

**CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DE SANTA CATARINA
UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS DA ADMINISTRAÇÃO E SOCIOECONÔMICAS – ESAG
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ADMINISTRAÇÃO EM SEGURANÇA
PÚBLICA COM ÊNFASE NA ATIVIDADE BOMBEIRO MILITAR**

WILLYAN FAZZIONI

**PROPOSTA DE UTILIZAÇÃO DA FLUIDODINÂMICA
COMPUTACIONAL COMO FERRAMENTA PARA
ESTUDO CIENTÍFICO DE INCÊNDIOS PELO CORPO
DE BOMBEIROS MILITAR DE SANTA CATARINA**

**FLORIANOPOLIS
2016**

WILLYAN FAZZIONI

**PROPOSTA DE UTILIZAÇÃO DA FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL
COMO FERRAMENTA PARA ESTUDO CIENTÍFICO DE INCÊNDIOS PELO
CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DE SANTA CATARINA**

Trabalho de conclusão apresentado ao Curso de Especialização de Administração de Segurança Pública do Centro de Administração e Socioeconômicas da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para a obtenção do grau de especialista.

Orientador: Ten BM Wagner Alberto de Moraes

**FLORIANOPOLIS/SC
2016**

WILLYAN FAZZIONI

**PROPOSTA DE UTILIZAÇÃO DA FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL
COMO FERRAMENTA PARA ESTUDO CIENTÍFICO DE INCÊNDIOS PELO
CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DE SANTA CATARINA**

Monografia apresentada ao Curso de Comando e Estado Maior como requisito parcial para obtenção do título de especialista em Administração de Segurança Pública.

Banca Examinadora:

Orientador: _____
Mestre Wagner Alberto de Moraes
Tenente do CBMSC

Membro: _____
Doutora Ana Paula Grillo Rodrigues
Departamento de Administração Pública ESAG/UDESC

Membro: _____
Alexandre Corrêa Dutra
Tenente Coronel do CBMSC

Florianópolis – SC, 16/06/2016.

Dedico este trabalho à minha esposa, Francieli Dal Bosco Fazzioni, e à pequena Agatha, que em breve virá à luz e nos brindará com sua presença.

RESUMO

FAZZIONI, Willyan. **Proposta de utilização da fluidodinâmica computacional como ferramenta para estudo científico de incêndios pelo Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina**. 2016. 59 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Administração de Segurança Pública – Área: Administração e Administração Pública) - Curso de Especialização em Administração de Segurança Pública da Escola Superior de Administração e Gerência, da Universidade do Estado de Santa Catarina e do Curso de Comando e Estado Maior do Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

Estudar incêndios é uma tarefa complexa, devido à grande quantidade de variáveis envolvidas no fenômeno e aos diversos processos físicos e químicos que interagem entre si. Como a simulação de eventos reais para estudo é muitas vezes inviável, uma alternativa para simular estes eventos em computador é através da fluidodinâmica computacional, ou CFD (*Computational Fluid Dynamics*). Fluidodinâmica computacional é uma ciência que utiliza recursos computacionais para simular eventos e solucionar equações da mecânica dos fluidos, transferência de calor e reações químicas. Após o estudo de um caso específico e a definição da abordagem teórica necessária, os dados são lançados em um software de CFD, o qual realizará o processamento dos mesmos e fornecerá os resultados ao pesquisador. Como forma de comprovar a efetividade desta ferramenta para a análise e estudo do comportamento dos incêndios, são demonstradas várias pesquisas onde o CFD foi utilizado para esta finalidade. O CFD mostrou-se uma ferramenta com potencial para ser utilizada pelo CBMSC para o desenvolvimento de estudos e pesquisas que visem o aprimoramento de atividades relacionadas à segurança contra incêndio (elaboração e aplicação das normas), combate e perícia em incêndios. Por fim, os requisitos para implementação do CFD no CBMSC e suas possíveis aplicações práticas são discutidas.

Palavras chaves: Fluidodinâmica Computacional. CFD. Incêndio.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	6
1.1	OBJETIVOS.....	7
1.1.1	Objetivo Geral	7
1.1.2	Objetivo Especifico	7
1.3	CONTRIBUIÇÃO DO TRABALHO	7
2	CONTEXTO E A REALIDADE INVESTIGADA	9
3	DIAGNÓSTICO DA OPORTUNIDADE.....	12
3.1	FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL	12
3.1.1	Conceitos e Aplicações da Fluidodinâmica Computacional	12
3.1.2	Metodologia do CFD	15
3.1.3	Validação dos Resultados.....	19
3.2	FLUIDODINÂMICA COMP. APLICADA À ANÁLISE DE INCÊNDIOS.....	21
3.2.1	CFD e a Fases Normativa e Passiva	21
3.2.2	CFD e a Fase Ativa.....	35
3.2.3	CFD e a Fase Investigativa.....	44
4	ANÁLISE DA PROPOSTA DE UTILIZAÇÃO DO CFD PELO CBMSC	49
4.1	REQUISITOS PARA IMPLEMENTAÇÃO DO CFD	49
4.2	APLICAÇÕES PRÁTICAS DO CFD NO CBMSC	52
5	CONCLUSÃO.....	55
	REFERÊNCIAS	57

1 INTRODUÇÃO

Desde que o homem dominou o fogo na pré-história, este tornou-se um verdadeiro aliado para a subsistência humana. Seja para proteção, preparo de alimentos, aquecimento ou desenvolvimento tecnológico, o fogo tem proporcionado inestimáveis benefícios para o desenvolvimento das civilizações.

Com o crescimento das cidades e aglomerações urbanas, logo o homem percebeu que o fogo, quando descontrolado, também poderia causar sérios danos à vida e ao patrimônio. Grandes incêndios marcaram a história da humanidade, tais como o incêndio de Roma em 64 d.C., o grande incêndio de Londres no ano de 1666 e o mais atual, o incêndio na boate Kiss em Santa Maria – RS, em 27 de janeiro de 2013, para citar alguns. Logo, no intuito de se minimizar os danos causados por este fenômeno, combatê-lo ou prevenir seu surgimento, é fundamental pesquisar e estudar amplamente o assunto.

O estudo científico dos incêndios e suas consequências mostra-se como uma tarefa complexa e multidisciplinar, envolvendo desde a psicologia comportamental das pessoas durante o evento até a análise dos diversos processos físicos e químicos que interagem entre si, a saber: combustão, transferência de calor, temperatura de ignição dos materiais e dinâmica dos fluidos (gases resultantes da combustão). Além destes, variáveis externas podem potencializar a intensidade e taxa de propagação de um incêndio, por exemplo, a intensidade e direção de ventos e a umidade relativa do ar.

Simular eventos de incêndio em escala real exige muitas vezes a construção de réplicas de ambientes para sua posterior destruição pelo incêndio, atividade que requer muito tempo e investimento por parte dos pesquisadores, além dos riscos inerentes à situação. Por este motivo, predominam a análise de eventos passados e estudos de caso. Estas análises de casos fortuitos apresentam ao menos duas grandes fontes de incerteza: (1) falta de dados precisos relacionados aos processos físicos e químicos do incêndio, pois não se colocam sensores em uma edificação visando coletar dados em um possível incêndio e; (2) as temperaturas atingidas durante os incêndios podem destruir algumas evidências científicas.

Apesar de existirem teorias matemáticas consolidadas para os processos físicos e químicos relacionados aos incêndios analisados isoladamente, a resolução analítica das equações para o problema de incêndio em escala real torna-se impraticável para o pesquisador quando considera-se a quantidade de variáveis envolvidas, suas inter-relações e as geometrias complexas dos ambientes e de seus objetos. Somente computadores com elevada capacidade de processamento podem resolver tais equações e uma forma consagrada de fazê-lo, é por meio

da fluidodinâmica computacional.

Este trabalho abordará a utilização da fluidodinâmica computacional como ferramenta para estudo científico de incêndios pelo Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina (CBMSC). Por ser um tema novo para a instituição, a finalidade deste trabalho será abordar o assunto sob o ponto de vista teórico, priorizando sua conceituação, quais suas aplicabilidades, pesquisar estudos realizados com a ferramenta na área de incêndios e, por fim, verificar a viabilidade de sua utilização pelo CBMSC.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Propor a utilização da fluidodinâmica computacional como ferramenta para estudo científico de incêndios pelo CBMSC.

1.1.2 Objetivos específicos

Compreender a fluidodinâmica computacional e suas aplicações.

Discorrer sobre as potenciais aplicações da fluidodinâmica computacional nas atividades desenvolvidas pelo CBMSC, no que tange a análise dos incêndios.

Avaliar a viabilidade da utilização da fluidodinâmica computacional pela instituição.

1.2 CONTRIBUIÇÃO DO TRABALHO

A fluidodinâmica computacional é uma ferramenta com potencial para contribuir com o desenvolvimento tecnológico institucional na análise e estudo dos incêndios. Por meio de simulações de incêndio em computador, é possível obter informações técnicas sobre o fogo, sua propagação, comportamento, produtos da combustão, transferência de calor, temperatura, dentre outros. Ou seja, a fluidodinâmica computacional possibilita a obtenção de importantes informações sobre os incêndios, informações estas que podem ser úteis para a instituição definir sua atuação nesta área.

As possíveis aplicações práticas da fluidodinâmica computacional no CBMSC são vastas. Dentre as inúmeras utilidades, destacam-se: possibilidade de aperfeiçoar as técnicas de combate a incêndio; estudar as formas de propagação do incêndio; prever o comportamento da fumaça e gases tóxicos; melhoria, adequação e comprovação da eficiência das normas de segurança contra incêndio; auxílio nas atividades de perícia; e auxílio na tomada de decisão e definição de estratégias em incêndios de grande proporção.

2 CONTEXTO E A REALIDADE INVESTIGADA

O Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina inciou suas atividades no ano de 1.926 com a específica e única atribuição de combater incêndios, assumindo novas responsabilidades com o passar do tempo. Apesar de possuir atualmente diversas competências, o desempenho de atividades relacionadas ao fogo continua sendo um fator preponderante na atividade institucional do CBMSC, sendo a principal identidade da corporação perante a sociedade. Segundo Acordi (2015), as atividades de bombeiro relacionadas ao incêndio compõem quatro fases dentro do chamado ciclo operacional de bombeiro, a saber: (1) fase normativa, onde são estabelecidas as normas de segurança contra incêndio (NSCIs); (2) fase estrutural, por meio da fiscalização da aplicação das NSCIs nos imóveis; (3) fase ativa, ou de combate aos incêndios; (4) fase investigativa, por meio da perícia em incêndio e explosão.

As fases normativa e passiva, do ciclo operacional de incêndio do CBMSC, também podem ser chamadas de fase preventiva e estrutural, respectivamente. Enquanto a finalidade da primeira é o estudo, revisão e elaboração de normas de segurança contra incêndio, a finalidade da segunda diz respeito à fiscalização e instalação dos sistemas preventivos nas edificações (ACORDI, 2015).

O CBMSC possui autorização constitucional para estabelecer normas de segurança contra incêndio desde o ano de 2003, quando foi aprovada a emenda constitucional N033/2013, que inseriu o Artigo 108 na Constituição do Estado de Santa Catarina. O inciso II do Artigo 108 trata desta autorização:

Art. 108. O Corpo de Bombeiros Militar, órgão permanente, força auxiliar, reserva do Exército, organizado com base na hierarquia e disciplina, subordinado ao Governador do Estado, cabe, nos limites de sua competência, além de outras atribuições estabelecidas em Lei:
[...]II – estabelecer normas relativas à segurança das pessoas e de seus bens contra incêndio, catástrofe ou produtos perigosos;[...] (SANTA CATARINA, 1989)

Todavia, até o dia 20 de dezembro de 2013, as NSCIs do Estado de Santa Catarina estavam previstas no Decreto Estadual nº 4.909/1994, ficando o CBMSC responsável apenas pela fiscalização do mesmo. Somente após a aprovação da Lei Estadual nº 16.157/2013 e do Decreto nº 1.957/2013, os quais revogaram o decreto nº 4.909/1994 e regulamentaram o inciso II do artigo 108 da constituição estadual, a instituição iniciou efetivamente a normatização da segurança contra incêndio no Estado de Santa Catarina, através da elaboração de Instruções Normativas.

A Lei Estadual nº 16.157/2013 estabelece quais os parâmetros gerais para a normatização da segurança contra incêndio, dentre os quais destacam-se: os dispositivos ou sistemas de controle do incêndio, detecção e alarme, proteção estrutural em situações de incêndio, de extinção de incêndio e controle da fumaça. De acordo com estes parâmetros, o CBMSC estabelece as Instruções Normativas, as quais serão utilizadas como referência para construção e adequação de edificações em todo território catarinense.

Tal fato impõe responsabilidades à instituição, cabendo a esta buscar meios de estudar, revisar, elaborar e fiscalizar as normas com vistas a otimizar os custos de implantação dos sistemas e torná-los mais eficientes e eficazes. A fluidodinâmica computacional, como será visto neste trabalho, é uma ferramenta útil para esta finalidade.

Segundo Acordi (2015, p. 3) “a finalidade da fase ativa ou de combate constitui-se do socorro ou da prestação de serviço quando há a participação, do poder operacional da Corporação, no atendimento a qualquer caso real de sinistro, para extinguir incêndios [...]”. Ou seja, trata-se da fase de emprego operacional da instituição em resposta aos incêndios, através do serviço de combate a incêndio.

Neste campo, a fluidodinâmica computacional pode ser utilizada para o estudo do comportamento do incêndio e como ferramenta de auxílio na tomada de decisões, definição de estratégias e táticas apropriadas de combate. Segundo Guigay et al (2009), o CFD tem um grande potencial para melhorar o entendimento e criar técnicas mais efetivas de combate a incêndio.

A fase investigativa ou pericial diz respeito às investigações periciais realizadas em locais que foram atingidos por incêndios. Segundo Acordi (2015, p. 3), “a finalidade da fase investigativa ou pericial é elucidar o caso real de sinistro, em todas as suas circunstâncias; causa, desenvolvimento, consequências, para a retroalimentação das demais fases do ciclo operacional”.

Para Hurley (2016), a utilização da fluidodinâmica computacional para reconstruir cenários de incêndio tem aumentado bastante nas últimas décadas. Esta ferramenta tem auxiliado profissionais da área na investigação de eventos de incêndio que causaram significativos danos às pessoas e ao patrimônio. Neste sentido, segundo Seito et al (2008, p. 342), durante a perícia de incêndio,

na tentativa de determinar a origem de um incêndio, frequentemente se faz necessária a realização de testes e ensaios que permitam determinar o cenário mais provável. Uma ferramenta importante e muito atual é o modelamento computacional de incêndio, pelo qual se busca comparar o evento real com a simulação de várias causas e cenários diferentes.

O CBMSC possui autonomia funcional para definição de normas e procedimentos em todas as quatro áreas do ciclo operacional. Até então, quando se necessita de informações técnicas e científicas dos incêndios (comportamento, temperatura, propagação, etc) para se estabelecer estas diretrizes, estas são propostas através da análise empírica dos profissionais, estudos de caso e pesquisas bibliográficas. Portanto, a fluidodinâmica computacional preencherá uma lacuna nesta área, que é a possibilidade institucional de produzir conhecimento científico sobre incêndios, através de simulações e análise dos conceitos físicos, químicos e matemáticos deste fenômeno.

3 DIAGNÓSTICO DA OPORTUNIDADE

Para que se possa dar suporte ao desenvolvimento da proposta deste trabalho, primeiramente será necessário compreender a fluidodinâmica computacional. Após, serão apresentadas pesquisas que foram realizadas utilizando-se a fluidodinâmica computacional como ferramenta de estudo de fenômenos relacionados a incêndios. Com isso, pretende-se demonstrar que esta ferramenta pode ser útil ao CBMSC e pode contribuir para o aperfeiçoamento de atividades desenvolvidas pela instituição nesta área.

3.1 FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

Serão estudados os conceitos, aplicações, formas de utilização e validação de resultados da fluidodinâmica computacional. Não há a intenção de esgotar o tema neste capítulo, e sim abordar o assunto de tal forma que seja possível o entendimento adequado dos demais capítulos e que possa ser uma fonte de pesquisa inicial sobre o tema, para futuros trabalhos a serem realizados nesta área.

3.1.1 Conceitos e Aplicações da Fluidodinâmica Computacional

A Fluidodinâmica Computacional, amplamente conhecida pelo acrônimo CFD, derivado da expressão *Computational Fluid Dynamics*, segundo Versteeg e Malalasekera (2007), é uma ferramenta computacional de simulação utilizada para análise de sistemas que envolvem dinâmica de fluidos, transferência de calor e massa, reações químicas e fenômenos associados a estas disciplinas.

Oh (2012) estabelece que o CFD é uma área emergente da mecânica de fluidos, na qual problemas relacionados ao fluxo dos fluidos são resolvidos e analisados usando métodos computacionais e algoritmos numéricos. Na disciplina de mecânica dos fluidos, existem três meios fundamentais de estudo e solução de problemas, o teórico, o experimental e o CFD. Quanto à categoria teórica, ou analítica, da mecânica dos fluidos, a manipulação, teoria e solução de equações são realizados através de meios tradicionais, utilizando, dentre outros, o papel e caneta. Na categoria experimental, profissionais estudam os fenômenos da fluidodinâmica através de experimentos reais, como por exemplo os túneis de vento, onde são verificados os efeitos que estímulos, formas e perturbações exercem sobre os fluidos. Por final,

um crescente número de engenheiros e cientistas estão utilizando o CFD como ferramenta para unir a parte teórica e experimental para simular, em computador, situações reais sem a necessidade de se realizar experimentos práticos. Para isto, é criado um modelo computacional e são gerados os códigos de equações, que representam as leis da física que governam o comportamento das moléculas do fluido no experimento que se pretende simular. Então, os resultados, tais como velocidade, temperatura, pressão, etc, são dispostos e podem ser visualizados em gráficos e/ou animações, tal como um experimento prático real.

Segundo Schneider e Maliska (2000, apud SILVA, 2012, p.39):

Fluidodinâmica computacional (CFD - Computational Fluid Dynamics) é um conjunto de ferramentas numéricas e computacionais utilizadas para resolver, visualizar e interpretar soluções relacionadas ao escoamento dos fluídos. É muito utilizada nos campos da física, química, engenharia mecânica, engenharia biomédica, entre outras. Estas ferramentas são estruturadas através de algoritmos numéricos que são capazes de resolver problemas de fluxo de fluídos.

Isto posto, conclui-se que a fluidodinâmica computacional é uma ciência que estuda o comportamento dos fluidos, envolvendo conhecimentos matemáticos, físicos e químicos, com o auxílio da computação. Em outras palavras, pode-se estabelecer que o CFD é um software computacional utilizado para calcular e simular fenômenos de mecânica dos fluidos, podendo ser utilizado também para fenômenos de transferência de calor e reações químicas.

O CFD surgiu na década de 1970, primeiramente como uma opção para combinar a matemática, a física e a ciência da computação para solução de equações específicas. Um limitador para o pleno desenvolvimento da nova técnica era a baixa capacidade computacional da época. Todavia, ao final da década de 1980, quando os computadores possuíam melhores condições de memória e capacidade de processamento, soluções de modelos e cálculos complexos de fluidodinâmica em 2 e 3 dimensões já eram possíveis (BLAZEK, 2015).

Neste sentido, segundo Porciúncula (2007), o pleno desenvolvimento do CFD foi possível devido ao avanço na capacidade de processamento dos computadores, bem como o surgimento de modernas técnicas numéricas, o que permitiu o uso de programas computacionais para solução de problemas complexos, até então impossíveis de serem resolvidos manualmente. Ou seja, a complexidade das equações que envolvem fluidos tornava, até poucas décadas atrás, inviável a solução de uma série de problemas de engenharia, devido à baixa capacidade computacional.

É importante ressaltar que as simulações com CFD vêm abrangendo maiores

aplicações e resultados mais confiáveis na medida que os computadores se tornam mais potentes. Como exemplo, Carlsson (1999) comenta que para simular um incêndio em grande escala usando um software adequado em um computador com um processador Pentium II de 300MHz, no ano de 1999, seriam necessárias 4 semanas para o computador processar os resultados de 13 minutos do evento. O autor sugeriu em seu trabalho que os computadores da época não possuíam condições ideais para modelar incêndios, e que tais estudos deveriam ser realizados no futuro, quando os computadores possuíssem melhores processadores.

Quanto às possíveis aplicações, o CFD pode ser utilizado em uma vasta gama de atividades industriais e não industriais, a saber: aerodinâmica para a aviação e veículos, hidrodinâmica para navios, desempenho de turbinas em usinas elétricas, resfriamento de equipamentos elétrico e eletrônicos, processos de engenharia química, ventilação interna e externa em prédios, engenharia naval, engenharia ambiental, hidrologia, meteorologia, engenharia biomédica, dentre outros (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

Shaw (1992, apud PORCIÚNCULA, 2007, p.39), explica detalhadamente algumas das áreas onde é possível a utilização da fluidodinâmica computacional:

- Projeto de mísseis - assim como em aviões, o conhecimento dos fenômenos inerentes ao voo é de extrema importância, sobretudo para equipamentos de grande importância militar;
- Vazamentos em reatores nucleares - devido à impossibilidade de realizar experimentos por questões de segurança, técnicas de CFD também se aplicam neste caso, onde o conhecimento do comportamento de um vapor radioativo é crucial em termos de tomada de decisões;
- Chamas em queimadores - o conhecimento da dinâmica da combustão é importante para o melhor projeto de queimadores em caldeiras, fornalhas, turbinas de foguetes, fornos industriais e outros equipamentos que envolvam combustão;
- Circulação de ar em câmaras de combustão - o ar a ser utilizado numa câmara de combustão deve ser o mínimo necessário para que a própria combustão se inicie e se mantenha, operando o mais perto possível de condições ótimas; assim, fatores como perda de carga e distribuição de velocidades no interior das câmaras são importantes;
- Escoamento de ar refrigerante em equipamentos elétricos - dispositivos elétricos dissipam calor devido ao efeito Joule e este calor deve ser retirado de forma a evitar um super aquecimento do dispositivo;
- Dispersão de poluentes em rios, oceanos e na atmosfera - simulação de prováveis acidentes com produtos perigosos é uma interessante aplicação das técnicas de CFD, onde o conhecimento da dispersão de determinado poluente sobre um curso de água ou no ar ambiente deve ser conhecido para fins de segurança;
- Previsão do clima - constitui-se em uma das áreas de maior impacto; simulações computacionais do clima são de extrema importância para a agricultura e medidas de controle ambiental.

Percebe-se o grande potencial de aplicabilidade da fluidodinâmica computacional. Trata-se de uma ferramenta de alto desempenho, capaz de auxiliar em situações,

solucionar problemas, e simular cenários nos mais diferentes campos da engenharia.

3.1.2 Metodologia do CFD

Com vistas a tornar o CFD uma ferramenta de fácil entendimento e apropriada aos usuários, os códigos de CFD são divididos em três principais elementos: pré-processamento, processamento e pós-processamento (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). Estes elementos também podem ser considerados como as três etapas a serem seguidas para a solução de um problema de CFD.

Segundo Porciúcula (2007, p. 34), “toda a atividade envolvida na montagem e elaboração de um problema de CFD antes da etapa de solução numérica é denominada de pré-processamento.” Oh (2012), refere-se a pré-processamento como o trabalho que deve ser feito antes da simulação ou experimento.

Mais detalhadamente, através de uma interface apropriada, o pré-processamento consiste na inserção de um problema que será analisado pelo software de CFD. Neste estágio, segundo Versteeg e Malalasekera (2007), será necessário:

- 1) definir a geometria do objeto/local a ser estudado - domínio;
- 2) gerar a malha, que é a subdivisão do domínio em pequenos subdomínios ou células;
- 3) selecionar os fenômenos químicos e físicos que precisam ser modelados;
- 4) definir as propriedades do fluido;
- 5) especificar as condições de contorno onde as células tocam no limite do domínio.

Todas etapas acima são importantes para o bom desempenho da simulação, porém de acordo com Porciúcula (2007, p. 34), “a parte mais difícil e também a mais importante do pré-processamento é a construção da geometria e a geração da malha.” Neste sentido, Versteeg e Malalasekera (2007) estabelecem que mais de 50% do tempo utilizado em projetos na fluidodinâmica computacional são dispendidos no desenvolvimento geométrico do domínio e na geração de uma malha adequada. Por este motivo, dentre as etapas descritas acima, estes dois assuntos serão discutidos com mais profundidade.

O propósito da definição da geometria, primeiro passo na fase do pré-processamento, é limitar o problema em um espaço finito e limitar também a quantidade de cálculos necessários para a solução deste problema. Por exemplo, apesar de um avião em pleno voo sofrer interferências e produzir efeitos na atmosfera em distâncias superiores a 1.000 km,

os efeitos produzidos a esta distância são desprezíveis, desta forma, nesta situação, deve-se limitar o espaço de modo a considerar somente as interferências significativas sofridas e produzidas pelo avião. Isto posto, o domínio será um objeto ou um espaço limitado, que pode ter duas ou três dimensões, onde os cálculos serão realizados, e tudo o que estiver fora deste domínio não será considerado, (Oh, 2012).

Por conseguinte, entende-se que a geometria do objeto é a definição dos volumes ou áreas que serão estudados, podendo ser um cômodo, um edifício, a área de uma peça ou a delimitação de um volume ou área externa. Após a definição teórica do domínio, o próximo passo é o lançamento da geometria no CFD, ou seja, a construção do domínio dentro do computador. Quanto a isto, é importante destacar que “a geometria pode ser construída a partir de pacotes separados das mesmas empresas que desenvolvem o simulador ou mesmo usando programas de outras companhias, notadamente aquelas que trabalham com programas de desenho (por exemplo CAD)” (PORCIÚCULA, 2007, p. 34). Ou seja, é possível construir a geometria em softwares adequados para tal e exportar esta geometria para o software de CFD.

Após a fase da definição do domínio, parte-se para a geração da malha, que é o ato da subdivisão do domínio em pequenas partes/células. Dentro de cada uma das células do domínio, é onde serão realizados os cálculos definidos para solucionar o problema proposto.

De acordo com Versteeg e Malalasekera (2007), as soluções para o problema proposto, tais como velocidade, pressão, temperatura, dentre outros, é definida dentro de cada célula. A precisão do resultado simulado será mensurada pela quantidade de células na malha, ou seja, quanto maior a quantidade de células na malha, maior será a precisão do resultado. Todavia, “malhas muito complexas necessitam de um poder de processamento maior [e/ou exigirá mais tempo para a simulação], por isso, a escolha da malha e sua qualidade vai depender do tipo de problema a ser abordado” (SILVA, 2012, p. 43).

Porciúcula (2007, p. 34) define a geração da malha da seguinte forma:

A geração da malha consiste na subdivisão do domínio em várias partes ou pedaços, onde as equações serão discretizadas e resolvidas. Se a geometria for tridimensional, então o espaço em questão será composto por uma miríade de pequenos elementos de volume cujo tamanho é fixo ou variável, de acordo com a geometria em estudo e das características do problema.

Segundo Oh (2012), à primeira vista, a subdivisão do domínio pode não parecer óbvia, porém esta situação fica clara com a percepção de que a solução de equações de fluidodinâmica é muito mais fácil em pequenas áreas e volumes do que em grandes porções. Também, dividindo o volume em pequenas unidades transforma um grande problema dentro do domínio em um grande número de pequenos problemas dentro de pequenos subdomínios, o

que possibilita o estudo dos fenômenos em vários pontos dentro do volume ou área a serem estudados e a interação entre eles.

Versteeg e Malalasekera (2007), fazem um importante apontamento sobre a geração da malha em domínios irregulares, sendo que nestes casos a malha deve ser mais fina onde os domínios tem grande variação e mais grossa em regiões mais regulares. Esforços estão sendo dispendidos para o desenvolvimento de códigos de CFD capazes de refinar e adaptar a malha conforme a necessidade imposta pela geometria do objeto/ambiente. Muitos avanços precisam ser alcançados até que uma técnica de auto ajuste de malha seja robusta o suficiente para incorporar programas comerciais de CFD. Ou seja, o ajuste da malha ainda continua dependendo da capacidade e habilidade do usuário em analisar qual a precisão necessária para o experimento, analisando seu custo, tempo de simulação e capacidade computacional, etc.

Seguindo o processo, Porciúcula (2007, p. 34) relata que

Uma vez estabelecidas a geometria e a malha, as outras etapas se tornam relativamente simples se o simulador apresentar uma interface gráfica adequada. As condições de contorno especificadas podem ser visualizadas em cada parte da geometria e as propriedades dos fluidos podem ser facilmente ajustadas; caso estas variem durante o processo é necessário a introdução da expressão matemática, que represente esta variação. Fatores como precisão, número máximo de iterações e parâmetros usados em métodos numéricos também são ajustados.

Ou seja, após a definição do domínio e da malha, dentro de cada célula/subdomínio, serão definidas as propriedades do fluido que serão consideradas, os fenômenos químicos e físicos que precisam ser modelados e serão especificadas as condições de contorno onde as células tocam no limite do domínio. Assim, a malha estará pronta para ser processada.

Terminada a fase do pré-processamento, será iniciado o processamento, que nada mais é que do que o início da simulação computacional. Alguns aspectos dentro desta fase da metodologia do CFD são importantes ser analisados, para se obter o entendimento do funcionamento da ferramenta.

Primeiramente, cabe ressaltar que os fenômenos físicos que envolvem a mecânica dos fluidos são complexos e não lineares, logo uma abordagem iterativa torna-se necessária. Os códigos CFD possuem técnicas de discretização capazes de transformar as equações diferenciais complexas da mecânica dos fluídos em códigos adequados para a análise computacional (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

Neste sentido, as soluções das equações no computador são realizadas através de modelos numéricos, cuja principal técnica utilizada é o Método dos Elementos Finitos

(MEF), sendo a base central dos principais códigos de CFD disponíveis no mercado (ANSYS, PHOENICS, STAR-CD e FDS). Em linhas gerais, na fluidodinâmica computacional, o MEF consiste na resolução numérica das equações diferenciais parciais da mecânica dos fluidos em todas as células do domínio (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

Por fim, chega-se ao terceiro e último estágio do CFD, o pós-processamento. Segundo Ho (2012), este é o estágio final no qual, após o programa CFD calcular todas variáveis propostas na fase do pré-processamento, os resultados serão demonstrados ao usuário. Isto envolve a obtenção dos resultados de velocidade, pressão, densidade e demais informações esperadas em cada célula da malha por fração de tempo, demonstrando os resultados visualmente.

Devido ao avanço da capacidade gráfica computacional, uma grande quantidade de inovações e desenvolvimento tem sido realizados na área do pós-processamento do CFD. Atualmente, segundo Versteeg e Malalasekera (2007), os programas são equipados com notáveis e versáteis ferramentas para visualização dos dados do experimento, tais como:

- 1) geometria do domínio e exibição da malha;
- 2) disposição dos vetores;
- 3) linha e gráficos de contorno coloridos/sombreados;
- 4) superfícies em 2 e 3 dimensões;
- 5) rastreamento de partículas;
- 6) ver o experimento através de vários ângulos, permitindo translações, rotações e ampliações ou reduções.

Porciúcula (2007, p. 34), dispõe que

No pós-processamento as soluções são visualizadas e interpretadas. Outros cálculos também podem ser realizados a partir dos resultados obtidos, como o de valores médios das variáveis de interesse (velocidade, pressão, temperatura, tensão de cisalhamento) além da representação dos perfis destas variáveis através de gráficos e superfícies de contorno. Campos vetoriais e linhas de corrente também podem ser visualizados e efeitos como a turbulência podem ser previstos.

Mais recentemente, tem sido possível demonstrar o resultado da simulação em vídeo. Além de gráficos, os códigos estão fornecendo a possibilidade de exportar os dados numéricos produzidos para outros programas, facilitando o estudo através de outras ferramentas. Como em várias outros campos dentro da engenharia computacional, a possibilidade de visualização gráfica e manipulação dos resultados da Fluidodinâmica Computacional têm facilitado a interação com pessoas que não são especialistas. (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

3.1.3 Validação dos Resultados

Quando um experimento é realizado utilizando-se a fluidodinâmica computacional, os dados lançados no programa na fase do pré-processamento, com o intuito de se simular uma situação, são chamados de modelos. Para cada tipo de experiência, são criados diferentes modelos dentro do CFD, dentro dos quais serão consideradas apenas as variáveis que exercem influência no experimento.

Todavia, os resultados obtidos através da realização de um experimento na fluidodinâmica computacional, por si só, não devem ser considerados confiáveis. Os resultados obtidos serão apenas uma estimativa, sem validade científica. Para que os resultados sejam confirmados, existe a necessidade de se validar os mesmos. Kevin Mcgrattan (2015) orienta que a validação de um resultado no CFD envolve 3 etapas: comparação dos resultados da simulação do modelo proposto com um experimento real; qualificar as diferenças do resultado de ambos (simulação e experimento); e decidir se o modelo é apropriado para o caso sugerido. Dizer que um modelo foi validado significa que um modelo foi testado para determinada situação e se mostrou apropriado para tal.

Sabino (2015), desenvolveu uma tese na qual avaliou a ventilação dentro de um chiqueiro utilizando-se do CFD. Após definir e construir o domínio no CFD, gerar a malha, selecionar os fenômenos físico-químicos, definir as propriedades dos fluidos e especificar as condições de contorno, os dados foram processados e foram obtidos diversos resultados. Terminada a fase de simulação no CFD, foi realizado um experimento real no chiqueiro, onde foram instalados sensores e colhidos os dados pertinentes. Na etapa seguinte do estudo, foram confrontados os resultados da simulação e da experiência real. Como os resultados foram semelhantes, o modelo de CFD utilizado por Sabino (2015) para o estudo da ventilação do chiqueiro foi validado.

No exemplo acima, surge uma indagação se é compensador realizar duas experiências para um mesmo fim. Ou seja, à primeira vista, bastaria realizar a experiência real sem a necessidade de se realizar uma simulação computacional. No entanto, no mesmo estudo, Sabino (2015, p. 37) propôs que uma “[...] grande vantagem dos modelos baseados em CFD é permitir a redução do número de repetições dos experimentos e aperfeiçoar instalações a partir da validação dos dados experimentais [...]”. No estudo realizado, após a validação do modelo, a autora simulou diversas disposições de entrada de ar e exaustores no chiqueiro, chegando a uma situação ideal, fato que seria inviável simular em escala real.

Neste contexto, Versteeg e Malalasekera (2007) citam que ao final da simulação, o usuário deverá julgar se os dados gerados são satisfatórios ou não, sendo impossível avaliar a validade de um modelo físico/químico incorporado a um programa tão complexo como o CFD e a precisão dos resultados finais senão pela comparação com experimentos reais. Qualquer profissional ou instituição que anseia a utilização do programa de forma séria deve levar em consideração que o CFD não substitui um experimento prático real, sendo apenas uma ferramenta auxiliar de solução e estudo de problemas. Mais ainda, é importante destacar que durante o experimento real, deverão ser utilizados equipamentos, técnicas e programas específicos para captar e mensurar informações do experimento.

Oh (2012) aborda o tema da mesma forma, sugerindo que, apesar do aumento contínuo da confiabilidade na utilização da fluidodinâmica computacional, não se chegou ao ponto de confiar nos resultados sem que os mesmos sejam validados. Ou seja, a verificação e a validação dos resultados são indispensáveis para garantir sua confiabilidade.

A necessidade de validação dos resultados não significa que todas simulações devem ser acompanhadas de um experimento real. Esta situação é sim a mais indicada, entretanto podem existir simulações cujos experimentos reais podem ser difíceis, inviáveis ou impossíveis de se realizar. Nestes casos, de acordo com Versteeg e Malalasekera (2007), o usuário do programa poderá validar seu estudo embasado em experiências prévias, comparar as análises com simulações similares ou comparar com soluções de problemas e experimentos parecidos publicados em literatura pertinente.

Segundo Sabino (2015, p. 48),

A validação de modelos CFD, que quantifica quão bem um modelo matemático representa a realidade, pode ser feita de várias maneiras, tais como tratamento estatístico, comparação entre dados medidos e simulados por meio de gráficos, pelo uso de PIV (Particle Image Velocimetry) e túnel de vento, comparação das simulações com dados da literatura, validação de simulações realizadas em outros programas CFD como por exemplo, simulações no software Open FOAM e validação no FLUENT, dentre outros.

Diante do exposto, constata-se que o programa CFD envolve a criação de um conjunto de números, através dos quais pretende-se e espera-se que realizem uma aproximação realística de uma situação real. Porém, é imperioso ter plena consciência que uma simulação em CFD nada mais é do que o estudo do comportamento de um sistema, com vistas a aprimorar o conhecimento sobre o tema. Neste caso, não há garantias universais sobre a precisão do experimento, motivo pelo qual será necessário validar os resultados, seja por intermédio de experimentos reais, comparações com simulações já realizadas ou comparação com literatura pertinente.

3.2 FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL APLICADA À ANÁLISE DE INCÊNDIOS

Oh (2012) afirma que é possível utilizar o CFD para calcular passo a passo as reações químicas, transferência de calor e modelos de turbulência das chamas, sendo viável portanto estudar e prever o comportamento de um incêndio. Para Lazaro et al (2008), a fluidodinâmica computacional tem se mostrado uma poderosa ferramenta no estudo da dinâmica dos incêndios, com capacidade de produzir informações científicas sobre estes eventos em áreas como, design de sistemas de segurança, investigações, treinamento de bombeiros, gerenciamento de emergências e análise de risco.

Neste capítulo, a fluidodinâmica computacional será avaliada com relação a sua capacidade de contribuir para o estudo dos incêndios dentro das quatro fases do ciclo operacional de bombeiro sugeridas por Acordi (2015): normativa, passiva, ativa e investigativa. Para tanto, serão apresentados estudos e referências bibliográficas que demonstram a utilização do CFD como ferramenta de pesquisa e sua capacidade de contribuição em cada uma das quatro fases descritas acima.

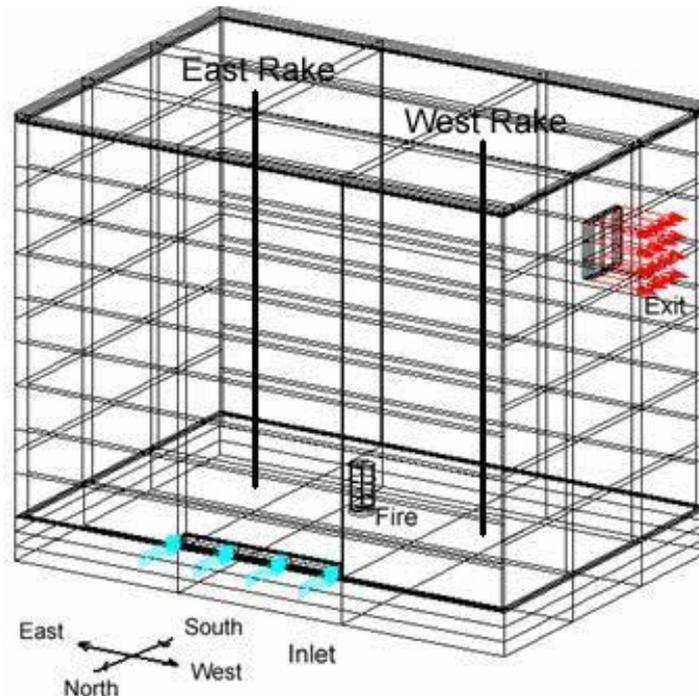
As fases normativa e passiva serão discutidas em uma única seção, pois há uma relação significativa entre estas duas atividades, ao passo que as fases ativa e investigativa serão trabalhadas em seções distintas.

3.2.1 CFD e a Fases Normativa e Passiva

Segundo Liu, Moser e Sinai (2004), pesquisas sobre a propagação de incêndios tem atraído cada vez mais atenção da comunidade científica, por causa da grande capacidade destrutiva dos mesmos. Neste contexto, modelos computacionais de incêndio têm surgido como uma alternativa atrativa para a avaliação da eficiência da segurança contra incêndio em edificações. Para comprovar a eficiência de um modelo de CFD para a previsão do comportamento de um incêndio de duração de 20 minutos em um compartimento, os autores realizaram uma simulação através do software CFD ANSYS, comparando os resultados com um experimento prático similar.

O experimento foi realizado em uma sala de alvenaria com tijolos de 10cm de espessura, com 6 metros de comprimento, 4 metros de largura e 4,5 metros de altura, com uma abertura de 0,65m x 0,65m.

Figura 1 – Esquema do compartimento estudado de 6m x 4m x 4,5m.



Fonte - Liu, Moser e Sinai (2004, p.179).

Após a simulação e validação dos resultados no CFD, os autores obtiveram as seguintes conclusões:

- 1) aproximadamente 70% do calor gerado pelo fogo foram depositados nas paredes, teto e chão do compartimento, os outros 30% foram concentrados no ar. Isso mostra que o calor conduzido e armazenado nas paredes não pode ser ignorado em uma simulação, caso contrário os resultados não serão adequados;
- 2) a radiação desempenha um importante papel no processo de transferência de calor. A radiação emanada pelos gases do ambiente é tão significativa quanto à radiação emanada pelas superfícies;
- 3) a distribuição da temperatura no compartimento, especialmente na fase inicial do incêndio, não é relevante para a temperatura externa da parede. Durante os primeiros vinte minutos do incêndio, o calor gerado no cômodo penetrou apenas 3 cm na parede, deixando a temperatura da face exterior dos tijolos de 10cm inalterada, ou seja as condições de contorno externas não influenciaram os resultados do teste;
- 4) o software ANSYS-CFX mostrou-se uma ferramenta útil para modelagem de incêndio.

O comportamento da fumaça em ambientes confinados é um importante tema dentro da segurança contra incêndio. Segundo Hurley (2016), uma das causas mais significativas de fatalidades em incêndio é a inalação de fumaça e gases tóxicos. Ainda, a fumaça gerada em um incêndio confinado diminui a visibilidade no ambiente e rotas de fuga, contribui para a propagação do calor e diminui a concentração de oxigênio no local.

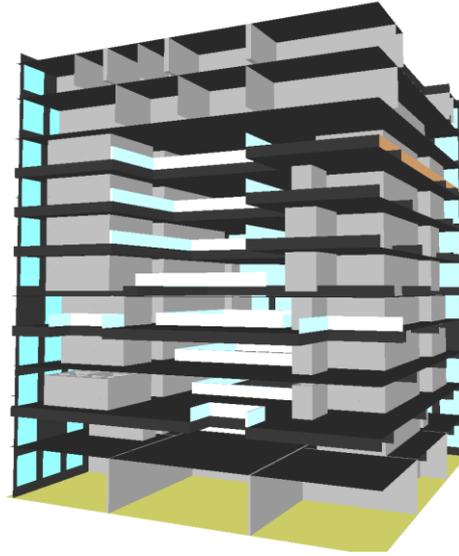
Barreiras físicas, exaustão forçada/não forçada e pressurização de ambientes protegidos são as maneiras mais comuns de controlar o movimento da fumaça dentro de espaços confinados. Em casos comuns, medidas de controle dos gases do incêndio são previstas em normas técnicas e podem ser deduzidas por empirismo. Todavia, quando as edificações são complexas, pelo seu tamanho ou forma, ou quando um novo sistema de ventilação é proposto, surge a necessidade de se avaliar cada caso em particular. Neste sentido, o CFD será uma ferramenta útil (HURLEY, 2016).

Guigay (2008) desenvolveu um estudo sobre a utilização da fluidodinâmica computacional na segurança contra incêndio das edificações. Segundo o autor, as exigências previstas em normas de segurança contra incêndio impactam significativamente nos projetos das edificação, desde a parte estética e funcional até o custo total da obra. Nas últimas décadas, devido aos avanços tecnológicos na ciência das construções, o tamanho das edificações tem aumentado continuamente, e em grandes centros, existe a tendência de construção de edificações complexas, tais como shoppings, estacionamentos e depósitos subterrâneos.

Estas novas edificações introduzem novas classes de risco à segurança contra incêndio, as quais exigem estudos direcionais específicos para definição dos parâmetros de segurança necessários para cada caso. Quando as normas de segurança contra incêndio existentes não preveem soluções para edificações complexas, a fluidodinâmica computacional poderá ser utilizada para projetar sistemas de segurança adequados para estas edificações, principalmente no que tange à propagação do fogo e da fumaça.

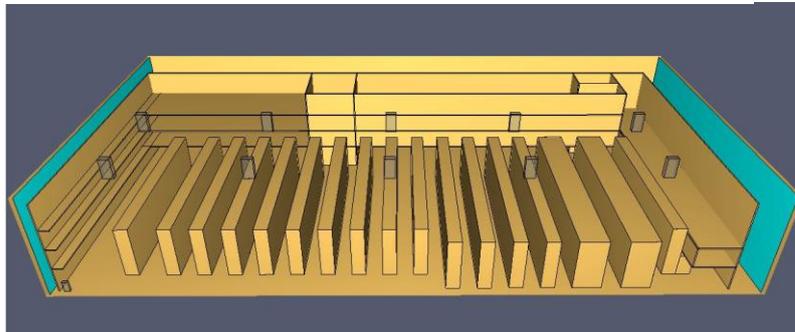
No estudo de Guigay (2008), foram demonstrados dois exemplos da utilização do CFD para estudo da segurança contra incêndio: (1) incêndio em um edifício de escritórios com 11 andares, com um átrio interligando o 1º e 9º andares e; (2) um galpão de armazenamento com 7200 m², com dez escotilhas instaladas no teto da edificação para exaustão da fumaça em caso de incêndio.

Figura 2 – Modelo 3D do edifício de 11 pavimentos.



Fonte: Guigay (2008, p.126).

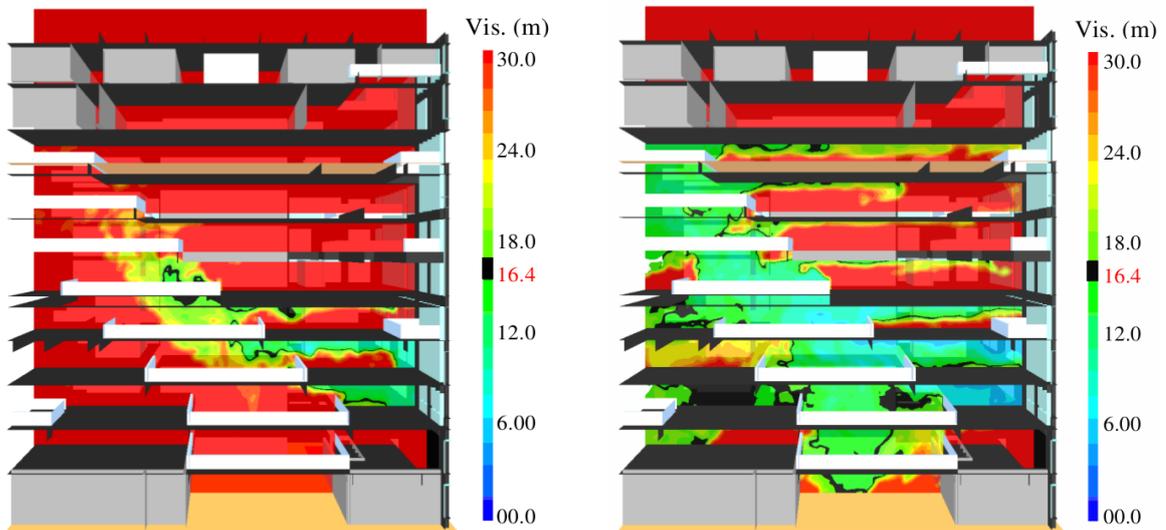
Figura 3 – Modelo 3D do galpão de armazenamento.



Fonte: Guigay (2008, p.128).

No primeiro exemplo, o incêndio foi simulado no primeiro andar da edificação. O combustível previsto foi material plástico, com significativa produção de fuligem e monóxido de carbono. A Figura 4 mostra a visibilidade no local após 6 e 8 minutos, respectivamente.

Figura 4 – Visibilidade dentro do edifício após 6 e 8 minutos.



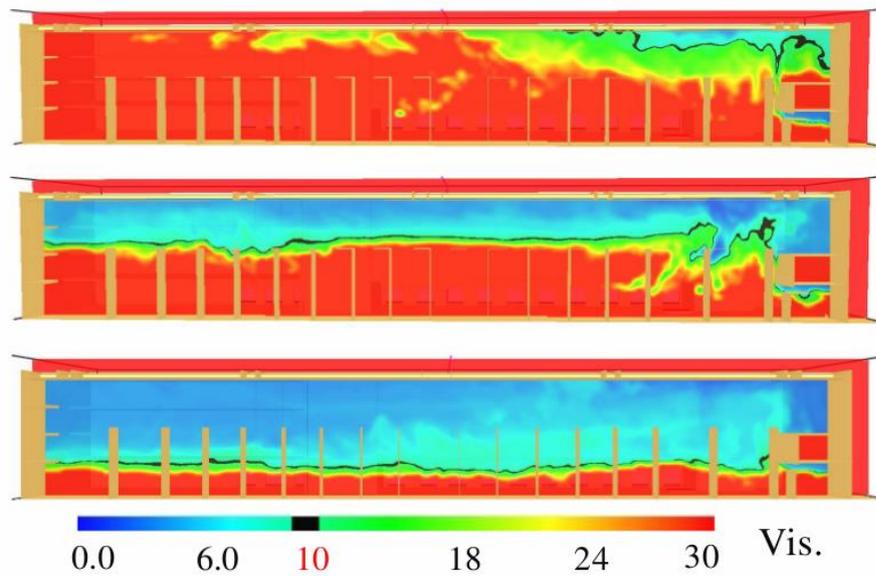
Fonte: Guigay (2008, p.126).

A visibilidade mínima a ser garantida para a evacuação do local para o caso em questão, conforme normas do país de origem dos autores, é de 16,4 metros. Após 8 minutos, constata-se que vários pontos da edificação estão com a visibilidade abaixo do ideal.

Para estudar a evacuação das pessoas e comparar os dados com a simulação no CFD, os autores utilizaram o software STEPS. Foi considerado que cada andar da edificação era habitado por 100 pessoas no momento do incêndio. Ao analisar os resultados, concluiu-se que após 6 minutos, quando os limites de visibilidade começaram a ficar prejudicados, todas as pessoas já haviam atingido as escadas, que para o edifício em questão, deveriam ser à prova de fogo e fumaça.

Na segunda situação, foi considerado que as escotilhas para exaustão da fumaça foram abertas 5 minutos após o início do incêndio, e todas as portas da edificação permaneceram abertas durante a simulação. O local de início do fogo e os materiais combustíveis foram escolhidos de forma a possibilitar uma grande produção de fumaça e a sua propagação rápida. A Figura mostra a visibilidade no ambiente após 4, 6 e 10 minutos.

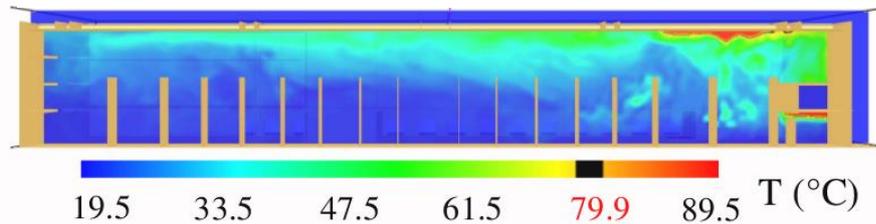
Figura 5 – Visibilidade após 4, 6 e 10 minutos (do teto para o chão).



Fonte: Guigay (2008, p.126).

Na Figura 6 é possível verificar a distribuição da temperatura no ambiente após 5 minutos.

Figura 6 – Temperatura dentro da edificação após 5 minutos.



Fonte: Guigay (2008, p.128).

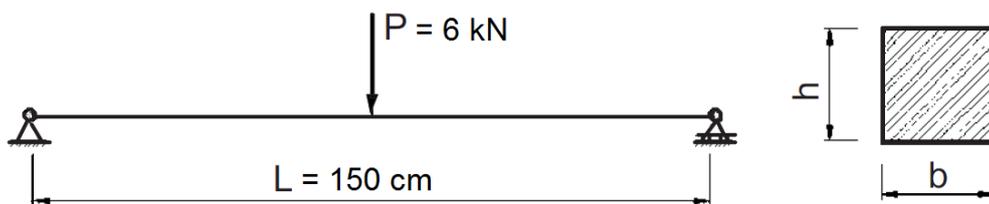
Neste tipo de edificação, por não ter característica de concentração de pessoas, a visibilidade mínima exigida é de 10 metros. A visibilidade começou a ser comprometida após 6 minutos de incêndio, porém em alturas superiores a estatura de uma pessoa. A temperatura manteve-se aceitável durante toda a simulação, com exceção de zonas próximas ao foco de incêndio. A simulação no CFD demonstrou que as escotilhas para exaustão de fumaça foram úteis para manter a temperatura interna aceitável para a entrada dos bombeiros para o combate direto ao fogo (GUIGAY, 2008).

Para a análise de sistemas de segurança contra incêndio, os fenômenos físicos mais estudados através do CFD são os relacionados comportamento dos gases, no entanto,

existem outras aplicações possíveis. Segundo Hurley (2016), através do estudo da transferência de calor, é possível examinar a absorção e transmissão de calor em elementos de vidro, investigar a resposta de lajes de concreto sob ação direta do fogo e prever o comportamento de estruturas de concreto e aço expostos à um incêndio. Em uma simples abordagem, a análise estrutural de uma edificação no CFD seria a verificação da temperatura atingida pelos elementos estruturais da mesma durante um incêndio, e se esta temperatura atingiu patamares que tornariam a estrutura instável ou mesmo determinariam o seu colapso.

Rigobello (2011) desenvolveu uma tese com o título “Desenvolvimento e Aplicação de Código Computacional para Análise de Estruturas de Aço Apoiadas em Situação de Incêndio”, na qual os softwares CFD SYSAF e ANSYS foram utilizados como ferramentas para prever o comportamento de pilares e vigas de aço em situações de incêndio. Os resultados foram validados em comparação com ensaios semelhantes realizados por diferentes autores, que utilizaram diferentes códigos computacionais. Apesar da tese abordar vários tipos de ensaios, serão discutidos aqui apenas os três principais, a saber: viga de aço, pilares de aço e pórtico tridimensional de 2 andares submetidos a incêndio. A Figura 7 demonstra o modelo da viga que foi estudada.

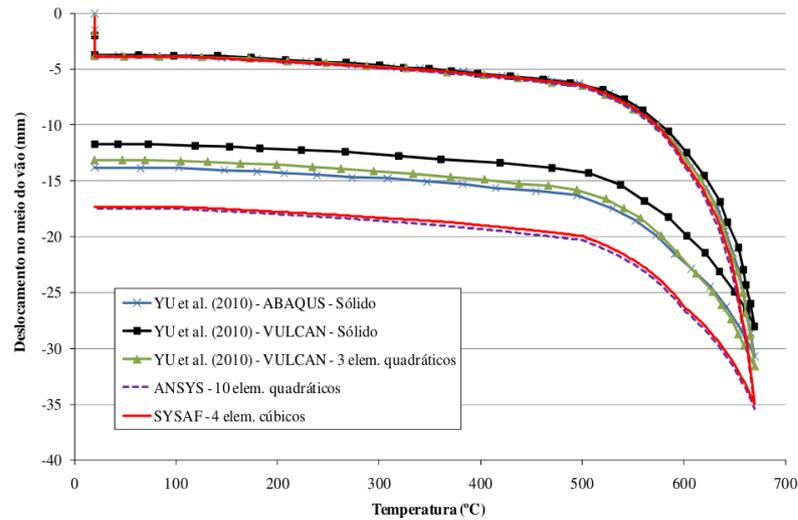
Figura 7 – Geometria da viga simplesmente apoiada, carregamento e seção transversal.



Fonte: YU et al (2010, apud RIGOBELLO, 2011, p. 154).

O autor comparou os resultados da simulação realizada nos programas ANSYS e SYSAF com os resultados obtidos por Yu et al (2010, apud RIGOBELLO, 2011), que utilizou os programas ABACUS e VULCAN, obtendo os resultados conforme Figura 8.

Figura 8 – Gráfico demonstrando o deslocamento no meio do vão da viga em função da temperatura.

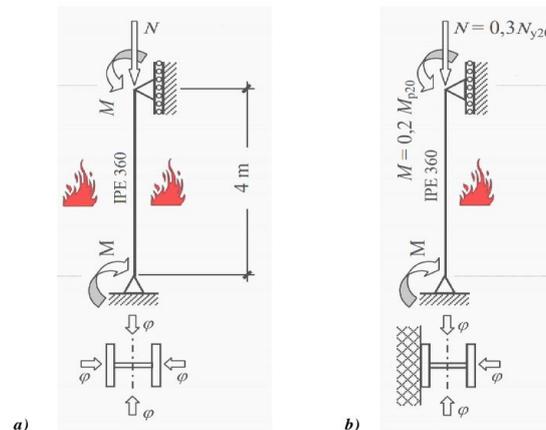


Fonte: Rigobello (2011, p. 156).

Os resultados demonstram o deslocamento da viga no meio do vão, sendo as linhas superiores a demonstração do deslocamento da viga durante o aquecimento e as linhas inferiores o deslocamento durante o resfriamento até 20° C. Os resultados dos programas ANSYS E SYSAF são praticamente idênticos, diferenciando um pouco dos resultados apresentados por Yu et al (2010, apud RIGOBELLO, 2011), sendo que tal fato pode ser atribuído às diferenças metodológicas envolvidas nos ensaios (RIGOBELLO, 2011).

O modelo de pilar utilizado no estudo de Rigobello (2011) pode ser visualizado na Figura 9. No primeiro cenário de simulação, o pilar é aquecido pelos quatro lados do perfil, já no segundo cenário o aquecimento é realizado em apenas três lados.

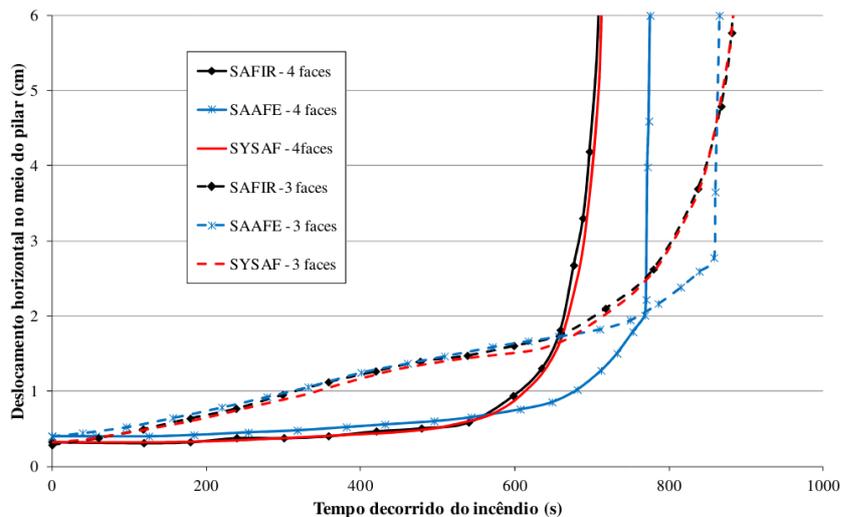
Figura 9 – Modelos de viga-pilar biapoiados expostos ao incêndio: a) seção com as quatro faces expostas ao fogo; b) seção com três faces expostas ao fogo.



Fonte: Landesmann (2005, apud RIGOBELLO, 2011, p.157).

Rigobello (2011) realizou a simulação no programa SYSAF e comparou com os resultados obtidos por Landesmann (2005, apud RIGOBELLO, 2011), o qual utilizou os códigos computacionais SAFIR e SAAFE. Na Figura 10 é possível constatar o deslocamento horizontal da viga previsto pelos diferentes programas de CFD nos dois casos estudados, 4 e 3 faces do pilar expostas ao fogo.

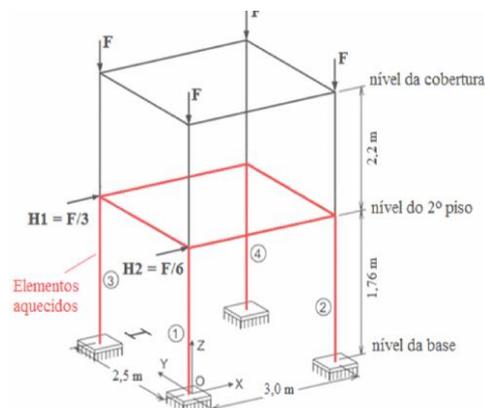
Figura 10 – Gráfico demonstrando o deslocamento horizontal no meio dos pilares em função do tempo de exposição ao incêndio.



Fonte: Rigobello (2011, p. 159).

A geometria e condições de contorno do pórtico tridimensional de 2 andares analisado na tese de Rigobello (2011) são ilustrados na Figura 11. Uma força F de 250kN é aplicada sobre a estrutura, e uma força $F/3$ e $F/6$ são aplicadas horizontalmente nos pontos H1 e H2 da estrutura, respectivamente.

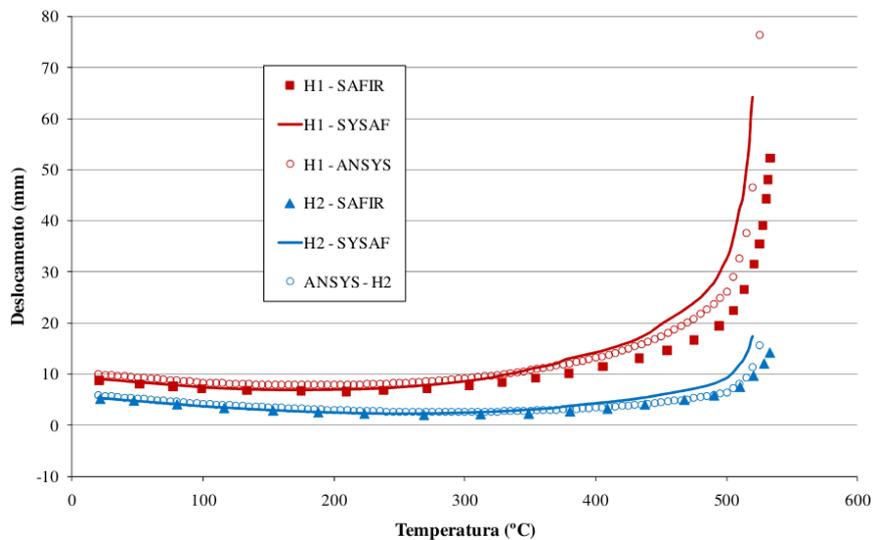
Figura 11 – Geometria e condições de contorno do pórtico tridimensional de aço de dois andares.



Fonte: Rigobello (2011, p. 168).

Foi simulado um incêndio na parte inferior da estrutura, com aquecimento uniforme de todas as vigas e pilares neste local. A mesma configuração de simulação foi utilizada por Souza Júnior e Creus (2007, apud RIGOBELLO 2011), os quais utilizaram o software SAFIR para a análise. Ribogello (2011) utilizou os programas SYSAF e ANSYS. Os resultados podem vistos na Figura 12.

Figura 12 – Gráfico demonstrando os deslocamentos H1 e H2 em função da temperatura dos elementos.



Fonte: Rigobello (2011, p. 169).

Segundo Rigobello (2011, p. 168 e 169),

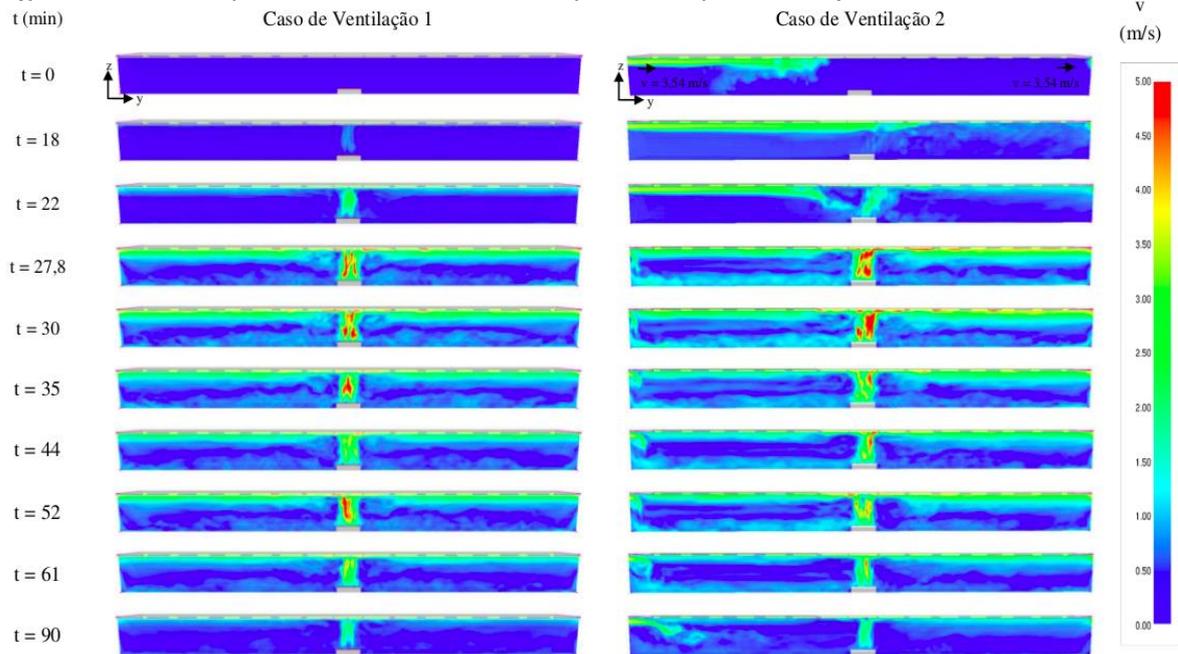
analisando-se os resultados obtidos com os programas SAFIR, SYSAF e ANSYS, pode-se perceber que os resultados obtidos com o SYSAF resultaram mais próximos aos obtidos com o ANSYS. Ainda assim, se forem comparadas as temperaturas de colapso dos modelos pode-se verificar que a diferença em relação ao SAFIR é da ordem de 2,5% apenas, o que caracteriza o bom desempenho do SYSAF nessa análise.

Carvalho (2013), estudou a aplicação do CFD para análise da segurança de túneis rodoviários sob incêndio. A autora aborda o tema através do estudo de caso de um incêndio simulado em um veículo médio sedam no Túnel Rebouças, na cidade do Rio de Janeiro. Foram analisados, dentre outros, a velocidade de propagação da fumaça, evolução da temperatura por convecção e a concentração da fumaça em função do tempo no interior do túnel. As análises foram realizadas considerando duas formas diferentes de ventilação: (1) ventilação nula; e (2) ventilação forçada, através de ventiladores instalados no teto do túnel, com velocidade constante de 3,14 m/s. O software CFD utilizado para a simulação foi o FDS (*Fire Dynamics*

Simulator).

Na Figura 13 consta a simulação da velocidade dos fluidos dentro do túnel, considerando as duas formas de ventilação. “A partir dos resultados apresentados, é possível observar que a velocidade do fluido não varia significativamente ao incluir uma ventilação forçada” (CARVALHO, 2013, p 35).

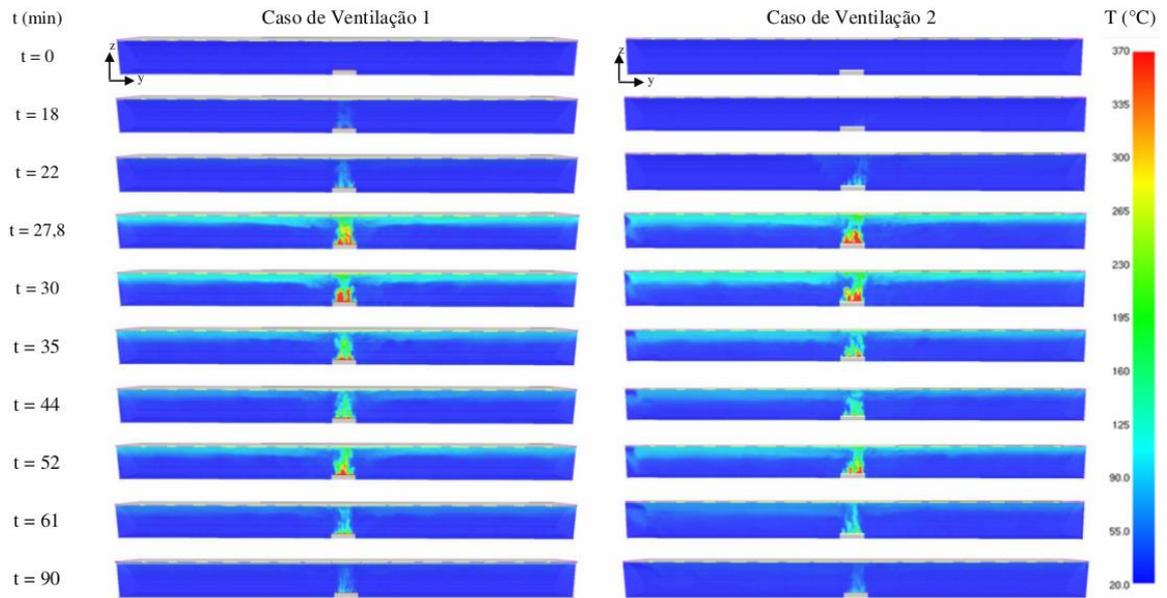
Figura 13 – Evolução da velocidade da fumaça em função do tempo.



Fonte: Carvalho (2013, p. 34).

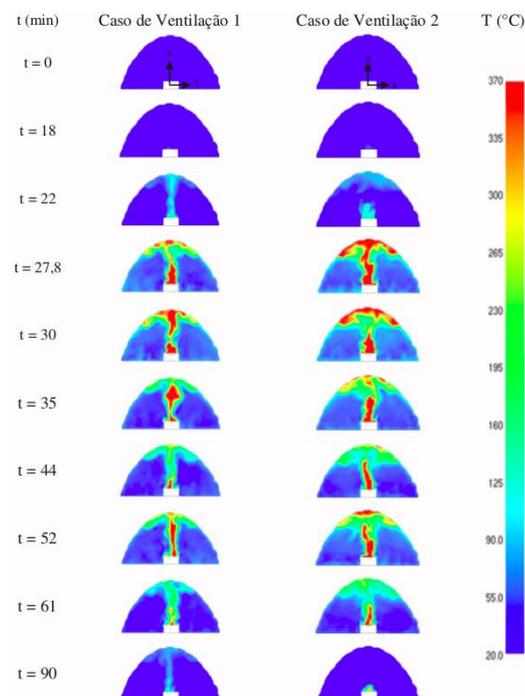
As Figuras 14 e 15 demonstram os resultados obtidos na análise da variação da temperatura por convecção, com perspectiva lateral e frontal (transversal), respectivamente. Conforme esperado, os fluidos com maiores temperaturas encontram-se na parte central superior do túnel, e as “diferenças apresentadas entre os casos na seção transversal são devidas à existência de turbulência gerada pelo encontro entre os fluxos gerados pela ventilação e combustão” (CARVALHO, 2013, p. 36).

Figura 14 – Evolução da temperatura em função do tempo, vista lateral.



Fonte: Carvalho (2013, p. 36).

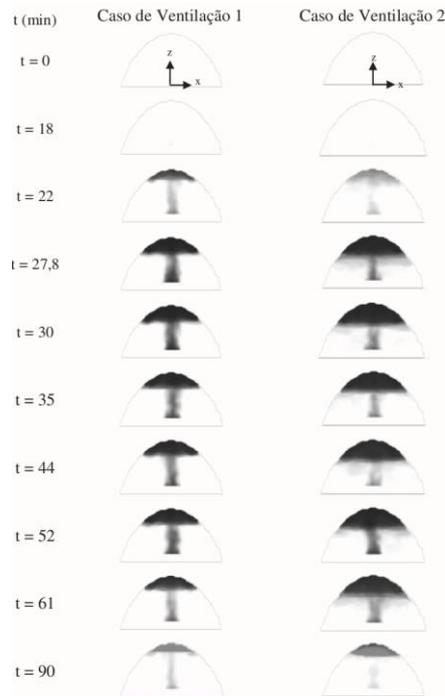
Figura 15 – Evolução da temperatura em função do tempo, vista frontal.



Fonte: Carvalho (2013, p. 37).

Na Figura 16 verifica-se a concentração de fumaça no teto do túnel, com os dois tipos de ventilação. Consta-se que “a fumaça está concentrada somente na região superior do túnel, exceto na região onde ocorre o incêndio. Em relação aos diferentes casos, percebe-se que para o segundo, a fumaça ocupa maior área da seção transversal” (CARVALHO, 2013, p. 44).

Figura 16 – Concentração de gases em função do tempo, vista frontal.



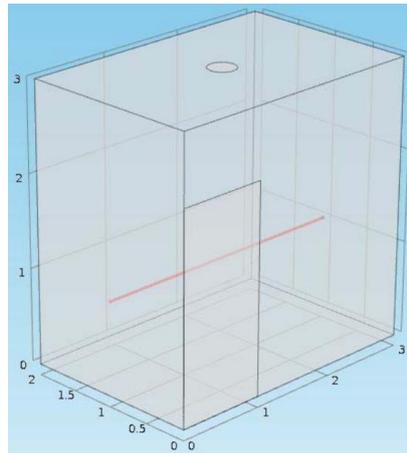
Fonte: Carvalho (2013, p. 42).

Conforme foi possível visualizar, apesar do senso comum estabelecer que a ventilação em um túnel rodoviário seria benéfica para a dispersão dos gases e diminuição da temperatura em caso de incêndio, não foram essas as conclusões da simulação. Sobre esta situação, Hurley (2016) faz um importante apontamento, citando que em caso de incêndios em túneis rodoviários, a velocidade da ventilação forçada deve ser estudada e definida de acordo com as características de cada túnel, pois o dimensionamento incorreto do sistema de ventilação poderia potencializar o sinistro, ao invés de amenizar seus danos. A aplicação do CFD para definição destes parâmetros tem obtido excelentes resultados.

Um outro importante aspecto na segurança contra incêndio é a regulamentação do uso de GLP e Gás Natural nas edificações. Isso é necessário devido ao perigo associado ao acúmulo destes gases em ambientes confinados, que pode ocasionar grandes explosões ou contribuir para o decréscimo dos níveis de oxigênio em um ambiente, seja por meio do acúmulo dos gases ou o efeito da queima destes dentro do ambiente.

Muharam e Septian (2013) utilizaram o CFD para simular um vazamento de metano em uma cozinha com área de 6 m², sem janela e com porta fechada. A Figura 17 demonstra o modelo geométrico da cozinha. O orifício superior é o local onde um exaustor foi instalado e a origem do traço vermelho é o local do vazamento de gás.

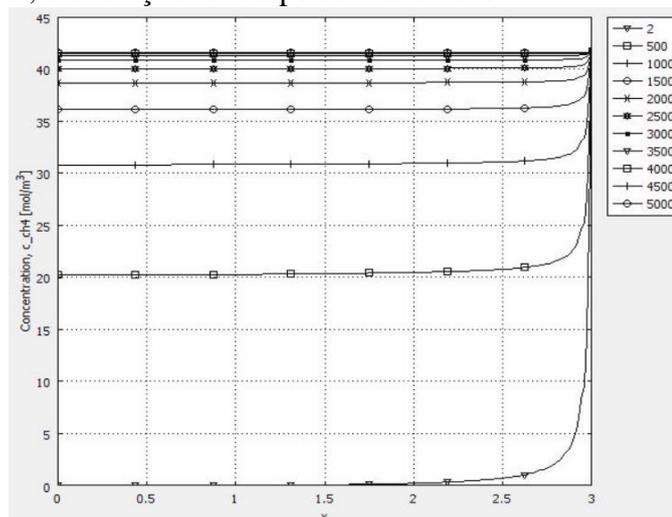
Figura 17 – Geometria do modelo.



Fonte: Muharam e Septian (2013, p. 229).

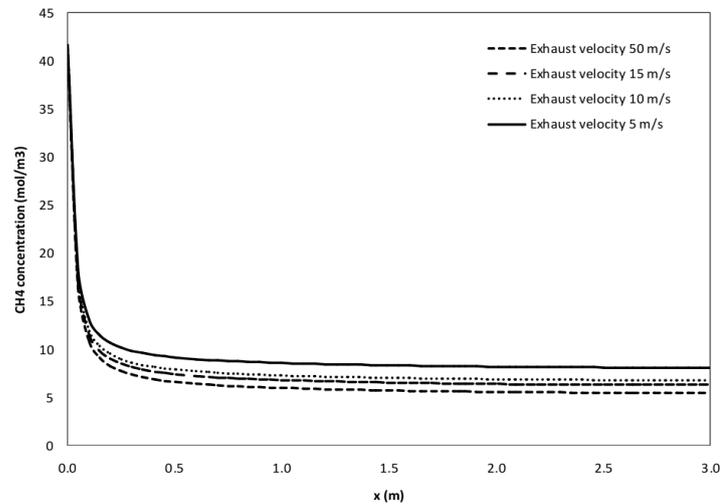
Para o cenário acima, Muharam e Septian (2013) consideraram duas situações: (1) primeiramente são analisadas as concentrações de gás metano no eixo x (comprimento) da cozinha em função do tempo de vazamento, até o ambiente atingir o equilíbrio (Figura 18); (2) após o ambiente ter atingido o equilíbrio de gás metano, o exaustor foi acionado para eliminação do gás no ambiente, sendo mensuradas as concentração de metano no eixo x (Figura 19).

Figura 18 – Concentração de gás ao longo do eixo X, em relação ao tempo de vazamento.



Fonte: Muharam e Septian (2013, p. 228).

Figura 19 – Concentração de gás ao longo do eixo X, de acordo com a potência do exaustor.



Fonte: Muharam e Septian (2013, p. 229).

Através da análise dos resultados, segundo Muharam e Septian (2013) é possível concluir:

- 1) considerando que os limites inferior e superior de inflamabilidade do metano são $2,08 \text{ mol/m}^3$ e $6,25 \text{ mol/m}^3$, tais limites foram atingidos na primeira etapa da experiência com 38 e 117 segundos, respectivamente, após o início do vazamento;
- 2) o tempo necessário para atingir o limite máximo de concentração de metano no ambiente foi de 4.500 segundos;
- 3) na segunda etapa do experimento, com o gás metano em equilíbrio no ambiente e com o vazamento ativo, 4 velocidades de exaustão foram testadas (5, 10, 15 e 50 m/s), porém nenhuma foi capaz de diminuir a concentração de metano abaixo do limite inferior de inflamabilidade, que é de $2,08 \text{ mol/m}^3$;
- 4) o aumento da velocidade do exaustor não diminui proporcionalmente a quantidade de metano na cozinha. Seria necessário um exaustor 10 vezes mais potente que o maior exaustor comercial (50 m/s) no país dos autores, Indonésia, para trazer os níveis de metano abaixo do limite inferior de inflamabilidade, para o caso estudado.

3.2.2 CFD e a Fase Ativa

Um fenômeno importante que ocorre durante o desenvolvimento dos incêndios e que deve ser conhecido pelos bombeiros no momento do combate é o *flashover*. Segundo Segundo Grimwood (2003, apud Oliveira, 2005, p. 13):

“O fenômeno denominado de *flashover*, em seu sentido genérico, é um assassino significativo de bombeiros. Nos EUA, por exemplo, as estatísticas da NFPA no período de 1985 e 1994 demonstraram que um total de 47 bombeiros combatentes perderam suas vidas devido ao *flashover*. De 87 bombeiros combatentes mortos nos EUA durante os anos 1990-1999 em razão de operações em incêndios estruturais, as principais causas das lesões que produziram o óbito estão:

- 1) perder-se dentro da estrutura sinistrada e ficar sem ar respirável = 29 mortes;
- 2) preso pelo progresso do fogo - backdraft ou flashover = 23 mortes;
- 3) preso em estruturas colapsadas = 18 mortes”.

Karlsson e Quintiere (2000) define o *flashover* como a fase de transição entre o período de crescimento e pleno desenvolvimento de um incêndio confinado, quando uma série de ignições espontâneas de objetos e materiais acontecem, devido à irradiação emanada de gases superaquecidos que estão na parte superior do compartimento. Para Oliveira, 2005, p. 27),

Se a oxigenação é adequada, as condições do ambiente alteram-se muito rapidamente à medida que o incêndio atinge todas as superfícies de combustão expostas. Isso acontece porque a capa de gás aquecido que se cria no teto da edificação durante a fase de crescimento irradia calor para os materiais combustíveis situados longe da origem do fogo. Esse calor irradiado produz a pirólise dos materiais combustíveis do ambiente. Os gases que se produzem durante este período se aquecem até a temperatura de ignição e poderá ocorrer um fenômeno denominado de ignição súbita generalizada (*flashover*, em inglês), ficando toda a área envolvida pelas chamas.

Lazaro et al (2008) realizou um estudo científico com o objetivo de avaliar a capacidade da fluidodinâmica computacional para prever um *flashover* em um incêndio confinado. Para validação do modelo computacional utilizado, foram utilizados dados de um experimento real de incêndio chamado de Dalmarnock, realizado pela universidade de Edimburgo, em um edifício na cidade de Glasgow, Escócia. Neste experimento, um incêndio foi gerado em um apartamento, no quarto pavimento do condomínio, onde foram colhidos e registrados diversos dados (Figuras 20 e 21). Dentre estes, destaca-se que o *flashover* foi observado após 300 segundos do início do incêndio e uma janela foi quebrada propositalmente

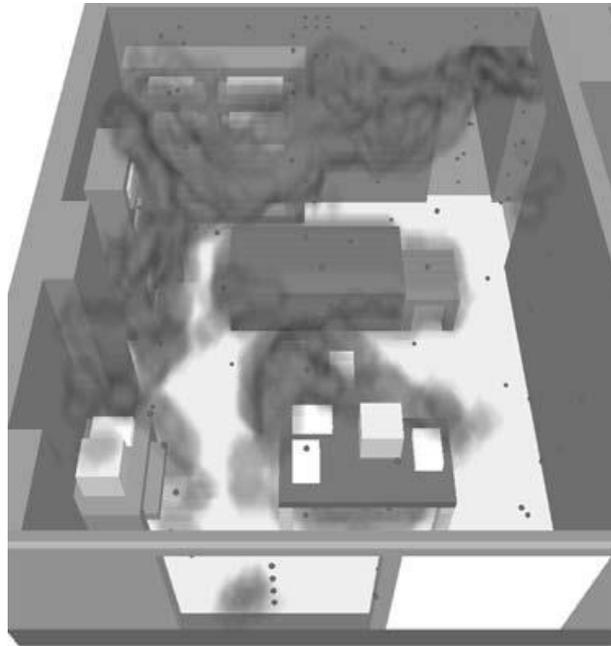
aos 780 segundos.

Figura 20 – Vista externa do experimento de Dalmarnock.



Fonte: Rein (2012). Disponível em: [http:// guillermo-rein.blogspot.com.br/2012_08_01_archi ve.html](http://guillermo-rein.blogspot.com.br/2012_08_01_archive.html)

Figura 21 – Vista interna da simulação em CFD do experimento de Dalmarnock.

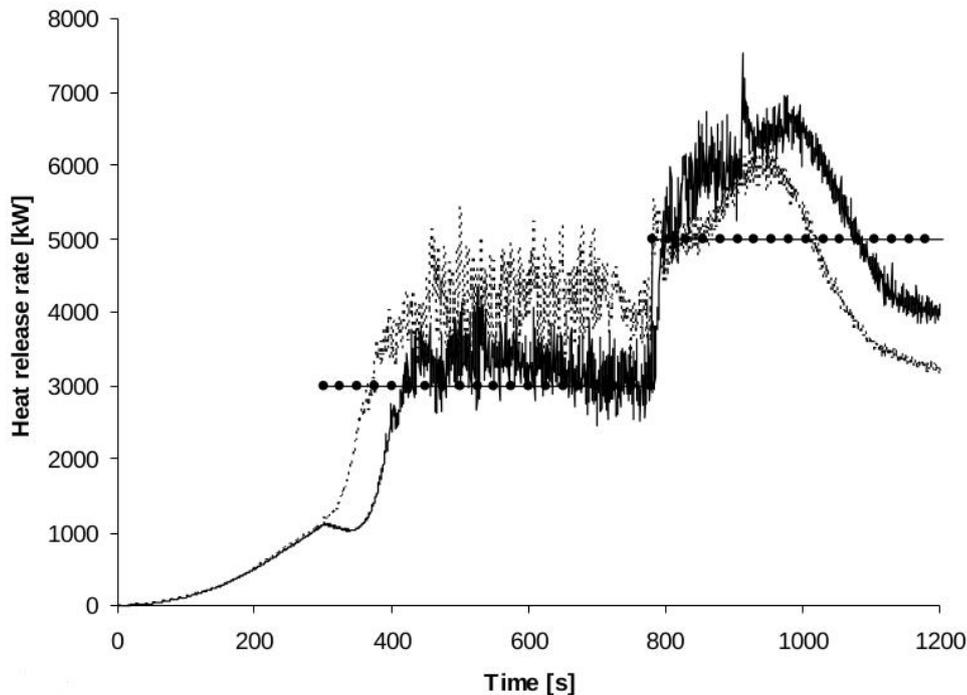


Fonte: Lazaro et al (2008, p. 1384).

Foi utilizado o software FDS para a simulação computacional. Foram testadas duas malhas diferentes, uma com células cúbicas de 10 x 10 x 10 cm e outra de 5 x 5 x 5 cm. A Figura 22 demonstra os resultados da taxa de calor liberado no ambiente (*heat release rate*)

durante a simulação, onde a linha em negrito represente a malha com células de 5 cm e a linha pontilhada representa a malha com células de 10 cm (LAZARO et al, 2008).

Figura 22 – Taxa de liberação de calor simulada no CFD.



Fonte: Lazaro et al (2008, p. 1383).

A comparação entre os dados experimentais e os resultados do FDS (Figura 23) são muito semelhantes com relação ao tempo em que o flashover aconteceu (300 segundos) e a resposta do incêndio à abertura da janela aos 780 segundos, quando o incêndio desenvolveu-se completamente, com a entrada de oxigênio no ambiente. Comprovou-se a capacidade deste software para a simulação e o estudo da evolução de incêndios confinados (LAZARO et al, 2008).

Uma técnica de combate a incêndio utilizada pelas equipes de resposta é, segundo Oliveira (2005), o Método Tridimensional com Resfriamento dos Gases, ou técnica 3DWF (*Three Dimensional Water Fog*). Segundo Grimwood e Desmet (2003, apud OLIVEIRA, 2005, p. 50) esse método

[...] consiste no direcionamento de curtos pulsos de água nebulizada na camada de pressão positiva formada pelos gases aquecidos do incêndio. Esta forma de aproximação também pode ser usada (defensivamente) para prevenir os efeitos de incêndios de progressão rápida (ignição súbita generalizada, Ignição explosiva, ignição dos gases do incêndio). O termo tridimensional se

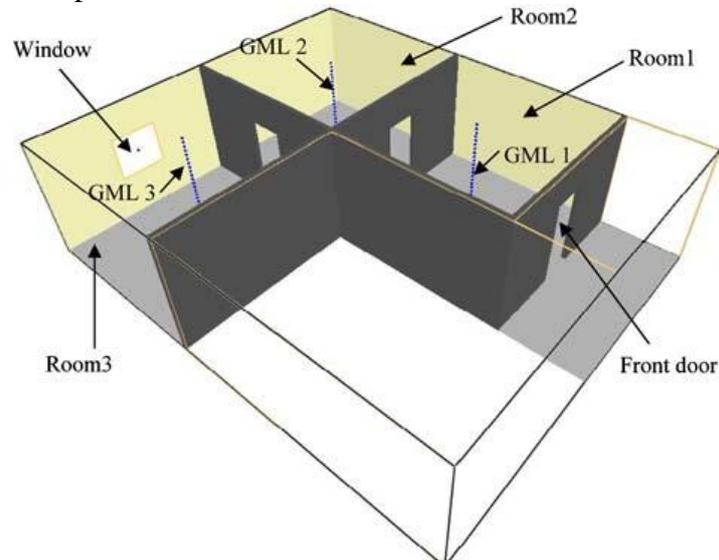
refere aos mecanismos de volume da combustão na fase gasosa ou tridimensional e as aplicações associadas de água, sempre calculadas em valores cúbicos (lpm/m³).

Liu et al (2002), ao abordar a técnica 3DWF, citou que os experimentos reais são muito úteis para o estudo e aprimoramento desta técnica, porém, além do alto custo operacional, estes experimentos não são suficientes para prover um entendimento profundo sobre o assunto, pois há muitas variáveis físicas envolvidas que não podem ser visualizadas em um experimento prático. Os autores concluíram, ao analisar diversas pesquisas sobre a utilização do CFD para estudo da aplicação de água neblinada para resfriamento de gases ou supressão do fogo, que esta ferramenta tem o potencial de prover uma compreensão detalhada sobre os fenômenos físicos deste processo, auxiliando no aprimoramento da técnica 3DWF. Um outro fenômeno comum em incêndios confinados, que merece atenção especial dos profissionais quando chegam no local do sinistro, é o *backdraft*. O mesmo ocorre quando a oxigenação de um incêndio confinado é inadequada, neste caso

[...] a queima se torna lenta e a combustão incompleta porque não há oxigênio suficiente para sustentar o fogo. Grandes quantidades de calor e gases do fogo podem se acumular nos espaços não ventilados. Estes gases podem até atingir a temperatura de ignição, mas carecem de oxigênio suficiente para se inflamar. Contudo, o calor interior permanece e as partículas de carbono não queimadas (bem como outros gases inflamáveis, produtos da combustão) estão prontas para incendiar-se rapidamente assim que o oxigênio for suficiente e, na presença de oxigênio, esse ambiente explodirá. A essa explosão chamamos ignição explosiva (*backdraft*, em inglês). Nesses casos, os bombeiros precisam realizar uma adequada ventilação para permitir que a fumaça e os gases combustíveis superaquecidos sejam retirados do ambiente, no entanto, isso deve ser realizado com cautela, pois uma ventilação inadequada suprirá abundante e perigosamente o local com o elemento que faltava (oxigênio), provocando a ignição explosiva (OLIVEIRA, 2005, p. 27 e 28).

Guigay et al (2009), desenvolveu uma pesquisa com o objetivo de mostrar como a fluidodinâmica computacional pode se integrar com os procedimentos práticos adotados pelas equipes de resposta ao chegar em um local de incêndio, e auxiliar estas equipes na tomada de decisões em situações de *backdraft*. O FDS foi utilizado para simular uma situação de *backdraft* em uma moradia com três quartos, conforme Figura 23.

Figura 23 – Modelo Geométrico da edificação com 3 compartimentos.



Fonte: Guigay et al (2009, p. 291).

A simulação inicia considerando a chegada dos bombeiros no local e a detecção de anormalidade no ambiente, sugerindo uma possível situação de *backdraft*. A primeira ação dos bombeiros foi abrir a porta cuidadosamente, permanecendo agachados e ao lado da abertura, procedimento operacional padrão na Suécia, país que foi utilizado como referência das técnicas utilizadas para a situação pelas equipes de resposta. A partir de então, o autor pesquisou seis cenários de atuação dos bombeiros:

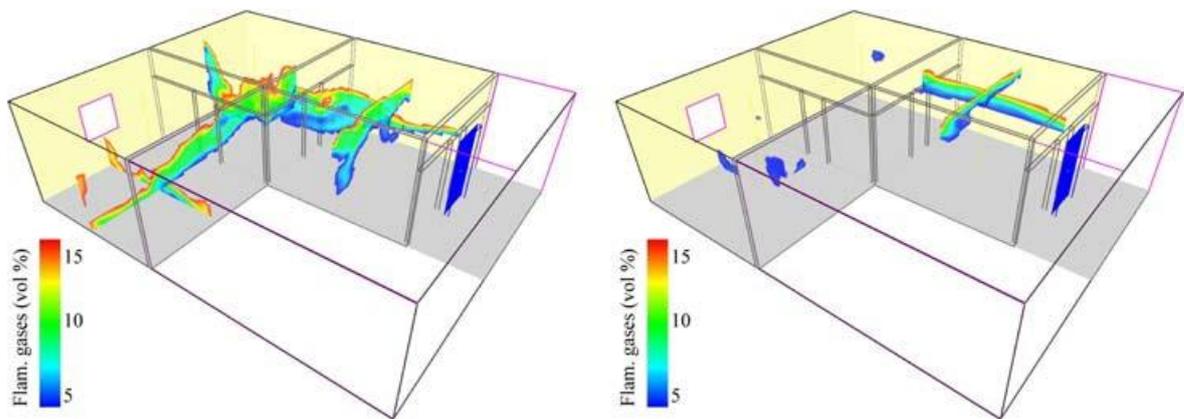
- 1) nenhuma ação é tomada após a abertura da porta;
- 2) os bombeiros precisam entrar no local para resgatar uma pessoa, então dois blocos são colocados na porta, simulando a influência que dois bombeiros podem causar no fluxo de ar dentro do ambiente;
- 3) realiza-se uma ventilação natural no local, abrindo a janela dos fundos;
- 4) é realizada uma ventilação por pressão positiva, utilizando-se para isso um ventilador na porta principal e abertura da janela dos fundos;
- 5) a utilização de um ventilador na porta principal sem a abertura da janela dos fundos;
- 6) utilização da técnica 3DWF.

O CFD foi utilizado para verificar como cada uma das ações influenciou na eliminação dos gases combustíveis do local em função do tempo. Referente ao cenário 6, a

técnica de utilização de jatos neblinados é amplamente conhecida por sua capacidade de resfriar os gases do ambiente, todavia, segundo Weng e Fan WC (2002, apud GUIGAY, 2009), experimentos práticos têm demonstrado que uma significativa contribuição da utilização desta técnica em ambientes confinados é a sua capacidade de dispersão dos gases inflamáveis, além do resfriamento do ambiente.

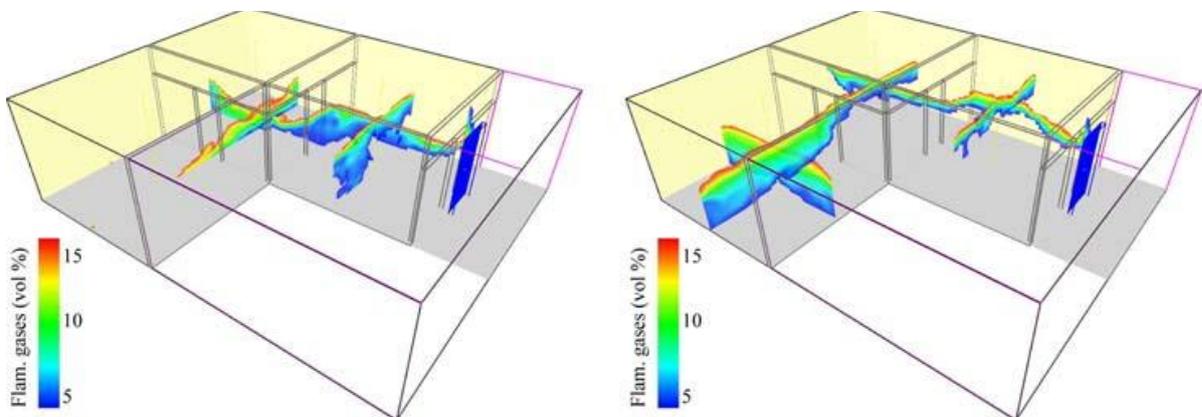
Abaixo, nas Figuras 24 e 25 estão representadas, dentre os seis cenários, a situação mais e menos eficiente da simulação. A Figura 26 mostra os efeitos da ventilação natural utilizando-se a abertura da janela dos fundos. A concentração dos gases dentro do intervalo de inflamabilidade é representada por cores, considerando-se: limite inferior 5 % (azul) e limite superior 15 % (vermelho).

Figura 24 – Região de inflamabilidade no cenário 4, ventilação forçada com janela aberta, após 20 segundos (esquerda) e 40 segundos (direita).



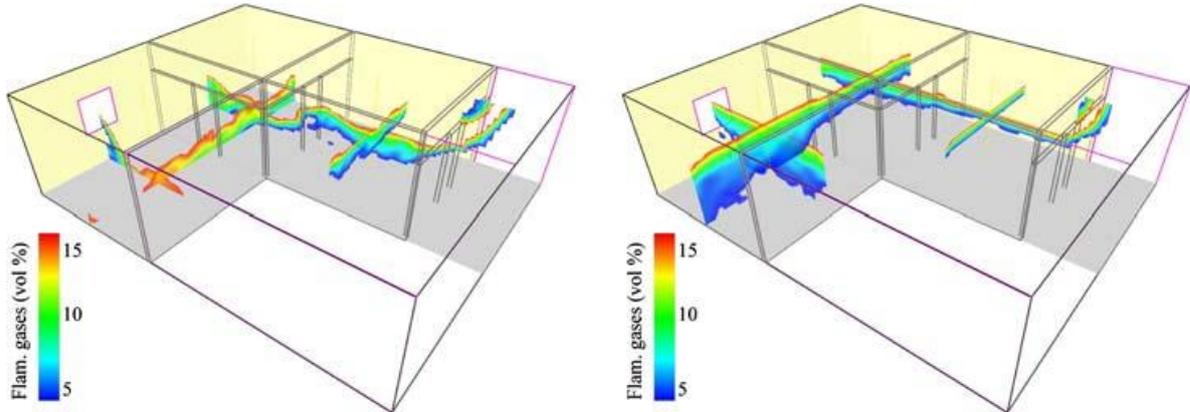
Fonte: Guigay et al (2009, p. 297).

Figura 25 – Região de inflamabilidade no cenário 5, ventilação forçada com janela fechada, após 20 segundos (esquerda) e 40 segundos (direita).



Fonte: Guigay et al (2009, p. 298).

Figura 26 – Região de inflamabilidade no cenário 3, ventilação natural porta/janela, após 20 segundos (esquerda) e 40 segundos (direita).



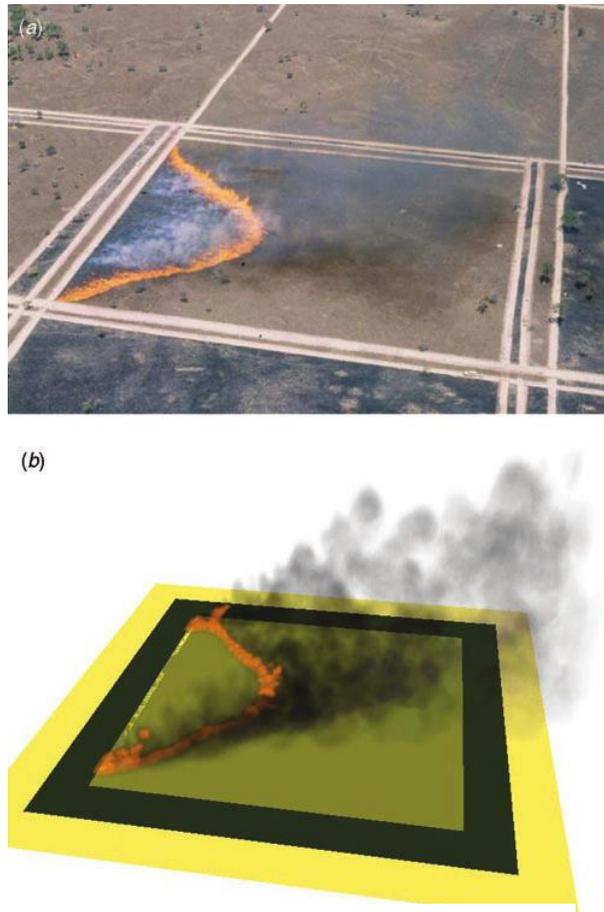
Fonte: Guigay et al (2009, p. 295).

As conclusões de Guigay et al (2009) foram as seguintes:

- 1) a ventilação por pressão positiva pode ser utilizada para a eliminação dos gases de um ambiente confinado. O risco de ignição aumenta bastante nos primeiros instantes, mas diminui rapidamente. É importante que se tenha convicção de que o caminho entre as duas aberturas esteja desobstruído, caso contrário os riscos de ignição permanecerão altos por um longo período;
- 2) comprovou-se que o uso da ventilação natural para a eliminação dos gases do ambiente é eficaz, porém o tempo para eliminar os gases inflamáveis do local é maior que o tempo no cenário onde foi utilizada a ventilação forçada;
- 3) a técnica de utilização de jatos de água neblinada também mostrou-se efetiva na diluição dos gases inflamáveis, além de contribuir para a diminuição da temperatura do ambiente;
- 4) o CFD mostrou-se eficiente para avaliar a efetividade de diferentes técnicas de combate a incêndio em situações de *backdraft*, sendo útil para recomendações e treinamentos nesta área.

A fluidodinâmica computacional também pode ser utilizada para o estudo de incêndios em vegetação. Mell et al (2007) utilizou o software WFDS, que é uma extensão para vegetação do programa FDS, para simular 16 configurações de incêndio em vegetação rasteira, com quatro diferentes linhas de ignição e quatro diferentes velocidades do vento. Os resultados da simulação foram comparados e validados com dados colhidos em experimentos práticos realizados na Austrália em 1980.

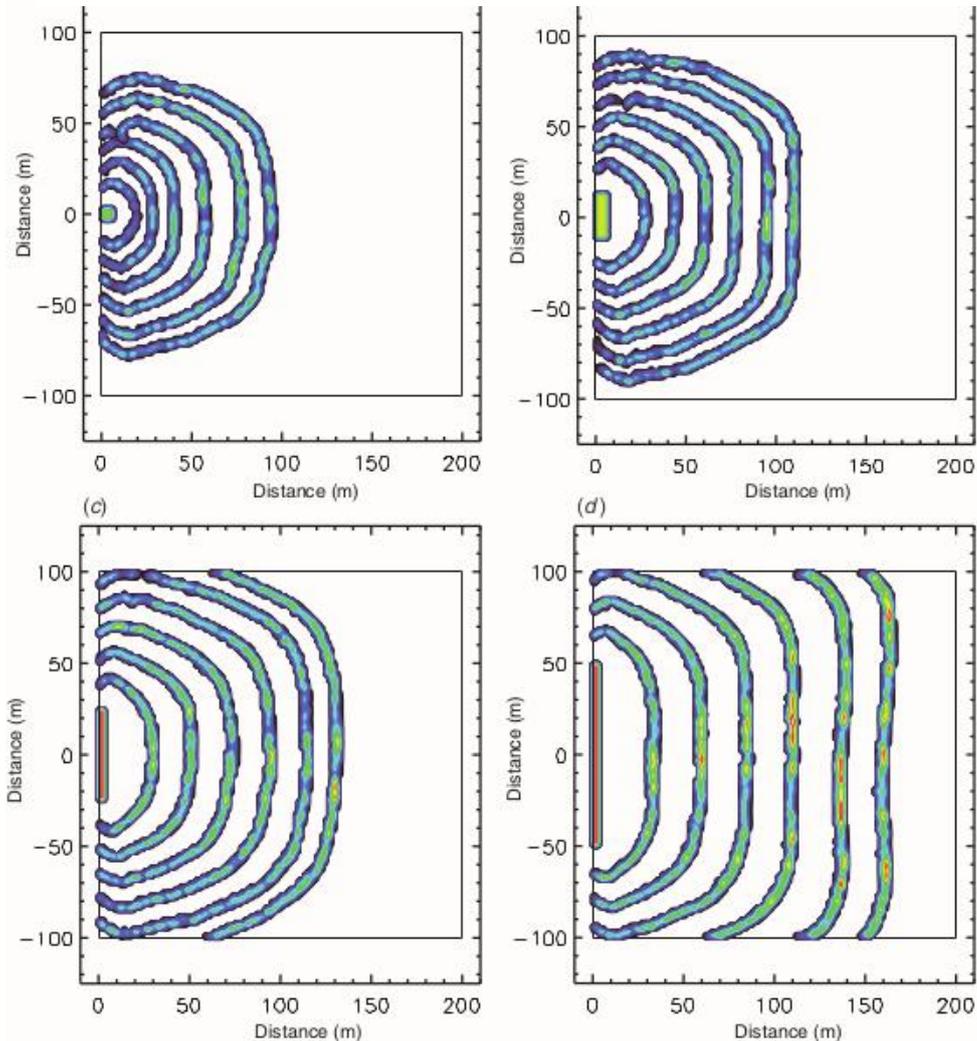
Figura 27 - Incêndio Real e a simulação do mesmo em CFD.



Fonte: Mell et al (2007, p. 8).

O comprimento das linhas de ignição propostas no estudo de Mell et al (2007) foram de 8, 25, 50 e 100 metros, considerando-se que a ignição foi instantânea em toda extensão da linha. As velocidades de vento estudadas foram de 1, 3, 4 e 5 m/s. A Figura 28 demonstra as simulações das 4 linhas de ignição com velocidades de vento de 1 m/s, sendo possível comparar a propagação do incêndio no terreno de acordo com o tamanho do foco inicial. Cada arco dos gráficos é a representação da posição do incêndio em intervalos de 60 segundos.

Figura 28 - Simulação da propagação do incêndio em vegetação rasteira.



Fonte: Mell et al (2007, p. 10).

Os resultados comparados entre os experimentos práticos reais e as simulações foram satisfatórios. Foi possível prever no CFD a posição da frente principal ou cabeça do incêndio, em função do tempo, velocidade do vento e tamanho do foco inicial. O WFDS mostrou-se uma excelente ferramenta para estudo do comportamento de incêndios em vegetação (MELL et al, 2007).

3.2.3 CFD e a Fase Investigativa

Um exemplo da utilização do CFD na atividade pericial foi a investigação realizada por pesquisadores do Instituto Americano de Padrões e Tecnologia, referente ao

incêndio ocorrido em uma loja de móveis em Charleston, na Carolina do Sul, em 18 de junho de 2007, que vitimou nove bombeiros. Usando evidências colhidas na cena e através de testemunhas, foi possível reconstituir o evento através do CFD, o que foi útil para estabelecer a sequência de eventos no incêndio e as conclusões da investigação. A Figura 29 mostra uma foto real do incêndio e uma foto da simulação realizada através do programa FDS (HURLEY, 2016).

Figura 29 - Comparação entre o incêndio real e a simulação realizado com o FDS na investigação do incêndio.



Fonte: Hurley (2016 , p. 1059).

Outro exemplo foi citado por Seito el al (2008, p. 343):

“No Brasil, atualmente está se começando a utilizar o FDS e o Smokeview como ferramenta de auxílio à perícia, como no incêndio ocorrido em 2007 no Distrito Federal e que vitimou duas crianças, deixando seriamente ferido mais uma pessoa. O incêndio aconteceu em um barraco de madeira de cômodo único, contendo um sofá, uma cama de casal, um armário, um berço conjugado com uma cômoda, outra cômoda e um armário de televisão.

Na Figura 30 consta a geometria do local do incêndio e a visualização da fumaça no momento em que ocorreu o *flashover*, simulado no programa FDS.

Figura 30 - Momento em que houve a generalização do incêndio na simulação.



Fonte: Seito el al (2008, p. 344).

Foram comparadas as marcas de queima no local, as informações colhidas das testemunhas e a simulação computacional. Através desta análise, concluiu-se que o foco inicial do incêndio estava próximo ao berço. “Foi possível verificar também que, quando da ocorrência da generalização do incêndio [*flashover*], a temperatura pode ter chegado a mais de 1.000° C em grande parte do ambiente em um período inferior a oito segundos” (SEITO et al, 2008, p. 344).

Madrzykowski, Forney e Walton (2002), utilizaram o programa FDS para reconstituir e investigar um incêndio ocorrido no ano de 1999, no estado de Iowa, nos Estados Unidos. O incêndio ocorreu em uma residência de dois pavimentos e vitimou três crianças e três bombeiros.

Figura 31 - Vista geral da residência atingida pelo incêndio.

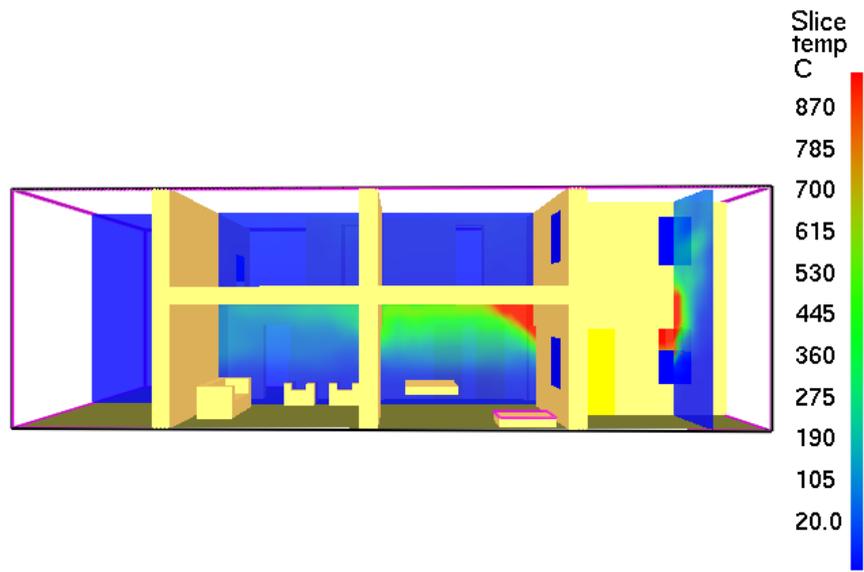


Fonte: Madrzykowski, Forney e Walton (2002, p. 12).

O incêndio iniciou no fogão da cozinha, que ficava no primeiro pavimento. Os resultados da investigação comprovaram que o evento crítico foi a ocorrência do *flashover* na cozinha, que ocorreu após 491 segundos após a ignição. Após 60 segundos da ocorrência do *flashover*, as chamas e gases quentes se espalharam rapidamente para outros cômodos. A temperatura dos gases aumentou de 200° C/300° C para mais de 600° C em vários locais da edificação, em menos de dois minutos (MADRZYKOWSKI, FORNEY E WALTON, 2002).

As Figuras 32, 33 e 34 demonstram a temperatura dos gases nos tempos de 491, 524 e 605 segundos após a ignição do incêndio.

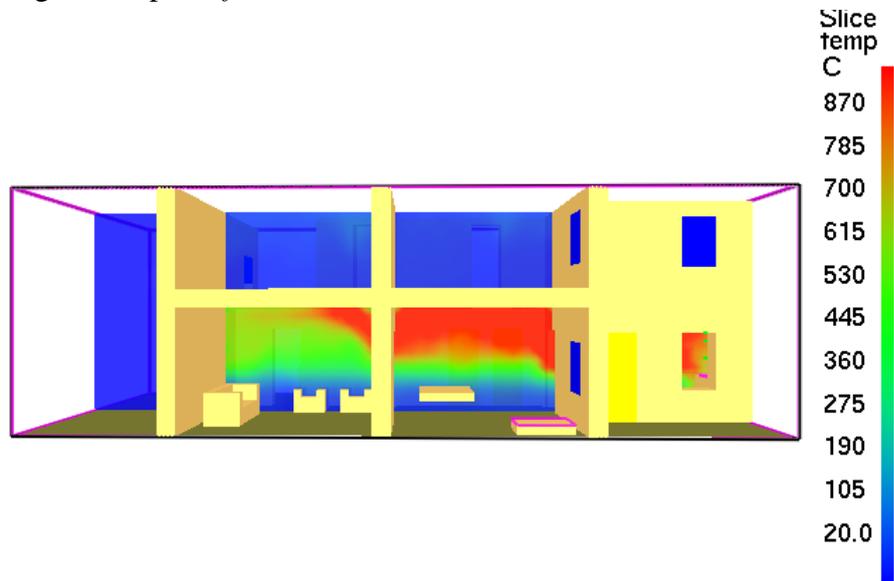
Figura 32 - Demonstrativo da temperatura no momento do *flashover*, 491 segundos após a eclosão do incêndio.



Time: 491.0

Fonte: Madrzykowski, Forney e Walton (2002, p. 21).

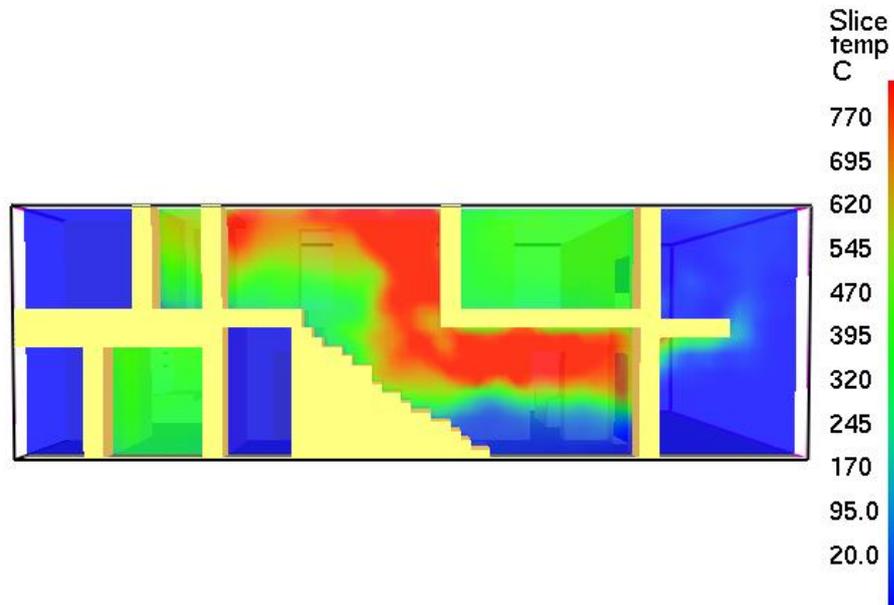
Figura 33 - Demonstrativo da temperatura interna da residência, 33 segundos após o *flashover*.



Time: 524.0

Fonte: Madrzykowski, Forney e Walton (2002, p. 22).

Figura 34 - Demonstrativo da temperatura interna na residência, 114 segundos após o *flashover*.



Time: 605.0 

Fonte: Madrzykowski, Forney e Walton (2002, p. 22).

Os três bombeiros, que perderam suas vidas no incêndio, estavam dentro da edificação quando ouve o *flashover* na cozinha (Figura 33). O aumento súbito da temperatura em várias partes da edificação, após o *flashover*, ocasionou a ignição de vários outros focos de incêndio em outros cômodos da residência. Estas mudanças repentinas foram determinantes para encurralar os profissionais, que sucumbiram aos efeitos extremos do ambiente interno (MADRZYKOWSKI; FORNEY E WALTON, 2002).

4 ANÁLISE DA PROPOSTA DE UTILIZAÇÃO DO CFD PELO CBMSC

Neste capítulo, a viabilidade da utilização do CFD pelo CBMSC será analisada. Serão apresentados uma proposta de software CFD, os requisitos computacionais (software e hardwares) necessários para rodar o programa e qual a qualificação necessária para operar o mesmo. Após, serão abordados aspectos gerais sobre a aplicação da fluidodinâmica computacional nas atividades desenvolvidas pelo CBMSC nas quatro fases do ciclo operacional.

4.1 REQUISITOS PARA IMPLEMENTAÇÃO DO CFD

Quanto à escolha de um programa para ser utilizado pelo CBMSC, primeiramente cabe citar que existem diversos programas de CFD disponíveis no mercado, todavia não é objetivo deste trabalho analisar todas as opções possíveis, e sim apresentar uma proposta viável. Entende-se como uma opção viável, um software com baixo custo de aquisição e manutenção, que possa ser instalado no sistema operacional Linux, que é o sistema utilizado nos computadores do CBMSC.

A empresa ESSH, que possui sede em Florianópolis/SC, comercializa o software CFD da ANSYS. Este software é amplamente utilizado por empresas e universidades em diversos países, sendo um dos programas de CFD mais conhecidos no mercado. O mesmo pode ser instalado em um sistema operacional Linux (ANSYS, 2009) e seu custo de aquisição é de US\$ 88.681,50 (oitenta e oito mil, seiscentos e oitenta e um dólares e cinquenta centavos), conforme orçamento demonstrado na Figura 35.

Figura 35 - Orçamento para licença de utilização do Software ANSYS – FLUENT.



Engineering Simulation and Scientific Software Ltda.
Rua Orlando Phillipi, n° 100
Edifício Techplan, 1° andar - Saco Grande
Florianópolis - SC - CEP: 88032-700 - Brasil
CNPJ: 00.796.437/0001-83 - Inscrição Municipal: 09121-6 - CMC: 4234

DATA: 29/mar/2016

CONTATO: Maurício Seiji Rezende
(48) 3953-0016
mauricio@esss.com.br

PARA: Capitão Willyan Fazzioni
Corpo de Bombeiros de Santa Catarina
wfazzioni@yahoo.com.br

PROPOSTA N°: 17134
VALIDADEZ: 28/abr/2016

Tipo	Item	Modalidade	Data Inicio	Data Final	Qty	Valor Unitário	Valor Final
New	ANSYS FLUENT	Paid-up	4/Apr/16	3/Apr/17	1	\$ 66.663,00	\$ 66.663,00
New	ANSYS FLUENT	TECS	4/Apr/16	3/Apr/17	1	\$ 13.338,00	\$ 13.338,00
New	ANSYS SpaceClaim Direct Modeler	Paid-up	4/Apr/16	3/Apr/17	1	\$ 7.236,00	\$ 7.236,00
New	ANSYS SpaceClaim Direct Modeler	TECS	4/Apr/16	3/Apr/17	1	\$ 1.444,50	\$ 1.444,50

Prazo de Pagamento: 15 Dias

Subtotal	\$ 88.681,50
Impostos Locais	inclusos
Total	\$ 88.681,50

Observações
Todos os valores apresentados estão em dólares (USD)
Os valores já incluem os impostos para pagamento no Brasil
TECS: Technical Enhancements and Customer Support
Para pedidos emitidos com atraso será aplicada uma taxa de reativação

OBSERVAÇÃO - Para aceitar a proposta enviar pedido com os seguintes dados:

<p>Dados para Faturamento</p> <p>[Nome da Empresa]</p> <p>[Faturamento ao nome de]</p> <p>[CNPJ/CPF]</p> <p>[Dados Complementares]</p>	<p>Dados para Entrega da Nota Fiscal</p> <p>[Responsável pelo recebimento da NF]</p> <p>[Departamento/Setor]</p> <p>[Telefone] [E-mail]</p> <p>[Endereço] [Fax]</p>
--	---

Fonte: Orçamento fornecido pela empresa ESSS (2016).

O valor total do orçamento é referente à licença de um ano para utilização do ANSYS – FLUENT. Os valores discriminados no orçamento correspondem a:

- 1) valor da licença anual no programa, U\$ 66.663,00;
- 2) valor do serviço de suporte técnico, U\$ 13.338,00;
- 3) valor, opcional, de U\$ 7.236,00, referente a licença que permite importar arquivos de outros programas para dentro do ANSYS, para facilitar a modelagem do domínio. Através deste programa opcional, por exemplo, é possível importar arquivos do software AutoCAD para o ANSYS;
- 4) valor do serviço de suporte técnico referente ao programa opcional, U\$ 1.444,50.

Como a fluidodinâmica computacional é um assunto novo para o CBMSC, que necessita de um desenvolvimento gradual, talvez não seja necessário a aquisição de um software profissional desta grandeza. Também, um investimento inicial desta ordem geraria elevada resistência para sua aquisição, o que inviabilizaria o início da utilização da ferramenta.

Uma excelente opção de software de CFD livre, é o FDS – Fire Dynamics Simulator, desenvolvido pela NIST, dos Estados Unidos da América. Enquanto o programa da ANSYS possui capacidade de análise para uma vasta gama de situações, tais com modelos de

combustão, transferência de calor, modelagem aerodinâmica, análise termoestrutural, reações químicas, dentre outros (ANSYS, 2009), o programa FDS limita-se a análise de modelos de incêndio, envolvendo a combustão, transferência de calor e o comportamento dos gases (MCGRATTAN, 2016). Para o estudo de incêndios, o FDS pode ser considerado uma excelente opção de software CFD, possuindo uma boa reputação internacional.

O programa FDS pode ser obtido no site oficial do desenvolvedor: <https://pages.nist.gov/fds-smv>. Neste site, é possível obter também todos os manuais técnicos do programa, manuais de instalação e utilização, bem como um guia com vários estudos já validados no FDS.

Segundo McGrattan (2016), os requisitos computacionais para rodar o FDS são relativos, dependendo do tipo da simulação, número de variáveis e quantidade de células dentro do domínio. O FDS pode ser instalado nos sistemas operacionais Windows, Linux ou MAC OS X. É recomendável que o computador possua um bom processador, no mínimo 4 GB de memória RAM e bastante espaço em HD. Quanto maior a capacidade do processador, menor será o tempo de simulação, e simples simulações costumam gerar mais de 1 GB de dados que serão armazenados no HD.

Podem haver casos em que seja necessário utilizar vários computadores em rede (cluster) para realizar uma simulação, devido à complexidade do problema. Todavia, em muitas situações rotineiras, um notebook comercial é suficiente para rodar uma simulação dentro do FDS (MCGRATTAN, 2016). Ou seja, não são necessários investimentos significativos em computadores e softwares para se utilizar a fluidodinâmica computacional no CBMSC.

Segundo Versteeg e Malalasekera (2007), além de considerar a obtenção de hardwares, softwares e licenças, uma organização deve ter consciência que precisa possuir profissionais capacitados para operar e entender os resultados do CFD. Talvez, esta seja a grande barreira a ser superada no processo de utilização do CFD pelo CBMSC.

Para atuar na fluidodinâmica computacional, o operador precisa possuir várias habilidades específicas, dentre estas destacam-se os conhecimentos sobre a física, química e matemática envolvidas no problema, além da sua própria experiência na utilização programa. Sem estas habilidades, é bem improvável que o profissional consiga extrair do CFD os melhores resultados (VERSTEEG E MALALASEKERA, 2007).

4.2 APLICAÇÕES PRÁTICAS DO CFD NO CBMSC

São inúmeras as possibilidades de aplicação da fluidodinâmica computacional no CBMSC. Nas fases normativa e preventiva do ciclo operacional, o CFD pode ser utilizado tanto para o estudo dos sistemas de segurança incêndio, buscando-se uma melhor eficiência normativa, como para fazer estudos e análises para edificações específicas.

Através da possibilidade de prever o comportamento dos gases de incêndio dentro de uma edificação, é possível estudar a eficiência dos sistemas de proteção contra fumaça e exaustão, previstos para as rotas de fuga exigidas nas normas catarinenses. Os dispositivos de detecção de fumaça também podem ser analisados.

A fumaça contribui para o aquecimento de um ambiente e para a propagação do fogo, além de ser uma das principais causas de fatalidades nos incêndios. Logo, pode-se prever sistemas eficientes de exaustão e eliminação dos gases do incêndio para locais com grande quantidade de pessoas, tais como shopping centers, casas noturnas e grandes indústrias.

A análise do comportamento do fogo, as reações de combustão envolvidas, as formas de propagação do calor e dos fluidos no ambiente, permitem dimensionar os sistemas de compartimentação e extinção do incêndio. Vários são os dispositivos normativos que tratam destes assuntos. Portanto, análises criteriosas sobre a eficácia destes sistemas e propostas de melhorias pode ser realizadas através da utilização do CFD.

As normas que tratam das instalações de gases combustíveis preveem diversos parâmetros e dispositivos de segurança relacionados ao comportamento físico e químico destes gases. Logo, as redes de distribuição do gás da edificação, a quantidade necessária e suficiente de recipientes instalados e as ventilações permanentes nos pontos de uso podem ser analisados por meio de simulação no CFD. Produtos da combustão e anormalidades no sistema tais como vazamentos e explosões também podem ser simulados.

Para edificações cujos sistemas previstos sejam inexequíveis ou cuja a forma de construção e arquitetura pretendida sejam inviabilizadas pelas normas de segurança contra incêndio, estudos direcionados através de simulações podem auxiliar na tomada de decisões. Através destes estudos, projetos preventivos contra incêndio seriam aprovados com sistemas dimensionados especificamente para a edificação pretendida, embasados em estudos realizados através da fluidodinâmica computacional.

Para a fase do combate ao incêndio, os estudos de CFD podem auxiliar os bombeiros na obtenção de conhecimentos mais detalhados sobre os incêndios, envolvendo processos de propagação, *flashover*, *backdraft*, temperatura dos gases, dentre outros. Estes

conhecimentos, ao serem disseminados para os profissionais que atuam no serviço operacional da instituição, são de extrema importância para a tomada de decisões e escolha das melhores técnicas de combate.

Nos laboratórios de combate a incêndio que o CBMSC possui em várias cidades de Santa Catarina, em sua maioria contêineres metálicos, o comportamento do fogo, dos gases e da temperatura, bem como as técnicas de combate, poderiam ser primeiro demonstradas por meio de simulações em CFD. Tal procedimento potencializaria o entendimento dos alunos a respeito dos fenômenos físico-químicos que observarão durante os exercícios reais de combate a incêndio.

Em incêndios de grandes proporções, os quais podem estender-se por dias ou semanas, o CFD pode ser utilizado para estimar a evolução do cenário de incêndio, permitindo-se traçar estratégias de combate e decidir sobre evacuação de áreas de risco.

Na fase pericial, a simulação computacional atuaria como uma ferramenta de suporte e auxílio da perícia, podendo servir para confirmação das conclusões da perícia ou para esclarecer pontos ainda não elucidados. Para a utilização do CFD nestes casos, segundo Hurley (2016), é de suma importância que se realize a coleta de dados no local do sinistro, tais como evidências físicas e testemunhais. Em casos de grande repercussão, uma simulação em vídeo, fotos e gráficos, seriam um importante incremento para a divulgação dos resultados.

Seito et al (2008, p. 342) traz uma importante consideração sobre a aplicação prática da fluidodinâmica computacional nas perícias de incêndio:

obviamente, a simulação não traz em si todas as respostas sobre o incidente, pois é apenas mais uma ferramenta, mas a sua utilização pelo investigador, em conjunto com o seu conhecimento em engenharia de proteção contra incêndio e do método científico de investigação de incêndio, faz com que possam ser obtidos resultados bem consolidados. A simulação permite a verificação das condições a que um local pode ter sido submetido quando da ocorrência de um incêndio, calculando dados importantes como: temperatura, concentração de gases como oxigênio e monóxido de carbono, tempo para acionamento dos detectores de fumaça e calor e dos sprinklers, tempo de queima, entre outros. O objetivo é o de encontrar a causa mais provável do incêndio, mas também permite verificar se o projeto arquitetônico da edificação foi negligente quanto à segurança contra incêndio ou se há falha nos sistemas de detecção e supressão, o que permitiria mudanças necessárias nas normas e códigos de proteção contra incêndio e pânico para evitar que um incêndio similar não aconteça no futuro.

Em todas possíveis aplicações práticas da fluidodinâmica computacional, é prudente deixar registrado que cada estudo analisará um caso específico, com limitações de acordo com a geometria do objeto e das variáveis físicas que se deseja analisar. Os resultados deverão ser validados, seja através de experimentos práticos ou pela comparação com valores

obtidos em outras referências bibliográficas. Uma vez validada, a simulação passa a ser uma referência para outros trabalhos similares.

Sugere-se que o CBMSC inclua o tema fluidodinâmica computacional em disciplinas pertinentes ministradas nos cursos de formação, tais como: combate a incêndio estrutural, combate a incêndio florestal, perícia em incêndio e explosão e segurança contra incêndio.

As coordenadorias de combate a incêndio e a Diretoria de Atividades Técnicas, possuindo profissionais com o perfil apropriado, podem utilizar as simulações como ferramenta para a tomada de decisão, seja para alterar uma técnica de combate ou para tornar as normas de segurança contra incêndio mais efetivas.

Outra forma de utilização desta ferramenta pode ser através de convênios ou uma aproximação institucional com universidades que possuem laboratórios de fluidodinâmica computacional. No campus da UFSC em Florianópolis, o Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos possui um laboratório de simulações, no qual são analisados processos de fluidodinâmica computacional. Assuntos de interesse institucional relacionados à dinâmica dos fluidos e transferência de calor podem servir como parâmetro para pesquisas realizadas por aquele departamento.

5 CONCLUSÃO

A fluidodinâmica computacional é uma ciência que utiliza recursos computacionais para simular eventos e solucionar equações da mecânica dos fluidos, transferência de calor e reações químicas. Após o estudo de um caso específico e a definição da abordagem teórica necessária, os dados são lançados em um software de CFD, o qual realizará o processamento dos mesmos e fornecerá os resultados ao pesquisador. Os resultados podem ser demonstrados através de gráficos, tabelas, imagens e animações.

Esta ciência mostrou-se uma excelente ferramenta para o estudo dos incêndios. Comprovou-se sua capacidade de analisar os mais variados aspectos deste fenômeno, tais como: comportamento e propagação de incêndios estruturais e florestais; estudo de fenômenos específicos dos incêndios confinados, tais como *backdraft* e *flashover*; comportamento de estruturas sob a ação do fogo; transferência de calor; as temperaturas do ambiente, fogo e gases; e o comportamento da fumaça em incêndios e gases em geral.

Através destas possibilidades, a fluidodinâmica computacional tem potencial para ser utilizada pelo CBMSC para o desenvolvimento de estudos e pesquisas que visem o aprimoramento de atividades relacionadas à segurança contra incêndio (elaboração e aplicação das normas), combate e perícia em incêndios. Foram pesquisados e expostos neste trabalho, estudos realizados através do uso de CFD, comprovando sua efetividade e capacidade de contribuir em cada uma das quatro áreas de atuação do CBMSC no ciclo operacional dos incêndios.

Devido ao avanço da capacidade de processamento e armazenamento dos computadores atuais, não são necessários supercomputadores ou grandes laboratórios para se realizar uma simulação, ou seja, não será necessário a aquisição de computadores específicos para esta finalidade. Outro aspecto importante, é a existência de softwares livres de CFD, que possuem excelente desempenho técnico e também podem ser instalados em sistema operacional Linux.

A utilização efetiva da fluidodinâmica computacional exigirá dos profissionais que operarão o programa conhecimentos significativos das teorias do problema a ser estudado, além do conhecimento e experiência na utilização do programa. Resultados confiáveis dependerão destas variáveis e também da validação dos resultados, que podem ser realizados através de experimentos práticos e busca de modelos semelhantes já validados pela literatura.

Ou seja, operar um software de CFD e obter resultados confiáveis não é uma tarefa simples, pois exigirá do operador ou operadores bastante pesquisa, dedicação e empenho na atividade.

Por fim, cabe salientar que este trabalho não teve o intuito de esgotar o tema ou se aprofundar nos conceitos e teorias da fluidodinâmica computacional, que são extensos e complexos. A proposta geral foi trazer este novo conceito ao conhecimento institucional, em uma linguagem acessível. A partir de então, será possível se iniciar um processo de produção de conhecimento no campo dos incêndios com a utilização da fluidodinâmica computacional, onde este trabalho servirá como parâmetro inicial para futuras pesquisas nesta área.

REFERÊNCIAS

ACORDI, Charles Fabiano. Metodologia da investigação de incêndios. Florianópolis, 2015. Apostila.

ANSYS (Estados Unidos da América) (Ed.). **ANSYS FLUENT 12.0: User's Guide**. 2009. Disponível em: <<http://users.ugent.be/~mvbelleg/flug-12-0.pdf>>. Acesso em: 16 abr. 2016.

BLAZEK, Jiri. **Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications**. 3. ed. Kidlington: Elsevier, 2015. 447 p.

CARVALHO, Julia Epichin Cheroto. **APLICAÇÃO DE FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE DE SEGURANÇA DE TÚNEIS RODOVIÁRIOS SOB INCÊNDIO**. 2013. 65 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <http://www.coc.ufrj.br/index.php/component/docman/cat_view/1-mestrado/117-2013?start=15>. Acesso em: 18 abr. 2016.

CARLSSON, Jörgen. **Fire Modelling Using CFD: An introduction for Fire Safety Engineers**. 1999. 120 f. Relatório N° 5025 - Curso de Engenharia de Segurança Contra Incêndio, Department Of Fire Safety Engineering, Lund University, Lund, 1999. Disponível em: <<https://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordId=1767130&fileId=1770040>>. Acesso em: 14 abr. 2016.

GUIGAY, Georges. **A CFD AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF UNDER-VENTILATED COMPARTMENT FIRES**. 2008. 230 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engineering And Natural Sciences, Department Of Civil And Environmental Engineering, University Of Iceland, Reykjavik, 2008. Disponível em: <http://skemman.is/stream/get/1946/3439/10659/1/Thesis_Georges_Guigay_fixed.pdf> . Acesso em: 18 abr. 2016.

GUIGAY, Georges et al. The Use of CFD Calculations to Evaluate Fire-Fighting Tactics in a Possible Backdraft Situation. **Fire Technology**. [s. L.], p. 287-311. June, 2009.

LAZARO, Mariano et al. Numerical Simulation of Fire Growth, Transition to Flashover, and Post-Flashover Dynamics in the Dalmarnock Fire Test. In: FIRE SAFETY SCIENCE, 9., 2008, Reykjavik, Islândia. **Proceedings of the Ninth International Symposium**. Reykjavik: International Association For Fire Safety Science, 2008. v. 1, p. 1377 - 1388.

HURLEY, Morgan J. (Ed.). **SFPE Handbook of Fire Protection Engineering**. 5. ed. New York: Springer, 2016. 3493 p.

KARLSSON, Björn; QUINTIERE, James G. **Enclosure Fire Dynamics**. Boca Raton: Crc Press, 2000. 317 p.

KEVIN MCGRATTAN (Estados Unidos da América). National Institute Of Standards And Technology - NIST. **Fire Dynamics Simulator: User's Guide**. 2016. Disponível em: <<https://drive.google.com/file/d/0B-W-dkXwdHWNHk5aE9yV0F6TE0/view>>. Acesso em: 16 abr. 2016.

LIU, Yunlong; MOSER, Alfred; SINAI, Yehuda. Comparison of a CFD fire model against a ventilated fire experiment in an enclosure. **International Journal Of Ventilation**. [s. L.], p. 169-181. September, 2004.

LIU, Z. et al. REVIEW OF THREE DIMENSIONAL WATER FOG TECHNIQUES FOR FIREFIGHTING. **Institute For Research In Construction National Research Council Canada: Research Report 124**. Ottawa, p. 0-18. December, 2002. Disponível em: <<http://nparc.cisti-icist.nrc-cnrc.gc.ca/eng/view/object/?id=7463fbf8-4148-48c5-bd82-7e641a61bcb1>>. Acesso em: 5 maio 2016.

MADRZYKOWSKI, Daniel; FORNEY, Glenn P.; WALTON, William D. **NISTIR 6854: Simulation of the Dynamics of a Fire in a Two-Story Duplex – Iowa, December 22, 1999**. Gaithersburg: National Institute Of Standards And Technology, 2002. 24 p.

MELL, William et al. A physics-based approach to modelling grassland fires. **International Journal Of Wildland Fire**. [s. L.], p. 1-22. February, 2007. Disponível em: <<http://www.publish.csiro.au/paper/WF06002.htm>>. Acesso em: 23 maio 2016.

MUHARAM, Yuswan; SEPTIAN, Henry. Simutation of Gas Leakage in a Gas Utilization System in Household Sector. **International Journal Of Technology**. [s. L.], p. 224-231. July, 2013.

OH, Hyoung Woo (Ed.). **Applied Computational Fluid Dynamics**. Rijeka: Intech, 2012. 344 p.

OLIVEIRA, Marcos de. **Estudos sobre Incêndios de Progresso Rápido**. 2005. 74 f. Monografia (Especialização) - Curso de Planejamento e Gestão em Defesa Civil, Centro Universitário de Estudos e Pesquisas Sobre Desastres, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005. Disponível em: <http://www.ceped.ufsc.br/wp-content/uploads/2014/09/Monografia_Marcos.pdf>. Acesso em: 23 maio 2016.

PORCIÚNCULA, Cleiton Bittencourt. **Simulação Fluidodinâmica Computacional de Processos de Separação por Membranas**. 2007. 142 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Fenômenos de Transporte e Operações Unitárias, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/11808>>. Acesso em: 05 abr. 2016.

SANTA CATARINA (Estado). Constituição (1989). **Constituição do Estado de Santa Catarina**. Disponível em: <http://www.alesc.sc.gov.br/portal/legislacao/docs/constituicaoEstadual/CESC_16_11_2009.pdf>. Acesso em: 03 maio 2016.

SANTA CATARINA (Estado). Decreto nº 1.957, de 2013. **Regulamenta a Lei nº 16.157, de 07 de novembro de 2013**. Disponível em: <http://www.cbm.sc.gov.br/dat/images/arquivo_pdf/Leis/Decreto_1957_2013_Poder_de_Policia.pdf>. Acesso em: 03 maio 2016.

SANTA CATARINA (Estado). Lei nº 16.157, de 07 de novembro de 2013. **Dispõe sobre as Normas e os Requisitos Mínimos para a Prevenção e Segurança Contra Incêndio e Pânico e Estabelece Outras Providências**. Disponível em: <http://www.cbm.sc.gov.br/dat/images/arquivo_pdf/Leis/Lei_16157_2013_poder_de_

Polcia_CBMSC.pdf>. Acesso em: 03 maio 2016.

REIN, Guillermo. **Forecasting Fire Dynamics: Tomorrow's Infrastructure Protection**. 2012. Disponível em: <http://guillermo-rein.blogspot.com.br/2012_08_01_archive.html>. Acesso em: 23 maio 2016.

RIGOBELLO, Ronaldo. **DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE CÓDIGO COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE DE ESTRUTURAS DE AÇO APORTICADAS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO**. 2011. 272 f. Tese (Doutorado) - Curso de Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, SÃO Carlos, 2011. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/.../2011DO_RonaldoRigobello.pdf>. Acesso em: 18 abr. 2016.

SABINO, Luana Araújo. **ESTUDO DA DISTRIBUIÇÃO DA TEMPERATURA EM INSTALAÇÕES PARA A CRIAÇÃO DE FÊMEAS SUÍNAS EM FASE DE GESTAÇÃO COM O USO DA FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD)**. 2015. 89 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Agrícola, Centro Tecnológico, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2015. Disponível em: <www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=000953807>. Acesso em: 05 abr. 2016.

SEITO, Alexandre Itiu et al. **A segurança Contra Incêndio no Brasil**. São Paulo: Projeto Editora, 2008. 457 p.

SILVA, Janaína de Andrade. **MODELAGEM CFD DE EXPLOSÕES DE PÓS EM SILOS**. 2012. 121 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012. Disponível em: <<http://www.prpg.ufla.br/esistemas/wp-content/uploads/2012/08/MODELAGEM-CFD-DE-EXPLOS%C3%95ES-DE-P%C3%93S-EM-SILOS.pdf>>. Acesso em: 18 abr. 2016.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method**. 2. ed. England: Pearson Education Limited, 2007. 503 p.