

**CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DE SANTA CATARINA
UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA**

**CENTRO DE ENSINO BOMBEIRO MILITAR
CENTRO DE CIÊNCIAS DA ADMINISTRAÇÃO E SOCIOECONÔMICAS**

**CURSO DE ALTOS ESTUDOS ESTRATÉGICOS
ESPECIALIZAÇÃO EM GESTÃO PÚBLICA: ESTUDOS ESTRATÉGICOS EM
ATIVIDADE BOMBEIRIL**

ALEXANDRE VIEIRA

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DA EXTRAÇÃO DE FUMAÇA NAS ESCADAS DE
EMERGÊNCIA NA GESTÃO DOS RISCOS DURANTE OS INCÊNDIOS EM
EDIFÍCIOS ALTOS**

**FLORIANÓPOLIS
2018**

ALEXANDRE VIEIRA

ANÁLISE DO DESEMPENHO DA EXTRAÇÃO DE FUMAÇA NAS ESCADAS DE EMERGÊNCIA NA GESTÃO DOS RISCOS DURANTE OS INCÊNDIOS EM EDIFÍCIOS ALTOS

Monografia apresentada ao Curso de Altos Estudos Estratégicos e ao Curso de Especialização em Gestão Pública: Estudos Estratégicos em Atividade Bombeiril, do Centro de Ensino Bombeiro Militar (CBMSC) e do Centro de Ciências da Administração e Socioeconômicas (ESAG - UDESC) como requisito parcial para a obtenção do grau de Especialista em Gestão Pública: Estudos Estratégicos em Atividade Bombeiril.

Orientador: Prof. Dr. Arnaldo José de Lima

**Florianópolis
2018**

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor com orientações da Biblioteca CBMSC

Vieira, Alexandre

Análise do desempenho da extração de fumaça nas escadas de emergência na gestão dos riscos durante os incêndios em edifícios altos.

/ Alexandre Vieira. -- Florianópolis: CEBM, 2018.

83 p.

Monografia (Curso de Altos Estudos Estratégicos) – Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina, Centro de Ensino Bombeiro Militar, Curso de Altos Estudos Estratégicos, 2018.

Orientador: Prof. Arnaldo José de Lima, Dr.

1. Fumaça. 2. Escada. 3. Incêndio. I. Lima, Arnaldo José de. II. Título.

ALEXANDRE VIEIRA

ANÁLISE DO DESEMPENHO DA EXTRAÇÃO DE FUMAÇA NAS ESCADAS DE EMERGÊNCIA NA GESTÃO DOS RISCOS DURANTE OS INCÊNDIOS EM EDIFÍCIOS ALTOS

Monografia apresentada ao Curso de Altos Estudos Estratégicos e ao Curso de Especialização em Gestão Pública: Estudos Estratégicos em Atividade Bombeiril, do Centro de Ensino Bombeiro Militar (CBMSC) e do Centro de Ciências da Administração e Socioeconômicas (UDESC) como requisito parcial para a obtenção do grau de Especialista em Gestão Pública: Estudos Estratégicos em Atividade Bombeiril.

Banca Examinadora:

Orientador:

Prof. Dr. Arnaldo José de Lima
UDESC

Membros:

Cap BM Esp. Fábio Fregapani Silva
CBMSC

Cap BM Esp. Ilton Schpil
CBMSC

Florianópolis, 05 de novembro de 2018

RESUMO

O presente trabalho tem o objetivo de fazer uma análise do desempenho da extração de fumaça nas escadas de emergência na gestão dos riscos durante os incêndios em edifícios altos. Foi realizado um levantamento dos edifícios mais altos no estado de Santa Catarina, com uma revisão bibliográfica dos princípios da ventilação, do movimento dos gases durante o incêndio em edificações, sob a ótica da gestão dos riscos do incêndio envolvendo a extração de fumaça nos diferentes tipos de escadas de emergência previstos em normas. Adotou-se uma lógica de pesquisa dedutiva, com uma abordagem qualitativa. A coleta dos dados foi realizada por meio de uma pesquisa teórica e bibliográfica, através do exame documental de dissertações, teses, publicações, periódicos, normas técnicas, legislações e outras fontes de consulta. O universo da pesquisa limitou-se ao estudo de casos realizados por outros pesquisadores, que contemplassem o desempenho da extração de fumaça nas escadas de emergência durante o incêndio em edifícios altos no Brasil, e a análise dos dados foi realizada de forma intuitiva e indutiva. Com base na pesquisa realizada neste trabalho, conclui-se que o desempenho da extração de fumaça nas escadas de emergência é insatisfatório na gestão dos riscos durante os incêndios em edifícios altos, tanto para as escadas de emergências ventiladas naturalmente, como também para as escadas de emergências com ventilação mecânica; recomendando-se que seja feita uma revisão com urgência das normas de segurança contra incêndio e pânico do Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina, para uma redefinição dos critérios de concepção dos tipos de escadas de emergência, em relação a extração de fumaça para edifícios altos.

Palavras-chave: Fumaça. Escada. Incêndio.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Avaliação do risco de incêndio	19
Figura 2	– Tempo necessário para evacuação num incêndio	20
Figura 3	– Edifícios altos na cidade de Balneário Camboriú	25
Figura 4	– Mecanismo de produção de fumaça num ambiente	27
Figura 5	– Escoamento da fumaça por convecção natural em incêndio	30
Figura 6	– Processo de formação da camada de fumaça e fluxo do ar na abertura	31
Figura 7	– Extração de fumaça por meio de ventilação natural	33
Figura 8	– Diferenciais de pressão causados pela ação do vento e da temperatura	34
Figura 9	– Extração de fumaça por meio de ventilação mecânica	36
Figura 10	– Ventilação pela ação do vento	38
Figura 11	– Ventilação por efeito chaminé (diferença de temperatura)	39
Figura 12	– Forças que atuam sobre uma partícula em queda no ar	41
Figura 13	– Vazão de ar através de uma abertura	41
Figura 14	– Representação gráfica do teorema de Bernoulli	43
Figura 15	– Efeito de Venturi em um tubo com formato de funil	44
Figura 16	– Escada enclausurada protegida com ventilação no corpo da escada	48
Figura 17	– Escada enclausurada protegida com ventilação no corredor	48
Figura 18	– Escada enclausurada à prova de fumaça	49
Figura 19	– Escada à prova de fumaça pressurizada	50
Figura 20	– Funcionamento do sistema de pressurização de escada	50
Figura 21	– Dutos de ventilação para saída de fumaça e para entrada de ar	53
Figura 22	– Escada protegida	54
Figura 23	– Escada enclausurada sem ventilação	56
Figura 24	– Escada enclausurada com ventilação através de janela	56
Figura 25	– Escada enclausurada com pressurização	57
Figura 26	– Escada enclausurada sem ventilação com antecâmara sem ventilação	57
Figura 27	– Escada enclausurada ventilação por janela e antecâmara sem ventilação	57
Figura 28	– Escada enclausurada sem ventilação e antecâmara com ventilação por duto ...	57
Figura 29	– Escada pressurizada e antecâmara com exaustão mecânica	57
Figura 30	– Planta baixa do edifício do Bloco C do Complexo Brasil 21	64
Figura 31	– Planta baixa do edifício Commerzbank Tower	65

Figura 32 – Planta baixa do prédio simulado com indicação da origem do incêndio	70
Figura 33 – Perfil de temperatura: a) sem exaustão, b) com exaustão mecânica	72

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Os edifícios mais altos de Santa Catarina	25
Quadro 2 – Vítimas fatais em incêndios nos EUA de 1979 à 1992	26
Quadro 3 – Coeficientes de vazão	42
Quadro 4 – Tipo de escada para edifício residencial privativo multifamiliar	53
Quadro 5 – Resumo das avaliações das escadas realizadas por Seito e Berto	48
Quadro 6 – Características das edificações com escadas pressurizadas	60
Quadro 7 – Resumo das avaliações das vistorias realizadas em escadas por Vieira	61
Quadro 8 – Resumo das avaliações das vistorias realizadas em escadas por Silva	68

LISTA DE SIGLAS

BS – British Standard

CBMSC – Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina

CTBUH – Council on Tall Buildings and Urban Habitat

FDS – Fire Dynamics Simulator

IN – Instrução Normativa

IT – Instrução Técnica

NIST – National Institute of Standards and Technology

SC – Santa Catarina

LISTA DE SÍMBOLOS

- A – área frontal da abertura, [m²]
A_e – área da abertura de entrada, [m²]
A_o – área equivalente das aberturas, [m²]
A_s – área da abertura de saída, [m²]
c_e – coeficiente de pressão da abertura de entrada de ar
c_s – coeficiente de pressão da abertura de saída de ar
D – diâmetro interno do duto
F_e – força de empuxo, [kgf]
g – aceleração da gravidade, [m/s²]
H – altura, [m]
h_f – perda de carga, [m]
K – coeficiente de vazão referido à área frontal da abertura
N – número de antecâmaras ventiladas pelo duto
n – número de mols existentes no volume V, [mol]
P – pressão absoluta do gás, [N/m²]
P – pressão estática do fluido, [N/m²]
Q – vazão de ar, [m³/s]
Q – vazão do fluido, [m³/s]
Q – vazão ou fluxo de ar por ação do vento, [m³/s]
R – constante universal dos gases, [8,314 N.m/(mol.K)]
Re – número de Reynolds, é adimensional
T – temperatura absoluta do gás, [K]
V – velocidade do fluido dentro do tubo, [m/s]
V – velocidade do fluido, [m/s]
V – volume do fluido deslocado pelo corpo imerso no fluido, [m³]
V – volume do gás, [m³]
Z – altura acima do plano horizontal de referência, [m]
γ – peso específico do fluido, [N/m³]
ΔP – diferencial de pressão através da abertura, [Pa]
ΔP_e – diferença de pressão através da abertura de entrada de ar, [Pa]
ΔP_s – diferença de pressão através da abertura de saída de ar, [Pa]

μ – viscosidade dinâmica do fluido

ρ – massa específica do fluido

ρ_{ar} – massa específica do ar, [kg/m³]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 JUSTIFICATIVA	14
1.2 OBJETIVOS	14
1.2.1 Objetivo geral	14
1.2.2 Objetivos específicos	15
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	15
1.4 METODOLOGIA DA PESQUISA	16
2 REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1 FOGO E INCÊNDIO	17
2.2 GESTÃO DOS RISCOS DE INCÊNDIO	17
2.2.1 Tempo necessário para evacuação em incêndios	19
2.2.2 Segurança contra incêndio	20
2.2.2.1 Manutenção dos sistemas de segurança contra incêndio	21
2.2.3 Simulação computacional de incêndios	21
2.3 INCÊNDIOS EM EDIFÍCIOS ALTOS	23
2.3.1 Edifícios altos em Santa Catarina	24
2.4 FUMAÇA	26
2.4.1 Mecanismo de produção da fumaça	27
2.4.2 Toxicidade da fumaça	27
2.4.3 Densidade ótica da fumaça	29
2.4.4 Efeitos da fumaça	29
2.4.5 Movimentação da fumaça no interior da edificação	29
2.4.5.1 O fenômeno de estratificação da fumaça	32
2.5 VENTILAÇÃO	32
2.5.1 Ventilação Natural	33
2.5.2 Ventilação Mecânica ou Forçada	36
2.6 PRINCÍPIOS DO MOVIMENTO DO AR	37
2.6.1 Ventilação pela ação do vento	37
2.6.2 Ventilação por efeito chaminé	39
2.6.3 Ventilação por efeito combinado (ação do vento e efeito chaminé)	40
2.6.4 Movimento de partículas no ar	40

2.6.5 Vazão de ar através de uma abertura	41
2.6.6 Movimento do ar em incêndios	42
2.6.7 Teorema de Bernoulli	43
2.6.7 Efeito Venturi	44
2.6.8 Regime de escoamento de fluídos	44
2.6.8.1 Regime de escoamento Laminar	45
2.6.8.2 Regime de escoamento turbulento	45
2.6.8.3 Camada limite	46
2.7 ESCADAS DE EMERGÊNCIA	46
2.7.1 Extração de fumaça nas saídas de emergência pela NBR 9077	46
2.7.1.1 Escada comum ou escada não enclausurada	47
2.7.1.2 Escada enclausurada protegida	47
2.7.1.3 Escada enclausurada à prova de fumaça	48
2.7.1.4 Escada à prova de fumaça pressurizada	49
2.7.1.5 Dutos de ventilação natural	51
2.7.2 Extração de fumaça nas saídas de emergência pela IN 009	52
2.7.2.1 Escada comum	53
2.7.2.2 Escada protegida	53
2.7.2.3 Escada enclausurada	54
2.7.2.4 Escada enclausurada à prova de fumaça	54
2.7.2.5 Escada pressurizada	55
3 ANÁLISE E RESULTADOS DE ESTUDO DE CASOS	56
3.1 FUMAÇA NO INCÊNDIO – ESCADAS DE SEGURANÇA	56
3.2 PRESSURIZAÇÃO DE ESCADAS	59
3.3 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL APLICADA À PREVENÇÃO DE INCÊNDIOS	61
3.4 A QUESTÃO DO ESCAPE EM EDIFÍCIOS ALTOS: A INFLUÊNCIA DA FUMAÇA DE INCÊNDIO NA PROTEÇÃO DA VIDA	63
3.5 RELATÓRIO DE ANÁLISE DAS ESCADAS PRESSURIZADAS E SEU EFETIVO FUNCIONAMENTO NO ESTADO DE SANTA CATARINA	67
3.6 CAPACIDADE DE EXAUSTÃO DE FUMAÇA EM DUTOS DE VENTILAÇÃO NATURAL DAS ESCADAS DE EMERGÊNCIA	69

3.7 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE INCÊNDIO EM EDIFICAÇÕES MULTIFAMILIARES COM ESCADA NÃO ENCLAUSURADA	71
4 CONCLUSÃO	74
REFERÊNCIAS	78

1 INTRODUÇÃO

Desde o início das civilizações, o elemento fogo, está presente na vida das pessoas, tanto no preparo de alimentos, como na transformação de materiais. Porém, o fogo, uma vez descontrolado, gera o incêndio, que no decurso da história já causou inúmeras tragédias, como as ocorridas nos edifícios Andraus e Joel na década de 70, com a perda de patrimônio e vidas.

Com o domínio do fogo e a fixação do homem na terra, também veio a formação das cidades, impondo a construção de habitações, com o emprego dos materiais disponíveis para as primeiras construções, como pedra e madeira.

Desde então, a construção civil nunca mais parou de crescer, com as cidades cada vez maiores e com menos espaços para as edificações, forçando a verticalização dos prédios, aumentando os riscos das construções para as pessoas, principalmente em situação de incêndio.

Nos últimos anos a construção civil no estado de Santa Catarina deu um salto em termos de verticalização dos prédios, e atualmente, 9 dos 10 edifícios mais altos do Brasil estão na cidade de Balneário Camboriú, no litoral norte do estado.

A cidade de Balneário Camboriú já tem construído ou em fase de construção 25 edifícios residências privativo multifamiliar com altura superior a 150 m; e está previsto para ser inaugurado em 2019 o edifício mais alto do país, o Yachthouse Residence Club com 2 torres de 277 m de altura e 80 pavimentos cada.

Em qualquer edificação, uma rota de fuga segura é fundamental para a evacuação de pessoas e para as operações de resgate e combate a incêndios pelo Corpo de Bombeiros. Nos edifícios altos, a propagação do incêndio e da fumaça ganha velocidade com a verticalização das construções, e o tempo de evacuação aumenta com a elevação da altura da edificação.

Em todos os incêndios a principal causa de morte das pessoas é a fumaça, e não as temperaturas elevadas ou as chamas, como algumas pessoas pensam, esta é a razão da importância de se gerenciar os riscos da propagação da fumaça entre pavimentos, as condições de estanqueidade das escadas de emergência e a forma como ocorre a extração da fumaça nas escadas de emergência, entre outros riscos envolvidos num incêndio.

Durante o processo de revisão nas normas de segurança contra incêndio e pânico, do Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina, se constatou no estudo da arte, que falta uma compreensão melhor da influência da altura das edificações altas, no processo de extração da fumaça de dentro das escadas de emergência em situação de incêndio, e os efeitos que isto provoca na gestão dos riscos gerados num incêndio, para a segurança das pessoas caso seja necessário a fuga de prédios altos, como os que estão sendo construídas em Santa Catarina.

Neste contexto, o problema que motiva esta pesquisa é:

O desempenho da extração de fumaça nas escadas de emergência é satisfatório na gestão dos riscos durante os incêndios em edifícios altos?

1.1 JUSTIFICATIVA

Com a promulgação da Lei Estadual nº 16.157, de 07 de novembro de 2013, que dispõe sobre as normas e os requisitos mínimos para a prevenção e segurança contra incêndio e pânico no estado de Santa Catarina, o Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina passou a ter a responsabilidade de instituir as Instruções Normativas que especificam os requisitos para os sistemas de segurança contra incêndio e pânico das edificações.

A fumaça é a principal causa de morte nos incêndios, as saídas de emergências das edificações verticalizadas, mais especificamente, as escadas de emergência, necessitam ter uma característica essencial: manter o isolamento ao calor, chamas e fumaça. Porém, durante o incêndio, as pessoas ao entrarem na escada de emergência, acabam por permitir que a fumaça também adentre a escada, comprometendo a segurança desta rota de fuga. Sendo necessária uma ventilação adequada, para que ocorra a extração da fumaça das escadas de emergência, a fim de proporcionar uma evacuação segura para as pessoas.

Nos últimos anos o estado de Santa Catarina vem se destacando na construção civil, por ter na cidade de Balneário Camboriú 25 dos edifícios mais altos do país ultrapassando a barreira dos 150 m de altura, e já alcançando a marca dos 277 m de altura.

Desta forma, o Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina (CBMSC) tem interesse em aperfeiçoar o modelo das escadas de emergência, através do estudo do desempenho da extração de fumaça nas escadas de emergência, principalmente para edifícios altos, onde o tempo e a complexidade para a evacuação das pessoas, para as operações de combate ao incêndio e resgate das vítimas também aumenta, com a verticalização cada vez maior das edificações.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo geral

Analisar o desempenho da extração de fumaça nas escadas de emergência na gestão dos riscos durante os incêndios em edifícios altos.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Fazer um levantamento da altura a que está chegando a construção dos edifícios mais altos no estado de Santa Catarina;
- b) Fazer uma revisão bibliográfica para compreender os princípios da ventilação e do movimento dos gases durante o incêndio em edificações verticalizadas;
- c) Fazer uma revisão bibliográfica da gestão dos riscos do incêndio, envolvendo a extração de fumaça nos diferentes tipos de escadas de emergência previstos em normas;
- d) Fazer uma análise de estudos de caso disponível na literatura que envolvam o desempenho da extração de fumaça nas escadas de emergência na gestão dos riscos durante os incêndios em edifícios altos.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho está estruturado em 4 capítulos.

O capítulo 1 faz uma introdução ao tema proposto da análise do desempenho da extração de fumaça nas escadas de emergência na gestão dos riscos durante os incêndios em edifícios altos, demonstrando a relevância do estudo do tema.

O capítulo 2 apresenta uma revisão teórica, com base na literatura disponível dos últimos 30 anos, desde o conceito de fogo, gestão dos riscos de incêndio levantamento de edifícios altos no estado de Santa Catarina (SC), compreensão da fumaça e seus efeitos, ventilação natural e ventilação forçada, definição dos princípios do movimento do ar e da fumaça, e tipos de escadas de emergência previstos em norma pela ABNT e pelo Corpo de Bombeiros Militar de SC.

O capítulo 3 descreve a análise e os resultados de 7 estudos de casos realizados por outros pesquisadores que envolvem no todo ou em parte o tema objeto deste trabalho. O estudo de casos foi a forma adotada neste trabalho, para analisar o desempenho da extração de fumaça nas escadas de emergência em prédios altos, com base no estudo da arte, para a gestão dos riscos durante o incêndio.

No capítulo 4 são feitas as conclusões do trabalho e apresentado as considerações que possam colaborar para a realização de novas pesquisas na área de segurança contra incêndio das edificações verticalizadas.

1.4 METODOLOGIA DA PESQUISA

Para analisar o desempenho da extração de fumaça nas escadas de emergência na gestão dos riscos durante os incêndios em edifícios altos, adotou-se uma lógica de pesquisa dedutiva, partindo do geral para o específico (GIL, 2002).

A abordagem do problema de pesquisa adotado neste trabalho foi a qualitativa, que almeja o entendimento das singularidades de um determinado assunto através de um conjunto de técnicas a ser utilizadas para a construção do conhecimento (MINAYO, 2003).

Na análise do problema, a coleta dos dados foi realizada por meio de uma pesquisa teórica e bibliográfica, através do exame documental de dissertações, teses, publicações, periódicos, normas técnicas, legislações e outras fontes que já se encontram disponíveis em trabalhos realizados (HEERDT, 2006).

O universo da pesquisa limitou-se a estudos de casos realizados por outros pesquisadores, que contemplassem o desempenho da extração de fumaça nas escadas de emergência durante o incêndio em edifícios altos no Brasil (GIL, 2002).

Na pesquisa, a análise dos dados foi realizada de forma intuitiva e indutiva, sem o uso de estatísticas para a avaliação dos resultados (GODOY, 1995).

2 REVISÃO TEÓRICA

2.1. FOGO E INCÊNDIO

O fogo pode ser definido como um fenômeno físico-químico, decorrente de um processo de combustão (reação de oxidação) com emissão de calor, luz, chama e fumaça. Para que ocorra o fogo são necessários quatro componentes: combustível, comburente (oxigênio), calor e reação em cadeia. A extinção do fogo ocorre pela retirada de um destes componentes da reação (SEITO, 1988; NBR 13860, 1997).

A NBR 13860 (1997) e Seito (1988) definem o incêndio como sendo o fogo fora do controle ou indesejável, independentemente da sua dimensão.

O combustível sólido ao ser exposto ao calor sofre um processo de decomposição térmica (pirólise), e no combustível líquido esta exposição ao calor provoca o processo de evaporação, em ambos os casos são emitidos gases e vapores, que ao se misturar com o oxigênio do ar, forma uma mistura inflamável ou explosiva. Esta mistura na presença de uma fonte de energia de ativação (faísca, centelha, chama, etc.) se inflama. Quando o combustível já é gasoso, basta que o gás ou o vapor combustível se misture com o oxigênio do ar, formando a mistura inflamável ou explosiva, que na presença de uma fonte de ignição se inflama (SEITO, 2008).

2.2 GESTÃO DOS RISCOS DE INCÊNDIO

Araújo (2010, p. 22), define o perigo como uma “circunstância potencialmente capaz de acarretar algum tipo de perda, dano ou prejuízo ambiental, material ou humano”; e a definição de risco como sendo a “representação da probabilidade de possíveis danos dentro de um período específico de tempo ou ciclos advindos da consumação de um perigo, com provável consequência”.

Para Duarte et al. (2008, p. 380), o risco “é uma combinação da magnitude de consequências indesejáveis e da probabilidade dessas consequências ocorrerem”, sendo que estas consequências podem ser para as pessoas, para o meio ambiente ou socioeconômicas.

O Superior Tribunal Federal, Brasil (2016), explica o que significa a gestão de riscos para o tribunal:

A gestão de riscos consiste no processo de identificar, avaliar e administrar eventos diante de incertezas críticas. As incertezas emanam da incapacidade de determinar com precisão a probabilidade da ocorrência de determinado evento e os impactos a

ele associados. A gestão de riscos é um processo contínuo, que consiste no desenvolvimento de um conjunto de ações destinadas a identificar, analisar, avaliar, priorizar, tratar e monitorar riscos positivos ou negativos capazes de afetar os objetivos, programas, projetos ou processos de trabalho do Tribunal nos níveis estratégico, tático e operacional (BRASIL, 2016, p. 9).

Para a Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil, do Ministério da Integração Nacional, Brasil (2017, p. 22), “a gestão de risco de desastre compreende o planejamento, a coordenação e a execução de ações e medidas preventivas destinadas a reduzir os riscos de desastres e evitar a instalação de novos riscos”.

O Ministério da Transparência e Controladoria-Geral da União, Brasil (2018) define a gestão de riscos e o gerenciamento de risco, como:

Gestão de riscos: arquitetura (princípios, objetivos, estrutura, competências e processo) necessária para se gerenciar riscos eficazmente.
Gerenciamento de risco: processo para identificar, avaliar, administrar e controlar potenciais eventos ou situações e fornecer segurança razoável no alcance dos objetivos organizacionais (BRASIL, 2018, p. 8).

Duarte et al. (2008), explica que os objetivos do gerenciamento dos riscos de incêndio incluem identificar a sensibilidade das pessoas, instalações e processos frente ao incêndio, bem como determinar o tempo necessário para as ações de emergência; sendo que o gerenciamento dos riscos de incêndios é baseado nas seguintes etapas:

- descrição do funcionamento das instalações e processos;
- identificação dos perigos, pois não é possível mitigar um perigo que não é conhecido;
- identificação dos eventos (falhas) com potencial de degradar as barreiras de proteção;
- visualização dos cenários de possíveis danos as instalações e processos; e
- caracterização dos riscos, ou seja, quantificar as consequências de um incêndio para as pessoas, para a propriedade e meio ambiente.

Segundo Carlo (2008), a análise de risco de incêndio envolve os seguintes fatores:

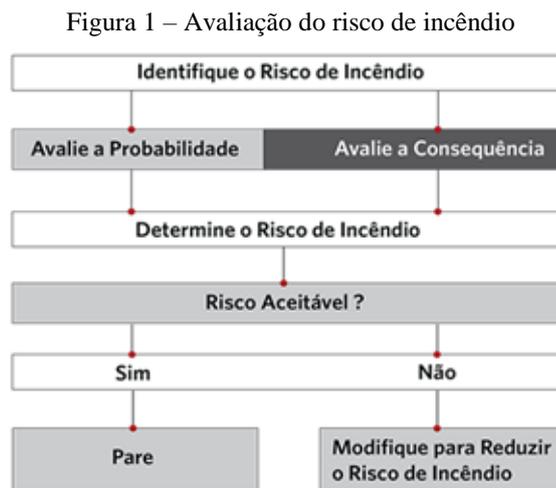
- a possibilidade da ocorrência do incêndio;
- a análise de locais de risco específicos;
- o cálculo da carga de incêndio;
- a velocidade de propagação do incêndio;
- a avaliação de perdas humanas, materiais, operacionais, institucionais, etc.; e
- a probabilidade do incêndio passar de uma edificação para outra.

Segundo Braga e Campos (2010, p. 5), o tempo de fuga (evacuação) das pessoas em situação de incêndio “é o tempo necessário para que os ocupantes de uma edificação atinjam

um local seguro”. Para que ocorra uma fuga ou escape seguro, “esse tempo deve ser menor do que o tempo que o incêndio leva para criar condições insustentáveis para a vida humana no ambiente considerado”. O tempo de fuga vai deste o instante em que ocorre o início da ignição do incêndio, passando pela detecção do incêndio e acionamento do alarme de incêndio, até a percepção do alarme pelas pessoas (população da edificação) e a sua passagem (abandono) pelas saídas.

Moncada (2018), na área da segurança contra incêndio, define o perigo de incêndio como sendo uma condição com potencial de causar danos às pessoas, propriedade ou meio ambiente; enquanto o risco de incêndio é a conjunção de probabilidades e consequências que resultem num incêndio que cause danos às pessoas, propriedade ou meio ambiente.

Moncada (2018), explica que a avaliação do risco de incêndio, pode ser resumido conforme mostra o fluxograma da Figura 1.



Fonte: Moncada (2018).

2.2.1 Tempo necessário para evacuação em incêndios

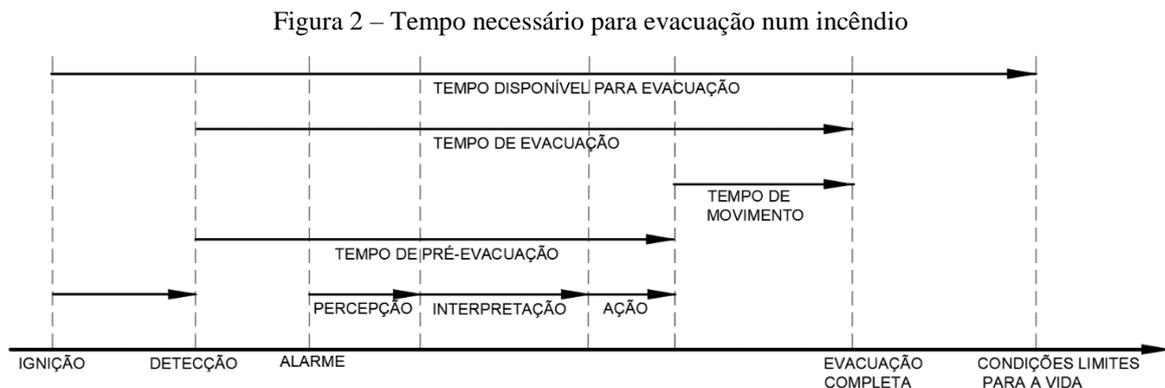
O comportamento humano no incêndio depende de várias características do indivíduo. Estas características são compostas por fatores fisiológicos, limitações físicas, limitações de compreensão cognitiva e conhecimento do ambiente físico. Cada uma destas características afeta a capacidade do indivíduo de reconhecer e avaliar com precisão os riscos apresentados por um incêndio ou a capacidade do indivíduo de responder adequadamente a esses perigos (NFPA 921, 2011).

Na gestão dos riscos durante um incêndio, o tempo necessário para a evacuação das pessoas é um fator essencial. As pessoas precisam de um tempo de fuga suficiente para alcançar

uma saída segura, levando-se em consideração que a fumaça é a principal causa de morte nos incêndios. Logo, as saídas de emergência devem ser projetadas de forma adequada, proporcionando uma rota de fuga livre da fumaça, a fim de que o tempo necessário para a evacuação seja menor que o tempo que o incêndio leva para tornar insustentável as condições à vida. (MONTEGREGRO, 2016).

O tempo disponível para a evacuação segura das pessoas num incêndio depende fundamentalmente da geração de fumaça, das propriedades da fumaça e da existência de um sistema de controle da fumaça (GOUVEIA; ETRUSCO, 2002).

De acordo com o Handbook of Fire Protection Engineering (SPFE e NFPA, 2002), o tempo necessário para a fuga das pessoas é a soma do tempo que vai desde o início da detecção do incêndio até a evacuação completa da edificação, conforme mostra a Figura 2.



Fonte: Adaptado de Handbook of Fire Protection Engineering (SPFE e NFPA, 2002, p. 3-347).

2.2.2 Segurança contra incêndio

Segundo Seito (1988, p. 373), “o objetivo básico da segurança contra incêndio é a proteção da vida humana e do patrimônio”.

A proteção contra incêndio são sistemas e medidas tomadas para evitar que o incêndio ocorra, ou se ocorrer o incêndio para evitar a sua propagação e mitigar os efeitos do incêndio na edificação e em seus ocupantes. As medidas para salvamento das pessoas se resumem no dimensionamento correto das rotas de fuga horizontais e verticais da edificação, no controle do movimento de fumaça dentro da edificação, no sistema de alarme e no treinamento para abandono do local (SEITO, 1988).

2.2.2.1 Manutenção dos sistemas de segurança contra incêndio

Os sistemas de segurança contra incêndio e pânico nas edificações são fundamentais para evitar que o incêndio ocorra, e caso venha a ocorrer, possam reduzir o número de vítimas, os danos materiais e os impactos no meio ambiente, logo, precisam ter um funcionamento confiável. A falta de manutenção destes sistemas pode levar a sua falha ou pane, ficando a edificação exposta à ocorrência de sinistros. Os sistemas de segurança contra incêndios e pânico são constituídos de equipamentos e dispositivos físicos, mecânicos, elétricos, eletrônicos, entre outros, que por serem utilizados com baixa frequência, dificulta a identificação das falhas de manutenção, sendo necessário um programa de manutenção preventiva, não bastando apenas a manutenção corretiva dos sistemas, dispositivos ou equipamentos (LINZMAYER; SILVA; ATIK, 2008);

A NBR 5462 (1994, p. 6) define a manutenção como a “combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, destinadas a manter ou recolocar um item em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida”.

A manutenção preventiva pode ser definida como a “manutenção efetuada em intervalos predeterminados, ou de acordo com critérios prescritos, destinada a reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do funcionamento de um item” (NBR 5462, 1994, p. 7).

A manutenção corretiva pode ser definida como a “manutenção efetuada após a ocorrência de uma pane destinada a recolocar um item em condições de executar uma função requerida” (NBR 5462, 1994, p. 7).

A NBR 5462 (1994, p. 3) define a falha como sendo o “término da capacidade de um item desempenhar a função requerida”, sendo que “a falha é um evento”, diferentemente da “pane que é um estado”.

2.2.3 Simulação computacional de incêndios

A simulação computacional de incêndios é uma ferramenta poderosa usada para simular situações de incêndios reais que possam ocorrer numa edificação, durante a fase de projetos, antes mesmo da construção da edificação, o que permite a correção de possíveis falhas no projeto de segurança contra incêndio da edificação; ou após a construção da edificação, o que permite uma adequação das instalações para melhoria dos sistemas de segurança contra incêndio da edificação. O custo da simulação em computador de incêndios é muito baixo

quando comparado com o custo dos ensaios e testes de incêndio em edificações inteiras, a fim de entender o comportamento do incêndio (TABACZENSKI et al., 2017).

Segundo Costa e Silva (2006), o incêndio é um fenômeno que depende de inúmeras variáveis, tornando cada evento único, com características próprias, e difícil de ser analisado.

Para Tabaczinski et al. (2017) o estudo de um incêndio em uma edificação envolve a análise de várias situações:

- desenvolvimento do incêndio propriamente dito;
- propagação do incêndio;
- influência de sprinklers e outros sistemas de proteção ativa;
- influência da compartimentação e outros sistemas de proteção passiva;
- produção e propagação da fumaça;
- a influência de layouts na contenção dos incêndios;
- efeitos da ventilação na extração da fumaça e no desenvolvimento do incêndio;
- eficiência das saídas de emergência na evacuação das pessoas;
- reação ao fogo dos materiais de acabamento e revestimento;
- resistência ao fogo dos elementos construtivos e da estrutura da edificação;
- entre outras situações.

Os riscos e o custo elevado das instalações e equipamentos necessários para realizar os ensaios na avaliação do comportamento de incêndios em edifícios, fazem com que este tipo de pesquisa seja reduzido no mundo. Por esta razão o uso da simulação em computador de incêndios é uma solução viável e cada vez mais corrente em pesquisas na área de segurança contra incêndios (RUSCHEL, 2011; TABACZENSKI et al., 2017).

Existem alguns softwares para a simulação de incêndios, um dos mais utilizados pelos pesquisadores é o Fire Dynamics Simulator (FDS), desenvolvido pelo National Institute of Standards and Technology (NIST) nos Estados Unidos da América, que permite representar o comportamento do incêndio, e fazer a análise de alguns parâmetros como temperatura, movimento da fumaça, transporte de calor e concentração de oxigênio no ambiente. As simulações envolvem cálculos matemáticos complexos, que dependendo das configurações do usuário, podem levar alguns dias em processamento para simular poucos minutos de um incêndio. Associados ao FDS são usados os softwares Smokeview que é uma interface de visualização do desenvolvimento do incêndio, o Evacuation para avaliar o comportamento das pessoas na evacuação durante o incêndio, o Pyrosim para a modelagem gráfica da edificação. (RUSCHEL, 2011).

2.3 INCÊNDIOS EM EDIFÍCIOS ALTOS

A altura dos edifícios altos agrava a problemática dos incêndios, tornando complexa as operações de combate ao fogo e de salvamento das vítimas pelo Corpo de Bombeiros, pois a propagação do incêndio e da fumaça continua a mesma, além de dificultar ainda mais a evacuação das pessoas destas edificações, constituindo-se num grande desafio de projeto para arquitetos e engenheiros.

Dois incêndios emblemáticos ocorridos em edifícios altos no Brasil, que foram um divisor de águas para a segurança contra incêndio, foram os incêndios no Edifício Andraus em 1972 e no Edifício Joelma em 1974, ambos na cidade de São Paulo e de grande repercussão pública na época. O Edifício Andraus tinha 115 m de altura com 31 pavimentos de escritórios e salas comerciais, a escada interna era aberta, não sendo adequada para a evacuação das pessoas, no incêndio morreram 16 pessoas e outras 352 ficaram feridas; durante o incêndio aproximadamente 360 pessoas foram salvas por helicóptero através do heliporto na cobertura. O Edifício Joelma tinha 25 pavimentos de escritórios e garagens, a escada interna era aberta também, não era adequada para a evacuação das pessoas, e no incêndio morreram 179 pessoas e outras 320 ficaram feridas; durante o incêndio aproximadamente 80 pessoas foram salvas por helicóptero mesmo sem ter um heliporto na cobertura. (NEGRISOLO; GILL; OLIVEIRA, 2008; SÃO PAULO, 2011;)

Segundo Ono, Valentin e Venezia (2008, p. 130), para efeito de segurança contra incêndio, os edifícios altos são definidos como “aqueles em que o pavimento mais elevado (último andar) excede a capacidade de alcance dos equipamentos e veículos para operações de combate ao fogo e salvamento estacionados no piso de descarga (térreo)”.

Os edifícios altos mais modernos usam sistemas de climatização interna mecanizado, que geralmente impede a abertura de janelas, o que pode ocasionar sérios problemas para o escape da fumaça em situação de incêndio (ONO; VALENTIN; VENEZIA, 2008).

Devido ao efeito chaminé, nos edifícios altos a propagação da fumaça e gases quentes pode se dar por convecção para os demais pavimentos através das aberturas verticais internas do edifício como escadas, dutos de serviço (shafts) e poço de elevador; sendo necessário a compartimentação entre pavimentos, selagem dos dutos e o uso de portas corta fogo nas escadas e elevadores (ONO; VALENTIN; VENEZIA, 2008).

A NBR 9077 (2001, p. 27), conceitua a altura da edificação como sendo as “alturas contadas da soleira de entrada ao piso do último pavimento, não consideradas edículas no ático destinadas a casas de máquinas e terraços descobertos”.

A NBR 9077 (2001, p. 27), classifica como edificações altas, as com altura $H > 30$ m, ou as “edificações dotadas de pavimentos recuados em relação aos pavimentos inferiores, de tal forma que as escadas dos bombeiros não possam atingi-las, ou situadas em locais onde é impossível o acesso de viaturas de bombeiros, desde que sua altura seja $H > 12,00$ m”.

De acordo com Tecmundo (2014), Antell, Everson e Vanney (2018), no edifício mais alto do mundo, o arranha-céus Burj Khalifa Bin Zayid em Dubai, nos Emirados Árabes Unidos, com uma altura de 828 m e 160 andares, inaugurado em 2010, numa situação de incêndio, os ocupantes próximos do fogo são dirigidos para as escadas até a área de refúgio que estão separadas do resto do edifício por uma construção com resistência ao fogo de 2 horas e são pressurizados de forma a minimizar a migração de fumaça para o interior do compartimento. Ao evacuar o edifício pelas escadas, existem andares especiais a cada 25 pisos, que servem de refúgio para descanso ou mesmo para esperar socorro. Esses andares estão presentes na maior parte dos grandes arranha-céus e são pressurizados, completamente à prova de fogo e climatizados, prontos para abrigar quem estiver precisando descansar.

No Burj Khalifa Bin Zayid em Dubai, para auxiliar a evacuação dos ocupantes, elevadores específicos apresentam um modo de evacuação, que permite aos bombeiros ou ao pessoal treinado de transportar ocupantes desde porções superiores da torre até níveis de descarga designados. Os elevadores designados dispõem de uma capacidade de operação plena com alimentação primária ou de emergência, equipamento resistente à água, e soleiras das portas elevadas em cada piso para minimizar a entrada do fluxo de água dos sprinklers nos poços. O edifício possui um plano e uma equipe de gestão de resposta às crises de evacuação, desde situações simples, até as mais complexas, envolvendo diversos grupos de pessoas que ocupam o prédio (TECMUNDO, 2014; ANTELL; EVERSON; VANNEY, 2018).

2.3.1 Edifícios altos em Santa Catarina

Em reportagem veiculada em fevereiro de 2017, no jornal Diário Catarinense (SPAUTZ, 2017), sob o título “Terra de Gigantes”, a cidade de Balneário Camboriú, em Santa Catarina levou destaque ao liderar 9 das 10 primeiras posições de edifícios mais altos do país, lista do The Skyscraper Center, produzida pela organização não governamental Council on Tall Buildings and Urban Habitat (CTBUH).

O Quadro 1 mostra os 25 edifícios mais altas, já construídos ou em fase de construção no estado de Santa Catarina, com altura superior a 150 m, todos localizados na cidade de Balneário Camboriú.

Quadro 1 – Os edifícios mais altos de Santa Catarina

Nome do edifício	Ano de conclusão	Altura (m)	Nº de andares
Yachthouse Residence Club Torre 1 e Torre 2	2019 (previsto)	277	80
One Tower	2022 (previsto)	263	70
The Tower	-	255	69
Infinity Coast Tower	2019 (previsto)	237	66
Boreal Tower	2021 (previsto)	220	55
Epic Tower	2019 (previsto)	209	55
Vitra Residence	-	208,5	62
Phoenix Tower	2020 (previsto)	215	48
Sky Tower	2020 (previsto)	210	45
Millennium Palace	2014	177,3	46
Splendido	2019 (previsto)	176	50
Splendia Tower	-	175	43
Alameda Jardins Residence	2015	174	45
Falcon Tower	-	168	40
Império das ondas	2016	165	51
Edifício Pharos	2020 (previsto)	160,7	46
Vison Tower	2017	160	38
Villa Serrana Home Club Torre A e Torre B	2012	159,3	49
Olympo Tower	2019 (previsto)	157	44
Magnifique Tower	2022 (previsto)	154,8	44
Ocean Palace	2012	152,8	42
Serendipity Village	2020 (previsto)	152	45
H. Pio Infinity	2021 (previsto)	152	41
Eleganza Tower	2021 (previsto)	151,3	43
Ibiza Tower – Torre Central	2015	150	43

Fonte: Elaborado pelo autor, adaptado de Spautz, 2017; Wikipédia, 2018; The Skyscraper Center, 2018.

A Figura 3 ilustra a quantidade e o tamanho dos edifícios altos na cidade de Balneário Camboriú, no litoral norte do estado de SC.

Figura 3 – Edifícios altos na cidade de Balneário Camboriú



Fonte: Spautz, 2017.

2.4 FUMAÇA

Nos incêndios em edificações, a fumaça produzida na combustão dos materiais utilizados nos ambientes é tóxica e asfíxiante, sendo a responsável pela maioria das vítimas fatais do sinistro, e não queimadas pelo fogo. Com o desenvolvimento dos materiais sintéticos, e o seu uso crescente nas edificações, aumentou a quantidade de produtos tóxicos prejudiciais para as pessoas durante o incêndio. Logo, além da propagação das chamas e da sua severidade, o desenvolvimento da fumaça é um problema nos incêndios, uma vez que a fumaça é a responsável por mais de 80% das vítimas fatais em incêndios (SEITO, 1988).

Para Toloni e Vieira (2003, p. 149), a fumaça “é uma mistura formada por partículas suspensas no ar, gases e vapores resultantes de combustão incompleta de materiais”.

Segundo Seito e Berto (1988), a fumaça pode ser definida como uma mistura complexa e tóxica de partículas sólidas em suspensão, vapores e gases, desenvolvida quando um material sofre o processo de pirólise (decomposição por efeito do calor) ou combustão.

A fumaça possui 6 características: é opaca (baixa visibilidade), tóxica (prejudica a respiração), móvel (pode atingir diferentes ambientes e propagar o incêndio), quente (atinge elevadas temperaturas), inflamável (possui subprodutos da combustão que podem queimar) e pode causar pânico nas pessoas (ALVES, 2010).

O Quadro 2 mostra o número de vítimas fatais por inalação de fumaça e por queimaduras nos Estados Unidos da América (EUA), entre os anos de 1979 e 1992 (HALL JR, 1996; apud in MITIDIARI, 2008).

Quadro 2 – Vítimas fatais em incêndios nos EUA de 1979 à 1992

Ano	Vítimas fatais			
	Total	Inalação de fumaça	Queimadura	Outros
1979	5.998	3.515 (58,6%)	2.262 (37,7%)	221 (3,7%)
1980	5.822	3.515 (60,4%)	2.079 (35,7%)	228 (3,9%)
1981	5.697	3.501 (61,5 %)	2.048 (35,9%)	148 (2,6%)
1982	5.210	3.396 (65,2%)	1.683 (32,3%)	130 (2,5%)
1983	5.039	3.245 (64,4%)	1.654 (32,8%)	140 (2,8%)
1984	5.022	3.277 (65,3%)	1.625 (32,4%)	121 (2,4%)
1985	4.952	3.311 (66,9%)	1.498 (30,3%)	143 (2,9%)
1986	4.835	3.328 (68,8%)	1.415 (29,3%)	92 (1,9%)
1987	4.710	3.307 (70,2%)	1.301 (27,6%)	102 (2,2%)
1988	4.965	3.480 (70,1%)	1.378 (27,8%)	106 (2,1%)
1989	4.723	3.308 (70,0%)	1.311 (27,8%)	103 (2,2%)
1990	4.181	2.986 (71,4%)	1.138 (27,2%)	57 (1,4%)
1991	4.126	2.977 (72,2%)	1.078 (26,1%)	70 (1,7%)
1992	3.966	2.866 (72,3%)	995 (25,1%)	105 (2,6%)

Fonte: NFPA Journal (1996, p. 92) apud in MITIDIARI (2008, p. 66).

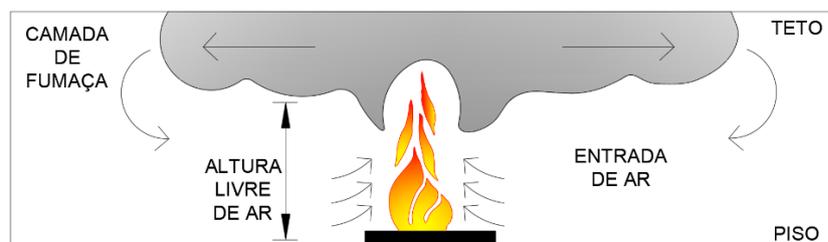
No Quadro 2, a diminuição no número total de vítimas fatais em incêndios nos EUA de 1979 a 1992, deve-se aos avanços na área de segurança contra incêndio, com a implementação de normas e de legislações pertinentes. Já o aumento do número de vítimas fatais por inalação de fumaça, ao longo dos anos, é decorrente do aumento do uso dos materiais de acabamento e de revestimento sintéticos no interior das edificações (MITIDIERI, 2008).

2.4.1 Mecanismo de produção da fumaça

Kato, Fichmann e Guaraldo (1988) explicam como ocorre o mecanismo de produção da fumaça num incêndio, ilustrado na Figura 4:

A queima de materiais sólidos libera vapores voláteis combustíveis que, ignizados, produzem chamas e gases quentes, cuja diferença em relação à densidade do ar iniciará um movimento ascendente característico. Como resultado, o ar adjacente entra no processo, sendo que parte alimentará a combustão e parte se aquecerá, misturando-se com os gases quentes. Como a temperatura nessa camada gás-ar não é alta e a mistura não é homogênea, a combustão desses gases será incompleta e a dispersão das partículas sólidas produzirá a fuligem da fumaça. A fumaça é, portanto, a mistura desses três elementos: vapores, gases e fuligem (KATO, FICHMANN E GUARALDO, 1988, p. 395).

Figura 4 – Mecanismo de produção de fumaça num ambiente



Fonte: Adaptado de Kato, Fichmann e Guaraldo (1988, p. 395).

2.4.2 Toxicidade da fumaça

Durante um incêndio as pessoas acabam por inalar os subprodutos da combustão, incluindo os gases tóxicos presentes na fumaça. Além disso, o desenvolvimento e a progressão do incêndio, bem como a presença desses outros gases, geralmente resulta em uma diminuição do oxigênio presente no ar ambiente. A inalação de gases tóxicos, ou baixos níveis de concentração de oxigênio (aproximadamente abaixo de 15%), podem afetar o comportamento de um indivíduo e resultar em percepção distorcida e mudanças comportamentais. Estas

alterações podem manifestar-se em respostas atrasadas ou inadequadas ao incêndio. A força, a resistência, a acuidade mental e capacidade de percepção podem ser severamente diminuídas (NFPA 921, 2011).

Segundo Seito e Berto (1988) e Seito (2008) a composição química da fumaça é muito complexa e variável, podendo ter até 200 substâncias diferentes. A toxicidade da fumaça depende dos tipos de matérias combustíveis disponíveis no incêndio. Alguns produtos tóxicos normalmente presentes na fumaça são:

- monóxido de carbono (CO), produzido em grande quantidade nos incêndios pela combustão de todos os materiais orgânicos, ao ser inalado causa a asfixia pela sua combinação com a hemoglobina que reduz o fornecimento de oxigênio para as células do corpo humano;

- gás carbônico (CO₂), também presente em grande quantidade nos incêndios, estimula a respiração e com isso aumenta a inalação de gases tóxicos, sendo que a exposição por mais de 30 minutos com concentração acima de 70 mil ppm causa a inconsciência;

- gás cianídrico ou cianureto de hidrogênio (HCN), produzido pela combustão de materiais compostos por nitrogênio (por exemplo, náilon, seda, poliuretano, etc.), exerce uma ação inibidora da oxigenação nas células do corpo humano;

- gás clorídrico (HCl), produzido pela combustão de materiais compostos por cloro (por exemplo o PVC), quando inalado causa asfixia, podendo levar a morte;

- óxidos de nitrogênio (NO_x), produzido pela combustão de nitrato de celulose e nitratos inorgânicos, é muito tóxico quando inalado, causa irritação nas membranas mucosas e lesão no aparelho respiratório;

- amônia (NH₂), produzida pela combustão de nitrogenado e presente em sistemas de refrigeração, causa irritação e pode levar a morte em poucos minutos;

- gás sulfídrico (H₂S), produzido pela combustão de materiais compostos por enxofre, danifica o sistema nervoso e paralisa o sistema respiratório, pode levar a morte.

2.4.3 Densidade ótica da fumaça

Segundo Seito (1988), Kato, Fichmann e Guaraldo (1988) a densidade ótica da fumaça, ou seja, a redução da luz que atravessa a fumaça, reduz a visibilidade e conseqüentemente diminui a mobilidade das pessoas, dificultando que elas saiam do incêndio. A densidade ótica da fumaça depende de vários fatores:

- da própria fumaça (composição, concentração, tamanho e distribuição das partículas);

- do ambiente (natureza, intensidade e cor da iluminação, e da posição do objeto que está sendo observado);

- do comportamento humano (estado físico e mental do observador).

Segundo Seito (2008, p. 49) a densidade ótica da fumaça pode ser medida “pela redução da intensidade do feixe de luz que passa através da atmosfera enfumaçada, a qual pode ser relatada subjetivamente como redução da visibilidade”.

2.4.4 Efeitos da fumaça

Segundo Seito (1988) e a Instrução Técnica nº 02 do Corpo de Bombeiros Militar do Estado de São Paulo (São Paulo, 2011), os efeitos da fumaça sobre as pessoas durante o incêndio são:

- redução da visibilidade, que impede a fuga dos ocupantes da edificação;
- irritação, lacrimejamento dos olhos, vômito e tosse, gerando desespero;
- modificação da atividade orgânica, devido a aceleração dos batimentos cardíacos;
- medo e pânico, causando desorientação e redução na capacidade de raciocínio;
- desmaios;
- intoxicação e asfixia, podendo causar a morte em caso de exposição prolongada.

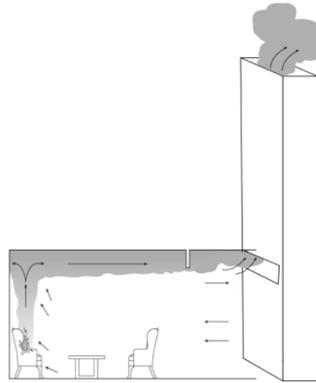
Os bombeiros durante as ações de combate ao incêndio e de resgate das vítimas, mesmo com o uso de equipamentos de proteção respiratório, ainda estão sujeitos aos efeitos da fumaça, que reduz a visibilidade do local do sinistro, dificultando a ação, podendo inclusive se tornar uma vítima fatal da fumaça tóxica (KATO; FICHMANN; GUARALDO, 1988).

2.4.5 Movimentação da fumaça no interior da edificação

A Compreensão dos mecanismos de movimentação da fumaça dentro das edificações, em situação de incêndio, pode permitir o controle deste fluxo de fumaça e assim impedir o contato das pessoas com a fumaça, proporcionando rotas de fugas horizontais e verticais segura para a evacuação das pessoas. A Figura 5 ilustra o escoamento da fumaça por convecção natural num incêndio no interior da edificação.

Uma forma de controlar a propagação do calor, das chamas e da fumaça dentro das edificações é através da compartimentação, que é definido como a separação ou enclausuramento de um ou mais ambientes do restante da edificação por meio de paredes e portas corta-fogo (ABNT/NBR 9077, 2001).

Figura 5 – Escoamento da fumaça por convecção natural em incêndio



Fonte: Campos (2015, p. 3).

A lei dos gases ideais expressa na equação (1), diz que para um gás ideal confinado, se a pressão é mantida constante, então o volume do gás irá aumentar de forma diretamente proporcional ao aumento da temperatura; logo, se o gás não estiver confinado, ao se expandir terá sua densidade diminuída. Num incêndio, as altas temperaturas geradas formam fluxos de grande força de flutuação, movidas pela diferença de densidade entre os gases quentes e o ar ambiente. Estas diferenças de densidade geram diferenças de pressão (de valor absoluto pequeno), que são responsáveis pela introdução do ar na base do fogo e pela propagação dos gases quentes de locais confinados (SEITO, 2008; LIVI, 2004).

$$\frac{P.V}{T} = n.R \quad (1)$$

Onde:

P = pressão absoluta do gás, [N/m²];

V = volume do gás, [m³];

T = temperatura absoluta do gás, [K];

n = número de mols existentes no volume V, [mol];

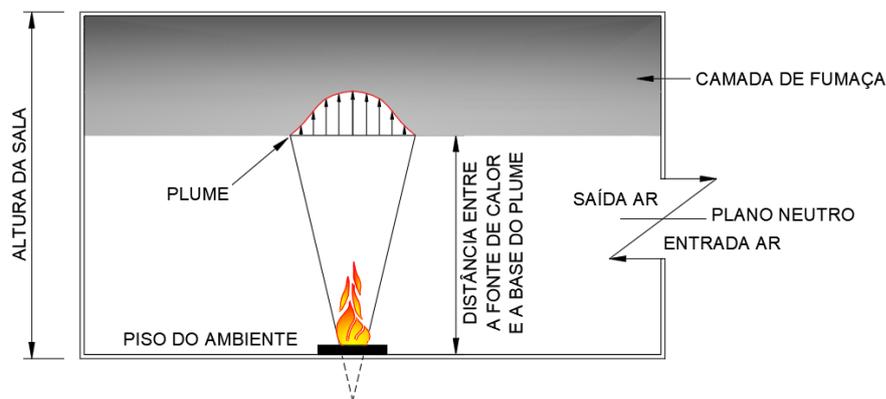
R = constante universal dos gases, [8,314 N.m/(mol.K)].

A fumaça gerada no incêndio possui uma temperatura maior que a temperatura do ambiente, logo, a fumaça tem uma densidade menor, surgindo uma força ascendente de flutuação que a faz propagar-se dentro da edificação, se acumulando no teto do ambiente e se espalhando pela camada superior. A propagação da fumaça está diretamente relacionada a taxa de elevação da temperatura, logo, quanto maior a diferença de temperatura, maior será a velocidade de propagação da fumaça (SEITO; KATO, 1988).

A velocidade de propagação da fumaça é maior na direção vertical, em relação à sua propagação na direção horizontal. A fumaça que flua no sentido ascendente tem o formato de um cone invertido, chamando de “plume”, conforme ilustra a Figura 6, sendo que a taxa de queima dos combustíveis que darão origem a fumaça é determinada pelo suprimento de ar para o ambiente. (SEITO; KATO, 1988; KATO; FICHMANN; GUARALDO, 1988).

Segundo Seito e Kato (1988), Cunha e Martinelli Jr (2008), foi verificado que a velocidade de propagação da fumaça na direção horizontal está entre 1 a 2 m/s, e na direção vertical está entre 2 a 3 m/s.

Figura 6 – Processo de formação da camada de fumaça e fluxo básico do ar na abertura



Fonte: Adaptado de Seito (1988, p. 376).

Para Seito e Kato (1988), Seito e Berto (1988) os fatores que influenciam o movimento da fumaça num incêndio dentro da edificação são:

- a força de flutuação da própria fumaça;
- a estação climática do ano no momento do incêndio;
- a direção, a velocidade e o coeficiente de pressão do vento;
- a diferença de temperatura entre o ar externo e o ar interno da edificação;
- o sistema de ventilação mecânica interno da edificação;
- o sistema de climatização interno da edificação;
- a localização do foco inicial do incêndio;
- a resistência ao fluxo do ar das portas, janelas, dutos, poços e chaminés;
- a condição das aberturas das portas e janelas na situação de incêndio; e
- a variação térmica entre os diferentes tipos de ambientes da edificação.

Seito e Kato (1988), explicam que a ventilação natural da edificação durante o incêndio (movimento ascendente ou descendente da fumaça) através da aberturas e dutos é afetado pelo

sistema de climatização (ar condicionado) da edificação, que no inverno aquece o ar interior e no verão resfria o ar interior. Ao se estudar o comportamento da fumaça é necessário levar em consideração o andar da ocorrência do incêndio, devendo-se observar os seguintes fatores:

- densidade de ocupação do pavimento;
- probabilidade de iniciar o incêndio no local; e
- características do local para o controle da propagação da fumaça.

2.4.5.1 O fenômeno de estratificação da fumaça

De acordo com o Manual Básico de combate a incêndio do Corpo de Bombeiros Militar do Distrito Federal (2006, p. 51), o fenômeno de estratificação “é a divisão do ar de um ambiente em camadas, o que ocorre devido a diferenças de temperatura e densidade”. Este fenômeno pode impedir que a fumaça ou gases gerados por uma combustão alcancem um detector instalado no teto.

2.5 VENTILAÇÃO

Para Toledo (2001), Clezar e Nogueira (2009), Bittencourt e Cândido (2010), a ventilação tem 3 objetivos:

- renovar o ar de ambientes de uma edificação;
- promover o conforto térmico das pessoas; e
- proporcionar o resfriamento da edificação.

Quando a ventilação ocorre por meios naturais, é denominada ventilação natural; já quando ventilação é induzida por equipamentos mecânicos, é denominado ventilação mecânica.

O principal parâmetro num projeto de ventilação é a vazão do ar, que determina as dimensões das instalações de ventilação. Para ventilar um ambiente, é necessário retirar a mesma massa de ar que se pretende introduzir no recinto, logo, as aberturas de entrada de ar e as aberturas de saída de ar devem ter dimensões adequadas. Na ventilação mecânica ou industrial, normalmente, o escoamento do ar é considerado incompressível (CLEZAR; NOGUEIRA, 2009).

Alves (2010, p. 151), explica que “a ventilação, seja ela natural ou forçada, pode ser uma grande aliada ou uma grande inimiga no controle de incêndio, pois tem a capacidade de direcionar a fumaça para onde se deseja”. Tudo vai depender da escolha correta da entrada de

ar e da saída da fumaça, uma vez que o percurso da fumaça ocorrerá entre estes 2 pontos. A propagação do incêndio depende para onde está sendo levada a fumaça.

Livi (2004, p. 134), explica que a convecção forçada ocorre quando o escoamento do fluido é causado por ventiladores ou bombas; já a convecção natural ocorre quando o escoamento do fluido “é causado por forças de empuxo devidas aos gradientes de massa específica produzidos pelas diferenças de temperatura no fluido”.

2.5.1 Ventilação Natural

Segundo Toledo (2001), Clezar e Nogueira (2009), Bittencourt e Cândido (2010), a ventilação natural é aquela em que o movimento do ar ocorre através de 2 mecanismos:

- pela ação do vento (diferença de pressão dinâmica); ou
- pelo efeito chaminé, provocado pela diferença de temperatura entre os ambientes internos e externos da edificação (diferença de pressão estática).

A Figura 7 ilustra o processo da ventilação natural usada para a extração de fumaça um incêndio, ao adentrar no interior da escada de emergência em uma edificação.

Figura 7 – Extração de fumaça por meio de ventilação natural



Fonte: Engetel Automação e Segurança (2018).

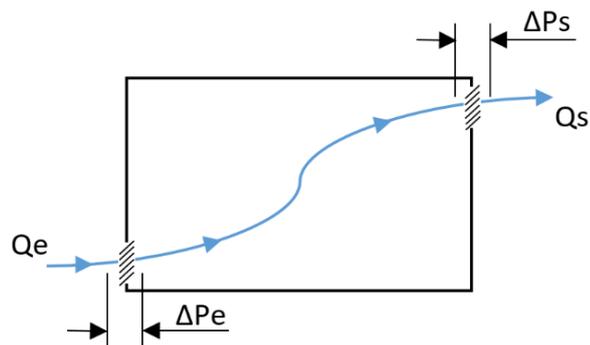
A ventilação natural causada pela ação do vento ocorre pela existência de zonas de diferentes pressões na edificação, sendo uma zona de alta pressão sobre as aberturas de entrada na face de incidência do vento e outra zona de baixa pressão sobre as aberturas de saída na face oposta da edificação. O coeficiente de pressão do vento depende: da direção e velocidade do

vento, da altura e geometria da edificação, do relevo, proximidade de edificações vizinhas e obstáculos no entorno da edificação (LAMBERTS, 2018).

A ventilação natural causada pela diferença de temperatura entre o ar interno e externo da edificação, ocorre pelas diferenças de densidade entre o ar externo e interno, provocando um deslocamento da massa de ar da zona de maior pressão ou densidade (ar frio) para a zona de menor pressão ou densidade (ar quente). Nestas condições, quando ocorre a circulação do ar de uma abertura inferior para outra superior na edificação, denomina-se efeito chaminé (LAMBERTS, 2018).

Segundo Clezar e Nogueira (2009), a ventilação natural provocada pela ação do vento ou pela diferença de temperatura pode ocorrer de forma separada ou combinada, para produzir os diferenciais de pressão através das aberturas de entrada de ar (ΔP_e) e de saída de ar (ΔP_s) na edificação, conforme ilustrado na Figura 8.

Figura 8 – diferenciais de pressão causados pela ação do vento e da temperatura



Fonte: Adaptado de Clezar e Nogueira (2009, p. 83).

Os resultados da ventilação natural podem variar consideravelmente, conforme o projeto do sistema de ventilação natural, o arranjo, a localização e o controle das aberturas de ventilação. Em relação à ação das diferenças de temperaturas, as aberturas de entrada de ar devem estar situadas em nível inferior às das aberturas de saída de ar. No que tange a ação do vento, as aberturas de entrada de ar devem estar situadas nas paredes voltadas para o vento dominante, e as aberturas para a saída do ar devem estar protegidas da ação do vento (CLEZAR; NOGUEIRA, 2009).

Para Clezar e Nogueira (2009), Bittencourt e Cândido (2010), os fatores que influenciam a ação do vento na ventilação natural são:

- intensidade da velocidade média do vento dominante local;
- direção predominante do vento em relação às paredes da edificação;

- interferência local no vento devido às proximidades de edifícios, topografia e outros obstáculos.

Cunha e Martinelli Jr (2008), explicam que a fluidez do ar pela edificação depende:

- da diferença de temperatura entre o ar e os gases quentes dentro e fora da edificação;
- da diferença da altura entre a entrada de ar e as aberturas de exaustão;
- da convecção do calor ascendente;
- da velocidade e direção do vento.

Para Cunha e Martinelli Jr (2008), existem algumas vantagens e desvantagens em se usar a ventilação natural.

Vantagens da ventilação natural:

- ventilação silenciosa;
- praticamente sem manutenção;
- custos baixos (pneumático ou elétrico);
- funcionamento livre de falhas;
- grande área aberta permitindo a perda de calor por radiação;
- fácil instalação;
- baixo peso;
- pode ser combinada esteticamente com a arquitetura da edificação.

Desvantagens da ventilação natural:

- a fluidez do ar pode ser afetada pela intensidade e direção do vento;
- a topografia local e as edificações adjacentes afetam a ventilação;
- a ventilação natural pode não funcionar de forma eficiente no início do incêndio.

2.5.2 Ventilação Mecânica ou Forçada

Segundo Clezar e Nogueira (2009, p. 61), a ventilação mecânica ou forçada é aquela em que o movimento do ar ocorre “por diferença de pressão provocada pela ação de um ventilador (insuflando ou succionando)”, sendo que o ventilador é um equipamento utilizado para converter a energia mecânica de rotação de seu eixo em aumento de pressão do ar.

Para Cunha e Martinelli Jr (2008), a ventilação mecânica tem algumas vantagens e desvantagens em relação a ventilação natural.

Vantagens da ventilação mecânica:

- a ventilação é independente da altura da construção, de correntes térmicas e da pressão do vento;

- o desempenho é previsível e repetitivo;
- os exaustores podem operar contra o vento;
- o ar fresco pode ser conduzido para onde se desejar em velocidade e temperatura ótimas.

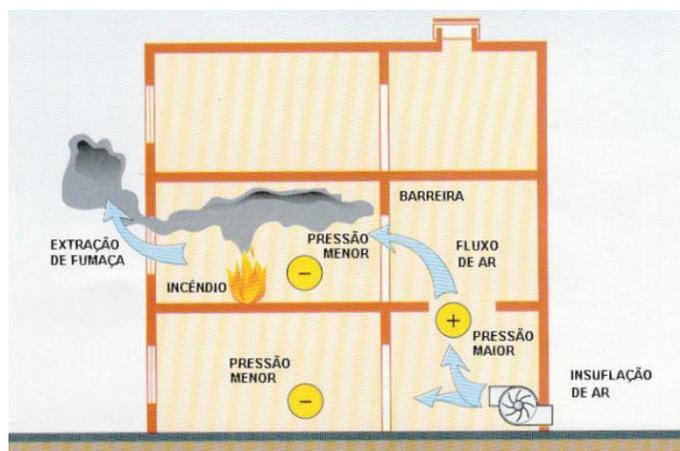
Desvantagens da ventilação mecânica:

- a velocidade do ar depende da velocidade do exaustor;
- a fluidez do ar não aumenta com a elevação da temperatura interna da edificação;
- o exaustor depende de energia elétrica para funcionar;
- num incêndio deve-se garantir uma fonte de energia para o exaustor funcionar, bem como os fios devem ser protegidos do fogo;
- os exaustores produzem barulho, e a atenuação do barulho pode ser complicada;
- não é recomendado para insuflação, pois a entrada prematura de ar pode resfriar a fumaça, dificultando a sua extração;
- pode ocorrer curto-circuito no motor elétrico da ventilação mecânica;
- os equipamentos devem ser testados e corretamente projetados e executados.

Para a extração (ventilação) mecânica de fumaça, os exaustores devem resistir, sem comprometimento do funcionamento, a passagem de fumaça com uma temperatura de 400 °C por 60 minutos para edificação com até 30 metros de altura, e durante 120 minutos para edificação com altura superior a 30 metros (SÃO PAULO, 2011).

A Figura 9 da Instrução Técnica nº 15 – Controle de fumaça, do Corpo de Bombeiros Militar de São Paulo, ilustra a extração de fumaça de um incêndio numa edificação por meio da ventilação mecânica (SÃO PAULO, 2011).

Figura 9 – Extração de fumaça por meio de ventilação mecânica



Fonte: Instrução Técnica nº 15 (SÃO PAULO, 2011, p. 316).

Para que um sistema de exaustão (ventilação) mecânico de fumaça funcione adequadamente, é necessário haver o fornecimento de ar, substituindo o ar da pluma do incêndio, criando um “efeito chaminé” na edificação, e permitindo um fluxo uniforme de circulação de ar, porém, a velocidade da entrada de ar não pode ser muito alta, para não atrapalhar a evacuação (CUNHA; MARTINELLI JR, 2008).

Segundo Alves (2010, p. 148), a pior situação possível para os bombeiros é aquela quando se utilizada a ventilação forçada de forma errada, “pois acarreta uma forte turbulência da camada de fumaça em todo ambiente, fazendo com que a temperatura seja maior em todo ambiente, não apenas na parte superior dele”.

No caso de evacuação num edifício em situação de incêndio, o uso da ventilação forçada mal aplicada pode trazer sérios riscos para as pessoas em situação de fuga, “o local pode ser tomado pela fumaça muito rapidamente dificultando a visibilidade, retardando o tempo de saída e até mesmo impedindo que todos saiam ilesos aos efeitos da fumaça” (ALVES, 2010, p. 148).

A NBR 14880 (ABNT, 2014, p. 1), que trata das saídas de emergência em edifícios – escada de segurança – controle de fumaça por pressurização, tem por objetivo especificar “uma metodologia para manter livres da fumaça, através de pressurização, as escadas de segurança que se constituem, na porção vertical, da rota de fuga dos edifícios”.

Conforme a NBR 14880 (ABNT, 2014, p. 4), o princípio geral da pressurização consiste de que “um espaço é pressurizado quando recebe um suprimento contínuo de ar que possibilita manter um diferencial de pressão entre este espaço e os adjacentes, preservando-se um fluxo de ar através de uma ou várias trajetórias de escape para o exterior da edificação”.

2.6 PRINCÍPIOS DO MOVIMENTO DO AR

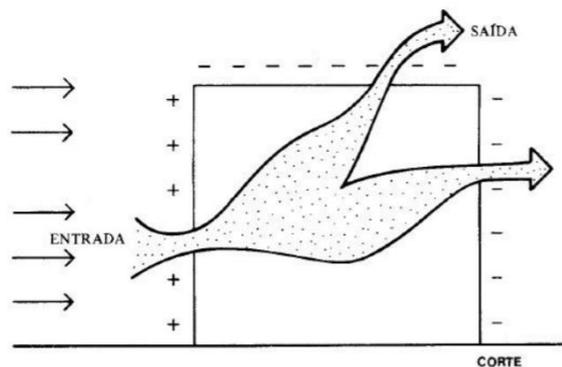
O escoamento do ar no interior de um ambiente é determinado pela ação do vento (pressão dinâmica) ou por efeito chaminé (pressão estática).

2.6.1 Ventilação pela ação do vento

O vento causa variação de pressão na superfície da edificação, alterando a entrada e saída de ar pelas aberturas, fazendo com que ocorra a ventilação natural, conforme ilustra a Figura 10. O vento ao atingir uma edificação, distribui pressões nas superfícies externas do edifício. Estas pressões dependem da direção e velocidade do vento, densidade do ar, orientação da superfície e características do entorno. Normalmente a pressão do vento é positiva a

barlavento (lado onde incide o vento) e negativa a sotavento (lado para onde o vento vai). Porém essas pressões podem ser negativas ou positivas, dependendo da direção e forma da edificação. O comportamento instável do vento, com suas turbulências e rajadas, causa variações de pressão muito instáveis sobre as superfícies que atingem. A maioria das edificações está em ambiente urbano e é obstruída por edificações vizinhas, árvores, arbustos e etc. Estas obstruções alteram o fluxo de ar que passa pela edificação, causando a redução da velocidade do vento e consequentemente a alteração de seus coeficientes de pressão (VERSAGE, 2009).

Figura 10 – Ventilação pela ação do vento



Fonte: Duarte, Monteiro e Michalski (2018).

Duarte, Monteiro e Michalski (2018), explicam que a vazão ou o fluxo de ar pela ação do vento pode ser calculado pelas equações (2) e (3).

$$Q = 0,6 \cdot A_o \cdot v \cdot \sqrt{(c_e - c_s)} \quad (2)$$

$$\frac{1}{A_o^2} = \frac{1}{A_e^2} + \frac{1}{A_s^2} \quad (3)$$

Onde:

Q = vazão ou fluxo de ar por ação do vento, [m³/s];

v = velocidade do vento resultante na abertura, [m/s];

c_e = coeficiente de pressão da abertura de entrada de ar;

c_s = coeficiente de pressão da abertura de saída de ar;

A_o = área equivalente das aberturas, [m²];

A_e = área da abertura de entrada, [m²];

A_s = área da abertura de saída, [m²].

2.6.2 Ventilação por efeito chaminé

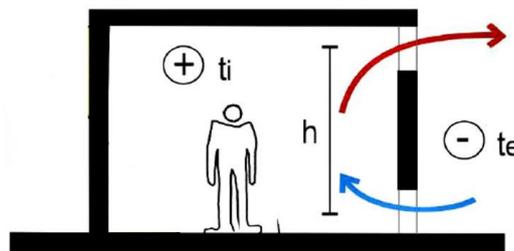
No efeito chaminé a circulação do ar é causada pela diferença de pressão (pressão estática) entre o ar interno e o externo da edificação; e esta diferença de pressão é gerada pela diferença de densidade entre o ar interno e o externo. A densidade do ar depende da temperatura, em outras palavras, pode-se dizer que o efeito chaminé é causado pelas diferenças de temperatura entre o ar interior e exterior da edificação. No efeito chaminé, o ar mais frio (mais denso) exerce pressão positiva; o ar mais quente (menos denso) exerce baixa pressão e tende a subir criando correntes de convecção (BITTENCOURT; CÂNDIDO, 2010).

A pressão estática se constitui na força motriz do fenômeno que se convencionou chamar de 'efeito chaminé'. Em uma chaminé, o ar aquecido torna-se mais leve que o ar circundante e tende a subir. Esse fenômeno provoca um deslocamento de massas de ar circundantes, com temperatura mais baixa, para ocupar o lugar do ar quente que subiu pela chaminé. Esse ar fresco que substituiu o ar que subiu pela chaminé vai sendo aquecido até que, por sua vez, vai também ascendendo, provocando, assim, um ciclo contínuo de movimentação do ar (BITTENCOURT; CÂNDIDO, 2010, p. 29).

Num incêndio, os gases quentes no interior da edificação estão menos densos que o ar no exterior, provocando um movimento ascendente, devido a forças de flutuação, dos gases quentes dentro da edificação (FERNANDES, 2008; VERSAGE, 2009).

Bittencourt e Cândido (2010) esclarecem que a intensidade do movimento do ar, produzido pelo efeito chaminé, depende de 2 fatores principais: da diferença de altura entre as aberturas de entrada e saída do ar; e da diferença de temperatura entre o ar aquecido e o ar do ambiente circundante, como ilustrado na figura 11.

Figura 11 – Ventilação por efeito chaminé (diferença de temperatura)



Fonte: Adaptado de Bittencourt e Cândido (2010, p. 30).

Bittencourt e Cândido (2010), Duarte, Monteiro e Michalski (2018), explicam que a vazão ou o fluxo de ar por efeito chaminé pode ser calculado pela equação (4).

$$Q = C \cdot A \cdot \sqrt{h \cdot (T_i - T_e)} \quad (4)$$

Onde:

Q = vazão ou fluxo de ar por efeito chaminé, [m³/s];

C = coeficiente de resistência ao escoamento do fluxo do ar (0,12 para a maioria das aberturas);

A = área da abertura, [m²];

h = altura medida a partir da metade da altura da abertura de entrada de ar até a metade da abertura de saída de ar, [m]

T_i = temperatura do ar interno, [°C];

T_e = temperatura do ar externo, [°C].

2.6.3 Ventilação por efeito combinado (ação do vento e efeito chaminé)

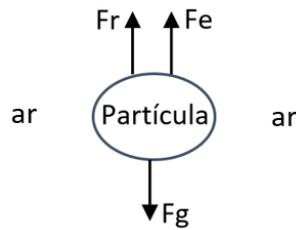
Normalmente um edifício está sujeito à ação dos ventos e ao efeito chaminé de forma combinada, proporcionando uma boa ventilação natural para a edificação. Porém, estes 2 efeitos podem agir de maneira a se anularem entre si, ou se combinarem para uma melhor ventilação natural. A oposição do efeito dos ventos sobre o efeito chaminé pode provocar o refluxo do ar a ser retirado, impedindo a renovação de ar fresco no ambiente (VERSAGE, 2009).

2.6.4 Movimento de partículas no ar

Segundo Clezar e Nogueira (2009), o movimento de uma partícula em queda no ar é determinado por 3 tipos de forças mais significativas, sendo: a força peso ou gravitacional (F_g), a força de empuxo ou flutuação (F_e) e a força de arrasto (F_r), conforme ilustra a Figura 12. A força de arrasto se opõe ao movimento da partícula no ar, e é resultante do deslocamento do ar imediatamente à frente da partícula, transferindo parte do movimento da partícula para o fluido adjacente, e a força peso é decorrente da ação da gravidade.

Segundo Livi (2004), o princípio de Arquimedes diz que ‘todo corpo (ou partícula) mergulhado num fluido (líquido ou gás) sofre, por parte do fluido, uma força vertical para cima, cuja intensidade é igual ao peso do fluido deslocado pelo corpo’. Esta força vertical de sustentação é chamada de força de empuxo, calculada conforme a equação (5).

Figura 12 – Forças que atuam sobre uma partícula em queda no ar



Fonte: Adaptado de Clezar e Nogueira (2009, p. 54).

$$F_e = \gamma \cdot V \quad (5)$$

Onde:

F_e = força de empuxo, [kgf];

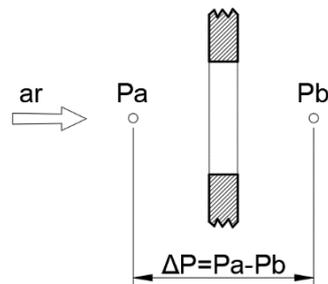
γ = peso específico do fluido, [kgf/m³];

V = volume do fluido deslocado pelo corpo imerso no fluido, [m³].

2.6.5 Vazão de ar através de uma abertura

A vazão de ar através de uma abertura pode ser determinada através da equação (6), conforme ilustra a Figura 13 (CLEZAR; NOGUEIRA, 2009, p. 87).

Figura 13 – Vazão de ar através de uma abertura



Fonte: Adaptado de Clezar e Nogueira (2009, p. 87).

$$Q = K \cdot A \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\rho_{ar}}} \quad (6)$$

Onde:

Q = vazão de ar, [m³/s];

K = coeficiente de vazão referido à área frontal da abertura;

A = área frontal da abertura, [m²];

ΔP = diferencial de pressão através da abertura, [Pa];

ρ_{ar} = massa específica do ar, [kg/m³].

No Quadro 3, Idel'cik (1969) apud Clezar e Nogueira (2009, p. 87), fornece os valores do coeficiente de vazão para alguns tipos de aberturas.

Quadro 3 – Coeficientes de vazão

Abertura	K
Venezianas com 50% de área livre	0,40
Basculante com chapa a 60°	0,58
Abertura com bordos vivos	0,62
Aberturas com bordos arredondados	0,85

Fonte: Idel'cik (1969) apud Clezar e Nogueira (2009, p. 87).

2.6.6 Movimento do ar em incêndios

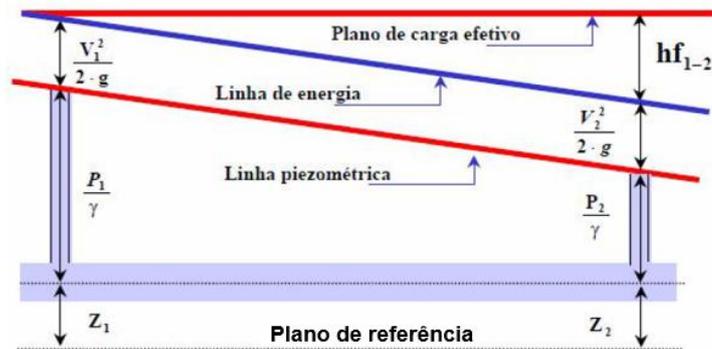
Quando o ar é aquecido, ocorre a sua expansão e com isso a redução da densidade, fluando em relação ao ar adjacente mais frio (densidade maior). No entorno do incêndio (fonte de calor) a coluna de ar quente ascendente acelera enquanto se eleva. A velocidade do ar que sobe depende da altura livre acima da fonte de calor e da diferença de temperatura entre o ar quente e o ar adjacente frio. Enquanto uma coluna de ar quente sobe, ela vai se misturando com o ar adjacente, se diluindo, e portanto, diminuindo a diferença de temperatura enquanto se eleva. Esta diluição do ar, diminui a aceleração da coluna térmica ascendente, e se a altura livre acima da fonte de calor for grande, o ar quente para de subir, e se espalha horizontalmente, fluando sobre o topo da camada de ar levemente mais fria. Em suma, o ar frio (mais denso) ocupa o espaço do ar quente (menos denso), criando uma força ascendente (flutuação) no ar quente; logo, a presença de aberturas nas partes baixas da edificação permite a entrada de ar frio, que impele o ar quente para a saída pelas aberturas nas partes altas da edificação (CUNHA; MARTINELLI JR, 2008).

A fluidez do ar através de qualquer abertura na edificação depende da combinação da fluibilidade do ar e da direção do vento, criando diferenças de pressão na edificação, que podem ser aditivas ou opostas; logo, a fluidez do ar por meio da abertura, depende da soma da diferença de pressão por meio da própria abertura. Para efeito de extração do ar, a ausência de vento é a pior situação, pois nesta situação a ventilação natural ocorre apenas por fluibilidade (CUNHA; MARTINELLI JR, 2008).

2.6.7 Teorema de Bernoulli

O princípio de Bernoulli relaciona-se basicamente com o princípio da conservação de energia, para um fluido incompressível de fluxo constante ao longo de um percurso. Toda energia, em um sistema fechado é a mesma em 2 pontos distintos do sistema. Pelo Princípio de Bernoulli, ilustrado na Figura 14 e demonstrado na equação (6), a soma das energias potencial (Z), piezométrica (P/γ) e cinética ($V^2/2g$), em 2 pontos diferentes de um sistema fechado, mais as perdas de cargas (h_f) devido ao deslocamento entre os 2 pontos, é uma constante (BITTENCOURT; CÂNDIDO, 2010; EVANGELISTA, 2018).

Figura 14 – Representação gráfica do teorema de Bernoulli



Fonte: Evangelista (2018).

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + h_f = Cte \quad (6)$$

Onde:

Z = altura acima do plano horizontal de referência, [m];

P = pressão estática do fluido, [N/m²];

γ = peso específico do fluido, [N/m³];

V = velocidade do fluido, [m/s];

g = aceleração da gravidade, [m/s²];

h_f = perda de carga, [m].

2.6.7 Efeito Venturi

O efeito de Venturi é baseado no teorema de Bernoulli e no princípio da conservação da massa. Pelo teorema de Bernoulli, a pressão de um fluido diminui à medida que a sua velocidade aumenta; logo, um fluido ao passar por um tubo em formato cônico (funil), conforme a Figura 15, no sentido da seção maior para a menor, pelo princípio de conservação da massa expresso pela equação (7), para manter a vazão no tubo constante, a redução da seção do tubo implica num aumento da velocidade do fluido, este aumento da velocidade do fluido gera uma diminuição da pressão do escoamento do ponto A em relação ao ponto B, mostrado na Figura 14. Deste modo o fluido próximo ao ponto B é succionado para o ponto A, devido a diferença de pressão entre os pontos A e B. (BITTENCOURT; CÂNDIDO, 2010).

$$Q = A.V \quad (7)$$

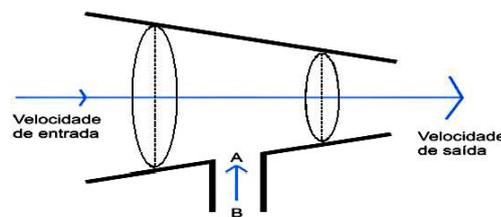
Onde:

Q = vazão do fluido, [m³/s];

A = área da seção do tubo, [m²];

V = velocidade do fluido dentro do tubo, [m/s].

Figura 15 – Efeito de Venturi em um tubo com formato de funil



Fonte: Bittencourt; Cândido, 2010.

2.6.8 Regime de escoamento de fluidos

Segundo Livi (2004), o movimento dos fluidos pode ter um regime de escoamento laminar ou turbulento, sendo classificado em função do número de Reynolds (Re).

Reynolds observou que o escoamento no interior de um tubo de seção circular de diâmetro constante é laminar ou turbulento em função de uma relação entre a velocidade de escoamento, o diâmetro interno do duto, a massa específica e a viscosidade dinâmica do fluido. Essa relação, que é adimensional, é chamada de número de Reynolds (LIVI, 2004, p. 55).

O número de Reynolds (Re) é calculado pela equação (8).

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu} \quad (8)$$

Onde:

Re = número de Reynolds, é adimensional;

ρ = massa específica do fluido;

V = velocidade média de escoamento no duto;

D = diâmetro interno do duto;

μ = viscosidade dinâmica do fluido.

2.6.8.1 Regime de escoamento Laminar

No regime de escoamento laminar, o movimento do fluido se passa como se o fluido fosse constituído de lâminas paralelas que deslizam umas em relação às outras, sem se misturarem. Os atritos que ocorrem são de origem viscosa do fluido. No regime laminar normalmente $Re < 2000$. Ao fluir em um tubo, o fluido desloca-se em camadas paralelas, sem que as linhas de corrente se cruzem. O movimento laminar caracteriza-se por um deslocamento regular, suave e ordenado de todas as partículas do fluido, mantendo estas, uma posição relativa bem definida entre si (LIVI, 2004).

2.6.8.2 Regime de escoamento turbulento

No regime de escoamento turbulento, as partículas do fluido se movem em trajetórias irregulares, misturando-se, geralmente através de turbilhões. Neste regime os atritos são gerados pela rugosidade das paredes do tubo. No regime turbulento normalmente $Re > 2500$. Conforme a velocidade aumenta, o fluxo torna-se mais instável com as linhas de corrente se cruzando ao longo da seção transversal do tubo. Os atritos internos do próprio fluido e das interações na interface fluido parede do tubo causa uma perda de energia. O movimento turbulento caracteriza-se por um deslocamento desordenado, com turbilhões ou redemoinhos das partículas, em que as suas trajetórias se cruzam, e a velocidade das partículas varia de modo muito irregular (LIVI, 2004).

2.6.8.3 Camada limite

Os fluídos possuem a propriedade de aderir a superfície sólida com a qual estão em contato, de tal modo, que num escoamento uma película (camada) do fluido, que está em contato direto com uma superfície sólida, não desliza. Esta película é chamada de camada limite. O campo de escoamento de um fluído pode ser dividido em 2 regiões, sendo uma região junto a superfície sólida, que é a camada limite, com velocidade de escoamento igual à da parede sólida (ou seja velocidade zero); e outra região de escoamento fora da camada limite, chamada de escoamento livre (LIVI, 2004).

2.7 ESCADAS DE EMERGÊNCIA

Cada estado do Brasil define a sua legislação e normas próprias de segurança contra incêndio, que devem ser atendidas pelos profissionais de arquitetura e de engenharia ao se projetar as edificações; não existindo uma padronização de norma para o nosso país. De uma maneira em geral, a estanqueidade das escadas de emergência ocorre por meio do enclausuramento das escadas através de paredes e portas corta-fogo. A falta de estanqueidade à fumaça nas escadas de emergência é fatal para as pessoas em caso de incêndio, como por exemplo no incêndio ocorrido no edifício Joelma em São Paulo no ano de 1974, com 179 mortos e 320 feridos (SEITO; BERTO, 1988), (NEGRISOLO; GILL; OLIVEIRA, 2008).

As escadas de emergência, de segurança ou também chamadas de escadas de incêndio, são escadas existentes nas edificações destinadas à evacuação de pessoas em caso de incêndio ou emergência (SEITO; BERTO, 1988).

2.7.1 Extração de fumaça nas saídas de emergência pela NBR 9077

A NBR 9077 (ABNT, 2001), é uma norma brasileira prescritiva que estabelece os parâmetros para o dimensionamento das saídas de emergência em edifícios, e tem por objetivo fixar as condições exigíveis que as edificações devem possuir:

- a) a fim de que sua população possa abandoná-las, em caso de incêndio, completamente protegida em sua integridade física;
- b) para permitir o fácil acesso de auxílio externo (bombeiros) para o combate ao fogo e a retirada da população (ABNT, 2001, p. 1).

A saída de emergência, rota de saída ou saída, podem ser definidas como:

Caminho contínuo, devidamente protegido, proporcionado por portas, corredores, halls, passagens externas, balcões, vestíbulos, escadas, rampas ou outros dispositivos de saída ou combinações destes, a ser percorrido pelo usuário, em caso de um incêndio, de qualquer ponto da edificação até atingir a via pública ou espaço aberto, protegido do incêndio, em comunicação com o logradouro (ABNT, 2001, p. 4).

A NBR 9077 (ABNT, 2001) define que a escada de emergência faz parte da rota de fuga da edificação, podendo ser dos seguintes tipos:

- escada comum ou escada não enclausurada;
- escada enclausurada protegida;
- escada enclausurada à prova de fumaça:
 - com ventilação natural, por dutos de entrada de ar e saída de fumaça; ou
 - com ventilação mecânica, por pressurização.

2.7.1.1 Escada comum ou escada não enclausurada

A escada não enclausurada ou escada comum é definida pela NBR 9077 (ABNT, 2001, p. 3), como “escada que, embora possa fazer parte de uma rota de saída, se comunica diretamente com os demais ambientes, como corredores, halls e outros, em cada pavimento, não possuindo portas corta-fogo”.

2.7.1.2 Escada enclausurada protegida

A escada enclausurada protegida é definida pela NBR 9077 (ABNT, 2001, p. 3), como “escada devidamente ventilada situada em ambiente envolvido por paredes corta-fogo e dotada de portas resistentes ao fogo”.

Em relação a ventilação, de acordo com a NBR (ABNT, 2001), a escada enclausurada protegida deve ter as seguintes características:

- ter a caixa da escada isolada por paredes resistentes ao fogo por 2 horas;
- ter as portas de acesso a caixa da escada resistentes ao fogo por 30 minutos;
- ser dotadas de janelas abrindo para o exterior, com área mínima de 0,80 m², junto ao teto, em todos os pavimentos (sendo facultativo no pavimento descarga), conforme Figura 16;
- ser dotada de alçapão de alívio de fumaça que permita a ventilação em seu término superior, com área mínima de 1,00 m²;

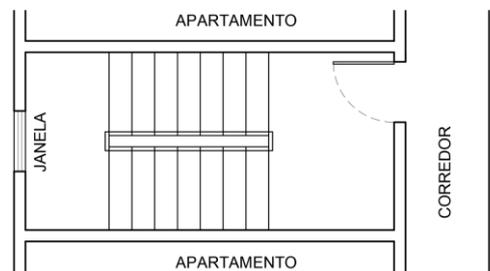
- possuir ventilação permanente inferior, com área mínima de 1,20 m², junto ao solo.

Na impossibilidade de colocar a janela na caixa da escada enclausurada protegida, a NBR 9077 (ABNT, 2001) prevê que os corredores de acesso devem:

- ser ventilados por janelas abrindo para o espaço livre exterior, com área mínima de 0,80 m², situadas junto ao teto, conforme Figura 17; ou

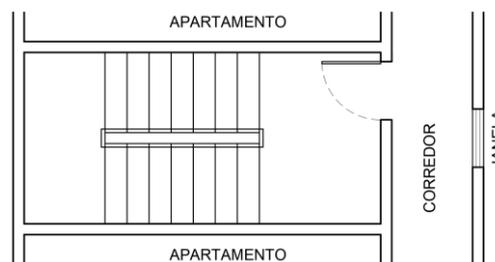
- ter sua ligação com a caixa da escada por meio de antecâmara, dotada de portas corta-fogo, ventilada por dutos de entrada de ar e de saída de fumaça. Na prática esta alternativa tem a mesma configura de uma escada enclausurada à prova de fumaça.

Figura 16 – Escada enclausurada protegida, com ventilação no corpo da escada



Fonte: Adaptado de ABNT NBR 9077 (2001, p. 13).

Figura 17 – Escada enclausurada protegida com, ventilação no corredor de acesso a escada



Fonte: Adaptado de ABNT NBR 9077 (2001, p. 13).

2.7.1.3 Escada enclausurada à prova de fumaça

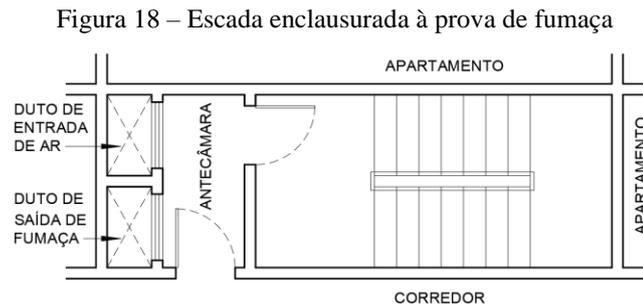
Pela NBR 9077 (ABNT, 2001, p. 3), a escada enclausurada à prova de fumaça é definida como “escada cuja caixa é envolvida por paredes corta-fogo e dotada de portas corta-fogo, cujo acesso é por antecâmara igualmente enclausurada ou local aberto, de modo a evitar fogo e fumaça em caso de incêndio”.

Em relação a ventilação, de acordo com a NBR (ABNT, 2001), a escada enclausurada à prova de fumaça deve ter as seguintes características:

- ter a caixa da escada isolada por paredes resistentes ao fogo por 4 horas;

- ter as portas de acesso a caixa da escada do tipo corta-fogo;
- ter ingresso a escada por antecâmaras ventiladas, terraços ou balcões;

Quando o ingresso ao corpo da escada enclausurada à prova de fumaça for por meio de antecâmara, esta deve ser dotada de portas corta-fogo, ventilada por dutos de entrada de ar e de saída de fumaça, conforme Figura 18.



Fonte: Adaptado da NBR 9077 (ABNT, 2001, p. 15).

A NBR 9077 (ABNT, 2001, p. 17), explica que “a condição de escada à prova de fumaça pode ser obtida pelo método de ventilação natural por meio de dutos ou pelo método de pressurização”, e que as escadas à prova de fumaça pressurizadas podem sempre substituir as escadas enclausuradas à prova de fumaça ventiladas naturalmente.

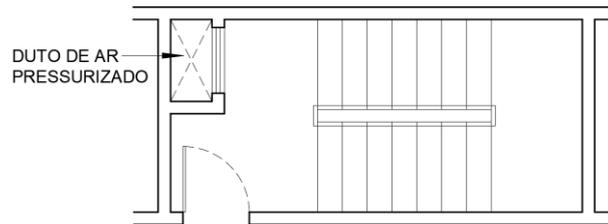
Na elaboração do projeto de uma edificação, de acordo com a Tabela 7 da NBR 9077 (2001), a definição do tipo da escada de emergência ocorre em função dos seguintes parâmetros: tipo de ocupação da edificação, altura da edificação e da área do pavimento. Para todas as edificações consideradas altas, o tipo de escada deve ser escada enclausurada à prova de fumaça; com exceção das edificações com ocupação tipo garagens sem acesso de público e sem abastecimento ou garagens com acesso de público e sem abastecimento, para as quais se admite o uso da escada enclausurada protegida.

2.7.1.4 Escada à prova de fumaça pressurizada

A NBR 9077 (ABNT, 2001, p. 3), define a escada à prova de fumaça pressurizada como “escada à prova de fumaça, cuja condição de estanqueidade à fumaça é obtida por método de pressurização”.

A NBR 9077 (ABNT, 2001) prevê que as escadas à prova de fumaça pressurizadas dispensam a antecâmara, conforme mostra a Figura 19.

Figura 19 – Escada à prova de fumaça pressurizada

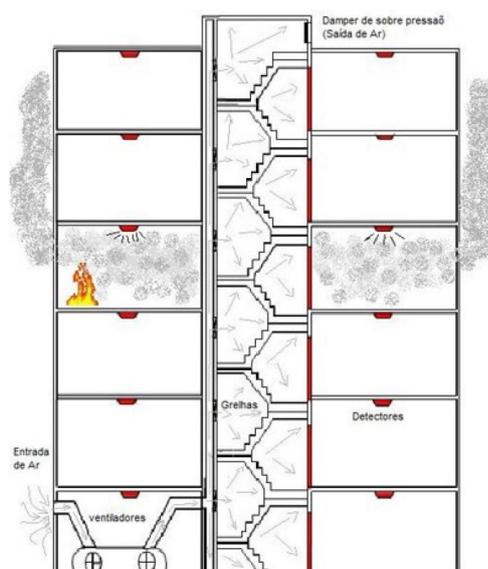


Fonte: Elaborado pelo autor.

A NBR 14880 (2014), trata do controle de fumaça por pressurização nas escadas de segurança. Esta Norma especifica uma metodologia para manter livres da fumaça, através da pressurização, as escadas de segurança dos edifícios, estabelecendo conceitos de aplicação, princípios gerais de funcionamento e parâmetros básicos para o desenvolvimento do projeto.

A pressurização consiste basicamente em manter um suprimento contínuo ar (capitado do exterior da edificação por ventiladores) dentro do corpo da escada (insuflado através de dutos), de modo que a pressão do ar no interior da escada seja maior do que a pressão do ar nos ambientes adjacentes a escada, preservando-se um fluxo de ar contínuo através de uma ou várias trajetórias de escape para o exterior da edificação. Desta forma ao se abrir a porta para entrar na escada, o ar em seu interior (por ter uma pressão maior) sai para fora do corpo da escada, impedindo que a fumaça (que tem uma pressão menor) entre dentro da escada (NBR 14880, 2014). A Figura 20 ilustra o funcionamento do sistema de pressurização uma escada.

Figura 20 – Funcionamento do sistema de pressurização de escada



Fonte: Silva (2013).

2.7.1.5 Dutos de ventilação natural

Segundo Campos e Siqueira (2016), os dutos de ventilação natural das escadas enclausurada à prova de fumaça, conforme mostra a Figura 21, devem formar um sistema integrado, sendo um duto para a entrada de ar e outro para saída de fumaça, que tem a função de garantir que a fumaça que entrar na antecâmara seja extraída por meio de convecção natural para o exterior da edificação.

O duto para saída de fumaça é um “espaço vertical no interior da edificação, que permite a saída, em qualquer pavimento, de gases e fumaça para o ar livre, acima da cobertura da edificação” (NBR 9077, 2001, p. 3).

Conforme a NBR 9077 (2001), o duto de saída de fumaça deve:

- ter aberturas nas paredes que dão para as antecâmaras, junto ao teto;
- ser totalmente fechado em sua extremidade inferior;
- elevar-se 1,00 m acima de qualquer elemento construtivo existente sobre a cobertura;
- ter abertura para a saída de fumaça em sua extremidade superior.

O duto para a entrada de ar é um “espaço no interior da edificação, que conduz ar puro coletado ao nível inferior desta, às escadas, antecâmaras ou acessos, exclusivamente, mantendo-os, com isso, devidamente ventilados e livres de fumaça em caso de incêndio” (NBR 9077, 2001, p. 3).

Conforme a NBR 9077 (2001), o duto de entrada de ar deve:

- ter aberturas nas paredes que dão para as antecâmaras, junto ao piso;
- ser totalmente fechado em sua extremidade superior;
- ter abertura para tomada de ar em sua extremidade inferior, com captação de ar fresco.

Os dutos de saída de fumaça e de entrada de ar, conforme a NBR 9077 (2001), também devem:

- ter paredes com revestimento interno liso e resistentes ao fogo por 2 horas;
- quando de seção retangular, suas dimensões devem ter à proporção máxima de 1:4;
- ter seção mínima calculada pela equação (9), não podendo ser inferior a 0,84 m².

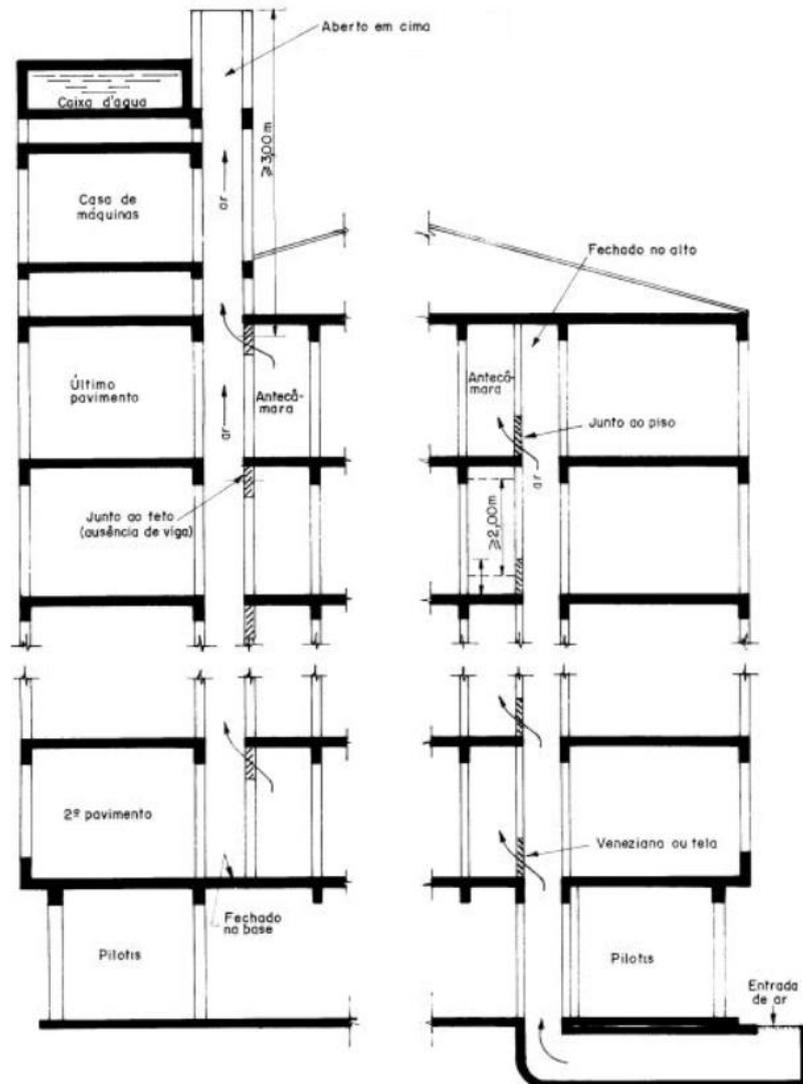
$$A = 0,105.N \quad (9)$$

Onde:

A = seção mínima do duto, [m²];

N = número de antecâmaras ventiladas pelo duto.

Figura 21 – Dutos de ventilação para saída de fumaça e para entrada de ar



Fonte: NBR 9077 (ABNT, 2001, p. 16).

2.7.2 Extração de fumaça nas saídas de emergência pela IN 009

A Lei Estadual nº 16.157, de 07 de novembro de 2013, que dispõe sobre as normas e os requisitos mínimos para a prevenção e segurança contra incêndio e pânico no estado de Santa Catarina, estabelece em seu Artigo 10, § 2º, que compete ao Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina discriminar as instruções normativas.

A Instrução Normativa 009 (IN 009) do Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina (CBMSC) estabelece e padroniza os critérios de concepção e dimensionamento do sistema de saídas de emergência, para todas as edificações no estado de Santa Catarina. Logo, a IN 009 em SC prevalece sobre a NBR 9077, ficando todas as edificações sob a fiscalização do CBMSC, no que diz respeito à segurança contra incêndio e pânico. (SANTA CATARINA, 2014).

A IN 009 publicada em 2014, utilizou como referência a própria NBR 9077 publicada em 2001, assim, muitos itens normativos ficaram parecidos em ambas as normas técnicas; porém, a IN 009 (SANTA CATARINA. 2014) prevê 5 tipos de escadas de emergência:

- escada comum;
- escada protegida;
- escada enclausurada;
- escada enclausurada à prova de fumaça; e
- escada pressurizada.

No estado de Santa Catarina as edificações mais altas, já construídas e em fase de construção, são aquelas com ocupação do tipo residencial privativa multifamiliar (SPAUTZ, 2017), e conforme o Anexo B da IN 009 (SANTA CATARINA, 2014), para esta ocupação o tipo de escada exigido é em função da altura da edificação, conforme mostra o Quadro 4.

Quadro 4 – Tipo de escada para edifício residencial privativo multifamiliar

Tipo de escada	Altura (H) da edificação
Escada comum	$H \leq 12 \text{ m}$
Escada protegida	$12 < H \leq 21 \text{ m}$
Escada enclausurada	$21 < H \leq 30 \text{ m}$
Escada enclausurada à prova de fumaça	$H > 30 \text{ m}$

Fonte: Adaptado de Santa Catarina (2014, p. 39).

2.7.2.1 Escada comum

A escada comum prevista na IN 009, assim como na NBR 9077, não tem a caixa da escada fechada por paredes resistentes ao fogo e nem portas corta-fogo, logo, este tipo de escada não é estanque a fumaça em caso de incêndio.

2.7.2.2 Escada protegida

Conforme a IN 009, a escada protegida deve ter:

- caixa da escada isolada por paredes resistentes ao fogo por 2 horas; e
- portas de acesso a caixa da escada resistentes ao fogo por 30 minutos;
- alçapão de alívio de fumaça em seu término superior, com área de 1,00 m²;
- possuir ventilação permanente inferior, com área mínima de 1,00 m².

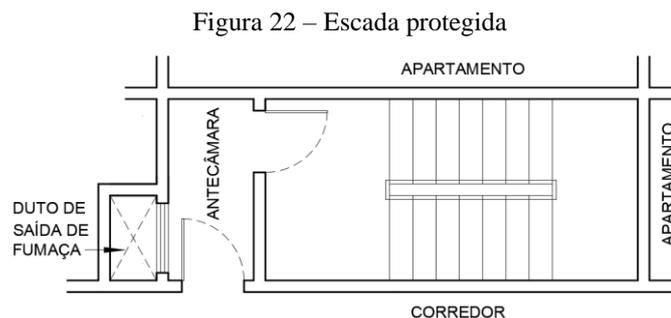
A IN 009 permite que a ventilação para a extração de fumaça da escada protegida seja através de:

- janela, no corpo da escada, abrindo para o exterior, com área mínima de 0,80 m², junto ao teto, em todos os pavimentos (sendo facultativo no pavimento descarga);
- janela, no corredor de acesso a escada, abrindo para o exterior, com área mínima de 0,80 m², junto ao teto, em todos os pavimentos (sendo facultativo no pavimento descarga);
- balcão, varanda ou sacada aberta com acesso a escada;
- escada aberta, com dissipação total da fumaça;
- duto para saída de fumaça, dentro do corpo da escada;
- duto para saída de fumaça, dentro da antecâmara com acesso a escada.

2.7.2.3 Escada enclausurada

Em relação a ventilação, de acordo com a IN 009, a escada enclausurada deve ter as seguintes características:

- ter a caixa da escada isolada por paredes resistentes ao fogo por 2 horas;
- ter as portas de acesso a caixa da escada do tipo corta-fogo;
- ter ingresso a escada por antecâmara, ventilada apenas por duto de saída de fumaça, com seção de 70 x 120 cm, sem duto para a entrada de ar, conforme Figura 22.



Fonte: Elaborado pelo autor, adaptado IN 009 (2001).

2.7.2.4 Escada enclausurada à prova de fumaça

A escada enclausurada à prova de fumaça prevista na IN 009 tem as mesmas características construtivas da NBR 9077, com a caixa da escada envolvida por paredes corta-fogo e dotada de portas corta-fogo, cujo acesso é por meio de antecâmara ventilada por dutos de entrada de ar e saída de fumaça.

2.7.2.5 Escada pressurizada

A IN 009 prevê que, a critério do responsável técnico pelo projeto dos sistemas de segurança contra incêndio e pânico da edificação, pode ser admitido a pressurização da escada de emergência, sendo utilizado como norma de referência a NBR 14880.

A IN 009, além das especificações da NBR 14880, estabelece ainda as seguintes exigências para a escada pressurizada, em relação a ventilação:

- possuir antecâmara para acesso à escada;
- possuir sistema de controle de fumaça em todos os pavimentos, o qual deve abrir automaticamente, em casos de falhas na pressurização da escada, localizado: nos corredores, nas antecâmaras ou no corpo da escada;
- o corpo da escada deve ser dotado de alçapão de alívio de fumaça que permita a ventilação em seu término superior, ou possuir smoke-vents com abertura automatizada, em caso de falhas na pressurização da escada, na parte superior com área mínima de 1,00 m².

A IN 009 prevê que as edificações residenciais privativas multifamiliar, com altura superior a 50 m e as demais ocupações com altura superior a 40 m, devem dispor de local para resgate aéreo na cobertura. Porém, a IN 009 admite a substituição do local para resgate aéreo por medidas compensatórias, sendo estas:

- utilizar escada de emergência pressurizada;
- instalar elevador de emergência dentro da antecâmara;
- ter gerador de emergência para a escada pressurizada e elevador de emergência; e
- prever sistema hidráulico preventivo por mangotinhos.

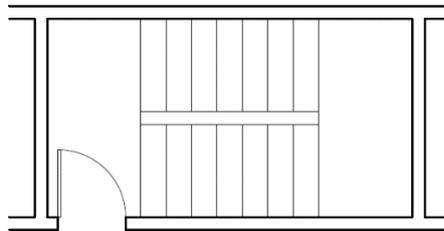
Atualmente, a grande maioria dos edifícios altos de Balneário Camboriú e região norte do estado de SC, principalmente aqueles com altura superior a 150 m, já utilizam as medidas compensatórias para substituir o local para resgate aéreo na cobertura, ou seja, a escada destes prédios é pressurizada.

3 ANÁLISE E RESULTADOS DE ESTUDO DE CASOS

3.1 FUMAÇA NO INCÊNDIO – ESCADAS DE SEGURANÇA

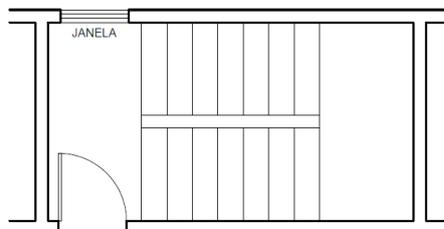
Seito e Berto (1988) avaliaram o desempenho em relação a estanqueidade à fumaça, de 7 tipos diferentes de escadas de emergência existentes em edifícios altos em São Paulo, durante o período de evacuação de um edifício, conforme ilustrado nas Figuras 23, 24, 25, 26, 27, 28 e 29, observando a existência ou não de antecâmaras nas escadas, e o tipo de ventilação (natural ou mecânica) existente nas antecâmaras ou nas escadas. A avaliação do desempenho, foi realizado por simulação *in loco* (com uso de ventiladores e fumaça fria não tóxica posicionados na frente da porta de acesso à antecâmara ou escada) e por simulação em software, considerado que durante o período de evacuação, apenas um pavimento estaria em fase de incêndio generalizado, a uma temperatura média de 800 °C, e com uma diferença de pressão estática máxima de 2 mm H₂O (20 Pa ou 2 kgf/m²) causada pela mudança de temperatura entre o ambiente incendiado e a escada ou a antecâmara.

Figura 23 – Escada enclausurada sem ventilação



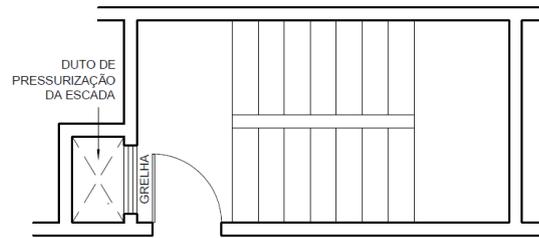
Fonte: Adaptado de Seito e Berto (1988, p. 388).

Figura 24 – Escada enclausurada com ventilação através de janela



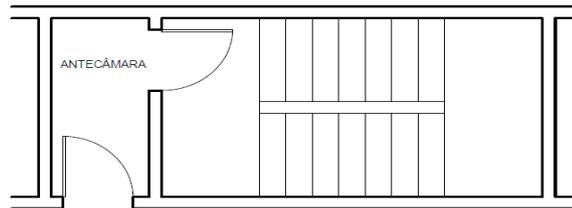
Fonte: Adaptado de Seito e Berto (1988, p. 388).

Figura 25 – Escada enclausurada com pressurização



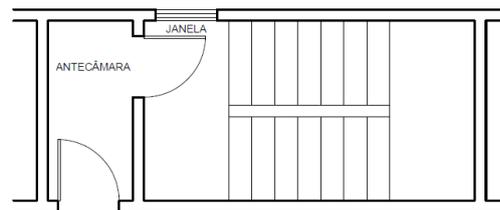
Fonte: Adaptado de Seito e Berto (1988, p. 388).

Figura 26 – Escada enclausurada sem ventilação, com antecâmara sem ventilação



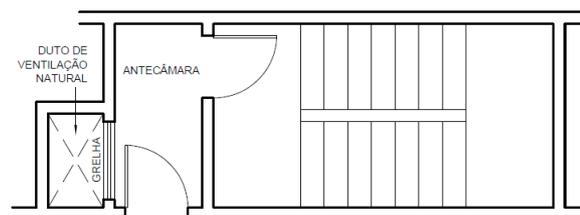
Fonte: Adaptado de Seito e Berto (1988, p. 388).

Figura 27 - Escada enclausurada ventilação por janela e antecâmara sem ventilação



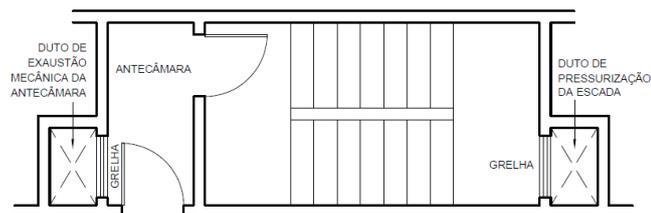
Fonte: Adaptado de Seito e Berto (1988, p. 388).

Figura 28 - Escada enclausurada sem ventilação e antecâmara com ventilação por duto



Fonte: Adaptado de Seito e Berto (1988, p. 389).

Figura 29 – Escada pressurizada e antecâmara com exaustão mecânica



Fonte: Adaptado de Seito e Berto (1988, p. 389).

O Quadro 5 apresenta um resumo do resultado das avaliações realizados por Seito e Berto (1988), do desempenho em relação a estanqueidade à fumaça dos 7 tipos de escadas de emergência analisados.

Quadro 5 – Resumo das avaliações das escadas realizadas por Seito e Berto (1988)

Tipo de escada	Resultado da avaliação de desempenho
Escada enclausurada sem ventilação.	<ul style="list-style-type: none"> - Péssimo desempenho. Apresentou penetração de grande quantidade de fumaça, propagando-se rapidamente para cima pelo interior da escada e adentrando os átrios dos andares superiores. - A estanqueidade à fumaça poderia melhorar com o uso de portas corta fogo.
Escada enclausurada com ventilação através de janelas.	<ul style="list-style-type: none"> - Péssimo desempenho. Apresentou penetração de grande quantidade de fumaça, propagando-se rapidamente para cima pelo interior da escada e adentrando os átrios dos andares superiores. - A estanqueidade à fumaça poderia melhorar com o uso de portas corta fogo.
Escada enclausurada com pressurização.	<ul style="list-style-type: none"> - Apresentou penetração de grande quantidade de fumaça, propagando-se rapidamente para cima pelo interior da escada e adentrando os átrios dos andares superiores. - O péssimo desempenho da escada deu-se em função dos baixos níveis de diferenciais de pressão existentes entre a escada e os átrios.
Escada enclausurada sem ventilação, com antecâmara sem ventilação.	<ul style="list-style-type: none"> - Apresentou penetração de grande quantidade de fumaça com uma rápida propagação no interior da escada. - A inexistência de ventilação na antecâmara permitiu a continuidade do fluxo de fumaça para o interior da caixa da escada, logo, a antecâmara sem ventilação é ineficiente. - A estanqueidade à fumaça poderia melhorar com o uso de portas corta fogo.
Escada enclausurada com ventilação através de janelas, com antecâmara sem ventilação.	<ul style="list-style-type: none"> - Apresentou penetração de grande quantidade de fumaça com uma rápida propagação no interior da escada. - A inexistência de ventilação na antecâmara permitiu a continuidade do fluxo de fumaça para o interior da caixa da escada, logo, a antecâmara sem ventilação é ineficiente. - A dissipação parcial da fumaça pela janela para o exterior ocasionou a entrada de maior quantidade de fumaça no interior da escada. - A estanqueidade à fumaça poderia melhorar com o uso de portas corta fogo.
Escada enclausurada sem ventilação, com antecâmara com ventilação natural através de duto.	<ul style="list-style-type: none"> - Apresentou penetração de fumaça no interior da escada. - Ocorreu o retorno da fumaça através do duto de ventilação natural da antecâmara, para as antecâmaras localizadas acima do andar incendiado. - A estanqueidade à fumaça poderia melhorar com o uso de portas corta fogo, associada a amplas aberturas na antecâmara diretamente para o exterior.
Escada enclausurada com pressurização, com antecâmara com exaustão mecânica.	<ul style="list-style-type: none"> - Este foi o melhor tipo de escada avaliado, porém, ainda com resultado insatisfatório. - Apresentou penetração de grande quantidade de fumaça no interior da escada e retorno para o ambiente do edifício, devido ao dimensionamento inadequado do sistema de exaustão mecânica na antecâmara. - Concluiu que a exaustão mecânica na antecâmara pode ser um perigo adicional para a evacuação das pessoas, pois tende a causar a concentração de fumaça nas rotas de fuga horizontais. - Pressurização da escada ineficiente, em função dos baixos níveis de diferenciais de pressões existentes entre a escada e os átrios.

Fonte: Elaborado pelo autor, adaptado de Seito e Berto (1988, p. 389-390).

Nos testes realizados por Berto em 1988, o uso de fumaça fria para avaliar o desempenho das escadas de emergência, em relação a capacidade de extração de fumaça é uma alternativa disponível para testes em edifícios já construídos, que não gera danos para a edificação, mas não reflete o comportamento real da fumaça em situação de incêndio, pois a sua temperatura é muito baixa se comparada a situação de um incêndio. O uso da fumaça fria permite verificar a estanqueidade (isolamento) a fumaça da escada, porém a fumaça com temperaturas elevadas tem baixa densidade, que geram gradientes de pressão significativos e com isto grande fluuabilidade; logo o efeito chaminé não ocorre com a mesma intensidade na fumaça fria.

Em sua análise Berto já pode constatar que a ventilação natural através de janelas ou de dutos não consegue manter a escada de emergência livre da fumaça, sendo um grave problema para a evacuação das pessoas em situação de incêndio, principalmente para edifícios altos, onde o tempo para a fuga das pessoas aumenta com a altura das construções.

Dos 7 tipos diferentes de escadas de emergência analisados por Berto, a única que apresentou um desempenho melhor em relação aos demais tipos foi a escada pressurizada, porém ainda considerado insatisfatório o desempenho, pois a baixa diferença de pressão no dimensionamento da pressurização permitiu a entrada de fumaça na escada.

Os testes de Berto apresentam constatações que demonstram que:

- a pior situação é uma escada de emergência sem qualquer tipo de ventilação;
- a ventilação natural, independentemente de estar posicionada no corpo da escada ou em duto de ventilação dentro da antecâmara para acesso a escada, não é suficiente para manter a rota de fuga vertical livre da fumaça;
- a ventilação mecânica, por pressão positiva, é a mais indicada para manter a escada livre da fumaça, desde que esteja dimensionada adequadamente o diferencial de pressão;
- a ventilação mecânica, por pressão negativa, é um perigo, pois tende a causar a concentração de fumaça na rota de fuga horizontal.

3.2 PRESSURIZAÇÃO DE ESCADAS

Vieira (2001), durante o Curso de Especialização de Bombeiros para Oficiais, ao estudar a pressurização de escadas de emergência, realizou vistoria em 5 edificações na cidade de Florianópolis, com as características previstas no Quadro 6, com a finalidade de verificar as condições de funcionamento do sistema de pressurização destas escadas.

Quando a escada de emergência é do tipo pressurizada, significa que a ventilação da escada é forçada, por meio do insuflamento de ar, através de um sistema de ventiladores, que

capta ar do exterior da edificação e insuflam no interior da escada por meio de um duto, impedindo desta forma que a fumaça de um incêndio entre na escada ao se abrir a porta da escada, devido à pressão do ar dentro da escada ser maior do que a pressão do ar no corredor que dá acesso para a escada pressurizada.

Quadro 6 – Características das edificações com escadas pressurizadas

Nome da edificação	Tipo de ocupação	Nº de pavimentos	Características da Escada
Edifício Comercial Maia & Monteiro	Comercial	11	Escada e antecâmara com paredes e portas corta-fogo, sem ventilação na antecâmara, e com duto de pressão positiva (pressurização) no corpo da escada.
Edifício Centro Comercial Dom Jaime Câmara	Comercial	12	Escada e antecâmara com paredes e portas corta-fogo, sem ventilação na antecâmara, e com duto de pressão positiva (pressurização) no corpo da escada.
Edifício Residencial Porto Régio	Residencial Multifamiliar	19	Escada e antecâmara com paredes e portas corta-fogo, sem ventilação na antecâmara, e com duto de pressão positiva (pressurização) no corpo da escada.
Beira Mar Shopping Center	Comercial	7	Escada e antecâmara com paredes e portas corta-fogo, com ventilação por exaustão mecânica na antecâmara, e com duto de pressão positiva (pressurização) no corpo da escada.
Edifício Residencial Alberto Entris	Residencial Multifamiliar	15	Escada e antecâmara com paredes e portas corta-fogo, sistema de ventilação mecânica com pressão positiva (pressurização) através de duto na antecâmara.

Fonte: Elaborado pelo autor, adaptado de Vieira (2001, p. 128-137).

O Quadro 7 apresenta um resumo dos resultados das vistorias obtidos por Vieira (2001), em relação ao funcionamento das escadas pressurizadas.

A cidade de Florianópolis foi uma das primeiras a usar o sistema de pressurização em escadas de emergência no estado de SC, porém a grande difusão deste tipo de escada ocorreu na cidade de Balneário Camboriú e região, devido à grande especulação imobiliária e principalmente com a verticalização crescente das edificações residenciais multifamiliares.

Com base nas vistorias realizadas por Vieira em 2001, em 5 edificações existentes na cidade de Florianópolis, ficou constatado que:

- as escadas pressurizadas das edificações vistoriadas foram projetadas com base em norma internacional, como por exemplo a norma britânica BS 5588 publicada pela British Standard Institute (1986), ou com base no conhecimento técnico dos respectivos projetistas, pois a primeira versão da NBR 14880 que trata da pressurização de escadas de emergência, só foi publicada no ano de 2002, e que inclusive é uma cópia traduzida da norma britânica BS 5588;

- existia falta de padronização na concepção das escadas pressurizada, principalmente por não haver na época norma no Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina, que definisse como deveria ser o projeto das escadas pressurizadas;

- os sistemas de pressurização das escadas não funcionaram, devido a 5 fatores chaves:

- má concepção dos projetos;
- falta de mão de obra qualificada para executar os projetos;
- baixa qualidade dos equipamentos e das instalações do sistema;
- falta de manutenção preventiva e corretiva dos sistemas; e
- as pessoas (zelador, síndico, vigia, ...) não sabiam como operar o sistema.

Quadro 7 – Resumo dos resultados das vistorias em escadas pressurizadas realizada por Vieira em 2001

Nome da edificação	Condições de funcionamento da escada pressurizada
Edifício Comercial Maia & Monteiro	<ul style="list-style-type: none"> - Teste do sistema de pressurização prejudicado, pois o zelador do edifício não sabia operar o sistema de pressurização da escada. - Damper de alívio de sobre pressão não foi localizado. - A casa de máquinas do sistema de pressurização virou um depósito de materiais. - Não tinha uma rotina de manutenção do sistema de pressurização da escada.
Edifício Centro Comercial Dom Jaime Câmara	<ul style="list-style-type: none"> - Teste do sistema de pressurização prejudicado, pois o zelador do edifício não sabia operar o sistema de pressurização da escada. - O painel de comando do sistema de pressurização na casa de máquina estava desligado, ou seja, o sistema de pressurização da escada nunca seria ligado em caso de incêndio. - Damper de alívio de sobre pressão não foi localizado. - Não tinha uma rotina de manutenção do sistema de pressurização da escada. - Instalações elétricas da casa de máquinas de pressurização em péssimas condições, necessitando de manutenção.
Edifício Residencial Porto Régio	<ul style="list-style-type: none"> - A vistoria ficou prejudicada, pois o edifício estava na fase final de construção. - O teste de funcionamento do sistema de pressurização também ficou prejudicado devido o edifício ainda não estar com a obra totalmente concluída na época.
Beira Mar Shopping Center	<ul style="list-style-type: none"> - O sistema de pressurização da escada era do tipo estágio único, sempre ligado, em funcionamento, porém subdimensionada a vazão de ar para a ventilação. - Damper de alívio de sobre pressão não foi localizado. - Possuía equipe de manutenção do sistema de pressurização, com responsável técnico.
Edifício Residencial Alberto Entris	<ul style="list-style-type: none"> - A captação do ar para a pressurização da escada erra dentro do pavimento garagem, e não no exterior da edificação. - A pessoa responsável não sabia operar o sistema de pressurização. - Damper de alívio de sobre pressão não foi localizado. - O sistema de pressurização não funcionou quando acionado no teste pelo zelador. - Não tinha uma rotina de manutenção do sistema de pressurização da escada.

Fonte: Elaborado pelo autor, adaptado de Vieira (2001, p. 128-137).

3.3 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL APLICADA À PREVENÇÃO DE INCÊNDIOS

Braga e Campos (2010, p. 1), explicam que “grande esforço tem sido empreendido no sentido de correlacionar o tempo necessário para escape em edificações com o modelamento da evolução do incêndio para, a partir daí, validar e aprimorar as normas técnicas”, para isso,

avaliaram a influência da fumaça na evacuação das pessoas de edifícios altos e a eficiência das prescrições normativas da NBR 9077 - Saídas de emergência em edifícios.

A avaliação de Braga e Campos (2001) foi realizada através de simulação computacional de incêndio, empregando o software Fire Dynamics Simulator (FDS) desenvolvido pelo National Institute of Standards and Technology (NIST), para validação do modelo de propagação do incêndio, e o software FDS+Evac (FDS with Evacuation) para simular o comportamento das pessoas em fuga. Para a simulação computacional foi criado um prédio comercial virtual de 12 pavimentos, com uma altura de 30,8 m, com uma área de 730 m² por pavimento e área total aproximada de 8.730 m². Foi previsto uma escada à prova de fumaça no prédio (com paredes e portas corta-fogo, acesso por antecâmara com ventilação natural por dutos de entrada de ar e saída de fumaça), com largura de 1,10 m, conforme as especificações da NBR 9077 (2001).

Braga e Campos (2010), previram na simulação computacional, que para a fuga, as pessoas teriam que percorrer uma distância de 45 m dentro do pavimento para chegar até a porta da escada. Também foi previsto uma densidade populacional de 1 pessoa/7m² de piso, com uma população de 104 pessoas por pavimento, e uma capacidade de fluxo de pessoas por unidade de passagem (55 cm) de 60 pessoas/min para a escada e de 100 pessoas/min para as portas e corredores, conforme previsto na NBR 9077.

Braga e Campos (2010), advertem que, apesar da simulação computacional de incêndios ser uma ferramenta poderosa para estimar o desempenho da edificação em situação de incêndio, a engenharia de segurança contra incêndio é uma ciência complexa, onde existem muitos processos físicos e químicos envolvidos no incêndio, além de incertezas decorrentes de algumas variáveis, tais como, o comportamento humano, condição de portas e aberturas, quantidade, tipo e disposição dos materiais combustíveis no ambiente, localização, evolução e propagação do fogo, eficiência dos sistemas de proteção contra incêndio instalados, entre outros. Assim, a condição aleatória do fogo pode gerar resultados imprecisos, que necessitam da realização de ensaios para validação do modelo de simulação computacional.

A primeira simulação realizada por Braga e Campos (2010) avaliou apenas a evacuação das pessoas, sem fogo, obtendo como resultado uma estimativa de tempo total de 23 min para evacuação do prédio, e verificou que nenhum dos andares foi evacuado em menos de um minuto.

Na segunda simulação realizada por Braga e Campos (2010) avaliou-se a evacuação das pessoas em situação de incêndio, para verificar a influência da fumaça no comportamento de fuga. Nesta simulação, durante a evacuação das pessoas, o movimento de saída pela escada

permaneceu com as portas abertas durante toda a simulação. A fumaça influencia sobremaneira na evacuação das pessoas, reduzindo bruscamente a velocidade de deslocamento, devido aos efeitos da fumaça nas pessoas de redução da visibilidade e a toxicidade dos gases.

As conclusões de Braga e Campos (2010), nas simulações de incêndios realizadas com software FDS+Evac, foram:

- a implantação de legislações e normas de segurança contra incêndio, baseadas em desempenho, exige o uso de ferramentas para validação de parâmetros normativos e testes de aceitação de soluções na área de saídas de emergência;

- a adoção de soluções inovadoras na área da engenharia de segurança contra incêndio, vai exigir sólidos conhecimentos sobre a dinâmica do fogo e do comportamento das pessoas em fuga, para a construção de hipóteses adequadas à realidade;

- no estudo de caso realizado, observou-se que a largura mínima exigida para a escada, conforme a prescrição da NBR 9077, não comportou a capacidade de fluxo para a evacuação das pessoas dos pavimentos em um minuto;

- num incêndio, como o simulado, com teto baixo, grande produção de fumaça e com as portas da escada aberta, as rotas de fuga ficaram bloqueadas pela fumaça, dificultando e até impedindo a fuga das pessoas;

- os resultados da simulação indicam a necessidade de estudos mais aprofundados, no sentido de revisão dos critérios prescritivos atualmente admitidos para as saídas de emergência e a adoção de parâmetros de desempenho.

A utilização de simulação computacional para avaliar o comportamento e os efeitos do incêndio em edificações se intensificou nos últimos 10 anos, principalmente pelo baixo custo desta ferramenta e pelo acesso a supercomputadores, que são necessários para fazer o processamento pesado dos softwares usados na simulação.

Braga e Campos em 2010, ao avaliar a evacuação de pessoas num edifício de 12 pavimentos, utilizando uma escada de emergência enclausurada à prova de fumaça, conforme prescreve a NBR 9077, por simulação em computador, constataram que é necessário revisar os critérios prescritivos atualmente admitidos para as saídas de emergência, pois a fumaça afeta drasticamente a evacuação das pessoas em situação de incêndio, e a escada de emergência para uma edificação com 12 pavimentos atualmente não é adequada.

O edifício avaliado por Braga e Campos é considerado uma edificação alta, conforme prevê a NBR 9077, por ter uma altura de 30,8 m, porém ainda é uma altura baixa se for comparado com os atuais prédios em SC com mais de 150 m de altura.

O comportamento da fumaça e a sua extração em caso de incêndio é carente de estudos nos edifícios altos com altura superior a 150 metros, tanto no caso da ventilação natural como para a ventilação mecânica das escadas de emergência.

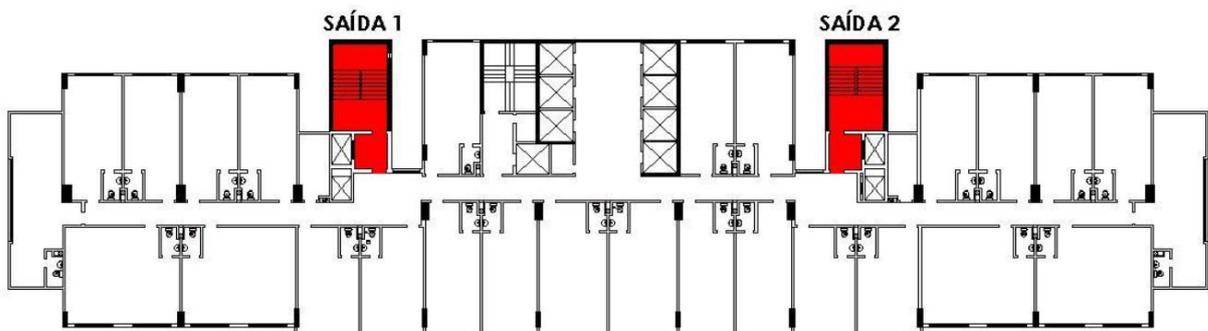
3.4 A QUESTÃO DO ESCAPE EM EDIFÍCIOS ALTOS: A INFLUÊNCIA DA FUMAÇA DE INCÊNDIO NA PROTEÇÃO DA VIDA

Alves (2010), em sua tese de doutorado avaliou a influência da ventilação natural, através de janelas na fachada da edificação, na evacuação de pessoas de edifícios altos; para isto, realizou 6 simulações computacionais de incêndio, empregando o software FDS (Fire Dynamics Simulator) do Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia dos Estados Unidos da América (NIST), para avaliar a propagação do incêndio, e o software FDS+Evac (FDS with Evacuation) para avaliar o comportamento das pessoas na evacuação durante o incêndio.

Para as simulações em computador, Alves (2010) criou 2 edifícios virtuais, usando como referência as plantas do edifício Commerzbank Tower em Frankfurt na Alemanha, e do edifício do Bloco C do Complexo Brasil 21 – Business Center Park em Brasília. Ambos os edifícios atendem as prescrições normativas da NBR 9077 (2001) em relação as saídas de emergência (escadas).

O Bloco C do Complexo Brasil 21 é um edifício comercial com escritórios, a forma predominante do edifício é retangular, com 65 m de altura, tem 2 escadas à prova de fumaça pressurizadas, o pé-direito do pavimento tem 2,40m, possui sistema de ar condicionado central, as janelas dos andares de escritórios são do tipo maxim-ar, a distância máxima a ser percorrida até a escada é de 25 m. O número de ocupantes previstos por pavimento foi de 146 pessoas. A Figura 30 ilustra a planta baixa do Bloco C do Complexo Brasil 21 usada na simulação.

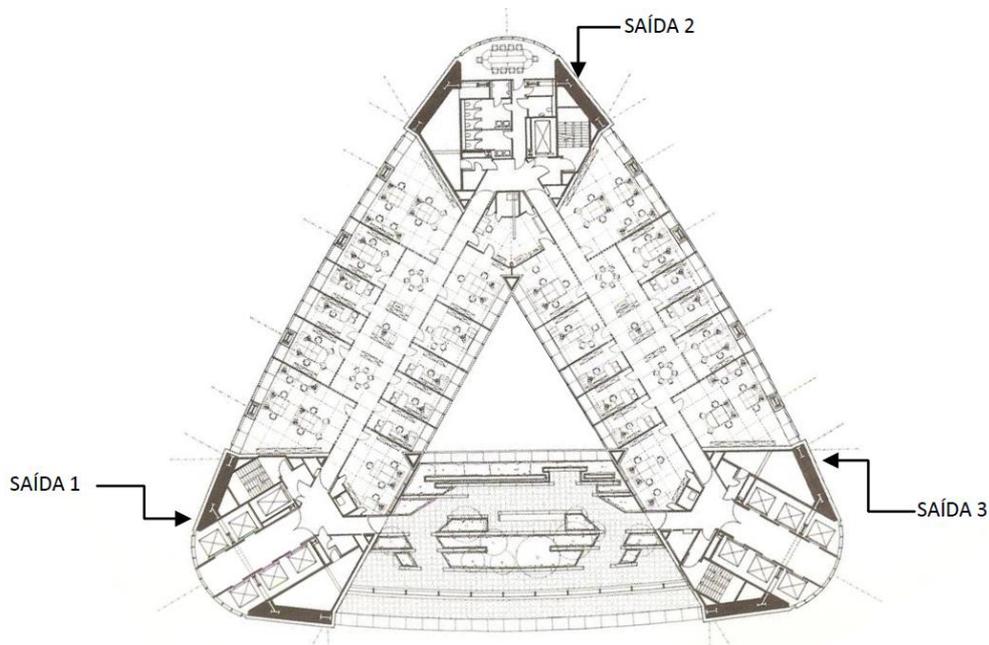
Figura 30 – Planta baixa do edifício do Bloco C do Complexo Brasil 21



Fonte: Alves (2010, p. 204).

O Commerzbank Tower também é um arranha-céu verde, ecologicamente correto, devido aos jardins suspensos na arquitetura e à aplicação de tecnologia para reduzir o consumo de energia, sua ocupação é comercial com escritórios, a forma predominante do edifício é de um triângulo equilátero, com 259 m de altura, a área de trabalho dos pavimentos é 1.035 m², possui 3 escadas à prova de fumaça pressurizadas, o pé-direito do pavimento tem 2,40m. O número de ocupantes previstos por pavimento foi de 130 pessoas. A Figura 31 ilustra a planta baixa do edifício Commerzbank Tower usada na simulação.

Figura 31 – Planta baixa do edifício Commerzbank Tower



Fonte: Alves (2010, p. 205).

Alves (2010) realizou 3 tipos diferentes de simulação para cada edifício:

- na primeira simulação, realizou somente a evacuação das pessoas, sem incêndio, no pavimento de maior lotação;
- na segunda simulação, realizou a evacuação das pessoas, com incêndio, no pavimento de maior área, sem a entrada de ventilação externa; e
- na terceira simulação, realizou a evacuação das pessoas, com incêndio, no pavimento de maior área, com a entrada de ventilação natural externa através da abertura total das janelas de maxim-ar na fachada.

Na realização da simulação, Alves (2010) considerou as portas das salas comerciais, do pavimento inteiro, totalmente abertas.

As conclusões de Alves (2010), nas simulações de incêndios realizadas com software FDS+Evac, foram:

- a ventilação natural, através da abertura das janelas, aplicada ao pavimento, influencia no movimento da fumaça no interior da edificação;
- todas as simulações de incêndio e evacuação estão diretamente ligadas ao tempo de movimento das pessoas dentro do pavimento;
- o tempo de evacuação das pessoas é influenciado pela presença da fumaça dentro do edifício;
- a fumaça pode prejudicar a saída segura dos ocupantes do prédio, dependendo das condições de visibilidade, temperatura e propagação nos ambientes;
- a toxidade da fumaça também influencia na velocidade de deslocamento das pessoas no edifício;
- a altura da camada de fumaça nos ambientes fechados (sem ventilação) são mais desfavoráveis;
- a forma do edifício pode influenciar no movimento interno da fumaça e na entrada de ar natural através das aberturas na fachada, posicionadas de acordo com a incidência dos ventos e da trajetória solar;
- a aplicação da ventilação natural em um só ponto da edificação, demonstrou na simulação, que dependendo do posicionamento das escadas em relação à entrada de ar no edifício, prejudica algumas saídas e favorece outras; e
- de maneira geral, o posicionamento correto da ventilação pode ser favorável no controle da fumaça.

Alves em 2010, ao simular em computador incêndios em 2 edifícios, um de 65 m de altura e o outro com 259 m de altura, avaliou a influência da ventilação natural dos ambientes do pavimento na propagação da fumaça e na evacuação das pessoas. Em sua análise um ponto que não foi observado é a influência do aumento da intensidade dos ventos com a elevação da altura da edificação. Nos pavimentos mais altos, abrir janelas para ventilar ambientes muitas vezes é impraticável devida a intensidade dos ventos, logo, a tendência é de se manter as janelas fechadas, não colaborando na extração da fumaça durante o incêndio.

Ventilar os ambientes onde está ocorrendo o incêndio facilita a extração da fumaça, mas ao mesmo tempo aumenta a oferta de oxigênio para o processo de combustão, aumentando a severidade do incêndio; logo, esta ventilação precisa ser muito bem analisada e dimensionada para que a ventilação realmente possa auxiliar na extração da fumaça, contribuindo o mínimo possível para a propagação do incêndio, bem como para o seu desenvolvimento.

3.5 RELATÓRIO DE ANÁLISE DAS ESCADAS PRESSURIZADAS E SEU EFETIVO FUNCIONAMENTO NO ESTADO DE SANTA CATARINA

Silva (2013), explica que a escada de emergência tipo pressurizada possui vários componentes mecânicos, eletroeletrônicos e automatizados, que são essenciais para o seu funcionamento, e que estes componentes estão sujeitos à falha devido as suas características e complexidade. Com base nesta situação de ‘fragilidade’ dos componentes da escada pressurizada, e considerando que a saída de emergência não pode falhar em caso de incêndio, Silva no ano de 2013 realizou um estudo buscando verificar o funcionamento das escadas pressurizadas nas edificações já aprovadas pelo Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina.

Para verificar o funcionamento das escadas pressurizadas Silva realizou 21 vistorias nas cidades de Balneário Camboriú, Itajaí e Blumenau, onde se concentra a maior quantidade de edificações com este tipo de escada de emergência no estado de Santa Catarina. Nas vistorias foi usado como referência a NBR 14880, publicada em 2002, que trata das saídas de emergência em edifícios – escadas de segurança – controle de fumaça por pressurização; esta norma especifica princípios e parâmetros gerais de funcionamento para manter livres da fumaça, através da pressurização, as escadas de segurança.

Com base na NBR 14880, Silva (2013) checkou 17 itens (componentes) em cada uma das 21 vistorias realizadas nas edificações com escadas pressurizadas, para verificar o seu funcionamento. O Quadro 8 apresenta um resumo dos resultados das vistorias obtidos por Silva, em relação ao funcionamento das escadas pressurizadas.

Silva (2013), conclui em seu relatório que apesar do conceito do sistema de pressurização para a escada de emergência ser simples na teoria, na prática a execução do sistema possui muitas etapas e fases de um processo que podem falhar, conforme ficou constatado nas vistorias realizadas, comprometendo a rota de fuga vertical das pessoas em caso de um incêndio. Na teoria, a escada pressurizada tem a concepção mais segura, porém, se e somente se funcionar; pois em caso de falha, torna-se uma escada sem ventilação para a exaustão da fumaça que adentre o seu interior.

Silva ainda sugere que a escada pressurizada deve prever além da ventilação forçado, um sistema de ventilação natural como uma forma alternativa para a extração da fumaça, em caso de falha, do sistema de pressurização.

De acordo com a NBR 9077, para um edifício por exemplo com 50 pavimentos e uma altura de 150 m, seria necessário que a seção interna do duto de ventilação tivesse uma área de

5,25 m² para cada duto (de entrada de ar e de saída de fumaça) da escada enclausurada à prova de fumaça, o que é inviável de ser construído na prática, pois a soma das áreas dos 2 dutos nos 50 pavimentos seria de 525 m², gerando um custo altíssimo na construção da edificação. Além do que, a falta de comprovação através de testes e ensaios da eficiência destes dutos de ventilação na extração da fumaça para esta altura é questionável.

Quadro 8 – Resumo dos resultados das vistorias em escadas pressurizadas realizado por Silva em 2013

Componente vistoriado	Total	Condições de funcionamento da escada pressurizada
Gerador de emergência ou nobreak	1 (4,8%)	Não funciona
Sistema de alarme e detecção	11 (52,4%)	
Central de alarme que monitora o funcionamento do sistema de pressurização	7 (33,3%)	
Grelha do duto de entrada de ar a ser pressurizado	5 (23,8%)	Funciona, mas apresenta falhas; com itens que se relacionam com uma possibilidade de falha maior, já que não possui a execução prevista na NBR 14880.
Duto de entrada de ar a ser pressurizado	5 (23,8%)	
Compartimento do grupo moto-ventilador	4 (19%)	
Compartimento do gerador de emergência ou nobreak	4 (19%)	
Grelha, dumpers ou aberturas para o escape do ar pressurizado para o exterior da edificação	18 (85,7%)	
Dumpers de alívio de sobre pressão	17 (81%)	
Painel de comando do grupo moto-ventilador	6 (28,6%)	
Painel de comando remoto (na recepção ou hall de entrada) do grupo moto-ventilador	8 (38,1%)	Funciona, mas pode apresentar falhas; em algum de seus quesitos perdendo a eficiência do sistema como um todo.
Porta corta-fogo P-60 ou P-90	1 (4,8%)	
Grelha de insuflamento de ar pressurizado dentro da escada de emergência	1 (4,8%)	
Manual, plano ou caderno de manutenção do sistema e pressurização	18 (85,7%)	
Proprietário, síndico ou zelador sabe operar o sistema de pressurização	17 (81%)	
Detector de fumaça na sala do moto-ventilador e na sala do gerador de emergência	6 (28,6%)	
Sistema de pressurização é automatizado, com horários pré-definidos para o seu funcionamento e teste	2 (9,5%)	

Fonte: Elaborado pelo autor, adaptado de Silva (2013, p. 12).

Em suma, os resultados das vistorias de funcionamento das escadas pressurizadas realizados por Silva em 2013, demonstraram os mesmos problemas já apontados por Vieira (2001), e a eficiência da ventilação mecânica por pressurização (pressão positiva) das escadas de emergência depende dos seguintes fatores:

- o projeto tenha um modelo de concepção correta, baseado em norma técnica;
- a mão de obra para a execução do projeto seja qualificada;
- os materiais, equipamentos e a automação do sistema sejam de boa qualidade, preferencialmente certificados;
- exista manutenção preventiva e corretiva do sistema de pressurização; e

- exista um treinamento das pessoas que fazem a vigília do prédio, para que saibam operar e identificar problemas básicos no sistema de pressurização, mesmo sendo automatizado o funcionamento do sistema de pressurização.

3.6 CAPACIDADE DE EXAUSTÃO DE FUMAÇA EM DUTOS DE VENTILAÇÃO NATURAL DAS ESCADAS DE EMERGÊNCIA

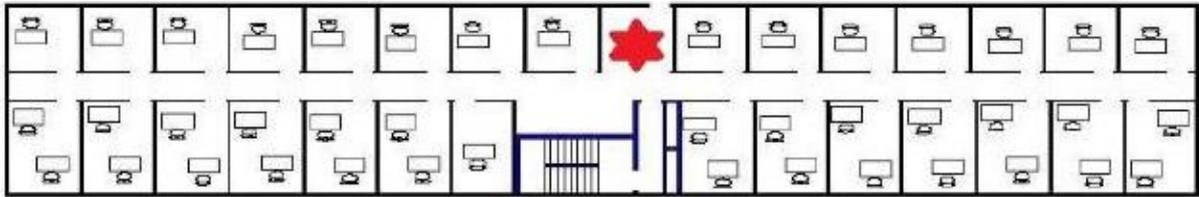
Campos e Siqueira (2016) avaliaram a efetividade do sistema de ventilação natural de 2 tipos de escadas de emergência, em relação a capacidade de exaustão de fumaça em caso de incêndio na edificação, comparando o desempenho de uma escada com um duto de ventilação para a extração de fumaça, com outra escada de emergência com 2 dutos de ventilação para a extração de fumaça. A avaliação foi através de simulação computacional, utilizando o software FDS desenvolvido pelo NIST, para simular o escoamento da fumaça pelos dutos de ventilação das escadas de emergência.

Na simulação computacional, Campos e Siqueira (2016, p. 2), consideraram que para a fumaça típica de mobília em madeira, com enchimento de espuma, revestimento em tecido e plástico, “o escoamento de fumaça a 400 °C pela parede do duto passa ao regime turbulento com cerca de 1 m de altura”.

Para as simulações computacionais, Campos e Siqueira (2016), projetaram uma edificação virtual, com ocupação comercial, com 12 pavimentos e altura de 33,60 m. Para a edificação foram previstas 2 situações, cada qual com um modelo de escada de emergência diferente. Numa simulação foi prevista uma escada à prova de fumaça, atendendo as prescrições da NBR 9077, com 2 dutos para ventilação na antecâmara (um duto para a entrada de ar junto ao piso, e outro duto para a saída de fumaça junto ao teto). Na outra simulação foi prevista uma escada enclausurada, com apenas um duto para a saída de fumaça junto ao teto na antecâmara, conforme prescrição da IN 009 do Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina.

A análise do escoamento da fumaça ocorreu no duto de saída de fumaça, com uma altura total de 36,60 m, com área da seção transversal de 1,26 m² (área = 12 x 0,105 = 1,26 m²) e dimensões internas do duto de 56 x 224 cm. A fumaça produzida equivale ao pico de queima de uma poltrona com revestimento de espuma. A origem do incêndio foi localizada numa sala próximo a escada, no piso térreo; e em cada cenário simulado foram posicionados 21 pontos de medição de temperatura e velocidade da fumaça, ao longo do duto de saída de fumaça e no seu topo. A Figura 32 ilustra a planta baixa do prédio usado na simulação.

Figura 32 – Planta baixa do prédio simulado com indicação da origem do incêndio.



Fonte: Campos e Siqueira (2016, p. 3).

As conclusões de Campos e Siqueira (2016, p. 3), na simulação foram:

- constatou-se que no caso da escada com apenas um duto na antecâmara, a velocidade da fumaça foi menor do que a da escada com 2 dutos na antecâmara; já a temperatura de saída da fumaça no topo do duto em cada caso, foram de 69,45 °C para a antecâmara com 2 dutos e de 88,56 °C para a antecâmara com um duto;

- a adoção de antecâmara ventilada naturalmente apenas por um duto de saída de fumaça, torna o sistema de ventilação ainda menos eficiente, em relação à capacidade de extrair fumaça da antecâmara; e

- a vazão de fumaça do sistema de ventilação com apenas um duto fica aproximadamente 28% menor do que no caso da antecâmara com 2 dutos (um para entrada de ar e outro para saída de fumaça).

A pesquisa de Campos e Siqueira em 2016, através de simulação computacional de incêndio em um edifício de 12 pavimento com altura de 33,60 m, para analisar o desempenho de 2 modelos de escadas de emergência, uma escada enclausurada à prova de fumaça (conforme a NBR 9077) e uma escada enclausurada (conforme a IN 009), confirmou o resultado da pesquisa realizada por Berto (1988), ou seja, a escada com 2 dutos para a extração de fumaça na antecâmara tem uma eficiência melhor em comparação a escada com apenas um duto para a saída da fumaça.

Os resultados da pesquisa de Campos e Siqueira indicam que o uso de um duto para a saída da fumaça e outro para a entrada de ar, dentro da antecâmara otimizam o efeito chaminé, com uma vazão de 28% maior do que a da escada com antecâmara com apenas um duto para a saída de fumaça.

As conclusões de Campos e Siqueira demonstram que é necessária uma reavaliação do modelo usado para a concepção da escada enclausurada prevista na IN 009 do CBMSC, para que a segurança das pessoas não seja comprometida em situação de incêndio, ao se usar as saídas de emergência, devido a deficiência na extração da fumaça.

3.7 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE INCÊNDIO EM EDIFICAÇÕES MULTIFAMILIARES COM ESCADA NÃO ENCLAUSURADA

Lemonje et al. (2017) explicam que as edificações residenciais privativas multifamiliar populares de baixo padrão, com até 5 pavimentos, são construídas sem elevadores, para baixar o custo da construção, e com isso a escada é o único meio de acesso a todos os pavimentos, sendo geralmente uma escada do tipo não enclausurada, e portanto não existe compartimentação vertical entre os pavimentos da edificação, o que permite uma rápida propagação do incêndio e da fumaça entre todos os pavimentos pela própria escada.

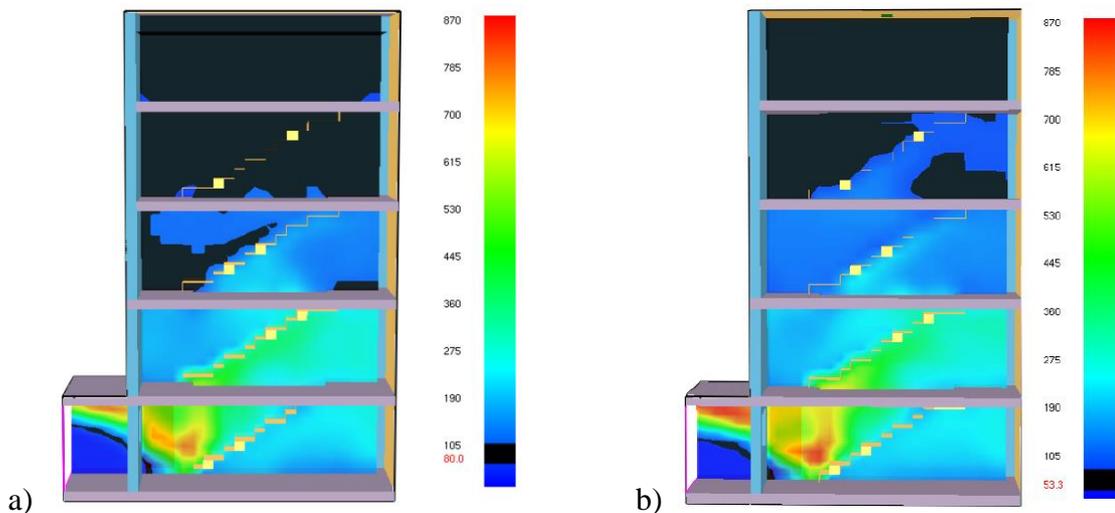
A pesquisa de Lemonje et al. (2017) teve como objetivo propor algumas medidas mitigadoras, com o objetivo de aumentar a segurança dos usuários das edificações com escada comum, tais como: a utilização de portas corta-fogo na entrada dos apartamentos e a adoção de um sistema de ventilação forçada (exaustão mecânica), instalada na extremidade superior da escada comum.

Lemonje et al. (2017), para avaliar a efetividade das medidas mitigadoras propostas, realizaram simulações em computador de um incêndio, iniciando na sala de 10,8 m² de um apartamento no pavimento térreo de um edifício residencial multifamiliar com 5 pavimentos e 4 apartamentos por andar, com uma escada não enclausurada, avaliando a propagação da fumaça gerada para 2 casos: sem as medidas mitigadoras propostas e com as medidas. Para a simulação foram utilizados os softwares FDS (para a simulação propriamente dita) associado ao Smokeview (interface de visualização do desenvolvimento do incêndio) desenvolvidos pelo NIST, e o software Pyrosim para a modelagem gráfica da edificação.

Para verificar o efeito da exaustão mecânica na propagação da fumaça, considerou-se que todos os apartamentos não tinham portas para acesso a escada (só parede), exceto o apartamento no pavimento térreo (origem do incêndio) onde foi mantida uma porta aberta. O suprimento de ar foi previsto pela entrada da edificação no pavimento térreo. Utilizou-se uma carga de incêndio de 300 MJ/m² para o apartamento no pavimento térreo onde foi considerado como a origem do incêndio. A simulação do incêndio para cada caso analisado teve duração de 260 segundos.

A Figura 33a ilustra o perfil vertical da temperatura dentro da escada comum sem exaustão mecânica ao longo da simulação do incêndio, atingindo uma temperatura de 80°C no topo da escada comum. Já a Figura 33b ilustra o perfil vertical da temperatura dentro da escada comum com exaustão mecânica no topo da escada, durante a simulação do incêndio, com uma vazão de 0,25 m³/s, atingindo uma temperatura de 53,3°C no topo da escada.

Figura 33 – Perfil de temperatura do modelo: a) sem exaustão mecânica, b) com exaustão mecânica.



Fonte: Lemonje et al. (2017, p. 6-7).

Para analisar o efeito da inclusão das portas corta-fogo, as mesmas foram incluídas na entrada de todos os apartamentos, e retirado do modelo a exaustão mecânica, para verificar apenas a influência do tipo de porta no desenvolvimento do incêndio. Foi previsto uma carga de incêndio para todos os apartamentos de 300 MJ/m². Numa simulação foram usadas portas de madeira convencional na entrada dos apartamentos e na outra simulação foram usadas portas corta-fogo metálicas.

A simulação com portas de madeira convencional apresentou uma propagação intensa de calor, chamas e fumaça. Já a simulação com instalação das portas corta-fogo apresentou resultados bem diferentes, com redução acentuada da propagação da fumaça pela edificação.

Segundo Lemonje et al. (2017), a simulação utilizando portas convencionais de madeira desenvolveu temperaturas acima de 600°C na frente do apartamento incendiado e de mais de 200°C ao longo da escada, com a presença de labaredas. O modelo com utilização das portas corta-fogo apresentou apenas um aquecimento junto a porta do apartamento incendiado próximo de 80°C.

As conclusões de Lemonje et al. (2017), nas simulações foram:

- a configuração arquitetônica das edificações residências multifamiliar com até 5 pavimentos, com escada comum, favorece a propagação de um incêndio e o bloqueio pelas chamas da única rota de fuga vertical disponível;

- a proposta de incluir a extração forçada de fumaça no topo da escada comum e o uso de portas corta-fogo na entrada dos apartamentos com acesso direto para a escada, é plenamente possível de ser executada;

- a utilização de uma exaustão mecânica na parte superior da escada comum, a fim de remover a fumaça e os gases aquecidos num incêndio, apresentou resultado positivo, mas deve ser melhor estudada, pois uma exaustão mecânica mal dimensionada pode aumentar a oxigenação do ambiente, favorecendo o desenvolvimento do incêndio;

- o uso de portas corta-fogo na entrada dos apartamentos apresentou resultados excelentes, com redução acentuada da propagação da fumaça pela escada da edificação e um bom isolamento térmico entre a escada e o apartamento incendiado.

Lemonje et al. (2017) na análise por simulação computacional do comportamento do incêndio numa edificação com até 5 pavimentos, com escada comum (sem enclausuramento), demonstra como este modelo de escada de emergência é problemático, devido a rápida propagação da fumaça pela escada de emergência, sendo um risco para a fuga das pessoas em situação de incêndio.

A proposta de Lemonje et al. (2017) de incluir portas corta-fogo na entrada dos apartamentos que dão acesso a escada e a colocação de um sistema de exaustão mecânica no topo da escada, melhoraram o desempenho da escada, conforme ficou indicado e demonstrado na simulação realizada.

A fim de diminuir os custos, no lugar da exaustão mecânica no topo da escada, poderia ser avaliado a possibilidade de se fazer esta exaustão no topo da escada por meio de ventilação natural, com a inserção de um alçapão para tiragem da fumaça, a exemplo do que já é usado no topo dos dutos de saída de fumaça das escadas à prova de fumaça.

4 CONCLUSÃO

Apesar da pouca literatura e pesquisas disponíveis sobre o desempenho da extração de fumaça nas escadas de emergência na gestão dos riscos durante os incêndios em edifícios altos, os objetivos propostos no presente trabalho foram atingidos.

Num incêndio são vários os riscos que precisam ser gerenciadas, a fim de reduzir a probabilidade de ocorrência de danos e a extensão das suas consequências. Alguns riscos que precisam ser gerenciados num incêndio são:

- a deficiência da extração da fumaça das escadas de emergência;
- a estanqueidade à fumaça das escadas de emergência;
- a velocidade de propagação da fumaça e do próprio incêndio;
- a quantidade e distribuição da carga de incêndio;
- a avaliação de perdas humanas, materiais, operacionais, institucionais;
- a probabilidade do incêndio passar de uma edificação para outra, entre outros riscos.

O levantamento da altura das edificações, demonstrou que no estado de SC existem 25 prédios já construídos ou em fase de construção com altura superior a 150 m. Que dentre estes prédios estão os 9 edifícios mais altos atualmente do país, e um deles ultrapassando a marca dos 270 m de altura, sendo que todas estas construções estão concentradas na cidade de Balneário Camboriú.

O nível da construção civil em SC, projetando e executando edificações com mais de 150 m de altura, é uma marca a ser comemorada, porém, ficou demonstrado na pesquisa deste trabalho, a necessidade de se reavaliar os critérios de concepção, dimensionamento, especificação, parâmetros e diretrizes para a elaboração dos projetos de segurança contra incêndio e pânico, principalmente no que diz respeito as saídas de emergência.

As saídas de emergência são o principal sistema de segurança contra incêndios de uma edificação, pois são as elas que vão garantir a fuga segura das pessoas e a entrada das equipes de socorro nos incêndios; mas, o seu pleno funcionamento depende do bom desempenho de todos os sistemas e medidas de segurança contra incêndio da edificação, que são interdependentes. Por exemplo, a saída de emergência depende do sistema de iluminação de emergência, da sinalização para abandono do local, do sistema de alarme e detecção de incêndio, do plano para evacuação de emergência, entre outros sistemas.

Conforme a revisão bibliográfica, o movimento dos gases dentro da edificação vai depender dos gradientes de temperatura gerados pelo incêndio, do layout da edificação, da

climatização interna, da quantidade e distribuição dos materiais combustíveis, da taxa de ventilação dos ambientes da edificação, entre outros fatores.

Na revisão bibliográfica, para compreender os princípios da ventilação ficou explicado que para ocorrer a ventilação natural é necessário um diferencial de pressão, que pode ocorrer pela ação do vento (diferencial de pressão dinâmico) ou pela diferença de temperatura entre ambientes, que gera uma diferença da densidade dos gases e uma consequente diferença de pressão estática, também chamado de efeito chaminé. Já a ventilação mecânica ou forçada é aquela que provoca o movimento dos gases pela ação de equipamentos, tipo ventiladores (pressão positiva) ou exaustores (pressão negativa).

As escadas de emergência que usam janelas ou dutos para fazer a sua ventilação natural, possuem uma baixa manutenção, mas a extração da fumaça em caso de incêndio depende de vários fatores, que não podem ser controlados, tais como:

- das condições climáticas, da estação do ano;
- da incidência, intensidade, e direção dos ventos;
- da incidência do sol;
- da climatização interna da edificação;
- da diferença de temperatura entre os ambientes internos e externos da edificação;
- entre outros fatores.

A ventilação mecânica por ser um sistema de ventilação totalmente controlado e previsto em normas técnicas como a NBR 14880 (2014) e a BS 5588 (1986), é uma alternativa eficiente para manter as escadas de emergência estanques e livres da fumaça do incêndio, desde que o sistema de pressurização atenda algumas condições:

- o projeto tenha um modelo de concepção correta, baseado em norma técnica;
- a mão de obra para a execução do projeto seja qualificada;
- os materiais, equipamentos e a automação do sistema sejam de boa qualidade, preferencialmente certificados;
- exista manutenção preventiva e corretiva do sistema de pressurização; e
- exista um treinamento das pessoas que fazem a vigília do prédio, para que saibam operar e identificar problemas básicos no sistema de pressurização, mesmo sendo automatizado o funcionamento do sistema de pressurização.

Para arranha-céus, a exemplo do Burj Khalifa Bin Zayid em Dubai, com 826 m de altura e 160 pavimentos, a escada de emergência usou o sistema de ventilação por pressurização, bem como foram previstas no prédio áreas de refúgio pressurizadas a cada 25 pavimentos, para que as pessoas possam descansar e aguardar pelo resgate em caso de incêndio.

Na revisão bibliográfica foi possível comparar os diferentes tipos de escadas de emergência previstos na norma NBR 9077 da ABNT e na Instrução Normativa 009 do Corpo de Bombeiros Militar de SC. Os modelos são parecidos, até porque a IN 009 tem como referência a NBR 9077, com exceção da escada enclausurada prevista na IN 009, com apenas um duto para a saída da fumaça na antecâmara, que não existe na NBR 9077.

A análise de estudos de casos, realizados por outros pesquisadores que envolvem o desempenho da extração de fumaça nas escadas de emergência em prédios altos, foi a forma encontrada neste trabalho para fazer esta pesquisa, devido ao curto espaço de tempo disponibilizado, de apenas 4 meses. E na busca por fontes de consulta, constatou-se a carência que existe em se estudar o desempenho da extração da fumaça nas escadas de emergência de edifícios altos, principalmente para aqueles com altura superior a 150 m. Existem poucas pesquisas nesta área, para avaliar o desempenho da extração da fumaça das rotas de fuga verticais.

Nos casos analisados, a forma mais utilizada pelos pesquisadores para estudar o comportamento dos incêndios nas edificações foi a simulação por computador, devido ao baixo custo e risco. Além da facilidade de se reproduzir vários tipos de situações e simulações. Porém, a configuração dos softwares usados nas simulações em computador, requer domínio e supercomputadores para o seu processamento. Dependendo das configurações das simulações do incêndio, o processamento pode levar alguns dias para reproduzir alguns poucos minutos do comportamento do incêndio, devido a todas as variáveis e cálculos complexos envolvidos.

Através dos estudos de caso, foi possível constatar que a escada de emergência comum, prevista na NBR 9077, é ineficiente, sem qualquer forma de ventilação, permitindo a livre circulação da fumaça em seu interior, facilitando a propagação do incêndio e da fumaça para os demais pavimentos, não oferecendo segurança para a evacuação das pessoas em incêndio.

Em relação a escada enclausurada protegida, prevista na NBR 9077, os estudos de casos também demonstraram que a sua ventilação natural por janelas é insatisfatória, não conseguindo manter a escada livre da fumaça, não sendo adequada para a evacuação das pessoas no incêndio.

A escada enclausurada, prevista na IN 009 do Corpo de Bombeiros Militar de SC, com apenas um duto para a saída da fumaça na antecâmara, com ventilação natural, também mostrou-se insatisfatória nos estudos de caso, para a extração da fumaça num incêndio, permitindo que a fumaça entrasse dentro da escada de emergência.

Na avaliação da escada enclausurada à prova de fumaça, prevista na NBR 9077, para os edifícios com altura superior a 30 m, com um duto para a entrada de ar e outro para a saída de fumaça dentro da antecâmara, as simulações em computador realizadas nos estudos de caso,

mostraram que dentre os modelos de escada com ventilação natural, este o tipo de escada de emergência com melhor ventilação e com maior capacidade de extração da fumaça, porém, ainda permite que a fumaça entre dentro da escada, o que compromete a fuga das pessoas numa situação de incêndio.

No estudo de casos, em que foram realizadas vistorias nas escadas pressurizadas de edifícios, ficou constado o mau funcionamento das mesmas devido a falhas de projeto e de execução, além da falta de manutenção do sistema de pressurização. O princípio da pressurização das escadas por ventilação forçada com pressão positiva é simples, e pode ser uma boa alternativa para manter as rotas de fuga de edifícios altos livres da fumaça durante os incêndios; mas, as falhas na sua implementação e operacionalização mostraram-se ‘delicada’ e um risco para as pessoas em situação de incêndio.

O comportamento da fumaça e a sua extração em caso de incêndio é carente de estudos nos edifícios altos, principalmente para aqueles com altura superior a 150 metros, tanto no caso da ventilação natural como para a ventilação mecânica das escadas de emergência.

Com base na pesquisa realizada neste trabalho, conclui-se que o desempenho da extração de fumaça nas escadas de emergência é insatisfatório na gestão dos riscos durante os incêndios em edifícios altos, tanto para as escadas de emergências ventiladas naturalmente, como também para as escadas de emergências com ventilação mecânica.

Recomenda-se que seja feita uma revisão com urgência das normas de segurança contra incêndio e pânico do Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina, para uma redefinição dos critérios de concepção dos tipos de escadas de emergência, em relação a extração de fumaça para edifícios altos.

Sugestões para futuras pesquisas:

- fazer vistorias em escadas de emergência com ventilação natural e com ventilação mecânica, para verificar as condições de manutenção e operação destas escadas, em edifícios com altura superior a 150 m;

- realizar simulação de incêndio em computador para avaliar o desempenho das escadas de emergência com ventilação natural e com ventilação mecânica, em edifícios com altura superior a 150 m;

- estudar a influência do aumento da área da seção dos dutos de ventilação natural na extração da fumaça, conforme prevê a NBR 9077, em edifícios com altura superior a 150 m.

REFERÊNCIAS

- ALVES, A. B. C. G. **A questão do escape em edifícios altos: A influência da fumaça de incêndio na proteção da vida.** Tese de Doutorado. Universidade de Brasília. Brasília, 2010.
- ANTELL, J.; EVERSON, J.; VANNEY, A. F. **Burj Dubai: Inovações no planejamento das respostas a situações de crise.** Artigo. NFPA Journal Latinoamericano. Disponível em: <<http://www.nfpajla.org/pt/arquivos/alarma-deteccion-senalizacion/624-burj-dubai-innovaciones-en-la-planificacion-de-la-respuesta-a-situaciones-de-crisis>>. Acesso em: 15 out. 2018.
- ARAÚJO, S. B. **Administração de desastres: Engenharia de segurança.** Rio de Janeiro: Sygma, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13860:** Glossário de termos relacionados com a segurança contra incêndio. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14880:** Saídas de emergência em edifícios – Escada de segurança – Controle de fumaça por pressurização. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5462:** Confiabilidade e manutenibilidade. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9077:** Saídas de emergência em edifícios. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.
- BITTENCOURT, L.; CÂNDIDO, C. **Ventilação Natural em Edificações.** Rio de Janeiro: PROCEL EDIFICA, 2010.
- BRAGA, G. C. B.; CAMPOS, A. T. **Simulação computacional aplicada à prevenção de incêndio.** Artigo. Seminário Nacional de Bombeiros – SENABOM. Porto Alegre, 2010.
- BRASIL. **Gestão de riscos.** Ed. ver. e atual. Brasília: Superior Tribunal de Justiça, 2016.
- BRASIL. **Metodologia de gestão de riscos.** Brasília: Ministério da Transparência e Controladoria-Geral da União, 2018.
- BRASIL. **Noções básicas em proteção e defesa civil e em gestão de riscos:** livro base. Brasília: Ministério da Integração Nacional, Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil, 2017.
- BRITISH STANDARD INSTITUTE. **BS 5588:** Part. 4 – Code of practice for smoke control in protected space routes using pressurization. London: BSI, 1986.
- CAMPOS, A. T. **Convecção natural no controle do escoamento de fumaça em edifícios.** Monografia. Universidade de Brasília. Brasília: UnB, 2015.

CAMPOS, A. T.; SIQUEIRA, M. B. B. **Capacidade de exaustão de fumaça em dutos de ventilação natural das escadas de emergência**. Artigo. Seminário Nacional de Bombeiros – SENABOM. Goiânia, 2016.

CARLO, U. D. A segurança contra incêndio no Brasil. In: SEITO, A. I. (Coord.) et al. **A segurança contra incêndio no Brasil**. São Paulo: Projeto Editora, 2008. p. 9-17.

CLEZAR, C. A.; NOGUEIRA, A. C. R. **Ventilação industrial**. 2ª ed. rev. Florianópolis: Editora da UFSC, 2009.

COSTA, C. N.; SILVA, V. P. **Revisão histórica das curvas padronizadas de incêndio**. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL NUTAU'2006. Inovações Tecnológicas e sustentabilidade, Núcleo de Pesquisa em Tecnologia da Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. São Paulo: USP, 2006.

CUNHA, L. C. L. da; MATINELLI JR., R. H. Sistema de controle de fumaça. In: SEITO, A. I. (Coord.) et al. **A segurança contra incêndio no Brasil**. São Paulo: Projeto Editora, 2008. p. 257-275.

DISTRITO FEDERAL. **Manual básico de combate a incêndio**. Módulo 5 – Segurança contra incêndio. Corpo de Bombeiros Militar do Distrito Federal. Brasília: CBMDF, 2006.

DUARTE, D.; et al. Gerenciamento dos riscos de incêndio. In: SEITO, A. I. (Coord.) et al. **A segurança contra incêndio no Brasil**. São Paulo: Projeto Editora, 2008. p. 379-409.

DUARTE, D. H. S.; MONTEIRO, L. M.; MICHALSKI, R. L. X. N. **Ventilação natural**. Notas de aula. Universidade de São Paulo. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Disponível em: <<http://www.fau.usp.br/arquivos/disciplinas/au/aut0276/Aulas/>>. Acesso em 09 out. 2018.

IDEL'CIK, I. E. Memento des perdas de charge. [S.I.], 1969. Apud In: CLEZAR, C. A.; NOGUEIRA, A. C. R. **Ventilação industrial**. 2ª ed. rev. Florianópolis: Editora da UFSC, 2009. p. 87.

ENGETEL AUTOMAÇÃO E SEGURANÇA. **Extração natural de fumaça**. Disponível em: <<http://www.grupoengetel.com.br/sistemas/protecao-contraincendio/>>. Acesso em: 08 out. 2018.

EVANGELISTA, A. W. P. **Condutos forçados**. Notas de aula. Universidade Federal de Goiás. Escola de Agronomia e Engenharia de Alimentos. Disponível em: <https://www.agro.ufg.br/up/68/o/3.2__Condutos_For_ados.pdf>. Acesso em: 07 out. 2018.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4ª ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GODOY, A. S. **Introdução à pesquisa qualitativa e suas possibilidades**. Revista de Administração de Empresas. São Paulo: v. 35, n. 2, p. 57-63, 1995.

GOUVEIA, A. M. C. de; ETRUSCO, P. **Tempo de escape em edificações: os desafios do modelamento de incêndios no Brasil**. Artigo. Revista Escola de Minas. Ouro Preto: 2002.

Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=_arttext&pid=S0370-44672002000400005>. Acesso em: 28 ago. 2018.

HALL JR., J. R. Combustion toxicity? NFPA Journal, v.91, n.6, p.90-101, Nov/Dec. 1996. In: MITIDIERI, M. L. O comportamento dos materiais e componentes construtivos diante do fogo – reação ao fogo. In: SEITO, A. I. (Coord.) et al. **A segurança contra incêndio no Brasil**. São Paulo: Projeto Editora, 2008. p. 55-75.

KATO, M. F.; FICHMANN, F.; GUARALDO, E. Densidade ótica específica de fumaça gerada por materiais sólidos. In: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, Divisão de Edificações do IPT. **Tecnologia de edificações: Projeto de Divulgação Tecnológica Lix da Cunha**. São Paulo: Pini, 1988. p. 395-398.

LAMBERTS, R. **Desempenho Térmico em edificações: Ventilação Natural**. Notas de aula. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis: UFSC, 2018.

LEMONJE, T. A.; et al. **Simulação computacional de incêndio em edificações multifamiliar com escada não enclausurada**. Artigo. XIV Congresso Latinoamericano de Patología de la Construcción y XVI Congreso de Control de Calidad en la Construcción. CONPAT. Asunción: CONPAT, 2017.

LINZMAYER, E.; SILVA, S. B. da; ATIK, V. E. G. Manutenção aplicada em sistemas e equipamentos de segurança contra incêndio. In: SEITO, A. I. (Coord.) et al. **A segurança contra incêndio no Brasil**. São Paulo: Projeto Editora, 2008. p. 365-377.

LIVI, C. P. **Fundamentos de fenômenos de transporte: Um texto para cursos básicos**. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2004.

MINAYO, M. C. de S. (Org.) **Pesquisa social: teoria, método e criatividade**. 22 ed. Rio de Janeiro: Vozes, 2003.

MITIDIERI, M. L. O comportamento dos materiais e componentes construtivos diante do fogo – reação ao fogo. In: SEITO, A. I. (Coord.) et al. **A segurança contra incêndio no Brasil**. São Paulo: Projeto Editora, 2008. p. 55-75.

MONCADA, J. A. **Risco ou Perigo**. Artigo. NPFA Journal Latinoamericano. Disponível em: <<http://www.nfpajla.org/pt/arquivos/edicion-impresa>>. Acesso em: 04 set. 2018.

MONTENEGRO, M. L. O. **Análise de desempenho das saídas de emergência por meio de simulação computacionais: O caso de projetos de edifícios universitários**. Dissertação. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal: UFRGN, 2016.

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION. **NFPA 921: Guide for Fire and Explosion Investigations**. Quincy: NFPA, 2011.

NEGRISOLO, W.; GILL, A. A.; OLIVEIRA, S. A. Aprendendo com os grandes incêndios. In: SEITO, A. I. (Coord.) et al. **A segurança contra incêndio no Brasil**. São Paulo: Projeto Editora, 2008. p. 19-33.

ONO, R.; VALENTIN, M. V.; VENEZIA, A. P. P. G. Arquitetura e urbanismo. In: SEITO, A. I. (Coord.) et al. **A segurança contra incêndio no Brasil**. São Paulo: Projeto Editora, 2008. p. 123-134.

RUSCHEL, F. **Avaliação da utilização de ferramentas de simulação computacional para reconstituição de incêndios em edificações de concreto armado**: aplicação ao caso Shopping Total em Porto Alegre – RS. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Porto Alegre: UFRGS, 2011.

SÃO PAULO. **Regulamento de segurança contra incêndio das edificações e áreas de risco do Estado de São Paulo**: Decreto Estadual nº 56.819, 10 de março de 2011. Instrução Técnica nº 15 – Controle de Fumaça. São Paulo: Páginas & Letras Editora e Gráfica, 2011. p. 313-407.

SÃO PAULO. **Regulamento de segurança contra incêndio das edificações e áreas de risco do Estado de São Paulo**: Decreto Estadual nº 56.819, 10 de março de 2011. Instrução Técnica nº 02 – Conceitos básicos de segurança contra incêndio. São Paulo: Páginas & Letras Editora e Gráfica, 2011. p. 87-120.

SANTA CATARINA. **Instrução Normativa 009 – Sistema de Saídas de Emergência**. Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina (CBMSC). Florianópolis: CBMSC, 2014.

SANTA CATARINA. **Lei nº 16.157, de 07 de novembro de 2013**. Assembleia Legislativa do Estado de Santa Catarina (ALESC). Florianópolis: ALESC, 2013.

SEITO, A. I.; BERTO, A. F. Fumaça no incêndio: escadas de segurança. In: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, Divisão de Edificações do IPT. **Tecnologia de edificações**: Projeto de Divulgação Tecnológica Lix da Cunha. São Paulo: Pini, 1988. p. 385-390.

SEITO, A. I. Fumaça de incêndio. In: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, Divisão de Edificações do IPT. **Tecnologia de edificações**: Projeto de Divulgação Tecnológica Lix da Cunha. São Paulo: Pini, 1988. p. 377-380.

SEITO, A. I. Fundamentos de fogo e incêndio. In: SEITO, A. I. (Coord.) et al. **A segurança contra incêndio no Brasil**. São Paulo: Projeto Editora, 2008. p. 35-54.

SEITO, A. I.; KATO, M. F. Fumaça no incêndio: movimentação no edifício e seu controle. In: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, Divisão de Edificações do IPT. **Tecnologia de edificações**: Projeto de Divulgação Tecnológica Lix da Cunha. São Paulo: Pini, 1988. p. 381-384.

SEITO, A. I. Tópicos da segurança contra incêndio. In: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, Divisão de Edificações do IPT. **Tecnologia de edificações**: Projeto de Divulgação Tecnológica Lix da Cunha. São Paulo: Pini, 1988. p. 373-376.

SILVA, F. F. **Relatório de análise das escadas pressurizadas e seu efetivo funcionamento no Estado de Santa Catarina**. Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina. Florianópolis, 2013.

SPAUTZ, D. **Terra de gigantes**: Balneário Camboriú tem 9 entre os 10 prédios residenciais mais altos do país. Artigo. Florianópolis: Jornal Diário Catarinense, 2017. Disponível em: <<http://dc.clicrbs.com.br/sc/nos/noticia/2017/02/terra-de-gigantes-balneario-camboriu-tem-9-entre-os-10-predios-residenciais-mais-altos-do-pais-9724448.html>>. Acesso em: 23 ago. 2018.

TABACZENSKI, R.; et al. Aplicação do software fire dynamics simulator (FDS) no estudo da segurança contra incêndios (SCI) no Brasil. Artigo. Revista FLAMMAE. Corpo de Bombeiros Militar de Pernambuco. Recife: FLAMMAE, v. 03, n. 07, 2017.

TECMUNDO. **Megaestruturas inteligentes: a engenharia dos novos arranha-céus**. Artigo. 2014. Disponível em: < <https://www.tecmundo.com.br/engenharia/51950-megaestruturas-inteligentes-a-engenharia-dos-novos-arranha-ceus.htm>>. Acesso em: 15 out. 2018.

TOLEDO, A. **Critérios para o dimensionamento de aberturas de ventilação natural dos edifícios**. VI Encontro Nacional e III Encontro Latino-Americano sobre Conforto no Ambiente Construído. Artigo. São Pedro: ENCAC, 2001.

TOLONI, M.; VIEIRA, A. V. **Manual de proteção respiratória**. São Paulo: ABHO, 2003.

VERSAGE, R. DE S. **Ventilação natural e desempenho térmico de edifícios verticais multifamiliar em Campo Grande, MS**. Dissertação. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis: UFSC, 2009.

VIEIRA, A. **Pressurização de escadas**. Monografia. Polícia Militar de Santa Catarina. Florianópolis, 2001.

SFPE – Society of Fire Protection Engineering; NFPA – National Fire Protection Association. **Handbook of Fire Protection Engineering**. Third Edition, 2002.

WIKIPÉDIA. **Lista de arranha-céus do Brasil**. 2018. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Lista_de_arranha-c%C3%A9us_do_Brasil>. Acesso em: 12 out. 2018.

THE SKYSCRAPER CENTER. **Brazil Buildings**. The Global Tall Building Database of the CTBUH. 2018. Disponível em: <<http://www.skyscrapercenter.com/country/brazil>>. Acesso em: 12 out. 2018.