



Artigo de Revisão

ANÁLISE DAS APLICAÇÕES DE SOFTWARES SIMULADORES DE INCÊNDIO POR FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL POR BOMBEIROS MILITARES BRASILEIROS

APPLICATION ANALYSIS OF FIRE SIMULATOR SOFTWARE BASED ON COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS BY BRAZILIAN MILITARY FIREFIGHTERS

Henrique Diniz Mello¹, Paulo Henrique Camargos Firme¹

DOI: <https://doi.org/10.56914/vigiles.v4i1a4>

¹. Corpo de Bombeiros Militar de Minas Gerais.

RESUMO

Os programas computacionais baseados em fluidodinâmica (Computational fluid dynamics – CFD, em inglês) são ferramentas de pesquisa amplamente utilizadas em todo o mundo. A alavancagem no desenvolvimento da ciência do fogo, a partir dos anos 2000, teve grande influência do lançamento do Simulador Dinâmico de Incêndio (Fire Dynamics Simulator – FDS, em inglês). Diante dessa rápida evolução, é importante que os corpos de bombeiros militares do Brasil, como órgãos reguladores e principais referências no assunto, acompanhem a produção de conhecimento. Sendo assim, o presente estudo objetivou identificar e discutir como os bombeiros militares brasileiros utilizam essa ferramenta. Para tal, foi realizada revisão bibliográfica e entrevista aos principais autores bombeiros envolvidos nessa pesquisa. Foram detectados seis estados que já identificaram essa tendência e, dentre eles, quatro que já produziram conhecimento a partir da aplicação direta do FDS. Também foram constatadas aplicações práticas desse tipo de ferramenta na atividade-fim das corporações, especialmente em perícias e avaliação de normas. O estudo permitiu concluir que a produção científica com o uso de CFD por bombeiros militares brasileiros é ainda incipiente e carece de incentivo das corporações em apoio às iniciativas individuais.

Palavras-chave: Bombeiros; Incêndio; Fluidodinâmica computacional.

ABSTRACT

Computational fluid dynamics (CFD) programs are research tools widely used worldwide. The growth in the development of fire science from the 2000s onwards has been greatly influenced by Fire Dynamics Simulator (FDS) release. Given this quick evolution, it is necessary that the Brazilian Military Firefighters Corps, as legislators and main references in this subject, follow knowledge production closely. Therefore, the objective of this study was to identify and discuss how Brazilian military firefighters use this tool. For that purpose, a literature review was performed, as well as interviews with the main military firefighters authors in the area. As a result, six states have already identified this trend, and among them, four states have already produced knowledge through CFD application. Some practical applications of these tools in fire departments' activities were also identified, especially for fire investigation and regulation assessment. The study found that the scientific production using CFD by Brazilian military firefighters is still incipient and lacks encouragement from Corporations in support of individual initiatives.

Keywords: Firefighter; Fire; Computational fluid dynamics.



Recebido em: 11/10/2019 - Aprovado em: 30/07/2021

E-mail: henrique.mello@bombeiros.mg.gov.br.

1 INTRODUÇÃO

A Fluidodinâmica Computacional - *Computational Fluid Dynamics* (CFD) - é uma técnica poderosa, amplamente utilizada na engenharia para resolver questões de aerodinâmica, dinâmica dos fluidos, turbomáquinas, processos químicos, engenharia ambiental, dentre outras áreas. A partir de um modelo computacional, os problemas são resolvidos por meio de algoritmos estruturados nos princípios de conservação de massa, conforme a segunda lei de Newton, que estabelece que a taxa de variação do momento é igual à soma das forças aplicadas a uma partícula de fluido; e da primeira lei da termodinâmica, sobre a conservação de energia. A aplicação desses princípios na fluidodinâmica leva às equações de *Navier-Stokes* (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). Esses autores definem CFD como o uso de simulações computacionais para a análise de sistemas que envolvam escoamento de fluidos ou transferência de calor, incluindo-se fenômenos associados, tais como reações químicas.

Os softwares modeladores de incêndio por fluidodinâmica computacional mais conhecidos são o Simulador Dinâmico de Fogo (*Fire Dynamics Simulator* – FDS, em inglês), o mais frequentemente citado na literatura nacional, e o SMARTFIRE (TABACZENSKI; CORRÊA; SANTOS; PIRES; SILVA, 2017). É importante diferenciá-los daqueles baseados em modelos de zonas, como o OZONE (CADORIN; PINTEA; FRANSSEN, 2009) e o Modelo Consolidado de Crescimento do Incêndio e Transporte de Fumaça (*Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport* – CFAST, em inglês) (PEACOCK; RENEKE; FORNEY, 2017). Embora utilizem os mesmos conceitos físicos, os modelos de zonas são mais simples, repartem o ambiente verticalmente em dois volumes de controle, superior quente e inferior frio (LANNON; MILKE, 2014). Por sua vez, os simuladores baseados em CFD dividem o ambiente em diversos volumes menores, atribuindo-lhes propriedades como velocidade, pressão, densidade e temperatura, além de suas derivadas no tempo e espaço (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

Softwares mais robustos também podem ser utilizados para modelagem de incêndios tais como ANSYS, SAFIR, SYSAF (FAZZIONI, 2016) e ABAQUS (TABACZENSKI; CORRÊA; PIRES; SILVA, 2019). Esses programas não se limitam à simulação de incêndio, possuindo vasta gama de aplicações na engenharia.

A indústria aeroespacial iniciou a utilização de CFD no projeto, pesquisa e fabricação de aeronaves e motores a jato na década de 1960. A partir dos anos 1990, quando os computadores passaram por grande evolução e tornaram-se mais acessíveis, os programas acompanharam esse desenvolvimento. Atualmente, a ferramenta é fundamental para prover competitividade a projetos e processos industriais (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).



Em 2000, foi lançado o FDS, pelo Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia dos Estados Unidos (*National Institute of Standards and Technology – NIST*, em inglês). A lista de desenvolvedores inclui um engenheiro-naval da Marinha do Brasil, o então Tenente Júlio Cesar Silva, doutor em engenharia civil pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. Desde seu lançamento, o programa vem sendo constantemente testado por usuários de todo o mundo (MCGRATTAN; HOSTIKKA; FLOYD; MCDERMOTT; VANELLA, 2021).

No Brasil, o uso de CFD para simulação de incêndios desenvolveu-se a partir dos anos 2000, aplicado inicialmente na investigação desse tipo de sinistro. Braga e Landim (2008) citam um incêndio em um barracão, ocorrido em 2007, no Distrito Federal, que vitimou duas crianças e feriu gravemente um adulto. Foi realizada perícia desse evento com o uso do FDS, identificando-se as hipóteses mais prováveis para sua deflagração.

Considerando-se engenheiros e pesquisadores em geral, a utilização de softwares modeladores de incêndio para a produção científica em todo o mundo é intensa (TABACZENSKI et al., 2017). Por outro lado, não há consenso a respeito de sua aplicação pelos corpos de bombeiros militares (CBM) do Brasil. Se as ferramentas são utilizadas internamente, sem finalidade científica, nem sempre há publicação e os estudos podem gerar relatórios ou laudos. No caso de pesquisas científicas por bombeiros militares, a questão central é se há uma preocupação institucional com esse assunto ou se as publicações derivam de iniciativa exclusiva do autor, em busca de desenvolvimento profissional.

As atribuições do Corpo de Bombeiros Militar de Minas Gerais (CBMMG), descritas pelo artigo nº 142, da Constituição Estadual (MINAS GERAIS, 1989) e pelo artigo 3º, da Lei Complementar nº 54 (MINAS GERAIS, 1999), posicionam a corporação como órgão regulador e responsável pela prevenção, combate e investigação de incêndios, dentre outras funções. Diante de tais responsabilidades, é importante que a instituição se mantenha atualizada quanto aos conhecimentos e tecnologias contemporâneos sobre o tema.

Como órgãos reguladores e principais referências no assunto, os corpos de bombeiros brasileiros têm acompanhado a evolução dessa tecnologia? Diante dessa questão, o objetivo deste trabalho foi identificar e discutir as principais aplicações de softwares modeladores de incêndio por fluidodinâmica computacional por bombeiros militares do Brasil.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Método

Tendo em vista o caráter exploratório da pesquisa, foi adotada uma abordagem qualitativa, por meio de revisão não sistemática bibliográfica do tema principal do estudo: Softwares

modeladores de incêndio por fluidodinâmica computacional. Foram incluídos na revisão somente trabalhos que continham a participação de bombeiros militares brasileiros como autores.

Os dados foram coletados de trabalhos e artigos publicados em revistas científicas, plataformas digitais e portais de outras corporações.

Contudo, esperava-se que parte das aplicações de CFD por bombeiros militares não resultasse em produções científicas, mas em relatórios e laudos. Em geral, esse tipo de documento não possui caráter público, o que limitou o alcance dessa revisão bibliográfica.

Diante dessa dificuldade, foi realizada entrevista semiestruturada, aplicada aos autores bombeiros militares encontrados por essa revisão bibliográfica. Foram selecionados aqueles que realizaram estudos experimentais com aplicação direta de um *software* simulador de incêndio, limitando-se a um por estado. As definições de entrevista semiestruturada e de estudo experimental foram baseadas em Marconi e Lakatos (2003) e Gil (2007), respectivamente.

O roteiro de entrevistas apresentou questões sobre o propósito do uso dessas ferramentas pelas corporações e que tipo de apoio elas oferecem para seus militares com relação ao uso de CFD, tais como cursos, laboratório, convênios e participação em seminários. Também se buscou extrair dos entrevistados opiniões sobre a utilidade, viabilidade e fatores de fomento ao uso da ferramenta.

2.2 O ciclo operacional

Maus (2005) definiu as atividades do Ciclo Operacional de Bombeiros. Lugon *et al.* (2018) propuseram uma nova nomenclatura desse processo para Ciclo Operacional de Segurança Contra Incêndio, uma vez que se refere apenas a uma parte das atividades desenvolvidas por bombeiros, que também envolvem busca e salvamento, atendimento pré-hospitalar, defesa civil, dentre outras. Baseada nas definições desses autores, o Quadro 1 apresenta as quatro fases do ciclo.

Quadro 1 - Fases do Ciclo Operacional

Fase	Atividades Relacionadas
Normativa ou Preventiva	Criação de normas relativas à segurança contra incêndio e pânico (SCIP) para o público externo e guias e procedimentos operacionais para o público interno
Passiva ou Estrutural	Análise de projeto SCIP, vistorias e fiscalização
Ativa ou de Combate	Atividades de resposta ao sinistro, a fim de impedir ou mitigar suas consequências
Investigativa ou Pericial	Perícias e estudos de caso

Fonte: Elaborado pelos autores.

O ciclo foi criado a partir de uma metodologia denominada Kaizen, trazida do Japão, pela Agência Japonesa de Cooperação Internacional (JICA), inicialmente para o Corpo de Bombeiros Militar do Distrito Federal (CBMDF). Baseando-se no PDCA (Planejar, Desenvolver, Checar e Agir), metodologia de gerenciamento criada nos Estados Unidos, na década de 1930, Lugon *et al.* (2018) propõem a inclusão de uma quinta fase no Ciclo Operacional de Segurança Contra Incêndio: Fase Corretiva. Para os autores, essa etapa corresponderia à utilização dos resultados da Fase Investigativa na produção científica e consequente melhoria das ações desenvolvidas ao longo do próprio ciclo. Para que tal desenvolvimento científico seja alcançado, os autores apresentam as simulações computacionais como principal ferramenta tecnológica de investigação de incêndio.

2.3 Simuladores de incêndio

Fazzioni (2016) descreveu diversas aplicações de CFD nos estudos de incêndio. Dentre os softwares presentes em seu estudo encontram-se: ANSYS, SAFIR, SYSAF e FDS, todos baseados nessa metodologia. Após uma análise de viabilidade, o autor concluiu que o software mais indicado para utilização pelo Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina (CBMSC) é o FDS, por ser gratuito e possuir uma boa reputação internacional.

Conforme descreve McGrattan *et al.* (2021), o FDS é destinado à solução de equações que descrevem a evolução do fogo, possui código aberto e não requer licença de uso. Esse é o programa CFD simulador de incêndio mais recorrente na literatura técnico-científica nacional e internacional, à frente de concorrentes pagos, como o SMARTFIRE, desenvolvido pelo Grupo de Engenharia de Segurança contra o Fogo (*Fire Safety Engineering Group*, em inglês) da Universidade de Greenwich (TABACZENSKI *et al.*, 2017). Inicialmente, o FDS era utilizado basicamente em três áreas: sistemas de condução de fumaça, estudos da ativação de *sprinklers* e reconstrução de incêndios. Atualmente, esse programa também é utilizado na solução de problemas práticos de engenharia de proteção contra o fogo e em estudos dos fundamentos da combustão e da dinâmica dos incêndios.

A entrada de dados do programa é realizada por meio de um arquivo de texto, que é lido e processado por um código FORTRAN. Seus resultados são visualizados por um programa auxiliar, denominado Smokeview (SMV), também gratuito e desenvolvido pelo NIST. Para a criação do arquivo de entrada, existem diversos programas produzidos por outras entidades, com grande variação de interface e de custo. McGrattan *et al.* (2021) descreveram os conhecimentos necessários ao usuário: dinâmica dos fluidos, termodinâmica, transferência de calor, combustão e ciência do fogo.

Braga (2018) cita a simulação de abandono como um estudo complementar à modelagem do incêndio, cuja finalidade é avaliar a fuga das pessoas de uma edificação em caso de incêndio e pânico. O autor listou mais de 20 softwares desenvolvidos com esse fim.

2.4 A produção científica nacional por bombeiros militares

Foram identificados trabalhos publicados por bombeiros militares brasileiros em várias fases do Ciclo Operacional, nos seguintes CBM: Distrito Federal (CBMDF), Espírito Santo (CBMES), Goiás (CBMGO), Pernambuco (CBMPE), Rio Grande do Sul (CBMRS) e Santa Catarina (CBMSC). Para melhor apresentação, os trabalhos foram divididos quanto à aplicação direta ou não de um software baseado em CFD na avaliação da dinâmica do incêndio, da fumaça ou da evacuação.

2.4.1 Estudos sem aplicação direta de CFD

O Quadro 2 lista as publicações encontradas que abordam o tema sem aplicação direta e as classifica quanto à fase do Ciclo Operacional relacionada.

Alguns dos trabalhos citados possuem como escopo o estudo do comportamento do fogo de maneira geral, sem enfoque em apenas uma fase do Ciclo Operacional. Para essas publicações, a classificação por fases foi definida como geral.

Quadro 2 - Estudos sem aplicação direta de CFD

Referência	Autores Militares	Título	Instituição	Fase do Ciclo Operacional
Braga e Landim (2008)	Braga e Landim	Investigação de incêndios	CBMDF	Investigativa
Braga (2018)	Braga	Simulação computacional aplicada à segurança contra incêndio		Geral
Lugon <i>et al.</i> (2018)	Lugon	A investigação de incêndio no Brasil: uma visão para o futuro	CBMES	Investigativa
Santos (2015)	Santos	A matemática e o fogo: um olhar no futuro	CBMGO	Geral
Tabaczenski <i>et al.</i> (2017)	Corrêa	Aplicação do software <i>Fire Dynamics Simulator</i> (FDS) no estudo da segurança contra incêndios (SCI) no brasil	CBMPE	Geral
Fazzioni (2016)	Fazzioni	Proposta de utilização da fluidodinâmica computacional como ferramenta para estudo científico de incêndios pelo corpo de bombeiros militar de Santa Catarina	CBMSC	Geral
Rampinelli (2017)	Rampinelli	Sistemas de controle de fumaça em edificações: proposta de instrução normativa		Normativa / Passiva
Basílio e Vidal (2017)	Basílio e Vidal	Investigação de incêndio em edificações: estudo das marcas de combustão e do sentido de propagação das chamas		Investigativa

Fonte: Elaborado pelos autores.



Braga e Landim (2008), oficiais do CBMDF, produziram um capítulo de livro com o tema investigação de incêndio. Os autores abordam a simulação computacional de incêndio relacionando-a à perícia, com um exemplo de aplicação realizada em 2007, em um barracão de madeira no Distrito Federal. Segundo os autores, os resultados obtidos permitiram comparar a temperatura máxima atingida e o tempo de evolução do modelo numérico com os vestígios encontrados no local e os relatos dos bombeiros que o combateram, o que possibilitou detectar sua causa mais provável dentre as hipóteses levantadas.

Braga (2018) voltou a abordar os simuladores na publicação de um capítulo de livro, desta vez relacionando-o à segurança contra incêndios. Nessa publicação, o autor apresentou a simulação computacional de incêndio como uma ferramenta extremamente útil para o projeto e para a avaliação de normas e de edificações existentes. O autor alerta para a necessidade de muita preparação técnica dos profissionais que manipulam esse tipo de software para se obterem resultados confiáveis.

Lugon *et al.* (2018) realizaram uma análise profunda sobre a investigação de incêndios no Brasil. Dentre os pontos abordados, destaca-se uma prospecção do futuro dessa atividade com relação à ciência, tecnologia e inovação. Os autores afirmam que o FDS já produziu grande impacto na segurança contra incêndios e tem grande potencial na fase pericial. Pela avaliação de hipóteses, é possível avaliar fontes de ignição, temperatura, fluxo de calor, taxa de liberação de calor, visibilidade, efeitos na edificação, dentre outros, para comparação com as informações obtidas *in loco*.

Tabaczenski *et al.* (2017) descreveram as aplicações do FDS no estudo de Segurança Contra Incêndio e Pânico (SCIP) no Brasil, com base em uma revisão bibliográfica dos trabalhos desenvolvidos no país por autores em geral. Foram listados 16 estudos realizados entre 2008 e 2017, com grande variabilidade de aplicações. Foi possível observar uma ocorrência mais frequente de análises prognósticas, normalmente relacionadas às fases Normativa e Passiva do Ciclo Operacional.

Fazzioni (2016) estudou as aplicações dos softwares de modelagem de incêndio por CFD que poderiam ser úteis ao CBMSC. Através de uma revisão bibliográfica, o autor descreveu aplicações da ferramenta no Brasil e no exterior, por pesquisadores em geral, identificando diversas utilidades à corporação de seu estado. Nas fases Normativa e Passiva, a ferramenta pode ser utilizada para o esclarecimento de questões que não são consenso. Na fase Ativa, ela pode auxiliar a corporação a compreender melhor o comportamento do fogo para o desenvolvimento de técnicas e táticas, além de auxiliar no desenvolvimento de combatentes, pela demonstração visual em instruções teóricas que antecedam as práticas. Por fim, na fase Pericial, a fluidodinâmica computacional pode atuar como suporte para o esclarecimento de ocorrências.

Diante desse potencial, Fazzioni (2016) sugeriu a inclusão do tema fluidodinâmica computacional nos cursos de formação e apontou a Diretoria de Atividades Técnicas do CBMSC

como divisão ideal para a realização desse tipo de análise, pelo perfil profissional dos militares lotados nesta seção.

Outro oficial do CBMSC, Rampinelli (2017), ao debater a respeito dos sistemas de controle de fumaça em edificações, defendeu a utilização de CFD na área, tanto para os responsáveis técnicos pelo projeto, quanto para os militares da sua corporação, como integrantes de um órgão de fiscalização.

Em contrapartida, Santos (2015) identificou um nível de conhecimento considerado baixo dentre os formandos do Curso de Formação de Oficiais (CFO) de seu estado a respeito das ferramentas matemáticas. O autor atribuiu o resultado ao não aprofundamento da disciplina de Cálculo. Segundo o autor, há, no entanto, significativo interesse dos alunos pela modelagem matemática para estudos do comportamento do fogo. Os resultados levaram-no a recomendar uma reforma curricular do curso.

Basílio e Vidal (2017) abordaram o exame das marcas remanescentes de um incêndio como indícios importantes durante a realização de uma perícia e indicaram a simulação computacional como ferramenta auxiliar nesse tipo de trabalho.

2.4.2 Estudos com aplicação direta de CFD

O Quadro 3 lista os trabalhos experimentais encontrados. Para uma apresentação mais concisa, estes trabalhos foram organizados por estado e serão apresentados juntamente com os resultados das entrevistas aos autores.

Assim como ocorreu para as pesquisas sem aplicação direta, foram identificados trabalhos com aplicação de CFD para o estudo da dinâmica do fogo, sem enfoque em apenas uma fase do Ciclo Operacional. Nesses casos, foi atribuída classificação por fases como geral.

Quadro 3 - Estudos com aplicação direta de CFD

Referência	Autores Militares	Título	Instituição	Fase do Ciclo Operacional
Alves, Campos e Braga (2008)	Campos e Braga	Simulação computacional de incêndio aplicada ao projeto de arquitetura	CBMDF	Normativa
Mariani (2009)	Mariani	Simulação de incêndio com o <i>Fire Dynamic Simulator</i> (FDS)		Investigativa
Campos e Braga (2010)	Campos e Braga	Simulação computacional aplicada à prevenção de incêndios		Normativa
Silva Filho, Ruschel, Dolvitsch, Lima e Braga (2011)	Braga	Utilização de métodos computacionais na reconstituição de incêndios: aplicação ao caso do Shopping Total		Investigativa
Carlos, Mariani e Moraes (2016)	Mariani	Avaliação do desempenho de sistemas de controle de fumaça por modelagem numérica		Passiva

Cunha, Lugon e Bona (2018)	Lugon e Cunha	Investigação experimental e modelagem da dispersão utilizando <i>Fire Dynamics Simulator</i> (FDS) para um vazamento acidental de GLP	CBMES	Investigativa
Tabaczenski et al. (2019)	Corrêa	Simulação numérica e experimento de incêndio em dormitório residencial	CBMPE	Geral (Dinâmica do incêndio)
Rodrigues (2009)	Rodrigues	Análise da eficiência dos sistemas de compartimentação vertical externa por afastamento entre janelas e por projeções horizontais segundo as exigências normativas brasileiras	CBMRS	Normativa
Centeno e Rodrigues (2015)	Rodrigues	Reduced-scale study of liquid fuel storage tank fire using fire dynamics simulator		Geral (Dinâmica do incêndio)

Fonte: Elaborado pelos autores.

2.4.2.1 Distrito Federal

Campos e Braga (2010) discutiram a utilização dos simuladores computacionais de incêndio para a avaliação e elaboração de normas de segurança contra incêndio em edificações. Os autores citam uma tendência mundial de criação de legislações de desempenho em complemento às normas prescritivas, predominantes no Brasil. Para a determinação adequada dos parâmetros normativos, os autores destacaram a importância da utilização de ferramentas de cálculo.

Através de estudos de caso, Alves et al. (2008) utilizaram os softwares FDS e SIMULEX, enquanto Campos e Braga (2010) utilizaram FDS e EVAC, para estudar a evacuação de edifícios em caso de incêndio. Ambos os trabalhos permitiram concluir que as saídas de emergência, mesmo atendendo às prescrições das normas nacionais, não apresentavam um resultado satisfatório no tempo de fuga. Os autores concluem que são necessários estudos mais aprofundados para a revisão dos critérios exigidos para saídas de emergência, além de recomendarem a adoção de parâmetros de desempenho para essas normas.

Com foco na Fase Passiva, Carlos et al. (2016) realizaram um estudo sobre o controle de fumaça baseado em normas de SCIP vigentes em Portugal, por meio de simulação computacional no FDS. O modelo consistiu no último pavimento de um edifício de escritórios. Foram adotadas quatro configurações diferentes de admissão de ar e extração de fumaça, para comparação, que envolviam desde a obstrução total dessas passagens até a extração forçada. Os parâmetros de saída escolhidos foram a visibilidade, a temperatura e a *Fractional Effective Dose* (FED), que leva em consideração a concentração de gases provenientes da queima que influenciam a incapacitação das pessoas durante a evacuação. Os resultados levaram os autores a identificar um risco para a segurança das pessoas durante a evacuação de prédios em que não há exigência de controle de fumaça segundo as normas portuguesas atuais.



Mariani (2009) realizou um teste de hipótese de um incêndio ocorrido em uma residência em Samambaia, Distrito Federal, por meio de simulação no FDS. O pesquisador se baseou em um laudo de investigação produzido por militares do CBMDF, contendo croquis, fotografias e informações coletadas. O arquivo de entrada do programa foi criado linha a linha em um editor de texto, sem auxílio de ferramentas de modelagem. Como resultados, foram obtidos os valores de temperatura ao longo do tempo em três planos ortogonais. O trabalho permitiu concluir que a simulação foi efetiva para comprovar a hipótese existente no laudo, com base no cruzamento entre os resultados da simulação e os registros fotográficos. Por outro lado, o autor identifica a necessidade de um alto grau de conhecimento a respeito das propriedades físico-químicas dos materiais envolvidos na queima para a construção correta do arquivo de entrada.

Silva Filho *et al.* (2011) também utilizaram o FDS para estudar um incêndio ocorrido em 2007, no Shopping Total, em Porto Alegre. A base de dados foi obtida dos relatórios de inspeções realizadas após o sinistro, que indicavam um elevado gradiente vertical de temperatura. Diferentemente do trabalho de Mariani (2009), o modelo computacional do Shopping Total era muito complexo para que a sua construção se desse sem o auxílio de um software pré-processador. Para isso, foi utilizado o software auxiliar *Pyrosim* (THUNDERHEAD ENGINEERING, 2021), que fornece uma interface para a criação de modelos que serão calculados posteriormente pelo FDS. Os parâmetros de saída escolhidos foram a temperatura e a distribuição de fumaça, que permitiram aos autores concluir que os resultados apresentaram aproximação razoável, mas que é necessário grande desenvolvimento dos bancos de dados de materiais, quanto às propriedades relacionadas ao comportamento em incêndios.

O Coronel BM George Cajaty Barbosa Braga, do CBMDF, concedeu entrevista para o trabalho de Santos (2015), a respeito da relação entre a matemática e o fogo. Dentre os aspectos apontados como importantes para o desenvolvimento tecnológico da corporação, o entrevistado citou o cadastramento do CBMDF como instituição de pesquisa junto ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, em 2003. O Coronel abordou ainda a importância da pesquisa para os corpos de bombeiros militares brasileiros, considerada fundamental para a melhoria da prevenção, combate e investigação de incêndios.

Para melhor esclarecimento do contexto de utilização do CFD pelo CBMDF, foi realizada, no dia 28 de junho de 2019, nova entrevista com o Coronel BM George Cajaty Barbosa Braga para este estudo. O pesquisador atribuiu o início da utilização de CFD pelo CBMDF ao ano de 2004. Em 2006, o militar fez um curso de FDS avançado disponibilizado pelo NIST, nos Estados Unidos. Em 2010, o CBMDF, em parceria com a Universidade de Brasília (UnB), ofertou um curso similar a militares e civis em Brasília.

Segundo o entrevistado, a corporação possui, atualmente, um laboratório de simulação computacional, subordinado à Diretoria de Investigação de Incêndio, cujos computadores possuem licença do *Pyrosim* (THUNDERHEAD ENGINEERING, 2021), além de programas simuladores de evacuação, todos adquiridos com verbas de projetos de pesquisa, além do gratuito FDS, o mais

aproveitado. O laboratório teve início por um acordo de cooperação com a JICA na década de 80, o que requereu a contratação de profissionais especializados para trabalhar nele, por meio da criação do quadro complementar, no qual o Coronel atua profissionalmente. Embora voltado inicialmente para a perícia, hoje o laboratório é utilizado para todas as fases do ciclo operacional, conforme declaração do entrevistado:

[...] o que fez uma grande diferença para o CBMDF começar a trabalhar com pesquisa foi a criação do quadro complementar e, em especial, a entrada do pessoal da área de exatas, pois eles vieram para trabalhar no desenvolvimento da investigação de incêndio, algo que por si só já traz o método científico no cerne da sua metodologia. Com o passar dos anos, com os oficiais do quadro complementar aprendendo cada vez mais sobre as atividades dos bombeiros, as questões e perguntas que eram voltadas apenas para a área de investigação, começaram a ser voltadas também para as áreas de prevenção e combate a incêndio, levando ao estágio de desenvolvimento de pesquisa em que estamos hoje (BRAGA, 2018).

Quanto à participação em congressos e seminários, o entrevistado relatou que as publicações de trabalhos dependem, em grande parte, da iniciativa pessoal do pesquisador. O apoio institucional ocorre na forma de tempo disponibilizado para o desenvolvimento das pesquisas.

Embora ainda dependa de iniciativas pessoais, há uma preocupação institucional para o direcionamento das pesquisas, por equipes similares aos Grupos Temáticos Operacionais (GTO) no CBMMG. Nas palavras do pesquisador:

Hoje, apesar de as iniciativas serem pessoais no início, buscamos trazê-las para dentro do grupo de pesquisa, fazendo com que tenhamos uma prioridade na realização das pesquisas, mas também buscando uma ampla discussão do que deve ser pesquisado e como (BRAGA, 2018).

No CBMDF, a aplicação das ferramentas de simulação visa à melhoria do serviço prestado, como pode ser observado pelas palavras do Coronel:

A maior finalidade é de melhoria dos procedimentos utilizados em prevenção, combate e investigação de incêndio. No final, o artigo é mais um meio de divulgação externo, do que propriamente o objetivo final. O nosso maior interesse é fazer com que as áreas de incêndio sejam baseadas em conhecimento técnico-científico, saindo do lugar comum do 'eu acho' e do 'sempre foi assim' (BRAGA, 2018).

Dentre as aplicações, o entrevistado cita a produção e avaliação de normas, estudos de sistemas de prevenção, melhoria de técnicas e táticas de combate, ensino, perícia de incêndios, avaliação do desgaste fisiológico do bombeiro em atividade, melhoria dos procedimentos de segurança e estudo do comportamento do fogo e dinâmica do incêndio.

Sobre a utilização de CFD por bombeiros, o Coronel considera viável e importante. Dentre os países com cultura de pesquisa mais desenvolvidas, o entrevistado cita Portugal, país cujas leis

foram alvo de avaliação de bombeiros brasileiros na pesquisa de Carlos *et al.* (2016). A seguir, a opinião do entrevistado sobre o assunto:

Países como EUA ou da Europa, e aí cito fortemente os nossos irmãos portugueses, que possuem laboratório com boa estrutura para pesquisa em segurança contra incêndio e cursos voltados para a formação de engenheiros de proteção contra incêndio, em nível de mestrado ou doutorado. Não possuímos isso no Brasil. Mas saiba que por mais que estejamos atrasados, a pesquisa nas áreas de atuação dos bombeiros vem se desenvolvendo cada vez mais nos últimos anos pelo mundo. Ou seja, ainda estamos em tempo de participar deste desenvolvimento. Afirmo isso sem medo de errar, pois algumas pesquisas que realizamos aqui servem como referência lá fora (BRAGA, 2018).

2.4.2.2 Espírito Santo

Cunha *et al.* (2018) aplicaram o FDS em um estudo de caso que investigou a dispersão de gás liquefeito de petróleo (GLP) em uma residência que sofreu uma explosão no município de Vila Velha. Com base nos documentos produzidos pela perícia do CBMES, os pesquisadores buscaram ratificar as hipóteses levantadas quanto à dispersão accidental do gás até a sua faixa de explosividade, além de avaliar a provável fonte de ignição. O modelo foi criado com base em croquis e fotografias anexadas ao laudo pericial e o principal parâmetro de saída avaliado foi a concentração do gás no ambiente em vários pontos do imóvel. O tempo decorrido para se atingir a concentração necessária à explosão e o local da fonte de ignição foram coerentes entre o modelo e os dados da perícia. Os autores consideraram a simulação computacional um importante recurso para investigar as causas de explosões que envolvem a dispersão de gases, mas defendem que a perícia no local é indispensável para fornecer os dados e hipóteses que servirão de entrada na análise numérica.

No dia 12 de julho de 2019, foi realizada entrevista com o Major BM André Pimentel Lugon. Segundo ele, o CBMES fornece um curso de especialização específico de FDS, de 40 horas-aula, e também destina determinada carga horária à ferramenta durante o curso de especialização em perícia de incêndios. O CBMES possui licenças dos softwares *Pyrosim* e *Pathfinder*, além de utilizar os gratuitos: FDS e Evac.

Em busca de desenvolvimento científico, há acordos de cooperação técnica entre a corporação e duas instituições públicas de ensino superior: Universidade Federal do Espírito Santo e Instituto Federal do Espírito Santo. O entrevistado destacou a importância dessas parcerias:

Entendemos que a academia precisa estar mais envolvida e entender a importância em desenvolver estudos nessa área. Em cima disso, buscamos uma aproximação maior com a nossa universidade, possibilitando assim um envolvimento maior da comunidade científica (LUGON, 2018).



Quanto às áreas de aplicação pelo CBMES, a ferramenta é utilizada mais frequentemente nas investigações de incêndio, mas também se encontra “Em fase de teste e implementação junto ao Centro de Atividades Técnicas” para a avaliação e produção de normas.

Por fim, o Major considera a utilização de CFD por bombeiros militares brasileiros útil e viável, mas, dependente do alinhamento entre interesse pessoal do pesquisador e apoio institucional. Além disso, ainda há um desafio para a aplicação de CFD para o estudo de incêndios no Brasil relacionado à falta de parametrização de materiais, como pode ser interpretado pelas palavras do pesquisador:

O FDS possibilita a realização de estudos buscando a validação de normas e o aprimoramento do sistema de segurança contra incêndio, além de melhorias nas áreas de combate a incêndio e perícia. [...] Porém, a complexidade de entender a codificação, alinhado à falta de parametrização de materiais, dificulta uma aplicação mais real, carecendo de estudos mais avançados para retratarmos na simulação o que realmente acontece no mundo real (LUGON, 2018).

2.4.2.3 Pernambuco

Tabaczenski *et al.* (2019) realizaram a simulação de um modelo computacional do FDS, baseando-se em um experimento de incêndio em um dormitório típico, previamente realizado. O objetivo foi verificar a temperatura dos gases no modelo e compará-la aos resultados do experimento, cujos valores foram medidos por termopares instalados no interior da estrutura de teste. A base de dados foi proveniente dos parâmetros descritos no experimento e de propriedades dos materiais definidas em normas brasileiras. Os resultados do modelo foram próximos quanto às temperaturas máximas atingidas quando na comparação com as encontradas no experimento. Por outro lado, houve uma dificuldade de validação do modelo diante da redução significativa de oxigênio no ambiente.

No dia 07 de agosto de 2019, foi realizada entrevista com o Tenente-Coronel BM Cristiano Corrêa. Segundo ele, a utilização dos softwares no CBMPE é impulsionada por uma parceria com a Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), mediante apoio do comando da instituição, o que permite a utilização de uma licença acadêmica do *Pyrosim*, além do FDS e do *SMARTFIRE*. Nas palavras do entrevistado:

Em nosso Estado temos uma parceria com a Universidade Federal, que possui núcleo de Pesquisa RISCTEC e laboratório de ensaio de estruturas em situação de incêndio. [...] Existe ainda uma parceria realizada com o Corpo de Bombeiros Militar do Distrito Federal - CBMDF, orientada pelo Sr. Cel George Cajaty Braga, na qual experimentos e simulações são realizados em conjunto. Parceiros privados também são recebidos para testes e experimentos em escala real [...] (TABACZENSKI *et al.*, 2017).

Outro ponto que colocou o CBMPE em posição privilegiada na produção científica nacional por bombeiros foi a criação da revista FLAMMAE:

Estabelecimento de revista técnico-científica (FLAMMAE) que criou um fórum adequado para a visibilidade das pesquisas das corporações bombeiro militar. (...) Com mais de 120 artigos publicados advindos de 22 Unidades da Federação e mais de 30 Instituições de Ensino Superior nacionais e internacionais, o periódico tornou-se um incentivo à pesquisa corporativa (TABACZENSKI *et al.*, 2017).

Perguntado a respeito das aplicações possíveis para esse tipo de ferramenta, o Tenente-Coronel sugeriu sua aplicação em simulações prévias de desastres relacionados a incêndios. Esse tipo de utilização de CFD se encaixaria na fase de Preparação do Ciclo de Proteção e Defesa Civil.

Construção de cenários e consequente preparação de planos de contingência e atuação. Pode-se, por exemplo, ao realizar o estudo de uma área sensível (um parque de tancagens [...], simular combustão ou explosões parciais e totais, levantando indícios de como agir em cada caso específico (TABACZENSKI *et al.*, 2017).

Por fim, o entrevistado considera a utilização desse tipo de ferramenta por bombeiros militares útil e viável, mas que ainda falta a disponibilização de licenças que tornem as interfaces mais simples e a preparação de recursos humanos.

2.4.2.4 Rio Grande do Sul

Rodrigues (2009) analisou a eficiência da compartimentação vertical externa prevista nas normas brasileiras como medida de segurança contra incêndio por meio de ensaios e simulações computacionais com o FDS. O pesquisador produziu um simulador em escala reduzida, de três andares, e realizou 16 experimentos, variando-se os parâmetros de compartimentação vertical e de carga incêndio, com uma queima no primeiro pavimento. Os dados foram coletados por termopares, filmagens e termografia. Paralelamente, o autor criou modelos computacionais similares ao do ensaio, variando o tamanho da malha, além dos parâmetros descritos no ensaio, para comparação e validação do modelo. Com base nos resultados obtidos, o autor considerou a ferramenta importante para análises qualitativas de medidas de SCIP, com baixo custo operacional. Por outro lado, identificou que, para análises quantitativas, há ainda a escassez de informações relativas às propriedades dos materiais utilizados no Brasil, uma vez que a utilização da ferramenta ainda é incipiente no país.

Centeno e Rodrigues (2015) realizaram simulações de incêndio em tanques de armazenamento de etanol utilizando o FDS. O objetivo foi criar correlações matemáticas para definição da altura das chamas, do gradiente de temperatura e do fluxo de calor por radiação, em



função da geometria dos tanques. Os autores justificaram a escolha desses parâmetros por serem aqueles diretamente relacionados à segurança durante o combate a esse tipo de incêndio.

No dia 27 de julho de 2019, o Tenente-Coronel BM Eduardo Estêvam Camargo Rodrigues concedeu entrevista sobre CFD no CBMRS. Segundo o pesquisador, esse tipo de ferramenta é mais útil para perícia e para aperfeiçoamento de normas.

Embora a utilização da fluidodinâmica computacional pelos corpos de bombeiros seja útil e viável pelas diretorias técnicas e de perícia, ainda há pouco investimento. No caso do CBMRS, perguntado a respeito de quais fatores contribuíram para o desenvolvimento da área, o pesquisador destacou o tempo fornecido para o desenvolvimento dos trabalhos: "O apoio da instituição em caráter específico às iniciativas dos bombeiros militares que desejaram estudar o tema, no que tange a liberação e autorização para tal aperfeiçoamento" (RODRIGUES, 2009).

2.4.2.5 Situação atual em Minas Gerais

Em estudos científicos produzidos na corporação, o tema foi citado por Santos (2009), que realizou uma revisão bibliográfica e documental sobre ventilação forçada com o uso de exaustores nas ocorrências de combate a incêndio em ambientes confinados. Ao final do estudo, o autor sugeriu a implantação de um laboratório para pesquisa de incêndios através de modelos computacionais.

Mata (2019), em dissertação desenvolvida no Departamento de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), realizou um estudo das temperaturas em um compartimento fechado durante o combate a incêndio. Para isso, a pesquisadora utilizou o contêiner do CBMMG, com apoio dos militares da corporação, e comparou os resultados a um modelo no FDS. A partir das análises realizadas, a autora considerou que, embora requeira conhecimento aprofundado do assunto, o uso dos softwares de CFD pode fornecer princípios qualitativos importantes para o estudo do comportamento do fogo a baixo custo.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foram encontrados 17 trabalhos envolvendo fluidodinâmica computacional para o estudo de incêndios com autoria de bombeiros militares, dos quais, nove utilizaram-na diretamente na solução de problemas. Embora haja opções de softwares no mercado, todos os estudos experimentais utilizaram o FDS como ferramenta de cálculo, o que coincide com os resultados de Tabaczenski *et al.*, (2017), de que o FDS é o software mais utilizado nessa área.

Dos 27 CBM brasileiros, pelo menos seis já demonstraram, nas publicações de seus integrantes, conhecer a importância dessa ferramenta. Contudo, apenas quatro possuem trabalhos publicados com aplicação direta desse tipo de software: CBMDF, CBMES, CBMPE e CBMRS. Além



disso, 11 dos 17 trabalhos foram produzidos a partir do ano de 2015, o que demonstra que esse é um campo de estudo em desenvolvimento no país.

A entrevista aos autores permitiu observar o quanto é importante o apoio institucional para o desenvolvimento das pesquisas, seja por disponibilização de laboratórios, por convênios com instituições de ensino ou até por busca de financiamento externo. Há que se destacar ainda a importância das revistas científicas mantidas pelas corporações, como Flammae, Ignis e Vigiles, como incentivo ao desenvolvimento tecnológico.

Contudo, de acordo com os entrevistados, a iniciativa individual dos pesquisadores é predominante. Ainda assim, a disponibilização de tempo para que os militares possam dedicar-se à pesquisa não deixa de ser uma forma importante de apoio. O papel da Instituição é traçar as diretrizes de pesquisa como ocorre no CBMDF, o que poderia ser realizado pelos GTO no CBMMG.

Com base nas fases do Ciclo Operacional, constatou-se que a utilização de CFD por bombeiros militares no Brasil é mais recorrente na fase normativa, assim como por autores em geral (Tabczenski *et al.*, 2017), e também na fase investigativa.

A aplicação de modelagem computacional na fase investigativa é vantajosa porque independe da validação por meio de experimentos, que podem ser substituídos pelos dados do incêndio real coletados. Por ser a principal fonte de informações para o desenvolvimento da ciência do fogo, a perícia é fundamental e deve ser incentivada no CBMMG.

Com relação à fase normativa, há a validação e o aprimoramento das normas existentes, muitas vezes importadas de outros países. Pode-se considerar que a prevenção é uma fonte inesgotável de pesquisa, tendo em vista que a arquitetura se reinventa constantemente e é necessário manter as normas atualizadas.

Uma limitação das ferramentas de modelagem computacional de incêndio foi citada em diversos trabalhos: a falta de parametrização de materiais de construção utilizados no Brasil. Essa é uma área que ainda demanda esforço dos pesquisadores para tornar as simulações mais assertivas.

No CBMMG, há um campo fértil para que essa área de pesquisa se inicie de forma promissora. O trabalho de Mata (2019) mostrou à instituição a importância das pesquisas, principalmente na Fase Ativa. O potencial do contêiner de treinamento como um laboratório experimental para a validação de modelos em diversas linhas de estudo deve ser aproveitado. Diante disso, propõe-se a criação de um curso preparatório de FDS na modalidade especialização, como é realizado no CBMES, ou a sua inclusão na grade curricular do CFO, como proposto por Fazzioni (2016) para o CBMSC.

Vale destacar também trabalhos que tratam da temática de incêndio, tal como Diniz e Ferreira (2019), bem como dos aplicados na área de prevenção e predição de incêndio, relatando-se o monitoramento desses desastres e aliados às técnicas de Geoprocessamento, tais como os apresentados em Fernandes (2019), Fernandes, Cintra, Nero e Temba (2018), Fernandes, Nero, Temba e Soares Filho (2018), Fernandes, Nero, Temba e Elmíro (2020).

O foco deste estudo foi a produção por bombeiros militares, mas a produção por pesquisadores em geral é intensa no Brasil e no mundo. Considerando-se o papel central dos corpos de bombeiros na prevenção, combate e investigação de incêndios, é fundamental que essas instituições acompanhem a vanguarda da produção científica sobre o assunto.

REFERÊNCIAS

- ALVES, A. B. C. G.; CAMPOS, A. T.; BRAGA, G. C. B. **Simulação Computacional de Incêndio Aplicada ao Projeto de Arquitetura.** In: Seminário do Núcleo de Pesquisa em Tecnologia da Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, 7, 2008, São Paulo. Disponível em: <https://www.usp.br/nutau/CD/71%20196.pdf>. Acesso em: 30 jul. 2019.
- BASÍLIO, R. G.; VIDAL, V. V. Investigação de Incêndio em Edificações: Estudo das Marcas de Combustão e do Sentido de Propagação das Chamas. **Revista Ignis**, v. 2, n. 1, 2017.
- BRAGA, G. C. B.; LANDIM, H. R. O. Investigação de Incêndio. In: SEITO, A. I., et al. **A Segurança Contra Incêndio no Brasil.** São Paulo: Projeto Editora, cap XXII, 2008.
- BRAGA, G. C. B. Simulação Computacional Aplicada à Segurança Contra Incêndio. In: LUGON, A. P., et al. **Livro SCIER:** Segurança Contra Incêndio em Edificações - Recomendações. Revisão 1. Vitória: Firek Segurança Contra Incêndio, 2018.
- CAMPOS, A. T.; BRAGA, G. C. B. Simulação Computacional Aplicada à Prevenção de Incêndios. In: **XI Seminário Nacional de Bombeiros**, Blumenau, 2010.
- CARLOS, T. B.; MARIANI, L. M.; MORAES, H. H. Q. Avaliação do Desempenho de Sistemas de Controle de Fumaça por Modelagem Numérica. **Revista Ignis**, v. 1, n. 2, ed. Especial: Anais do XVI SENABOM, 2016.
- CENTENO, F. R.; RODRIGUES, E. E. C. Reduced-Scale Study of Liquid Fuel Storage Tank Fire Using Fire Dynamics Simulator. **Engenharia Térmica (Thermal Engineering)**, v. 14, n. 1, 2015. DOI: 10.5380/reterm.v14i1.62112.
- CADORIN, J.; PINTEA, D.; FRANSSEN, J. **The Design Fire Tool OZone V2.0 – Theoretical Description and Validation on Experimental Fire Tests.** 1. ed. Universidade de Liège, 2009.

CUNHA, I. O. P.; LUGON, A. P.; BONA, B. M. Investigação Experimental e Modelagem da Dispersão Utilizando Fire Dynamics Simulator (FDS) para um Vazamento Acidental de GLP. **Revista Flammae**, v. 04, n. 11, ed. Especial XVIII SENABOM, 2018.

DINIZ, P. H. T. V.; FERREIRA, L. O. Análise do Risco de Incêndio no Edifício Principal do Hospital João XXIII em Belo Horizonte. **Vigiles**, v. 02, n. 1, 2019. DOI: 10.17648/revistavigiles-2595-4229-v2n1-3.

FAZZIONI, W. **Proposta de Utilização da Fluidodinâmica Computacional como Ferramenta para Estudo Científico de Incêndios pelo Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina.** 2016. Monografia (Especialização em Administração de Segurança Pública) - Centro de Administração e Socioeconômicas da Universidade do Estado de Santa Catarina: Florianópolis, 2016.

FERNANDES, L. C. **Modelagem de risco de incêndios florestais utilizando redes neurais artificiais aplicada às regiões metropolitanas.** 2019. Dissertação (Mestrado em Modelagem e Análise de Sistemas Ambientais) - Universidade Federal de Minas Gerais: Belo Horizonte, 2019.

FERNANDES, L. C.; NERO, M. A.; TEMBA, P. C.; ELMIRO, M. A. T. The use of remote sensing techniques by Modis (MCD45A1) images using to identify and evaluate burned areas in the metropolitan region of Belo Horizonte - MG, Brazil. **Sustentabilidade em Debate**, v. 11, n. 2, 2020. DOI 10.18472/SustDeb.v11n2.2020.28145.

FERNANDES, L. C.; CINTRA, R.; NERO, M. A.; TEMBA, P. C. Fire Risk Modeling Using Artificial Neural Networks. In: Rodrigues, H. C., et al. (Org.). **EngOpt 2018 Proceedings of the 6th International Conference on Engineering Optimization.** 1. ed. Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland AG, v. 1, 2018. DOI: 10.1007 / 978-3-319-97773-7_81.

FERNANDES, L. C.; NERO, M. A.; TEMBA, P. C.; SOARES FILHO, B. S. Modelagem de Risco de Incêndios Florestais: Uma Visão Geral. **SODEBRÁS**, v. 13, 2018.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa.** 4. ed. São Paulo: Atlas, 2007.

LANNON, C. M.; MILKE, J. A. **Evaluation of Fire Service Training Fires.** The Fire Protection Research Foundation, Massachusetts, 2014.

LUGON, A. P.; BONA, B. M.; PAIVA, S. M.; CUNHA, I. O. P. A Investigação do Incêndio no Brasil: Uma Visão para o Futuro. In: LUGON, A. P., et al. **Livro SCIER: Segurança Contra Incêndio em Edificações - Recomendações**. Revisão 1. Vitória: Firek Segurança Contra Incêndio, 2018.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de Metodologia Científica**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2003.

MARIANI, L. M. **Simulação de Incêndio Utilizando a Ferramenta Computacional Fire Dynamic Simulator: Teste da Hipótese de Incêndio Urbano Ocorrido em Samambaia-DF**. 2009. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Perícia de Incêndio e Produção de Provas Judiciais) - Centro Universitário Euroamericano, Brasília, 2009.

MATA, K. L. **Análise da Influência do Combate a Incêndio nas Temperaturas de um Compartimento**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Universidade Federal de Minas Gerais: Belo Horizonte, 2019. DOI: hdl.handle.net/1843/31449.

MAUS, Á. **Segurança Contra Sinistros: Teoria Geral**. 2005. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Gestão Estratégica em Segurança Pública) - Curso Superior de Polícia, Universidade do Sul de Santa Catarina: Florianópolis, 2005.

MCGRATTAN, K.; HOSTIKKA, S.; FLOYD, J.; McDERMOTT, R.; VANELLA, M. **Fire Dynamics Simulator. User's Guide**. 6. ed. Revisão: FDS6.7.6-0-g5064c500c. National Institute of Standards and Technology – NIST & Technical Research Centre of Finland – VTT, Maryland, 2021. DOI: [10.6028/NIST.SP.1019](https://doi.org/10.6028/NIST.SP.1019).

MINAS GERAIS. **Constituição do Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: Assembleia Legislativa do Estado de Minas Gerais, 1989.

MINAS GERAIS. Lei Complementar nº 54, de 13 de Dezembro de 1999. **Dispõe sobre a organização básica do Corpo de Bombeiros Militar de Minas Gerais – CBMMG – e dá outras providências**. Belo Horizonte: Assembleia Legislativa do Estado de Minas Gerais, 1999.

PEACOCK, R. D.; RENEKE, P. A.; FORNEY, G. P. **CFAST – Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (Version 7)**. Volume 2: User's Guide. National Institute of Standards and Technology – NIST Maryland, 2017. DOI: [10.6028/NIST.TN.1889v2](https://doi.org/10.6028/NIST.TN.1889v2).

RAMPINELLI, D. H. **Sistemas de Controle de Fumaça em Edificações: Proposta de Instrução Normativa.** 2017. Monografia (Curso de Formação de Oficiais) - Academia de Bombeiros Militar de Santa Catarina: Florianópolis, 2017.

RODRIGUES, E. E. C. **Análise da eficiência dos sistemas de compartimentação vertical externa por afastamento entre janelas e por projeções horizontais segundo as exigências normativas brasileiras.** 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul: Porto Alegre, 2009. DOI: hdl.handle.net/10183/19045.

SANTOS, G. O. **A Matemática e o Fogo: Um Olhar no Futuro.** 2015. Artigo (Curso de Especialização em Gerenciamento de Segurança Pública) - Universidade Estadual de Goiás e Corpo de Bombeiros Militar do Estado de Goiás: Goiânia, 2015.

SANTOS, G. J. **Relevância da Utilização da Ventilação Forçada com Uso de Exaustor nas Ocorrências de Combate a Incêndio em Ambiente Confinado.** 2009. Monografia - Academia de Polícia Militar: Belo Horizonte, 2009.

SILVA FILHO, L. C. P.; RUSCHEL, F.; DOLVITSCH, J. N.; LIMA, R. C. A.; BRAGA, G. C. B. Utilização de métodos computacionais na reconstituição de incêndios: aplicação ao caso do shopping total. **Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural**, v. 8, n. 3, 2011. DOI: hdl.handle.net/10183/189647.

TABACZENSKI, R.; CORRÊA, C.; SANTOS, M. M. L.; PIRES, T. A. C.; SILVA, J. J. R. Aplicação do Software Fire Dynamics Simulator (FDS) no Estudo da Segurança Contra Incêndios (SCI) no Brasil. **Revista Flammae**, v. 3, n. 7, 2017. DOI:10.17648/2359-4837/flammae.v3n7.p87-116.

TABACZENSKI, R.; CORRÊA, C.; PIRES, T. A.; SILVA, J. J. R. Simulação numérica e experimento de incêndio em dormitório residencial. **Revista Alconpat**, v. 9, n. 1, 2019. DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v9i1.315>

THUNDERHEAD ENGINEERING. **PyroSim User Manual**, Versão 2021-2. Manhattan: 2021. Disponível em: <https://support.thunderheadeng.com/docs/pyrosim/2021-2/user-manual/>. Acesso em: 12 ago. 2021.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The finite volume method.** 2. ed. Harlow: Pearson Education Limited, 2007.