

**CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO DISTRITO FEDERAL
DEPARTAMENTO DE ENSINO, PESQUISA, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DIRETORIA DE ENSINO
CENTRO DE ESTUDOS DE POLÍTICA, ESTRATÉGIA E DOCTRINA
CURSO DE APERFEIÇOAMENTO DE OFICIAIS**

CAP QOBM/Comb. GEORGE LOPES **PALMEIRA JUNIOR**



**DESENVOLVIMENTO DE NORMATIVA DE CONTROLE DE FUMAÇA
PARA EDIFICAÇÕES DO DISTRITO FEDERAL**

**BRASÍLIA
2021**

CAP QOBM/Comb. GEORGE LOPES **PALMEIRA** JUNIOR

**DESENVOLVIMENTO DE NORMATIVA DE CONTROLE DE FUMAÇA
PARA EDIFICAÇÕES DO DISTRITO FEDERAL**

Monografia apresentada ao Centro de Estudos de Política, Estratégia e Doutrina como requisito para conclusão do Curso de Aperfeiçoamento de Oficiais do Corpo de Bombeiros Militar do Distrito Federal.

Orientador: CEL QOBM/Compl. **GEORGE** CAJATY BARBOSA BRAGA

BRASÍLIA
2021

CAP QOBM/Comb. GEORGE LOPES **PALMEIRA JUNIOR**

**DESENVOLVIMENTO DE NORMATIVA DE CONTROLE DE FUMAÇA PARA
EDIFICAÇÕES DO DISTRITO FEDERAL**

Monografia apresentada ao Centro de Estudos de Política, Estratégia e Doutrina como requisito para conclusão do Curso de Altos Estudos para Oficiais Combatentes do Corpo de Bombeiros Militar do Distrito Federal.

Aprovado em: ____/____/____.

BANCA EXAMINADORA

André Telles Campos – Ten-Cel. QOBM/Comb.
Membro

Sueli Bomfim De Matos – Ten-Cel. QOBM/Comb.
Presidente

Gleydson de Carvalho Andrade – Ten-Cel. QOBM/Comb.
Membro

George Cajaty Barbosa Braga – Cel. QOBM/Compl.
Orientador

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA PUBLICAÇÃO

AUTOR: Cap. QOBM/Comb. George Lopes **Palmeira** Junior

TÍTULO: Desenvolvimento de normativa de controle de fumaça para edificações do Distrito Federal

DATA DE DEFESA: 11/02/2021.

Acesso ao documento		
<input checked="" type="checkbox"/> Texto completo	<input type="checkbox"/> Texto parcial	<input type="checkbox"/> Apenas metadados
Em caso de autorização parcial, especificar a(s) parte(s) que deverá(ão) ser disponibilizadas:		

Licença
<p>DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO EXCLUSIVA</p> <p>O referido autor:</p> <p>a) Declara que o documento entregue é seu trabalho original, e que detém o direito de conceder os direitos contidos nesta licença. Declara também que a entrega do documento não infringe, tanto quanto lhe é possível saber, os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade.</p> <p>b) Se o documento entregue contém material do qual não detém os direitos de autor, declara que obteve autorização do detentor dos direitos de autor para conceder ao CBMDF os direitos requeridos por esta licença, e que esse material cujos direitos são de terceiros está claramente identificado e reconhecido no texto ou conteúdo do documento entregue.</p> <p>Se o documento entregue é baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o CBMDF, declara que cumpriram quaisquer obrigações exigidas pelo respectivo contrato ou acordo.</p> <p>LICENÇA DE DIREITO AUTORAL</p> <p>Na qualidade de titular dos direitos de autor da publicação, autorizo a Biblioteca da Academia de Bombeiro Militar disponibilizar meu trabalho por meio da Biblioteca Digital do CBMDF, com as seguintes condições: disponível sob Licença Creative Commons 4.0 International, que permite copiar, distribuir e transmitir o trabalho, desde que seja citado o autor e licenciante. Não permite o uso para fins comerciais nem a adaptação desta.</p> <p>A obra continua protegida por Direito Autoral e/ou por outras leis aplicáveis. Qualquer uso da obra que não o autorizado sob esta licença ou pela legislação autoral é proibido.</p>

George Lopes **Palmeira** Junior

Cap. QOBM/Comb.

RESUMO

Um sistema de controle de fumaça eficaz, impede que, durante a ocorrência de incêndios, a fumaça tome conta do ambiente em um curto espaço de tempo, permitindo, primordialmente, a saída segura dos ocupantes. A inalação da fumaça pode provocar intoxicação e envenenamento, sendo responsável pela maior parte dos casos de morte em incêndios. A retirada da fumaça também auxilia o combate realizado pelos bombeiros pelo fato de permitir a visualização direta do foco, prevenindo estragos ocasionados pelo uso de água em excesso. Por fim, os sistemas de controle da fumaça, ao restringirem a movimentação de partículas quentes para os demais ambientes de uma edificação, limitam e dificultam a propagação do incêndio e a danificação de bens. No Brasil não existe normatização nacional que obrigue a instalação de sistemas de controle de fumaça. Em alguns estados brasileiros os Corpos de Bombeiros exigem a instalação desses sistemas em determinados tipos de edificação, todavia, sem um padrão estabelecido. Atualmente o Corpo de Bombeiros Militar do Distrito Federal não conta com norma técnica para sistemas de controle de fumaça. Constatada a importância dos sistemas de controle de fumaça e a ausência de uma uniformidade na sua exigência no Brasil, o presente trabalho estudou os princípios e principais sistemas de controle de fumaça, a partir de uma revisão do padrão americano e da instrução técnica do Estado de São Paulo, de trabalhos científicos e do levantamento da atual prática nos demais estados do Brasil. Após reunião e estudo das técnicas apresentadas na literatura, formando uma base de conhecimento adequada para o posterior desenvolvimento do documento técnico, foi transcrita uma sugestão de parte de norma técnica para o Distrito Federal, aplicável em todo o Brasil.

Palavras-chave: Fumaça. Incêndio. Norma.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Zonas de deposição de partículas no trato respiratório.....	25
Figura 2 – Sistema de ventilação longitudinal em túnel	31
Figura 3 – Esquema de montagem do experimento.....	33
Figura 4 – Experimento n° 14 com a cortina de ar desligada (esq.) e ligada (dir.)	34
Figura 5 – Exemplo de acantonamento utilizado na IT-15 SP	45
Figura 6 – Exemplo de extração da fumaça utilizado na IT-15 SP	46
Figura 7 – Quadro dos sistemas de extração de fumaça e introdução de ar utilizado na IT-15 SP	46
Figura 8 – Determinação dos locais onde deve haver controle de fumaça, por ocupação, utilizado na IT-15 SP.....	47
Figura 9 – Determinação dos locais onde deve haver controle de fumaça, por ocupação, utilizado na IT-15 SP.....	47
Figura 10 – Átrio conforme IT-15 SP	49
Figura 11 – Quadro das definições e conceitos da IT 15	50
Figura 12 – Entrada de ar e extração natural conforme IT-15 SP	52
Figura 13 – Entrada de ar e extração natural por meio de dutos conforme IT-15 SP.....	52
Figura 14 – Divisão em áreas de acantonamento conforme IT-15 SP	53
Figura 15 – Altura de referência, livre de fumaça e da zona enfumaçada conforme IT-15 SP	54
Figura 16 – Classificação de risco para as demais ocupações conforme IT-15 SP ..	55
Figura 17 – Taxa de porcentagem para determinação das áreas de abertura conforme IT-15 SP	55
Figura 18 – Dimensões do incêndio conforme IT-15 SP	57
Figura 19 – Taxa de liberação de calor conforme IT-15 SP	57
Figura 20 – Fator de ajuste conforme IT-15 SP	60
Figura 21 – Máxima vazão volumétrica por ponto de sucção ou ventilador individual conforme IT-15 SP	61
Figura 22 – Posição de aberturas de extração e introdução de ar conforme IT-15 SP	62
Figura 23 – Distância em linha reta das aberturas de extração conforme IT-15 SP ..	62
Figura 24 – Distância das aberturas de extração conforme IT-15 SP	63
Figura 25 – Distância das aberturas de extração conforme IT-15 SP.....	63

Figura 26 – Distância das aberturas de extração conforme IT-15 SP.....	64
Figura 27 – Átrio ao ar livre conforme IT-15 SP	65
Figura 28 – Átrio coberto aberto conforme IT-15 SP	65
Figura 29 – Átrio coberto fechado 1 conforme IT-15 SP	66
Figura 30 – Átrio coberto fechado 2 conforme IT-15 SP	66
Figura 31 – Átrio coberto aberto conforme IT-15 SP.....	66
Figura 32 – Átrio coberto padronizado conforme IT-15 SP	67
Figura 33 – Local fechado com acesso à circulação por meio de uma porta conforme IT-15 SP	68
Figura 34 – Quadro das definições da NFPA 92 (tradução livre)	71
Figura 35 – Incêndio projetado com fase estável conforme NFPA 92.....	75
Figura 36 – Utilização do fluxo de ar para impedir que a fumaça de um espaço comunicante se propague por um espaço amplo.....	77
Figura 37 – Processo necessário para a implementação de um sistema de controle de fumaça de acordo com o exigido pela NFPA 92	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Diferença de pressão mínima entre barreiras de fumaça	73
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRAVA	Associação Brasileira de Refrigeração, Ar-Condicionado, ventilação e Aquecimento
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
ASTM	American Society for Testing and Materials
CBMDF	Corpo de Bombeiros Militar do Distrito Federal
CFAST	Consolidated Model of Fire and Smoke Transport
CA	Autômatos Celulares
EUA	Estados Unidos da América
FDS	Fire Dynamics Simulator
FEMA	Federal Emergency Management Agency
ISO	International Organization for Standardization
NFPA	National Fire Protection Association
NIST	National Institute of Standards and Technology

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Fator de acidose
C_p	Calor específico do ar
FED	Fractional Effective Dose
H	Altura do telhado do edifício
LC_{50}	Concentração letal do gás
M	Massa
MDI	Di-isocianato de difenilmetano
n	Relacionado à taxa de liberação de calor do incêndio
PU	Espuma flexível de poliuretano
\dot{Q}	Taxa de calor liberado
S	Área do piso
t	Tempo
T_a	Temperatura do ar
TDI	Di-isocianato de tolueno
V	Volume
V_{CO_2}	Fator de concentração de dióxido de carbono
z	Altura da camada de fumaça
α	Velocidade de desenvolvimento do incêndio
μ	Micro
ρ_a	Densidade do ar
ρ_g	Densidade da camada superior de fumaça

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Definição do problema	13
1.2 Justificativa	14
1.3 Objetivos	15
1.4 Objetivo geral	16
1.5 Objetivos específicos	16
1.6 Definição de termos	16
2 REVISÃO DA LITERATURA	18
2.1 A fumaça	18
2.2 Composição da fumaça	18
2.3 Toxicidade da fumaça	22
2.4 Comportamento da fumaça	26
2.5 Sistemas de controle de fumaça	29
2.6 Inovação e pesquisas relacionadas ao controle de fumaça	32
2.7 Normatização internacional e brasileira	35
3 METODOLOGIA	40
3.1 Quanto à área de conhecimento	41
3.2 Quanto à sua finalidade	41
3.3 Quanto aos objetivos	42
3.4 Quanto ao método	42
3.5 Quanto à abordagem	42
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
4.1 Análise das Normas e Instruções Técnicas brasileiras	44
4.2 Instrução Técnica Nº 15/2019 - Polícia Militar do Estado de São Paulo	44
4.2.1 Instrução Técnica Nº 15/2019: Parte 1 - Regras gerais	44
4.2.2 Instrução Técnica Nº 15/2019: Parte 2 - Conceitos, definições e componentes do sistema	49
4.2.3 Instrução Técnica Nº 15/2019: Parte 3 - Controle de fumaça natural em edificações comerciais, industriais e depósitos	51
4.2.4 Instrução Técnica Nº 15/2019: Parte 4 - Controle de fumaça natural nas demais ocupações	54

4.2.5 Instrução Técnica Nº 15/2019: Parte 5 - Controle de fumaça mecânico	56
4.2.6 Instrução Técnica Nº 15/2019: Parte 6 - Controle de fumaça em rotas de fuga horizontais protegidas e subsolos	62
4.2.7 Instrução Técnica Nº 15/2019: Parte 7 - Átrios	65
4.2.8 Instrução Técnica Nº 15/2019: Parte 8 - Aspectos de segurança	68
4.3 NFPA 92 - Padrão para sistemas de controle de fumaça	69
4.4 Resultados das análises da IT-15 e NFPA 92	78
4.5 Desenvolvimento da proposta de parte da norma de controle de fumaça para o CBMDF.....	81
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	83
REFERÊNCIAS.....	84
APÊNDICES	89
APÊNDICE A – Proposta de Norma Técnica.....	90

1 INTRODUÇÃO

Em situações de incêndio em edificações é de primordial importância um sistema de controle de fumaça eficaz, que impeça que a fumaça tome conta do ambiente em um curto espaço de tempo com o intuito de promover a saída segura dos ocupantes.

A fumaça é o principal agente causador de mortes em incêndios, dados retirados do Fire Statistics United Kingdom 2013–14 (Department for Communities and Local Government, 2015) indicam que a maioria das mortes relacionadas a incêndios estão diretamente ligadas com a inalação de fumaça. Além disso, a fumaça pode se deslocar a uma velocidade superior a 2m/s, podendo ser mais veloz que o escape de um ocupante (SFPE, 2019).

Para além das pequenas partículas sólidas que constituem a fumaça, e que são nocivas para a saúde das pessoas, a fumaça pode conter substâncias tóxicas suficientes para asfixiar, desorientar e incapacitar as pessoas em poucos segundos e matar em alguns minutos. Conforme Gupta et al. (2018), a inalação de fumaça resulta em três tipos fisiológicos de lesão: lesão térmica predominantemente nas vias aéreas superiores; lesão química no trato respiratório superior e inferior e efeitos sistêmicos dos gases tóxicos.

O controle de fumaça serve, portanto, para evitar que esta se espalhe através da edificação por meio de barreiras que restrinjam seu escoamento e por meio de aberturas, dutos ou ventiladores pelos quais a fumaça e o calor possam ser extraídos.

Ao realizar o controle da fumaça tem-se como objetivos principais a segurança da vida dos ocupantes e dos bombeiros e a proteção da propriedade ou negócio. O controle de fumaça visa proporcionar uma atmosfera mais limpa, com visibilidade suficiente em rotas de fuga, reduzir a temperatura interna da edificação protegendo contra maiores estragos, impedindo ignição espontânea de materiais, reduzir o tempo de limpeza, prover uma visão clara do fogo facilitando a extinção da chama por parte dos bombeiros, além de reduzir os custos relacionados com o incêndio.

Dentre as normas internacionais sobre sistemas de controle de fumaça destacam-se a Instrução Técnica nº 246, francesa, e a NFPA 92, norte-americana. A

maior parte dos estados brasileiros exige a instalação de algum tipo de sistema de controle de fumaça em determinados tipos de edificações. O Distrito Federal não conta com normativa própria, sendo que, quando ocorre a necessidade de consulta ou aplicação desse sistema, outras normas nacionais são utilizadas. Nota-se, portanto, a necessidade da construção de um arcabouço teórico relacionado ao controle de fumaça e da transcrição de normativa específica para o Distrito Federal, de modo a atender as necessidades e peculiaridades da região, sem perder um caráter nacional, além de assegurar a obrigatoriedade da utilização do controle de fumaça para maior segurança das edificações.

Este trabalho de conclusão de curso está organizado em 5 (cinco) capítulos, a saber: Capítulo 1 - INTRODUÇÃO, Capítulo 2 - REVISÃO DE LITERATURA, Capítulo 3 - METODOLOGIA, o Capítulo 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO e o Capítulo 5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS.

Em seu Capítulo 1 - INTRODUÇÃO as considerações iniciais sobre o perigo da fumaça e a importância do seu controle, bem como a motivação e relevância do tema são apresentadas. No Capítulo 2 - REVISÃO DE LITERATURA, apresenta-se o estado da arte em revisão bibliográfica, com ênfase nas principais características da fumaça, os principais sistemas de controle de fumaça existentes e as normas Americana, Europeia e Brasileira. Além de documentos técnicos, são apresentados trabalhos científicos, legislações, estudos, dissertações e artigos que abordam o tema.

O Capítulo 3 - METODOLOGIA aborda a forma que o trabalho foi desenvolvido para o alcance dos resultados almejados. O Capítulo 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO traz a análise do padrão americano (NFPA 92) e da instrução técnica de São Paulo (IT-15), elencando os pontos mais importantes, que poderão servir como base para a norma técnica do Distrito Federal. Por fim, o último Capítulo, 5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS, elenca os objetivos que foram alcançados com o estudo e as sugestões de pesquisas para complementar os campos em aberto.

1.1 Definição do problema

Normas de controle de fumaça são muito comuns em todo o mundo. Podem ser destacadas as normativas espanholas, o *Reglamento de seguridad contra*

incêndios en los establecimientos industriales [Real Decreto 2267, 2004] e o *Código Técnico de la Edificación* [Real Decreto 314, 2006]; as normas britânicas, o *Code of practice BS7346 Part 4: Components for smoke and heat control systems. Functional recommendations and calculation methods for smoke and heat exhaust ventilation systems, employing steady-state design fires* [BS7346, 2003] e a *BS5588: Fire precautions in the design, construction and use of buildings* [BS5588, 1997]; a norma neozelandesa, o *New Zealand Building Code Handbook and Approved Document*; além das já citadas normas norte-americana e francesa.

No Brasil não existe normatização nacional que determine a utilização de sistemas de controle de fumaça. Atualmente, em 14 estados da Federação, os Corpos de Bombeiros prescrevem a instalação desses sistemas em determinados tipos de edificação, por exemplo naquelas com subsolos ou átrios, todavia, sem uma metodologia comum para todo o território nacional. O fato é que mais da metade dos estados brasileiros exigem a instalação de sistemas de controle de fumaça, evidenciando a importância do tema em questão, sendo que, o Distrito Federal não conta com norma ou instrução técnica própria.

Considerando a importância, a ampla utilização do sistema supracitado, a falta de uma uniformidade na sua exigência no Brasil e a ausência de norma que atenda o Distrito Federal, o problema de pesquisa proposto traduz-se na seguinte pergunta: Quais aspectos, definições e exigências dos principais estudos e diretrizes nacionais e internacionais podem compor a norma de controle de fumaça do CBMDF a ser aplicada nas edificações do Distrito Federal?

1.2 Justificativa

Ao observar a ampla utilização do controle de fumaça em diversas partes do mundo, nota-se que esse tipo de sistema traz benefícios em situações de incêndios, principalmente em edificações que contam com grande circulação de pessoas. Verifica-se, de forma antagônica, que o Distrito Federal não conta com normativa própria.

O controle da fumaça tem como objetivos principais a segurança da vida dos ocupantes e dos bombeiros e a proteção da propriedade ou negócio. Ao proporcionar

uma atmosfera mais limpa, com visibilidade suficiente em rotas de fuga e menor temperatura interna da edificação, são oferecidas as condições para a salvaguarda de vidas. Tais benefícios previnem ou diminuem também a ocorrência de danos materiais, impedindo ignição espontânea de materiais, reduzindo o tempo de limpeza, proporcionando uma visão clara do fogo, facilitando a extinção da chama por parte dos bombeiros, além de reduzir os demais custos relacionados ao incêndio.

A partir do estudo e análise dos princípios que regem os diferentes tipos de sistemas de controle de fumaça, bem como das mais relevantes normas internacionais, é possível construir um arcabouço teórico e estabelecer um padrão metodológico de aplicação desses sistemas. Por conseguinte, torna-se possível realizar a avaliação de novos métodos ou equipamentos voltados ao escoamento de forma controlada ou à contenção da fumaça, como por exemplo, a utilização de aparelhos de cortinas de ar e cortinas de água como barreiras físicas que impeçam o espalhamento da fumaça sem prejudicar a saída dos ocupantes ou a entrada dos bombeiros.

Visto isso, entende-se que a pesquisa e o estudo para a formulação de uma base teórica consistente e, por conseguinte, o desenvolvimento de normativa para sistemas de controle de fumaça, que atenda às necessidades do Distrito Federal, com uma metodologia e requisitos para implementação bem definidos é de extrema importância.

1.3 Objetivos

A definição dos objetivos visa nortear as ações para a confecção do trabalho. Serão divididos em geral e específicos, de acordo com Marconi e Lakatos (2010, p. 202), que definem como objetivo geral aquele que “está ligado a uma visão global e abrangente do tema” e como objetivos específicos os que “apresentam caráter mais concreto”.

1.4 Objetivo geral

Construir a base de conhecimento necessária e transcrever, como forma de sugestão, parte da norma de controle de fumaça para aplicação no Distrito Federal a partir da principal norma nacional e internacional.

1.5 Objetivos específicos

Torna-se necessário, para o cumprimento do objetivo geral, estabelecer objetivos específicos, entre eles:

- Descrever as principais características da fumaça relacionada aos incêndios em edificações;
- Estudar normas, códigos técnicos e bibliografia científica, em especial a NFPA 92, buscando compreender os parâmetros principais dos sistemas de controle de fumaça;
- Apresentar a principal Instrução Técnica sobre sistemas de controle de fumaça atualmente exigida no Brasil, a IT-15 do Estado de São Paulo.

1.6 Definição de termos

Controle de fumaça: consiste em impedir que os gases tóxicos, quentes e inflamáveis da fumaça ocupem espaços preservados em uma edificação incendiada (KLOTE, 2012).

Fumaça: as partículas sólidas e líquidas e os gases, transportados pelo ar, gerados quando um material entra em processo de combustão ou pirólise (SFPE, 2019).

Pirólise: decomposição térmica de substâncias sólidas em partículas combustíveis de menor peso molecular que podem volatilizar da superfície, a partir da adição de calor, originando diversas espécies químicas que variam em tipo e número (DRYSDALE, 2011).

Pluma: coluna convectiva que ascende a partir de uma fonte de calor, que tem sua estrutura determinada pela interação com o fluido circundante (DRYSDALE, 2011).

2 REVISÃO DA LITERATURA

Para que os ocupantes de uma edificação possam sair em segurança e os bombeiros possam adentrar e combater o foco do incêndio com maior eficiência, o ambiente deve estar livre de fumaça, ou pelo menos tê-la em níveis aceitáveis, insuficientes para intoxicar ou asfixiar seres vivos, permitindo a visualização e locomoção pelas rotas de fuga. Além das benesses citadas, sistemas de controle de fumaça também têm a função de preservar bens materiais ao impedir ou diminuir a deposição de fuligem e a propagação do incêndio.

2.1 A fumaça

A fumaça é definida pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM) como as partículas sólidas e líquidas e os gases, transportados pelo ar, gerados quando um material entra em processo de combustão ou pirólise (SFPE HANDBOOK, 2019). Na literatura também pode ser encontrado o termo pluma, definido como a coluna convectiva que ascende a partir de uma fonte de calor, que tem sua estrutura determinada pela interação com o fluido circundante (DRYSDALE, 2011).

No processo de combustão, as ligações químicas moleculares de um combustível e de um oxidante são rompidas, os átomos são reorganizados, novas ligações são feitas e como resultado, além dos produtos da combustão, existe a liberação de energia térmica. Já a pirólise é a decomposição térmica de um material. Enquanto a evaporação e a sublimação são mudanças de fase de substâncias para o estado gasoso que ocorrem sem alteração de suas composições químicas, a pirólise é a decomposição térmica de substâncias sólidas em partículas combustíveis de menor peso molecular que podem volatilizar da superfície, a partir da adição de calor, originando diversas espécies químicas que variam em tipo e número. O processo de pirólise requer muito mais energia que uma simples evaporação (DRYSDALE, 2011).

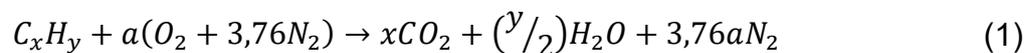
2.2 Composição da fumaça

O processo de combustão ocorre a partir de uma reação de oxidação, que pode ocorrer com ou sem a presença de chama. Na combustão com chama, esta é a zona

onde ocorre a reação com os reagentes em estado gasoso. Em uma combustão sem chama (estado de latência), também conhecido como *smouldering*, materiais porosos que formam um carvão carbonáceo sólido quando aquecidos sofrem um processo de combustão autossustentada sem a presença da chama (TURNNS, 2012).

Segundo Turns (2012), a chama é dividida em duas classes, pré-misturada e não pré-misturada (difusa), essa classificação está relacionada com o estado de mistura molecular dos reagentes. Em uma chama pré-misturada, o combustível e o oxidante estão misturados molecularmente antes que qualquer reação química se manifeste. Em uma chama difusa, os reagentes estão inicialmente separados e a reação ocorre somente na interface onde ocorre a mistura molecular entre o combustível e o oxidante. O termo “difusão” refere-se ao transporte molecular de espécies químicas, o qual promove a mistura molecular dos diferentes componentes em fase gasosa.

Em uma reação de combustão (oxidação) estequiométrica, a quantidade de oxidante é exatamente aquela necessária para queimar completamente certa quantidade de combustível. Se o oxidante está presente em quantidade maior do que a estequiométrica, diz-se que a mistura é pobre, caso a quantidade de oxidante seja menor que a estequiométrica isso resulta em uma mistura rica. A razão estequiométrica é determinada por um balanço atômico supondo que o combustível reage para formar um conjunto ideal de produtos, que farão parte da fumaça. Por exemplo, para um combustível hidrocarboneto genérico, a relação estequiométrica é a seguinte:

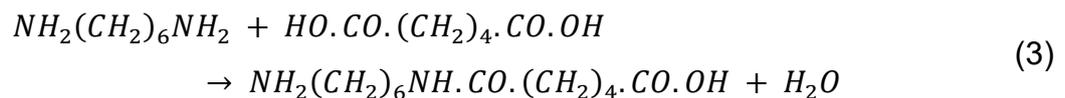


Onde

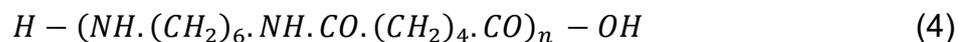
$$a = x + y/4 \quad (2)$$

Existem diversos tipos de combustíveis que podem fazer parte de um processo de combustão. Desde simples hidrocarbonetos gasosos até sólidos de elevado peso molecular e complexidade química, que podem ocorrer na natureza, como a celulose, ou serem fabricados pelo ser humano, como polietileno e poliuretano. Segundo Drysdale (2011), todos podem comburir em condições apropriadas, reagindo com o oxigênio do ar, gerando produtos da combustão e emitindo energia térmica.

A composição dos combustíveis voláteis liberados de uma superfície sólida em combustão tende a ser extremamente complexa, fato que pode ser compreendido quando a natureza química do sólido é estudada. Por exemplo, o Nylon 66, polímero de condensação de cadeia longa e elevado peso molecular que é formado através da reação de dois monômeros (hexametileno diamina e ácido adípico), com a eliminação de uma substância simples, no caso a água:



A fórmula do Nylon 66 pode ser escrita no seguinte formato:



Sendo que, de acordo com Drysdale (2011), o tamanho da cadeia, ou seja, o valor de n na fórmula acima, dependerá das condições existentes durante o processo de polimerização, que serão determinadas para a produção de polímeros com as propriedades desejadas. Tais propriedades também podem ser modificadas com a introdução de ramificações e interligações na cadeia principal do polímero, processo conhecido como *crosslinking* ou ligação cruzada, gerando estruturas com propriedades físicas e químicas muito diferentes de outras estruturas menos interligadas.

Com relação à inflamabilidade, a geração de voláteis a partir da decomposição térmica de um polímero será bem menor para estruturas com muitas ligações cruzadas (polímeros termorrígidos) pois, parte do material forma um carvão carbonáceo não volátil, reduzindo o potencial de suprimento de combustível gasoso para a chama. Segundo Drysdale (2011), em geral os voláteis são compostos de uma mistura complexa de produtos da pirólise, desde moléculas simples como hidrogênio

e etileno, até espécies de peso molecular relativamente alto que são voláteis somente em temperaturas existentes na superfície em que foram formados, quando a energia térmica sobrepõe as forças de coesão na superfície do combustível. Na combustão com chamas a maioria dos voláteis será consumida, porém na pirólise sem combustão e na combustão latente esses produtos irão condensar e formar uma fumaça, como uma espécie de aerossol, ao se misturar com o ar em menor temperatura.

Nos incêndios, a composição da fumaça não é uma mistura simples de produtos ideais, como em uma reação estequiométrica. As espécies majoritárias do produto da combustão dissociam-se, produzindo inúmeras espécies químicas minoritárias, sendo que as frações molares dessas espécies variam em função da mistura ser considerada rica ou pobre. Por exemplo, segundo Turns (2012), os produtos majoritários na combustão pobre do propano são: H_2O , CO_2 , O_2 e N_2 . Já na combustão do propano em uma mistura rica, os produtos majoritários são: H_2O , CO_2 , CO , H_2 e N_2 .

A maior dificuldade em prever os possíveis danos causados por um incêndio, concernente aos produtos da combustão, está relacionada com a confiabilidade da previsão de quais serão os produtos tóxicos gerados, pois estes dependem do material e da condição do fogo. A solução para este problema seria a execução de experimentos em larga escala, mas a variedade de cenários de incêndio possíveis, custo e tempo para a construção dos cenários são proibitivos.

Visto isso, Stec e Lebek (2008) utilizaram um forno de tubo de estado estacionário (ISO TS 19700), que é capaz de replicar todos os estágios de um incêndio, inclusive a pirólise, onde foi possível observar, por exemplo, que para muitos polímeros de hidrocarbonetos a geração de CO aumenta rapidamente quanto mais rica for a mistura no ambiente. Portanto, é possível perceber que a composição química da fumaça depende de variáveis complexas e difíceis de serem previstas em situações de incêndios, demonstrando a relevância dos estudos realizados sobre o tema.

2.3 Toxicidade da fumaça

A toxicidade da fumaça depende majoritariamente de dois parâmetros: a taxa de perda de massa do objeto comburindo e a toxicidade dos produtos da combustão por unidade de massa do combustível, que depende da composição do material e das condições em que ocorre o incêndio. Com uma estimativa do grau de toxicidade da fumaça que pode ser gerada em um incêndio, um construtor, arquiteto ou engenheiro pode garantir uma maior segurança contra incêndios, sendo capaz de demonstrar que o tempo disponível para o escape seguro da edificação é maior que o tempo mínimo requerido (HULL; BREIN; STEC, 2016).

Segundo Hull, Brein, Stec (2016), a combustão de um material orgânico, por exemplo um polímero, produz uma mistura de substâncias que vão desde produtos completamente oxidados como dióxido de carbono (CO_2) e água (H_2O), até produtos da combustão incompleta, como monóxido de carbono (CO) e cianeto de hidrogênio (HCN). Existem diferenças significantes na geração de produtos tóxicos entre combustão com chama e sem chama e entre chamas super ventiladas e sub ventiladas.

Além de H_2O , CO_2 , CO e HCN , os gases provenientes do fogo contém uma mistura de produtos parcialmente oxidados, como aldeídos; combustível ou produtos da degradação do combustível, como hidrocarbonetos alifáticos ou aromáticos; e outras moléculas de gases estáveis, como nitrogênio, óxidos de nitrogênio e halogenetos de hidrogênio.

O monóxido de carbono (CO) é um dos componentes mais importantes do ponto de vista toxicológico dos gases de combustão, impedindo o transporte de oxigênio pela formação de carboxi-hemoglobina e atuando como marcador de outros produtos tóxicos da combustão incompleta, como HCN e compostos orgânicos oxigenados. O cianeto de hidrogênio (HCN) é importante pois é 20 vezes mais tóxico que o CO , impedindo a chegada de oxigênio nas células do corpo.

O efeito combinado desses agentes tóxicos pode ser expresso utilizando o modelo de Purser (1983) como uma dose efetiva fracionária (FED):

$$FED = \left\{ \frac{[CO]}{LC_{50,CO}} + \frac{[HCN]}{LC_{50,HCN}} + \frac{[HCl]}{LC_{50,HCl}} + \dots \right\} * V_{CO_2} + A + \frac{21 - [O_2]}{21 - 5.4} \quad (5)$$

$$V_{CO_2} = 1 + \frac{\exp(0.14[CO_2]) - 1}{2} \quad (6)$$

A é um fator de acidificação igual a $[CO_2] * 0.05$.

Os valores para o gás LC_{50} (concentração letal do gás) foram obtidos de experimentos letais com ratos. Em essência a razão de concentração individual dos agentes tóxicos sobre sua concentração letal é somada para cada agente. Estes são multiplicados pelo fator V_{CO_2} , pois o CO_2 estimula o aumento da taxa de respiração. Além disso, um fator de acidose e um fator de depleção de oxigênio são incluídos no somatório geral. A obtenção de FED igual a 1 seria letal para 50% da população exposta.

A letalidade em relação ao FED pode ser expressa como $material - LC_{50}$, ou seja, a massa de material (gramas de combustível) necessária para produzir 1 m³ de uma dose letal ($FED = 1$).

$$material - LC_{50} = \frac{M}{FED * V} \quad (7)$$

Comparando os potenciais tóxicos de diferentes materiais, quanto menor o LC_{50} (quanto menor a quantidade de material necessário para atingir o potencial tóxico) mais tóxico é o material. Os valores de LC_{50} devem ser referenciados pelas condições da combustão em que foram mensurados.

De acordo com Stec (2017), os asfixiantes, monóxido de carbono e cianeto de hidrogênio, são conhecidos por causar a morte da maioria das vítimas de incêndio. A produção de CO e HCN é muito maior em incêndios sub ventilados, que é mais difícil de replicar em uma bancada.

Estudo desenvolvido por Daniels et al. (2014) indicam que os bombeiros têm uma maior taxa de mortes por câncer comparado com a população civil e destacam a relevância dos carcinogênicos como produtos tóxicos de incêndios. Atualmente não há nenhuma obrigação em quantificar os carcinogênicos nas matérias primas de

produtos e não existe restrição de produtos que emitem quantidades letais de carcinogênicos durante um incêndio.

Misturas complexas de compostos orgânicos voláteis e semivoláteis são geradas como produtos da combustão incompleta em incêndios e grande parte destes produtos são conhecidos por serem prejudiciais à saúde humana e ao meio ambiente. São importantes exemplos desses compostos o benzeno, o estireno e o fenol, pois geralmente são formados na maioria dos incêndios. O benzeno tem um significado toxicológico particular, pois é um precursor dos hidrocarbonetos aromáticos policíclicos cancerígenos, além de ser um conhecido carcinógeno em si mesmo.

De acordo com Purser et al. (1983) os químicos irritantes libertados nos incêndios são formados durante a pirólise e oxidação parcial de materiais, e as combinações de produtos de diferentes materiais são frequentemente similares. No entanto, para muitos materiais orgânicos e particularmente para polímeros de hidrocarbonetos simples, como o polipropileno ou o polietileno, os principais produtos da pirólise, que consistem em vários fragmentos de hidrocarbonetos, são inócuos. Assim, quando o polipropileno é pirolisado em hidrogênio, o produto, tal como o etileno, o formaldeído, o acetaldeído, o estireno etc. são produzidos, e tal atmosfera não teve efeito sobre os primatas.

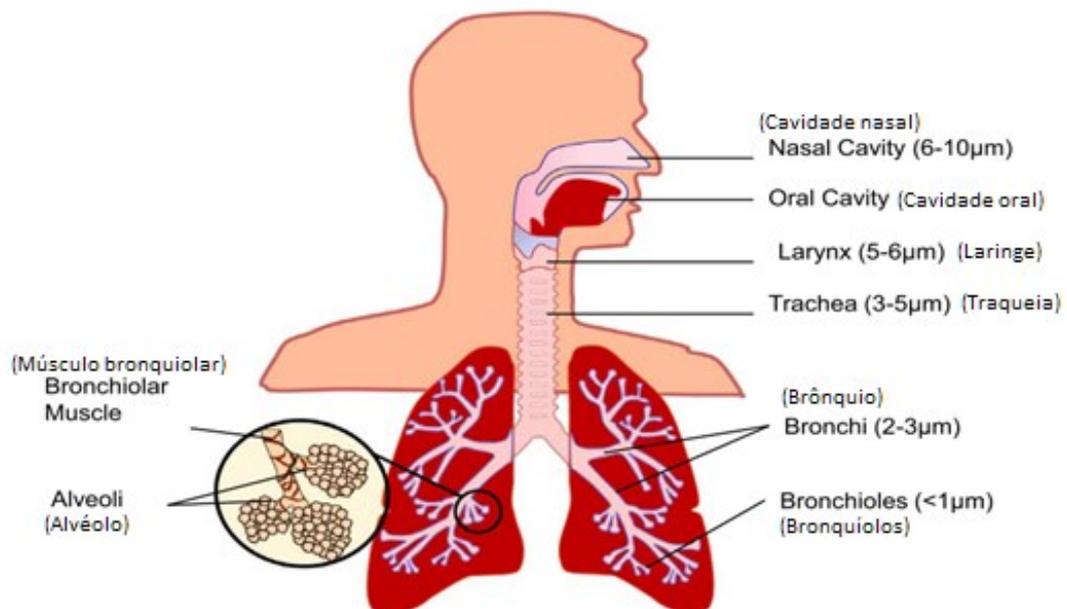
No entanto, quando esses produtos são oxidados durante a decomposição sem a presença de chamas no ar, alguns são convertidos em produtos irritantes, e tais atmosferas foram de fato consideradas altamente irritantes tanto para camundongos quanto para primatas. Em relatos de experimentos de exposição de camundongos, alguns materiais retardantes de fogo, que poderiam ser induzidos a chamas apenas intermitentemente, com considerável produção de fumaça, produziram atmosferas até 300 vezes mais irritantes do que o mesmo polímero em seu estado não retardante ao fogo, que queimou de forma limpa (Purser et al., 1983).

Pesquisa realizada por Blomqvist et al. (2003) mostra que os isocianatos, potentes sensibilizadores respiratórios, que desencadeiam asma e às vezes morte após uma única exposição, foram identificados em efluentes de incêndios. Os isocianatos são amplamente utilizados na fabricação de espumas flexíveis de poliuretano (PU) para móveis e espumas rígidas de PU para isolamento em edifícios,

bem como em geladeiras e freezers. Devido à sua versatilidade e ampla gama de aplicações, os produtos contendo isocianatos podem ser encontrados em quantidades significativas em todo o ambiente construído. Os dois principais produtos no mercado dos isocianatos, com uma quota de mercado aproximada de 90%, são ambos diisocianatos: isômeros de diisocianato de tolueno (TDI) e diisocianato de difenil metano (MDI). A inalação de isocianatos é a via de exposição humana mais importante e pode resultar em danos na via respiratória.

A existência de pequenas partículas na fumaça não só prejudica a fuga por obscurecimento visual, mas representa também um risco respiratório. Apesar da grande quantidade de partículas geradas em um incêndio, relativamente poucas investigações foram feitas sobre seu tamanho, distribuição e composição. De acordo com Blomqvist et al. (2007), a distribuição do tamanho das partículas depende do material, temperatura, condições de incêndio e fluxo de efluentes. O tamanho das partículas em forma de gotículas esféricas oriundas da combustão latente é geralmente da ordem de 1 μm , enquanto o tamanho das partículas de fuligem irregulares da combustão com chamas tem uma faixa de tamanho muito maior. Isso dificulta a determinação do tamanho das partículas e depende da técnica de medição e da posição de amostragem. As zonas de deposição para humanos em função do tamanho das partículas são apresentadas na Figura 1.

Figura 1 – Zonas de deposição de partículas no trato respiratório



Fonte: Adaptado de (Stec e Lebek, 2008).

Visto isso, é possível compreender os riscos relacionados à toxicidade da fumaça, que conta com substâncias e partículas prejudiciais ou até mesmo letais aos seres humanos, comprovando a importância de estudos, como os citados no texto, de forma a auxiliar na prevenção de mortes e acidentes, além de contribuir para a produção de materiais que apresentem menos riscos à saúde humana em situações de incêndios.

2.4 Comportamento da fumaça

Os fatores que afetam o comportamento e o processo de ocupação de espaços pela fumaça, principalmente em ambientes amplos, são diversos e incertos. O preenchimento de espaços pela fumaça é um elemento determinante em situações de incêndio. É extremamente difícil realizar uma divisão clara, entre os ambientes de maior amplitude de uma edificação, em zonas livres ou ocupadas por fogo ou fumaça em virtude do seu rápido espalhamento. Ademais, em certos cenários, somente quando o incêndio se desenvolve em maior escala, os detectores são sensibilizados e acionados, o que representa uma grande ameaça à evacuação dos ocupantes e ao resgate realizado pelos bombeiros (HUANG; ZHU; PAN, 2018).

Incêndios em ambientes fechados são de grande preocupação na engenharia de segurança contra incêndios, sendo uma das principais questões a transição do fogo localizado para o fogo generalizado, onde o vetor mais importante que leva a incêndios generalizados é a fumaça. Portanto, tratando-se de incêndios confinados e sub ventilados, é importante compreender a dinâmica da fumaça, principalmente próximo às aberturas, onde o ar fresco e os gases quentes da fumaça se misturam. Esse fenômeno, muito comum em incêndios confinados, é conhecido como *pulsing fire* (fogo pulsante), e ocorre em condições de limitação de oxigênio, sendo relacionado também com ventilações naturais ou mecânicas em sistemas de controle de fumaça (Merci e Beji, 2016).

Huo R. et al. (2005) estudaram experimentalmente como a fumaça gerada por um incêndio em shopping center ocuparia um átrio. Eles avaliaram dois modelos de pluma dentro do átrio e derivaram uma equação para o estudo da altura da camada de fumaça. Chow W. K. et al. (2001) realizaram estudos experimentais sobre o enchimento de fumaça em um átrio induzido por incêndio em piscina de líquido

combustível de até 1,6 MW para medir a qualidade do combustível, a distribuição vertical da temperatura e a altura da camada de fumaça. Eles encontraram boa concordância de resultados quando comparados com aqueles previstos pela equação de enchimento de fumaça da NFPA, desenvolvido a partir de equações de pluma, e com um modelo desenvolvido por Tanaka (1985). Finalmente, eles desenvolveram um novo modelo de preenchimento de fumaça.

Tomando como exemplo o preenchimento da fumaça em espaços amplos, como em átrios de shopping centers, onde o fluxo de fumaça não é influenciado pelo ambiente exterior e, portanto, forma uma camada de fumaça restrita a estes espaços fechados. O desenvolvimento da camada de fumaça geralmente pode ser descrito como um modelo de duas zonas. A ideia básica desse modelo consiste em dividir o ambiente em uma zona quente (de fumaça) superior e uma zona inferior (de ar frio). As propriedades das camadas são espacialmente uniformes. Considera-se que o ambiente não conta com aberturas, deixando somente uma pequena saída, ao nível do piso, e a camada superior como sendo um volume de controle aplicando a conservação de massa (Yamana e Tanaka, 1985). A equação abaixo pode ser utilizada para calcular a altura da camada de fumaça z :

$$z = \left(\frac{0.21}{\rho_g} \left(\frac{\rho_a^2 g}{C_p T_a} \right)^{1/3} \frac{\alpha^{1/3} 2t^{(1+n/3)}}{S} + \frac{1}{H^{2/3}} \right)^{-3/2} \quad (8)$$

Onde α é relacionado com a velocidade em que o incêndio se desenvolve, ρ_g é a densidade da camada superior de fumaça, C_p é o calor específico do ar, T_a é a temperatura do ar e ρ_a é a densidade do ar. S é a área do piso e H é a altura do telhado do edifício, t é o tempo e n está relacionado com a taxa de liberação de calor do incêndio, $\dot{Q} = \alpha t^n$.

Condições atmosféricas externas podem perturbar o fluxo de fumaça, pois este depende essencialmente de propriedades físicas como expansão, pressão térmica, flutuabilidade ou empuxo térmico e efeito do vento. A variação de um desses parâmetros, como o vento externo, pode afetar a dinâmica do incêndio e o comportamento da fumaça. No contexto da segurança contra incêndio, é importante estudar os efeitos das condições atmosféricas externas na propagação da fumaça em um compartimento (Li et al., 2017).

Durante um incêndio em um cômodo, a presença de ventilação ambiente externa através de uma abertura contribui para a perturbação do fluxo de fumaça, que pode impactar no processo de extração, por exemplo, aumentando o risco de ocorrência de mortes. Tian et al. (2017) mostraram que, quanto mais a velocidade do vento aumenta, a temperatura da fumaça mais perto do chão aumenta, a fim de convergir para a temperatura da fumaça próximo ao teto. Considerando isso, eles destacam que, acima de um certo valor crítico da velocidade do vento ao ar livre, a estratificação da fumaça era perturbada e a fumaça ocupava todo o volume do compartimento.

Zhong et al. (2016) estudaram o desenvolvimento da fumaça como uma função da taxa de calor liberada e do vento. Eles encontraram que, no início do incêndio, a velocidade do vento era maior que a velocidade da fumaça e a velocidade do vento poderia ser negligenciada quando o incêndio atingia seu máximo.

Simulações numéricas da propagação de incêndios em compartimentos têm atingido resultados satisfatórios. Li et al. (2014) simularam o fluxo de fumaça em um corredor em escala reduzida (1:12) sobre condições de ventilação natural utilizando o software *Fire Dynamics Simulator* (FDS) e compararam os dados obtidos numérica e experimentalmente, obtendo boa aproximação.

Kaye e Hunt (2007) consideraram o enchimento de fumaça de uma sala a partir de um pequeno incêndio localizado no centro do piso. A taxa na qual a camada de fumaça se intensificou mostrou ser mais rápida para salas relativamente amplas por causa da turbulência e empuxo em larga escala do fluido ambiente. Em incêndios, o controle de fumaça envolve a interação de fogo, ocupantes e construção.

O fenômeno conhecido como *fire spill plume* (extravasamento de fumaça) ocorre em incêndios em cômodos com pelo menos uma abertura no qual a fumaça escapa por essa abertura podendo atingir, por exemplo, em edifícios, outros cômodos ao longo da fachada, induzindo a propagação vertical do incêndio, que pode causar séria ameaça à segurança estrutural do edifício e à vida (Gao et al., 2016). Prahel e Emmons (1975) apontam que o extravasamento de fumaça é conduzido pela diferença de pressão nas aberturas.

Steckler et al. (1985) verificaram teórica e experimentalmente que a taxa do fluxo de massa do extravasamento de fumaça é proporcional ao chamado fator de ventilação $A\sqrt{H}$, onde A e H são respectivamente a área e altura da abertura. Primeiramente os dados experimentais disponíveis tratavam sobre compartimentos com somente uma abertura, contudo, ambientes com ventilação cruzada (duas aberturas localizadas em paredes opostas) são muito comuns. Alguns estudos indicam que essa abertura adicional pode afetar significativamente o incêndio e o extravasamento da fumaça.

Takeda (1988) utilizando um modelo de compartimento em escala 1/6, com duas aberturas cruzadas (uma porta e uma janela) indicou que a dimensão da abertura da janela tinha significativa influência na altura do plano neutro (limite entre o ar ambiente e a fumaça dentro do compartimento) e a abertura da porta afetava a taxa de queima e a temperatura na camada superior no interior do compartimento. Os estudos citados são exemplos de comportamento da fumaça, sendo possível perceber a variedade e complexidade desses comportamentos, que variam de acordo com a cena em que ocorre o incêndio, tornando complexo o controle desse fluido, demonstrando a importância de pesquisas referentes ao tema.

2.5 Sistemas de controle de fumaça

Considerando a composição dos produtos da combustão que fazem parte da fumaça, em boa parte prejudiciais ou até mesmo letais aos seres humanos e o comportamento da fumaça que tende a ocupar espaços de forma rápida e inesperada, foram desenvolvidos sistemas de controle de fumaça de forma a proteger os ocupantes das edificações, fornecendo tempo para saída em segurança. Além disso, eles podem auxiliar os bombeiros no resgate e no combate ao incêndio, na proteção do ambiente, da edificação e dos bens materiais, na garantia do funcionamento dos empreendimentos, da produção e prestação de serviços, bem como na redução de custos de seguros.

Para melhor entender o abandono da população durante a ocorrência de um incêndio, Gwynne, Galea e Lawrence (2001) criaram um modelo de comportamento para simular o reconhecimento do fogo, a tomada de decisões e a preparação para a evacuação das pessoas. Yang, Deng e Xie (2014) desenvolveram um modelo de

evacuação de incêndio baseado em autômatos celulares (CA) para simular comportamentos de evacuação de ocupantes em casos de incêndios em locais públicos, que podem refletir características individuais, comportamentos de manada e os efeitos ambientais no comportamento de evacuação. Porém, existem fatores de incerteza e aleatoriedade nesses processos. Salem (2016) explorou os efeitos das incertezas envolvidas na propagação do incêndio. Os resultados mostraram que o tempo disponível para uma evacuação segura é geralmente afetado pela incerteza dos dados de entrada. De todos os parâmetros, a toxicidade da fumaça era o fator mais importante com relação ao tempo seguro de evacuação, que demonstra a importância de sistemas de controle de fumaça para a preservação de vidas em situações de incêndios.

De acordo com Klote et al. (2012), sistemas de controle limitam a fumaça em áreas definidas, fornecem caminho seguro para saídas de emergência através de zonas de baixa concentração, direcionam a fumaça através da exaustão e de barreiras, providenciam acesso seguro e com boa visibilidade para os bombeiros tornando o combate mais eficiente e reduz o risco de *flashover* (generalização do incêndio). Existem diferentes métodos de controle de fumaça, que podem ser utilizados de forma isolada ou em combinações. São eles compartimentação, diluição, pressurização, fluxo de ar e empuxo.

A compartimentação consiste em implementar barreiras que possam se manter efetivas durante um incêndio, muito utilizadas para a proteção contra a propagação do incêndio, por exemplo, paredes, piso, portas, cortinas e outras barreiras que promovam algum nível de proteção para espaços não atingidos pela fumaça.

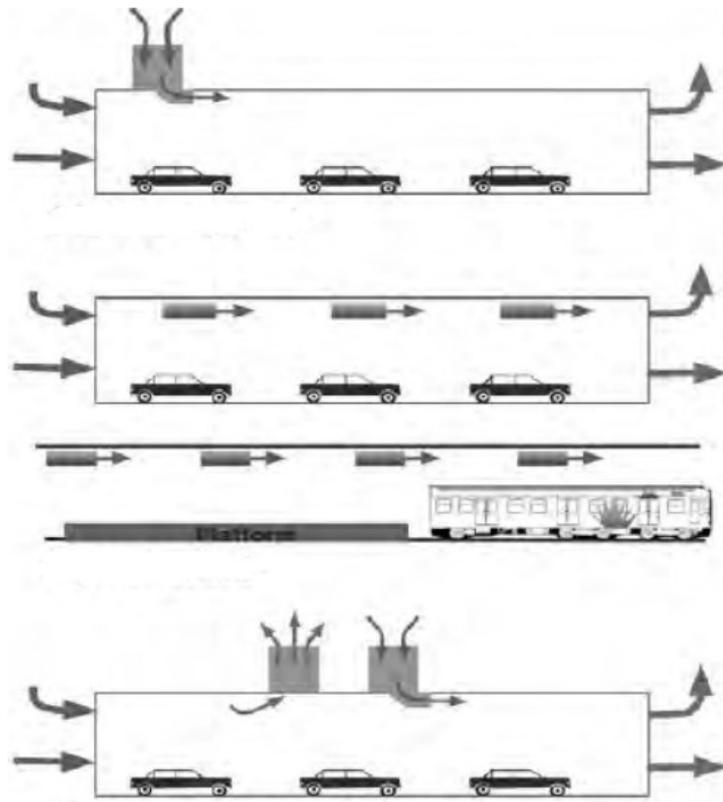
A diluição também conhecida como exaustão ou retirada de fumaça é utilizada para manter uma concentração aceitável de gases e partículas em um compartimento que está sendo inundado por fumaça. Esse método pode ser efetivo se a taxa de ocupação da fumaça for pequena se comparado com o volume total do espaço protegido ou com a taxa de retirada do ar contaminado do ambiente. Também pode ser utilizado para a remoção da fumaça após o combate ao incêndio.

Sistemas de controle de fumaça por pressurização utilizam insufladores mecânicos para controlar a fumaça pela diferença de pressão. Ao aumentar a pressão

em um ambiente oposto àquele em que o incêndio está ocorrendo, é estabelecida uma barreira que impede, ou pelo menos dificulta, a passagem de fumaça para a área pressurizada não atingida.

O controle de fumaça pelo fluxo de ar é bastante utilizado em túneis devido à grande intensidade do fluxo requerido (Klote e Milke, 2002). A velocidade do ar deve ser elevada, por isso a técnica não é muito utilizada em edificações, principalmente devido ao risco do fluxo de ar alimentar o incêndio com oxigênio, que pode resultar em uma catástrofe. Um exemplo de aplicação é o sistema de ventilação longitudinal, que cria um fluxo ao longo do túnel e introduz ou extrai o ar em alguns pontos específicos, como demonstrado na Figura 2.

Figura 2 – Sistema de ventilação longitudinal em túnel



Fonte: Klote, 2012.

O empuxo ou flutuabilidade dos gases quentes da combustão é utilizado para o controle de fumaça em ambientes de grande volume, por exemplo, átrios. A fumaça gerada pelo incêndio ascende para formar uma camada sob o teto, nesse processo, ao se misturar com o ar ambiente, a temperatura da fumaça diminui.

2.6 Inovação e pesquisas relacionadas ao controle de fumaça

A tecnologia empregada atualmente para impedir o livre fluxo de fumaça em um incêndio consiste em utilizar a compartimentação e, em determinados casos, implementar um segundo tipo de controle de fumaça. Entretanto o fechamento de passagens com portas ou portões dificulta a identificação das rotas de fuga pelos ocupantes da edificação e atrasa as ações dos bombeiros.

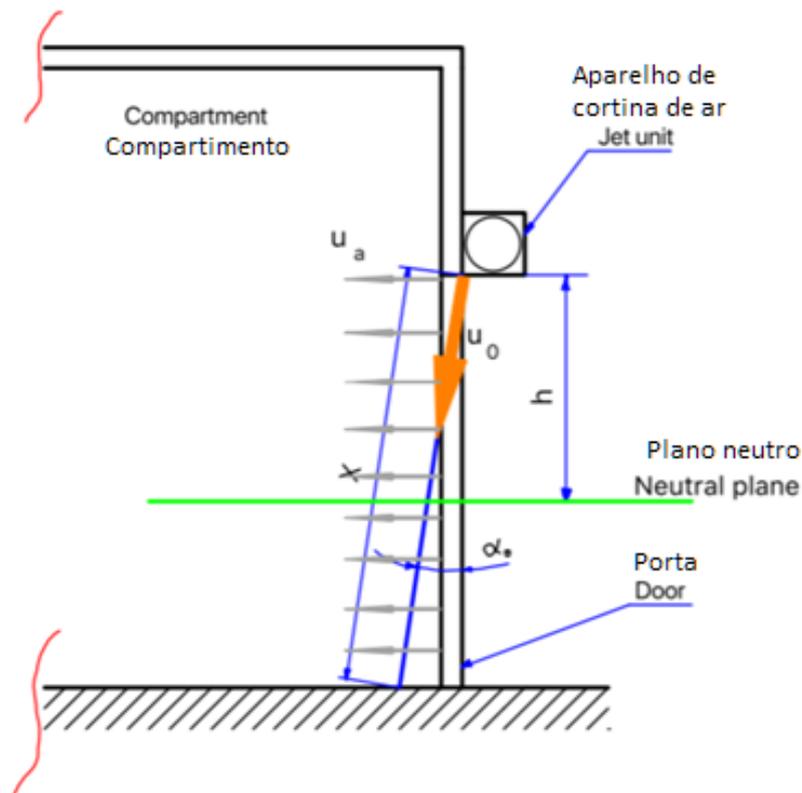
Estudos recentes analisaram a possibilidade da utilização de cortinas de ar para prevenir a saída da fumaça de compartimentos, visto que esse sistema não prejudica a visibilidade durante a evacuação ou combate. Experimentos em escala real foram realizados em condições variáveis para garantir o estancamento da fumaça utilizando a combinação de um sistema de exaustão adequado e aparelhos de cortina de ar.

Gupta, Pavageaum e Elicer (2007) conduziram estudos sobre o confinamento de fumaça em células delimitadas por duas cortinas de ar em túneis, Altinakar e Weatherill (2001) fizeram o uso de uma cortina de ar inclinada para prevenir a propagação da fumaça em um túnel durante um incêndio. Existem ainda outros estudos sobre esse tipo de sistema de controle de fumaça, principalmente referentes aos túneis que abrigam trens ou metrô. Alguns estudiosos utilizaram simulações computacionais para averiguar a performance de cortinas de ar para impedir o espalhamento da fumaça em corredores (Hu et al., 2008), em acidentes com incêndios ou explosões (Yp; Chiu; Wu, 2009), em caixas de escada (Luo et al., 2013) e para conter a dispersão de contaminantes (Shih; Yang; Chang-wei, 2011).

Viegas e Cruz (2019) desenvolveram experimentos, diferentemente dos estudos anteriores, considerando a necessidade de um sistema de exaustão de fumaça atuando em conjunto com a cortina de ar. Os autores consideram a exaustão essencial para atingir o estancamento da fumaça, pois, a expansão do fluido (pluma) em altas temperaturas, com o incêndio desenvolvido, em virtude da taxa de liberação de calor, deveria ser balanceada por uma taxa de extração. Dessa forma, a pressão no interior do compartimento não aumentaria significativamente acima da pressão exterior.

Em seus experimentos uma chama é iniciada dentro do compartimento de teste, sendo que, a cortina de ar (jato plano) que protege a porta aberta é ativada e um exaustor também é ativado. A vazão do exaustor e a velocidade do jato da cortina são reduzidas ao mínimo possível durante os testes no limite para manter a estanqueidade da fumaça na abertura da porta. A área da piscina de gasolina, a espessura e o ângulo do jato de ar variam entre os testes. A temperatura da fumaça na abertura, dentro do compartimento e no duto de exaustão são mensuradas, bem como a velocidade do jato de ar da cortina, a vazão do exaustor e o consumo de massa de gasolina. Os experimentos foram realizados em um hangar para evitar a interferência do vento. O exaustor foi instalado próximo ao teto, no lado oposto da porta e era controlado por sua frequência que por sua vez determinava a vazão volumétrica. O aparelho de cortina de ar foi suspenso no lado externo do compartimento sobre a abertura da porta, a velocidade do fluxo de ar era controlada pela frequência e monitorada por um anemômetro e a temperatura interna do compartimento era monitorada por duas colunas de termopares, conforme a Figura 3.

Figura 3 – Esquema de montagem do experimento



Fonte: Adaptado de (Viegas e Cruz, 2019).

Para garantir a estanqueidade da fumaça, foram realizadas diferentes combinações dos parâmetros durante os dezesseis testes realizados. Os parâmetros utilizados que proporcionaram a estanqueidade da fumaça foram: taxa de liberação de calor entre 576 kW e 1206 kW, espessura do jato de ar de 0.017m a 0.045m, velocidade do jato de ar de 8.3 m/s a 19.9 m/s, ângulo do jato de ar de 18° a 26° e a vazão volumétrica do exaustor de 1.73 m³/s a 4.60 m³/s. Em alguns testes a cortina de ar era desligada, sem modificar nenhum outro parâmetro, para demonstrar que a cortina de ar realmente retém a fumaça, como pode ser visto na Figura 4.

Figura 4 – Experimento n° 14 com a cortina de ar desligada (esq.) e ligada (dir.)



Fonte: Viegas e Cruz, 2019.

Os resultados dos testes mostraram que a estanqueidade da fumaça obtida através da cortina de ar depende do cenário do incêndio, portanto o projeto de um sistema com cortina de ar deve ser realizado de acordo com os requisitos de cada edificação. De todo modo foi observado que é possível restringir o fluxo de fumaça dentro de um compartimento utilizando um jato plano de ar frio nas aberturas e que a presença da cortina de ar permite atingir a estanqueidade da fumaça utilizando uma vazão de exaustão menor do que seria necessário sem a cortina. Contudo, quando a vazão de exaustão não era ajustada, a estanqueidade da fumaça era perdida, então conclui-se que a exaustão da fumaça é essencial para manter a estanqueidade nos casos em que a fumaça atinge altas temperaturas.

Sistemas de cortina de água, comumente referidos como cortina de névoa de água, também representam uma alternativa para o controle de fumaça que não exige

o bloqueio das rotas de fuga. Pan et al. (2011) conduziram estudo experimental com a utilização de um sistema de névoa de água para o controle de fumaça em uma estação do metrô. Ao final dos testes foi concluído que a temperatura da fumaça depois da interação com a névoa poderia ser reduzida para menos de 1/10 da temperatura inicial e a taxa do fluxo de massa poderia ser reduzida para menos de 1/4 da taxa inicial, indicando que o sistema poderia ajudar a reduzir a temperatura da fumaça e a concentração de espécies tóxicas, melhorando as condições de sobrevivência para a evacuação dos passageiros.

Zhigang et al. (2018) realizaram estudos experimentais com névoa de água para o controle de fumaça e os resultados indicaram que as partículas presentes na fumaça e monóxido de carbono liberados pela combustão tiveram seus níveis reduzidos, a visibilidade apresentou uma melhora expressiva e a temperatura diminuiu na zona protegida. Um modelo de zonas foi utilizado por Chow (2001) para prever a interação entre a névoa e a camada de fumaça.

A eficiência da retirada de fumaça com a presença das gotículas de água foi investigada experimentalmente por Balachandran et al. (2003), Maghirang e Razote (2009) e Xiang e Colbeck (1997). Algumas variações nos parâmetros críticos da camada de fumaça em interação com a névoa de água foram reportadas por Fang (2008). Com o intuito de analisar as desvantagens desse tipo de sistema, Gong et al. (2016) realizaram estudos e experimentos, concluindo que o entorno da cortina de água sofre influência da ação resultante da fricção do ar, da pressão atmosférica, da tensão superficial da água e da gravidade, que pode resultar em um encolhimento da névoa em estágios de baixo fluxo de água e na diminuição da velocidade do fluxo da névoa no seu contorno.

2.7 Normatização internacional e brasileira

Dentre as normas internacionais de sistemas de controle de fumaça destacam-se a instrução técnica francesa, *Instruction Technique 246 Relative au désenfumage des Établissements Recevant du Public* (IT246, 2004), e a norma norte-americana, *NFPA 92: Standard for Smoke Control Systems* (NFPA, 2018).

De acordo com Ribeiro (2018), a norma francesa trata exclusivamente sobre controle de fumaça e é direcionada aos edifícios públicos, contemplando sistemas de controle de fumaça passivos e ativos. Essa norma é um documento de referência para outras normativas, que pode ser aplicada em diferentes contextos. Contempla os sistemas com profusas considerações em contexto prescritivo ou baseado no desempenho, não se reduzindo somente aos métodos de cálculo avançados focados em simulações numéricas como método de projeto. Ainda na realidade francesa, importam para o controle de fumaça o Artigo R.235-4-8 do Código de Trabalho, o Artigo 14 do Decreto de 5 de agosto de 1992 e o Artigo IGH GH 29 para edifícios altos.

A NFPA é a autoridade Norte-Americana responsável pela produção de documentos técnicos voltados para a proteção ao fogo, sendo que as versões atuais do conjunto normativo americano que tratam sobre o controle de fumaça são do ano de 2018. A NFPA 92 é o ponto de partida para o projeto de sistemas de controle de fumaça, tratando também sobre instalações, testes e operações do sistema, com o objetivo de prevenir a entrada de fumaça em áreas seguras, como em escadas e *shafts*, a migração entre zonas de fumaça, provendo condições fora da zona afetada para auxiliar nas respostas dos serviços de emergência, mitigando os riscos à vida e à propriedade.

A indústria norte americana de proteção contra incêndios evoluiu muito a partir da década de 1980 principalmente em virtude do incêndio no MGM Grand Hotel e Cassino, que resultou em 85 mortes. Destas mortes, apenas 18 vítimas foram localizadas no nível de origem do fogo. Sessenta e uma vítimas, localizadas na torre de arranha-céus anexada ao cassino, morreram de inalação de monóxido de carbono, em virtude da propagação de fumaça. Aberturas verticais desprotegidas, caixas de escada abaixo do padrão, lacunas excessivas nas juntas de separação sísmica e o próprio sistema de climatização permitiu que a fumaça se espalhasse da área de origem (Klote e Milke, 2002).

Mesmo antes do incêndio da MGM, discussões sobre o uso de sistemas exclusivos ou compartilhados que poderiam efetivamente gerenciar a fumaça em um edifício estavam ocorrendo entre várias organizações, incluindo NFPA, ASHRAE (e seu antecessor - a Sociedade Americana de Engenheiros de Refrigeração), o *National Bureau of Standards* (agora NIST) e empresas de consultoria (Klote e Milke, 2002).

O primeiro documento de controle da NFPA, “NFPA 92A: Prática Recomendada para Sistemas de Controle de Fumaça”, foi publicado em 1988. Durante os anos seguintes, a NFPA 92A amadureceu em uma norma padrão e a “NFPA 92B: Padrão para Sistemas de Gerenciamento de Fumaça em *Malls*, Átrios e Grandes Espaços” foi publicada. Em 2012, os documentos foram fundidos em um só, a NFPA 92, para sistemas de controle de fumaça. A NFPA 92 abrange dois tipos de sistemas de controle de fumaça: sistemas de gestão e sistemas de contenção de fumaça (NFPA, 2018).

Sistemas de gestão trabalham para manter espaços de grande volume com condições mínimas para a saída dos ocupantes ou impedir o movimento da fumaça em espaços circunvizinhos. Sistemas de contenção de fumaça impedem a entrada de fumaça em áreas específicas. Um dos objetivos mais importantes do design tanto para sistemas de gerenciamento de fumaça quanto para contenção de fumaça é manter um ambiente sustentável para a evacuação por um período especificado. A NFPA 92 fornece métodos para calcular a temperatura, a densidade e a taxa de fluxo da fumaça (NFPA, 2018).

Em Portugal, o Decreto-Lei 220/2008 de 12 de novembro, designado Regime Jurídico de Segurança Contra Incêndio em Edifícios (RJ-SCIE) e a Portaria 1532/2008, de 29 de dezembro, designada Regulamento Técnico de Segurança Contra Incêndio em Edifícios (RT-SCIE) inauguraram o conjunto de legislação estruturante sobre segurança contra incêndios em edifícios utilizado atualmente, com vigência a partir de janeiro de 2019 e revogação de diplomas anteriores (Ribeiro, 2018).

O Decreto é composto por cinco capítulos e cinco anexos com condições comuns (207 artigos, 29 dos quais se referem à temática do controle de fumaça) e condições específicas (101 artigos, sendo cinco deles referentes ao controle de fumaça), também são descritas doze utilizações tipo e seis locais de risco, definidos a partir de considerações sobre o efetivo total, o efetivo de público, os ocupantes com limitações de mobilidade, a existência de riscos agravados de incêndio e a existência de sistemas essenciais à continuidade de atividades relevantes. Além disso são definidas quatro categorias de risco em função da altura, área bruta, efetivo total, efetivo em locais de risco, existência de cobertura ou não, número de pisos abaixo do

plano de referência e carga de incêndio. A Portaria é constituída por oito capítulos e um anexo, onde se estabelecem os critérios de dimensionamento para sistemas passivos (localização, resistência ao fogo das estruturas e dos materiais; compartimentação, dimensionamento e proteção dos caminhos de evacuação, entre outros) e para sistemas ativos (condições gerais das instalações técnicas e dos equipamentos e sistemas de segurança) (Ribeiro, 2018).

Apesar dos diversos estudos e aplicações dos sistemas de controle de fumaça pelo mundo, este tema ainda é pouco discutido no Brasil. O estado de São Paulo foi o primeiro a adotar uma legislação que impõe a obrigatoriedade de implementação de sistemas de controle de fumaça. Por meio do Decreto Estadual nº 46.076/2001, foram descritas as situações nas quais se exige a implementação do sistema. Para atender a esta lei, foi elaborada a Instrução Técnica nº 15 (IT15, 2019), pelo Corpo de Bombeiros do Estado de São Paulo, sendo então considerada pioneira neste tipo de norma em território brasileiro.

A Instrução Técnica Nº 15 do Corpo de Bombeiros Militar do Estado de São Paulo foi dividida em oito partes, são elas: Parte 1 - Regras Gerais; Parte 2 - Conceitos, definições e componentes do sistema; Parte 3 - Controle de fumaça natural em edificações comerciais, industriais e depósitos; Parte 4 - Controle de fumaça natural nas demais ocupações; Parte 5 - Controle de fumaça mecânico; Parte 6 - Controle de fumaça em rotas de fuga horizontais protegidas e subsolos; Parte 7 - Átrios e Parte 8 - Aspectos de segurança.

Após a normativa elaborada pelo Corpo de Bombeiros do Estado de São Paulo, outros corpos de bombeiros também passaram a implementar instruções técnicas sobre este tema, baseadas na própria IT-15. Atualmente, os estados que possuem norma própria sobre controle de fumaça, além de São Paulo, são: Amazonas, Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Pará, Paraná, Piauí, Rio de Janeiro, Rio Grande do Norte, Rio Grande do Sul, Rondônia e Roraima. Portanto, dos 27 estados brasileiros, 14 possuem alguma normatização sobre o tema.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, juntamente com a Associação Brasileira de Refrigeração, Ar-Condicionado, ventilação e Aquecimento – ABRAVA, estão atuando em conjunto para elaborar uma norma técnica sobre

sistemas de controle de fumaça nas edificações. O Brasil, quinto maior país em extensão territorial, reúne diversas culturas e, muitos tipos de edificações e materiais empregados na construção civil. Dessa forma, normas estaduais coerentes e concisas devem ser elaboradas de forma a compreender todos esses aspectos.

3 METODOLOGIA

Gil (2010) define pesquisa como o procedimento racional e sistemático que tem como objetivo fornecer respostas aos problemas que são propostos. O autor ainda defende que a pesquisa é desenvolvida mediante o concurso dos conhecimentos disponíveis e a utilização de métodos e técnicas de investigação científica.

Segundo Marconi e Lakatos (2010) o método é o conjunto das atividades sistemáticas e racionais que permite alcançar o objetivo - conhecimentos válidos e verdadeiros. Como toda atividade racional e sistemática, a pesquisa exige que as ações desenvolvidas ao longo do seu processo sejam efetivamente planejadas (GIL, 2010).

Para a confecção do trabalho foram realizados estudos bibliográficos das teorias nas quais se baseiam os sistemas de controle de fumaça. Dessa forma, o trabalho se desenvolve no sentido de estudar e descrever conceitos relacionados às principais características da fumaça, efeitos da fumaça no organismo, métodos de controle de fumaça existentes, instruções normativas, normas, códigos, documentos técnicos de serviços de bombeiro e demais bibliografias relacionadas ao tema.

A pesquisa bibliográfica foi utilizada em todo o decorrer do trabalho, de acordo com Gil (2010), esse tipo de pesquisa é elaborada com base em material já publicado e tem como vantagem permitir ao investigador a cobertura de uma gama de fenômenos muito mais ampla do que aquela que poderia pesquisar diretamente.

No primeiro momento foi desenvolvido o estudo da fumaça propriamente dita, seu comportamento, composição química e efeitos no organismo humano. Para isso utilizou-se de bibliografia voltada ao estudo do fogo, termodinâmica, transferência de calor e mecânica dos fluidos.

Seguidamente foram abordados os diferentes tipos de controle de fumaça, natural, mecânico e misto, suas características, diferenças e aplicações mais comuns. Sabido que documentação técnica fundamenta sistemas consolidados, partiu-se para o estudo das normas Americana e Europeia com vistas a compreender os principais temas abordados por elas.

Visto isso, foram analisadas as normativas brasileiras para melhor visualização do o panorama nacional referente ao controle de fumaça. Então as normas americana e brasileira foram comparadas com o objetivo de elencar os pontos em comum e possíveis divergências, buscando avaliar quais se adequam à realidade do Distrito Federal.

Por fim, após a conclusão dos estudos foi elaborada uma proposta de parte da normativa técnica de sistemas de controle de fumaça, aplicável em todo o Distrito Federal, visando a padronização das exigências e da forma de implementação dos sistemas em edificações.

3.1 Quanto à área de conhecimento

Conforme relatado por Gil (2010) o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) classifica as pesquisas em sete grandes áreas: 1. Ciências Exatas e da Terra; 2. Ciências Biológicas; 3. Engenharias; 4. Ciências da Saúde; 5. Ciências Agrárias Aplicadas e 7. Ciências Humanas. A presente pesquisa enquadra-se na área de Engenharia.

3.2 Quanto à sua finalidade

As pesquisas podem ser classificadas de duas maneiras tradicionais: a básica reúne estudos que tem como propósito preencher uma lacuna no conhecimento e a pesquisa aplicada abrange estudos elaborados com a finalidade de resolver problemas identificados no âmbito das sociedades em que os pesquisadores vivem (GIL, 2010).

Nesse sentido, a pesquisa realizada é classificada como aplicada, pois é voltada à aquisição de conhecimento relacionado ao controle de fumaça, com vistas à aplicação numa situação específica, a confecção de norma técnica para o Distrito Federal.

3.3 Quanto aos objetivos

Em relação aos objetivos mais gerais, ou propósitos, as pesquisas podem ser classificadas em exploratórias, descritivas e explicativas (GIL, 2010).

Quanto aos objetivos da pesquisa, a metodologia aplicada foi a exploratória que, segundo Gil (2010), têm como finalidade proporcionar maior familiaridade com o problema, com vistas a torná-lo mais explícito.

Tal classificação foi adotada pois, o principal objetivo do trabalho consiste em estudar, analisar e comparar normativas, além de diversos estudos relacionado ao tema, com o intuito de identificar relações e contradições, formando uma base sólida para o desenvolvimento futuro de normativa própria para o CBMDF.

3.4 Quanto ao método

Conforme explicitado por Marconi e Lakatos (2010), o argumento dedutivo tem o propósito de explicar o conteúdo das premissas, já o indutivo tem o desígnio de ampliar o alcance dos conhecimentos.

O método aplicado para a elaboração da pesquisa foi o dedutivo, partindo do geral para obter conclusões particulares. Pois, foram analisados diversos tipos de sistemas de controle de fumaça, além da teoria que envolve desde o surgimento até o comportamento da fumaça, para então edificar o arcabouço teórico, com vistas a desenvolver uma proposta de norma técnica que seja aplicável no Distrito Federal.

3.5 Quanto à abordagem

Nascimento (2002) relata a abordagem quantitativa relacionando-a aos fatos mensuráveis, discerníveis e sem ambiguidades, uma realidade estática com resultados replicáveis e generalizáveis. Esse tipo de pesquisa busca descobrir, quantificar e classificar dados.

Utiliza-se a abordagem qualitativa nas pesquisas voltadas à interpretação de fenômenos, atribuindo significados de forma contextualizada. A pesquisa realizada teve uma abordagem qualitativa, alicerçada na revisão de literatura com o intuito de

construir a base necessária para a interpretação e posterior aplicação do conhecimento adquirido sobre o controle da fumaça.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise das Normas e Instruções Técnicas brasileiras

Ao analisar as normas e instruções técnicas voltadas para o controle de fumaça dos corpos de bombeiros brasileiros tem-se o seguinte cenário: a Instrução Técnica nº 15 do Corpo de Bombeiros Militar de São Paulo foi a pioneira e serviu como base para os demais estados. Os estados do Amazonas, Paraná, Piauí, Rio Grande do Sul, Roraima e Rondônia utilizam a IT de São Paulo de forma literal. Os estados de Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e Rio Grande do Norte realizaram apenas pequenas modificações na formatação da norma de São Paulo. Rio de Janeiro, Minas Gerais e Pará utilizam a norma de São Paulo como referência, aplicando uma formatação e organização próprios, entretanto o conteúdo é praticamente o mesmo.

Considerando a descrição acima, realizou-se o estudo a partir da norma de São Paulo, visto que será suficiente para traduzir o cenário nacional pois, as demais normativas são cópias literais ou com pequenas adaptações da IT-15.

4.2 Instrução Técnica Nº 15/2019 - Polícia Militar do Estado de São Paulo

A Instrução Técnica nº 15/2019 de São Paulo, conforme citado no capítulo anterior, está dividida em oito documentos (partes). Foram estudados então todos as partes, de forma a compreender os aspectos mais importantes que poderão compor a norma do Distrito Federal. Serão elencados os pontos mais relevantes dos capítulos que compõem os documentos, portanto, para maior detalhamento, a Instrução Técnica deve ser consultada.

4.2.1 Instrução Técnica Nº 15/2019: Parte 1 - Regras gerais

A Parte 1 - Regras gerais é dividida em 6 capítulos. O Capítulo 1 traz o objetivo da IT, que é de estabelecer parâmetros técnicos para implementação de sistemas de controle de fumaça; o Capítulo 2 define a aplicação desta em átrios, *malls*, subsolos, espaços amplos e rotas horizontais, com o intuito de manter o ambiente seguro durante o tempo necessário para o abandono do local sinistrado, promover o controle

e a redução da propagação dos gases quentes e fumaça e auxiliar nas operações de busca, resgate e controle do incêndio.

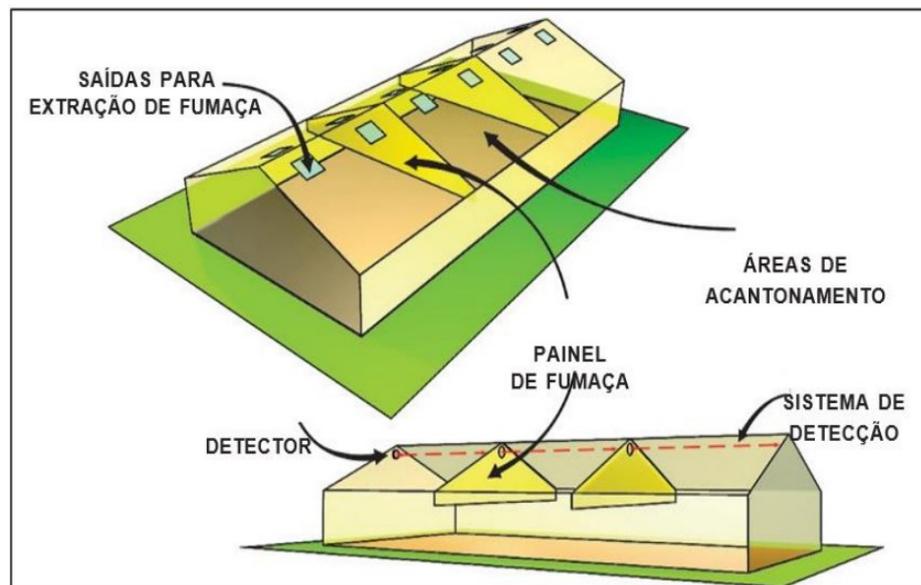
Importante salientar que escadas e rotas de fuga verticais devem atender às Instruções Técnicas próprias, sendo que, os diferentes sistemas de controle de fumaça (em rotas de fuga horizontais e verticais) devem ser compatíveis.

O Capítulo 3 traz as diversas referências normativas e bibliográficas que compuseram a IT, entre elas a normativa francesa - *Instruction Technique 246*, a norma alemã - DIN 18232-5 e a norma americana NFPA 92.

Denominado “Procedimentos”, o Capítulo 4 trata das condições gerais das edificações que devem ser dotadas de meios de controle de fumaça, para que promovam a extração dos gases do local de origem do incêndio, controlando a entrada de ar e prevenindo a migração da fumaça para áreas não sinistradas.

São estabelecidas as condições para um eficiente controle de fumaça, sendo elas: a divisão dos volumes de fumaça a extrair por meio da compartimentação ou acantonamento (Figura 5), a extração adequada sem a criação de zonas de acúmulo de fumaça (zona morta) e o controle das aberturas de extração de fumaça de forma a criar um diferencial de pressão, conduzindo a fumaça para as saídas externas ao edifício (Figura 6).

Figura 5 – Exemplo de acantonamento utilizado na IT-15 SP



Fonte: Instrução Técnica N° 15 - Polícia Militar do Estado de São Paulo, 2019.

Figura 6 – Exemplo de extração da fumaça utilizado na IT-15 SP



Fonte: Instrução Técnica N° 15 - Polícia Militar do Estado de São Paulo, 2019.

Ainda no Capítulo 4 tem-se que o controle de fumaça é obtido pela introdução de ar limpo e extração de fumaça de forma natural ou mecânica, conforme a Figura 7. Não podem ser instalados, em um mesmo ambiente, sistemas de extração de fumaça natural e mecânico, sendo que, o funcionamento do sistema deve colocar a área sinistrada em pressão negativa em relação às áreas adjacentes.

Figura 7 – Quadro dos sistemas de extração de fumaça e introdução de ar utilizado na IT-15 SP

Extração de fumaça	Introdução de ar limpo
Natural	Natural
Mecânica	Natural
Mecânica	Mecânica

Fonte: Instrução Técnica N° 15 - Polícia Militar do Estado de São Paulo, 2019.

O projeto e a execução dos sistemas deve ocorrer de forma a evitar condições perigosas, como a explosão da fumaça (*backdraft*) ou a propagação do incêndio decorrente do aumento de temperatura do local sinistrado.

Os quadros das Figuras 8 e 9 são exemplos da indicação por ocupação, das partes da edificação que devem possuir controle de fumaça.

Figura 8 – Determinação dos locais onde deve haver controle de fumaça, por ocupação, utilizado na IT-15 SP

OCUPAÇÃO	H > 90 (sem átrio)		Subsolo	
	Locais a proteger	Partes da IT 15 a consultar	Locais a proteger	Partes da IT 15 a consultar
RESIDENCIAL	-----	-----	Todos os locais com ocupação distinta de estacionamento	1, 2, 6 e 8
SERVIÇOS DE HOSPEDAGEM	Conforme item 4.2	1, 2, 5 e 8	Todos os locais com ocupação distinta de estacionamento	1, 2, 6 e 8
COMERCIAL	Conforme item 4.2	1, 2, 5 e 8	Todos os locais com ocupação distinta de estacionamento	1, 2, 6 e 8

Fonte: Instrução Técnica N° 15 - Polícia Militar do Estado de São Paulo, 2019.

Figura 9 – Determinação dos locais onde deve haver controle de fumaça, por ocupação, utilizado na IT-15 SP

OCUPAÇÃO	Átrio ou quebra de isolamento vertical		Exigências de outras IT		
	Locais a proteger	Partes da IT 15 a consultar	Locais a proteger		Partes da IT 15 a consultar
RESIDENCIAL	Átrio;	1, 2, 7 e 8	Edifícios sem janelas	Com corredores definidos	1, 2, 6 e 8
				Sem corredores	1, 2, 5 e 8
SERVIÇOS DE HOSPEDAGEM	Átrio; corredores; áreas adjacentes a corredores	1, 2, 7 e 8	Edifícios sem janelas	Com corredores definidos	1, 2, 6 e 8
				Sem corredores	1, 2, 5 e 8
COMERCIAL	Átrio; corredores; áreas adjacentes a corredores	1, 2, 7 e 8	Edifícios sem janelas	Com corredores definidos	1, 2, 6 e 8
				Sem corredores	1, 2, 5 e 8

Fonte: Instrução Técnica N° 15 - Polícia Militar do Estado de São Paulo, 2019.

A norma classifica a ocupação como: residencial, serviços de hospedagem, comercial, serviços profissionais, educacional, local de reunião de público, serviços automotivos e assemelhados, serviços de saúde, industrial e depósito. Essa classificação segue aquela delimitada pelo Anexo A do Decreto 63.911, de 10 de dezembro de 2018 do estado de São Paulo, que classifica as edificações e áreas de risco quanto à ocupação.

Conforme observa-se nas Figuras 7 e 8, as características da edificação são definidas como: Altura maior que 90 metros sem átrio ($H > 90$), Subsolo e Átrio ou quebra de isolamento vertical. Também são consideradas as exigências de outras Instruções Técnicas. De acordo com a ocupação e característica da edificação são definidos os locais a proteger e as partes da IT 15 a consultar.

O Capítulo 4 aborda ainda alguns parâmetros para aplicação do sistema nas edificações com altura superior a 90 metros, tais como a obrigatoriedade da instalação de sistema de controle de fumaça protegendo os acessos às rotas de fuga, o estabelecimento da altura mínima de 2,20 metros da zona livre de fumaça para o cálculo da vazão de extração, a velocidade de no máximo 5 m/s do ar no ponto de extração, dentre outras.

Ainda sobre as edificações com altura maior que 90 metros, são adotados parâmetros específicos para unidades autônomas com área superior a 300 m², dentre eles, a extração de fumaça deve ser feita no interior da unidade e a introdução de ar deve ser realizada de forma mecânica. Com relação aos corredores, estes devem conter pontos de extração de fumaça uniformemente distribuídos, mantendo-se um distanciamento máximo de 10 metros entre dois pontos consecutivos, além de um ponto localizado a uma distância máxima de 3 metros de cada extremidade, entre outros fatores.

O capítulo 5 traz considerações sobre o subsolo, definindo-o como o pavimento situado abaixo do perfil do terreno, não sendo assim considerado o pavimento que possuir ventilação natural para o exterior em pelo menos duas paredes distintas e tiver sua laje de cobertura acima de 1,20 m do perfil do terreno. O dimensionamento será definido conforme Parte 6 da IT 15.

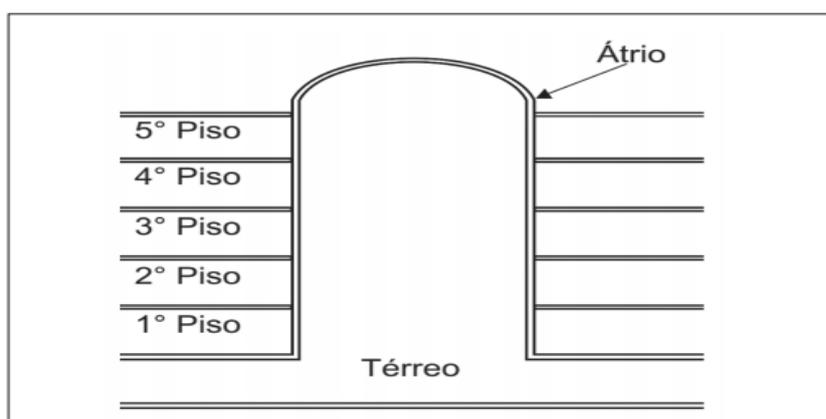
O Capítulo 6 trata sobre edificações sem janelas ou aberturas nas paredes periféricas ou coberturas. São estabelecidos parâmetros para que a edificação ou pavimento seja considerado com ou sem janelas, como por exemplo área útil para ventilação externa, abertura no teto ou telhado e presença de chuveiros automáticos e detecção de incêndio, a depender da ocupação. As edificações sem janelas devem ser dotadas de extração mecânica com capacidade mínima de 10 trocas do volume por hora, os extratores devem ser acionados automaticamente por um sistema de detecção de incêndio e alternativamente por acionamento manual remoto, podendo ser realizada por meio da rede de dutos de ar condicionado.

4.2.2 Instrução Técnica Nº 15/2019: Parte 2 - Conceitos, definições e componentes do sistema

A Parte 2 - Conceitos, definições e componentes do sistema, é dividida em 2 capítulos. O Capítulo 7 apresenta diversas definições e conceitos e o Capítulo 8 versa sobre os componentes de um sistema de controle de fumaça.

No Capítulo 7 são apresentadas 32 definições e conceitos a serem utilizados quando se trata de controle de fumaça (Figura 11). Por exemplo, o acantonamento é definido como o volume livre compreendido entre o chão e o teto, telhado ou forro, delimitado por painéis de fumaça e o átrio é definido como o espaço amplo criado por um andar aberto ou conjuntos de andares abertos, conectando 2 ou mais pavimentos cobertos, com ou sem fechamento na cobertura, conforme Figura 10.

Figura 10 – Átrio conforme IT-15 SP



Fonte: Instrução Técnica Nº 15 - Polícia Militar do Estado de São Paulo, 2019.

Figura 11 – Quadro das definições e conceitos da IT 15

Definições e conceitos elencados na IT 15			
Acantonamento	Camada de fumaça “ <i>smoke layer</i> ”	Extração de fumaça	Pressurização
Altura da zona enfumaçada (H_f)	Corredor definido	Fluxo de calor	Produção de calor
Altura da zona livre de fumaça (H')	Dimensões do incêndio	Fumaça	Registro corta-fogo e fumaça
Altura de referência (H)	Entrada de ar limpo	Interface da camada de fumaça “ <i>smoke layer interface</i> ”	Sistema de controle de fumaça
Área livre de um vão de fachada, grelha ou extrator natural	Efeito chaminé	Jato de fumaça sobre o teto “ <i>ceiling jet</i> ”	Superfície útil de um extrator
Área útil de um vão de fachada, boca de ventilação ou extrator	Espaços adjacentes	Núcleo do pavimento	Supervisão
Átrio	Extrator mecânico de fumaça	Painel de fumaça	Zona enfumaçada
Barreiras de fumaça	Extrator natural de fumaça	Pleno	Zona livre de fumaça

Fonte: Adaptado de (Instrução Técnica nº 15 - Polícia Militar do Estado de São Paulo, 2019).

O Capítulo 8 apresenta, de forma genérica, os vários itens que compõem ou podem fazer parte dos sistemas de controle de fumaça. Por exemplo, para um sistema de extração natural, são definidos dois componentes: a entrada de ar (que pode ser por aberturas localizadas nas fachadas e acantonamentos adjacentes, pelas portas dos locais a extrair fumaça, localizadas nas fachadas e acantonamentos adjacentes, e pelos vãos das escadas abertas) e a extração de fumaça (que pode ser por abertura ou vão de extração, janela veneziana de extração, grelhas ligadas a dutos, claraboia ou alçapão de extração, poços ingleses, dutos e peças especiais, registros corta-fogo

e fumaça, além de mecanismos elétricos, pneumáticos e mecânicos de acionamento dos dispositivos de extração de fumaça).

Além dos componentes citados acima, são apresentados aqueles que fazem parte dos sistemas de extração mecânica, barreiras de fumaça, grelhas e venezianas, circuitos de instalação elétrica, comando dos sistemas, dutos, fontes alternativas de alimentação elétrica, registros corta-fogo e fumaça e ventiladores de extração de fumaça e introdução de ar.

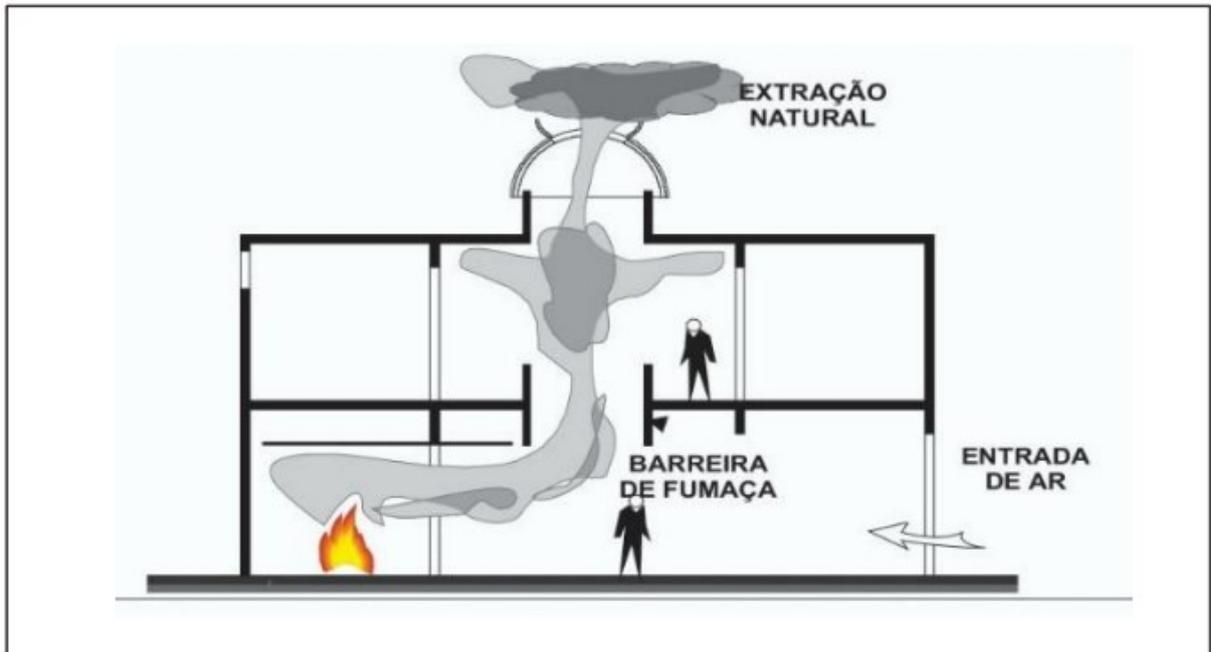
4.2.3 Instrução Técnica Nº 15/2019: Parte 3 - Controle de fumaça natural em edificações comerciais, industriais e depósitos

A Parte 3 - Controle de fumaça natural em edificações comerciais, industriais e depósitos é constituída pelo Capítulo 9. Esse capítulo apresenta procedimentos específicos aplicados às edificações comerciais (Grupo C), sendo C-1 o comércio com baixa carga de incêndio, C-2 o comércio com média e alta carga de incêndio e C-3 os Shopping Centers; industriais (Grupo I), sendo I-1 a indústria com carga de incêndio até 300 MJ/m², I-2 a indústria com carga de incêndio acima de 300 MJ/m² até 1.200 MJ/m² e I-3 a indústria com carga de incêndio superior a 1.200 MJ/m² I-3; e depósitos (Grupo J), sendo J-1 o depósito de material incombustível, J-2 o depósito com carga de incêndio de até 300 MJ/m², J-3 o depósito com carga de incêndio acima de 300 MJ/m² até 1.200 MJ/m² e J-4 o depósito com carga de incêndio superior a 1.200 MJ/m².

No controle de fumaça natural, a extração da fumaça pode ser realizada por aberturas na fachada, extratores naturais e aberturas de extração (ligadas ou não aos dutos). São estabelecidas distâncias entre os extratores naturais e quaisquer obstáculos que lhes seja mais elevado, além de estabelecer uma distância mínima com relação à divisa do terreno e propriedades adjacentes (Figuras 12 e 13).

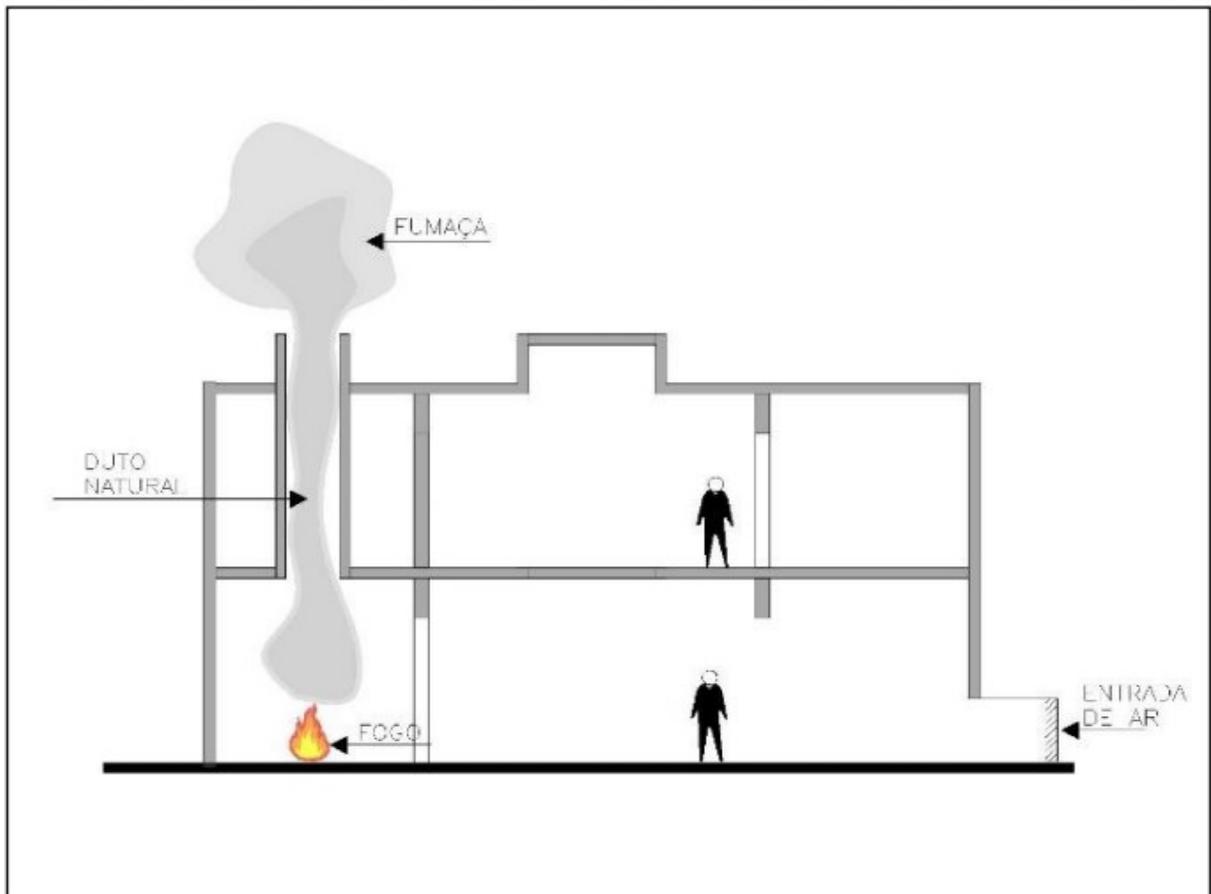
A abertura de introdução de ar para o controle de fumaça pode ser realizada por aberturas na fachada, portas dos locais onde a fumaça é extraída e que deem para o exterior, escadas abertas ou ao ar livre e aberturas de introdução posicionadas na fachada ou ligadas a dutos de captação de ar externo (Figuras 12 e 13).

Figura 12 – Entrada de ar e extração natural conforme IT-15 SP



Fonte: Instrução Técnica N° 15 - Polícia Militar do Estado de São Paulo, 2019.

Figura 13 – Entrada de ar e extração natural por meio de dutos conforme IT-15 SP

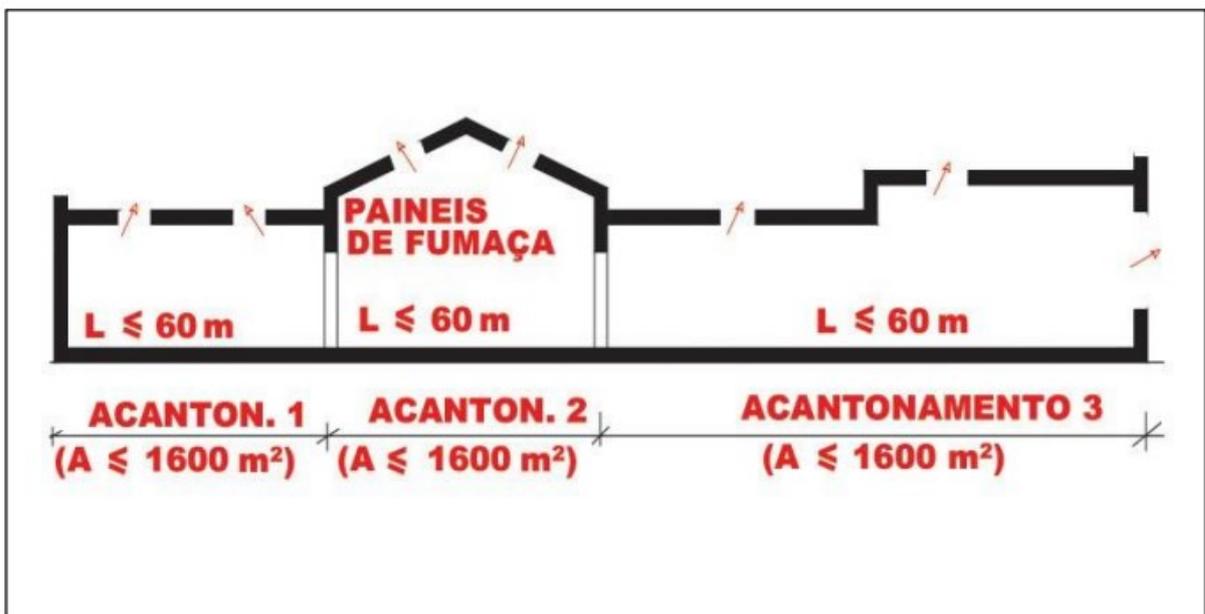


Fonte: Instrução Técnica N° 15 - Polícia Militar do Estado de São Paulo, 2019.

Em seguida são estabelecidos parâmetros de projeto para edificações térreas, grandes áreas isoladas em um pavimento e edificações que possuam seus pavimentos isolados por lajes, excetuando-se ambientes cobertos e átrios com altura de referência superior a 15 metros.

As áreas dessas edificações devem ser divididas em acantonamentos de no máximo 1.600 m², sendo que, o comprimento máximo de um lado da área de acantonamento não deve passar de 60 metros, conforme Figura 14.

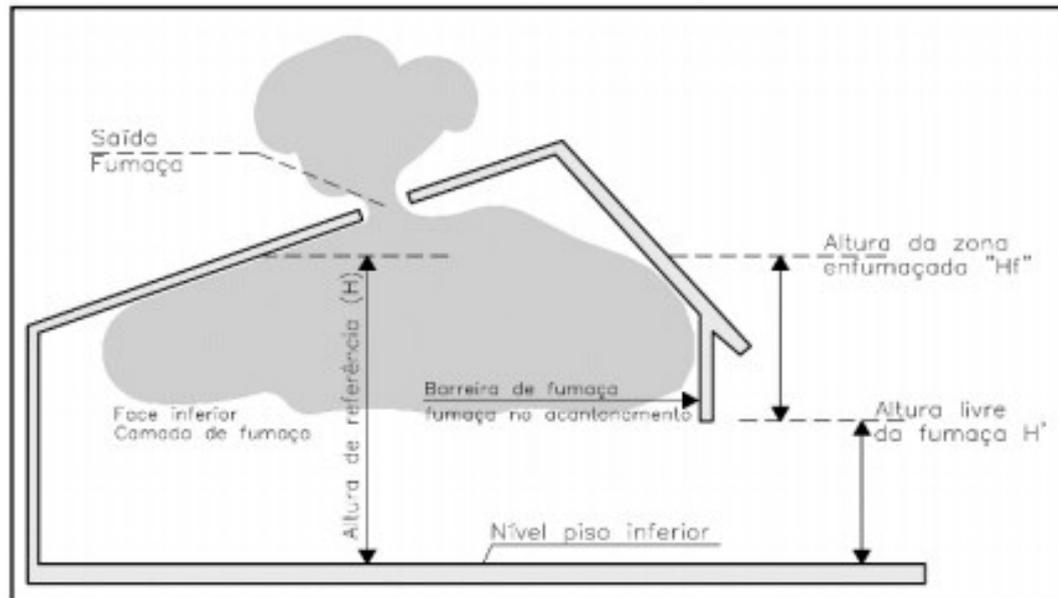
Figura 14 – Divisão em áreas de acantonamento conforme IT-15 SP



Fonte: Instrução Técnica N° 15 - Polícia Militar do Estado de São Paulo, 2019.

As aberturas destinadas a extração da fumaça devem se situar no ponto mais alto possível dentro da camada de fumaça, já aquelas destinadas à introdução de ar devem estar situadas na zona livre de fumaça no ponto mais baixo possível. A superfície geométrica total das áreas destinadas à entrada de ar deve ser ao menos igual às destinadas a extração da fumaça (Figura 15).

Figura 15 – Altura de referência, livre de fumaça e da zona enfumaçada conforme IT-15 SP



Fonte: Instrução Técnica N° 15 - Polícia Militar do Estado de São Paulo, 2019.

Ademais, o capítulo trata sobre a forma de delimitação das áreas de acantonamento, a distância entre as saídas de extração e destas para qualquer ponto do perímetro de acantonamento, altura e angulação máxima dos dutos ligados a aberturas de extração e superfície útil de um extrator natural. É apresentado o método para a obtenção da área de extração de fumaça com a utilização de tabelas e a fórmula para o cálculo da área efetiva de extração de fumaça, similar ao que será apresentado no Capítulo 10 da IT.

4.2.4 Instrução Técnica N° 15/2019: Parte 4 - Controle de fumaça natural nas demais ocupações

O capítulo 10 define os parâmetros de dimensionamento para as demais edificações, com exceção daquelas tratadas no capítulo 9. Contudo, para fins de arranjo de área de acantonamento, posição de extratores naturais e parâmetros para previsão dos equipamentos o capítulo 9 deve ser consultado.

Neste capítulo são estabelecidos os parâmetros de dimensionamento para a obtenção da área de extração de fumaça. Sendo que, para o cálculo da superfície útil das saídas de extração são necessários os seguintes dados: altura de referência e altura da zona livre de fumaça (dados de projeto), classificação da edificação

conforme Tabela 7 da IT (Figura 16) e uma taxa obtida conforme a Tabela 8 da IT (Figura 17). A área efetiva de extração de fumaça é calculada multiplicando-se a área de cada acantonamento pela taxa de extração de fumaça. Tanto o Capítulo 9 quanto o Capítulo 10 fornecem exemplos da utilização dos métodos de cálculo apresentados.

Figura 16 – Classificação de risco para as demais ocupações conforme IT-15 SP

Locais de reunião de público	Bibliotecas	F-1	Classe 3
	Arquivo de documentos	F-1	Classe 3
	Museus	F-1	Classe 2
	Igrejas e templos	F-2	Classe 1
	Centros esportivos	F-3	Classe 1
	Estações e terminais de passageiros	F-4	Classe 1
	Cinemas, teatros e similares	F-5	Classe 2
	Clubes sociais, boates e similares	F-6	Classe 2
	Restaurantes	F-8	Classe 1
	Auditório de rádio e televisão	F-5	Classe 3
	Pavilhões temporários	F-5	Classe 3
	Exposição de automóveis	F-10	Classe 3
	Exposição de máquinas	F-10	Classe 2
	Exposição de móveis	F-10	Classe 3

Fonte: Instrução Técnica N° 15 - Polícia Militar do Estado de São Paulo, 2019.

Figura 17 – Taxa de porcentagem para determinação das áreas de abertura conforme IT-15 SP

Altura de referência (em m)	Altura da zona livre de fumaça H' (em m)	% de abertura		
		Classe 1	Classe 2	Classe 3
2,50	2	0,23	0,33	0,47
3	2,25	0,23	0,32	0,46
	2	0,17	0,23	0,33
3,50	2,65	0,27	0,39	0,55
	2,50	0,23	0,33	0,46
	2	0,14	0,19	0,27
4	3	0,30	0,43	0,61
	2,50	0,19	0,27	0,38
	2	0,12	0,17	0,23
4,50	3,50	0,38	0,54	0,77
	3	0,25	0,35	0,50
	2,50	0,16	0,23	0,33
	2	0,10	0,14	0,21

Fonte: Instrução Técnica N° 15 - Polícia Militar do Estado de São Paulo, 2019.

4.2.5 Instrução Técnica Nº 15/2019: Parte 5 - Controle de fumaça mecânico

A Parte 5 da Instrução Técnica apresenta-nos o Capítulo 11 que detalha os procedimentos específicos para o estabelecimento do controle de fumaça mecânico, definindo-o como aquele que é realizado pela extração mecânica de fumaça e pela introdução do ar de forma natural ou mecânica, podendo ser realizada por dispositivos ligados a ventiladores por meio de dutos ou instalados diretamente na área a proteger.

O controle de fumaça mecânico pode ser um sistema específico, destinado exclusivamente à extração da fumaça, utilizar o sistema de ventilação ou ar-condicionado da edificação, desde que atenda às funções de climatização e extração de fumaça ou utilizar um sistema conjugado, com o emprego do sistema de climatização complementado por um sistema de controle de fumaça auxiliar.

Aspecto importante da utilização do sistema de climatização do edifício para o controle de fumaça por extração mecânica é que este deve assegurar a abertura ou fechamento de todas as partes que compõem o sistema, garantindo a não intrusão de fumaça nas demais áreas do edifício.

São elencados 10 fatores a serem considerados na elaboração do projeto de controle de fumaça, são eles: tamanho do incêndio, taxa de liberação de calor, altura da camada de fumaça, tempo para a camada de fumaça descer até a altura de projeto, dimensão do acantonamento, espessura da camada de fumaça, temperatura do ambiente, temperatura da fumaça, introdução de ar e obstáculos.

O tamanho do fogo dependerá se este será estável (quando a edificação for dotada de meios de supressão automática do incêndio) ou instável (quando não atender ao requisito anterior), além disso o tamanho do incêndio segue o estabelecido pelo quadro apresentado a seguir (Figura 18). Pontua-se que em edificações do Grupo J (depósitos) o tamanho do incêndio será o resultado da multiplicação da área constante no quadro pela altura de estocagem.

Figura 18 – Dimensões do incêndio conforme IT-15 SP

Categorias de risco	Tamanho do incêndio (m)	Perímetro (m)	Área (m²)
Baixo (Até 300 MJ/m ²)	3,0 x 3,0	12	9
Médio (de 300 a 1.200 MJ/m ²)	4,0 x 4,0	16	16
Alto (acima de 1.200 MJ/m ²)	6,0 x 6,0	24	36

Fonte: Instrução Técnica N° 15 - Polícia Militar do Estado de São Paulo, 2019.

A taxa de liberação de calor é determinada conforme dados tabelados constantes na Instrução Técnica, para fins de exemplificação, abaixo encontra-se parte dos parâmetros empregados (Figura 19).

Figura 19 – Taxa de liberação de calor conforme IT-15 SP

Ocupações	Taxa de liberação de calor (KW/m²)
Residencial	228
Serviços de hospedagem	500
Comercial	500
Serviços profissionais	228
Educacional	350
Local de reunião pública	500
Serviços automotivos	500
Serviços de saúde e institucionais	500
Indústrias	Taxa de liberação de calor (KW/m²)
I-1	60
I-2	280
I-3	500

Fonte: Instrução Técnica N° 15 - Polícia Militar do Estado de São Paulo, 2019.

A altura da camada de fumaça pode alcançar no máximo 85% da altura entre o piso e o teto, devendo estar no mínimo a 2,20 m acima do piso. Onde houver depósito de mercadorias, a camada de fumaça deve ser projetada a 0,50 m acima do topo dos produtos armazenados.

A posição da interface da camada de fumaça será determinada a depender dos seguintes cenários: nenhum sistema de extração de fumaça está em operação, a vazão mássica de extração de fumaça for igual ou superior à vazão fornecida à coluna da camada de fumaça e a vazão de extração de fumaça for menor que a vazão fornecida à coluna da camada de fumaça.

A Instrução Técnica apresenta a fórmula abaixo para determinar a posição da camada de fumaça quando nenhum sistema de extração está em funcionamento, tal equação é decorrente daquela apresentada no presente trabalho para o cálculo da altura da camada de fumaça (equação 8).

$$\frac{z}{H} = 1,11 - 0,28 \ln \left[\left(t \frac{Q^{1/3}}{H^{4/3}} \right) / \left(\frac{A}{H^2} \right) \right] \quad (9)$$

Com o fogo na condição estável, estabelece-se que ($z/H > 1,0$) significa que a camada de fumaça não começou a descer, sendo que z é a altura de projeto da camada de fumaça acima do piso (m), H é a altura do teto acima da base do fogo (m), t é o tempo (segundos), Q é a taxa de liberação de calor de fogo estável (kW) e A é a área do acantonamento (m²).

Para estabelecer a posição da camada de fumaça com a extração de fumaça em operação faz-se necessária a determinação da altura da chama, da massa e do volume de fumaça produzido.

Na determinação da altura da chama, proveniente da base do fogo, é adotada a seguinte equação:

$$z_1 = 0,166 Q_c^{2/5} \quad (10)$$

Onde z_1 é a altura da chama (m) e Q_c é a porção convectiva da taxa de liberação de calor (kW).

Para o dimensionamento da massa de fumaça a ser extraída deve-se determinar a massa de fumaça gerada pelo incêndio, sendo que, esta depende se a altura da camada de fumaça é: superior à altura da chama ($z > z_1$) ou igual ou inferior à altura da chama ($z \leq z_1$).

Para a condição ($z > z_1$), a massa de fumaça gerada é determinada pela seguinte equação:

$$m = 0,071Q_c^{1/3}z^{5/3} + 0,0018Q_c \quad (11)$$

Para a condição ($z \leq z_1$), a massa de fumaça gerada é determinada pela seguinte equação:

$$m = 0,032Q_c^{3/5}z \quad (12)$$

Onde m é a vazão mássica da coluna de fumaça (kg/s) para a altura z , z é a altura de projeto da camada de fumaça acima do piso (m), Q_c é a porção convectiva da taxa de liberação de calor, estimada em 70% da taxa de liberação de calor Q (kW).

O volume de fumaça produzido é obtido pela equação a seguir:

$$V = m/\rho \quad (13)$$

Onde V é o volume produzido pela fumaça (m^3/s), m é a vazão mássica da coluna de fumaça para a altura z (kg/s) e ρ é a densidade da fumaça em kg/m^3 , de acordo com a temperatura adotada ($0,92 kg/m^3$ para $70^\circ C$ e $0,55 kg/m^3$ para $300^\circ C$). Para compensar possíveis vazamentos nos registros de trancamento, deve ser previsto um coeficiente de vazamento mínimo de 25% a ser acrescentado sobre o resultado da equação acima para a seleção dos ventiladores e dimensionamento dos dutos principais de extração de fumaça.

Nos casos em que a vazão mássica de extração de fumaça for igual à vazão mássica de fumaça fornecida pelo incêndio, será alcançada, após determinado período, uma posição de equilíbrio na altura da camada de fumaça. Entretanto, caso a vazão mássica fornecida pela coluna de fumaça à base do fogo seja maior que a vazão mássica de extração, não haverá posição de equilíbrio e a camada de fumaça

irá descer, nesta condição, deve ser utilizado um fator de correção na equação 9, conforme o quadro abaixo.

Figura 20 – Fator de ajuste conforme IT-15 SP

z/H	t / t ₀					
	(m / m _e) ou (V / V _e)					
	0,25	0,35	0,50	0,70	0,85	0,95
0,2	1,12	1,19	1,30	1,55	1,89	2,49
0,3	1,14	1,21	1,35	1,63	2,05	2,78
0,4	1,16	1,24	1,40	1,72	2,24	3,15
0,5	1,17	1,28	1,45	1,84	2,48	3,57
0,6	1,20	1,32	1,52	2,00	2,78	4,11
0,7	1,23	1,36	1,61	2,20	3,17	4,98
0,8	1,26	1,41	1,71	2,46	3,71	6,25

Fonte: Instrução Técnica N° 15 - Polícia Militar do Estado de São Paulo, 2019.

Como visto anteriormente, a área máxima de acantonamento deve ser de 1.600 m², sendo possível dispensá-lo caso a edificação seja do grupo J (depósito) e possua sistema de chuveiros automáticos.

A espessura da camada de fumaça não pode ser menor que 15% da altura do local atendido pelo sistema, entretanto, para edificações que possuam área de armazenamento elevada (acima de 1,50 m), o projetista deve considerar a possibilidade de ocorrer o *flash-over* e de a fumaça esfriar e estratificar, decorrente da altura da camada de fumaça estar afastada com relação à origem do incêndio ou em virtude da existência de chuveiro automáticos.

Conforme a IT estabelece, deve ser prevista a temperatura da camada de fumaça de 70°C quando a edificação for dotada de chuveiros automáticos e 300°C quando a edificação não contar com sistema de chuveiros automáticos.

As grelhas para extração de fumaça devem ser distribuídas no ambiente de forma mais uniforme possível com, no mínimo, uma a cada 300 m² de área de abrangência, conforme a máxima vazão volumétrica por ponto de sucção ou ventilador individual determinado pelo quadro a seguir.

Figura 21 – Máxima vazão volumétrica por ponto de sucção ou ventilador individual conforme IT-15 SP

Espessura da camada de fumaça no ponto de sucção ou corte de um ventilador individual ou grelha de extração (metros)	Vazão volumétrica por ponto de sucção ou ventilador individual (m ³ /seg)
≥ 0,5 (1)	≤ 0,2 (2)
≥ 1,0	≤ 1,2
≥ 1,5	≤ 3,5
≥ 2,0	≤ 7,0
≥ 2,5	≤ 12,0

(1) Aplicável também para camadas de fumaça de altura < 0,5 m, desde que os pontos de sucção estejam posicionados para cima.

(2) Em locais com pé direito baixo, onde não seja possível haver maior espessura de camada de fumaça, a utilização de vazão volumétrica de maior magnitude por ponto de extração pode ser admitida mediante avaliação em Comissão Técnica Recursal.

Fonte: Instrução Técnica N° 15 - Polícia Militar do Estado de São Paulo, 2019.

A introdução de ar para controle de fumaça pode ser realizada de forma natural ou mecânica. Naturalmente por meio de portas, janelas, venezianas etc., desde que, posicionadas abaixo da camada de fumaça. A velocidade máxima de entrada do ar deve ser de 2 m/s e a vazão volumétrica deve ser igual a de extração. Caso a velocidade de entrada de ar seja superior a 1 m/s, a camada de fumaça deve ser projetada a 1,5 m acima das aberturas, quando menor que 1 m/s, a camada de fumaça pode ser projetada a 0,5 m acima das aberturas.

Por meios mecânicos realizada através de aberturas de insuflação ligadas a ventiladores por meio de dutos. A velocidade do ar nas aberturas de insuflação não deve ser superior a 5 m/s e sua vazão volumétrica deve ser da ordem de 60% da vazão das aberturas de extração de fumaça.

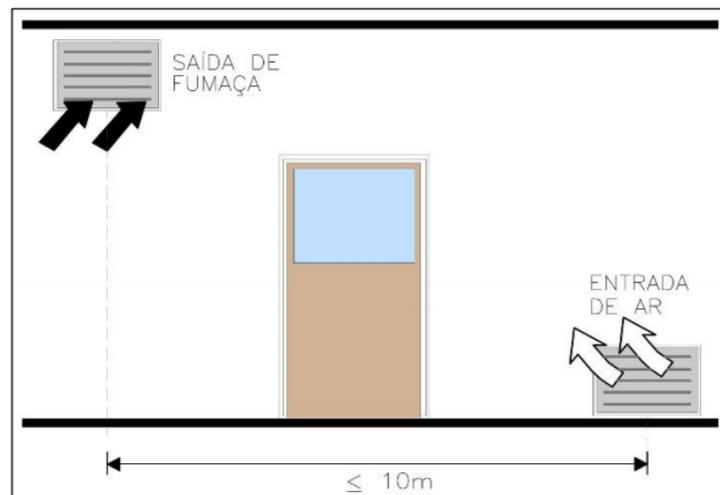
Ao final do capítulo são elaborados 3 exemplos do dimensionamento do sistema.

4.2.6 Instrução Técnica Nº 15/2019: Parte 6 - Controle de fumaça em rotas de fuga horizontais protegidas e subsolos

A Parte 6 traz os capítulos 12 (rotas de fuga horizontais) e 13 (Subsolos). As rotas de fuga horizontais protegidas são aquelas compartimentadas com paredes e portas corta-fogo. O controle de fumaça pode ser realizado por extração natural, extração mecânica ou sobrepressão relativamente ao local sinistrado.

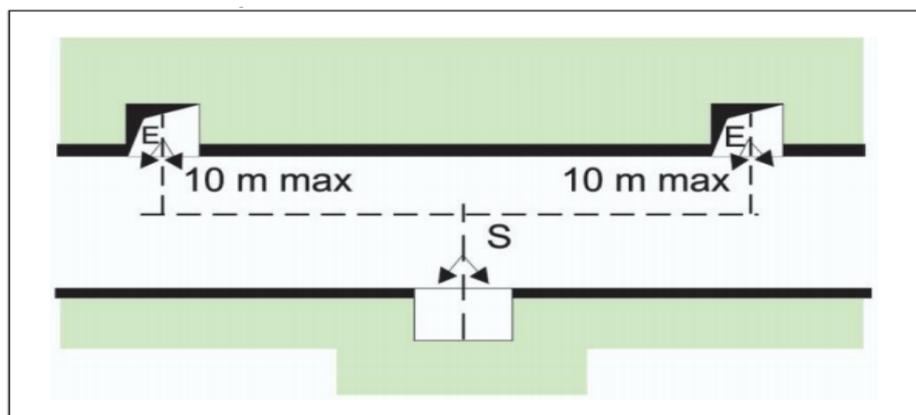
Para os casos de extração natural as aberturas para a introdução de ar e extração de fumaça devem ser alternadamente distribuídas (Figura 22) com distância máxima entre duas aberturas consecutivas de introdução e extração de 10 m nos percursos em linha reta (Figura 23) e 7 m nos outros percursos (Figura 24).

Figura 22 – Posição de aberturas de extração e introdução de ar conforme IT-15 SP



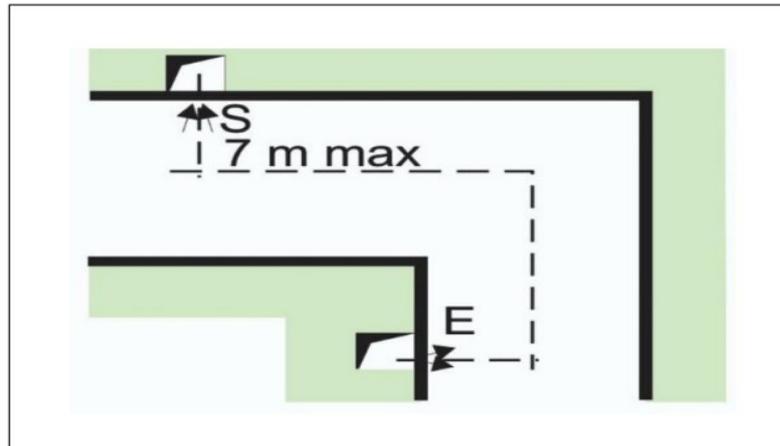
Fonte: Instrução Técnica Nº 15 - Polícia Militar do Estado de São Paulo, 2019.

Figura 23 – Distância em linha reta das aberturas de extração conforme IT-15 SP



Fonte: Instrução Técnica Nº 15 - Polícia Militar do Estado de São Paulo, 2019.

Figura 24 – Distância das aberturas de extração conforme IT-15 SP

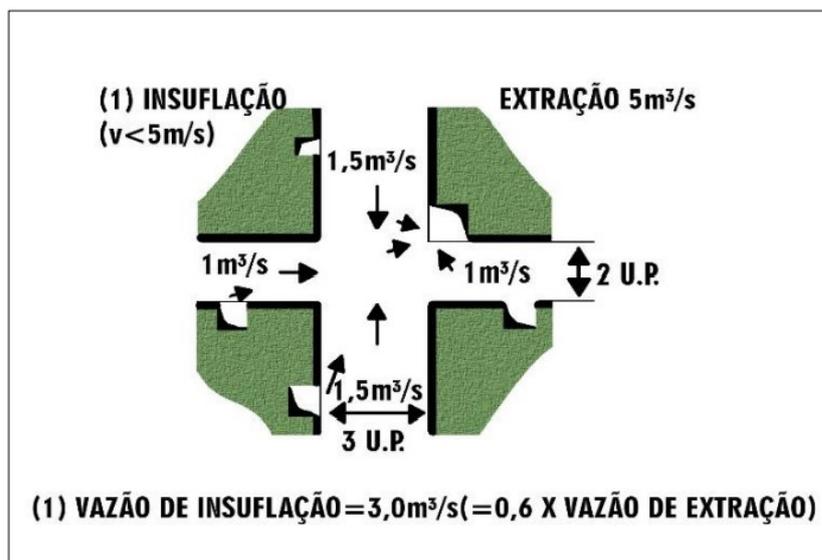


Fonte: Instrução Técnica N° 15 - Polícia Militar do Estado de São Paulo, 2019.

As aberturas devem ter a área livre mínima de 0,10 m² por unidade de passagem da rota de fuga onde estão instaladas e ser posicionadas em paredes externas, sem utilização de dutos. A abertura para extração deve ter sua parte mais baixa no mínimo a 1,80 m do piso do pavimento, a abertura para introdução de ar deve ter sua parte mais alta a menos de 1 m do piso do pavimento.

Para os casos de extração mecânica a distância máxima entre duas aberturas consecutivas de introdução e extração deve ser de 15 m nos percursos em linha reta e 10 m nos outros percursos. A vazão de extração não deve ser inferior a 0,5 m³/s por unidade de passagem da circulação (Figura 25).

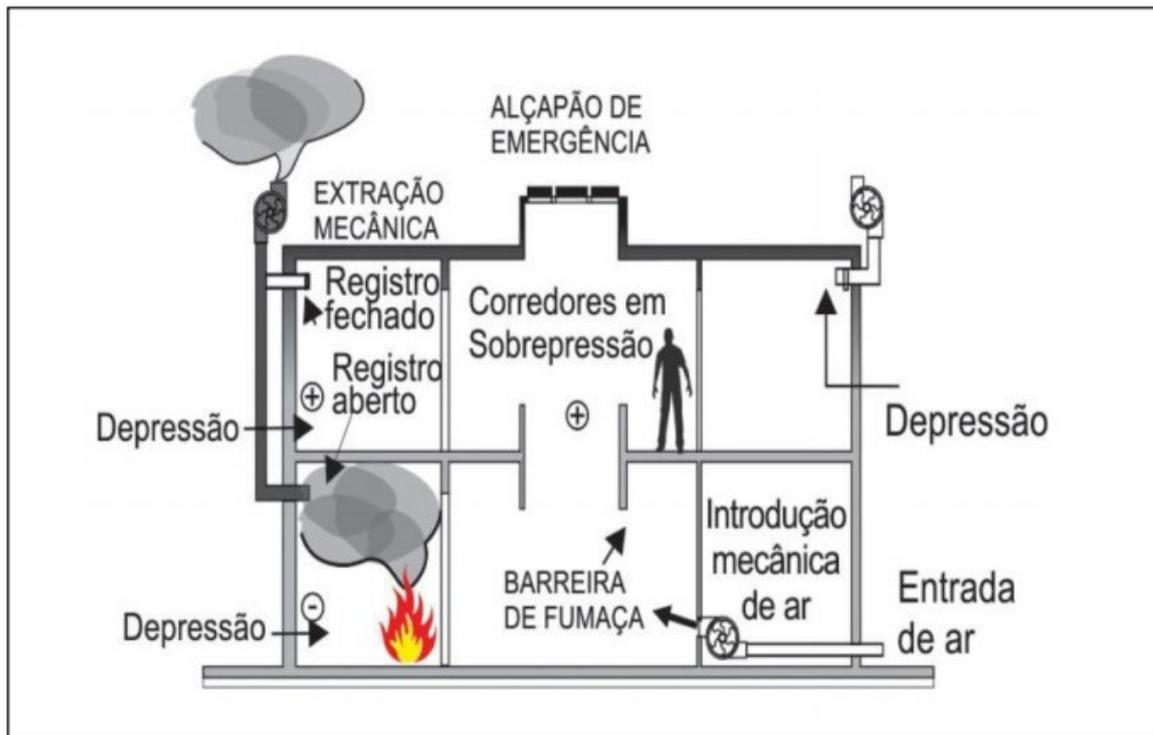
Figura 25 – Distância das aberturas de extração conforme IT-15 SP



Fonte: Instrução Técnica N° 15 - Polícia Militar do Estado de São Paulo, 2019.

O controle por sobrepressão é permitido se houver uma instalação de controle de fumaça por sistemas mecânicos. Nesse caso deve ser estabelecida uma diferença de pressão da ordem de 20 Pa entre as circulações horizontais e os locais sinistrados, sendo indicado para circulações que não possuam carga incêndio (fig. 26).

Figura 26 – Distância das aberturas de extração conforme IT-15 SP



Fonte: Instrução Técnica N° 15 - Polícia Militar do Estado de São Paulo, 2019.

Os sistemas de controle de fumaça para subsolos devem ser projetados com introdução de ar mecânica ou natural e extração de fumaça mecânica. Para áreas menores que 100 m², as grelhas de extração podem ser posicionadas apenas na circulação e as entradas de ar devem ser posicionadas junto ao piso nos acessos das rotas de fuga.

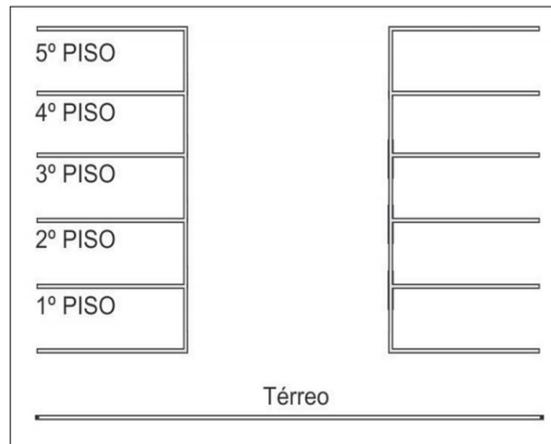
Nos casos de extração natural, as aberturas devem ser posicionadas no teto ou no terço superior das paredes, distribuídas da forma mais uniforme possível. A somatória total da área de aberturas deve ser, no mínimo, igual a 1/40 da área ocupada do subsolo. A extração mecânica deve ser dimensionada para atender, no mínimo, 10 trocas do volume de ar por hora, podendo ser realizada através da rede de dutos do sistema de climatização. Os estacionamentos devem dispor de ventilação e exaustão permanentes.

4.2.7 Instrução Técnica Nº 15/2019: Parte 7 - Átrios

A Parte 7 apresenta os capítulos 14 - Procedimentos específicos, 15 - Átrios padronizados, 16 - Espaços adjacentes aos átrios e 17 - Átrios não padronizados.

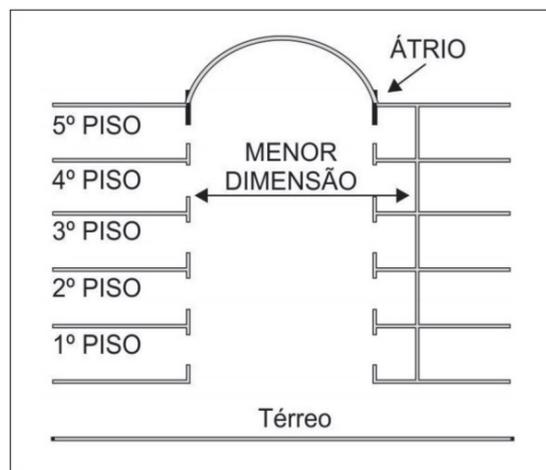
Primeiramente os átrios são padronizados de acordo com a seguinte classificação: Átrio ao ar livre (volume fechado sob as faces laterais, sem oclusão na parte superior, conforme Figura 27), Átrio coberto aberto (os níveis são abertos sobre o volume central, conforme Figura 28), Átrio coberto fechado (os níveis, com exceção do inferior, são fechados, conforme Figuras 29 e 30) e Átrio aberto de um lado e fechado do outro (Figura 31).

Figura 27 – Átrio ao ar livre conforme IT-15 SP



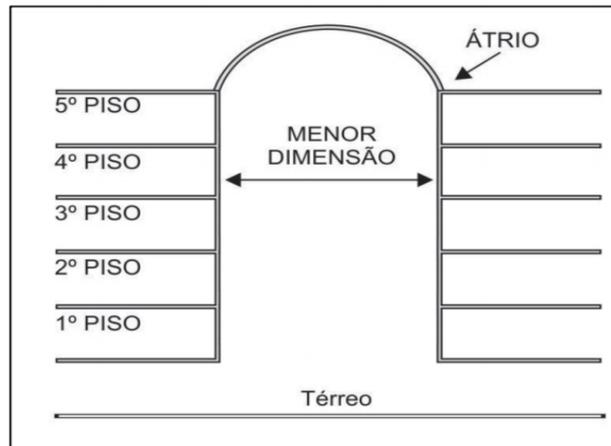
Fonte: Instrução Técnica Nº 15 - Polícia Militar do Estado de São Paulo, 2019.

Figura 28 – Átrio coberto aberto conforme IT-15 SP



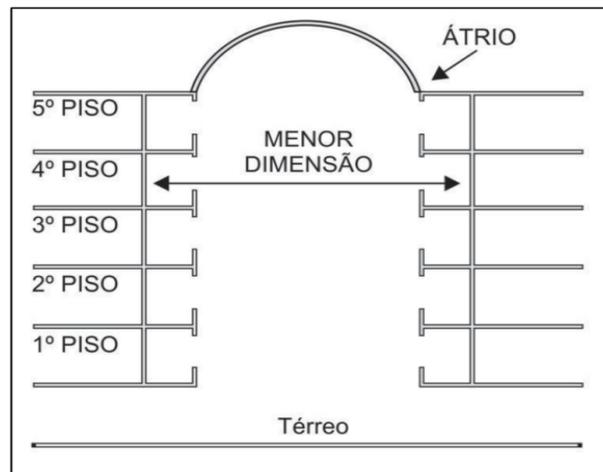
Fonte: Instrução Técnica Nº 15 - Polícia Militar do Estado de São Paulo, 2019.

Figura 29 – Átrio coberto fechado 1 conforme IT-15 SP



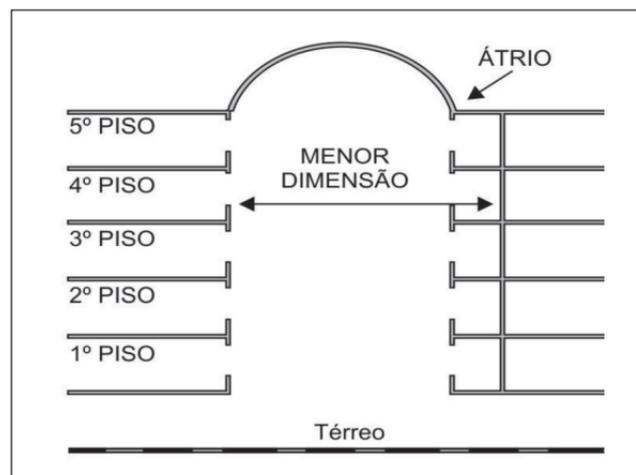
Fonte: Instrução Técnica N° 15 - Polícia Militar do Estado de São Paulo, 2019.

Figura 30 – Átrio coberto fechado 2 conforme IT-15 SP



Fonte: Instrução Técnica N° 15 - Polícia Militar do Estado de São Paulo, 2019.

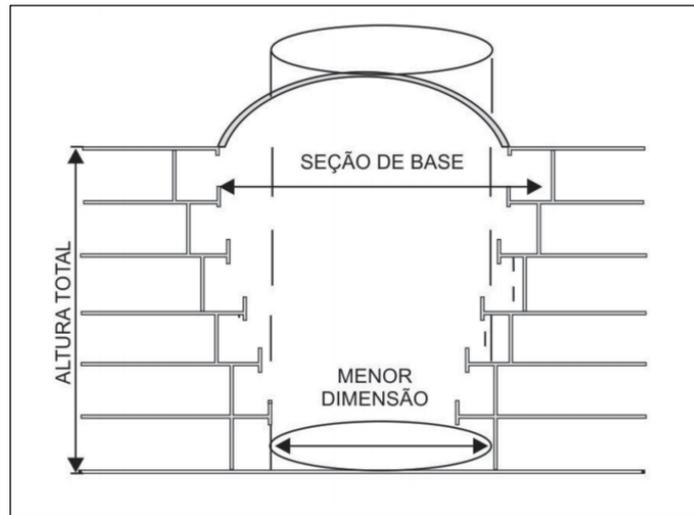
Figura 31 – Átrio coberto aberto conforme IT-15 SP



Fonte: Instrução Técnica N° 15 - Polícia Militar do Estado de São Paulo, 2019.

Os átrios padronizados caracterizam-se por permitir a inserção de um cilindro reto, cujo diâmetro se insere sobre toda a altura do átrio dentro do espaço livre. A dimensão do diâmetro deve ser de $\sqrt{7h}$, sendo h a altura do piso mais baixo ao piso mais alto do átrio (Figura 32).

Figura 32 – Átrio coberto padronizado conforme IT-15 SP



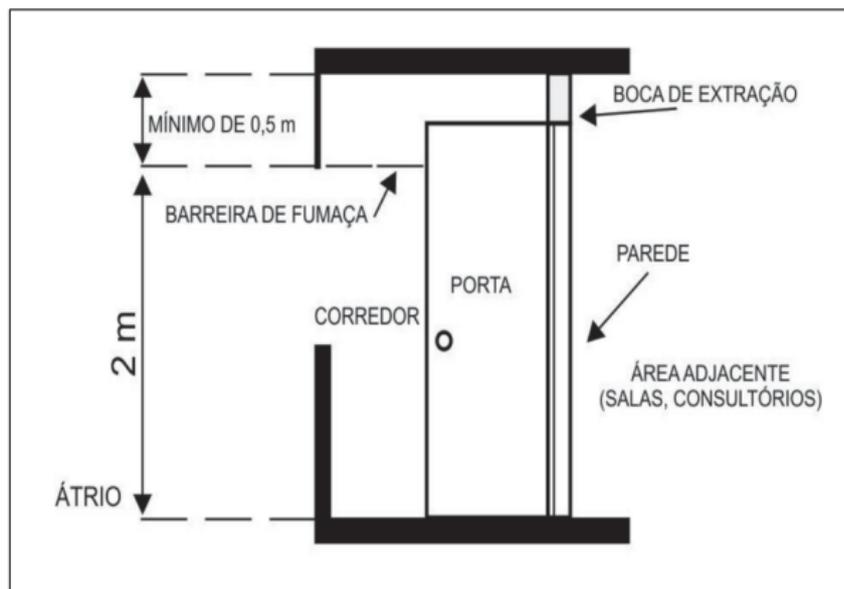
Fonte: Instrução Técnica N° 15 - Polícia Militar do Estado de São Paulo, 2019.

O controle de fumaça nos átrios padronizados é determinado pelo tipo de átrio. Nos átrios ao ar livre o controle se faz naturalmente pela parte superior. Para pequenos átrios (a altura do nível inferior em relação ao nível superior não ultrapassa 8 m e a seção de base tem dimensões mínimas de 5 m x 5 m) o controle de fumaça pode ser obtido naturalmente por aberturas instaladas na parte alta do átrio (com superfície livre igual a 1/100 da seção de base) ou mecanicamente (com vazão de extração igual a 1 m³/s para cada 100 m² de seção de base). Tais parâmetros também são aplicados para átrios com carga incêndio inferior a 190 MJ/m² e material de acabamento incombustível ou com fluxo crítico (fluxo de energia radiante necessário à manutenção da frente de chama no corpo de prova) maior ou igual a 8 kW/m².

Para os demais átrios padronizados os sistemas de controle de fumaça podem ser obtidos naturalmente por meio de aberturas situadas na parte superior através de uma superfície livre igual a 1/15 da seção de base do volume do átrio, com no mínimo 4 m² ou mecanicamente efetuada na parte alta com 12 trocas por hora do volume do átrio.

Os espaços adjacentes aos átrios são as lojas, circulações horizontais, escritórios e demais ocupações que possuam comunicação, direta ou indireta, com o átrio. Tais espaços devem ser separados dos átrios por meio de barreiras de fumaça fixas. Essas barreiras devem ser construídas sob o teto com, no mínimo, 0,50 m de altura, permitindo uma altura livre entre o piso e a barreira de, no mínimo, 2 metros (Figura 33).

Figura 33 – Local fechado com acesso à circulação por meio de uma porta conforme IT-15 SP



Fonte: Instrução Técnica N° 15 - Polícia Militar do Estado de São Paulo, 2019.

As circulações horizontais adjacentes ao átrio, por exemplo os locais fechados com acesso à circulação por meio de uma porta (Figura 33), devem ter extração de fumaça por sistemas mecânicos, além de áreas de acomodação de fumaça.

Para o dimensionamento do controle de fumaça nos átrios não padronizados podem ser utilizados modelos em escala reduzida para testes em pequena escala, equações fechadas derivadas primariamente da correlação de resultado experimental e modelagem computacional para análise da mecânica dos fluidos.

4.2.8 Instrução Técnica N° 15/2019: Parte 8 - Aspectos de segurança

Na última parte da Instrução Técnica, o Capítulo 18 aborda os aspectos de segurança do projeto de sistema de controle de fumaça, afirmando que todo sistema

deve ser submetido a uma simulação de falha para determinar o impacto de erros de projeto, operação indevida ou operação parcial de componentes.

A confiabilidade do sistema depende de seus componentes individuais, da dependência funcional entre eles, bem como do grau de redundância previsto. Devem ser criados meios para testes semestrais, a fim de verificar a confiabilidade e performance do sistema. Os resultados dos testes devem ser registrados através de relatório de inspeção e mantidos na edificação.

Os testes dos componentes do sistema objetivam estabelecer que a instalação final satisfaça os requisitos do projeto, funcione corretamente e esteja pronta para o comissionamento.

O comissionamento deve confirmar que o sistema, em conjunto com as demais instalações, está de acordo com o projeto e apresenta funcionamento apropriado. A ativação do sistema de controle de fumaça deve se iniciar em até 10 segundos após receber o comando de ativação.

Nos casos em que o sistema de ar-condicionado não for parte integrante do controle de fumaça, cuidados especiais devem ser tomados para que a climatização seja desligada imediatamente quando da ocorrência de incêndio e para que existam meios adequados para evitar a propagação de fumaça e gases pelos dutos.

4.3 NFPA 92 - Padrão para sistemas de controle de fumaça

A NFPA 92 - *Standard for smoke control systems* é dividida em oito capítulos: Aplicação, Publicações referenciadas, Definições, Fundamentos de projeto, Procedimentos para o cálculo do controle de fumaça, Equipamentos e controles, Documentação para sistemas de controle de fumaça e Testes.

A NFPA 92 não é uma normativa americana, mas sim uma *Stand* ou *Standard*, ou seja, uma compilação de informações técnicas sobre projetos, instalações e boas práticas, que pode ser adotada para maior segurança relacionada ao controle de fumaça. A definição de quais edificações devem obrigatoriamente fazer uso do controle de fumaça estão nos *codes*, por exemplo o *International Building Code* (IBC) em seu capítulo 4 em conjunto com a seção 909 determina os casos em que devem

ser utilizados sistemas de controle de fumaça. A NFPA 101 (*Life Safety Code*), nos capítulos 12 a 43 em conjunto com a seção 9.3 indica a aplicação de sistemas de controle de fumaça em determinados tipos de edifícios.

Cabe salientar que, no Brasil, ocorre uma divisão entre as instruções técnicas destinadas à pressurização de escadas de emergência e àquelas que tratam dos demais sistemas de controle de fumaça, diferentemente da NFPA 92 que traz informações de projeto sobre escadas de emergência como parte do controle de fumaça das edificações. Visto isso, a análise da NFPA 92 realizada neste trabalho não tratou sobre a pressurização de escadas por se tratar de normativa à parte no Brasil.

O texto da NFPA 92 é direcionado para edifícios tipo centros comerciais, arenas, locais para shows, parques temáticos cobertos, arranha-céus e com átrio, além disso, os padrões também são indicados para locais de detenções correcionais, cuidados de saúde, educacional, industrial, entretenimento e cultura.

Os capítulos 1, 2 e 3 seguem o mesmo modelo para todas as NFPA's. O Capítulo 1 - *Administration* delimita a aplicação do padrão sugerido em projetos, instalações, testagem para aceitação, operação e testagem periódica dos sistemas de controle de fumaça. O propósito dos modelos apresentados é de estabelecer requisitos para os sistemas de controle de fumaça de modo a inibir a fumaça de adentrar em escadas, rotas de fuga, áreas de refúgio, vãos de elevadores e áreas similares para manter um ambiente seguro durante o tempo de escape, preservar áreas não atingidas pelo incêndio e prover condições para as operações de resgate e combate ao incêndio.

O Capítulo 2 - *Referenced Publications* cita toda a documentação que fundamenta ou está relacionada de algum modo com o conteúdo do padrão apresentado, sendo sugerido que, estes sejam consultados quando da aplicação da NFPA 92.

O Capítulo 3 - *Definitions* traz a definição dos termos utilizados na NFPA 92. A Figura 34 elenca os termos apresentados.

Figura 34 – Quadro das definições da NFPA 92 (tradução livre)

Definições elencadas na NFPA 92			
<i>Approved</i> (Aprovado)	<i>Ceiling jet</i> (Jato de teto)	<i>Fire fighters smoke control station</i> (Central de controle para bombeiros)	<i>Registered design Professional</i> (Projetista registrado)
<i>Authority having jurisdiction</i> (Autoridade com jurisdição)	<i>Design pressure difference</i> (Diferença de pressão projetada)	<i>Growth time</i> (tempo de crescimento do incêndio)	<i>Smoke</i> (fumaça)
<i>Labeled</i> (Rotulado)	<i>Draft curtain</i> (Cortina a prova de fumaça)	<i>Plugholing</i> (Extração de ar fresco)	<i>First indication of smoke</i> (Primeiro indício de fumaça)
<i>Listed</i> (Listado)	<i>Fuel-limited fire</i> (Incêndio limitado pelo combustível)	<i>Plume</i> (Pluma)	<i>Smoke Barrier</i> (Barreira de fumaça)
<i>Shall</i> (Dever)	<i>Steady fire</i> (Incêndio estável)	<i>Axisymmetric plume</i> (Pluma simétrica)	<i>Smoke containment</i> (Contenção de fumaça)
<i>Should</i> (Poder)	<i>t-squared fire</i> (Incêndio conforme curva padrão t)	<i>Balcony spill plume</i> (Extravasamento de fumaça de varanda)	<i>Smoke control mode</i> (Modo de controle de fumaça)
<i>Standard</i> (Padrão)	<i>Unsteady fire</i> (Incêndio instável)	<i>Window Plume</i> (Pluma de janela)	<i>Smoke damper</i> (Damper corta-fogo)
<i>Atrium</i> (Átrio)	<i>Ventilation limited fire</i> (Incêndio limitado pela ventilação)	<i>Pressurized stairwells</i> (Escadas pressurizadas)	<i>Smoke layer</i> (Camada de fumaça)
<i>Smoke layer interface</i> (Interface da camada de fumaça)	<i>Smoke management</i> (Controle de fumaça)	<i>Smoke refuge área</i> (Área de refúgio de fumaça)	<i>Communicating space</i> (Espaço comunicante)
<i>Large-volume space</i> (Espaço amplo)	<i>Separated spaces</i> (Espaços compartimentados)	<i>Stack effect</i> (Efeito chaminé)	<i>Compensated System</i> (Sistema com compensação)
<i>Dedicated smoke control system</i> (Sistema de controle de fumaça dedicado)	<i>Nondedicated smoke control system</i> (Sistema de controle de fumaça não dedicado)	<i>Multiple-injection pressurization system</i> (Sistema de pressurização com múltipla injeção)	<i>Single-injection pressurization system</i> (Sistema de pressurização com injeção única)
<i>Smoke Control System</i> (Sistema de controle de fumaça)	<i>Zoned smoke control system</i> (Sistema de controle de fumaça por zona)	<i>Tenable Environment</i> (Ambiente seguro)	<i>Smoke control zone</i> (Zona de controle de fumaça)

Fonte: Adaptado de (NFPA 92 Standard for Smoke Control Systems, 2018).

Design Fundamentals é o título do Capítulo 4, cujo conteúdo refere-se aos objetivos, bases, abordagens e critérios de projeto, além de considerações sobre o funcionamento do sistema. A confecção de um projeto para sistemas de controle de fumaça tem dois objetivos principais: conter a fumaça em sua zona de origem e, para edificações com grandes volumes abertos, gerenciar a fumaça, garantindo um ambiente seguro e uma rota de fuga adequada.

Portanto, o projeto de sistemas de controle de fumaça tem como base duas premissas de funcionamento, seja para a contenção ou para o gerenciamento da fumaça. O sistema de contenção tem como objetivo manter a fumaça em uma determinada zona e impedir que esta se espalhe para outros ambientes estabelecendo e mantendo diferenças de pressão entre eles. Três fatores fundamentais, que interferem diretamente no estabelecimento da diferença de pressão, devem ser considerados: a presença de chuveiros automáticos, a altura do teto e o estabelecimento de um diferencial de pressão máximo e mínimo.

A NFPA 92 elenca os sistemas que podem fazer parte da contenção da fumaça: escadas pressurizadas, zonas de controle de fumaça, pressurização de elevadores, pressurização de vestíbulos e áreas de refúgio pressurizadas.

O sistema de gerenciamento de fumaça, utilizado geralmente em grandes espaços, depende diretamente do incêndio projetado (tipo, localização, quantidade de combustível, confiança dos sistemas de supressão, ventilação etc.), altura e tamanho da área a ser protegida, dimensões das demais áreas que se comunicam, barreiras existentes e áreas de refúgio.

Nesse caso, é necessário realizar cálculos e simulações computacionais quanto ao preenchimento dos espaços pela fumaça e ao estabelecimento da camada de fumaça sob o teto, determinando uma altura limite para que os ocupantes possam sair em segurança e o incêndio não seja alimentado pelo próprio sistema. A exaustão mecânica da fumaça deverá ser capaz de remover parte da fumaça e manter a camada de fumaça na altura estabelecida tempo suficiente para o escape dos ocupantes.

Os critérios gerais de projeto são todos os fatores que precisam ser considerados para o desenvolvimento de um sistema seguro e confiável, sendo eles:

os dados do clima e tempo na região, as diferenças de pressão máxima e mínima entre os ambientes e através das portas, a localização do incêndio, o fluxo de ar e fumaça, os espaços comunicantes, o gerenciamento do espalhamento de fumaça entre os espaços comunicantes, as áreas de aberturas e extravasamento de fumaça, a ventilação natural e os sistemas de supressão de incêndio com a utilização de gases.

São estabelecidas algumas diferenças de pressão mínimas entre ambientes separados por barreiras de fumaça:

Tabela 1 – Diferença de pressão mínima entre barreiras de fumaça

Tipo de Construção	Altura do teto (m)	Diferença de pressão (Pa)
Com chuveiro automático	-	1,25
Sem chuveiro automático	2,75	2,5
Sem chuveiro automático	4,57	3,5
Sem chuveiro automático	6,41	4,5

Fonte: NFPA 92 Standard for Smoke Control Systems, 2018.

Quando o poço do elevador for pressurizado, este deve manter os valores mínimos estabelecidos na tabela acima.

Com relação à operação do sistema, são estabelecidas algumas exigências quanto: à segurança do ambiente sinistrado (deve suportar um tempo determinado sem entrar em colapso), à manutenção da espessura mínima da camada de fumaça e à ativação do sistema de forma plena no menor tempo possível, com duração suficiente para garantir a saída de todos os ocupantes.

Nos casos em que a contenção da fumaça é realizada a partir de zonas de controle (espaços onde a fumaça pode ser contida), o edifício deve ser dividido em zonas separadas por barreiras de fumaça. O mesmo pavimento pode consistir em

uma ou mais zonas de controle de fumaça. O sistema de controle de fumaça por zonas deve ser projetado de modo que, quando estiver ativo, a diferença de pressão entre zonas adjacentes, com e sem a presença de fumaça, deve ser no mínimo igual à apresentada na Tabela 1, porém quando houver a presença de portas, a diferença de pressão não pode ser maior do que aquelas elencadas na tabela.

Diferentes sistemas de controle de fumaça devem ser projetados de forma a atuar simultaneamente sem alterar o funcionamento padrão destes. Deve haver áreas de refúgio de fumaça para a proteção dos ocupantes durante o período necessário para a evacuação. Os vestíbulos não são obrigatórios como parte do sistema de controle de fumaça, podendo ser pressurizados ou não. As portas localizadas nas barreiras de fumaça devem ter fechamento automático quando o sistema é ativado.

O Capítulo 5 fornece ferramentas para o desenvolvimento dos cálculos necessários para projetar um sistema de gerenciamento de fumaça. São sugeridas 3 abordagens para a confecção do projeto: por equações algébricas, possibilitando uma maneira de calcular fatores individuais que, em conjunto, podem ser utilizados para estabelecer os requisitos do sistema; por modelos físicos em escalas menores, devendo ser proporcionais em todas as dimensões à edificação em estudo e por modelos computacionais que envolvam dinâmica dos fluidos.

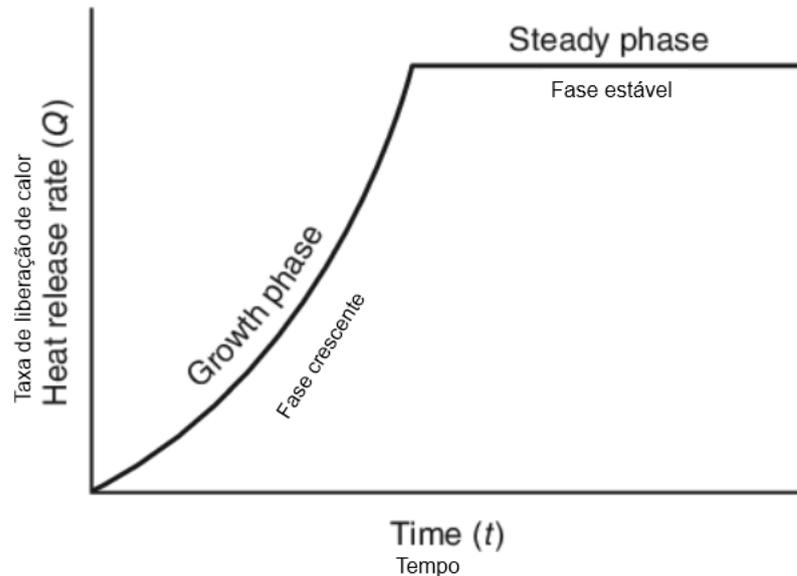
O incêndio projetado deve prever as condições mais desfavoráveis que poderão ser encontradas na edificação quando ocorrer um incêndio real e, portanto, determinará os demais parâmetros de projeto. O incêndio projetado pode ser estável (com uma taxa de liberação de calor constante) ou instável. A taxa de liberação de calor em incêndios estáveis deve ser baseada em dados de testes reais, onde a massa de combustível disponível é utilizada como fator limitante para a duração do incêndio, que pode ser calculado conforme a equação abaixo.

$$\Delta t = mH_c/Q \quad (14)$$

Onde Δt é a duração do fogo (s), m é o total de massa consumida (kg), H_c é o calor de combustão do combustível (kJ/kg) e Q é a taxa de liberação de calor (kW). No Brasil, não são facilmente encontrados dados para a definição da taxa de liberação de calor dos materiais costumeiramente utilizados. Na maior parte dos casos, são empregados dados de materiais americanos, diminuindo a confiabilidade dos cálculos.

Para incêndios instáveis ou inconstantes deve ser considerada uma fase de crescimento seguida de uma fase de estabilidade ou decaimento, de acordo com dados de testes, configuração do combustível ou sistemas de proteção propostos (Figura 35).

Figura 35 – Incêndio projetado com fase estável conforme NFPA 92



Fonte: NFPA 92 Standard for Smoke Control Systems, 2018.

A fase crescente deve ser determinada por dados de testes de incêndios, ou modelos aceitos pelas autoridades responsáveis. A NFPA 92 fornece um modelo matemático para o cálculo da fase crescente. Já as fases estável e de decaimento devem ser determinadas por dados de testes de incêndios ou análises relacionadas ao uso de chuveiros automáticos, quando for o caso.

O incêndio projetado deve sofrer um incremento caso existam outros materiais combustíveis a uma distância menor ou igual a R do primeiro material combustível:

$$R = \left(\frac{Q_r}{4\pi q_r''} \right)^{1/2} \quad (15)$$

Onde R é a distância de separação do alvo para o centro do primeiro material combustível (m), Q_r é a porção radiante da taxa de liberação de calor do incêndio (kW) e q_r'' é o fluxo radiante incidente necessário para provocar a ignição do material alvo (kW/m²).

Para o cálculo da altura da camada de fumaça em incêndio estáveis, assim como na IT-15 de São Paulo, é utilizada a equação 9. Entretanto, o padrão americano fornece uma segunda equação, para o cálculo em incêndios instáveis. A vazão mássica de fumaça gerada pelo incêndio é calculada assim como na IT-15, contudo também são apresentadas equações alternativas. Também são apresentados métodos de cálculo da vazão mássica de fumaça quando esta se movimenta através de varandas e janelas, além da temperatura da camada de fumaça.

O mesmo capítulo traz informações sobre a quantidade de aberturas para extração de fumaça. É necessário que seja determinado um número mínimo de aberturas para que o fluxo máximo de extração de fumaça não seja excedido, evitando a ocorrência de *plugholing* (extração de ar fresco pela abertura de extração de fumaça).

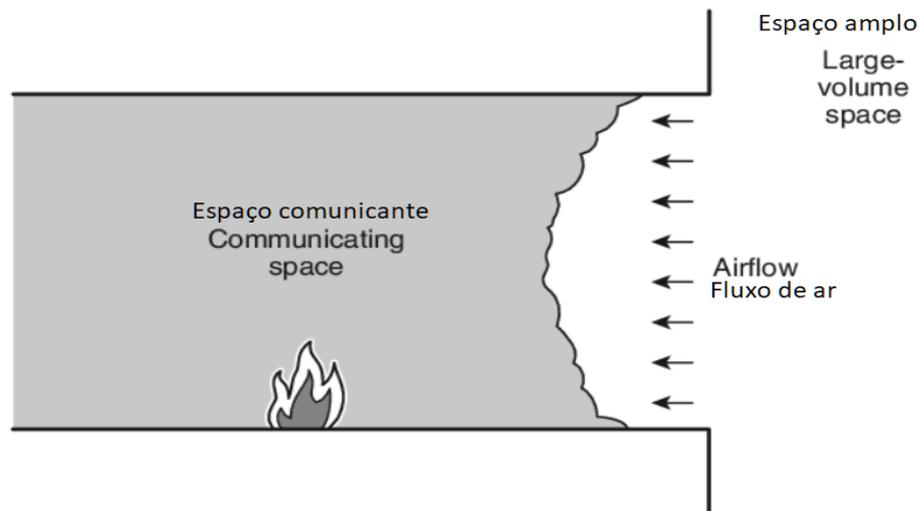
A vazão volumétrica máxima em uma abertura de extração de fumaça pode ser calculada pela seguinte equação:

$$V_{max} = 4.16\gamma d^{5/2} \left(\frac{T_S - T_0}{T_a} \right)^{1/2} \quad (16)$$

Onde V_{max} é a vazão volumétrica máxima (m³/s) sem a ocorrência de *plugholing*, γ é o fator de localização da exaustão (adimensional), d é a espessura da camada de fumaça abaixo do ponto mais baixo da abertura de extração (m), T_S é a temperatura absoluta da camada de fumaça (°C) e T_a é a temperatura ambiente absoluta. γ depende da distância da abertura de extração e as paredes da edificação e a razão d/D_i deve ser maior que 2, sendo que D_i é o diâmetro da abertura de extração. Ainda são determinadas a distância mínima entre duas aberturas de exaustão e a vazão volumétrica de exaustão em cada saída.

Quando o fluxo de ar na direção oposta é utilizado para impedir que a fumaça originada de um espaço comunicante seja propagada por um espaço amplo, conforme a Figura 36, o espaço comunicante deve contar com exaustão em uma taxa suficiente de forma que a velocidade do ar fresco supere a velocidade média limite do ar v_e , calculada conforme a equação 17.

Figura 36 – Utilização do fluxo de ar para impedir que a fumaça de um espaço comunicante se propague por um espaço amplo



Fonte: NFPA 92 Standard for Smoke Control Systems, 2018

$$v_e = 0.64 \left(gH \frac{T_f - T_0}{T_f} \right)^{1/2} \quad (17)$$

Onde v_e é a velocidade limite média do ar (m/s), g é a aceleração da gravidade (9,81 m/s²), H é a altura da abertura para o espaço comunicante (m), T_f é a temperatura da fumaça (°C) e T_0 é a temperatura do ar (°C). O texto também traz exemplo de aplicação nos casos em que a fumaça advinda de um espaço amplo tende a ocupar o espaço comunicante localizado acima e abaixo da interface entre a camada de fumaça e o ar fresco.

O capítulo 6 trata sobre os requisitos mínimos para que equipamentos possam fazer parte de um sistema de controle de fumaça. Por exemplo, um dos equipamentos mais importantes, os registros (*dampers*), utilizados como barreira para a contenção da fumaça, devem seguir normas rígidas de fabricação e certificação.

Os materiais utilizados nos dutos devem ser selecionados e estes devem ser projetados para transportar a fumaça, suportar variações de pressão e manter a integridade estrutural durante o período de operação do sistema.

O sistema de controle de fumaça deve ser ativado automaticamente em resposta ao sinal recebido do dispositivo de detecção ou da combinação de dispositivos. A ativação manual do sistema deve ser aprovada por autoridade

competente. Para os sistemas de múltiplas zonas que utilizam somente detectores de calor, deve ser permitida uma expansão na estratégia de controle para acomodar zonas adicionais até o limite de projeto do sistema. O controle de fumaça deve ser iniciado em até 10 segundos após o comando de ativação ser recebido.

A central de controle do sistema deve fornecer meios para que possa ser realizada uma verificação do funcionamento do controle de fumaça como um todo. A capacidade operacional de cada componente dedicado ao controle de fumaça deve ser testada semanalmente.

No capítulo 7 são elencados os documentos necessários para o projeto e utilização dos sistemas de controle de fumaça. Devem ser gerados, obrigatoriamente, durante o projeto do sistema, o memorial de cálculo detalhado do projeto (com objetivos do projeto, considerações utilizadas nos cálculos, especificações de todos os componentes etc.) e um manual de operação e manutenção (com procedimentos de testes e inspeções, performance esperada etc.).

Os testes a serem realizados nos sistemas são descritos no capítulo 8. Antes de qualquer teste é sugerido que seja realizada uma inspeção no edifício como um todo, de modo a verificar as barreiras físicas de fumaça, integridade dos *shafts*, portas, telhados etc., ademais são elencados testes individuais nos componentes do sistema, teste para aceitação do sistema de controle de fumaça e testes para os sistemas de contenção de fumaça (diferenças de pressão entre ambientes, força requerida para abrir portas etc.). São elencados testes específicos para as áreas de refúgio de fumaça, poço de elevadores etc.

4.4 Resultados das análises da IT-15 e NFPA 92

Ao finalizar as análises técnicas dos documentos apresentados, notam-se diferenças significativas. De um modo geral, a NFPA 92 apresenta meios para que o projetista possa elaborar sistemas de controle de fumaça específicos, de acordo com a singularidade de cada edifício, construindo cenários de incêndios projetados o mais próximo possível da realidade e realizando simulações computacionais para que os sistemas propostos possam atender, de forma mais individualizada e efetiva, o controle da fumaça. A IT-15 fornece dados e soluções mais padronizadas, facilitando

a confecção e análise dos projetos dos sistemas, entretanto, o resultado tende a ser mais genérico, atendendo a todos os tipos de edificação de modo parecido.

A instrução técnica de São Paulo traz em suas referências, algumas normas europeias e não trata sobre controle de fumaça em rotas verticais (elevador e escada), enquanto a NFPA lista somente referências americanas e aborda rotas de fugas verticais, aspecto interessante pois, os sistemas (horizontais e verticais) devem ser compatíveis e por vezes terão alguma relação.

Para os americanos a definição de quais edificações devem obrigatoriamente fazer uso do controle de fumaça estão no *codes*, já a IT de São Paulo, indica no seu próprio texto, aquelas que devem contar com o sistema. A NFPA conta com 8 capítulos divididos em 27 páginas e 67 páginas de anexos, a IT-15 é dividida em 8 partes com o total de 18 capítulos e 70 páginas. No texto brasileiro são listadas 32 definições de termos, enquanto no americano são 48.

Os objetivos dos projetos para sistemas de controle de fumaça são parecidos, ambas fazem menção à contenção da fumaça em sua zona de origem com o controle das aberturas de forma a criar um diferencial de pressão (na IT-15 fala-se em compartimentação e acantonamento, na NFPA fala-se em zonas de controle) e ao gerenciamento da fumaça em espaços amplos.

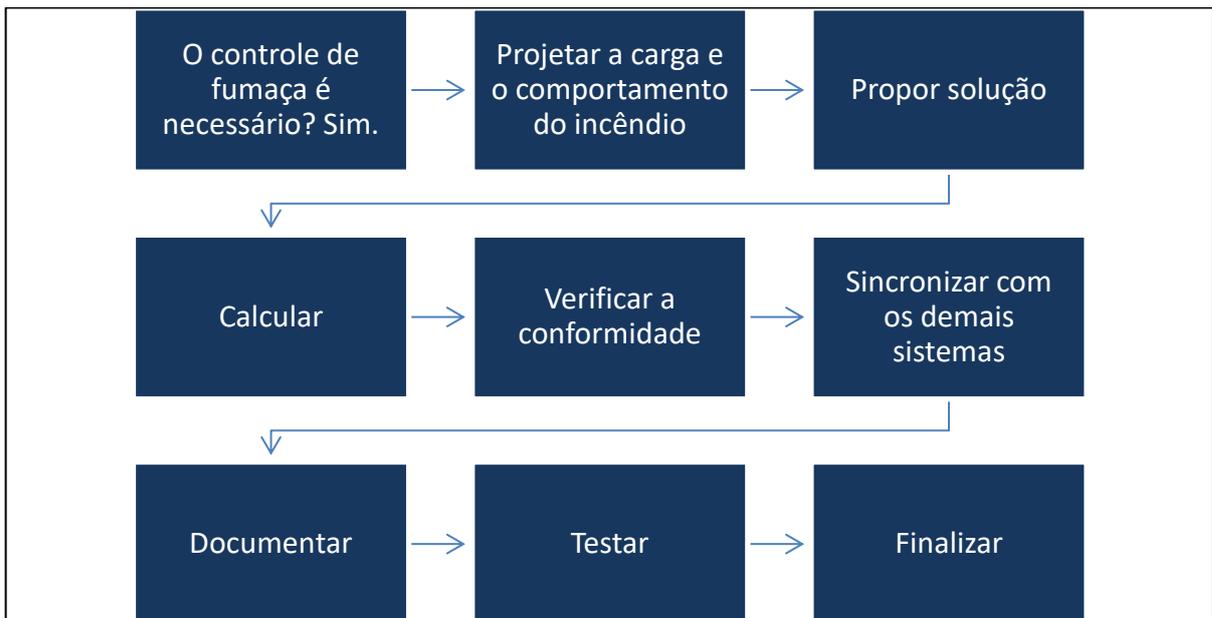
A NFPA fornece diferentes abordagens para a confecção do projeto a partir de equações algébricas, modelos físicos em escalas menores e modelos computacionais. A IT-15 também sugere a utilização de ferramentas alternativas, entretanto não são detalhadas as formas de como estas devem ser utilizadas. Já o texto americano traz nos seus anexos diversos exemplos de cálculos e aplicações, teoria sobre o comportamento da fumaça, informações técnicas para as simulações computacionais, comparações entre dados experimentais e previstos matematicamente, dados de testes em tamanho real, dados da reação ao fogo de diversos materiais que podem compor um ambiente, possíveis interações e detalhes dos sistemas de climatização e ar-condicionado, comparações entre diferentes equações algébricas, equações alternativas para diferentes situações, ou seja, fornece material de apoio suficiente para que diferentes métodos possam ser

utilizados para se chegar em um projeto que possa realizar um controle de fumaça compatível com a realidade.

A IT-15 fornece dados de tamanho de incêndios e taxas de liberação de calor tabelados, conforme a classificação da edificação. Apesar de fornecer formulações matemáticas para a obtenção destes valores, os dados de reação ao fogo dos principais materiais que compõem as edificações brasileiras não são facilmente encontrados ou carecem de experimentação.

A Figura 37 mostra os passos necessários desde a confecção do projeto até a instalação de um sistema de controle de fumaça de acordo com a NFPA 92. É importante salientar que após a execução de uma tarefa, são realizadas conferências e ajustes, para que possa ser executado o passo seguinte.

Figura 37 – Processo necessário para a implementação de um sistema de controle de fumaça de acordo com o exigido pela NFPA 92



Fonte: O autor.

Após a confirmação da necessidade do controle de fumaça, o projetista deve elencar os materiais que farão parte da edificação, ou seja, calcular a carga de incêndio e realizar os cálculos e simulações que possam prever o comportamento destes materiais em um incêndio. Então deve ser proposta uma solução, que será projetada conforme os cálculos e os métodos presentes na NFPA 92 e terá sua

conformidade verificada. Nesse ponto do projeto é de extrema importância documentar todos os cálculos e a conformidade que fora realizada.

Para a execução de um projeto de excelência, conforme a NFPA 92, o próximo passo é sincronizar o projeto de controle de fumaça com os demais que farão parte da edificação, como arquitetura, estrutural, elétrico e demais sistemas de segurança contra incêndio e pânico. Então a documentação precisa ser trabalhada de forma a garantir o registro de todos os parâmetros utilizados. Por fim, devem ser realizados testes nas instalações para averiguar se estão de acordo com o previsto em projeto, caso não esteja de acordo, serão necessárias novas soluções.

A IT-15 não apresenta o mesmo nível de detalhamento quanto às exigências de documentação e testes no sistema. São listados alguns poucos testes, sendo exigido um teste geral de funcionamento a cada 6 meses. O padrão americano dedica o capítulo 8 somente para a descrição de testes, além daqueles listados em anexo, sendo exigidos testes semanais nos sistemas.

Apesar das diferenças, ambos os documentos atendem ao objetivo principal de prescrever meios para que sejam adotados sistemas de controle de fumaça em determinados tipos de edificação com ênfase na segurança dos ocupantes, na preservação dos bens e no auxílio ao trabalho dos bombeiros. Evidentemente os documentos refletem a realidade e a cultura dos países (Estados Unidos da América e Brasil), sendo de vital importância a utilização dos melhores aspectos de cada um para a confecção de norma técnica para o Distrito Federal.

4.5 Desenvolvimento da proposta de parte da norma de controle de fumaça para o CBMDF.

A proposta de norma técnica presente no apêndice tem como objetivo fomentar, dentro do CBMDF, a discussão sobre a obrigatoriedade da instalação de sistemas de controle de fumaça em determinados tipos de edificações, portanto, foi elaborada para dar início a um estudo mais aprofundado sobre o tema a partir dos pontos apresentados no decorrer deste trabalho.

Considerando a importância e a complexidade da definição de parâmetros adequados para o projeto e instalação de sistemas de controle de fumaça, que

requerem testes reais, cálculos complexos e simulações computacionais, a norma proposta abarca aspectos menos controversos, mas ainda assim passíveis de discussões e adequações conforme o cenário encontrado.

A norma apresentada trata sobre o objetivo geral da normativa, sua aplicação, as referências bibliográficas utilizadas, definições de termos, condições gerais de aplicação e métodos de cálculo do incêndio projetado, necessário para que posteriormente o sistema de controle de fumaça possa ser concebido.

O texto normativo sugerido foi elaborado em grande parte a partir da análise da IT de São Paulo e da NFPA 92, baseando-se nos principais aspectos dos referidos padrões, trazendo da instrução técnica brasileira os elementos necessários para o projeto baseado em dados previamente estabelecidos com a utilização de cálculos menos complexos, em virtude da lacuna encontrada devido à falta de dados de muitos materiais nacionais, e do padrão americano a capacidade de realização de projetos a partir de cálculos, testes reais e simulações computacionais capazes de se aproximarem mais da realidade, contudo, necessitando de dados específicos de diversos materiais e de uma capacidade de cálculo mais robusta.

De todo modo, a proposta apresentada visa tão somente iniciar um trabalho ainda a ser desenvolvido e não deve ser considerada acabada, tendo como principal função servir como ponto de partida para a futura norma técnica sobre sistemas de controle de fumaça do Corpo de Bombeiros Militar do Distrito Federal.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo realizado envolveu diferentes trabalhos científicos, literatura consolidada e normativas nacionais e internacionais sobre controle de fumaça, abordando as principais vertentes necessárias para a compreensão do tema e formação de uma base de conhecimento sólida.

Visto isso, foram cumpridos os objetivos do trabalho de descrever as principais características da fumaça relacionada aos incêndios em edificações (Capítulo 2), estudar as principais normas, códigos técnicos e bibliografia científica (Capítulos 2 e 4) e apresentar a Instrução Técnica de maior importância atualmente exigida no Brasil, a IT-15 do Estado de São Paulo (Capítulo 4).

Portanto, o trabalho realizado atinge seu objetivo principal de construir o arcabouço teórico para a formulação da norma de controle de fumaça em edificações, além de, como forma de sugestão, transcrever parte da norma técnica para aplicação no Distrito Federal a partir de padrões consolidados. Tal proposta fora baseada nos aspectos principais da IT-15 e da NFPA 92 e encontra-se no Apêndice A.

Conforme descrito durante todo o texto, os sistemas de controle de fumaça são extremamente importantes para a preservação de vidas e bens, além de auxiliar o trabalho dos bombeiros, demonstrando a relevância do presente trabalho para a sociedade e para a organização.

A pesquisa e o desenvolvimento de diferentes técnicas para o controle de fumaça parte dos conhecimentos básicos abordados no presente texto, elaborado com o intuito de fomentar o estudo do tema, seja dentro do CBMDF ou no meio acadêmico, buscando o desenvolvimento da ciência e da tecnologia em prol da proteção de vidas e patrimônios.

Por fim, recomendam-se estudos complementares sobre a reação de diferentes materiais ao fogo de forma a subsidiar os cálculos de incêndios projetados conforme a realidade brasileira e sobre a utilização de *softwares* de simulação de incêndios para os projetos dos diversos sistemas de proteção contra incêndio e pânico.

REFERÊNCIAS

- ALTINAKAR, M. S.; WEATHERILL, A. **Use of an inclined air curtain for preventing smoke propagation in a tunnel during fire emergency**. Proceedings of the 4th international conference on safety in road and rail tunnels. 2001.
- BALACHANDRAN, W.; JAWOREK, A.; KRUPA, A.; KULON, J.; LACKOWSKI, M. **Efficiency of smoke removal by charged water droplets**. Journal of Electrostatics. 58. 209-220. 2003.
- BLOMQUIST, P.; HERTZBERG, T.; TUOVINEN, H.; ARRHENIUS, K.; ROSELL, L. **Detailed determination of smoke gas contents using a small-scale controlled equivalence ratio tube furnace method**. Fire Mater. 31 (8) P. 495. 2007.
- BLOMQUIST, P.; HERTZBERG, T.; DALENE, M.; SKARPING, G. **Isocyanates, amino isocyanates and amines from fires — A screening of common materials found in buildings**. Fire Mater. 27, P. 275–294. 2003.
- CHOW, W. K.; LI, Y. Z.; CUI, E.; HUO, R. **Natural smoke filling in atrium with liquid pool fires up to 1.6 MW**. Building & Environment, 36(1), P. 121-127. 2001.
- Daniels, R. D.; Kubale, T. L.; Yiin, J. H.; et al. **Mortality and cancer incidence in a pooled cohort of US firefighters from San Francisco, Chicago and Philadelphia (1950–2009)**. Occupational and Environmental Medicine, 71:388-397. 2014.
- DEPARTMENT FOR COMMUNITIES AND LOCAL GOVERNMENT. **Fire Statistics: Great Britain April 2013 to March 2014**. Department for Communities and Local Government, 2015.
- DRYSDALE, D. **An Introduction to Fire Dynamics**. John Wiley & Sons, 2011.
- FANG, Y. **Variational Principles of Typical Smoke Characteristics with Water Mist Applying**. Journal of Combustion Science and Technology; 14: 372-377. 2008.
- GAO, W.; LIU, N.; DELICHATSIOS, M.; YUAN, X.; BAI, Y.; CHEN, H.; & ZHANG, L. **Fire spill plume from a compartment with dual symmetric openings under cross wind**. Combustion and Flame, 167, 409–421. 2016.
- GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2010.
- GONG, H.; JIANG, J.; QIU J.; RANRAN, J.; ZHANG, W. **Theoretical and**

Experimental Study on the Water Curtain Shape and Mechanical Relationship of the Smoke Control System, Advances in Engineering Research, volume 93. 2016.

GUPTA, S.; PAVAGEAU, M.; ELICER-CORTE´S, J. C. **Cellular confinement of tunnel sections between two air curtains**. Build Environment journal 42:3352–3365. 2007.

Gupta, K.; Mehrotra, M.; Kumar, P.; Gogia, A. R.; Prasad, A.; Fisher, J. A. **Smoke Inhalation Injury: Etiopathogenesis, Diagnosis, and Management**. Indian journal of critical care medicine : peer-reviewed, official publication of Indian Society of Critical Care Medicine, 22(3), 180–188. 2018.

GWYNNE, S.; GALEA, E. R.; LAWRENCE, P. J. **Modelling occupant interaction with fire conditions using the building EXODUS evacuation model**. Fire Safety Journal, 36 (4), P. 327-357. 2001.

HU, L. H.; ZHOU, J. W.; HUO, R.; PENG, W.; WANG, H. B. **Confinement of fire-induced smoke and carbon monoxide transportation by air curtain in channels**. Journal of Hazard Mater 156:327–334. 2008.

HUANG, D.; ZHU, G.; PAN, R. **Probabilistic Model of Smoke Filling in Large Spaces**. Procedia Engineering, 211, 271–279, 2018.

HULL, T. R.; BREIN, D.; STEC, A. A. **Quantification of toxic hazard from fires in buildings**. Journal of Building Engineering, 2016.

HUO, R.; CHOW, W. K.; JIN, X. H.; LI, Y. **Experimental studies on natural smoke filling in atrium due to a shop fire**. Building & Environment, 40 (9), P. 1185-1193, 2005.

INSTRUÇÃO TÉCNICA Nº 15/2019. **Controle de fumaça**. Secretaria da segurança pública - Polícia Militar do Estado de São Paulo, Corpo de Bombeiros. 2019

ISO/TS 19700:2016. **Controlled equivalence ratio method for the determination of hazardous components of fire effluents - Steady-state tube furnace**. International Organization for Standardization, 2016.

IT246. **Instruction Technique IT 246 Relative au désenfumage des Établissements Recevant du Public**. Ministère de l'intérieur, de la Sécurité

Intérieure et des Libertés locales, 2004.

KAYE N. B.; HUNT G. R. **Smoke filling time for a room due to a small fire: The effect of ceiling height to floor width aspect ratio**. *Fire Safety Journal*, 42 (5), P. 329-339. 2007.

KLOTE H. J.; MILKE A. J. **Principles of Smoke Management**, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning. 2002.

KLOTE, H. J.; MILKE, A. J.; TURNBULL, G. P.; KASHEF, A.; FERREIRA, J. M.; **Handbook of Smoke Control Engineering**. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2012.

Li, A.; Zhang, Y.; Hu, J.; Gao, R. **Reduced-scale experimental study of the temperature field and smoke development of the bus bar corridor fire in the underground hydraulic machinery plant**, *Tunnelling and Underground Space Technology* 41. 2014.

LI, M.; GAO, Z.; JI, J.; LI, K.; SUN, J. **Wind effects on flame projection probability from a compartment with opposing openings**, *Fire Safety J.* 91 414–421. 2017.

LUO, N.; LI, A.; GAO, R.; ZHANG, W.; TIAN, Z. **An experiment and simulation of smoke confinement utilizing an air curtain**. *Safety Science* 59:10–18. 2013.

MAGHIRANG, R. G.; RAZOTE, E. B. **Smoke dissipation by solid particles and charged water spray in enclosed spaces**. *Fire Safety Journal*; 44: 668-671. 2009.

MARCONI, M. DE A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de metodologia científica**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

MERCI, B.; BEJI, T. **Fluid Mechanics Aspects of Fire and Smoke Dynamics in Enclosures**, CRC Press. 2016.

NASCIMENTO, D. M. **Metodologia do trabalho científico: Teoria e prática**. Rio de Janeiro: Forense, 2002.

NFPA. **Standard for Smoke Control Systems**. National Fire Protection Association. Publication N. 92, USA, 2018.

PAN, L.; LO, S. M.; LIAO, G.; CONG B. **Experimental study of smoke control in subway station for tunnel area fire by water mist system**. The fifth conference on

performance-based fire and fire protecting engineering. 2011.

PRAHL, J.; EMMONS, H. W. **Fire induced flow through an opening**. Combustion and Flame 25. P. 369-385. 1975.

PURSER, D. A.; WOOLLEY, W. D. **Biological studies of combustion atmospheres**, 1983.

RIBEIRO, P. T. **Dimensionamento de Sistemas de Controle de Fumo Passivos**. Trabalho final de mestrado para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. 2018.

SÃO PAULO. Decreto 63.911, de 10 de dezembro de 2018. **Institui o Regulamento de Segurança Contra Incêndios das edificações e áreas de risco no Estado de São Paulo e dá providências correlatas**. Diário Oficial do estado de São Paulo, 11 dez. 2018.

SALEM, A. M. **Use of Monte Carlo Simulation to assess uncertainties in fire consequence calculation**. Ocean Engineering, 117, P. 411-430. 2016.

SFPE - Society of Fire Protection Engineers. **Handbook of Fire Protection Engineering** , 2019.

SHIH, Y. C., YANG, A. S., CHANG-WEI, L. **Using air curtain to control pollutant spreading for emergency management in a cleanroom**. Building and Environment 46:1104–1114. 2011.

STEC, A. A.; LEBEK, K. **Characterization of the steady state tube furnace (ISO TS 19700) for fire toxicity assessment**. Polymer Degradation and Stability, 2008.

STEC, A. A. **Fire toxicity – The elephant in the room?** Fire Safety Journal, 91, P. 79–90. 2017.

STECKLER, K. D.; BAUM, H. R.; QUINTIERE, J. G. **Fire induced flows through room openings-flow coefficients**, Symposium (International) on Combustion 20 1591–1600. 1985.

TAKEDA, H. **Experimental investigation of fire behavior in a 1/6 scale dual opening compartment**, Symposium (International) on Combustion 21, 137–142. 1988.

TANAKA, T. **Smoke control in large scale spaces**. Materials and construction, fire safety, offshore engineering and architecture, computer application. Architectural Institute of Japan, P. 663-664. 1985.

TIAN, X.; ZHONG, M.; SHI, C.; ZHANG, P.; LIU, C. **Full-scale tunnel fire experimental study of fire-induced smoke temperature profiles with methanol-gasoline blends**, Applied Thermal Engineering 116, 233–243. 2017.

URNS, S. R. **An Introduction to Combustion: concepts and applications**, McGraw-Hill, 2nd ed, 2012.

VIEGAS, J. C.; CRUZ, H. **Air Curtains Combined with Smoke Exhaust for Smoke Control in Case of Fire: Full-Size Experiments**. Fire Technology 55, 211–232. 2019.

XIANG, X. D.; COLBECK, I. **Charged water drops and smoke dissipation**. Fire Safety Journal; 28: 227-232. 1997.

YAMANA, T.; TANAKA, T. **Smoke Control in Large Scale Spaces: (Part 2: Smoke Control Experiments In A Large-Scale Spaces)**. Fire Science & Technology, 5 (1), P. 41-54. 1985.

YANG, Y.; DENG, J.; XIE, C. C. **Design and Implementation of Fire Safety Evacuation Simulation Software based on Cellular Automata Model**. Procedia Engineering, 71, P. 364-371. 2014.

YP I.; CHIU Y. L.; WU S. J. **The simulation of air recirculation and fire/explosion phenomena within a semiconductor factory**. Journal of Hazard Mater 163:1040–1051. 2009.

ZHIGANG, W.; XISHI, W.; YANQING, H.; CHANGFA, T.; HEPING, Z. **Experimental study on fire smoke control using water mist curtain in channel**. Journal of Hazardous Materials 342, 231-241. 2018.

Zhong, M. H.; Shi, C. L.; He, L.; Shi, J.H.; Liu, C.; Tian, X. L. **Smoke development in full- scale sloped long and large curved tunnel fires under natural ventilation**, Applied Thermal Engineering 108, 857–865. 2016.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Proposta de Norma Técnica



CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO DISTRITO FEDERAL
DEPARTAMENTO DE SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO



ANEXO DA PORTARIA Nº /2021 - CBMDF, DE /..... /2020
PUBLICADO NO DODF Nº, DE /..... /2020.

NORMA TÉCNICA Nº .../2021-CBMDF

Sistemas de controle de fumaça

Sumário

- 1 Objetivo
- 2 Aplicação
- 3 Referências bibliográficas
- 4 Definições
- 5 Condições gerais
- 6 Cálculo do Incêndio Projetado

1. Objetivo

- 1.1. Esta Norma Técnica (NT) tem por objetivo estabelecer requisitos técnicos, necessários aos sistemas de controle de fumaça, a serem considerados no dimensionamento destes sistemas em projetos apresentados para análise e, posteriormente, vistoria da instalação, realizados pelo Departamento de Segurança Contra Incêndio (DESEG).

2. Aplicação

- 2.1. A presente NT se aplica às edificações e áreas de riscos no Distrito Federal que, em função de sua classificação, conforme norma técnica específica que trata das medidas de segurança e risco de incêndio, forem enquadradas no grupo de construções que demandam a instalação do sistema de controle de fumaça.

3. Referências Bibliográficas

- 3.1. INSTRUÇÃO TÉCNICA Nº 15 – Controle de fumaça. Secretaria da segurança pública – Polícia Militar do Estado de São Paulo, Corpo de Bombeiros - 2019.
- 3.2. NFPA 92 – Standard for smoke control systems. National Fire Protection Association Publication N. 92, USA, 2018.

4. Definições

- 4.1. **Acantonamento:** volume livre compreendido entre o chão e o teto, telhado ou forro, delimitado por painéis de fumaça.
- 4.2. **Altura da zona enfumaçada (Hf):** diferença entre a altura de referência e a altura de zona livre de fumaça.
- 4.3. **Altura da zona livre de fumaça (H’):** altura medida entre face superior do chão e a parte mais baixa da barreira de fumaça e, se não houver esta, entre a face superior do chão e a face inferior da camada de fumaça.
- 4.4. **Altura de referência (H):** média aritmética das alturas do ponto mais alto e do ponto mais baixo da cobertura (ou do falso teto) medida a partir da face superior do piso.
- 4.5. **Área livre de um vão de fachada, de grelha ou de um extrator natural de fumaça:** área geométrica interior da abertura efetivamente desobstruída para passagem de ar, tendo em conta a eventual existência de palhetas.
- 4.6. **Área útil de um vão de fachada, de uma boca de ventilação ou de um extrator de fumaça:** área equivalente a um percentual de área livre, utilizada para fins de cálculo, considerando a influência dos ventos e das eventuais deformações provocadas por um aquecimento excessivo.
- 4.7. **Átrio:** espaço amplo criado por um andar aberto ou conjuntos de andares abertos, conectando 2 ou mais pavimentos cobertos, com ou sem fechamento na cobertura, excetuando-se os locais destinados à escada, escada rolante, “shafts” de hidráulica, eletricidade, ar-condicionado, cabos de comunicação e poços de ventilação e iluminação.
- 4.8. **Barreiras de fumaça:** elemento vertical de separação montado no teto, com altura mínima e características de resistência ao fogo, que previna a propagação horizontal de fumaça de um espaço para outro.
- 4.9. **Camada de fumaça “smoke layer”:** espessura acumulada de fumaça por uma barreira ou painel.
- 4.10. **Corredor definido:** passagem no interior de edificação ou em um de seus pavimentos, considerada área comum, que delimita o espaço entre escadas e elevadores e a entrada das unidades autônomas (exemplos: apartamentos, quartos de hotéis, escritórios, consultórios).
- 4.11. **Dimensões do incêndio:** as dimensões de base do maior incêndio com o qual um sistema de controle de fumaça deve lidar, podendo ser no formato de um quadrado ou de um círculo.

- 4.12. Entrada de ar limpo:** ar fresco, em temperatura ambiente, livre de fumaça, que entra no acantonamento durante as operações de extração de fumaça.
- 4.13. Efeito chaminé:** fluxo de ar vertical dentro das edificações, causado pela diferença de temperatura interna e externa.
- 4.14. Espaços adjacentes:** áreas dentro de uma edificação com comunicação com corredores, “malls” e átrios (ex.: lojas em um shopping center).
- 4.15. Extrator mecânico de fumaça:** dispositivo instalado em um edifício, acionado automaticamente em caso de incêndio, permitindo a extração de fumaça para o exterior por meios mecânicos.
- 4.16. Extrator natural de fumaça:** dispositivo instalado na cobertura ou fachada de um edifício, suscetível de abertura automática em caso de incêndio, permitindo a extração da fumaça para o exterior por meios naturais.
- 4.17. Extração de fumaça:** retirada (natural ou mecânica) da fumaça de ambientes protegidos pelo sistema de controle de fumaça.
- 4.18. Fluxo de calor:** a energia total de calor transportada pelos gases quentes na área incendiada.
- 4.19. Fumaça:** partículas de ar transportadas nas formas sólida, líquida e gasosa, decorrentes de um material submetido à pirólise ou combustão que juntamente com a quantidade de ar formam uma massa.
- 4.20. Interface da camada de fumaça - “smoke layer interface”:** o limite teórico entre a camada de fumaça e a zona de transição onde a fumaça está tomando volume. Na prática, a interface da camada de fumaça é um limite efetivo dentro da zona de transição, que pode ter vários metros de espessura. Abaixo desse limite efetivo, a densidade da fumaça cai a zero.
- 4.21. Jato de fumaça sob o teto - “ceiling jet”:** um fluxo de fumaça horizontal estendendo-se radialmente do ponto de choque da coluna de fogo contra o teto. Normalmente, a temperatura do jato de fumaça sob o teto será maior que a camada de fogo adjacente.
- 4.22. Núcleo do pavimento:** área de acesso do pavimento onde se concentram os elevadores e, normalmente, as escadas de segurança.
- 4.23. Painel de fumaça:** elemento vertical de separação montado no teto, com altura e característica de resistência ao fogo, utilizada para delimitar uma área de acantonamento.
- 4.24. Pleno:** ambiente criado pela interposição de elementos de acabamento como, por exemplo, forros, divisórias e elementos estruturais como, por exemplo, lajes e paredes.
- 4.25. Pressurização:** diferença de pressão criada em um ambiente, com a finalidade de impedir a entrada de fumaça.
- 4.26. Produção de calor:** calor total gerado pela fonte de fogo.
- 4.27. Registro corta-fogo e fumaça:** dispositivos utilizados no sistema de controle de fumaça, dependendo da necessidade, projetados para resistirem à passagem de fogo, gases quentes e/ou fumaça no interior de dutos, paredes ou lajes, atendendo a requisitos de resistência a fogo, fumaça e estanqueidade.
- 4.28. Sistema de controle de fumaça:** processo com conjunto de equipamentos através dos quais a fumaça e os gases quentes são limitados, restringidos e extraídos.
- 4.29. Superfície útil de um extrator:** superfície dada pelo fabricante, baseada na influência do vento e das deformações provocadas por uma elevação de temperatura.
- 4.30. Supervisão:** autoteste do sistema de controle de fumaça, onde a instalação e os dispositivos com função são monitorados para acompanhar uma falha funcional ou de integridade da instalação e dos equipamentos que controlam o sistema.
- 4.31. Zona enfumaçada:** espaço compreendido entre a zona livre de fumaça e a cobertura ou o teto.

4.32. Zona livre de fumaça: espaço compreendido entre o piso de um pavimento e a face inferior das barreiras de fumaça ou, nos casos em que estes não existam, a face inferior das bandeiras das portas.

5. Condições Gerais

- 5.1.** Esta Norma Técnica aplica-se ao controle de fumaça objetivando a manutenção de um ambiente seguro nas edificações, durante o tempo necessário para abandono do local sinistrado, controlando a propagação de gases quentes e fumaça entre a área incendiada e áreas adjacentes, provendo condições para as operações de busca e resgate de pessoas, localização e controle do incêndio.
- 5.2.** As edificações devem ser dotadas de meios de gerenciamento e/ou contenção de fumaça, que promovam a extração (mecânica ou natural) e/ou a contenção dos gases e da fumaça no local de origem do incêndio, controlando a entrada de ar (ventilação) e prevenindo a migração de fumaça e gases quentes para as áreas adjacentes não sinistradas.
- 5.3.** Devem ser observados dez fatores na elaboração do projeto de controle de fumaça: tamanho do incêndio, taxa de liberação de calor, altura da camada de fumaça, tempo para a camada de fumaça descer até a altura de projeto, dimensão do acantonamento, espessura da camada de fumaça, temperatura do ambiente, temperatura da fumaça, introdução de ar e obstáculos.
- 5.4.** Para a confecção do projeto e posterior instalação de um sistema de controle de fumaça, devem ser observadas as etapas descritas a seguir:
 - 5.4.1.** Determinação do incêndio projetado: o projetista deve elencar os materiais que irão compor a edificação (aspectos estruturais, acabamentos, decoração, mobília, armazenamento etc.), calcular a carga de incêndio e realizar cálculos e simulações que possam prever o comportamento destes materiais em um incêndio.
 - 5.4.2.** Proposta de solução conforme o incêndio projetado: Deve ser proposta uma solução, que será projetada conforme os resultados do incêndio projetado, utilizando-se dos cálculos e métodos presentes nessa Norma Técnica, que deverá ter sua conformidade verificada.
 - 5.4.3.** Projeto do sistema de controle de fumaça: Durante a confecção do projeto é de extrema importância documentar todos os cálculos e a conformidades que foram realizadas. Devem ser detalhados também todos os aspectos dos equipamentos a serem utilizados.
 - 5.4.4.** Sincronização: O projeto de controle de fumaça deve estar sincronizado com os demais que farão parte da edificação, como arquitetura, estrutural, elétrico etc., além dos outros sistemas de proteção contra incêndio e pânico. Tal ação visa garantir o correto funcionamento quando estiverem operando conjuntamente.
 - 5.4.5.** Documentação: Além de todos os dados relacionados ao incêndio projetado e ao projeto do sistema propriamente dito, devem constar os manuais de operação, manutenção e testes do sistema.
 - 5.4.6.** Testes: Após a instalação do sistema deverão ser realizados e registrados os testes previstos nessa Norma técnica.

6. Cálculo do Incêndio Projetado

- 6.1.** Métodos para o cálculo do incêndio projetado
- 6.2.** O primeiro método de cálculo do incêndio projetado faz uso de tabelas e valores pré-determinados para os casos em que não é possível obter dados do comportamento de diferentes materiais ao fogo.
 - 6.2.1.** Para os casos em que existam meios para a obtenção dos dados do comportamento de materiais específicos (que compõem a edificação) ao fogo, estes devem ser utilizados nos cálculos do incêndio projetado conforme método apresentado da seção 6.3.

6.2.2. Determinação do tamanho do incêndio: A dimensão do incêndio depende do tipo de fogo esperado e de se estabelecer uma condição de estabilidade para que ele seja mantido em um determinado tamanho.

6.2.3. O tamanho do incêndio das edificações deve ser conforme a tabela abaixo:

Tabela 01 – Dimensões do Incêndio			
Categorias de risco	Tamanho do incêndio (m)	Perímetro (m)	Área (m²)
Baixo (Até 300 MJ/m ²)	3,0 x 3,0	12	9
Médio (de 300 a 1.200 MJ/m ²)	4,0 x 4,0	16	16
Alto (acima de 1.200 MJ/m ²)	6,0 x 6,0	24	36

O tamanho do incêndio em depósitos será o resultado da multiplicação da área constante na Tabela 1 pela altura de estocagem

6.2.4. A taxa de liberação de calor deve adotar os parâmetros da tabela 02:

Tabela 02 – Taxa de liberação de calor	
Ocupações	Taxa de liberação de calor (KW/m²)
Residencial	228
Serviços de hospedagem	500
Comercial	500
Serviços profissionais	228
Educacional	350
Local de reunião de público	500
Serviços automotivos	500
Serviços de saúde e institucionais	500
Depósitos	Taxa de liberação de calor (KW/m²)
Engradado de madeira	2500
Paletes de madeira, empilhados	2150
Móveis embalados	500
Madeira serrada empilhada	500
Madeira compensada empilhada	500
Produtos celulósicos em geral	160
Malas do correio	235
Papelão empilhado	290
Rolos de papelão	120
Caixas de papelão	150
Caixas de papelão com divisórias empilhadas	325
Caixas de papelão, produtos elétricos	145
Produtos empacotados	315
Componentes de fibra de vidro em caixas de papelão	190
Compartimentos em fibra de vidro em caixas de papelão, empilhados	275
Garrafas plásticas em caixas de papelão, empilhadas	940
Garrafas em PVC empacotadas em caixas de papelão com divisórias	655
Garrafas de polietileno empacotadas em caixas de papelão	1195
Escaninhos de polietileno, cheios, empilhados	1000
Sacos de lixo de polietileno em caixas empilhadas	380
Filmes de plástico em rolo	980
Filmes de polipropileno em rolo	1280
Tubos de polipropileno empacotados em caixas de papelão com divisórias empilhadas	850
Isolamento de poliuretano empacotado e empilhado	265

Painéis isolados de poliuretano rígido, espuma em caixas de papelão com divisórias, empilhada	370
Painel isolado em poliestireno espuma rígido, empilhado	675
Garrafas de poliestireno em caixas de papelão	2695
Garrafas de poliestireno empacotadas em caixas de papelão com divisórias, empilhadas	2720
Tubos de poliestireno em caixas de papelão	805
Tubos de poliestireno colocados em caixas de papelão, empilhadas	1105
Partes de brinquedo de poliestireno empilhadas	305
Partes de brinquedo poliestireno	390
Livros, móveis	720
Álcool	740
Gasolina	1590
Óleo combustível	1470

6.2.5. Altura da camada de fumaça

6.2.6. Uma altura livre de fumaça deve ser projetada de forma a garantir o escape das pessoas.

6.2.7. Esta altura devido a presença do jato de fumaça pode alcançar no máximo 85% da altura da edificação, devendo estar no mínimo a 2,20 m acima do piso da edificação.

6.2.8. Onde houver depósito de mercadorias, caso haja possibilidade de ocorrer o fenômeno “flash over”, a camada de fumaça deve ser projetada a 0,50 m acima do topo dos produtos armazenados.

6.2.9. Tempo para a camada de fumaça descer até a altura de projeto

6.2.10. A posição da interface da camada de fumaça a qualquer tempo pode ser determinada pelas relações que reportam a 3 situações:

- Quando nenhum sistema de extração de fumaça está em operação;
- Quando a vazão mássica de extração de fumaça for igual ou superior à vazão fornecida à coluna da camada de fumaça;
- Quando a vazão de extração de fumaça for menor que a vazão fornecida à coluna da camada de fumaça.

6.2.11. Posição da camada de fumaça com nenhum sistema de extração em funcionamento:

- com o fogo na condição estável, a altura das primeiras indicações da fumaça acima da superfície do piso, ‘z’, pode ser estimada a qualquer tempo, ‘t’, pela equação (1) (onde os cálculos abrangendo $z/H > 1,0$ significam que a camada de fumaça não começou a descer).

- Equação (1)** $\frac{z}{H} = 1,11 - 0,28 \ln \left[\left(t \frac{Q^{1/3}}{H^{4/3}} \right) / \left(\frac{A}{H^2} \right) \right]$ Onde: z = altura de projeto da camada de fumaça acima do piso (m); H = altura do teto acima da base do fogo (m); t = tempo (seg); Q = taxa de liberação de calor de fogo estável (kW); A = área do acantonamento (m²).

- A equação acima: está baseada em informações experimentais provenientes de investigações utilizando áreas uniformes (seccionais-transversais), baseadas em uma altura com proporções A/H² que pode variar de 0,9 a 14 e para valores de $z/H \geq 0,2$; avaliando a posição da camada a qualquer tempo depois da ignição.

6.2.12. Posição da camada de fumaça com a extração de fumaça em operação:

- Vazão mássica de extração de fumaça igual à vazão mássica de fumaça fornecida pelo incêndio;
- Depois que o sistema de extração estiver operando por um determinado período, será estabelecida uma posição de equilíbrio na altura da camada de fumaça, desde que vazão mássica de extração seja igual à vazão mássica fornecida pela coluna à base do fogo;

- c. Uma vez determinada esta posição, deve ser mantido o equilíbrio, desde que as vazões mássicas permaneçam iguais.
- d. Vazão mássica de extração de fumaça diferente da vazão mássica de fumaça fornecida pelo incêndio:
- e. Com a vazão mássica fornecida pela coluna de fumaça à base do fogo maior que a vazão mássica de extração, não haverá uma posição de equilíbrio para camada de fumaça;
- f. Neste caso, a camada de fumaça irá descer, ainda que lentamente, em função da vazão mássica de extração ser menor;
- g. Nesta condição, deve ser utilizado o valor de correção constante da Tabela 03.

Tabela 03 - Valor de correção						
z/H	t/t ₀					
	(m/m _e) ou (V/V ₀)					
	0,25	0,35	0,5	0,7	0,85	0,95
0,2	1,12	1,19	1,3	1,55	1,89	2,49
0,3	1,14	1,21	1,35	1,63	2,05	2,78
0,4	1,16	1,24	1,4	1,72	2,24	3,15
0,5	1,17	1,28	1,45	1,84	2,48	3,57
0,6	1,2	1,32	1,52	2	2,78	4,11
0,7	1,23	1,36	1,61	2,2	3,17	4,98
0,8	1,26	1,41	1,71	2,46	3,71	6,25

- h. Onde: z = altura de projeto da camada de fumaça acima do piso; H = altura do teto acima da base do fogo (m); t = tempo para a camada de fumaça descer até z (s); t₀ = valor de t na ausência de extração de fumaça (ver equação 1); (s) m = vazão mássica de extração de fumaça (menos qualquer vazão mássica dentro da camada de fumaça, decorrentes de outras fontes que não seja a coluna de fumaça); m_e = valor de "m" requerido para manter a camada de fumaça indefinidamente em z (obtido pela equação 3)

6.2.13. Altura da chama - Na determinação da altura da chama proveniente da base do fogo, deve-se adotar a seguinte equação:

- a. **Equação (2)** $z_1 = 0,166Q_c^{2/5}$ Onde: z₁ = limite de elevação da chama (m) Q_c = porção convectiva da taxa de liberação de calor (kW)

6.2.14. Dimensionamento da massa de fumaça a ser extraída:

6.2.15. Na determinação da massa de fumaça gerada pelo incêndio, duas condições podem ocorrer:

- a. altura (z) da camada de fumaça ser superior à altura (z₁) da chama, ou seja: (z > z₁);
- b. altura da camada de fumaça (z) igual ou inferior à altura (z₁) da chama, ou seja: (z ≤ z₁).

6.2.16. Para a condição (z > z₁), a massa de fumaça gerada é determinada pela seguinte equação:

- a. **Equação (3)** $m = 0,071Q_c^{1/3}z^{5/3} + 0,0018Q_c$ Onde: m = vazão mássica da coluna de fumaça para a altura z (kg/s); z = altura de projeto da camada de fumaça acima do piso; Q_c = porção convectiva da taxa de liberação de calor, estimada em 70% da taxa de liberação de calor (Q) (kW)

6.2.17. Para a condição (z ≤ z₁), a massa de fumaça gerada é determinada pela seguinte equação:

- a. **Equação (4)** $m = 0,032Q_c^{3/5}z$ Onde: m = vazão mássica da coluna de fumaça para a altura z (kg/s); z = altura de projeto da camada de fumaça acima do piso; Q_c = porção convectiva da taxa de liberação de calor estimada em 70% da taxa de liberação de calor (Q) (kW).
- 6.2.18.** Volume de fumaça produzido - Para se obter o volume de fumaça a extrair do ambiente, a seguinte equação deve ser utilizada:
- a. **Equação (5)** $V = m/\rho$ Onde: V = volume produzido pela fumaça (m³/s); m = vazão mássica da coluna de fumaça para a altura z (kg/s); ρ = densidade da fumaça em kg/m³, de acordo com a temperatura adotada (0,92 kg/m³ para 70° C e 0,55 kg/m³ para 300° C).
- b. Para compensar os possíveis vazamentos nos registros de trancamento, deve ser previsto um coeficiente de vazamento mínimo de 25% a ser acrescido sobre o resultado da Equação (5) para a seleção dos ventiladores e dimensionamento dos dutos principais de extração de fumaça.
- 6.3.** O segundo método de cálculo do incêndio projetado dá ênfase à utilização de dados relativos à reação de diferentes materiais ao fogo, para os casos em que esses dados estiverem disponíveis. (Informações sobre taxa de liberação de calor dos materiais no Anexo 1)
- 6.3.1.** Os incêndios projetados podem ser de dois tipos: Estável com uma taxa de liberação de calor constante ou Instável com uma taxa de liberação de calor que varia com o tempo.
- 6.3.2.** A taxa de liberação de calor de incêndios projetados estáveis deve ser baseada em dados disponíveis ou testes realizados.
- 6.3.3.** Quando a massa de combustível disponível é utilizada para limitar a duração de um incêndio projetado estável, essa duração deve ser calculada utilizando a seguinte equação:
- a. **Equação (6)** $\Delta t = mH_c/Q$ Onde: Δt = duração do incêndio (seg); m = total de massa de combustível consumida (kg); H_c = calor de combustão do combustível (kJ/kg) e Q = taxa de liberação de calor (kW)
- 6.3.4.** Incêndios projetados instáveis devem incluir uma fase de crescimento e uma fase estável ou de decaimento, conforme as figuras 1 e 2. As fases estáveis ou de decaimento devem ser baseadas em dados de testes, configuração do combustível ou sistemas de proteção existentes.

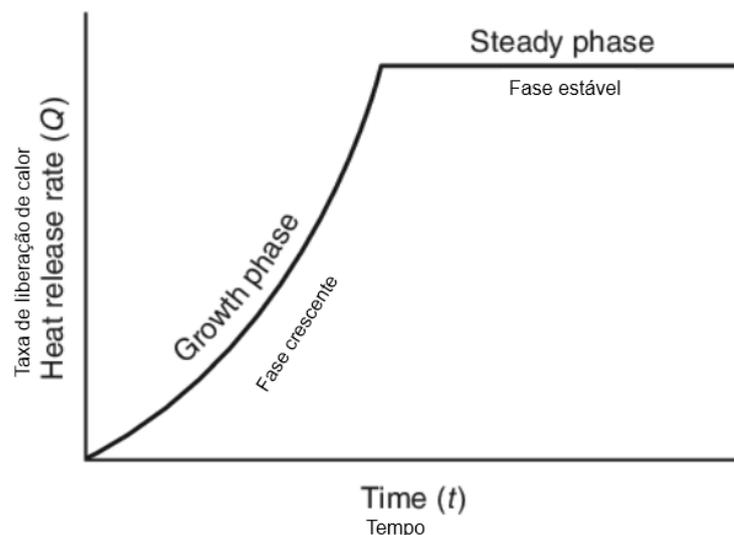


Figura 01 – Incêndio projetado instável com fase estável

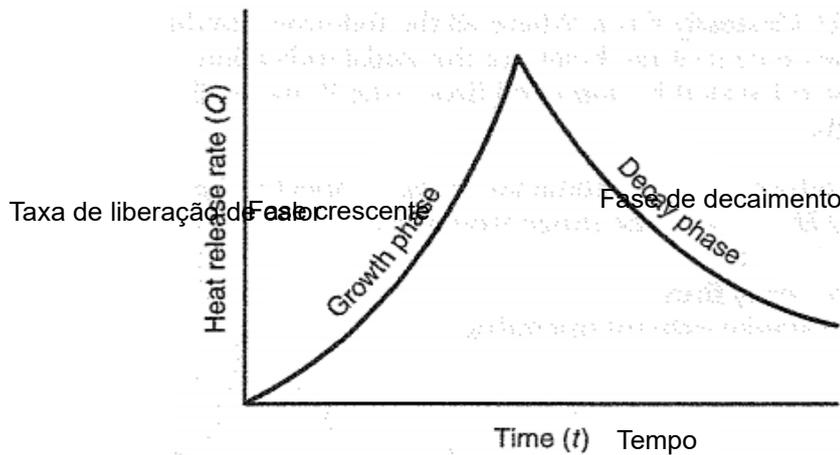


Figura 02 – Incêndio projetado instável com fase de decaimento

6.3.5. A Fase de crescimento de um incêndio deve ser descrita utilizando: dados de testes reais, modelo de crescimento de incêndio t-quadrado ou outros modelos de crescimento de incêndios aceitos por autoridade competente.

6.3.6. O modelo de crescimento t-quadrado deve ser calculado conforme a equação 7:

- a. **Equação (7)** $Q = 1055(t/t_g)^2$ Onde: Q = taxa de liberação de calor do incêndio projetado (kW); t = tempo após ignição efetiva (seg); t_g = tempo de crescimento (seg)

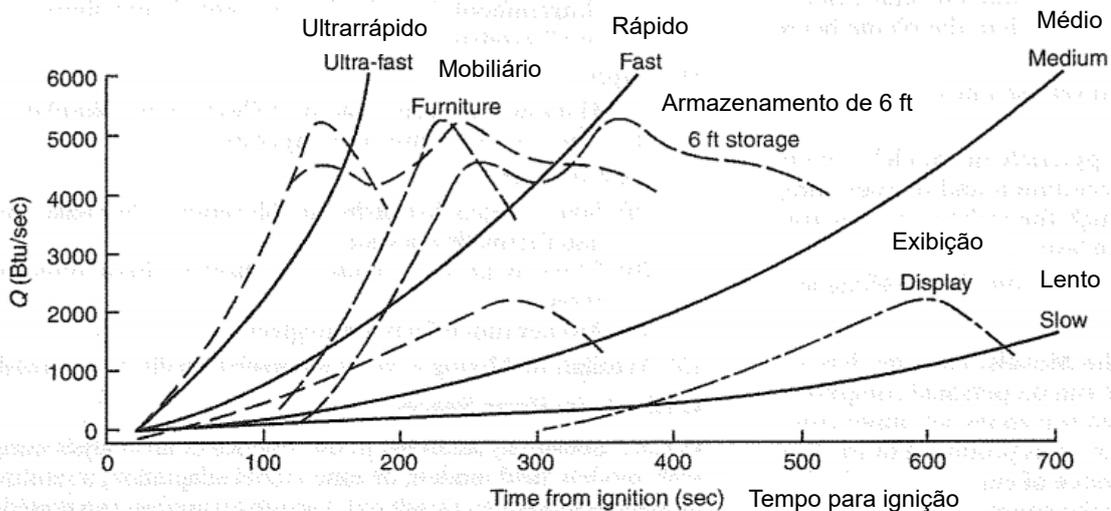


Figura 03 – Crescimento de incêndio t-quadrado

6.3.7. Quando a massa de combustível disponível é utilizada para limitar a duração do incêndio t-quadrado, a duração deve ser calculada utilizando a equação 8:

- a. **Equação (8)** $\Delta t = (mH_c t_g^2 / 333)^{1/3}$ Onde: Δt = duração do incêndio (seg); m = massa de combustível consumida; H_c = calor de combustão do combustível (kJ/kg); t_g = tempo de crescimento (seg)

6.3.8. A fase crescente de um incêndio instável pode alcançar uma taxa de liberação de calor estável baseada em dados de testes reais e em análises de engenharia de crescimento de incêndios com resposta dos chuveiros automáticos.

6.3.9. A fase crescente de um incêndio instável pode ser seguida de um decaimento da taxa de liberação de calor baseada em dados de testes reais e em análises da efetividade de chuveiros automáticos em determinados combustíveis e alturas de telhados.

- 6.3.10.** O incêndio projetado deve ser determinado considerando o tipo e a configuração do combustível além do espaçamento entre os materiais combustíveis.
- 6.3.11.** A seleção do incêndio projetado deve iniciar com a determinação do pacote de combustível, ou seja, o tamanho máximo do conjunto de material combustível que poderá estar envolvido no incêndio.
- 6.3.12.** O incêndio projetado deve ser maximizado se outros combustíveis estiverem dentro da distância definida por R, equação 9:
- a. **Equação (9)** $R = (Q_r/4\pi q_r)^{1/2}$ Onde: R = distância de separação entre o alvo e o centro do pacote de combustível (m); Q_r = Porção radiante da taxa de liberação de calor do incêndio (kW); q_r = fluxo de calor radiante incidente necessário para ignição (kW/m²)
- 6.3.13.** A porção radiante da taxa de liberação de calor do incêndio deve ser determinada pela equação 10:
- a. **Equação (10)** $Q_r = \xi Q$ Onde: Q_r = Porção radiante da taxa de liberação de calor do incêndio (kW); ξ = fração radiante (adimensional); Q = taxa de liberação de calor do incêndio (kW)
- b. O valor de 0.3 deve ser utilizado para a fração radiante, ao menos que outro valor seja determinado por dados advindos de testes aprovados
- c. Se o pacote de combustível não for circular, um raio equivalente deve ser calculado considerando uma circunferência equivalente a área do piso coberta pelo combustível
- d. O valor de 10 kW/m² deve ser utilizado como fluxo de calor radiante incidente necessário para ignição, ao menos que outro valor seja determinado por dados advindos de testes aprovados
- 6.3.14.** Para um incêndio estável, o total de massa de combustível requerida para sustentar uma taxa de liberação de calor estável deve ser determinada conforme a equação 11:
- a. **Equação (11)** $m = Q\Delta t/H_c$ Onde: m = total de massa consumida (kg); Q = taxa de liberação de calor (kW), Δt = duração do incêndio (seg); H_c = calor de combustão do combustível (kJ/kg)
- 6.3.15.** Para um incêndio t-quadrado, o total de massa consumida deve ser determinada conforme a equação 12:
- a. **Equação (12)** $m = 333\Delta t^3/H_c t_g^2$ Onde: m = total de massa consumida (kg); Δt = duração do incêndio (seg); H_c = calor de combustão do combustível (kJ/kg); t_g = tempo de crescimento do incêndio (seg)
- 6.3.16.** A altura da camada de fumaça, no início do incêndio, sem o funcionamento do sistema de controle de fumaça, para um incêndio estável, deve ser calculada pela equação 13, quando observadas as seguintes condições: (1) Área do espaço a ser preenchido por fumaça deve ser uniforme com relação à altura; (2) A razão A/H^2 deve estar entre 0.9 e 14 e (3) $z/H > 0.2$.
- a. **Equação (13)** $z/H = 1.11 - 0.28 \ln \left(tQ^{1/3}/H^{4/3} / A/H^2 \right)$ Onde: z = distância acima da base do fogo até o primeiro indício de fumaça (m); H = altura do teto acima da superfície (m); t = tempo (seg); Q = taxa de liberação de calor para incêndio estável (kW) e A = área transversal do espaço sendo ocupado pela fumaça (m²).
- 6.3.17.** A altura da camada de fumaça, no início do incêndio, sem o funcionamento do sistema de controle de fumaça, para um incêndio instável, deve ser calculada pela equação 14, quando observadas as seguintes condições: (1) Área do espaço a ser preenchido por

fumaça deve ser uniforme com relação à altura; (2) A razão A/H^2 deve estar entre 0.9 e 23 e (3) $z/H > 0.2$.

- a. **Equação (14)** $z/H = 0.91 \left(t/t_g^{2/5} H^{4/5} (A/H^2)^{3/5} \right)^{-1.45}$ Onde: z = distância acima da base do fogo até o primeiro indício de fumaça (m); H = altura do teto acima da superfície (m); t = tempo (seg); t_g = tempo de crescimento (seg) e A = área transversal do espaço sendo ocupado pela fumaça (m^2)

6.3.18. A taxa mássica de produção de fumaça para plumas simétricas deve ser calculada segundo as equações 15, 16 e 17:

- a. **Equação (15)** $z_1 = 0.166Q_c^{2/5}$ Onde: z_1 = altura limite da camada de fumaça e Q_c = porção convectiva da taxa de liberação de calor (kW)

- b. **Equação (16)** para $z > z_1$, $m = \left(0.071Q_c^{1/3} z^{5/3} \right) + 0.0018Q_c$ Onde: m = taxa mássica com a pluma na altura z (kg/seg); z = distância acima da base do fogo até a camada de fumaça (m).

- c. **Equação (17)** para $z \leq z_1$, $m = 0.032Q_c^{3/5} z$

6.3.19. A porção convectiva da taxa de liberação de calor do incêndio deve ser determinada conforme equação 18:

- a. **Equação (18)** $Q_c = \chi Q$ Onde: Q_c = porção convectiva da taxa de liberação de calor do incêndio (kW); χ = fração convectiva (adimensional) e Q = taxa de liberação de calor do incêndio (kW)

- b. O valor de 0.7 deve ser utilizado como fração convectiva, ao menos que outro valor esteja de acordo com dados de testes realizados

6.3.20. O cálculo do diâmetro da pluma simétrica deve ser realizado a partir da equação 19. O diâmetro pode variar de 0.25 a 0.5m e os valores de K_d devem ser de 0.5 para plumas em contato com paredes.

- a. **Equação (19)** $d_p = K_d z$ Onde: d_p = diâmetro da pluma simétrica (m); k_d = diâmetro constante e z = distância acima da base do fogo (m)

6.3.21. A temperatura da camada de fumaça é determinada de acordo com a equação 20:

- a. **Equação (20)** $T_s = T_o + K_s Q_c / m C_p$ Onde: T_s = temperatura na camada de fumaça ($^{\circ}C$); T_o = temperatura ambiente ($^{\circ}C$); K_s = fração convectiva do calor da camada de fumaça liberado (adimensional); Q_c = porção convectiva da taxa de liberação de calor (kW); m = taxa mássica da pluma à uma altura z (kg/seg) e C_p = calor específico dos gases da pluma (1 kJ/kg $^{\circ}C$)