °C, logo esse efeito apresenta-se nos primeiros minutos do incêndio, coincidindo com o momento em que se observa a ocorrência do *spalling*.

Alto gradiente de temperatura – dada a baixa condutividade do concreto e a alta taxa de aquecimento que um incêndio provoca, perpendicular à superfície do revestimento desenvolve-se um grande gradiente de temperatura. Isso gera tensões térmicas localizadas de grande magnitude, que contribuem com o fenômeno de *spalling*. Isso pode ser agravado se a distribuição da temperatura for assimétrica, as peças esbeltas, presença de armadura, etc. Vale lembrar que tensão térmica é a tensão gerada em corpos devido ao deslocamento, causado pela dilatação térmica, ser restringido pelos demais pontos da mistura– para o lascamento considera-se esse efeito local, porém esse efeito é observado também globalmente.

Apesar de essas tensões contribuírem com o *spalling*, também provocam um efeito que o reduz: ao provocar fissuras ou deslocamento no concreto, há o alívio das tensões de vapor reduzindo o efeito. Por isso, em aquecimentos mais lentos – onde não há tensões térmicas significantes – o efeito também pode ocorrer.

Efeitos secundários, físicos e químicos, também podem contribuir para o lascamento. A desidratação do hidróxido de cálcio presente no cimento do concreto, que ocorre em temperaturas acima de 400 °C, além de reduzir a capacidade cimentante do material e, conseqüentemente, a resistência e rigidez do concreto, ainda libera gás carbônico aumentando a pressão de vapor no interior da peça. O quartzo presente nos agregados também sofre mudança mineralógica em temperaturas acima de 575 °C, aumentando seu volume, e agregados de calcário se decompõem em temperaturas acima de 800 °C. (CARVEL e BOTH, 2011)

Quando fragmentos do concreto não são projetados com velocidade, mas apenas são desprendidos, o tipo de deslocamento é o progressivo. Este tipo de ruptura normalmente se observa em conjunto com o fenômeno de *spalling*. (NUNES e FRANCO, 2017)

#### **4.1.4. Demais diretrizes propostas pela PIARC**

A primeira preocupação é com o colapso progressivo da estrutura: uma ruptura local não pode acrescentar cargas aos elementos vizinhos a ponto de causar sua falha.

Deve-se dimensionar a estrutura para que não ocorra colapsos durante a fase de evacuação em locais em que podem haver pessoas. Para a determinação dessa fase, deve-se levar em consideração a curva temperatura – tempo como já foi observado neste trabalho.

Segundo ITA (2004) o melhor método de proteção de túneis é prover diretrizes para a proteção térmica dos vários elementos de um túnel. Isso foi decidido dado o fato de que existem muitos subsistemas e tipos de elementos estruturais no túnel, tornando muito difícil identificar cada tipo e providenciar um sistema específico de proteção. Assim sendo, o grupo de trabalho estabeleceu um limite de duas horas de duração de incêndio para proteção dos vários materiais e elementos específicos que se seguem:

- i. Concreto: elementos estruturais típicos, paredes, lajes, concreto projetado, etc. devem ser protegidos para limitar a superfície de concreto a um aumento de temperatura máxima de 380 °C;
- ii. Elementos de concreto pré-moldado: incluindo segmentos de alta resistência devem ser protegidos para prevenir *spalling* e colapso;
- iii. Tetos de concreto: devem ser adequadamente protegidos do colapso por no mínimo duas horas com o acréscimo máximo de temperatura de 380 °C;
- iv. Alvenaria de bloco cerâmico: não é considerada crítica e não precisa de proteção;
- v. Revestimento de aço e ferro fundido: devem ser protegidos na superfície para um aumento máximo de temperatura de 550°C;
- vi. Juntas chumbadas em segmentos de revestimentos: devem ser protegidos para um aumento máximo de temperatura de 200°C;



- vii. Azulejos cerâmicos: devem ser protegidos contra *spalling* a um aumento máximo de temperatura de 200°C (obs.: o uso de acabamentos cerâmicos em novos túneis deve ser evitado);
- viii. Elementos estruturais de aço, ferro fundido e ganchos do teto do mesmo material: devem ser protegidos a um aumento máximo de temperatura de 550°C;
- ix. Elementos estruturais de aço inoxidável e ganchos do teto do mesmo material: devem ser protegidos a um aumento máximo de temperatura de 800°C;
- x. Comprimentos de ancoragem: devem ser dimensionados com o fator de segurança mínimo de 3,5;
- xi. Resinas de epóxi: devem ser protegidas para um aumento de temperatura de 200°C a seis centímetros da superfície (obs.: a França proíbe o uso de ancoragem por epóxi em ambientes que podem estar acima de 300 °C);
- xii. Toda ancoragem por epóxi deve ser projetada com a zona de ligação superior a 6 cm da superfície do concreto ou qualquer outro material que a envolve;
- xiii. Ancoragem com componentes de chumbo, bronze, zinco ou outro material com baixa temperatura de derretimento: não é permitida para equipamentos de suporte estrutural ou de emergência como amortecedores ventiladores, etc.
- xiv. Todos os materiais a prova de fogo não devem ser degradados em relação a ligação ao substrato ou no índice de resistência referente a presença de água;
- xv. Todos os materiais incorporados a estrutura ou dentro de um túnel devem ser não tóxicos e não inflamáveis;
- xvi. Todos os equipamentos de emergência a serem instalados devem estar de acordo com as diretrizes PIARC e códigos e regulamentos locais;
- xvii. Saídas e acessos de emergência a serem instalados devem ser dimensionados para não exceder uma temperatura máxima de 40°C.

Equipamentos pesados não podem cair durante a fase de evacuação, resgate e combate às chamas. Como referência pode-se utilizar o seguinte critério: Não pode haver queda de itens pesados quando submetidos a temperaturas inferiores à 400 – 450 °C, pois esta faixa de temperatura produz radiação insustentável para o corpo humano mesmo utilizando equipamento de proteção (5 kW/m<sup>2</sup>). Outra estimativa da duração dessas fases é o critério francês: a partir de 2 horas de incêndio, deve-se encerrar o combate ao incêndio por ser considerado arriscado (a não ser estruturas mais críticas cuja ruptura pode causar prejuízos maiores, como túneis submersos e embaixo de edificações)

## **4.2. Segurança operacional**

### **4.2.1. Definição**

Para PIARC (2017) o procedimento de *design* do sistema de segurança pode ser dividido em cinco sistemas: reação ao fogo, controle das chamas e fumaça, evacuação, controle de tráfego e proteção dos bens.

Segundo PIARC (2007) é de suma importância estabelecer um plano de resposta que seja desenvolvido e alinhado por todas as partes correspondentes.

### **4.2.2. Reação ao fogo**

Esse sistema contempla as decisões que devem ser tomadas rapidamente. A detecção do incêndio, disposição e reação dos operadores de segurança, plano de evacuação e comunicação e reação dos serviços de emergência: quanto mais rápido forem esses processos, mais segura será a situação. Deve-se então desenvolver as estratégias e procedimentos para que seja implementada essa reação de forma rápida e eficiente.

### **4.2.3. Sistema de ventilação**

De acordo com Bendelius (2011) há uma simples definição para ventilação: “circulação de ar”. Não necessariamente ventilação implica em uso de dispositivo mecânico. Entretanto a ventilação de um túnel tem ganhado grande significado com o século XX devido a aplicação dos motores a vapor e combustão interna. A exposição a produtos da combustão oriunda dos veículos, agravada pelo ambiente confinado do túnel, pode causar desconforto e doenças aos usuários. A ventilação tornou-se a solução diluindo os contaminantes e tornando o ambiente mais saudável, além de auxiliar na visibilidade.

No fim do século XX, aumentou-se a preocupação da segurança dos usuários fazendo com que a ventilação assumisse outro papel na operação do túnel. (BENDELIUS, 2011)

O sistema de ventilação de um túnel exerce três principais funções: diluição de poluentes no ar, mitigação de problemas ambientais e controle de fumaça em caso de incêndios.

Entretanto, esta terceira função exige muito mais capacidade do sistema que as duas primeiras, tornando-se assim o principal critério para o dimensionamento.

#### **4.2.3.1. Ventilação natural**

O sistema de ventilação pode ser classificado com relação a natureza e trajetória do fluxo. A natureza da ventilação presente no túnel pode ser natural ou mecânica, já o fluxo pode ser classificado como longitudinal, transversal, semi-transversal e pseudo-transversal.

A ventilação natural é definida como aquela que ocorre dentro do túnel sem o auxílio de equipamentos mecânicos. Pode ser induzida por motivos atmosféricos como a diferença de pressão de ar entre as extremidades do túnel, efeitos convectivos e efeito chaminé (situação em que uma extremidade tem pressão atmosférica diferente da outra). Pode ser também induzida pelo tráfego de veículos dentro do túnel.

Para que esta modalidade seja suficiente no dimensionamento, é necessário que o túnel tenha um pequeno comprimento. Por não exercer muita influência no controle de fumaça, não é recomendado que apenas desta modalidade seja constituído o sistema de ventilação em um túnel de comprimentos maiores de 500 metros.

#### **4.2.3.2. Ventilação mecânica**

Sistema de ventiladores que devem prover qualidade aceitável do ar sob condições normais e garantir segurança dos usuários em situação de incêndio, além de facilitar o combate às chamas e outras operações emergenciais.

#### **4.2.3.3. Ventilação longitudinal**

A ventilação longitudinal consiste em produzir um fluxo de ar uniforme ao longo do eixo do túnel. O ar entra praticamente limpo e, conforme percorre o túnel, assimila gradualmente os poluentes gerados pelos veículos. Este sistema é barato e de fácil

instalação, e é recomendado para túneis unidirecionais gerando fluxo de ar no mesmo sentido do fluxo dos veículos.

Em situações de incêndio, a fumaça é direcionada para a extremidade à jusante do túnel, fornecendo condições de evacuação em direção à montante. Assume-se que, em tráfegos unidirecionais, os veículos à jusante do incêndio não são impedidos de trafegar e podem abandonar o túnel rapidamente. Por isso, a fumaça direcionada neste sentido não aumentaria os riscos para esses usuários.

Em situações de túneis com tráfego bidirecional ou unidirecional com chances de formar congestionamento à jusante de um incêndio, haverá usuários submetidos fumaça direcionada. Para estas situações, deve-se pensar em outra modalidade de ventilação mecânica.

Outro impeditivo pode ser o limite prático de velocidade do fluxo de ar longitudinal, colocado para não gerar desconforto a usuários e operários. Se o túnel exigir uma velocidade acima do limite, deve ser considerada outra solução.

Esta modalidade é realizada por ventiladores de fluxo axial chamados *jet fans* ou *boosters*.

#### **4.2.4. Sistema de detecção**

Detectores de incêndio são de extrema importância para o funcionamento do sistema de segurança e combate a incêndio por ser o ponto inicial do plano de resposta. Como uma rápida reação determina menor impacto, é imprescindível que a informação chegue rápido à central de controle para que sejam tomadas as medidas de proteção. (MACIOCIA e ROGNER, 2011)

##### **4.2.4.1. Sinais de incêndio**

A reação de combustão dá origem a conversão de material e energia cujos produtos finais são denominados fenômenos de incêndio. Os primeiros fenômenos de incêndio detectáveis são fumaça e calor. Devido ao estado de latência que certas reações de combustão podem se desenvolver inicialmente pode não haver a presença de chamas.

#### 4.2.4.2. Detector de fumaça

Um dos mais conhecidos detectores dessa classe é o detector óptico de fumaça. O funcionamento deste detector consiste em um teste de opacidade de uma amostra de ar no interior do aparelho de detecção. (MACIOCIA e ROGNER, 2011)

O sistema utiliza um emissor e um receptor de luz que detectam a absorção e reflexão da luz pela amostra. Quando a amostra apresenta uma densidade específica de fumaça, o alarme é disparado. O processo é descrito na figura 18.

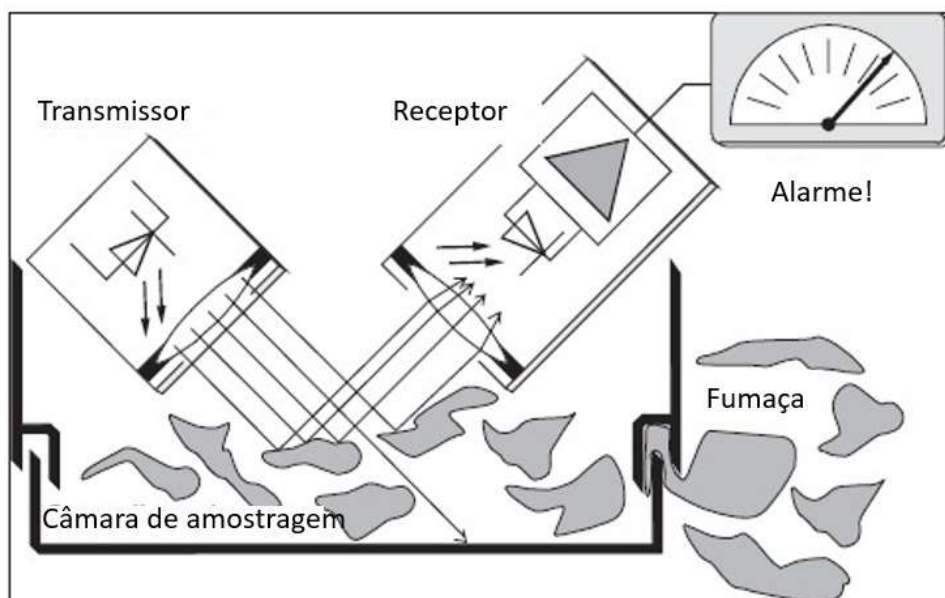


Figura 18 - Detector óptico de fumaça (MACIOCIA e ROGNER, 2011)

Outro tipo conhecido de detector desta classe é o detector de feixe. Ele é baseado na mensuração de absorção de luz, como ilustra a figura 19. O emissor de luz fica a uma distância de vários metros do receptor fotossensível. De acordo com a perda de intensidade da luz, devido a absorção da fumaça na trajetória o sistema ativa o alarme. Essa tecnologia não pode ser utilizada em túneis.

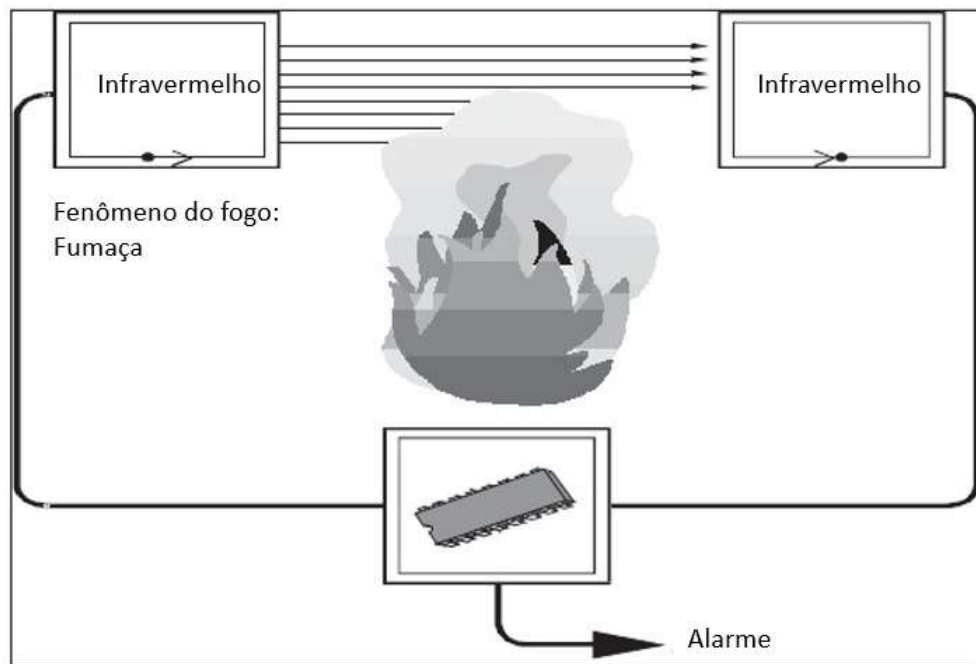


Figura 19 - Detector de feixe (MACIOCIA e ROGNER, 2011)

Por último, a detecção pode ser efetuada por um software de processamento de imagem. Este sistema apresenta uma sensibilidade considerável e por isso alta taxa de alarmes falsos. (MACIOCIA e ROGNER, 2011)

#### 4.2.4.3. Detector de chamas

Segundo Maciocia e Rogner (2011), chama é um fenômeno de incêndio que emite radiação de uma certa faixa de comprimentos de onda. Os detectores de chama são sensores foto sensíveis calibrados para ativarem quando a radiação específica os atinge. Este sistema possui uma desvantagem: o rápido desenvolvimento de fumaça pode impedir que os detectores identifiquem as chamas.

#### 4.2.4.4. Detector de calor

Através da medida da temperatura ambiente, é possível estabelecer uma detecção confiável de incêndio. Pois, pode ser monitorado não só a temperatura máxima alcançada, mas também sua taxa de crescimento.

Esses detectores podem ser divididos em dois tipos: os pontuais e os de linha. O primeiro, incorpora um sensor de calor conectado a uma unidade de avaliação. Já o segundo, não tem interrupção longitudinal entre os sensores e medem o aumento da temperatura.

Segundo o autor, o detector de calor do tipo linha se apresenta como o sistema de detecção rápida mais confiável. Entretanto, nem sempre um incêndio gerará um aumento de temperatura significativa. Dessa forma, um bom sistema deve contar com redundâncias associando tipos diferentes de detectores.

Com relação ao uso de detectores de fumaça e processamento de imagem, é recomendável que sejam associados a detectores de calor. Alarmes desses detectores devem ser confirmados pela central de comando antes dos avisos serem veiculados, ou devem apenas acionar a rotina de emergência do sistema de ventilação.





## 5. NORMATIVO

A norma brasileira NBR 15661:2012 desenvolvida pela ABNT especifica os requisitos de segurança para prevenção e proteção contra incêndio em túneis destinados ao transporte de passageiros e/ou cargas. Algumas das recomendações mais relevantes serão expostas neste capítulo.

### 5.1. Análise de riscos

Durante a fase de projeto do túnel deve-se efetuar a análise de riscos, para que sirva como guia para a elaboração do projeto e para a verificação de conformidade entre a fase de execução e operação. Deve ser elaborada por organismo independente do gestor do túnel, levando em consideração as características geométricas e de tráfego principalmente.

A potência do incêndio a ser considerada para o levantamento de riscos é expressa pela tabela 6 abaixo:

*Tabela 6 - Curvas HRR simplificadas de recomendação ABNT NBR 15661*

Tipo de veículo	Carga térmica [MW]	Tempo para atingir o pico térmico [minutos]
Automóveis de passeio	5 – 10	0 - 30
2 a 4 automóveis	10 – 20	13 – 55
Ônibus	20 – 30	7 – 10
Caminhão	70 – 200	10 – 18
Caminhão-tanque inflamável	200 - 300	-

Nota: Pesquisa demonstrou que caminhão (100 MW) em queima de 10 minutos gera uma temperatura de até 1.200 °C

### 5.2. Plano de gerenciamento

O gestor deve providenciar a elaboração de um plano de emergência claro, conciso e breve contendo os procedimentos para todos os cenários que podem se desenvolver durante uma situação emergencial. Alguns dos elementos mais importantes que o plano

deve abranger são: equipamentos e estruturas envolvidas no sistema, responsáveis por cada papel a ser desempenhado durante a operação do plano, treinamentos necessários a equipes e usuários e agências participantes.

### **5.3. Sistema de segurança**

A estrutura e os sistemas do túnel devem ser projetados para resistir, controlar, remover o calor, gases tóxicos e a fumaça gerada durante o incêndio. Na norma em epígrafe são definidos parâmetros mínimos que devem ser considerados nas fases de viabilidade e de projeto.

Os principais dados de entrada na elaboração do sistema são: tipos de veículos e cargas, volume de tráfego e frequência dos veículos, geometria do túnel (configuração do túnel, perfil, comprimento, quantidade de túneis), materiais e equipamentos, tempo de resposta das equipes envolvidas, riscos levantados.

#### **5.3.1. Sinalização**

Deve obedecer às normas vigentes, como as normas ABNT NBR 15981, ABNT NBR 13434-1, ABNT NBR 13434-2, ABNT NBR 13434-3 e ABNT NBR 15981, que dão orientações para dimensionamento de sinalização de emergência.

#### **5.3.2. Sistema de ventilação**

Ventilação natural pode ser utilizada para túneis de comprimento menor que 500 metros como sistema de ventilação e para túneis maiores dependendo da inclinação, tipo e volume de tráfego para renovação de ar.

Em túneis de até 3.000 metros de comprimento pode ser utilizado a ventilação longitudinal por jatos ventiladores, que gera um fluxo unidirecional de ar, recomendado para túneis de tráfego unidirecional. Deve ser evitada a formação do *backlayering* (movimento da fumaça na direção contrária do fluxo de ventilação) que ocorre quando a velocidade do ar ventilado ultrapassa a velocidade crítica.

Para túneis maiores de 3.000 metros podemos ter as alternativas de ventilação transversal, forçada semilongitudinal e longitudinal por jatos ventiladores e precipitadores eletrostáticos.

### **5.3.3. Sistema de hidrantes**

Para túneis com extensão entre 200 e 500 metros, deve haver um sistema de hidrantes com tubulação que pode permanecer seca, porém com controle de abastecimento em ambas as extremidades.

Para extensões maiores que 500 metros, deve ser implementado sistema de hidrantes do tipo 3 segundo a norma ABNT NBR 13714, que define este tipo com os valores mínimos para diâmetro de tubulação de 65 mm, esguicho do tipo jato compacto, diâmetro da mangueira de 65 mm, comprimento máximo de 30 m, duas saídas e vazão de 900 l/min. Para este sistema deve ser previsto reserva de incêndio suficiente para 30 minutos de combate com dois hidrantes funcionando simultaneamente e com pressão de 400 kPa no mais desfavorável.

Independente do comprimento do túnel, o sistema deve ter bomba atuante e reserva de mangotinhos, bem como sua sinalização apropriada. Deve possuir também uma distância máxima entre dois pontos de hidrante de 60 m, prevendo-se quatro lances de mangueira de 15 m para cada coluna de hidrante.

### **5.3.4. Extintores**

Túneis com 200 metros ou mais deve dispor de extintores de incêndio do tipo ABC a cada 30 metros e devidamente sinalizados.

### **5.3.5. Saídas e passagens de emergência**

Para qualquer comprimento de túnel, deve ser prevista a necessidade de saídas de emergência constituindo rotas de saída. Obedecendo às normas nacionais vigentes ABNT NBR 9050, ABNT NBR 9077, ABNT NBR14021 e ABNT NBR 15981.

Devem ser pressurizadas em relação à região do incêndio, recomendando-se controle de velocidade mínima de ar entre essas regiões de 3 m/s.

Recomenda-se um espaçamento de 100 a 700 metros de espaçamento entre passagens cruzadas para túneis com pista paralela. Esta distância depende do volume de tráfego, tipo da estrutura e comprimento do túnel.

As saídas devem ser de fácil acesso e desimpedida para que o usuário possa escapar com rapidez e sem dificuldade.

Abrigos de emergência, ou seja, passagens que não levam à área externa ao túnel, são proibidas.

### **5.3.6. Suprimento de energia elétrica**

Deve ser dimensionado de forma a reduzir ao máximo a probabilidade de falta de energia dentro do túnel. Para isso deve ser desenvolvido com várias redundâncias, para que, no caso de um circuito de alimentação falhar, os demais podem suprir a demanda elétrica. Exemplos de redundância são, linhas independentes de distribuição de energia, ou de diferentes concessionárias.

Devem ser previstas fontes alternativas de energia como geradores e baterias para o caso de emergência. Para esse caso, a alimentação deve ser ininterrupta, estabilizada e filtrada de interferências eletromagnéticas.

Diante de situação de emergência, as cargas elétricas dos sistemas devem ser alimentadas pelo suprimento de emergência: iluminação de emergência, sistema de controle de tráfego, sinalização e comunicação de emergência, ventilação de emergência, detecção e alarmes de incêndio, sistema de combate ao incêndio, drenagem, circuito interno de televisão e sistema de detecção automático de incêndio.

Estes sistemas são indispensáveis para o combate ao incêndio e, por isso, não podem sofrer com falta de energia.

### **5.3.7. Iluminação operacional e de emergência**

Deve ser ininterrupto e atender à norma ABNT NBR 5181 e legislação vigente. Em caso de falha do sistema principal de alimentação de energia elétrica, o sistema de emergência deve entrar automaticamente e em, no máximo, 0,5 segundos após interrupção.

O sistema operacional deve ser dimensionado para evitar o efeito cegueira (ofuscamento da visão do usuário pela luz natural na saída do túnel) e manter nível de iluminação médio em 10 lux e não inferior a 1 lux em todos os pontos do túnel.

A iluminação de emergência deve iluminar as rotas de saídas e saídas de emergência, atendendo à norma ABNT NBR 5181.

### **5.3.8. Sistemas eletrônicos**

Para túneis com extensão superior a 1.500 metros, recomenda-se a utilização de equipamentos eletrônicos de sinalização e segurança como painéis de mensagem variável, que pode expor mensagens de acordo com as condições presentes.

Para túneis acima de 500 metros de comprimento deve ser previsto no projeto um sistema de comunicação instalado no interior e exterior do túnel, permitindo comunicação entre usuários, equipes de serviço e emergência com os centros de controle e operação do túnel. Em túneis com comprimento igual ou maior a 1.000 metros deve ser instalado um circuito interno de câmeras que devem ser submetidos a manutenção periódica para garantir a visibilidade das imagens.

A norma descreve alguns sistemas que podem estar presentes no túnel para auxílio na proteção e prevenção de incêndio: triedros, megafonia, cancelas e balizadores de faixa. Detectores de incêndio devem obedecer a norma ABNT NBR 11836 e ABNT NBR 17240.

A norma indica que deve ser previsto em projeto um sistema de extinção de incêndio de acionamento automático, diminuindo o crescimento do incêndio e minimizando os impactos, além de possibilitar um maior tempo para evacuação e chegada da equipe de combate às chamas.

Deve ser previsto também um sistema de controle de fumaça de acordo com as características do túnel com o objetivo de melhorar as condições de permanência no túnel e diminuir dano aos equipamentos e estruturas. Controle de CO/NOx e visibilidade também devem ser previstos segundo a norma.

### **5.3.9. Sistema de coleta de líquidos**

O projeto do túnel deve prever um sistema de drenagem para coleta, armazenagem e descarga de líquidos efluentes no interior do túnel. Os 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, através de grelhas de escoamento nas laterais da pista, possibilitando o escoamento para bacias de contenção.

As bacias de contenção devem ser projetadas de modo que tenham capacidade para conter no mínimo 15 m<sup>3</sup>, associadas a um sistema de bombeamento de no mínimo 45 m<sup>3</sup>/h, ou capacidade para conter até 45 m<sup>3</sup>, no mínimo. Esse sistema deve possibilitar a retirada de líquidos das bacias de contenção através de caminhões-tanque, evitando danos ao meio ambiente.

As recomendações de normas são sumarizadas na tabela 7.

Tabela 7 - Recomendações de sistemas ABNT NBR 15661

Categoria do equipamento	Tipo de equipamento	Comprimento do túnel (m)				Observações
		> 3000	> 1001 ≤ 3000	> 500 ≤ 1000	Até 500	
Energia Elétrica	Suprimento de energia	OBR	OBR	OBR	REC	
	Energia de emergência	OBR	OBR	OBR	OPC	
Iluminação	Iluminação permanente	OBR	OBR	OBR	REC	
	Iluminação de emergência	OBR	OBR	OBR	REC	
Ventilação	Ventilação normal	OBR	OBR	REC	OPC	
	Ventilação de emergência	OBR	OBR	OPC	OPC	
Comunicação	Telefone de emergência	OBR	OBR	OBR	REC	
	Emissoras de rádio	REC	REC	REC	REC	
	Alto-falantes	OBR	OBR	REC	REC	
	Circuito de TV (CFTV)	OBR	OBR	REC	OPC	Somente para túneis com mais de 1.000 m
	Painéis de mensagens variáveis	OBR	OBR	REC	OPC	A cada 500 m no interior do túnel
Controle do tráfego	Equipamentos para fechamento do túnel	OBR	OBR	REC	OPC	Somente para túneis com mais de 1.000 m
	Equipamento para parar o veículo no interior do túnel	REC	REC	OPC	OPC	
	Equipamento para controle da altura do veículo	OBR	REC	REC	OPC	
	Centro de controle CCO	OBR	OBR	REC	OPC	
Detecção de incidente e incêndio	Detecção automática de incidente (DAI)	OBR	OBR	REC	OPC	No mínimo a cada 100 m
	Detecção de incêndio	OBR	OBR	REC	OPC	
	Alarme manual	OBR	OBR	OBR	OBR	
	Alarme automático	OBR	OBR	REC	OPC	
	Detecção de fumaça	OBR	OBR	REC	OPC	
	Detecção de CO/No <sup>2</sup>	OBR	OBR	REC	OPC	

Tabela 8 - Recomendações de sistemas ABNT NBR 15661 - continuação a

Controle de incêndio	Extintores	OBR	OBR	OBR	REC	No mínimo a cada 30 m
	Hidrantes	OBR	OBR	OBR	REC	No mínimo a cada 60 m
	Bombas de incêndio	OBR	OBR	REC	OPC	
	Sistema automático de supressão	OBR	OBR	REC	OPC	
	Suprimento de água	OBR	OBR	OBR	OPC	
	Portas corta-fogo	OBR	OBR	OBR	OPC	
	Sinalização de rota de fuga e saída de emergência	OBR	OBR	OBR	OPC	
	Plano de emergência	OBR	OBR	OBR	OPC	
	Brigada de emergência no emboque	OBR	OBR	OPC	OPC	
Drenagem		OBR	OBR	REC	OPC	Bacias de contenção com mínimo de 45 m <sup>2</sup> Caixas sifonadas no mínimo a cada 200 m
Análise de riscos		OBR	OBR	REC	OPC	Na fase do projeto básico Análise de conformidade na fase “as built”
Plano de contingência		OBR	OBR	REC	OBR	
Resistência	Resistência das estruturas e equipamentos contra incêndio	OBR	OBR	REC	OPC	



Tabela 9 - Recomendações de sistemas ABNT NBR 15661 continuação b

Medidas estruturais	Passarela de emergência para pedestres	OBR	OBR	OBR	REC	Somente para túneis urbanos
	Saídas de emergência	OBR	OBR	OBR	REC	No mínimo até 500 m
	Passagem para serviços de emergência	OBR	OBR	REC	OPC	No mínimo a cada 1.500 m para túneis paralelos
	Galeria de emergência	OBR	REC	OPC	OPC	
	Baias de emergência	OBR	REC	OPC	OPC	No mínimo a cada 1.000 m
	Pista de emergência	REC	REC	OPC	OPC	
	Abrigos de emergência	-	-	-	-	Proibido
Obrigatório	OBR	●				
Recomendado	REC	⊠				
Opcional	OPC	○				

#### 5.4. Materiais submetidos a temperatura

A norma define o termo tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF) como o tempo que dada estrutura resiste do início do incêndio à perda da função por colapso ou deformação excessiva.

A estrutura principal do túnel cujo colapso local pode gerar colapso de estruturas vizinhas importantes deve apresentar tempos de resistência adequados. De modo semelhante, a ruptura de uma região do revestimento não poder ser tal que gere sobrecarga para as estruturas adjacentes, gerando um possível efeito “dominó”.

O revestimento, do túnel, por exemplo, deve garantir o suporte do maciço possibilitando o abandono da área sinistrada. Para isso devem ser tomadas medidas de correção de patologias que surgirem durante a operação do túnel.

Define-se os seguintes TRRF para os materiais abaixo:

- a) revestimento estrutural do túnel e outros elementos estruturais em concreto: 120 minutos;
- b) revestimento estrutural do túnel e outros elementos estruturais em aço: 120 minutos;

- c) dutos metálicos: 120 minutos;
- d) vedação de aberturas destinadas a passagem de cabos/tubos: 120 minutos;
- e) bandejamento de cabos elétricos e de controle (iluminação de emergência): 60 minutos;
- f) todos os sistemas e equipamentos dos túneis destinados à proteção contra incêndio devem atender às possibilidades tecnológicas, de forma a manter as funções de segurança em caso de sinistro.

A obtenção dos TRRFs especificados pela norma pode ser feita de várias formas: utilização de materiais intrinsicamente resistentes, aditivos adicionados na composição do material ou elementos de proteção independente sobre os elementos menos resistentes a incêndio.

Adições de fibras de polipropileno e metal da ordem de  $2 \text{ kg/m}^3$  a  $3 \text{ kg/m}^3$  de concreto, associada a uma seleção otimizada de agregados, devem ser desenvolvidas especificamente para cada projeto. Há também a proteção por placas e concreto projetado.

Revestimento de proteção para estruturas de concreto deve assegurar que a temperatura na interface proteção-concreto não ultrapasse  $380 \text{ }^\circ\text{C}$ . Deve ser ancorado no concreto para evitar a queda durante a operação do túnel, atendendo às recomendações do fabricante.

A proteção de estruturas de aço deve ser baseada nas características da estrutura em si, de acordo com a massividade específica dos perfis e elementos. Deve-se ter em vista que temperaturas acima de  $550 \text{ }^\circ\text{C}$  reduz a capacidade de suporte e deforma a estrutura. Para proteger o aço devem ser usados materiais intumescentes, placas, isolantes térmicos para altas temperaturas ou argamassas projetadas desenvolvidas para esse fim.

Para bandejamento de cabos podem ser usados materiais isolantes tipo manta flexível incombustível encapsulada por um filme de alumínio de  $50 \text{ }\mu\text{m}$  de espessura devem ser reforçados internamente por trama de fibra de vidro (proporciona melhor manuseio e integridade ao sistema), podendo atender ao TRRF mínimo de 60 minutos. As aberturas para a passagem de cabos devem ser isoladas com material corta-fogo para atender o TRRF especificado.

Equipamentos instalados no interior do túnel não podem produzir gases tóxicos nem grandes quantidades de fumaça. Aqueles que possuem carga dinâmica ou de valor considerável devem ser engastados no revestimento ou estrutura secundária, sendo proibido o uso de chumbadores.

Todas as exigências acima devem ser verificadas por ensaios laboratoriais e certificadas. Deve ser elaborado um manual de manutenção das estruturas que determinam ações de inspeção e intervenção para os elementos do túnel.

### **5.5. Geometria do túnel**

Deve ser levada em consideração a segurança ao conceber a geometria da seção transversal. Não é permitido inclinações maiores que 5% nos novos túneis. Para túneis com inclinação superiores a 3% devem ser tomadas medidas para melhoras a segurança do sistema.

### **5.6. Ensaio e simulações**

Devem ser realizados ensaios no equipamento de forma sistemática durante a instalação operação do túnel como parte do plano de manutenção. Os ensaios dos equipamentos buscam verificar o funcionamento adequado do equipamento.

Deve ser efetuado um ensaio de simulação de incêndio no interior do túnel. Este ensaio deve ser feito com fumaça fria para observar o funcionamento dos equipamentos, equipes e sistemas sem danificá-los desnecessariamente.

## **6. DIRETRIZES RECOMENDADAS**

Com base nos estudos realizados neste trabalho, foram elaboradas diretrizes para o dimensionamento do sistema de segurança como um todo. Tais diretrizes contém orientações para que cada sistema seja elaborado para ser eficiente.

### **6.1. Informações do túnel**

Devem ser coletadas informações úteis para o entendimento do cenário em que o incêndio se desenvolverá, observando as necessidades de intervenção por parte do sistema de segurança a ser elaborado.

#### **6.1.1. Tráfego**

Um estudo de tráfego deve ser elaborado levantando as seguintes informações: probabilidade e duração de possíveis congestionamentos, direção do fluxo de veículos, densidade de tráfego, frequência de passagem de cada tipo de veículo (com ênfase em veículos de carga pesada e cargas perigosas).

#### **6.1.2. Geometria do túnel**

Dados de projeto de execução do túnel como seção transversal, altura do túnel, inclinação, comprimento e interseções são imprescindíveis para a construção do cenário.

#### **6.1.3. Locação do túnel**

Clima e altitude fornecem dados atmosféricos importantes para o dimensionamento e devem ser levados em consideração. A presença de estruturas vizinhas também pode ser relevante para os estudos de risco.

### **6.2. Escolha do fogo de dimensionamento**

A escolha entre as três abordagens descritas neste trabalho fica a critério do projetista. Independente da escolha, se faz necessária as potências de incêndio recomendadas pela norma.

Tabela 10 - Recomendações de curvas HRR ABNT NBR 15661

Tipo de veículo	Carga térmica [MW]	Tempo para atingir o pico térmico [minutos]
Automóveis de passeio	5 – 10	0 - 30
2 a 4 automóveis	10 – 20	13 – 55
Ônibus	20 – 30	7 – 10
Caminhão	70 – 200	10 – 18
Caminhão-tanque inflamável	200 - 300	-

Nota: Pesquisa demonstrou que caminhão (100 MW) em queima de 10 minutos gera uma temperatura de até 1.200 °C

A tabela exhibe o pico das curvas HRR para cada veículo. Entretanto, a norma ABNT NBR 15661 estabelece que para dimensionamento deve-se considerar 30 MW de pico atingidos em 10 minutos.

Esses dados podem ser usados para fogo de dimensionamento na abordagem prescritiva, ou tomados como ponto de partida na abordagem não prescritiva e na baseada em performance. De qualquer forma, esta informação deve ser levada em consideração.

### 6.3. Objetivos de design

Divididos entre objetivos de segurança e requisitos operacionais, aqui se definem os níveis de segurança que se deseja atingir com o sistema. Entra aqui as prescrições normativas e legislação vigente no local do empreendimento. São definidos também requisitos de segurança que não estão previstos em normas mas podem causar consequências indesejáveis, normalmente ligados a prejuízos financeiros.

Os requisitos normativos devem seguir as recomendações normativas e as recomendações dos órgãos competentes, citadas neste trabalho.

## **6.4. Dimensionamento**

Todos os sistemas dimensionados devem passar pela avaliação proposta pelo método de gestão de risco discutido neste trabalho. Para a decisão de reduzir o risco de determinada ameaça, pode-se seguir as recomendações a seguir.

### **6.4.1. Resposta ao incêndio**

Detectores devem ter rápida identificação do perigo, apresentando tipos diferentes de detecção com a finalidade de reduzir as desvantagens de cada modelo.

O detector de calor do tipo linha se apresenta como o sistema de detecção rápida mais confiável, porém nem todos os incêndios geram temperatura suficiente para dispará-lo.

Detectores de fumaça e processamento de imagem podem ser associados a detectores de calor. Alarmes desses detectores devem ser confirmados pela central de comando antes dos avisos serem veiculados, ou devem apenas acionar a rotina de emergência do sistema de ventilação (prejuízos pequenos em caso de alarme falso).

### **6.4.2. Controle de fumaça**

Deve-se determinar a ventilação para controlar a fumaça, evitando que a fumaça entre em contato com os usuários e equipes de emergência. Deve-se sempre atentar

Para túneis de pequeno porte (até 500 metros) não é necessária a ventilação mecânica. A baixa velocidade longitudinal manterá a estratificação da fumaça e a lenta propagação, permitindo a evacuação e combate às chamas.

Ventilação longitudinal para situações em que não haverá pessoas à jusante (túnel unidirecional sem formação de congestionamento).

Em túneis longos, bidirecionais ou com forte volume de tráfego deve haver um sistema de extração de fumaça (ventilação transversal, semi-transversal ou afins).

### **6.4.3. Controle de chammas**

O usuário do túnel deve ser capaz de apagar o fogo sozinho na fase inicial do incêndio com extintores tipo ABC localizados segundo as normas vigentes. Caso o fogo já tenha se desenvolvido demais, o usuário deve identificar o perigo e evacuar a área. Para que o usuário tenha este tipo de observação, deve ser estabelecido um programa educacional de conscientização com cursos, cartilhas e comerciais.

A brigada de incêndio, bombeiros e demais equipes de combate às chammas devem estar alertas ao alarme e chegar o quanto antes ao local da emergência. Para isto é possível haver um sistema de plantão em uma central de emergência próximo ao túnel. Para isso o sistema de detecção deve prover uma rápida identificação do perigo.

### **6.4.4. Evacuação**

Deve ser incentivada por meio da sinalização de emergência (alarmes, placas e painéis de mensagens variáveis). Podem ser utilizadas mensagens que despertam melhor a reação do usuário, como mensagens imperativas informando em quantos minutos a situação se tornará insustentável.

### **6.4.5. Controle de tráfego**

Deve-se considerar o controle de entrada de veículos que podem trazer elevação de riscos, em ordem decrescente: cargas inflamáveis, veículos de carga pesada, ônibus e vans. Para o caso de não ser possível restringir a entrada de veículos, quando não houver caminhos alternativos por exemplo, pode-se propor uma escolta para esses veículos com pessoal pronto para combater um possível incêndio no seu início.

Tomar medidas para manter os veículos afastados dentro do túnel reduz a chance de as chammas se alastrarem de um veículo para outro (os incêndios mais desastrosos ocorreram em sua maioria por esse fator, em que a duração do incêndio se estende e torna-se insustentável o combate às chammas). Aumentar a largura das faixas, avisos e orientações aos usuários para se manter a distância do veículo da frente.

Um sistema de cancelas pode ser utilizado para evitar a formação de congestionamentos dentro do túnel. Congestionamentos devem ser evitados por aumentarem a probabilidade de incêndio dentro do túnel, pela maior presença de veículos no túnel,

#### **6.4.6. Proteção de ativos**

Os elementos estruturais devem ser dimensionados para possíveis cargas térmicas a fim de evitar o colapso, principalmente nas fases em que há pessoas no túnel (duas horas de incêndio ou até uma temperatura de 400-450 °C). O mesmo vale para equipamentos pesados fixados no teto ou paredes.

Os materiais de revestimento de proteção devem ser ensaiados para verificar o desempenho de dimensionamento.

Retomando as recomendações PIARC discutidas neste trabalho:

- i. Concreto: elementos estruturais típicos, paredes, lajes, concreto projetado, etc. devem ser protegidos para limitar a superfície de concreto a um aumento de temperatura máxima de 380 °C;
- ii. Elementos de concreto pré-moldado: incluindo segmentos de alta resistência devem ser protegidos para prevenir *spalling* e colapso;
- iii. Tetos de concreto: devem ser adequadamente protegidos do colapso por no mínimo duas horas com o acréscimo máximo de temperatura de 380 °C;
- iv. Alvenaria de bloco cerâmico: não é considerada crítica e não precisa de proteção;
- v. Revestimento de aço e ferro fundido: devem ser protegidos na superfície para um aumento máximo de temperatura de 550°C;
- vi. Juntas chumbadas em segmentos de revestimentos: devem ser protegidos para um aumento máximo de temperatura de 200°C;
- vii. Azulejos cerâmicos: devem ser protegidos contra *spalling* a um aumento máximo de temperatura de 200°C (obs.: o uso de acabamentos cerâmicos em novos túneis deve ser evitado);
- viii. Elementos estruturais de aço, ferro fundido e ganchos do teto do mesmo material: devem ser protegidos a um aumento máximo de temperatura de 550°C;



- ix. Elementos estruturais de aço inoxidável e ganchos do teto do mesmo material: devem ser protegidos a um aumento máximo de temperatura de 800°C;
- x. Comprimentos de ancoragem: devem ser dimensionados com o fator de segurança mínimo de 3,5;
- xi. Resinas de epóxi: devem ser protegidas para um aumento de temperatura de 200°C a seis centímetros da superfície (obs.: a França proíbe o uso de ancoragem por epóxi em ambientes que podem estar acima de 300 °C);
- xii. Toda ancoragem por epóxi deve ser projetada com a zona de ligação superior a 6 cm da superfície do concreto ou qualquer outro material que a envolve;
- xiii. Ancoragem com componentes de chumbo, bronze, zinco ou outro material com baixa temperatura de derretimento: não é permitida para equipamentos de suporte estrutural ou de emergência como amortecedores ventiladores, etc.
- xiv. Todos os materiais a prova de fogo não devem ser degradados em relação a ligação ao substrato ou no índice de resistência referente a presença de água;
- xv. Todos os materiais incorporados a estrutura ou dentro de um túnel devem ser não tóxicos e não inflamáveis;
- xvi. Todos os equipamentos de emergência a serem instalados devem estar de acordo com as diretrizes PIARC e códigos e regulamentos locais;
- xvii. Saídas e acessos de emergência a serem instalados devem ser dimensionados para não exceder uma temperatura máxima de 40°C.

O dimensionamento é adequado se atender aos requisitos discutidos no item 2.3 deste trabalho e não apresentar valores de riscos inaceitáveis. Em caso de rejeição, deve ser elaborada uma nova proposta de dimensionamento até que tais objetivos sejam atingidos.

## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Estudos futuros podem ser feitos para dar continuidade a este trabalho com o objetivo de padronizar a segurança de usuários, funcionários e patrimônios contra incêndios em túneis rodoviários.

Estudos estatísticos devem ser elaborados para determinar valores que descrevem as probabilidades dos eventos cruciais do sistema de segurança. Por exemplo, a probabilidade de incêndio de um veículo por meio do superaquecimento dos freios em função da declividade do pavimento de acordo com o modelo e fabricante e periodicidade de manutenção. Esta é uma informação valiosa no dimensionamento do sistema de segurança para que se possa tomar medidas para reduzir este risco específico caso ultrapasse um valor limite.

Obtidas as probabilidades, pode-se estabelecer um estudo de risco residual do sistema e estabelecer uma avaliação da eficiência do sistema. Assim será possível estabelecer um critério normativo de aceitação para o qual todos os túneis devem ser submetidos.

O comportamento das chamas e fumaça ainda são muito variáveis de acordo com as condições do túnel. Um estudo de simulação pode mapear o comportamento das chamas e fumaça de forma precisa para que sejam determinadas diretrizes específicas de controle de incêndio, como exemplo a relação entre a curva de liberação de calor (HRR) e a curva temperatura-tempo que se desenvolve nas cercanias do incêndio e nas regiões mais afastadas.

## Referências

- ASSIS, A. A. **Mecânica das Rochas**. Brasília. 2017.
- ASSIS, A. A. **Métodos Estatísticos em Geotecnia**. Brasília. 2018.
- BEARD, A.; SCOTT, P. Prevention and protection: overview. In: SAFETY, H. O. T. F. **Beard, A.; Carvel, R.** Second edition. ed. [S.l.]: Thomas Telford, 2011. Cap. 5, p. 714.
- BENDELIUS A. Tunnel ventilation: state of art. In: BEARD, A.; R., C. **Handbook of Tunnel Fire Safety**. [S.l.]: Thomas Telford, 2011.
- CARVEL, R.; BOTH, K. Passive Fire Protection in Concrete Tunnels. In: BEARD, A.; R., C. **Handbook of Tunnel Fire Safety**. Second Edition. ed. [S.l.]: Thomas Telford, 2011.
- CLEMENT, P.; SIMMONS, R. **System Safety and Risk Management**. Cincinnati: NIOSH, 1998.
- COSTA, C.; FIGUEIREDO, A.; SILVA, V. O fenômeno do lascamento (“spalling”) nas estruturas de concreto armado submetidas a incêndio – uma revisão crítica. **44º IBRACON**, Belo Horizonte, 2002.
- CUOGHI, R.; FIGUEIREDO, A. **Aspectos de análise de risco das estruturas de concreto em situação de incêndio**. USP. São Paulo. 2007.
- GOOGLE INC. Google Maps, 2013. Disponível em: <<https://bit.ly/2Kn8DEP>>. Acesso em: 20 junho 2018.
- IP. **Abordagem Integrada à Segurança de Túneis Rodoviários**. Instituto de infra - estruturas rodoviárias. [S.l.]. 2007.
- ITA. **Guidelines for structural fire resistance for road tunnels**. Working Group No.6 Maintenance and Repair ITA. [S.l.]. 2004.
- MACIOCIA, S.; ROGNER, A. Fire detection systems. In: BEARD, A.; CARVEL, R. **safety, Handbook of tunnel fire**. Second edition. ed. [S.l.]: [s.n.], 2011. Cap. 6, p. 714.
- NUNES, L.; FRANCO, V. Resistência da estrutura de túneis rodoviários aos danos causados por incêndios. **4º Congresso Brasileiro de Túneis e Estruturas Subterrâneas**, São Paulo, abril 2017.
- PIARC. Fire and Smoke Control in Road Tunnels. **PIARC Technical Committee on Road Tunnel Operation**, 1999.
- PIARC. **Design Fire Characteristics for Road Tunnels**. Technical Comitee 3.3 Roads Tunnels Operations. [S.l.]. 2017.

REDDIT. Reddit, 2017. Disponível em: <<https://bit.ly/2N81qGp>>. Acesso em: 20 junho 2018.

SILVEIRA, E. B. S. **Apostila Metrô e Túneis em Solos**. [S.l.]. 1974.

SOUZA, J. C. T. D. Propostas de Diretrizes Gerais para Projeto de Túneis Rodoviários, BRASÍLIA, 2012.

STERLING, R. L.; GODARD, J. P. **Geoengineering Considerations in the Optimum Use of the Underground Space**. [S.l.], p. 15. 2001.

WATANABE, M. [architecturejoaquinlan.blogspot.com](http://architecturejoaquinlan.blogspot.com), 2016. Disponível em: <<https://bit.ly/2Nccwuj>>. Acesso em: 20 junho 2018.

WBUR. WBUR NEWS, 2012. Disponível em: <<https://wbur.fm/2KBlEqg>>. Acesso em: 20 junho 2018.