

A INVESTIGAÇÃO DE INCÊNDIO EM TÚNEIS: ESTUDO DA METODOLOGIA APLICADA À PERÍCIA

Rafael Giosa Sanino¹

Vanderlei Vanderlino Vidal²

RESUMO

O presente trabalho faz um estudo sobre a metodologia de investigação aplicada à perícia de incêndio em túneis com o intuito de fornecer subsídios às futuras investigações envolvendo ocorrências de incêndio nos túneis do Estado. A pesquisa buscou fundamento em normas de segurança contra incêndio, doutrinas, estudo de casos reais, laudos periciais e trabalhos acadêmicos no Brasil e no mundo que, de alguma forma, relacionaram-se com o tema. Tal estudo possibilitou conhecer as peculiaridades da dinâmica de incêndio em túneis e identificar alguns aspectos importantes a serem observados durante a realização das investigações de incêndio nesses locais. Com base nesse conhecimento, foi possível estabelecer uma proposta de metodologia de investigação de incêndio específica para túneis. Na conclusão, propõe-se ao Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina a aplicação dessa metodologia de investigação de incêndio e recomenda-se a continuidade da pesquisa no sentido de aprimorar essa metodologia ao longo do tempo.

Palavras-chave: Incêndio. Túneis. Metodologia. Investigação.

1 INTRODUÇÃO

O crescimento econômico e turístico de Santa Catarina ocorrido nos últimos anos refletiu diretamente no desenvolvimento constante das estradas e rodovias catarinenses. Além da melhoria na qualidade e quantidade das estradas, o Estado conta hoje com diversos túneis rodoviários onde transitam milhares de veículos diariamente.

Assim como qualquer outra edificação, esses túneis rodoviários estão sujeitos aos riscos que envolvem a segurança das pessoas que por ali circulam.

¹ 2º Tenente BM do CBMSC. Perito em Incêndio e Explosão. Bel. em Direito pela Faculdade Metropólicas Unidas. Esp. em Gestão do Meio Ambiente. E-mail: sanino@cbm.sc.gov.br

² Tenente-Coronel do CBMSC. Perito em Incêndio e Explosão. Bel. em Administração pela Universidade Federal de Santa Catarina. Esp. em Gestão de Serviços Públicos pela Escola Superior de Administração e Gerência da Universidade do Estado de Santa Catarina e Esp. em Gestão de Serviços de Bombeiro pela Universidade do Sul de Santa Catarina. E-mail: vanderlino@cbm.sc.gov.br

Diante desse cenário, o Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina (CBMSC) deve estar atento à segurança contra incêndio nesses locais e, para tanto, deve-se preocupar em adquirir o conhecimento necessário para atuar com propriedade e eficácia diante das piores situações.

Essa atuação eficiente do CBMSC, por sua vez, não deve se restringir apenas às fases normativa, estrutural e de combate. É necessário que ela abranja todas as fases do ciclo operacional e que, portanto, estenda-se também até a fase pericial. Nessa fase, o investigador deve estar atento às peculiaridades encontradas no local e deve buscar utilizar uma metodologia de investigação de incêndio em túneis adequada para a situação.

Entretanto, ocorre que, apesar das peculiaridades encontradas no incêndio em túneis, não há hoje no CBMSC uma metodologia que seja voltada especificamente para a investigação de incêndio em túneis. Sendo assim, o presente trabalho pretende trazer um conhecimento acerca do assunto, realizando uma análise científica basilar envolvendo aspectos como: a dinâmica do incêndio em túneis; suas características estruturais; estudo de casos; e a análise de uma nova metodologia de investigação de incêndio específica para túneis.

Dessa forma, a pesquisa tem como objetivo fornecer subsídios aos investigadores para que realizem futuras investigações de incêndio em túneis por meio da aplicação de uma técnica adequada, voltada para as peculiaridades que o caso requer.

Em relação à metodologia de pesquisa aplicada para a realização do presente estudo, segundo os entendimentos de Saunders, Lewis e Thornhill (2003, p. 83), pode ser classificada, quanto à sua lógica, pelo método dedutivo, ou seja, aquela que parte de uma análise geral (incêndio em edificações comuns) e caminha para uma análise específica (incêndio em túneis). Quanto aos objetivos, pode ser considerado descritivo e exploratório, pois realiza uma abordagem descritiva da dinâmica e das peculiaridades do incêndio em túneis, bem como de estudo de casos e, ao final, utiliza o método exploratório ao propor uma nova metodologia de investigação de incêndio específica para túneis, a qual ainda não foi abordada por pesquisas nacionais e internacionais. Quanto à estratégia, a pesquisa pode ser considerada bibliográfica, pois utiliza-se de livros, normas, trabalhos científicos e documentos em geral como fontes de consulta. Quanto ao horizonte de tempo, classifica-se como transversal, já que foi elaborada no período de aproximadamente três meses. Por fim, quanto à coleta de dados, o trabalho pautou-se basicamente pela coleta documental, por meio da análise de dados contidos em laudos periciais e nos trabalhos científicos que versam sobre o tema.

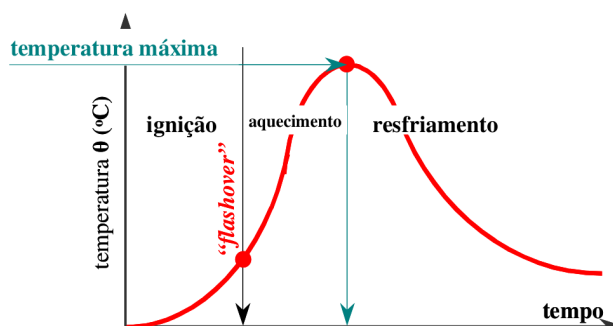
2 A DINÂMICA DE INCÊNDIO EM TÚNEIS E SUAS DIFERENÇAS EM RELAÇÃO À DINÂMICA DE INCÊNDIO EM OUTRAS EDIFICAÇÕES

Todo e qualquer incêndio possui uma dinâmica única e peculiar decorrente de suas características específicas. Entretanto, alguns estudos procuram demonstrar, por meio de fórmulas e gráficos, como o incêndio ocorre de uma maneira geral.

Uma das formas representativas do incêndio, é denominada de incêndio real, a qual apresenta três estágios básicos: ignição; fase de aquecimento e fase de resfriamento. O primeiro estágio representa o início da inflamação até o instante conhecido como “*flashover*” (instante de inflamação generalizada). O segundo estágio inicia-se com o *flashover* e termina quando a temperatura máxima do incêndio é atingida. O terceiro e último estágio inicia-se no ponto mais alto da temperatura e termina com a completa extinção do material combustível (SILVA, 1997, p. 4).

A curva temperatura-tempo de um incêndio real pode ser demonstrada pela figura a seguir:

Figura 1 – Gráfico representativo da curva de incêndio real



Fonte: COSTA; SILVA, 2006, p. 2

Ocorre, entretanto, que devido à existência de alguns fatores, tais como, carga de incêndio, grau de ventilação e características da compartimentação, há uma variação da temperatura de incêndio para incêndio, bem como do momento em que ocorre o *flashover* e do momento em que o incêndio atinge sua temperatura máxima (COSTA; SILVA, 2006, p. 2). Além disso, a influência desses fatores pode determinar a inexistência de uma ou mais fases da curva de incêndio real, bem como a inexistência do fenômeno *flashover*.

Para facilitar o entendimento das mais diversas dinâmicas, modelos matemáticos de incêndio foram formulados para elaborar curvas de incêndio que descrevem a variação da

temperatura de diversos tipos de compartimento em função de seus respectivos tempos do sinistro.

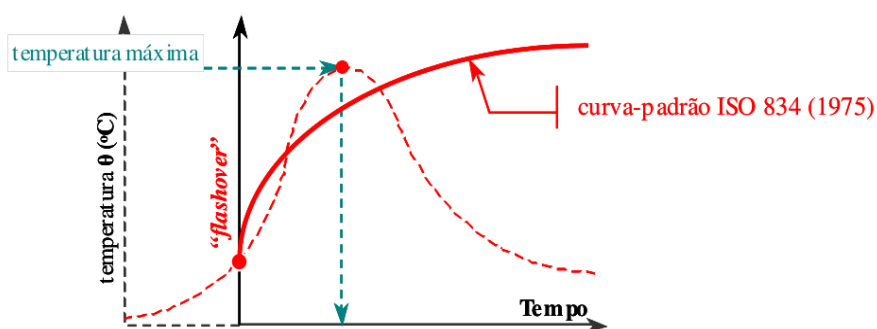
Essas curvas de incêndio podem ser parametrizadas (curvas naturais) ou padronizadas (curvas nominais). A primeira é constituída pelas características específicas do cenário de cada incêndio, trazendo, portanto, maior precisão na determinação da temperatura dos gases em função do tempo. Já a segunda constitui-se por modelos de curvas preestabelecidos que idealizam o padrão de um incêndio para análises experimentais (SILVA, 1997, p. 136).

Portanto, percebe-se que as curvas-padrão não descrevem a realidade de um incêndio, uma vez que o cenário sempre sofrerá variação de acordo com suas características específicas. Contudo, elas são usadas pela maioria das normas nacionais e internacionais para facilitar os ensaios em série de elementos construtivos e avaliar o Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF) no dimensionamento das estruturas (COSTA; SILVA, 2006, p. 4).

No Brasil, por exemplo, o TRRF é definido pela Norma Brasileira (NBR) 14.432 (Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimento), por meio da curva-padrão ISO 834, publicada em 1975 pela *International Organization for Standardization* (ISO)³.

A figura a seguir mostra a comparação entre a curva de incêndio real e a curva-padrão de incêndio ISO 834, utilizada pela NBR 14.432:

Figura 2 – Gráfico representativo da curva-padrão ISO 834



Fonte: COSTA; SILVA, 2006, p. 4

Porém, é importante salientar que a curva-padrão de incêndio ISO 834 descreve o incêndio cujo material combustível é composto por celulósicos, ou seja, não abrange a combustão de materiais à base de hidrocarboneto, tais como: petróleo, gás natural, óleo mineral, óleos derivados, dentre outros (COSTA; SILVA, 2006, p. 7).

³ Organização Internacional para Padronização: Organização Não Governamental de membros independentes. Com sede em Genebra/Suíça e constituída por 162 países-membros, é a maior elaboradora voluntária de normas internacionais.

Nesse sentido, vale destacar que:

Duas características importantes que diferenciam o incêndio de materiais hidrocarbonetos, do incêndio de materiais celulósicos, são evidenciadas: a taxa do aquecimento e o fluxo de calor liberado durante a combustão.

Para os materiais combustíveis hidrocarbonetos, a temperatura alcança 1100 °C em 5 minutos de incêndio, enquanto para os materiais celulósicos, a temperatura pode chegar aos 880 °C após 40 minutos de incêndio. Comparando os fluxos do calor correspondentes, o do incêndio de celulósicos é, de aproximadamente, 100 kW/m², contra 200 kW/m² do incêndio de hidrocarboneto (WARD et al., 1996, p. 17-18, tradução nossa).

Dessa forma, os cenários de incêndio caracterizados pela presença de materiais combustíveis à base de hidrocarbonetos, tais como túneis e ambientes industriais, não podem ser representados pela curva-padrão adotada hoje pela NBR 14.432.

Para resolver esse problema, muitos países têm adotado outras curvas nominais no intuito de determinar a temperatura dos gases em função do tempo de forma mais próximo à realidade, sendo que, segundo Costa e Silva (2006, p. 7-9) as principais são:

a) UL 1709 (*Underwriter Laboratory*): para o desenvolvimento dessa curva admitiu-se um incêndio de aquecimento instantâneo e intenso, com uma combustão de 200 kW/m² de potência;

b) ASTM E1529 (*American Society for Testing and Materials*): tem por base o julgamento, a experiência e os resultados de ensaios de vários incêndios de hidrocarbonetos, sendo projetada para atribuir à combustão uma potência de 158 kW/m²;

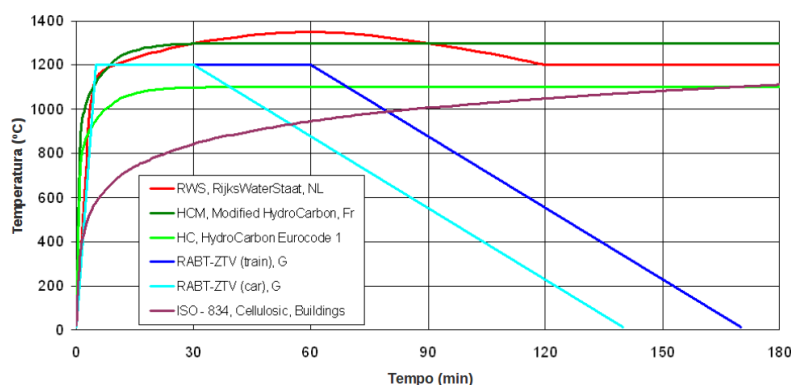
c) Curva “H”: idealizada, a priori, para projetos de segurança contra incêndio de indústrias petroquímicas e *offshore*, apropriada para materiais derivados do petróleo que poderiam causar “pequenos” incêndios em túneis;

d) RWS (*Rijkswaterstraat*): para sua elaboração admitiu-se o incêndio de um caminhão-tanque de combustíveis com capacidade de 45.000 L, capaz de gerar 300 MW de potência durante 120 minutos, admitindo 2 MJ de energia de combustão liberada por uma área de 150 m². A curva RWS é, portanto, mais rigorosa que a Curva “H”;

e) RABT-ZTV (*Richtlinie für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln – Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen*): simula o incêndio durante a explosão de um caminhão-tanque contendo líquidos derivados de petróleo, com base em resultados de uma série de testes de diversos programas de pesquisa.

A figura 3 a seguir demonstra algumas curvas nominais. Ponto importante a ser observado é a grande diferença entre as curvas nominais dos materiais à base de hidrocarboneto em comparação à curva dos materiais à base de celulose (curva ISO 834):

Figura 3 – Gráfico representativo da curva tempo-temperatura



Fonte: adaptado de MAEVSKI, 2011, p. 99

A escolha de qual das curvas nominais aplicar irá depender da análise de alguns elementos, tais como: geometria do túnel; tipos de veículos; tipos de cargas; medidas adicionais de redução do risco de incêndio; condições esperadas de tráfego (NFPA, 2011, p. 25, tradução nossa).

De forma similar, porém um pouco mais genérica, a NBR 15.661 (Proteção contra incêndio em túneis) prevê essa diferença entre a curva-padrão de incêndio aplicada aos materiais à base de celulose e as curvas nominais relativas aos materiais à base de hidrocarboneto, a saber:

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

Para o planejamento e projeto seguro de túneis rodoviários, urbanos, subaquáticos, metrô e/ou ferroviário, deve-se considerar a geração de energia de 30 MW em caso de incêndio dentro do túnel. Esse valor também é válido para os casos de restrições de circulação de produtos perigosos em túneis, atendendo à análise de risco específica (ABNT, 2012, p. 16).

Além disso, a NBR 15.661 faz ainda alusão à NFPA 502 (*Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways*⁴) e recomenda a aplicação do seguinte quadro:

Quadro 1 - Relação entre a carga térmica de veículos e o tempo para atingir o pico de queima

Tipo de veículo rodoviário	Carga térmica (MW)	Tempo p/ atingir o pico térmico (min)
Automóvel 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 demonstra que caminhão (100MW) em queima de 10min gera uma temperatura de até 1200° C

Fonte: ABNT, 2012, p. 17

⁴ Padrão para túneis rodoviários, pontes, estradas e outro acesso limitado

Em suma, o que se pretende demonstrar no presente capítulo é que há uma grande diferença no desenvolvimento do incêndio em túneis para o incêndio que ocorre nas outras edificações. Essa diferença já é levada em consideração pelas normas nacionais e internacionais no que diz respeito às exigências do TRRF dos materiais envolvidos na estrutura dos túneis.

Portanto, da mesma forma, um investigador de incêndio deve estar atento a essas diferenças entre ambas as dinâmicas. Como visto, o incêndio envolvendo um veículo dentro de um túnel atinge temperaturas muito mais elevadas e com muito mais rapidez do que o incêndio envolvendo uma edificação comum. O conhecimento prévio por parte do investigador a respeito da diferença desses dois fatores (tempo e temperatura) é essencial para que ele formule seu raciocínio com clareza e convicção no momento da reconstrução do cenário de uma investigação de incêndio em túneis.

3. A EVOLUÇÃO DO INCÊNDIO EM TÚNEIS DE ACORDO COM SUAS CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS PECULIARES

Quando um incêndio é iniciado em um túnel, o fluxo de gases quentes gerados pela combustão se eleva até atingir o topo (no ponto logo acima de onde o incêndio se iniciou) para, em seguida, fluir simetricamente em ambos os sentidos longitudinais (CARVALHO, 2013, p. 17).

Entretanto, o investigador de incêndio deve estar atento a alguns fatores que podem influenciar essa simetria do fluxo de gases após atingirem o teto, tais como: direção do vento; inclinação natural do terreno; e o sistema de ventilação. Os dois primeiros fatores são comuns a qualquer investigação e devem ser observados por ocasião de qualquer perícia. Já o sistema de ventilação merece algumas considerações que serão vistas ao longo do presente capítulo. De início, é importante que se conheça os tipos de ventilação previstas na NBR 15.661, a saber:

5.3.3.2 Ventilação Natural (para túneis com comprimento $\leq 500\text{m}$): Utilizado para túneis de pequenos comprimentos, dependendo, no entanto, do tipo de tráfego unidirecional/bidirecional, da inclinação e do volume do tráfego [...]

5.3.3.3 Ventilação longitudinal (por jatos-ventiladores) até 3.000 m: [...] produz um fluxo de ar uniforme ao longo de toda a extensão do túnel, sempre na mesma direção [...]

5.3.3.4 Ventilação longitudinal (por jatos-ventiladores e precipitadores eletrostáticos): [...] Em casos de congestionamento e acidentes, com ou sem incêndio em seu interior, estes túneis devem permitir a eliminação de gases de exaustão, material particulado e da fumaça do incêndio.

5.3.3.5 Ventilação forçada, semilongitudinal (por ventiladores axiais), horizontais e verticais: [...] existe um poço ou abertura intermediária, provido de equipamentos de ventilação, por onde o ar é exaurido ou insuflado no interior do túnel. As embocaduras ou aberturas nas extremidades do túnel são as tomadas ou saídas do ar, conforme o tipo de ventilação adotada [...]

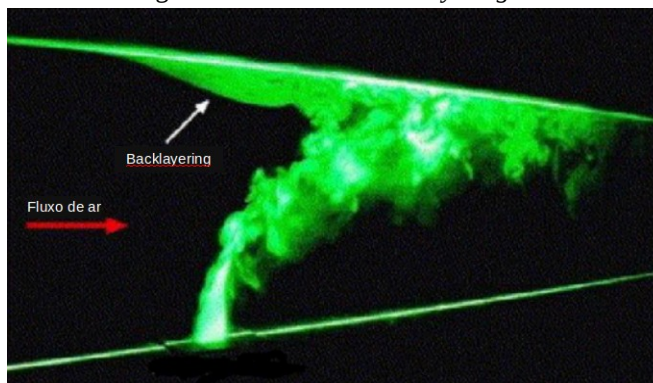
5.3.3.6 Ventilação transversal: [...] A insuflação e a exaustão atuam paralelamente juntas, não havendo, portanto, percurso de ar viciado ao longo do túnel. Em condições ideais o ar é insuflado na parte inferior e extraído na parte superior do túnel [...] (ABNT, 2012, p. 14-16).

Apesar da diversidade de tipos de sistema de ventilação, o sistema mais encontrado no Brasil e, mais especificamente em Santa Catarina, é o sistema de ventilação longitudinal.

Ao ativar esse sistema, a simetria dos gases quentes que atingem o teto é interrompida e o fluxo no sentido oposto à ventilação imposta é reduzido, fazendo com que os gases dirijam-se à saída do túnel (CARVALHO, 2013, p. 17).

Importante mencionar que, caso o sistema de ventilação longitudinal não esteja projetado para funcionar adequadamente, poderá ocorrer o fenômeno conhecido como “*backlayering*” (figura 4). Esse fenômeno, segundo a NBR 15.661, consiste no “[...] movimento reverso do fluxo de fumaça e dos gases quentes em relação à direção do fluxo de ar de ventilação.” (ABNT, 2012, p. 3).

Figura 4 – Fenômeno *Backlayering*



Fonte: CARVALHO, 2013, p. 18

Para evitar esse problema, a própria NBR 15.661 exige do sistema longitudinal que, “[...] após o início do incêndio, deve ser evitada a formação do *backlayering* da fumaça do incêndio, produzindo velocidade de ar longitudinal maior que a velocidade crítica de ar na direção do fluxo de veículos⁵.” (ABNT, 2012, p. 15).

Outro fenômeno passível de ocorrer durante o incêndio em túneis é chamado de “*spalling*” (lascamento) que, segundo os entendimentos de Costa, Figueiredo e Silva (2002, p. 12), é um fenômeno comum de desagregação do concreto quando submetido a altas

⁵ Velocidade mínima necessária para evitar o movimento reverso do fluxo de gases quentes em relação à direção do fluxo de ar de ventilação

temperaturas, podendo se manifestar na forma de desprendimentos do reboco ou por meio de um violento estilhaçamento (figura 5). Essa elevação da temperatura nas estruturas de concreto conduz à redução de resistência e rigidez do material.

Figura 5 – Anéis de concreto do Eurotúnel destruídos pelo *spalling*, expondo a armadura à ação direta do fogo



Fonte: COSTA; FIGUEIREDO; SILVA, 2002, p. 2

Em resumo, o presente capítulo procurou trazer alguns fatores peculiares que influenciam a evolução de um incêndio em túneis, tais como: o sistema de ventilação; o fenômeno *backlayerin*; e o fenômeno *spalling*.

Dessa forma, ao realizar uma perícia em túnel, o investigador deve procurar saber, dentre outros aspectos, se o local era provido de ventilação, qual o tipo, e se a mesma funcionava corretamente. Além disso, deve estar atento ao caminho percorrido pelos gases que, como visto, pode sofrer a influência do fenômeno conhecido como *backlayering* e, por fim, deve estar atento às marcas de combustão deixadas no local, em especial nos pontos onde houve o *spalling*, os quais, além de indicarem um comprometimento estrutural, são caracterizados pela presença de temperaturas elevadas e podem trazer informações essenciais para a reconstituição do local.

4. ESTUDO DE CASOS

Os casos envolvendo incêndio em túneis não acontecem com frequência, porém, quando acontecem, costumam ter consequências catastróficas. A severidade dos danos causados se dá, principalmente: pelo curto espaço de tempo em que a temperatura máxima do incêndio é atingida; pela dificuldade de evacuação do local (tendo-se em vista o excesso de fumaça e a distância que as vítimas têm que percorrer até a saída); e pela dificuldade no

combate, uma vez que a entrada da guarnição no local implica numa série de riscos aos combatentes.

Para que se tenha ideia dos danos causados nesse tipo de ocorrência, o quadro a seguir mostra os 15 principais incêndios ocorridos em túneis rodoviários ao redor do mundo nos últimos 40 anos, e suas consequências⁶:

Quadro 2 – Principais incêndios em túneis rodoviários

Ano	Túnel	País	Extensão (m)	Duração do Incêndio	Danos	
					Pessoas	Veículos
1978	Velsen	Holanda	770	1h 20min	5 mortos 5 feridos	4 caminhões 2 carros
1979	Nihonzaka	Japão	2045	159h	7 mortos 2 feridos	127 caminhões 46 carros
1982	Caldecott	Estados Unidos	1028	2h 40min	7 mortos 2 feridos	
1983	Pecorila Galleria	Itália	662		9 mortos 22 feridos	10 carros
1993	Serra Ripoli	Itália	442	2h 30 min	4 mortos 4 feridos	5 caminhões 11 carros
1996	Isola delle Femmine	Itália	148		5 mortos 20 feridos	1 caminhão-tanque 1 ônibus 18 carros
1999	Mont Blanc	França/Itália	11600	53h	39 mortos	23 caminhões 10 carros 1 motocicleta 1 caminhão de combate a incêndio
1999	Tauern	Áustria	6401	15h	12 mortos 49 feridos	14 caminhões 26 carros
2001	Gleinalm	Áustria	8320		5 mortos 4 feridos	
2001	Guldborgsund	Dinamarca	460		5 mortos 6 feridos	
2001	St. Gottard	Suíça	16900	48h	11 mortos	2 caminhões 23 carros
2006	Viamala	Suíça	760		9 mortos 6 feridos	1 ônibus 2 carros
2007	Santa Clarita	Estados Unidos/Canadá	165		3 mortos 23 feridos	33 caminhões 1 carro
2009	Eiksund	Noruega	7700		5 mortos	1 caminhão 1 carro
2010	Wuxi Lihu	China			25 mortos 19 feridos	1 ônibus

Fonte: elaborado pelo autor, adaptado de MAEVSKI, 2011, p. 22-23

⁶ Quadro atualizado até o ano de 2011.

Em análise ao quadro, percebe-se que apenas nesses 15 incêndios mencionados, o número de mortes chega a 151 e de feridos a 162. Visando evitar novas tragédias, muitos países já vêm se preocupando em realizar investigações após o acontecimento desses eventos no intuito de descobrir as causas que deram origem aos incêndios e de identificar as principais falhas que ocorreram durante todo o ciclo operacional. Além disso, as investigações realizadas também contribuem sugerindo melhoria na normatização, na fiscalização e no combate ao sinistro.

O Japão, por exemplo, após a realização da investigação do incêndio ocorrido no túnel Nihonzaka em 1979, tomou as seguintes providências:

- a) proibição da circulação de caminhões com carga perigosa;
 - b) proibição da ultrapassagem dentro do túnel;
 - c) instalação de radares para não permitir circulação em altas velocidades;
 - d) instalação de PMV⁷ nas entradas do túnel (dois em cada entrada) e mais dois internamente;
 - e) união dos dois túneis, pois o túnel onde pegou fogo foi anexado ao seu paralelo que tinha sentido contrário, aumentando desta forma para 4 faixas de mesmo sentido;
 - f) construção de outro túnel. O novo túnel, de 3 faixas, distante do existente, tem maior número de faixas, que possuía 2 faixas;
 - g) construção de área de descanso (baia de emergência) para carros no interior do túnel;
 - h) aumento da iluminação dentro do túnel;
 - i) colocação de uma sinalização semafórica (vermelho/verde) nas entradas do túnel.
- (SCABBIA, 2007, p. 18-19)

Outro exemplo foi os Estados Unidos que, após a investigação do acidente no túnel Caldecott em 1982, adotou as seguintes medidas:

- a) avaliar e revisar, onde necessário, exigências de equipamento e os procedimentos de emergência no Túnel de Caldecott, informando o motorista antes de sua aproximação do local do acidente;
- b) desenvolver sistema com resposta rápida a emergências e treinar empregados do túnel em todas as fases e as etapas de emergência, inclusive para casos de incêndio com periodicidade tal que possa evidenciar a capacidade dos funcionários quando em situações de estresse;
- c) identificar de modo claro as saídas do túnel;
- d) proibir mudanças de pistas ou ultrapassagens no interior do túnel;
- e) efetuar inspeção veicular;
- f) melhorar as condições de supervisão e atuação por meio da adoção de sistemas de segurança em caso de incêndio e sistema de comunicação;
- g) proibir o movimento de produtos perigosos no túnel;
- h) rever a administração federal da estrada e os programas urbanos de administração do transporte que incentivem a segregação dos veículos, de modo a evitar que a estrada apresente um risco desnecessário ao público em função do compartilhamento da estrada com a movimentação de caminhões trafegando com produtos perigosos;
- i) monitorar os condutores com problemas médicos conhecidos. (SCABBIA, 2007, p. 19-20).

⁷ Painel de Mensagens Variáveis

O terceiro exemplo, e talvez o mais importante deles, refere-se ao relatório de investigação do incêndio ocorrido em 1999 no túnel Mont Blanc, que liga França à Itália. Como se observa no quadro 2, apenas nesse incêndio ocorreram 39 óbitos, o que o caracteriza como o pior incêndio ocorrido em túneis na história. Após a realização da perícia, o relatório de investigação propõe diversas melhorias, tais quais:

- a) examinar a possibilidade de reduzir os riscos potenciais de incêndio por meio do controle dos materiais transportados;
- b) examinar a possibilidade de inspeção dos veículos antes de seu ingresso no túnel;
- c) instalação de sistema automático de detecção de incidentes (DAI);
- d) unificação dos objetivos, missões e políticas de investimento, inclusive nos túneis binacionais;
- e) CCO⁸ único;
- f) operação viária capaz de supervisionar os veículos, inclusive a sua quantidade no interior do túnel e possuir agilidade e plena capacidade de atuação;
- g) de modo geral os sistemas/equipamentos, principalmente os sistemas elétricos e de comunicação no interior do túnel, devem estar aptos a funcionar mesmo na ocorrência de incêndios;
- h) de modo a evitar-se o efeito dominó (um carro queimar o próximo) quando ocorrer congestionamento espaçar os carros;
- i) diante de um incêndio os usuários devem ser informados de modo claro, com sinalização visual e sonora, permitindo a ele conhecer o sinistro e saber onde se localiza a saída de emergência;
- j) existência ininterrupta de serviço de primeira atuação composta por uma equipe de 3 a 5 especialistas capazes de atuar em 5 minutos após a ocorrência;
- k) plano único de atuação, mesmo em túneis binacionais;
- l) deve existir um plano único de segurança pública, prevendo ensaios unificados anuais, principalmente em túneis binacionais;
- m) regulamentação mesmo em túneis binacionais;
- n) para túneis bidirecionais deve existir base jurídica para controle e operação de túneis, prevendo um diagnóstico de segurança, bem como obrigar a criação de um plano de atuação local. (SCABBIA, 2007, p. 20-21)

Os três relatórios citados anteriormente são apenas alguns exemplos da importância de se realizar uma investigação após a ocorrência de incêndio em túneis. Como visto, por meio das investigações surgem diversas recomendações e sugestões que, muitas vezes, acabam por tornar-se normas e procedimentos a serem adotados com o intuito de prevenir ou mitigar novas catástrofes dessa natureza.

Nesse sentido, os relatórios investigativos de incêndios realizados (em especial aquele feito na França após o acidente no túnel Mont Blanc) contribuíram sobremaneira para uma série de revisões e adequações das normas regulamentadoras da segurança contra incêndio em túneis em todo o mundo.

O quadro a seguir mostra o histórico evolutivo das principais normas de segurança relacionadas à segurança contra incêndio em túneis:

⁸ Centro de Controle Operacional

Quadro 3 – Normas de segurança relacionadas a túneis

Norma	Título	País/ Local	Versão		
			Válida em 1999	Após acidente no túnel Mont Blac	Em vigor
NFPA	NFPA 502: Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways	EUA	1987	2001	2014
Directiva da União Européia	Requisitos mínimos de segurança para os túneis da Rede Rodoviária Transeuropéia	União Européia	1988	2001	2004
Australasian Fire Authorities Council	Fire Safety Guidelines For Road Tunnels	Austrália	-	2001	2001
NBR	NBR 15.661: Proteção contra incêndio em túneis	Brasil	-	2009	2012
	NBR 15.775: Sistemas de segurança contra incêndio em túneis — Ensaios, comissionamento e inspeções	Brasil	-	2009	2009

Fonte: adaptado de Scabbia, 2007, p. 22.

Como visto, a NBR 15.661/2012 e a NBR 15.775/2009 são hoje as normas utilizadas como referência em segurança contra incêndio no Brasil, as quais tratam de diversos sistemas de segurança, dentre eles: sistema preventivo por extintores; sistema hidráulico preventivo; saídas de emergência; iluminação de emergência; sistema de ventilação; entre outros.

Na mesma linha, os Corpos de Bombeiros de alguns Estados já elaboraram suas normas de segurança contra incêndio aplicadas especificamente aos túneis, a exemplo de São Paulo (IT nº 35/2011/CBMSP) e Paraná (NPT nº 35/2012/CB/PMPR). Tais normas, além de preencherem algumas lacunas deixadas pelas NBR's, tem como objetivo adequar as exigências de acordo com as especificidades de cada Estado.

Por outro lado, o Estado de Santa Catarina, apesar de já ter possuído uma Instrução Normativa bastante superficial que tratava dos sistemas de segurança aplicados a túneis e galerias, hoje não possui nenhuma norma em vigor que possa ser aplicada na segurança contra incêndio em túneis.

Portanto, mais do que nunca, se faz necessário que haja investigadores aptos a realizarem perícia nos túneis do Estado, uma vez que, como visto ao longo do presente capítulo, serão eles os responsáveis por fornecerem dados e sugestões que servirão como subsídios para a elaboração das futuras normas de segurança contra incêndio em túneis no Estado de Santa Catarina.

5. METODOLOGIA DE INVESTIGAÇÃO DE INCÊNDIO EM TÚNEIS

Para que um investigador de incêndio possa atuar com precisão na realização de uma perícia de incêndio em túneis, ele deve estar atendo às peculiaridades trazidas pelo cenário e, principalmente, deve saber diferenciar o desenvolvimento desse incêndio em relação ao das outras edificações.

Dessa forma, o presente capítulo tem como objetivo elencar alguns pontos importantes a serem observados pelo perito em cada uma das fases da investigação de um incêndio em túneis. Vale mencionar que as fases da investigação expostas a seguir foram adaptadas da metodologia de investigação de incêndio adotada hoje pelo Corpo de Bombeiros Militar do Estado de Santa Catarina.

5.1 Plano de investigação

O plano de investigação nada mais é do que o planejamento, por parte do investigador, daquilo que ele pretende fazer e de como ele pretende realizar. Esse planejamento pode ser dividido duas fases: planejamento geral e planejamento específico.

5.1.1 Planejamento Geral

O planejamento geral refere-se ao planejamento que o investigador deve realizar antes mesmo da ocorrência de qualquer perícia. Nesse planejamento entram a preparação dos materiais utilizados na perícia, da equipe empregada, da viatura utilizada, etc.

5.1.2 Planejamento Específico

Já no planejamento específico, o investigador deve estar atento a alguns detalhes atinentes àquela ocorrência para qual foi acionado. Dessa forma, caso o investigador se depare com uma investigação de incêndio em túnel, além dos preparativos rotineiros a qualquer perícia, ele deve estar atento ainda a alguns outros detalhes.

O primeiro deles, diz respeito ao fato do túnel ser uma edificação pública. Sendo assim, o investigador deverá verificar se o túnel a ser periciado localiza-se em área urbana ou em rodovia federal. Essa constatação será de suma importância para que o investigador defina

quais órgãos deverão ser informados sobre a realização da perícia no local e ainda, para quais órgãos poderão ser solicitados possíveis apoios.

Ainda na fase do planejamento específico, o investigador deverá procurar se informar a respeito da situação em que o túnel se encontrava antes do sinistro, para tanto, deverá solicitar ao Chefe da Seção de Atividades Técnicas do CBMSC responsável pela circunscrição, que averigüe a situação e emita os documentos necessários. Caso o túnel não possua documentação junto ao CBMSC, o investigador deve procurar realizar contato com o órgão responsável para que providencie a documentação que julgar pertinente.

Outro aspecto importante a ser levado em conta no momento do planejamento específico é o cenário caótico com o qual o investigador irá se deparar. O que se espera após a extinção do incêndio dentro de um túnel, são quilômetros de congestionamento e milhares de motoristas impacientes aguardando a liberação da pista para transpor o túnel. Sendo assim, o investigador deverá procurar chegar ao local o mais rápido possível no intuito de evitar que o local seja liberado para passagem de veículos sem a sua presença. Se for necessário, o investigador deve fazer contato com o Comandante da guarnição para orientá-lo sobre os procedimentos a serem adotados.

É notório que, para a realização de toda e qualquer perícia, o ideal é que o local esteja sempre isolado. Porém, em se tratando de incêndio em túnel, o investigador deve analisar o quanto antes a possibilidade de liberar a passagem dos veículos para evitar maiores transtornos à sociedade. Para a realização dessa análise, o investigador deverá, em primeiro lugar, verificar se haverá prejuízo irreparável à perícia com a liberação da passagem de veículos. Caso não haja prejuízo, o investigador deverá analisar se a estrutura foi atingida a ponto de oferecer risco à população. Havendo dúvidas em relação às condições estruturais, o investigador deverá solicitar a presença de um engenheiro responsável para que o mesmo emita um laudo técnico para posterior liberação do local.

Caso o incêndio aconteça no período noturno, onde a visibilidade do perito ficará prejudicada, o mesmo deverá dirigir-se ao local ainda na mesma noite para verificar se há necessidade ou não de manter o túnel interditado, além de outros procedimentos que julgar necessário, como, por exemplo, coleta de depoimentos e registro fotográfico.

Por fim, é necessário que o investigador esteja consciente da complexidade do caso, onde, possivelmente, haverá uma operação conjunta de diversos órgãos, tais como: Polícia Militar; Polícia Rodoviária Federal; Defesa Civil; Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte (DNIT); Instituto Geral de Perícia (IGP); Fundação do Meio Ambiente (FATMA);

Guarda Municipal; etc. Portanto, é essencial que haja um respeito mútuo entre o investigador e os demais órgãos cooperadores (SANTA CATARINA, 2015, p.13).

5.2 Observação do local

Antes de entrar no túnel, o investigador deve realizar uma inspeção visual externa. Nessa inspeção, o investigador deve observar se o túnel oferece condições mínimas de segurança para a execução da perícia.

Oferecendo condições mínimas, o investigador deve entrar no túnel e iniciar a sua investigação. Nesse momento ele irá definir o sentido de propagação das chamas através das marcas de combustão, do grau de carbonização dos materiais e dos pontos de queima mais intensos. Com essas observações ele fará o levantamento de todas as hipóteses possíveis (SANTA CATARINA, 2015, p. 15).

Ponto importante a ser observado é a presença da ventilação no local e a constatação de que a mesma estava (ou não) funcionando no momento do sinistro, pois, como visto no início da pesquisa, ela será um fator determinante no caminho percorrido pelas chamas.

Ainda nessa fase, o investigador deve procurar observar se havia sistema de monitoramento por câmeras dentro do túnel, uma vez que a análise das imagens poderá economizar horas de trabalho do perito.

5.3 Coleta de depoimentos

Assim como qualquer incêndio, a maior parte das investigações de incêndio em túneis tem como causa a ação pessoal, seja ela direta ou indireta. Portanto, a coleta de depoimentos é, e sempre será, de grande valia para o investigador.

Nessa fase não há diferenciação em relação à coleta de depoimentos em incêndio de outra natureza. Sendo assim, ela deverá ser realizada o quanto antes e da forma mais rápida possível, sempre por escrito e assinada pela testemunha.

5.4 Determinação da zona de origem

Por meio da dedução do caminho da propagação das chamas e da análise dos depoimentos, o investigador irá determinar a zona de origem.

Uma consideração importante refere-se ao cuidado que o investigador deve ter na avaliação dos caminhos percorridos pelas chamas em incêndios de grandes proporções ocorridos em túneis. Devido à peculiaridade dos materiais combustíveis existentes no local (pneus e líquidos inflamáveis), pode haver queimas intensas e explosões que não caracterizam o foco inicial. Para evitar tomar conclusões precipitadas erroneamente, o investigador deve estar atento aos pequenos detalhes e examinar todos os locais do cenário de incêndio antes de chegar a qualquer conclusão.

Outra observação refere-se ao apontamento do local a ser indicado como zona de origem. Diferentemente de uma edificação comum, os túneis não possuem cômodos ou compartimentos que possam ser mencionados no laudo como foco inicial. Sendo assim, o que se sugere, é a indicação da metragem na qual foi determinada a zona de origem, a partir da entrada do túnel. Em caso de túneis bidirecionais, o investigador deve, sempre que possível, indicar qual das entradas é a referência para marcação da metragem e mencionar em qual das pistas se encontra a zona de origem.

5.5 Esquadrinhamento da área

O esquadrinhamento da área nas ocorrências de incêndio em túnel normalmente não se faz necessário. Porém, como visto antes, podem ocorrer situações em que o concreto do teto venha a colapsar devido ao fenômeno conhecido como *spalling*, o que poderia dificultar a visualização do foco inicial. Diante dessa situação, caso julgue pertinente, o investigador poderá se utilizar da técnica de esquadrinhamento prevista na metodologia de incêndio em edificações comuns para facilitar a visualização do local, organizando e distinguindo os quadrantes já examinados daqueles ainda não examinados.

5.6 Escavação dos escombros

Da mesma forma que o esquadrinhamento, a escavação dos escombros também será uma exceção na investigação de incêndio em túneis pelo fato de não haver objetos que possam cair sobre aqueles que deram origem ao incêndio. Da mesma forma que o item anterior, a escavação dos escombros poderá ser utilizada excepcionalmente nos casos de desabamento do concreto (*spalling*) ou dos equipamentos de ventilação localizados no teto do túnel ou ainda nos casos em que a carga do veículo esteja participando do incêndio.

5.7 Determinação do foco inicial

O foco inicial de um incêndio em túnel será, na grande maioria das situações, um veículo. Nesse caso, o trabalho do investigador será o de identificar em qual dos veículos o incêndio se iniciou.

Porém, apesar de serem remotas, outras possibilidades não podem ser descartadas. Para tanto, o investigador deve sempre lembrar de analisar os equipamentos de ventilação, os equipamentos de iluminação, as instalações elétricas, ou até mesmo a presença de materiais estranhos, os quais podem ter sido colocados no local com o intuito de causar o incêndio.

5.8 Reconstituição

A reconstituição tem por finalidade auxiliar o investigador na análise do caminho percorrido pelas chamas. No incêndio em túneis, ela pode se feita da mesma forma que é feita em qualquer outra perícia, ou seja, seguindo a ordem da escavação dos materiais (quando for o caso), por meio da observação das marcas de combustão e padrões de queima e ainda com o auxílio das testemunhas que presenciaram o fato. Também pode-se utilizar o projeto arquitetônico e/ou preventivo contra incêndio, ou ainda fotografias tiradas antes do incêndio (SANTA CATARINA, 2015, p. 16).

5.9 Estudo dos materiais queimados

Nessa fase o investigador deve analisar os materiais queimados no intuito de descobrir o agente gerador do fogo. Tendo-se em vista que o material queimado examinado irá se resumir basicamente ao material pertencente à estrutura do túnel, aos sistemas de ventilação e iluminação, e aos veículos envolvidos, é essencial que o investigador conheça o mecanismo e as condições de funcionamento desses materiais (SANTA CATARINA, 2015, p. 16-17).

5.10 Comprovação do agente gerador do fogo

O procedimento para a comprovação do agente gerador do fogo de um incêndio em túnel nada difere dos procedimentos de outras perícias de incêndio, ou seja, para levantar quais eram os agentes geradores de fogo existentes no local e quais suas possíveis relações

com os materiais queimados encontrados no foco inicial, o investigador deverá utilizar-se: dos dados colhidos no relatório de observação do local; da análise das provas recolhidas; e do conteúdo dos depoimentos. Por meio dessa verificação, o investigador irá excluir aqueles agentes geradores de fogo que não fazem conexão com o foco inicial para, enfim, chegar à conclusão sobre qual deles foi o agente gerador do fogo que deu causa ao incêndio (SANTA CATARINA, 2015, p. 17).

5.11 Determinação das causas e sub causas

A causa será a consequência da investigação realizada, ou seja, assim que for descoberto como surgiu o incêndio, a causa e a subcausa surgirão naturalmente.

A metodologia de investigação de incêndio atualmente aplicada no Estado de Santa Catarina prevê as seguintes causas de incêndio: ação humana; ação humana direta; ação humana indireta; natural; acidental e indeterminada.

Apesar de todas as causas serem possíveis, percebeu-se com a pesquisa que na maioria esmagadora das vezes a causa do incêndio em túneis está ligada a acidentes com veículos. Dessa forma, vale lembrar que, segundo o critério adotado na metodologia do CBMSC, o acidente de trânsito dificilmente será classificado como causa acidental, uma vez que, normalmente, ocorrem por culpa (ação humana indireta) ou dolo (ação humana direta) dos motoristas. A classificação da causa como acidental se dará apenas quando ninguém for considerado culpado pelo acidente, como, por exemplo, um veículo com defeito de fabricação ainda não conhecido.

Em relação às subcausas, a metodologia de investigação de incêndio do CBMSC prevê atualmente quatro possibilidades: agente físico; agente químico; agente biológico; e fenômeno termoelétrico. Nos incêndios em túneis, as subcausas mais comuns serão agente físico (acidentes automobilísticos) e fenômenos termoelétricos.

5.12 Planimetria e croqui

O croqui e a planimetria nas investigações dos incêndios em túneis serão tão importantes quanto em qualquer outro tipo de incêndio. São ferramentas que o investigador deve utilizar para auxiliar o leitor do laudo a compreender tudo que ocorreu.

5.13 Fotografia

Assim como a planimetria e o croqui, as fotografias também auxiliam a compreensão do laudo por parte do leitor. Além disso, servem para ilustrar e justificar toda a linha de raciocínio que fez com que o investigador chegasse a sua conclusão. Da mesma forma que as outras perícias, serão primordiais ao menos quatro fotografias: fachada (entrada e saída do túnel); zona de origem; foco inicial e agente gerador do fogo.

Vale lembrar que as fotografias serão tiradas ao longo de toda a investigação e não apenas no final. Conforme a investigação progride, o investigador irá realizando o registro fotográfico dos objetos que auxiliam na formação de suas hipóteses.

5.14 Liberação do local

Nesse momento faz-se uma revisão dos itens preenchidos no laudo e realiza-se um “pente-fino” para verificar se não foi deixado nenhum material utilizado no local.

Porém, a liberação de um túnel incendiado para a limpeza, reconstrução e reutilização requer um certo cuidado. Como já mencionado ao longo do estudo, sempre que o investigador tiver dúvidas a respeito das condições estruturais do túnel, ele deve solicitar a presença de um engenheiro responsável pela emissão de um laudo técnico para que se confirme se o local está em condições de reutilização, ou se haverá a necessidade de reformar o túnel com o objetivo de reforçar a sua estrutura. Essa informação deve ser repassada de forma clara aos outros órgãos responsáveis e, se possível, por escrito.

7 CONCLUSÃO

Considerando a problemática da inexistência de uma metodologia de investigação de incêndio voltada especificamente para as perícias em túneis no CBMSC, a presente pesquisa procurou trazer um conhecimento geral acerca do assunto, discorrendo inicialmente sobre a dinâmica do incêndio em túneis que, conforme visto, apresenta características peculiares em relação às outras dinâmicas de incêndio, destacando-se, dentre elas, sua temperatura máxima (que pode chegar a mais de 1300° C) e a rapidez com que essa temperatura é atingida.

Posteriormente, verificou-se alguns fenômenos que podem ocorrer durante o incêndio em túneis devido a suas características estruturais (*backlayering* e *spalling*) e realizou-se um estudo de casos.

Ao final, propõe-se uma nova metodologia de investigação de incêndio voltada especificamente para a perícia de incêndio em túneis. Tal metodologia foi adaptada dos procedimentos adotados atualmente no CBMSC e tem como objetivo fornecer subsídios para a realização de futuras investigações de incêndio em túneis.

Por fim, vale dizer que o presente estudo procurou abordar um tema específico da investigação de incêndio ainda não explorada no campo da pesquisa. Portanto, este seria apenas um ponto inicial para que os futuros investigadores interessados pelo assunto possam dar prosseguimento à pesquisa, complementando-a e atualizando-a continuamente.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14.432**: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.661**: Proteção contra incêndio em túneis. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.775**: Sistemas de segurança contra incêndio em túneis - Ensaios, comissionamento e inspeções. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

CARVALHO, Julia Epichin Cheroto de. **Aplicação de fluidodinâmica computacional para análise de segurança de túneis rodoviários sob incêndio**. 2013. 65 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DE SÃO PAULO. **Instrução Técnica 35**: Túnel rodoviário. São Paulo: CBMSP, 2011.

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO PARANÁ. **Norma de Procedimento Técnico 035**: Túnel rodoviário. Curitiba: PMPR, 2012.

COSTA, Carla Nenes; SILVA, Valdir Pignatta. **Revisão Histórica das Curvas Padronizadas de Incêndio**. 2006. 13 f. Artigo - Núcleo de Pesquisa em Tecnologia da Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

COSTA, Carla Neves; FIGUEIREDO, Antônio Domingues de; SILVA, Valdir Pignatta e. **O fenômeno do lascamento ("spalling") nas estruturas de concreto armado submetidas a incêndio - uma revisão crítica**. 2002. 16 f. Artigo - Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

MAEVSKI, Igor Y.. **NCHRP Synthesis 415**: Design Fires in Road Tunnels. Washington, D.c: Transportation Research Board, 2011.

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION. **NFPA 502**: Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways. Massachusetts: 2011.

SANTA CATARINA. Charles Fabiano Acordi. Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina. **Metodologia da investigação de incêndios**. Florianópolis: CBMSC, 2015.

SAUNDERS, Mark; LEWIS, Philip; THORNHILL, Adrian. Research Methods for Business Students. Third edition. England: Prentice Hall, 2003.

SCABBIA, André Luiz Gonçalves. **Túneis rodoviários**: proposta de avaliação de conformidade para liberação ao uso e operação comercial. 2007. Tese (Doutorado em Dinâmica das Máquinas e Sistemas) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

SILVA, Valdir Pignatta e. **Estruturas de aço em situação de incêndio**. 1997. 170 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

WARD, Thomas et al. Epoxy Intumescent Coatings Current Philosophy. **Protective Coatings Europe – Pce Magazine**, v. 1, n. 12, p.16-23, dez. 1996. Disponível em: <<http://docslide.us/documents/epoxy-coating.html>>. Acesso em: 25 out. 2015.