

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM QUÍMICA**

**Aplicação da fluidodinâmica computacional (CFD) e análise de
acelerantes por CG-EM na investigação de incêndio**

**Application of computational fluid dynamics (CFD) and GC-MS accelerant
analysis in fire investigation**

Igor Olímpio Pazini da Cunha

Dissertação de Mestrado

**Vitória
2020**

Igor Olímpio Pazini da Cunha

**Aplicação da fluidodinâmica computacional (CFD) e análise de
acelerantes por CG/EM na investigação de incêndio**

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Química do Centro de
Ciências Exatas da Universidade Federal do
Espírito Santo como requisito parcial para
obtenção do Título de Mestre em Química

Área de Concentração: Química

Linha de Pesquisa: Química Forense

Orientador: Prof. Dr. Valdemar Lacerda
Júnior.

Coorientador: Prof. Dr. Wanderson Romão

Vitória

2020

Aplicação da fluidodinâmica computacional (CFD) e análise de acelerantes por CG-EM na investigação de incêndio

Igor Olímpio Pazini da Cunha

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Química da Universidade Federal do Espírito Santo como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Química.

Aprovada em 05 de março de 2020 por:

Prof. Dr. Valdemar Lacerda Júnior
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Prof. Dr. Wanderson Romão
Instituto Federal do Espírito Santo
Coorientador

Prof. Dr. Macksuel Soares de Azevedo
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. Ricardo Machado Kuster
Universidade Federal do Espírito Santo

Universidade Federal do Espírito Santo
Vitória, março de 2020



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

PROTOCOLO DE ASSINATURA



O documento acima foi assinado digitalmente com senha eletrônica através do Protocolo Web, conforme Portaria UFES nº 1.269 de 30/08/2018, por
VALDEMAR LACERDA JUNIOR - SIAPE 1524293
Diretor de Pós-Graduação
Diretoria de Pós-Graduação - DPG/PRPPG
Em 27/05/2020 às 12:07

Para verificar as assinaturas e visualizar o documento original acesse o link:
<https://api.lepisma.ufes.br/arquivos-assinados/25773?tipoArquivo=O>

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

Cunha, Igor Olímpio Pazini da Cunha, 1992-
C972a Aplicação da fluidodinâmica computacional (CFD) e análise a de
 acelerantes por CG-EM na investigação de incêndio / Igor Olímpio Pazini da
 Cunha. – 2020;
 103 f.: il.

Orientador: Valdemar Lacerda Junior.

Co-Orientador: Wanderson Romão. Dissertação (mestrado) - Universidade
Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Exatas.

1. Incêndios - Investigação. 2. Fluidodinâmica computacional. 3. Prevenção
de incêndios. I. Lacerda Junior, Valdemar. II. Romão, Wanderson. III.
Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências Exatas. IV. Título.

CDU: 54

A Deus, meus pais Adalton e Sandra, a minha esposa Lígia

AGRADECIMENTO

Ao meu Deus por toda força e amparo.

A minha esposa Lígia, que mesmo em meus momentos de desânimo, nunca me deixou desanimar e sempre me motivou a buscar o sucesso.

Aos meus amados pais: Sandra e Adalton, minha irmã: Ana Julia, meus avós: Margarida e Carlos e ao Tio Lelê e Tia Bibi, por todo amor e incentivo.

Ao meu orientador, Professor Valdemar, por todo apoio durante esse processo e no momento mais difícil durante essa trajetória, por ter me incentivado a continuar.

Ao meu co-orientador, Professor Wanderson Romão, por ser um grande pesquisador na área forense e mesmo nas minhas limitações de estar presente nas reuniões de grupo, sempre me ajudou na construção do trabalho.

Ao Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Espírito Santo, instituição que tenho orgulho de fazer parte.

Ao meu chefe, Major Lugon, por todo apoio, incentivo e por sempre acreditar no meu potencial.

Ao meu colega de serviço e amigo de turma, Capitão Bona, por ombrear essa missão de desenvolver a perícia de incêndio no Estado do Espírito Santo.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Representação do tetraedro do fogo	18
Figura 2. Suspeito utilizando acelerante para dar início a um incêndio	21
Figura 3. Composição química de diferentes líquidos utilizados como acelerante ...	22
Figura 4. Investigador de incêndio atuando no cenário pós-incêndio.....	23
Figura 5. Representação esquemática da técnica do ACS.	25
Figura 6. Dispositivo de SPME.	27
Figura 7. Representação das formas de extração usando fibras de SPME: (A) imersão direta, (B) headspace, (C) membrana protetora.	29
Figura 8. Representação do funcionamento de um cromatógrafo gasoso.	32
Figura 9. Cromatogramas obtidos por CG-EM para diferentes acelerantes. (a)Gasolina Comum - Texaco. (b)Diesel - Shell. (c)Querosene - Sunnyside. (d) Álcool em gel - Hoogvliet	35
Figura 10. Simulação de incêndio usando o FDS para verificar o espalhamento da fumaça em uma edificação.....	37
Figura 11. Substratos utilizados nos testes realizados. Da esquerda para a direita: espuma, madeira, papel jornal, tecido e plástico.....	40
Figura 12. Dispositivo montado para extração dos voláteis oriundos da queima dos materiais. (a) materiais utilizados, (b) dispositivo de extração, (c) posicionamento do carvão ativado no interior da lata, (d) lata hermeticamente fechada com o disposição de extração.....	41
Figura 13. Dispositivo montado para extração dos voláteis oriundos da queima dos materiais, (a) Dispositivo SPME, (b) Exposição da fibra no interior da lata, (c) injeção do SPME no CG-EM.	42
Figura 14. Planta baixa do quarto onde ocorreu o incêndio, com destaque para os locais onde foram instalados os dispositivos para monitoramento das condições do quarto.	44
Figura 15. Planta baixa da edificação onde ocorreu o incêndio, com destaque para os locais onde foram instalados os dispositivos para monitoramento das condições do quarto.	46
Figura 16. Cromatogramas sobrepostos da queima do substrato, em preto o substrato queimado sem a presença de acelerante, em vermelho o substrato	

queimado na presença de gasolina e em azul o substrato queimado na presença de diesel.....	48
Figura 17. Cromatogramas sobrepostos da queima do substrato, em preto o substrato queimado sem a presença de acelerante, em vermelho o substrato queimado na presença de gasolina e em azul o substrato queimado na presença de diesel.....	53
Figura 18. Comparativo com o cenário real do incêndio(A) e (B) com o cenário virtual (C) e (D).....	56
Figura 19. (t= 407s) - Momento no qual a maior região do guarda-roupa foi exposta a temperatura de 909 °C. (a) Danos ocorridos na região do guarda-roupas. (b) Simulação mostrando a região do guarda-roupas e prateleiras, demarcando o local (cor preta) com a maior temperatura atingida (c) Danos ocorridos na região das prateleiras em virtude do incêndio.....	57
Figura 20. Variação da temperatura e do fluxo de calor do tampo da escrivaninha ao longo do tempo.....	58
Figura 21. (T= 330s) – Vista Posterior e Frontal – Temperatura de 40 °C na região da cama de inferior e abaixo da escrivaninha (região preta). (a) Corte feito da região próxima a casa. (b) Corte realizado na entrada do quarto.	58
Figura 22. Comparativo do ambiente real com o ambiente simulado. (a) Porta de entrada do ambiente sinistrado, (b)Ambiente virtual construído com base nas dimensões e informações do ambiente, (c)Visão da entrada da edificação demonstrando os danos oriundos do incêndio ocorrido.	60
Figura 23. Variação dos parâmetros monitorados no interior do quarto.	61
Figura 24. Variação dos parâmetros monitorados na entrada da residência.	63
Figura 25. Sentido de degradação da porta de entrada do banheiro.	64
Figura 26. Variação dos parâmetros monitorados na entrada da residência.	64
Figura 27. Análise visual da fumaça saindo da edificação que ocorreu o incêndio. .	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Propriedades térmicas utilizadas para parametrização do ambiente	43
Tabela 2. Compostos químicos identificados como marcadores dos acelerantes de gasolina (1-8) e diesel (6, 9-14).....	47
Tabela 3. Porcentagem de similaridade de cada composto-alvo identificado nos substratos.....	49
Tabela 4. Compostos químicos identificados como marcadores dos acelerantes de gasolina (1-8) e diesel (6, 9-14).....	52
Tabela 5. Porcentagem de similaridade de cada composto-alvo identificado nos substratos.....	54
Tabela 6. Resumo dos fenômenos verificados com a simulação com o FDS e constatados no local do incêndio.	59
Tabela 7. Resumo dos fenômenos verificados com a simulação com o FDS e constatados no local do incêndio.	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACC	Pano de carvão ativado (<i>Activated carbon cloth</i>)
ACS	Tira de carvão ativado (<i>Activated charcoal strip</i>)
ASTM	Sociedade Americana para Ensaios de Materiais (<i>American Society for Testing and Materials</i>)
CAR	Carboxen
CBMDF	Corpo de Bombeiros Militar do Distrito Federal
CBMES	Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Espírito Santo
CBMGO	Corpo de Bombeiros Militar do Estado de Goiás
CBMSC	Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina
CFD	Fluidodinâmica Computacional
CG	Cromatografia Gasosa
CS ₂	Dissulfeto de carbono
DCM	Diclorometano
DVB	Divinilbenzeno
EM	Espectrometria de Massas
EM	Espectrometria de Massas
EUA	Estados Unidos da América
FDS	<i>Fire Dynamics Simulator</i>
ILRs	Resíduos líquidos inflamáveis (<i>Ignitable liquid residues</i>)
IRS	Espectrógrafo Infravermelho (<i>Infrared Spectrograph</i>)
LES	Simulação de grandes redemoinhos (<i>Large Eddy Simulation</i>)
NCFS	Centro Nacional de Ciência Forense (<i>National Center for Forensic Science</i>)
NIST	Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia (<i>National Institute of Standards and Technology</i>)
PA	Poliacrilato
PMDS	Dimetil polissiloxano
PU	Poliuretano
RANS	Equações de Navier-Stokes com média de Reynolds (<i>Reynolds-Averaged Navier–Stokes</i>)
SPME	Microextração em fase sólida (<i>Solid Phase Micro Extration</i>)
SUS	Sistema Único de Saúde
UCF	Universidade da Flórida Central
WTC	<i>World Trade Center</i>

LISTA DE SIMBOLOS

BTU	Unidade Térmica Britânica (<i>British thermal unit</i>)
h	hora
min	minutos
mL	mililitro
mm	milímetro
°C	grau Celsius
s	segundos
μL	microlitro
kW	quilowatt
kJ	quilojoule

RESUMO

A investigação de incêndio é uma atividade complexa que envolve habilidade, tecnologia, conhecimento e ciência e tem como objetivo elucidar eventos relacionados ao fogo, como causa, origem, propagação, fenômenos etc. Análise química para verificar a presença de substâncias estranhas naquele local e o uso de *softwares* de simulação de incêndio, são maneiras eficientes e econômicas de estudar o comportamento do fogo durante a ocorrência de incêndio. Este trabalho demonstra a aplicação da Cromatografia Gasosa Acoplada por Espectrometria de Massas (GC-MS) nas análises para identificação de gasolina e diesel em diferentes substratos por meio da extração por ACS e SPME, bem como a aplicação da dinâmica dos fluidos computacional (CFD) para auxiliar na elucidação de incêndios. As análises químicas realizadas mostraram a possibilidade de identificar a presença de aceleradores mesmo em pequenas quantidades (1 μL) e em diferentes tipos de materiais (madeira, polietileno, poliuretano, poliamida e papel de jornal). O modelo computacional gerado pelo *software Fire Dynamics Simulator* (FDS) mostrou-se consistente com os dados obtidos no local pelo perito de incêndio, servindo, assim, para o descarte de hipóteses e conclusão da investigação.

Palavras-chave: Investigação. Fogo. Acelerante. Simulação. FDS.

ABSTRACT

Fire investigation is a complex activity that involves skill, technology, knowledge and science and aims to elucidate events related to fire, such as cause, origin, propagation, phenomena, etc. Chemical analysis to check the presence of foreign substances in that location and the use of fire simulation software, are efficient and economical ways to study the behavior of fire during the occurrence of a fire. This work demonstrates the application of Gas Chromatography Coupled by Mass Spectrometry (GC-MS) in the analysis to identify gasoline and diesel in different substrates by means of ACS and SPME extraction, as well as the application of computational fluid dynamics (CFD) to assist in the elucidation of fires. The chemical analyzes carried out showed the possibility of identifying the presence of accelerators even in small quantities (1 μL) and in different types of materials (wood, polyethylene, polyurethane, polyamide and newsprint). The computational model generated by the Fire Dynamics Simulator (FDS) software proved to be consistent with the data obtained at the site by the fire expert, thus serving to discard hypotheses and conclude the investigation.

Keywords: Investigation. Fire. Accelerator. Simulation. FDS.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	INCÊNDIO	16
1.1.1	Teoria do Fogo	17
1.1.2	Incêndio Criminoso	19
1.1.3	Acelerante	20
1.1.4	Investigação de Incêndio	22
1.2	TÉCNICAS	24
1.2.1	Extração por carvão ativado (ACS)	24
1.2.2	Microextração em fase sólida (SPME)	26
1.2.3	Cromatografia Gasosa acoplada a Espectrometria de Massas (CG-EM)	32
1.3	ANÁLISE NUMÉRICA	35
1.3.1	Fluidodinâmica Computacional (CFD)	35
1.3.2	<i>Fire Dynamics Simulator</i> (FDS)	37
2	OBJETIVOS	38
2.1	OBJETIVO GERAL	38
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	39
2.2.1	Análise de acelerantes	39
2.2.2	Análise computacional de incêndio	39
3	METODOLOGIA	39
3.1	ANÁLISE DE ACELERANTES	39
3.1.1	Substrato	39
3.1.2	Queima do substrato	40
3.1.3	Extração dos compostos	40
3.1.4	Parâmetros do equipamento	42
3.2	ANÁLISE COMPUTACIONAL	42
3.2.1	<i>Software</i>	42
3.2.2	Parametrização do ambiente	43
3.2.3	Equipamento utilizado	43
3.2.4	Descrição dos casos	43
3.2.4.1	Estudo de Caso nº 01	43
3.2.4.2	Estudo de Caso nº 02	45
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
4.1	ANÁLISE DE ACELERANTE	46
4.1.1	Extração por carvão ativado (ACS)	46
4.1.2	Microextração em fase sólida (SPME)	51
4.2	ANÁLISE COMPUTACIONAL	55

4.2.1 Estudo de Caso 1	55
4.2.2 Estudo de Caso 2	60
5 CONCLUSÃO	66
REFERÊNCIA	67
APÊNDICE A	75
APÊNDICE B	81
APÊNDICE C	87
APÊNDICE D	88
APÊNDICE E	92

1 INTRODUÇÃO

1.1 INCÊNDIO

Desde os primórdios o incêndio é um dos principais problemas enfrentado pela sociedade,¹ causando perdas de vidas humanas, lesões e perdas de propriedades. Seus prejuízos podem ser comparados aos causados por todas as classes de desastres, competindo com os produzidos por furacões e terremotos.²

Somente no Espírito Santo, no triênio 2017-2019, foram registrados 16.120 atendimentos realizados pelo Corpo de Bombeiros na área de incêndio, sendo desses 8.439 correspondem a incêndios urbanos, no qual o Corpo de Bombeiro Militar do Espírito Santo (CBMES) é o responsável por gerenciar as normas de segurança contra incêndio e pânico e fiscalizar se estão sendo cumpridas de maneira adequada.³

Segundo dados do Sistema Único de Saúde (SUS), no triênio 2016 - 2018 foram registradas 2.776 mortes por exposição à fumaça, ao fogo e às chamas. A região Sudeste lidera com 1.272 mortes sendo que 62 dessas mortes ocorreram no Estado do Espírito Santo.⁴

No idioma inglês e no espanhol não existem palavras que expressem de modo diferente os termos “fogo” e “incêndio”, ambos são conceituados pela palavra *fire* no inglês⁵ e *fuego* no espanhol.⁶ No português a palavra fogo é derivada do latim *ignis* e a palavra incêndio é derivada do latim *incendium* e ambas possuem significados diferentes.⁷

O fogo é um processo químico que ocorre entre uma substância combustível, um comburente (o ar atmosférico) e uma fonte de calor (energia de ativação), produzindo luz e calor em uma forma de reação sustentável.⁸⁻¹¹ O Corpo de Bombeiros Militar do Distrito Federal (CBMDF) entende combustão como sinônimo de fogo, sendo o fogo um termo mais usual e combustão um termo mais utilizado nos estudos científicos⁹, já o CBMES e o Corpo de Bombeiros Militar do Estado de Goiás (CBMGO) não apresenta definições do termo fogo, ressaltando que é uma palavra que não pode ser definida, mas sim, explicada por meio de suas características¹⁰, já o Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina (CBMSC) entende que o fogo é a simples manifestação visual do processo da combustão, sendo apenas uma das formas de combustão existente.¹¹

O termo incêndio é o nome dado quando o fogo que foge ao controle e passa a consumir aquilo que não é destinado a queimar, podendo, pela ação das suas chamas, calor e/ou fumaça, causar danos à vida, ao patrimônio e ao meio ambiente.⁹⁻¹¹

1.1.1 Teoria do Fogo

O fogo é um processo complexo que envolve muitas interações química e física. Para entender melhor o comportamento de fogo, é necessário ter um conhecimento básico sobre química, física, calor, transferência de massa e dinâmica de fluidos.¹²

A visão mais elementar do fogo é fornecida pelo triângulo de fogo sendo uma maneira simples de representar os três fatores necessários para o seu início: combustível, comburente e calor,¹³ no entanto, o triângulo de fogo não descreve todas as condições para o desenvolvimento do fogo, porque não inclui as reações químicas em cadeia e moléculas reativas em gases inflamados. As espécies moleculares altamente reativas, referidas como radicais livres, devem estar presentes em concentrações suficientes para assegurar a continuação das reações em cadeia, caso contrário, as chamas são extintas.¹²

Já o tetraedro do fogo, conforme se observa na Figura 1, é a representação dos elementos da combustão, mostra que a combustão requer suprimentos de combustível e oxidante, uma alta temperatura e reações que se processam rapidamente a esta alta temperatura para gerar uma quantidade maior de calor quanto dissipado, de modo que a zona de reação não resfrie.¹⁴ Considerando que o triângulo de fogo identifica as condições necessárias para iniciar um incêndio, o tetraedro de fogo reconhece as condições suficientes para um incêndio se sustente. Essas condições incluem a disponibilidade de combustível gasoso ou vapores de combustível, que só podem ser gerados se houver aquecimento suficiente de externo fontes ou feedback de calor das próprias chamas de um material em chamas.¹²



Figura 1. Representação do tetraedro do fogo. Adaptado de ²

O combustível é o campo de propagação do incêndio, sendo toda matéria sólida, líquida ou gasosa capaz de queimar,¹⁵ geralmente na presença do ar e em condições normais de temperatura e pressão, podendo ocorrer na presença de oxidantes diferente do oxigênio, como o cloro, flúor ou produtos químicos contendo oxigênio em sua estrutura.⁸

O calor representa a energia acima do nível mínimo necessário para liberar vapores de combustível e causar ignição. O calor é comumente definido em termos de intensidade ou taxa de aquecimento (BTU/s ou kW) ou como a energia calorífica total recebida ao longo do tempo (BTU ou kJ). Em um incêndio, o calor produz vapores de combustível, causa ignição e promove o crescimento do fogo e propagação da chama, mantendo um ciclo contínuo de produção de combustível e ignição.⁸

A reação em cadeia é a sequência de reações que conduzem a formação de produtos intermediários (os radicais livres) que auto alimentam o fogo reagindo com outras moléculas presentes nas chamas até a formação dos produtos finais da combustão.¹⁶ Ocorre pelo calor liberado pela própria reação de uma célula de combustão, que se for suficiente, ativa novas moléculas de massa circundante, transferindo energia calorífica de uma molécula para outra.¹⁵

O calor se propaga de três maneiras: condução, convecção e irradiação sendo influenciada: pelo tipo de material combustível que está sendo aquecido, pela capacidade do material combustível de reter calor e pela distância da fonte de calor até o material combustível.^{9,10}

A condução é a transferência de energia térmica através de um material por contato entre suas moléculas em movimento, sendo que o contato real das moléculas vibratórias é necessário, sendo limitada, em sua maior parte, à ação localizada.^{9,10} Seus efeitos são mais visíveis em materiais sólidos, onde o contato

molecular é o mais alto e onde a convecção não ocorre,² porém, o fogo que se propaga dessa maneira não deixa vestígios assinaladores em superfícies como paredes e teto, portando, o próprio corpo condutor de calor levará o perito até a fonte de calor inicial.¹⁵ A taxa em que o calor (energia) é transferido através de um corpo em condições estáveis é função da diferença de temperatura e da condutância do material envolvido.¹²

Na convecção é um meio de transferência de calor, sendo muito importante no desenvolvimento dos incêndios,² envolve a transferência de calor por um fluido circulante - seja um gás ou um líquido. O movimento do fluido pode ocorrer naturalmente, impulsionado por diferenças de densidade ou pode ser o resultado de um fluxo imposto (convecção forçada).¹² De forma natural, se uma superfície estiver a uma temperatura mais elevada do que o fluido circundante, o ar adjacente à superfície será aquecido e se tornará menos denso do que o ar circundante e, portanto, subirá.^{9,10} No caso dos incêndios, a transmissão por convecção ocorre do movimento ascendente da fumaça, vapores destilados e gases emanados como produto da combustão.¹⁵

A irradiação é menos considerada para o espalhamento dos incêndios em edificações maiores do que a transferência por condução ou convecção, no entanto, ele desempenha um papel crítico no crescimento e propagação do fogo, particularmente os incêndios maiores,² sendo uma forma de energia que viaja através de um espaço sem a necessidade de um meio intermediário, como um sólido ou fluido.^{9,10} Desloca-se como ondas eletromagnéticas em linhas retas, sendo que vácuo, todas as ondas eletromagnéticas viajam de maneira análoga a luz.^{12,15}

Baseado no tetraedro do fogo, os métodos ou processos de extinção de incêndios são realizados pela retirada de um ou mais elementos que o compõe. Se um dos lados da figura for quebrado, a combustão será interrompida e o incêndio poderá ser extinto, sendo esses métodos conhecidos como resfriamento, abafamento, isolamento e quebra da reação em cadeia.⁹⁻¹¹

1.1.2 Incêndio Criminoso

No Brasil o incêndio criminoso é tipificado pelo Código Penal em seu artigo 250 que determina que causar incêndio, expondo a vida a perigo, assim como a integridade física ou o patrimônio é crime, tendo uma pena de três a seis anos de

reclusão e multa.¹⁷ Nos Estados Unidos da América (EUA) causar incêndio ou causar uma explosão de maneira mal-intencionada e/ou intencionalmente, ou imprudentemente é chamado de *Arson*⁸ e o agente responsável por praticar esse crime, que no Brasil é o incendiário, é conhecido como *Arsonista*.¹²

O *Arsonista* utiliza de maneira deliberada do fogo para destruir as propriedades, tirar a vida humana ou para fazer as pessoas se sentirem inseguras na comunidade, sendo um crime que tende a ser difícil de investigar pois grande parte das provas são danificado pelo fogo.²

Durante as investigações, se for determinado que um incêndio é de causa criminoso ou de forma ilegal na propriedade, uma investigação criminal completa deve ser conduzida. Outros incêndios para os quais uma causa não pode ser facilmente determinada, incluindo aqueles classificados como suspeitos ou indeterminados, também devem ser investigados.¹²

Muitos incêndios criminosos estão associados a utilização de acelerantes,¹⁸ sendo que a presença de um acelerador numa cena de incêndio pode indicar que um ato de incêndio ocorreu em oposição a um incêndio acidental. Um acelerador pode ser qualquer material usado para facilitar a ignição ou contribuir para a velocidade ou a propagação de um incêndio. O incêndio criminoso é considerado um dos crimes mais fáceis de cometer e uma das mais difíceis de investigar.¹⁹

Investigações assertivas de incêndio por especialistas qualificados e capacitados podem impedir os incendiários. A determinação do incêndio criminoso geralmente pode ocorrer somente após uma investigação completa em que outras causas possíveis são descartadas e a evidência física de um incêndio causado por um incendiário é estabelecida.^{Erro! Indicador não definido.}

1.1.3 Acelerante

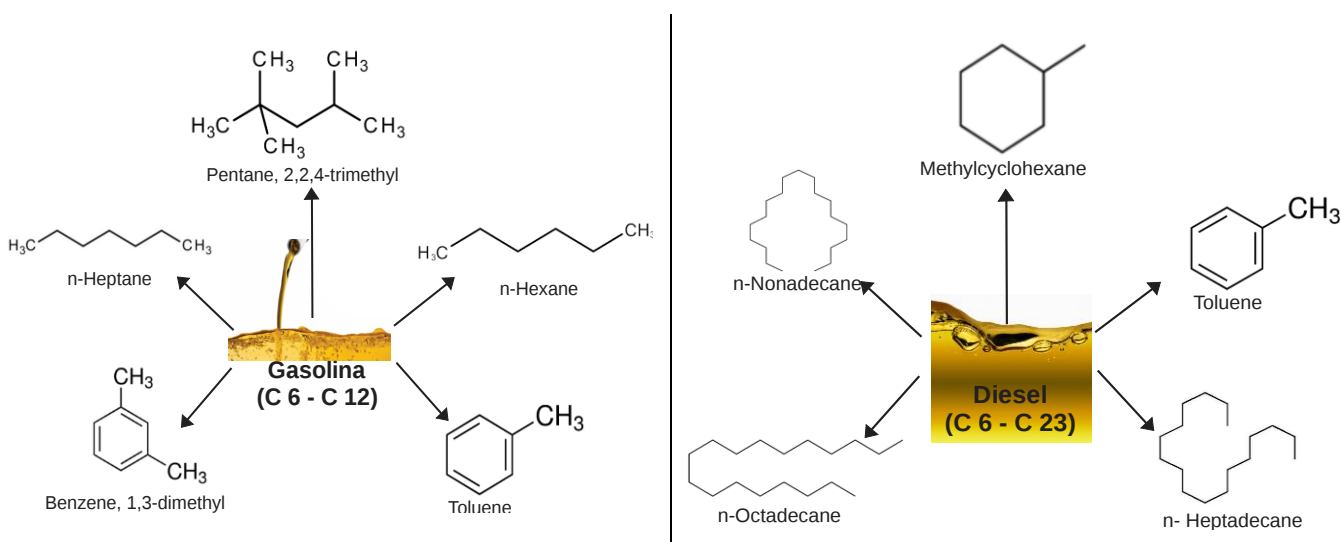
Quando um incêndio é iniciado deliberadamente, os incendiários usam líquidos inflamáveis que derramam sobre o local para ajudar dar início ao fogo, propagar e assim acelerar a destruição.²⁰ Um acelerante é qualquer combustível ou oxidante, muitas vezes um líquido inflamável, usado para iniciar um incêndio, aumentar a taxa de crescimento e acelerar a propagação do fogo.⁸



Figura 2. Suspeito utilizando acelerante para dar início a um incêndio.²¹

Os acelerantes podem ser encontrados em qualquer estado físico: gás, líquido ou sólido. As provas para testes de aceleração devem ser coletadas e testadas de acordo com as normas da *American Society for Testing and Materials* (ASTM),⁸ E1386, E1388, E1412, E1618 e E2154, uma vez que a detecção de resíduos acelerados afeta de forma decisiva o curso de investigação de incêndio e constitui importantes evidências materiais do crime, a confiabilidade desses testes é de extrema importância.²²

A gasolina é o combustível mais comumente utilizado como acelerante, porque é um líquido inflamável eficiente e pode ser comprado e transportado mesmo em grandes quantidades sem despertar as suspeitas dos vendedores e das autoridades, assim como os diluentes de tinta e o querosene que são combustíveis bastantes comuns e podem ser adquiridos em quantidades moderadas sem a suspeita, pois seu uso é liberado com pouca restrição.²



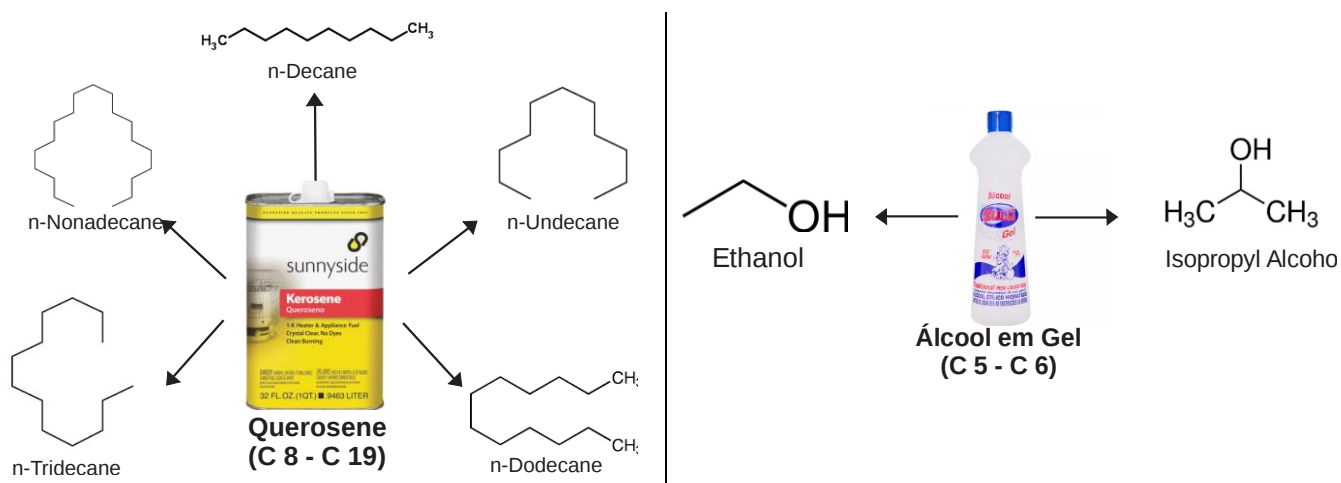


Figura 3. Composição química de diferentes líquidos utilizados como acelerante. Adaptado de ²³

Stauffer e Byron (2007) alertam para os combustíveis alternativos, como o biodiesel, que se apresentam de maneira crescente no mercado e não são a base de petróleo, ressaltando que os analistas de detritos de fogo, geralmente não possuem experiência com líquidos não-petrolíferos, e com o rápido aparecimento de combustíveis alternativos, é provável que os detritos de fogo que contenham essas substâncias sejam submetidos ao laboratório forense com mais frequência.²⁴

Com o auxílio dos laboratórios forenses o investigador pode identificar o acelerante por meio dos vestígios que permanecem nos detritos ou dos resíduos do líquido inflamável resultante da combustão incompleta, conforme pode ser observado nas Figuras 3, onde cada tipo de acelerante possui constituintes e grupamentos específicos de sua constituição, auxiliando na identificação e caracterização de substâncias inflamáveis,²⁵ podendo ser útil na identificação dos constituintes do combustível, do tipo de fonte de ignição,²¹ da explicação da causa e propagação do fogo e até mesmo apontar para excluir suspeitos.²⁶

1.1.4 Investigação de Incêndio

As doutrinas norte-americana e europeia utilizam o termo investigação de incêndio para referir-se ao processo de determinação de origem, causa e desenvolvimento de um incêndio ou explosão⁸ sendo realizada por pessoas ou órgãos competentes, conforme exigência das normas que ditam os requisitos mínimos para trabalhar como investigador de incêndio nos setores privado e público.²⁷

No Brasil não é comum a utilização do termo investigação de incêndio, sendo esse substituído pelo termo perícia de incêndio, desenvolvida pelo Corpo de Bombeiros ou Polícia Técnica Científica, de acordo com regulamentação Estadual. No Espírito Santo, conforme a Constituição Estadual em seu Artigo 130, compete ao CBMES a realização da Perícia de Incêndio e Explosão em local de sinistro,²⁸ além de ser atividade fundamental para o cumprimento do Artigo 2º da Lei Estadual 9.269, que atribui ao CBMES a responsabilidade de estudar a prevenção e segurança contra incêndio.²⁹

Na investigação do incêndio as causas são rastreadas a partir do próprio incêndio e essas exploradas utilizando o método científico,^{8,30} o principal problema na identificação e quantificação das causas do incêndio é a dificuldade na obtenção de dados precisos dos incidentes, sendo esse problema presente em todos países que realizam a atividade.²



Figura 4. Investigador de incêndio atuando no cenário pós-incêndio.³¹

A Figura 4 mostra um investigador de incêndio realizando seu trabalho em um cenário pós-incêndio. Durante os trabalhos são realizadas avaliações dinâmicas e análise dos padrões de queima, em seguida, a área de queima inicial é analisada para determinar o ponto de origem da ignição, sendo que durante essa etapa, uma potencial fonte de ignição é procurada, como uma vela, cigarro, fonte elétrica, etc., também é determinado no passo final se a potencial fonte de ignição é realmente a causa do incêndio.³²

Toda investigação de incêndio realizada pelo Corpo de Bombeiros Militar gera um laudo pericial referente ao sinistro, e esse produto oficial é também utilizado para

contribuir com elucidações e resoluções nas esferas jurídicas e civis (processos e investigações criminais, civis, subsídio para seguradoras, dentre outros), ou seja, atende diretamente demandas da sociedade.³³

Salvar vidas e prevenir lesões são os verdadeiros motivos dos investigadores de incêndios passarem longas horas buscando vestígios em uma cena de fogo ou realizando análises laboratoriais e pesquisa. O papel que a investigação de fogo desempenha no processo de regulamentação do código também é significativo, pois grande parte do progresso na redução da frequência de incêndios e mortes por fogo é devido aos avanços realizados na melhoria da segurança da vida e dos códigos de segurança contra incêndios, uma vez que a única maneira de ter certeza de que eles têm o efeito desejado e não criam outros riscos imprevistos é documentando as consequências causadas pelos incêndios em edificações contempladas pelo código.²

Do ponto de vista da segurança pública e das considerações econômicas, é importante que métodos de investigação para determinar com precisão as causas dos incêndios sejam entendidas e aplicadas na maior extensão possível. Não deve haver presunção de que um incêndio seja acidental ou incendiário,⁸ sendo vital que o investigador não defina a causa do incêndio sem avaliar todas as evidências coletadas.²

1.2 TÉCNICAS

1.2.1 Extração por carvão ativado (ACS)

Desde os anos 70 a técnica de extração por tira de carvão ativada vem sendo estudada para auxiliar na investigação sobre a utilização de acelerantes para dar início a incêndios³⁴ sendo uma das técnicas mais populares para essa finalidade.¹⁶

A técnica consiste em expor o carvão vegetal no recipiente da amostra para adsorver resíduos líquidos inflamáveis, sendo que o recipiente pode ser aquecido ou deixado à temperatura ambiente por um determinado tempo e em seguida o carvão é removido e eluído com dissulfeto de carbono (CS_2) ou éter dietílico e analisado utilizando alguma técnica analítica, comumente sendo empregada a CG-EM, conforme apresentado na Figura 3.³⁵

Na ATMS E1412 encontram-se os parâmetros utilizados para a realização da técnica, sendo que a norma recomenda a utilização de uma tira de carbono de 10 mm por 10 mm, ou 100 mm², sendo o CS_2 , n-pentano ou éter dietílico solventes

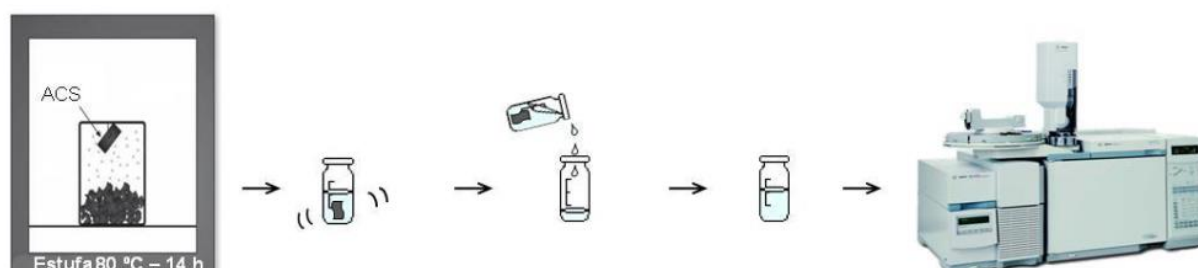
adequados para realizar a eluição. Uma vez que o pentano e o éter dietílico produzem relativamente grandes sinais ao passar por um detector de ionização de chama obscurecendo o sinal de hidrocarbonetos mais leves, o CS_2 é o solvente mais recomendado para realização da eluição.³⁵

Figura 5. Representação esquemática da técnica do ACS. Erro! Indicador não definido.

Outro parâmetro que a norma traz é a temperatura e o tempo de aquecimento do recipiente, devendo-se atingir uma temperatura de 50 a 80 ° C, durante 2 a 24 h. Alguns trabalhos buscaram aperfeiçoar esses parâmetros fornecidos pela norma, entre eles destaca-se o trabalho realizado por Salgueiro *et al.* (2012) que utilizou o ACS a uma temperatura de $80 \pm 1^\circ\text{C}$ por $14,0 \pm 0,5$ h no forno para extrair e identificar gasolina de 95 octanas, gasolina de 98 octanas, diluente de tinta, iniciador de carvão sólido e aguarrás.²²

No mesmo ano Prather *et al* (2012) também utilizou a ACS (de 2,5 mm por 5 mm, da marca *Albrayco Laboratories*) em seus trabalhos, otimizando a extração utilizando uma temperatura de 80°C durante 4 h. Decorrido esse tempo, a tira de carbono foi eluída com 200 mL de diclorometano obtendo-se excelentes resultados na análise para detectar gasolina e querosene.³⁶

Sinkov *et al* (2014) utilizaram a ACS (também da marca *Albrayco Technologies*) e otimizou a análise para a detecção de gasolina usando uma temperatura de 60°C, um tempo de extração de 16 horas e o dissulfureto de carbono para eluir o carvão ativado, semelhante ao trabalho realizado por Lopatka *et al.* (2015) onde a lata selada foi aquecida por 16h a 66°C e em seguida removida do



forno. Após atingir a temperatura ambiente, a tira de carbono ativado foi lavada com dissulfureto de carbono.³⁷

No trabalho de Sandercock (2016) avaliou-se a utilização de um pano de carbono ativado (ACC) e uma tira de carbono ativado (ACS) na extração de vários

líquidos inflamáveis. A extração simultânea de líquidos inflamáveis utilizando ACC e ACS foram realizadas durante um período de 16 horas em latas de tinta de um litro, tanto a temperatura ambiente quando a 60 ° C. As extrações aquecidas também foram realizadas em uma mistura aceleradora de gasolina e diesel na presença de vapor de água e o efeito do vapor de água sobre a eficiência de extração de ACC e ACS foi avaliada.³⁸

Concluiu-se que na ausência de vapor de água, o ACC e o ACS demonstraram extrair uma ampla gama de hidrocarbonetos de ILs sem alteração significativa das proporções relativas entre compostos em comparação com o líquido limpo, sendo que o ACC usado neste estudo deu extratos de IL mais concentrados do que o ACS. Ambas as formas de carvão ativado, mostraram uma marcada diminuição na recuperação de compostos de alceno comparado a recuperação de compostos aromáticos na presença de altas concentrações de vapor de água. Dado que ACC e ACS se mostraram igualmente satisfatórios, o uso do ACC é mais atraente principalmente devido ao custo do ACS, sendo que nesse estudo, o preço unitário de um ACS foi de US \$ 3,20, enquanto que o preço unitário do ACC de 1 cm x 2cm foi de US \$ 0,05.³⁸

Cheenmatchaya e Kungwankunakorn (2018) investigaram a permeação da gasolina em quatro tipos diferentes de solo e determinaram a profundidade ideal do solo para detecção de gasolina residual que pode fornecer informações importantes para vincular evidências com um incêndio criminoso. Os efeitos da duração para extinguir o fogo e retirar a amostra também foram investigados. Para a extração do ILRs, utilizaram 0,1 g de carbono ativado derivado da casca de arroz embalado em um saquinho de chá e pendurado em um recipiente de 100 mL. As amostras foram aquecidas a 70°C durante 30 min e utilizou o diclorometano (DCM) para extrair resíduos de gasolina do adsorvente para posterior análise por CG-EM, obtendo-se ótimos resultados.²⁵

1.2.2 Microextração em fase sólida (SPME)

Introduzido na década de 90 a microextração em fase sólida (SPME) encontrou inúmeras aplicações.³⁹ Trabalhos desenvolvidos nessa época já descreviam a técnica como sendo rápida, sem a necessidade de se utilizar solventes e compatível para a preparação de diversas amostras tendo sido aplicada a uma

variedade de áreas, entre elas: ambiental, higiene industrial, monitoramento de processos, análise clínica, forense, alimentar e de drogas.⁴⁰ Atualmente a SPME é considerada uma técnica de preparação de amostras portátil, simples, sensível, eficiente em termos de tempo, econômica, confiável, fácil de automatizar e que minimiza o consumo de solvente.⁴¹

Em SPME os revestimentos de fibra são usados para isolar e concentrar analitos em um intervalo de tempo curto. Após a extração, as fibras são transferidas com a ajuda de um dispositivo de manipulação tipo seringa para análise por instrumentos de separação e quantificação dos analitos.⁴⁰ O dispositivo básico de SPME, conforme apresentado na Figura 6, consiste de um bastão de fibra ótica, de sílica fundida com uma extremidade recoberta com um filme fino de um polímero ou de um sólido adsorvente.⁴²

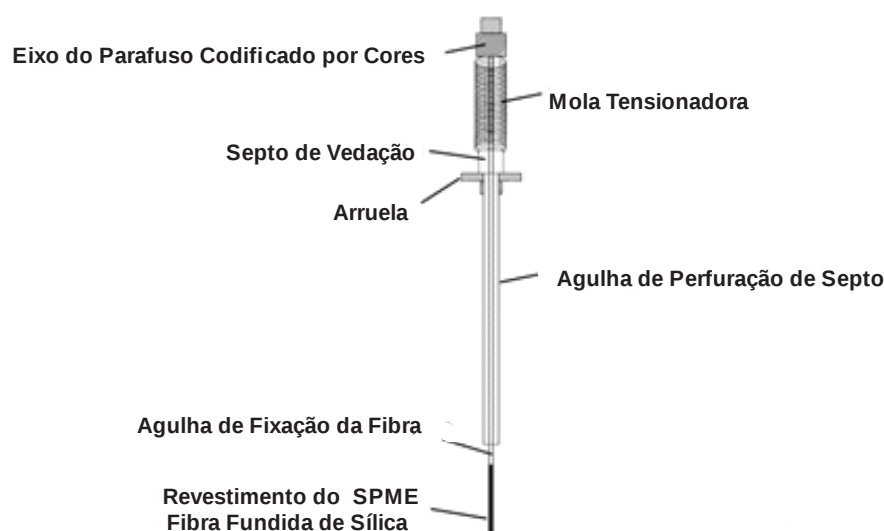


Figura 6. Dispositivo de SPME.⁴³

A escolha da fibra é uma das etapas mais importantes no método SPME e depende do nível de concentração e da amplitude, da complexidade da amostra, da polaridade do analito e do peso / tamanho molecular da matriz da amostra. As fibras geralmente são classificadas em quatro categorias de acordo com: o tipo de revestimento, espessura do filme, polaridade e adsorvente ou adsorvente. As composições da fibra são as seguintes: polímero líquido puro (PDMS, PA) e filme misto constituído por partículas sólidas e polímero líquido (carboxen-PDMS, DVB-PDMS). O extrato de polímero líquido puro através da absorção (analito difuso e se dissolve na fibra), enquanto para a fibra de partículas porosas, a extração é via

adsorção (analito que reside como uma camada mono). Os filmes mistos combinam a extração através da absorção de polímero líquido com adsorção de partículas porosas. Todas as fibras SPME têm a capacidade, até certo ponto, de extrair os analitos polares e não polares, mas a polaridade geral do revestimento determina a sua adequação.⁴⁴

Numa extração por SPME, as moléculas do analito tem de se deslocar da matriz e penetrar no recobrimento, para isto, devem vencer a resistências a transferências de massa até que se estabeleça um equilíbrio de partição (ou de adsorção, para o caso de recobrimentos sólidos) do analito entre a fibra e o meio que a envolve. Portanto, a teoria de SPME baseia-se na cinética de transferência de massa entre fases e na termodinâmica que descreve o equilíbrio de partição do analito entre elas.

Existem três formas de extração dos analitos usados em SPME: imersão direta, *headspace* e por membrana protetora (Figura 7). A amostragem por imersão direta (Fig. 7A) baseia-se na inserção de do revestimento de fibra diretamente na fase estacionária polimérica logo abaixo da matriz da amostra. Na amostragem por *headspace* (Fig. 7B) a configuração é semelhante à da imersão direta, exceto que a fibra é colocada acima da matriz da amostra sendo que o analito de interesse tem que passar pela fase de vapor antes da extração ser alcançada. A decisão de qual forma de extração utilizar depende do tipo de amostra, a volatilidade do analito e a composição da matriz. Na amostragem por membrana protetora (Fig. 7C), é colocada uma barreira (geralmente um tubo de silício) entre a amostra e o revestimento de fibras, no intuito de preservar o revestimento de fibra das substâncias que causam danos, pois não permitir a migração de interferências, mas há uma diminuição na difusão do analito aumentando o tempo de extração.^{40,44}

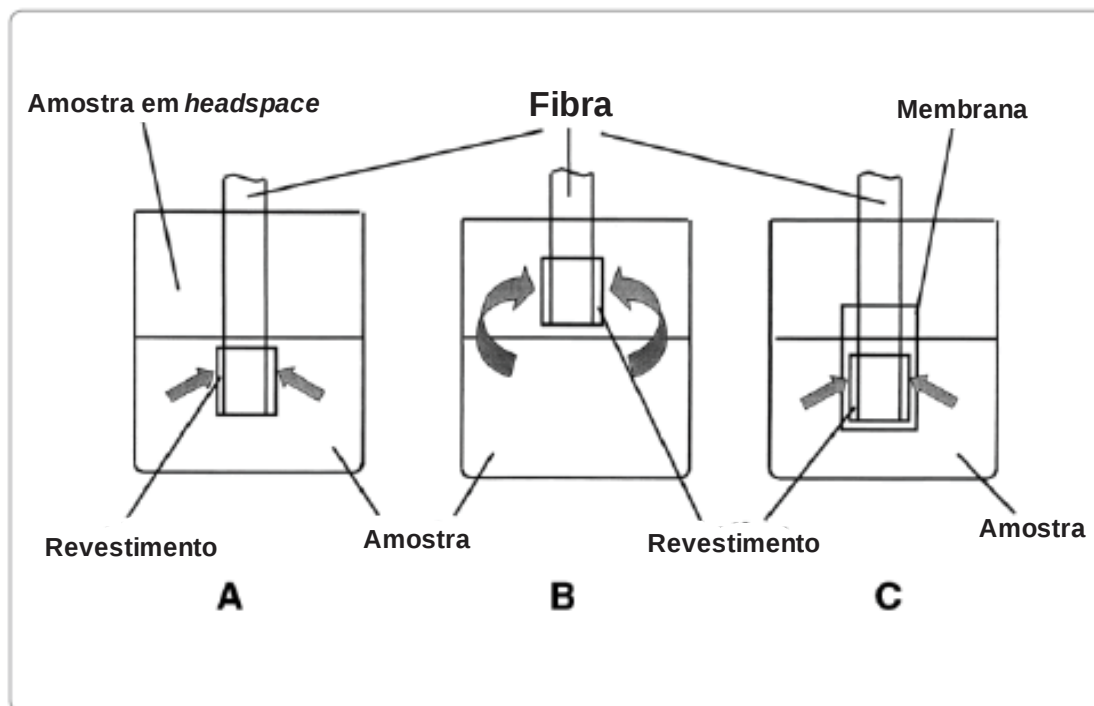


Figura 7. Representação das formas de extração usando fibras de SPME: (A) imersão direta, (B) headspace, (C) membrana protetora.⁴⁴

As investigações nos últimos anos revelaram a capacidade latente da SPME para a amostragem no local e a análise *in situ*. Em técnicas de SPME comuns, uma pequena quantidade de fase de extração é colocada em contato com a matriz da amostra ou espaço livre acima dela por um período predeterminado. Os analitos são extraídos diretamente de um espaço aquoso, gasoso ou superior acima das amostras sólidas ou líquidas em uma fase estacionária sendo posteriormente submetidos a dessorção, por meios térmicos ou pelo uso de um solvente. As fases estacionárias são tipicamente imobilizadas em superfícies geometricamente diversas ou embaladas dentro dos tubos, agulhas ou pontas da seringa.³⁹

Apesar das inúmeras vantagens apresentadas pela SPME e do número cada vez maior de trabalhos sobre suas aplicações, as análises de matrizes complexas impõem desafios substanciais, especialmente quando se trata de analitos de nível de traço. A incrustação da fase de extração por adsorção irreversível de macromoléculas da matriz da amostra pode levar a uma diminuição substancial na vida útil do revestimento e alterar sua propriedade de extração. Carregar a matriz para o instrumento pode causar efeitos de matriz, de modo que a busca de revestimentos SPME robustos para melhorar o desempenho da técnica em matrizes complexas é um tópico de pesquisa ativo. Além disso, uma vez que a SPME é uma

técnica de equilíbrio que extrai concentrações livres de analitos, ao estudar matrizes ambientais contendo partículas sólidas, pode ocorrer uma ligação extensa de analitos à matéria sólida, levando a concentrações livres diminuídas de analitos, o que, por sua vez, reduz a sensibilidade do método. Nesses casos, os avanços da SPME se concentraram no desenvolvimento de fases de extração altamente específicas e na implementação de grandes dispositivos de área superficial capazes de melhorar a eficiência de extração.⁴¹

A ASTM E2154 normatiza a utilização do SPME para separação e concentração de resíduos líquidos inflamáveis de amostras de detritos de fogo, considerando ser a técnica mais adequada para a detecção dos ILRs, para avaliar a sua concentração e para extrai-los das amostras aquosas.⁴⁵

A mesma norma orienta quanto as condutas que devem ser tomadas para evitar qualquer tipo de erro na realização do procedimento, de forma resumida: deve-se verificar se a fibra está livre de componentes de resíduos inflamáveis e outros contaminantes, introduzindo a fibra no CG sob a dessorção do injetor e condições cromatográficas para análise de resíduos inflamáveis, sendo que este resíduo de fibra "em branco" sempre deve ser avaliado antes da amostragem de resíduos. Caso o recipiente que contém a amostra tiver uma tampa metálica, deve-se fazer um orifício na tampa e instalar um septo de manga de borracha na abertura. O recipiente deve ser aquecido até que a amostra atinja a temperatura desejada, sendo que temperaturas inferiores a 60°C podem ser insuficientes para volatilizar compostos acima de C₁₆ e temperaturas acima de 80°C podem resultar em discriminação contra compostos de alta volatilidade quando 100µm fibra PDMS é utilizado. O tempo de exposição ideal para máxima sensibilidade dependerá da temperatura, concentração e da composição do composto volátil presente na amostra, mas os prazos de exposição para triagem de rotina de amostras ficam na faixa de 5-15 min.⁴⁵

Diversos autores utilizaram essa técnica SPME para extrair o acelerante alvo da perícia de incêndio e explosão. Destacam-se os trabalhos desenvolvidos por Cacho *et al.* (2014) que avaliaram a temperatura ideal para realizar a extração de acelerantes utilizando a fibra PMDS, o volume do frasco, o suporte para exposição das barras de agitação e o tempo de extração. Dentro do seu campo de análise concluiu que a melhores respostas foram obtidas na temperatura de 50° C, em relação aos frasco utilizados o de 40 mL obteve melhores resultados em compostos

mais pesado e o de 15 mL utilizado em compostos mais leves, em relação ao suporte obteve melhores resultados utilizando o suporte magnético e em relação ao tempo de extração, que considerou ser o aspecto mais importante na extração, definiu o tempo de 1 hora sendo o mais apropriado para realizar essa técnica e garantir a sensibilidade máxima.⁴⁶

Dhabbah e Al-Ghamdi (2014) extraíram gasolina residual de carpete utilizando a técnica SPME e reforçaram que é rápida, simples e eficiente, não requerendo habilidades específicas ou solventes para a extração. Os resultados obtidos em seu trabalho indicaram que a quantidade de combustível utilizada para inflamar as amostras de tapete e a espessura, desempenham um papel importante na presença dos resíduos de gasolina e depende da capacidade de adsorção do tapete queimado. Para realizar a extração, o *headspace* com a fibra PMDS foi realizado num forno a 50 °C por 30 min e conseguiram detectar traços de gasolina até 5 h, acima do tapete de 5 mm de espessura usando 2 mL de acelerador.⁴⁷

No mesmo ano Fettig *et al.* (2014) usaram uma fibra mista SPME (DVB / CAR / PDMS) para extrair compostos voláteis da gasolina e do diesel, a viabilidade da recuperação de líquidos inflamáveis em resíduos foi demonstrada com amostras de tapete preservado e queimado. As melhores condições de SPME para detecção de gasolina foram determinadas como sendo de 50 °C, com um tempo de incubação de 5 min e um tempo de exposição de 30 min. Já para o combustível diesel, a temperatura deve ser ajustada em um nível mais alto (70 ° C), com outros parâmetros mantidos similares.⁴⁸

Kruger *et al.* (2014) conduziram um trabalho sobre os efeitos dos aceleradores durante incêndio em uma sala de estar e avaliaram a detecção dos ILRs com diferentes fibras. Concluíram que a fibra mista SPME (DVB / CAR / PDMS) é ideal para adsorver componentes alvo de gasolina e diesel sendo que a contaminação de fundo ou produtos de combustão levando a um resultado falso positivo devem ser cuidadosamente consideradas. As condições mais susceptíveis de resultar em uma detecção confiável de líquidos inflamáveis a partir de amostras de detritos de fogo são: um fogo rapidamente extinto e uma amostragem extensa o mais rápido possível para evitar a evaporação das substâncias voláteis.⁴⁹

1.2.3 Cromatografia Gasosa acoplada a Espectrometria de Massas (CG-EM)

A cromatografia abrange uma série de técnicas que têm em comum a separação dos componentes de uma mistura por operações de equilíbrio que resultam na separação das entidades como resultado de sua partição (sorção diferencial) entre duas fases diferentes, uma estacionária com uma superfície grande e uma em movimento em contato com a primeira. A cromatografia não se restringe a separações analíticas podendo também ser usado na preparação de substâncias puras, no estudo da cinética das reações, nas investigações estruturais de escala molecular e na determinação de constantes físico-químicas, incluindo constantes de estabilidade de complexos, entalpia, entropia e energia livre.⁵⁰

A Figura 6 traz uma representação de como funciona o equipamento, o princípio de funcionamento da cromatografia gasosa baseia-se na injeção de uma solução de amostra no instrumento em uma corrente de gás (hélio ou nitrogênio) que transporta a amostra para um tubo de separação conhecido como "coluna" onde os vários componentes são separados. O detector mede a quantidade de componentes que saem da coluna, para medir uma amostra com uma concentração desconhecida é necessário a injeção de uma amostra padrão de concentração conhecida, sendo que o tempo padrão de retenção de pico da amostra (tempo de aparência) e a área são comparados com a amostra de teste para calcular a concentração.⁵¹

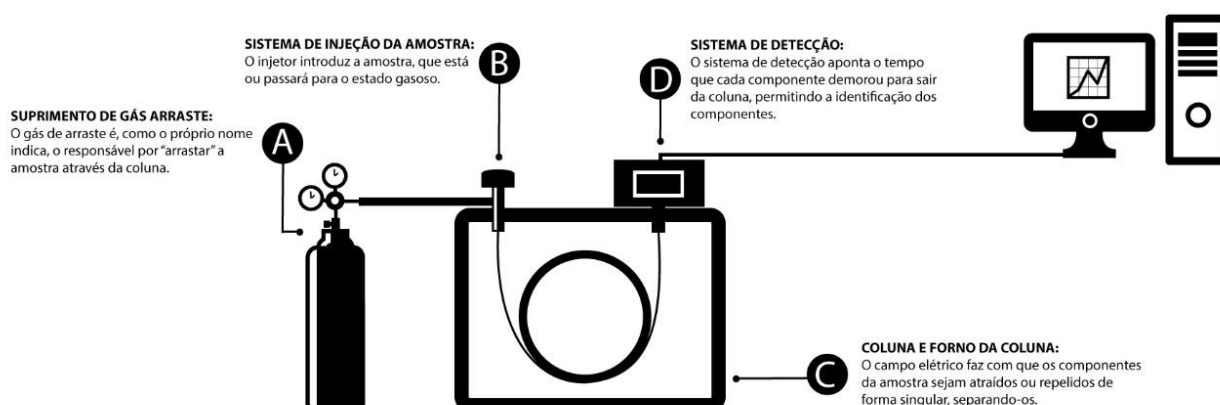


Figura 8. Representação do funcionamento de um cromatógrafo gasoso.⁵²

A CG é o primeiro método analítico para a separação de compostos voláteis, combina velocidade de análise, alta resolução, facilidade de operação, excelentes resultados quantitativos e custos moderados, no entanto, os sistemas CG não podem confirmar a identidade ou a estrutura de qualquer pico, pois os tempos de retenção apesar de estarem relacionados aos coeficientes de partição e esses característicos de um sistema bem definido, eles não são únicos.⁵³

Assim, deve-se ter cuidado ao identificar um pico em um pirograma para um composto desconhecido, isso significa que uma identificação confiável não deve ser baseada em dados de tempo de retenção. As duas melhores técnicas para identificar picos desconhecidos são a espectroscopia infravermelha (IRS) e a espectrometria de massa (EM). A espectrometria de massa é o melhor das duas técnicas porque se obtém um número de massa que pode ser combinado com um número de massa de uma biblioteca de espectros de compostos conhecidos,⁵⁰ além disso, é um dos detectores mais ricos em informações, pois requer apenas microgramas de amostra para fornecer dados sobre a identificação qualitativa de compostos desconhecidos (estrutura, composição elementar e peso molecular) e sua quantificação.⁵³ A Figura 9 mostra alguns exemplos de espectro obtidos por CG-EM, apresentando de alguns diferentes líquidos inflamáveis que podem ser utilizados como acelerantes e serão objetos de estudo nessa pesquisa.

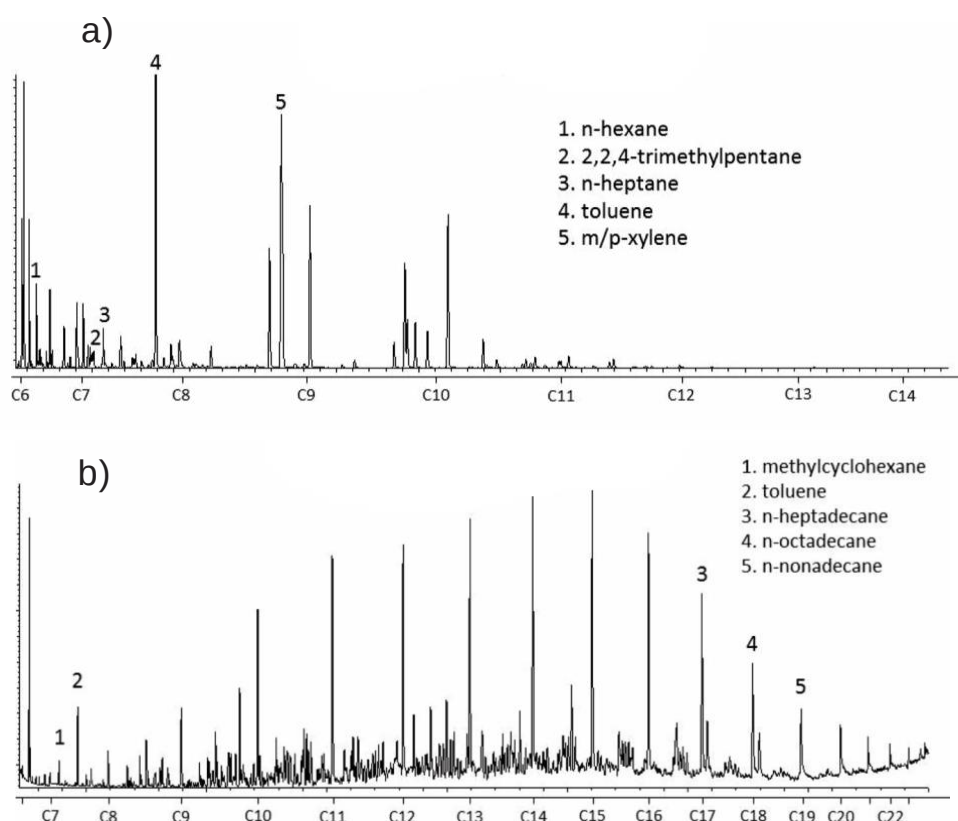
Em uma revisão realizada por Martin-Alberca et al.(2016) sobre as ferramentas de análise utilizadas para detectar a presença de acelerantes em detritos de incêndio durante os anos de 2008 – 2015, trouxeram que é uma área amplamente dominado pela CG acoplado a um detector EM, apresentando apenas algumas limitações para separar e identificar isômeros estruturais e hidrocarbonetos pesados de misturas complexas.⁵⁴

Entre os trabalhos que buscaram otimizar essa técnica de análise, destacam-se os trabalhos realizados por: Choodum e Daeid (2011) que melhoraram o método de espectrometria de massa cromatográfica em gás (CG-EM) proposto pela ASTM-1618, obtendo condições de separação e sensibilidade melhoradas.⁵⁵

No ano seguinte, Salgueiro et al. (2012) propuseram uma estratégia para verificar a qualidade da conservação da amostra, a transferência de resíduos de acelerante para o solvente final e a análise CG-EM utilizando padrões internos e obtiveram um procedimento adequado para verificar a repetitividade da análise, a extração de ACS e a conservação da amostra.²²

Já em 2016, Visotin e Lennard avaliaram um CG-EM portátil com o objetivo de realizar a análise dos detritos de fogo no local do incêndio. Analisando quatro líquidos inflamáveis (gasolina, terebintina mineral, querosene e diesel) e sete substratos (nylon, polipropileno e tapete de lã, base de borracha e espuma, pinheiro e poliuretano não tratados), na maioria das amostras analisadas os dados obtidos pelo CG-EM portáteis permitiram a detecção e classificação correta de ILRs, portanto, sendo considerado adequado à análise feita em campo das amostras como uma tela preliminar para fornecer resultados preliminares rápidos para pesquisadores de incêndio.¹⁹

Outros autores se destacam por utilizar a CG-EM como método de análise em seus trabalhos com detritos de incêndio, como: Cacho et al (2014),⁴⁶ Borusiewicz (2015),⁵⁶ Dhabbah et. Al (2014)⁴⁷, Lopatka (2015)⁵⁷, Cheenmatchaya e Kungwankunakorn (2018)²⁵ e Hall et al(2016)⁵⁸.



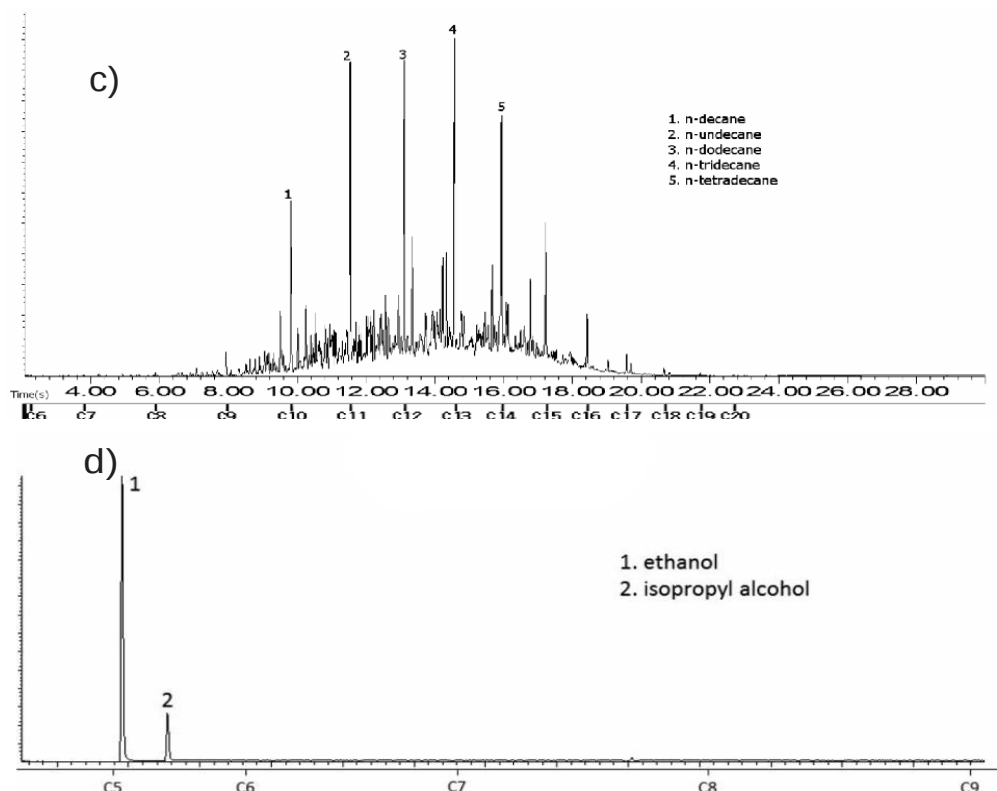


Figura 9. Cromatogramas obtidos por CG-EM para diferentes acelerantes. (a) Gasolina Comum - Texaco. (b) Diesel - Shell. (c) Querosene - Sunnyside. (d) Álcool em gel - Hoogvliet.²³

1.3 ANÁLISE NUMÉRICA

1.3.1 Fluidodinâmica Computacional (CFD)

O incêndio é sem dúvida um dos fenômenos mais complexos considerados na ciência do fogo. Ela abrange quase todos os efeitos encontrados nos fluxos de reação química. Dinâmica de fluidos, combustão, cinética, radiação e, em muitos casos, efeitos de fluxo multifásicos estão ligados entre si para fornecer um fenômeno físico e químico extremamente complexo.⁵⁹

A Ciência da Segurança contra Incêndios cresceu significativamente, especialmente nos últimos vinte anos. A modelagem matemática do fogo, no entanto, ainda é jovem e é uma área em rápida evolução da Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD). Uma complexidade do fenômeno o torna extremamente desafiador do ponto de vista matemático. A incorporação de todos esses processos em um modelo computacional unificado é uma tarefa ainda mais formidável.⁶⁰

A modelagem matemática de incêndios partiu de modelos semi-empíricos e analíticos. Sua evolução levou ao desenvolvimento de modelos de zona que formaram a primeira geração de modelos de incêndio por computador. O desenvolvimento da modelagem de CFD tornou possível modelar fenômenos de incêndio por meio da solução das equações básicas de conservação. Ele demonstrou sucesso na aplicação de vários problemas de segurança contra incêndio e seu papel na pesquisa de incêndio aumenta constantemente à medida que os modelos se tornam progressivamente robustos e sofisticados, e estudos de validação os tornam mais confiáveis. A abordagem CFD é considerada fundamental para o desenvolvimento futuro de modelos de incêndio, que pode fornecer a base para o desenvolvimento de regulamentos de segurança contra incêndio com base no desempenho.⁶⁰

O ponto de partida para os modelos CFD é o conjunto de equações diferenciais parciais que afirmam a conservação de massa, momento e energia no fogo e em todo o espaço ao seu redor. Essas equações são resolvidas numericamente para produzir previsões variáveis de tempo de temperatura, velocidade do gás, concentrações de espécies de gases e assim por diante, em uma malha tridimensional de volumes de controle que abrangem a geometria que está sendo modelada. Diferentemente dos modelos de duas zonas, os modelos CFD aplicam as leis de conservação em cada um dos milhares ou milhões de volumes de controle relativamente pequenos.⁶¹

As equações de conservação de massa, momento e energia que constituem o núcleo de qualquer modelo de CFD são expressas a seguir:⁶¹

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho Y_a)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho Y_a \mathbf{u}) = \nabla \cdot (\rho D_a \nabla Y_a) + m_a^m \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \mathbf{f} + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} \quad (3)$$

$$\frac{\partial (\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho h \mathbf{u}) = \frac{Dp}{Dt} + q^m - \nabla \cdot \mathbf{q} + \varepsilon \quad (4)$$

No entanto, a solução exata das equações governantes, resolvendo completamente as escalas de comprimento e tempo que ocorrem nos fluxos turbulentos associados ao fogo, ainda está além das capacidades dos maiores computadores atualmente

disponíveis. Como consequência, é necessário modificar as equações governantes para modelar a turbulência não resolvível. Atualmente, duas abordagens principais são empregadas em simulações CFD de fogo: simulação de grandes redemoinhos (LES) e equações de Navier-Stokes (RANS) com economia de energia Reynold. Além das incertezas associadas à modelagem do fluxo turbulento, outras são introduzidas pela descrição da química da combustão; radiação; e massa, momento e transferência de calor em limites sólidos.⁶²

1.3.2 Fire Dynamics Simulator (FDS)

O FDS é um software de CFD que calcula o fluxo de calor impulsionado pelo fogo. O *software* resolve numericamente uma forma das equações de Navier-Stokes apropriado para a baixa velocidade, fluxo térmico com ênfase na fumaça e no transporte de calor dos incêndios.⁶²

A primeira versão do FDS foi lançada publicamente em fevereiro do ano 2000, sendo usado para criar um modelo de transporte de calor, prever produtos da combustão em baixas velocidades, transferência de calor por radiação e convecção entre gases e superfícies sólidas, pirólise dos materiais sólidos, como ocorre a propagação das chamas e o crescimento do incêndio, capaz também de testar a ativação de chuveiros automáticos, detectores de temperatura, fumaça e supressão de incêndios com água por aspersão com chuveiros automáticos.⁶³

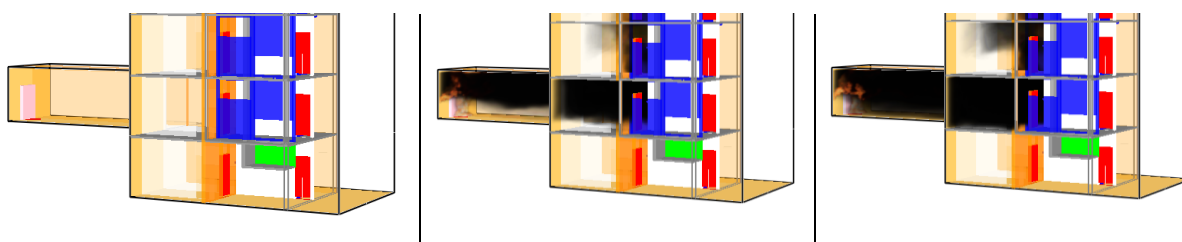


Figura 10. Simulação de incêndio usando o FDS para verificar o espalhamento da fumaça em uma edificação.

Todos os parâmetros de entrada requeridos pelo FDS para descrever um cenário de incêndio são transmitidos por meio de um arquivo de texto criado pelo usuário, baseado em comandos específicos de acordo com o guia de usuário disponível no site. Neste arquivo de entrada devem constar informações acerca do domínio físico e computacional, a geometria do ambiente e dos objetos, as

propriedades físico-químicas dos materiais, bem como especificações sobre a reação de combustão e dados de saída a serem gravados.⁶³

As reconstruções forenses exigem que o modelo simule um incêndio real com base nas informações coletadas após o evento, como testemunhas oculares, materiais não queimados e assinaturas de queimaduras. O objetivo da simulação é conectar uma sequência de observações discretas com uma descrição contínua da dinâmica do fogo. Normalmente, as reconstruções envolvem mais interação gás / fase sólida porque praticamente todos os objetos em uma determinada sala são potencialmente inflamáveis. Assim, há muito mais ênfase em fenômenos como transferência de calor para superfícies, pirólise, propagação e supressão de chamas. Em geral, reconstruções forenses são simulações mais desafiadoras para serem executadas porque exigem informações mais detalhadas sobre o conteúdo da sala, e há uma incerteza muito maior na taxa de liberação de calor total à medida que o fogo se espalha de um objeto para outro.⁶⁴

Diversos estudos com aplicação do FDS na elucidação das causas do incêndio foram realizados, com destaque para os estudos feitos pelo próprio NIST, entre eles: Simulação da dinâmica do incêndio para o caso do World Trade Center (WTC) em 11 de setembro de 2001,⁶⁵ após o atentado terrorista; o Incêndio na boate Station em Rhode Island em fevereiro 2003,⁶⁶ Simulação da Dinâmica do Fogo na Cherry Road NE em Washington D.C., ocorrido em 30 de maio de 1999;⁶⁷ Simulação da dinâmica de um incêndio em um duplex em Iowa, ocorrido em 22 de dezembro de 1999;⁶⁸ Simulação da dinâmica de um incêndio no porão de uma Loja de ferragens - Nova York, ocorrido em 17 de junho de 2001⁶⁹ e a Simulação da dinâmica de um fogo movido pelo vento em uma casa de estilo rural – Texas, ocorrido em 2009.⁷⁰

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Realizar uma análise experimental por meio de técnica cromatográfica gasosa acoplada a espectrometria de massas, com diferentes técnicas de extração (ACS e SPME) e uma análise numérica, por meio do software FDS, para identificação de agentes acelerantes em substratos encontrados em cenários pós-incêndio.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

2.2.1 Análise de acelerantes

- Determinar a presença dos compostos alvos, característicos da gasolina e do diesel, nas diferentes amostras de substratos (espuma, tecido, papel jornal, plástico e madeira) após uma queima controlada na presença do acelerante, definindo o melhor tipo de amostra para ser coletado pelo perito;
- Verificar a presença de compostos que mascaram a presença de acelerante em substratos queimados;
- Comparar a eficiência na identificação dos compostos alvo a partir das técnicas de extração por ACS e SPME utilizadas para análise por CG-EM, definindo a melhor técnica de extração.

2.2.2 Análise computacional de incêndio

- Realizar dois estudos de caso, modelando por meio de trabalhos de validação do FDS, de incêndios ocorridos no Estado do Espírito Santo, buscando aproximar-se do ambiente simulado do ambiente encontrado no cenário de incêndio;
- Identificar quais informações o FDS é capaz de mostrar que podem auxiliar durante o trabalho investigativo em um ambiente de incêndio;
- Estudar as condições atingidas nos ambientes com ênfase nos efeitos observados no incêndio e características dos materiais que compõe cada ambiente estudado.

3 METODOLOGIA

3.1 ANÁLISE DE ACELERANTES

3.1.1 Substrato

Os substratos utilizados foram: madeira (eucalipto), plástico (polietileno), espuma (poliuretano), tecido (poliamida) e papel-jornal (celulose), conforme Figura 11. Todos os substratos foram depositados em três pedaços no interior de blocos de dimensões média de 10x10 cm². Os acelerantes foram depositados em uma quantidade de 1 uL sobre cada pedaço do substrato, sendo eles: gasolina e diesel,

gerando um total de 10 amostras que posteriormente foram extraídos por meio da técnica do ACS e SPME.



Figura 11. Substratos utilizados nos testes realizados. Da esquerda para a direita: espuma, madeira, papel jornal, tecido e plástico.

3.1.2 Queima do substrato

A ignição do substrato com o acelerante foi feita utilizando um isqueiro e a extinção das chamas foi realizada, após 30 segundos do início da ignição, utilizando o princípio do abafamento. Na extinção por abafamento, uma placa de madeira foi utilizada para bloquear a passagem do oxigênio atmosférico para a amostra. Posteriormente, a amostra sólida foi coletada para o interior de um recipiente metálico, onde um pedaço da fibra de carvão foi colocado sobre o espaço vazio do recipiente e/ou a fibra do SPME foi exposta para extração dos elementos de interesse, sem contato direto com a amostra.

3.1.3 Extração dos compostos

Para a extração dos elementos de interesse por ACS, foi utilizado uma fibra de carvão ativado empregada em exaustores de ar para filtragem de gases nocivos, conforme dispositivo mostrado na Figura 12, e foi extraído durante um tempo de 12 horas em uma estufa de 120°C, posteriormente dessorvido utilizando 2 mL de diclorometano (DCM).

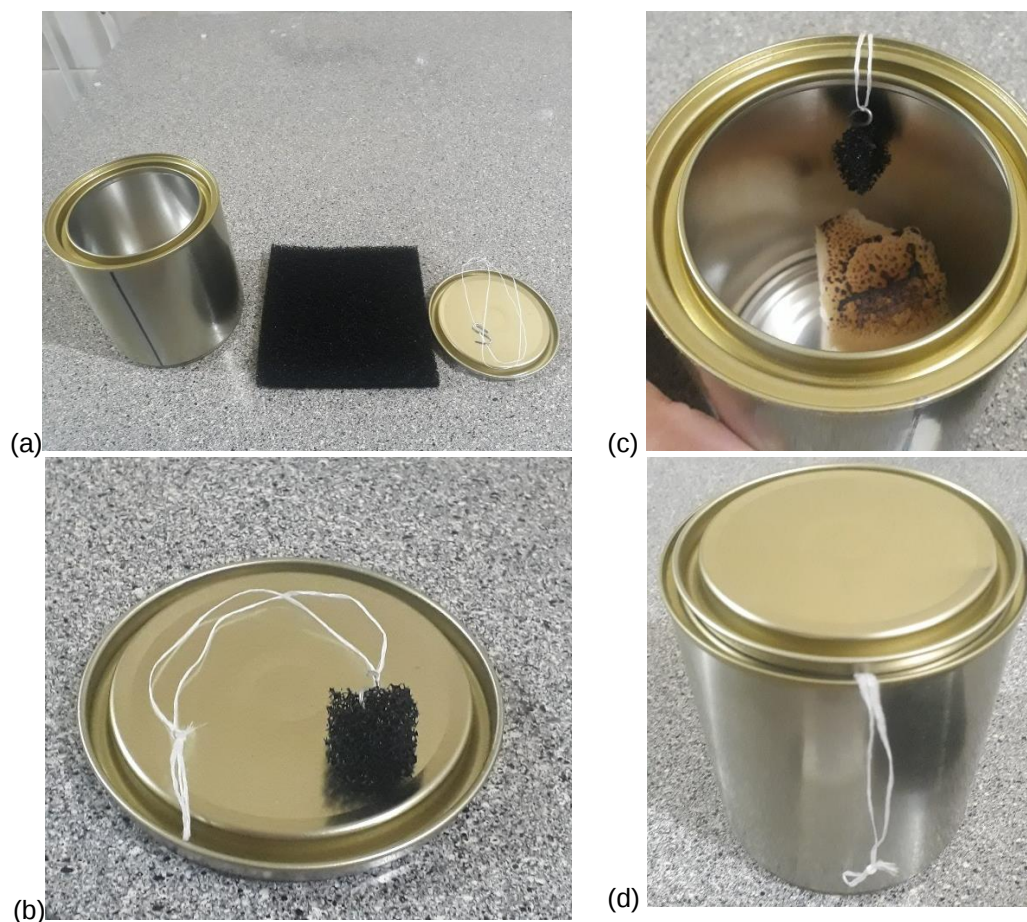


Figura 12. Dispositivo montado para extração dos voláteis oriundos da queima dos materiais. (a) materiais utilizados, (b) dispositivo de extração, (c) posicionamento do carvão ativado no interior da lata, (d) lata hermeticamente fechada com o disposição de extração.

Para a extração dos elementos de interesse por SPME, foi utilizada uma fibra mista de DVB/CAR/PMDS, a sequência metodológica é mostrada na Figura 13, onde a lata foi mantida a 70 °C por 30 minutos e em seguida a fibra foi exposta durante um tempo de 5 minutos no interior da lata, sem entrar em contato direto com a amostra, após esse tempo, foi feita a injeção da amostra no CG-MS, para isso a fibra foi exposta durante um tempo de 2 minutos na porta do aparelho que estava a 250°C.



Figura 13. Dispositivo montado para extração dos voláteis oriundos da queima dos materiais, (a) Dispositivo SPME, (b) Exposição da fibra no interior da lata, (c) injeção do SPME no CG-EM.

3.1.4 Parâmetros do equipamento

A análise dos produtos de combustão foi realizada em um cromatógrafo a gás modelo Agilent 6890N com uma coluna HP-5ms com 30 metros de comprimento, diâmetro interno: 0,25 mm, e gás portador: Hélio (pureza ultraelevada). Os parâmetros de análise por DCM utilizado para extração por ACS foram: vazão constante de 0,80 mL min⁻¹, volume de injeção: 1 mL, temperatura de injeção: 40°C, tempo de espera inicial: 3 min, taxa de aquecimento de 5 °C min⁻¹ até 150 °C e 15 °C*min⁻¹ até 300 °C, tempo final de espera: 1 min, e tempo total de execução: 36 min.

Para análise direta na fibra do SPME, os parâmetros foram: vazão constante de 0,80 mL min⁻¹, tempo de exposição da fibra: 2 min, temperatura no *inlet*: 250° C, temperatura inicial da coluna: 50°C, tempo de espera inicial: 1 min, taxa de aquecimento de 20 °C*min⁻¹ até 210°C e 30°C*min⁻¹ até 310 °C, tempo final de espera: 3 min, e tempo total de execução: 15,33 min.

3.2 ANÁLISE COMPUTACIONAL

3.2.1 Software

O *software* utilizado para realização da simulação foi o *Fire Dynamics Simulator (FDS)*. Toda simulação foi montada com base nas informações

repassadas pelo perito responsável pelo local da perícia em seu laudo investigativo e por visita *in loco*, para verificar o tipo de material existe no local. Nenhum dos dois casos estudados foi identificado, restringindo-se assim a análise do desenvolvimento do incêndio, preservando as pessoas diretamente envolvidas.

3.2.2 Parametrização do ambiente

As propriedades térmicas dos materiais foram obtidas com base no banco de dados de itens queimados criado pelo Centro Nacional de Ciência Forense (NCFS) da Universidade da Flórida Central (UCF) em parceria com o Departamento de Engenharia de Proteção contra Incêndios da Universidade de Maryland College Park e apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades térmicas utilizadas para parametrização do ambiente

Material	Calor Específico kJ/(kg.K)	Calor de Combustão kJ/kg	Condutividade W/m.k	Densidade (kg/m³)
Madeira	1,8	13.000	0,13	502
Tecido	1	15.000	0,1	100
Espuma	1	30.000	0,05	40
Tijolo	1,05		1,05	1957
Gesso	1,09		0,17	930

3.2.3 Equipamento utilizado

Para a execução da simulação foi utilizada um Desktop HP EliteOne 800, processador Core i5-4590S, 8GB RAM e HD 500GB.

3.2.4 Descrição dos casos

3.2.4.1 Estudo de Caso nº 01

Trata-se de um incêndio ocorrido no Estado do Espírito Santo no ano de 2018 que resultou na morte de duas pessoas, o caso em si não será aprofundado para

preservar o nome das vítimas e envolvidos, limitando-se aos resultados obtidos pela análise computacional, comparando com os danos encontrados no cenário do incêndio. A simulação ocorreu em um tempo de 10 minutos, tendo em vista que se buscava entender as condições alcançadas no interior de um quarto, conforme croqui apresentado na Figura 14, e confrontar com as condições encontradas pela guarnição do Corpo de Bombeiros. O tempo de 10 minutos foi definido com base na linha do tempo construída utilizando-se as imagens de uma câmera de videomonitoramento existente na região, onde entre o tempo que foi possível visualizar a saída da fumaça, até a chegada do caminhão dos bombeiros para realizar o combate ao incêndio, decorreu-se um tempo de 8 minutos.



Figura 14. Planta baixa do quarto onde ocorreu o incêndio, com destaque para os locais onde foram instalados os dispositivos para monitoramento das condições do quarto.

A geometria da estrutura, aberturas de portas e janelas para o exterior, que influenciam criticamente o crescimento e a propagação do fogo, foram feitas com base na planta baixa da edificação. O tamanho da malha computacional foi de 10 cm, tendo sido dividido em uma grade de 75 x 50 x 30 células (112.500 células no total) e o modelo de turbulência LES. A localização da fonte de ignição foi feita levando em conta a hipótese formulada pelo perito com base no depoimento da testemunha que estava no local no momento do ocorrido, que foi do incêndio ter sido iniciado no ar condicionado do quarto. Para simular a queima do ar condicionado, foram utilizados os parâmetros de queima de um televisor de 28 polegadas, que

foram obtidos experimentalmente e disponibilizados pelo Centro Nacional de Ciência Forense (NCFS), por apresentar formato, massa e constituição similar. As propriedades térmicas de paredes, teto, pisos e móveis, e o tamanho, localização foram feitos com base propriedades dos materiais existentes no banco de dados da NCFS. Toda parametrização utilizada foi baseada em estudos realizados e validados para comparar a eficiência do software com incêndios ocorridos em escala real com destaque para os estudos desenvolvidos por Barowy e Madrzykowski.³³

Conforme banco de dados do NCFS, a queima ocorrerá conforme as condições apresentadas na Tabela C.1. A base dos materiais presentes no quarto foi simplificada em 3 materiais constituintes, sendo eles: madeira, espuma de poliuretano e tecido, sendo apresenta as especificações na Tabela C.2.

As condições atingidas durante o incêndio foram monitoradas a partir de 6 dispositivos que foram instalados para monitorar a temperatura e o fluxo de calor e estão destacados na Figura 14. Os efeitos tóxicos dos produtos da combustão foram desconsiderados, uma vez que no modelo adotado levou-se em conta parâmetros simplificados da química da combustão. Com os dados obtidos, foi possível obter um perfil de temperatura, fluxo de calor do ambiente e avaliar as condições que alcançadas com o desenvolvimento do incêndio.

3.2.4.2 Estudo de Caso nº 02

Nesse estudo de caso, busca-se simular outro incêndio ocorrido no Estado do Espírito Santo no ano de 2018 que vitimou uma criança na capital do Estado. A simulação ocorreu durante um tempo de 1800 segundos (30 minutos) para tentar entender as condições alcançadas no interior da edificação, durante o desenvolvimento do incêndio e um possível cenário descrito pelo perito foi executado com as seguintes características: portas e janelas abertas, com exceção da porta de acesso ao banheiro, que permaneceu fechada após o início do incêndio, dimensões da cama e do sofá verificadas no local do ocorrido.

A parametrizações desses materiais foram obtidas com base em bibliografias que validaram esse tipo de material, utilizando-se de forma análoga as utilizadas no Estudo de Caso nº01, tendo sido dividido em uma grade de 85 x 30 x 26 (10cm) e 36 x 60 x 52 (5cm) células (178.620 células no total). Como carga de incêndio na edificação, foram consideradas apenas: uma cama de casal do tipo box, dois

colchões de casal, um cabideiro com roupas e a porta que liga o quarto ao banheiro, conforme apresentado no croqui da Figura 15. Dessa forma, o ambiente computacional simulado foi simplificado em comparação ao local do incêndio, por considerar que os colchões queimados são a principal fonte de energia liberada no incêndio, dessa forma com a maior parcela de contribuição para o incêndio ocorrido.



Figura 15. Planta baixa da edificação onde ocorreu o incêndio, com destaque para os locais onde foram instalados os dispositivos para monitoramento das condições do quarto.

Para monitorar as condições atingidas durante o incêndio, foram colocados 35 dispositivos para medir a temperatura, fluxo de calor e visibilidade no ambiente investigado, conforme esquema apresentado na Figura 15. Desses dispositivos, 15 foram posicionados na entrada da casa, nas alturas de 0,4m; 0,8m; 1,2m; 1,6m e 2,0m, 15 dispositivos na região do quarto, nas mesmas alturas, próximo a porta de entrada do ambiente, 3 no interior do banheiro em uma altura de 0,4m, 1 na porta do banheiro e 1 no sofá para monitorar a temperatura do objeto. Com os dados obtidos, foi possível obter um perfil de temperatura, fluxo de calor e visibilidade do ambiente e com isso avaliar as condições que alcançadas com o desenvolvimento do incêndio.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ANÁLISE DE ACELERANTE

4.1.1 Extração por carvão ativado (ACS)

No material suplementar foram apresentados os resultados das análises por CG/MS dos substratos espuma, tecido, papel jornal, plástico e madeira,

respectivamente, que foram queimados de forma natural, com gasolina e com diesel (Figuras C.1-C.4).

Os principais compostos químicos identificados nos cromatogramas da Figura C.1 foram numerados e sua identidade revelada na Tabela 2. A gasolina e o diesel são frações do petróleo, o primeiro contendo de 4 a 12 átomos de carbono em estrutura molecular que enquadram em três tipos gerais: parafinas (incluindo cicloparafinas e materiais ramificados), olefinas e aromáticos, sendo sua distribuição básica composta por alcanos (4 a 8%), alcenos (2 a 5%), isoalcanos (25 a 40%), cicloalcanos (3 a 7%), cicloalcenos (1 a 4%) e aromáticos (20-50%), enquanto que o segundo contem, predominantemente, mais de nove átomos de carbonos em sua constituição, constituído por hidrocarbonetos parafínicos, olefínicos e aromáticos. O óleo diesel é formulado através da mistura de diversas correntes como gasóleos, nafta pesada, diesel leve e diesel pesado, provenientes das diversas etapas de processamento do petróleo bruto.⁷¹

Tabela 2. Compostos químicos identificados como marcadores dos acelerantes de gasolina (1-8) e diesel (6, 9-14).

Rótulo	Combustível	Composto	TR (min)	Tecido	Papel	Plástico	Madeira	Espuma
1	Gasolina	Tolueno	7,0731	-	-	-	X	X
2		α -Xileno	10,0194	X	X	-	X	X
3		1-etil-2-metil-benzeno	12,9949	X	X	X	X	X
4		1, 3, 5- trimetil-benzeno	14,0609	X	X	X	X	X
5		1h-indene, 1,2,3-dihidro-5-metil	16,7543	X	X	X	X	X
6		Dodecano	18,9332 / 20,2296*	X	X	X	X	X
7		Penta-metil-benzeno	20,2830	X	X	X	X	X
8		1h-indene, 2,3-dihidro-4,7-dimetil	21,6522	X	-	X	X	X
9	Diesel	Tridecano	23,0214	X	X	X	X	X
10		Tetradecano	25,5865	X	X	X	X	X
11		Pentadecano	27,4010	X	X	X	X	X
12		Hexadecano	28,7239	X	X	X	X	X
13		Heptadecano	29,8529	X	X	X	X	X
14		Eicosane	32,1898	X	X	X	X	X

A Figura 16 traz uma sobreposição dos cromatogramas dos substratos queimados de maneira natural (linha preta), com a presença de gasolina (linha vermelha) e com a presença de diesel (linha azul). É possível perceber que quase não existe sobreposição das linhas o que demonstra o quando a separação dos

componentes se deram de maneira bastante efetiva, além disso, a ausência da linha preta quando comparada as outras linhas denota o quando os elementos de fundo, volatilizados pela queima do material, não se sobressaíram, minimizando qualquer interpretação errada quando a presença ou não de acelerante.

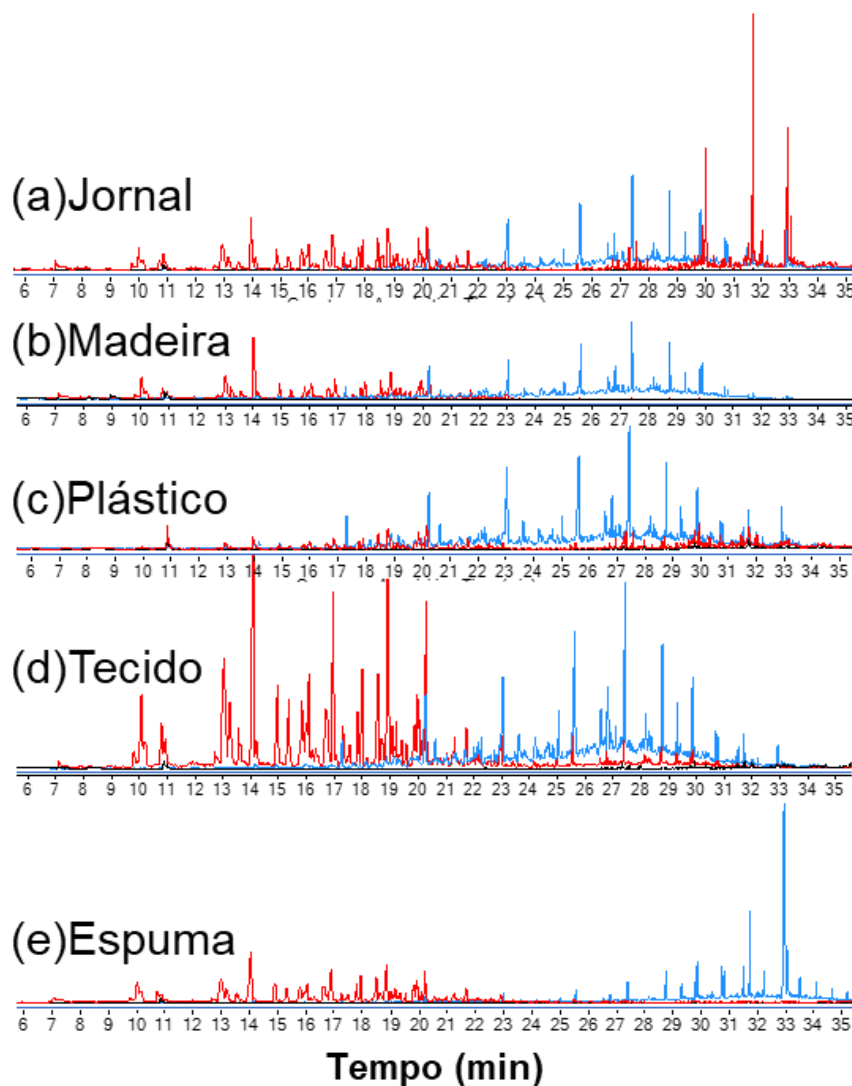


Figura 16. Cromatogramas sobrepostos da queima do substrato, em preto o substrato queimado sem a presença de acelerante, em vermelho o substrato queimado na presença de gasolina e em azul o substrato queimado na presença de diesel.

De uma maneira geral, quando comparamos à capacidade do acelerante em ser identificado, o diesel demonstrou ser melhor do que a gasolina, onde nos substratos com menor capacidade de absorção, como o plástico, jornal e o tecido sintético, sinais correspondendo a marcadores químicos do diesel (dodecano, tridecano, pentadecano, hexadecano, heptadecano e eicosano) foram facilmente identificados, sendo que os marcadores químicos da gasolina (tolueno, α -Xileno, 1-etil-2-metil-benzeno, 1, 3, 5-trimetil-benzeno, 1h-indene, 1,2,3-dihidro-5-metil,

dodecano, penta-metil-benzeno, 1h-indene, 1,2,3-dihidro-5-metil) apresentaram uma menor abundância.⁷² Isso se deve ao fato do diesel ser formado por hidrocarbonetos com maior massa molar do que o da gasolina, e dessa forma, apresentando uma temperatura de vaporização de seus componentes na faixa de 288 a 338 °C,⁷³ o que dificulta a sua perda durante a queima do substrato. Por outro lado, a gasolina, apresenta uma temperatura de vaporização de seus componentes na faixa de 14 a 135 °C.⁷⁴

Entre os materiais estudados como substrato, percebe-se que a espuma teve a melhor capacidade de conservação dos combustíveis quando comparado aos outros substratos e mesmo após 12 horas da queima, realizada com diesel, foi possível identificar os compostos químicos marcadores do combustível. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato desse material (espuma de poliuretano) apresentar uma menor densidade ($0,02 \text{ g.cm}^{-3}$) em relação aos demais (madeira: $0,49 \text{ g.cm}^{-3}$; polietileno: $1,35 \text{ g.cm}^{-3}$; papel-jornal: $0,93 \text{ g.cm}^{-3}$; poliamida: $1,13 \text{ g.cm}^{-3}$).⁶¹ Como consequência dessa propriedade, sua elevada porosidade confere a espuma de PU uma alta capacidade de absorção de líquidos, fazendo com que a substância fique retida em seu interior o que acaba inibindo-a da combustão durante um período maior.⁶¹ Por outro lado, o polietileno demonstrou ter uma pior capacidade de conservação de combustível, devido ao fato de suas características de impermeabilidade, limitando o acelerante a permanecer em sua superfície. Além disso, o elevado potencial calorífico do plástico (44 MJ kg^{-1}), comparado aos outros materiais (madeira: 19 MJ kg^{-1} , papel-jornal: 17 MJ kg^{-1} , poliuretano: 23 MJ kg^{-1} , e poliamida: 32 MJ kg^{-1})⁷⁵ faz com que a reação de combustão se desenvolva de maneira mais rápida, levando ao consumo do acelerante e dificultando sua posterior identificação.

A Tabela 3 apresenta a porcentagem de similaridade para cada composto-alvo identificado na queima dos substratos com o acelerante, onde em todos os casos, o valor foi superior a 80 %. Entre os substratos utilizados, é possível perceber que a similaridade dos compostos-alvo foram maiores na espuma (>89%), devido a maior abundância desses componentes, o que facilita assim, uma maior área cromatográfica detectada para cada composto e como consequência uma melhor qualidade no espectro de EI-MS produzido.

Tabela 3. Porcentagem de similaridade de cada composto-alvo identificado nos substratos.

Substrato	Compostos-alvo (Gasolina)	Similaridade (%)	Compostos-alvo (Diesel)	Similaridade (%)
Tecido	α -Xileno	80	Dodecano	97
	1-etil-2-metil-benzeno	82	Tridecano	98
	1, 3, 5- trimetil-benzeno	83	Tetradecano	95
	1h-indene, 1,2,3-dihidro-5-metil	82	Pentadecano	89
	Dodecano	95	Hexadecano	82
	Penta-metil-benzeno	81	Heptadecano	83
	1h-indene, 2,3-dihidro-4,7-dimetil	89	Eicosane	82
Papel	α -Xileno	93	Dodecano	93
	1-etil-2-metil-benzeno	97	Tridecano	97
	1, 3, 5- trimetil-benzeno	80	Tetradecano	98
	1h-indene, 1,2,3-dihidro-5-metil	82	Pentadecano	95
	Dodecano	83	Hexadecano	99
	Penta-metil-benzeno	82	Heptadecano	95
	-	81	Eicosane	81
Plastico	1-etil-2-metil-benzeno	89	Dodecano	89
	1, 3, 5- trimetil-benzeno	93	Tridecano	93
	1h-indene, 1,2,3-dihidro-5-metil	85	Tetradecano	87
	Dodecano	80	Pentadecano	82
	Penta-metil-benzeno	82	Hexadecano	83
	1h-indene, 2,3-dihidro-4,7-dimetil	83	Heptadecano	82
	-		Eicosane	
Madeira	Tolueno	93	Dodecano	82
	α -Xileno	98	Tridecano	80
	1-etil-2-metil-benzeno	95	Tetradecano	80
	1, 3, 5- trimetil-benzeno	99	Pentadecano	82
	1h-indene, 1,2,3-dihidro-5-metil	95	Hexadecano	83
	Dodecano	81	Heptadecano	82
	Penta-metil-benzeno	89	Eicosane	80
Espuma	1h-indene, 2,3-dihidro-4,7-dimetil	93	-	
	Tolueno	97	Dodecano	97
	α -Xileno	98	Tridecano	98
	1-etil-2-metil-benzeno	95	Tetradecano	95
	1, 3, 5- trimetil-benzeno	99	Pentadecano	99
	1h-indene, 1,2,3-dihidro-5-metil	98	Hexadecano	95
	Dodecano	95	Heptadecano	93
	Penta-metil-benzeno	90	Eicosane	89
	1h-indene, 2,3-dihidro-4,7-dimetil	89	-	

Analisando a literatura, não foram encontrados trabalhos avaliando a capacidade de absorção e a taxa de evaporação de combustível nesses substratos, limitando-se a estudar a interferência causada pela queima do substrato na identificação do agente acelerante. Destacamos o trabalho de Stauffer e colaboradores,²⁴ que em 2007, perceberam que os detergentes de lavar louça, por vezes utilizados como alternativa de espumas comerciais pelo pessoal que trabalha com a atividade combate a incêndios, apresentam em sua composição química moléculas de tolueno, etilbenzeno, xilenos, indano, naftaleno e naftalenos mono-substituído e padrões de alquilbenzenos lineares semelhantes ao padrão de alcanos em um destilado de petróleo. Esses compostos são, portanto, moléculas marcadores para a detecção de líquidos inflamáveis.

Já em 2016, nos trabalhos desenvolvidos por Visotin e Lennard,¹⁹ a gasolina foi corretamente identificada nas amostras de detritos de incêndio em tapetes de lã, telhas cerâmicas e queima de assoalho de madeira. Entretanto, para a amostra de tapete sintético, existiu uma interferência dos produtos de pirólise. Entre eles, o estireno era composto mais abundante dentro do cromatograma.

Em relação à capacidade do fundo em interferir na identificação dos acelerantes, observa-se que em todos os substratos foi possível realizar a identificação do acelerante. No entanto, a queima do substrato do tipo tecido e madeira, apresentou uma elevada quantidade de outras substâncias observadas cromatograma, como ácido 2-propanoico butil éster ($t_R = 10,84$ min) e fenol, 2,4-bis 1,1-dimetiletil ($t_R = 27,54$ min), o que pode prejudicar a identificação caso o tempo de coleta do substrato com o acelerante seja mais elevado, diminuindo assim, a quantidade de combustível recuperado no processo de extração.

4.1.2 Microextração em fase sólida (SPME)

De maneira semelhante ao realizado na extração por ACS, os principais compostos químicos identificados nos cromatogramas da Figura C.2 foram numerados e sua identidade revelada na Tabela 4.

Tabela 4. Compostos químicos identificados como marcadores dos acelerantes de gasolina (1-8) e diesel (6, 9-14).

Rótulo	Combustível	Composto	TR (min)	Tecido	Papel	Plástico	Madeira	Espuma
1	Gasolina	Tolueno	1,9292	X	X	X	X	X
2		α -Xileno	2,7226	X	X	X	X	X
3		1-etil-2-metil-benzeno	3,5388	X	X	X	X	X
4		1, 3, 5- trimetil-benzeno	3,8262	X	X	X	X	X
5		1h-indene, 1,2,3-dihidro-5-metil	4,2071	X	X	X	X	X
6		Dodecano	5,5172/ 5,5195*	X	X	X	X	X
7		Penta-metil-benzeno	5,5463	X	X	X	X	X
8		1h-indene, 2,3-dihidro-4,7-dimetil	5,9593	X	X	X	X	X
9	Diesel	Tridecano	6,2646	X	X	X	X	X
10		Tetradecano	6,9598	X	X	X	X	X
11		Pentadecano	7,6152	X	X	X	X	X
12		Hexadecano	8,2342	X	X	X	X	X
13		Heptadecano	8,8210	X	X	X	X	X
14		Eicosane	-	-	-	-	-	-

Comparando a Tabela 3 a Tabela 1, observa-se que em todos os substratos queimados foi possível a identificação dos componentes presentes na gasolina e apenas o Eicosane, presente no diesel, não foi identificável nos picos resultantes, tendo em vista a elevada taxa de aumento de temperatura utilizada no método, que pode ter levado a saída da substância sem a separação total das outras substâncias presentes no diesel.

No material suplementar foram apresentados os resultados das análises por CG/EM dos substratos espuma, tecido, papel jornal, plástico e madeira, respectivamente, que foram queimados de forma natural, com gasolina e com diesel (Figuras C.1-C.4). Diferente da metodologia utilizada na análise pela extração por ACS, na análise por SPME os compostos tiveram uma menor faixa do tempo de retenção, o que não prejudicou a identificação dos picos de maneira isolada.

A Figura 17 traz uma sobreposição dos cromatogramas dos substratos queimados de maneira natural (linha preta), com a presença de gasolina (linha vermelha) e com a presença de diesel (linha azul). Devido ao rápido aumento da temperatura escolhido a partir da otimização do método apresentado nos trabalhos de Fettig,⁴⁸ ao sobrepor aos cromatogramas, observa-se uma sobreposição nos picos oriundos da gasolina e do diesel, o que pode dificultar a identificação correta dos componentes de cada acelerante.

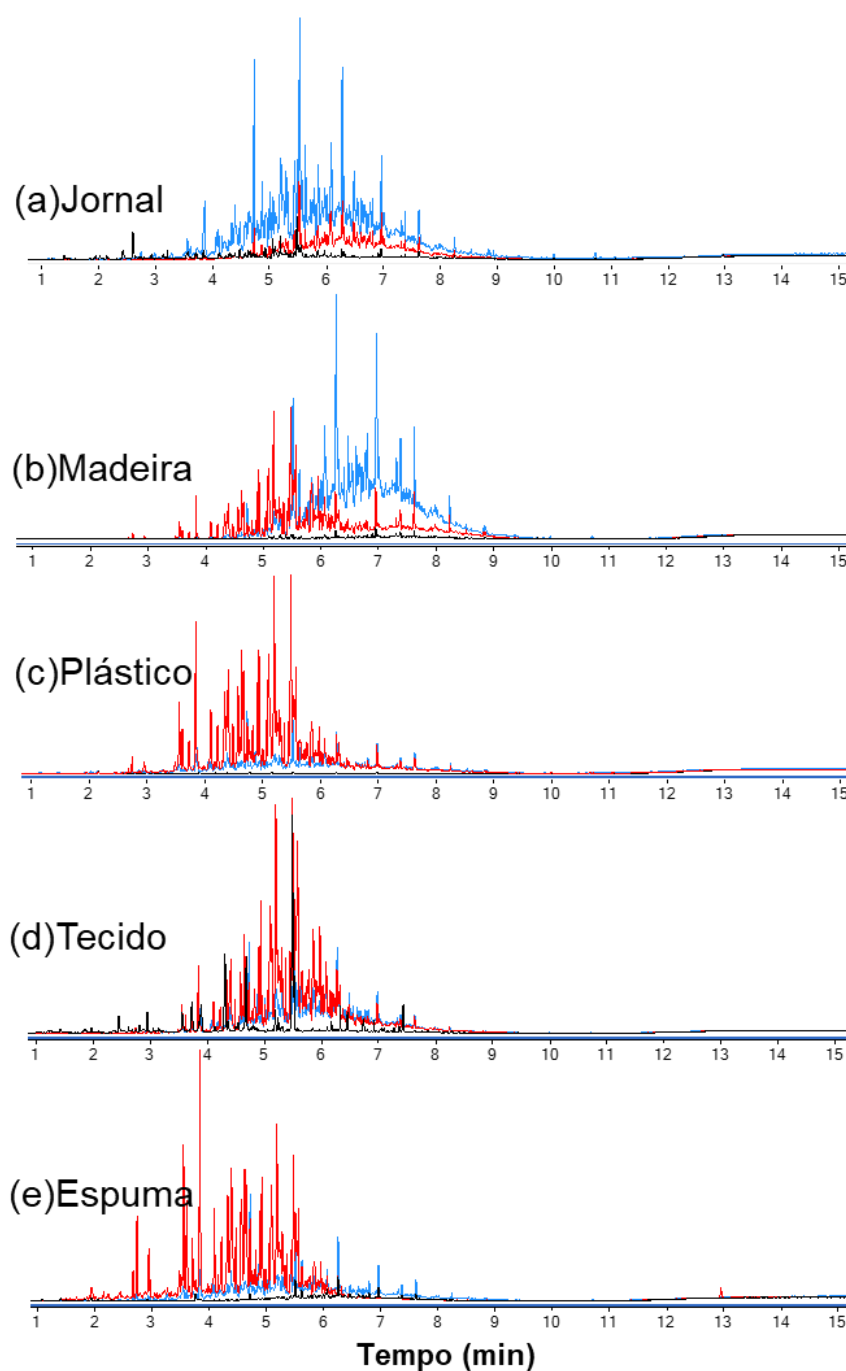


Figura 17. Cromatogramas sobrepostos da queima do substrato, em preto o substrato queimado sem a presença de acelerante, em vermelho o substrato queimado na presença de gasolina e em azul o substrato queimado na presença de diesel.

A Tabela 5 apresenta a porcentagem de similaridade para cada composto-alvo identificado na queima dos substratos com o acelerante, onde em todos os casos, assim como na análise realizada por ACS, o valor foi superior a 80 %. Entre os substratos utilizados, é possível perceber que a similaridade dos compostos-alvo, manteve-se maior na espuma (>89%), devido a maior abundância desses componentes, o que facilita assim, uma maior área cromatográfica detectada para

cada composto e como consequência uma melhor qualidade no espectro de EI-MS produzido.

Tabela 5. Porcentagem de similaridade de cada composto-alvo identificado nos substratos.

Substrato	Compostos-alvo (Gasolina)	Similaridade (%)	Compostos-alvo (Diesel)	Similaridade (%)
Tecido	Tolueno	86	Dodecano	97
	α -Xileno	88	Tridecano	99
	1-etil-2-metil-benzeno	91	Tetradecano	97
	1, 3, 5- trimetil-benzeno	94	Pentadecano	92
	1h-indene, 1,2,3-dihidro-5-metil	82	Hexadecano	85
	Dodecano	95	Heptadecano	87
	Penta-metil-benzeno	90	Eicosane	-
	1h-indene, 2,3-dihidro-4,7-dimetil	91	-	-
Papel	Tolueno	83	Dodecano	93
	α -Xileno	94	Tridecano	97
	1-etil-2-metil-benzeno	97	Tetradecano	98
	1, 3, 5- trimetil-benzeno	82	Pentadecano	95
	1h-indene, 1,2,3-dihidro-5-metil	87	Hexadecano	99
	Dodecano	85	Heptadecano	95
	Penta-metil-benzeno	84	Eicosane	-
	1h-indene, 2,3-dihidro-4,7-dimetil	87	-	-
Plastico	Tolueno	85	Dodecano	89
	α -Xileno	95	Tridecano	93
	1-etil-2-metil-benzeno	91	Tetradecano	87
	1, 3, 5- trimetil-benzeno	93	Pentadecano	83
	1h-indene, 1,2,3-dihidro-5-metil	87	Hexadecano	89
	Dodecano	84	Heptadecano	82
	Penta-metil-benzeno	85	Eicosane	-
	1h-indene, 2,3-dihidro-4,7-dimetil	87	-	-
Madeira	Tolueno	93	Dodecano	82
	α -Xileno	98	Tridecano	84
	1-etil-2-metil-benzeno	95	Tetradecano	85
	1, 3, 5- trimetil-benzeno	99	Pentadecano	88
	1h-indene, 1,2,3-dihidro-5-metil	95	Hexadecano	85
	Dodecano	81	Heptadecano	87
	Penta-metil-benzeno	89	Eicosane	-
	1h-indene, 2,3-dihidro-4,7-dimetil	93	-	-
Espuma	Tolueno	97	Dodecano	97
	α -Xileno	98	Tridecano	98
	1-etil-2-metil-benzeno	97	Tetradecano	95

1, 3, 5- trimetil-benzeno	99	Pentadecano	99
1h-indene, 1,2,3-dihidro-5-metil	98	Hexadecano	95
Dodecano	98	Heptadecano	95
Penta-metil-benzeno	93	Eicosane	-
1h-indene, 2,3-dihidro-4,7-dimetil	94	-	-

Comparando a Tabela 5 e Tabela 3, observa-se em termos absolutos uma maior similaridade nos compostos-alvo identificados por meio da extração por SPME, o que demonstra a capacidade da fibra utilizada para análise em manter a identidade na extração, permitindo que o espectrômetro de massas identifique de maneira mais precisa ao utilizar-se o bando de dados da NIST como comparação.

4.2 ANÁLISE COMPUTACIONAL

4.2.1 Estudo de Caso 1

Foram feitos alguns apontamentos baseados nos efeitos da temperatura e fluxo de calor observado pelo incêndio que evoluiu partindo da região do ar condicionado e se espalhando pelo colchão da cama superior, que foi a hipótese testada para a ocorrência do incêndio.

Na simulação, foi instalado um dispositivo para que a janela abrisse ao atingir a temperatura de 200°C, como se houvesse acontecido à quebra, temperatura essa encontrada na literatura nos trabalhos desenvolvidos por Babrauskas.⁷⁶ No tempo de 60 segundos, iniciou-se a queima do colchão da cama superior pelos efeitos do incêndio iniciado no ar condicionado. No tempo de 244 segundos, houve a ignição da escrivaninha e no tempo de 330 segundos, ocorreu o incêndio no colchão da cama inferior.

A Figura 18 demonstra as imagens do ambiente real e do simulado ou virtual obtida a partir do *software* FDS. Considerando que o ambiente ventilado traz melhores condições de propagação para o incêndio, as conclusões extraídas nesse tipo de ambiente podem ser generalizadas para ambientes que apresentam condições mais desfavoráveis de ocorrer o desenvolvimento do incêndio.

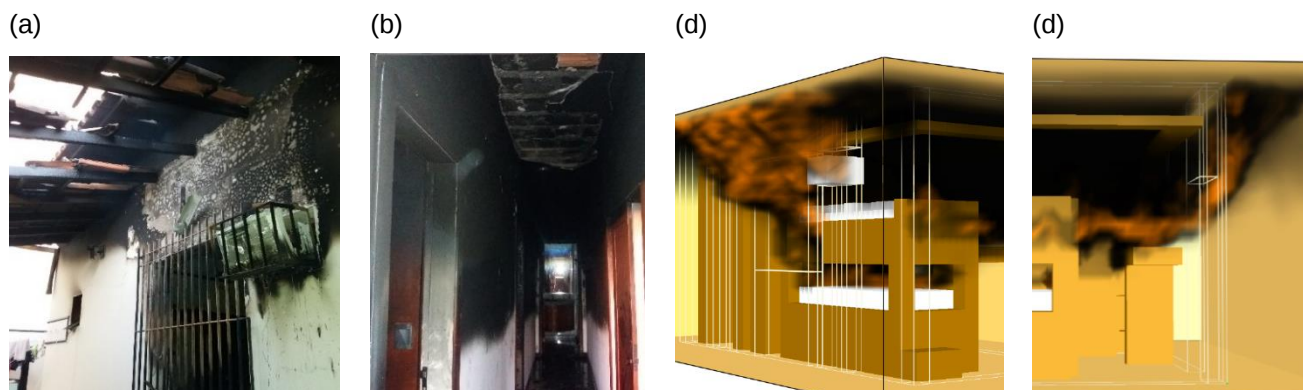


Figura 18. Comparativo com o cenário real do incêndio(A) e (B) com o cenário virtual (C) e (D).

Na Figura 18a observa-se um grande dano ocorrido na região externa à janela do quarto, onde por meio da simulação computacional apresentada na Figura 18c, é possível perceber a grande incidência das chamas na região externa na parede da janela, justificando o alto grau de destruição. Na Figura 18b observa-se um grande dano ocorrido no teto na saída do quarto onde se iniciou o incêndio, e por meio da simulação representada na Figura 18d, é possível notar uma grande incidência das chamas na região do teto.

A Figura 19 faz um comparativo entre a exposição sofrida na região do guarda-roupa e prateleiras, por meio da simulação computacional (b) com os danos encontrados no cenário investigado (a) e (c). Apesar da temperatura que atingiu a parte externa do guarda-roupa chegar a $909\text{ }^{\circ}\text{C}$ ser compatível com a carbonização completa da região⁷⁷ convém salientar a baixa condutividade térmica desse tipo de material que varia entre $0,055$ a $0,28\text{ W m}^{-1}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$,¹² dependendo do tipo de madeira, corroborando ainda mais para uma preservação da parte interior, o que não foram constatados na Figura 19, com um profundo grau de carbonização. Um tempo maior de exposição seria necessário contendo um alto nível de fluxo de calor, para que assim, conseguisse o consumo completo desse tipo de material. Isso também foi perceptível visualmente pela simulação, onde a primeira camada das células de madeira compreendida pela região mais externa, não foi consumida com o incêndio.

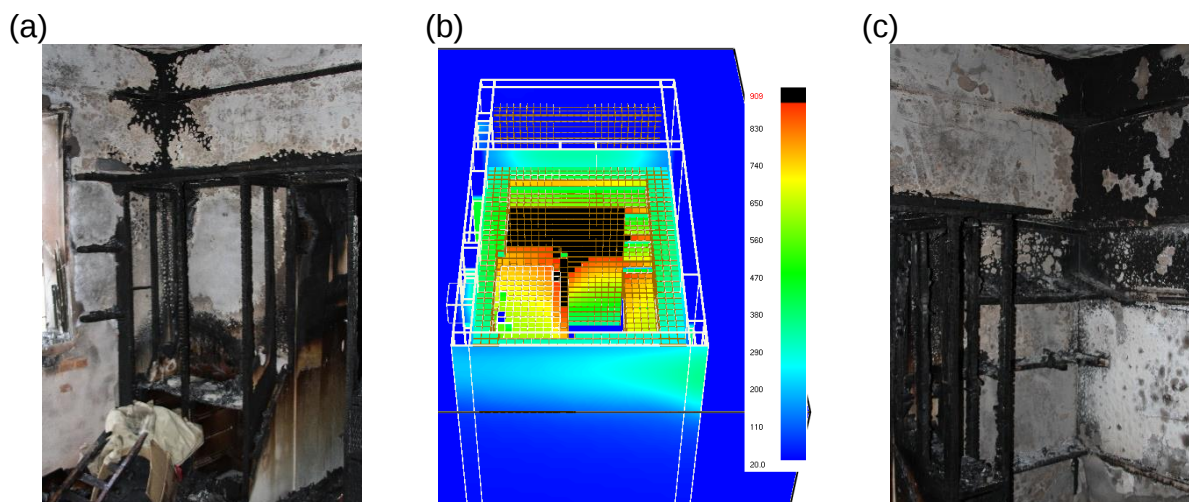


Figura 19. ($t = 407s$) - Momento no qual a maior região do guarda-roupa foi exposta a temperatura de 909 °C. (a) Danos ocorridos na região do guarda-roupas. (b) Simulação mostrando a região do guarda-roupas e prateleiras, demarcando o local (cor preta) com a maior temperatura atingida (c) Danos ocorridos na região das prateleiras em virtude do incêndio.

Além disso, os incêndios envolvem reagentes, geralmente combustível e ar, não misturados completamente em nível molecular antes da combustão. Normalmente, o combustível está no estado sólido ou líquido, portanto, a transferência de material através de um limite de fase (mudança de fase) também deve ocorrer. O combustível vaporizado deve combinar com o oxigênio do ar para formar uma mistura inflamável que, quando inflamada, forma a zona da chama. Na maioria dos incêndios, essa mistura de vapor de combustível e oxigênio ocorre principalmente por difusão e leva mais tempo em ordem de magnitude do que em uma reação química. Portanto, a difusão de espécies é o principal processo de controle durante esse comportamento de queima.⁶¹

A Figura 20 demonstra como ocorreu a variação da temperatura e do fluxo de calor ao longo do incêndio, em um termopar fixado na região da escrivaninha na entrada do quarto incendiado. Conforme os parâmetros estabelecidos por Braga (2010)⁶³ e por Figueroa e Moraes (2009)⁷⁷, percebe-se que:

- 01) Os gases oriundos da pirólise da madeira da escrivaninha entraram em ignição em aproximadamente 260 segundos, tendo em vista o fluxo de calor nesse tempo encontrar-se em aproximadamente 13 kW m⁻²;
- 02) No tempo de aproximadamente 320 segundos observou-se a maior temperatura e fluxo de calor registrado nos termopares instalados sobre a escrivaninha. Atingindo um valor de 830 °C de temperatura e 33,5 kW m⁻² de fluxo de calor, no entanto,

ambos se mantiveram por pouco tempo, tendo como consequência em virtude do fluxo de calor a ignição espontânea da madeira (sem a necessidade da presença do contato da chama). A temperatura é compatível com a carbonização da madeira, porém, isso só seria perceptível na camada exterior do móvel devido ao pouco tempo que se manteve a essa temperatura, não sendo suficiente para a queima completa;

03) Menos de 2 segundos após atingir o fluxo de calor máximo, o fluxo de calor caiu para a metade de seu valor e 8 segundos depois, para um terço do valor máximo, sendo esse valor suficiente para pirolisar o material combustível da escrivaninha.

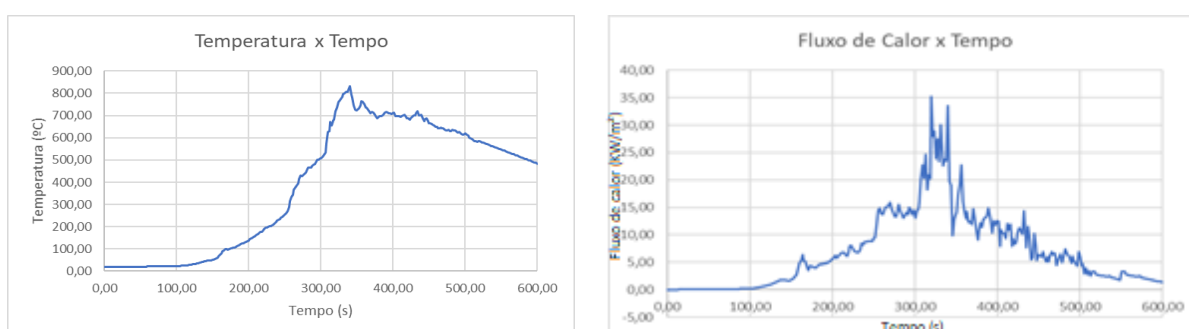


Figura 20. Variação da temperatura e do fluxo de calor do tempo da escrivaninha ao longo do tempo.

A Figura 21 apresenta duas lâminas de monitoramento de temperatura que foram posicionadas, sendo uma com visão da região mais próxima ao beliche para parte interna do quarto (a) e outra com a visão da região da porta de acesso para o interior do quarto. A região de cor preta mostra a região do cômodo no qual a temperatura ainda proporciona condição de permanência de uma pessoa. Em relação às condições de vida no interior do quarto, com base na temperatura monitorada, observa-se que em um tempo de aproximadamente 6 minutos após o início do incêndio, ainda existe uma região no interior do cômodo onde a temperatura permitiria a presença de uma pessoa.

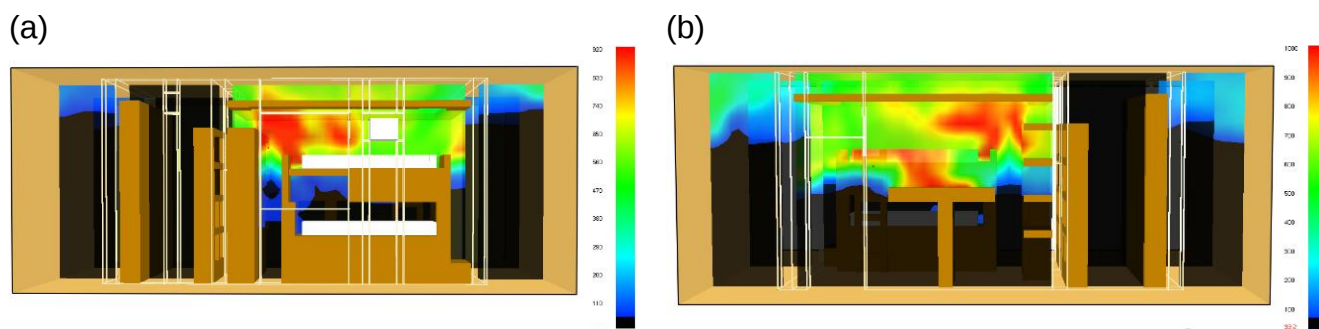


Figura 21. (T= 330s) – Vista Posterior e Frontal – Temperatura de 40 °C na região da cama de inferior e abaixo da escrivaninha (região preta). (a) Corte feito da região próxima a casa. (b) Corte realizado na entrada do quarto.

Não se podem desconsiderar os efeitos do fluxo de calor presentes em decorrência do incêndio que está em desenvolvimento, que apesar da temperatura na região demonstrar no tempo de 330 segundos é perfeitamente possível uma pessoa permanecer nessa região, o fluxo de calor poderia não permitir. Levando-se isso em conta, nesse mesmo tempo registrado pelo termopar da escrivaninha, teve-se um fluxo de calor incompatível com a presença de uma pessoa no interior do ambiente. No entanto, no tempo de 230 segundos, é compatível em ter uma pessoa nessa região do quarto, devido à temperatura e o fluxo de calor serem compatíveis com os limites estabelecidos pelos trabalhos de Braga (2010).⁶³ Na Tabela 05 foi apresentado um resumo de todos os fenômenos observados no cenário de incêndio com o resultado da simulação caso o incêndio tivesse desenvolvido de maneira natural, sem a utilização de um agente acelerante.

A Tabela 6 traz um resumo dos fenômenos que foram observados na simulação e comparados com o observado no ambiente estudado.

Tabela 6. Resumo dos fenômenos verificados com a simulação com o FDS e constatados no local do incêndio.

FENÔMENO	NO LOCAL	NA SIMULAÇÃO (FDS)
Destruição da Escrivaninha	Total	Parcial
Danos no Guarda Roupa	Total	Parcial
Queima do Colchão	Total	Parcial
Condição de Entrada no Ambiente (Sem visibilidade)	Adentrou sem causar queimaduras	Causaria queimadura de 2º grau
Condição de Vida do Interior do ambiente	Vítimas Fatais que não se movimentaram	Condições de sobreviver no colchão inferior até 4 minutos

Observa-se que no ambiente estudado, a destruição da escrivaninha, os danos no guarda roupa e a queima do colchão da cama superior ocorreram de maneira completa no tempo necessário para a chegada do Corpo de Bombeiros (aproximadamente 10 minutos), contrario do que foi observado na simulação computacional, onde os danos demonstrados no tempo de simulação, deu-se de maneira parcial nesse mesmo tempo, condizendo que para ocorrer os referidos danos necessitaria de um agente acelerador. Além disso, monitorada as condições de entrada e vida no interior do ambiente, observa-se pela simulação, que as condições para adentrar no ambiente causariam queimaduras de 2º grau em uma

pessoa que tentasse adentrar esse ambiente, assim como uma pessoa que estivesse nesse ambiente, teria condições de sobreviver na parte inferior do ambiente (mais próxima ao solo), até um tempo de 4 minutos. O que foi observado de maneira diferente no local, onde a pessoa que relatou ter adentrado no local não apresentou nenhuma queimadura. Além disso, as vítimas existentes no interior do cômodo, não apresentaram nenhuma reação de tentativa de fuga do incêndio, contrapondo o levantamento realizado das condições de vida pela simulação computacional.

4.2.2 Estudo de caso 2

Foram feitos alguns apontamentos baseados nos efeitos da temperatura, fluxo de calor e visibilidade decorrentes do incêndio que se iniciou no colchão do quarto por meio da utilização de um dispositivo de acendimento do tipo isqueiro, que foi a hipótese testada para a ocorrência do incêndio.

Na Figura 22 demonstra os danos ocorridos no ambiente estudado (a) e (c) e traz o ambiente construído no *software* FDS. É possível perceber a complexidade do ambiente estudado devido a sua grande carga incêndio, onde no ambiente simulado foi simplificado, concentrando toda observação pela queima dos colchões e roupas existentes no quarto e no sofá que existia na sala.

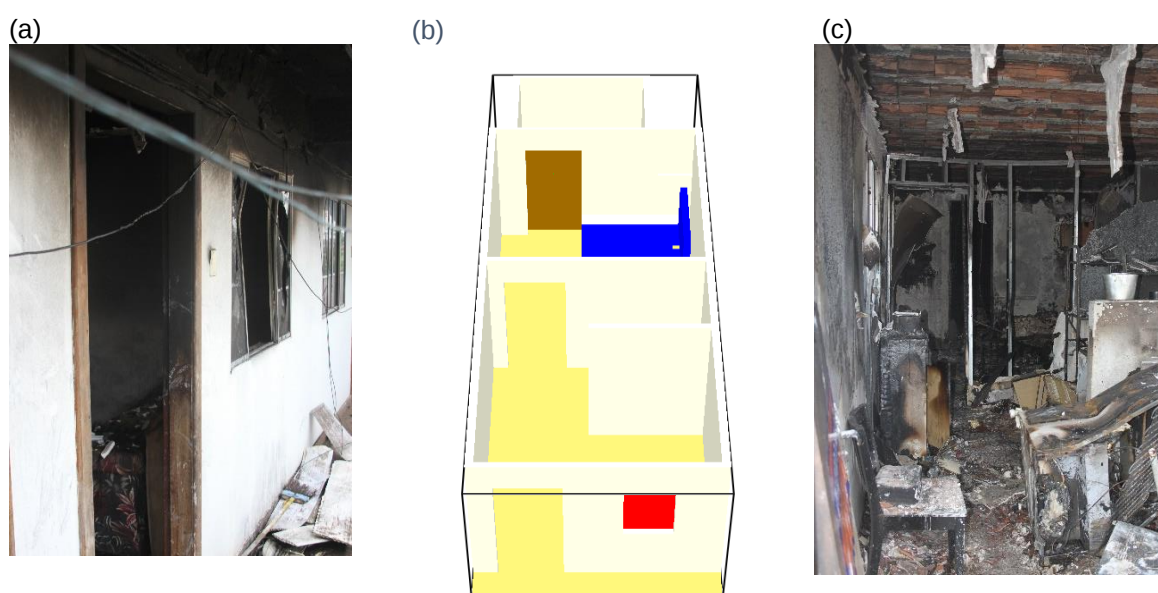


Figura 22. Comparativo do ambiente real com o ambiente simulado. (a) Porta de entrada do ambiente sinistrado, (b) Ambiente virtual construído com base nas dimensões e informações do ambiente, (c) Visão da entrada da edificação demonstrando os danos oriundos do incêndio ocorrido.

Na Figura 23a foi apresentada a temperatura monitorada no interior do quarto ao longo do desenvolvimento do incêndio. Com base nos estudos realizado por Braga (2010)⁶³, identificou-se que a temperatura limite que um ser humano suportaria no interior do ambiente fica em torno de 50°C, portanto, foi utilizado esse valor para definir como condição inadequada para entrada e permanência de uma pessoa na região. Foram também apresentados os dados referentes à região interna do quarto onde se originou o incêndio, sendo os valores monitorados nas alturas de 0,4; 0,8; 1,2; 1,6 e 2,0 m, traçando-se dessa maneira um perfil das condições alcançadas com o desenvolvimento do incêndio. Com base na Figura 23a, observa-se que essa temperatura na altura de 2,0m foi atingida no tempo de 77 segundos; na altura de 1,6m no tempo de 103 segundos; na altura de 1,2m no tempo de 112 segundos; na altura de 0,8m no tempo de 146 segundos e na altura de 0,4m no tempo de 202 segundos.

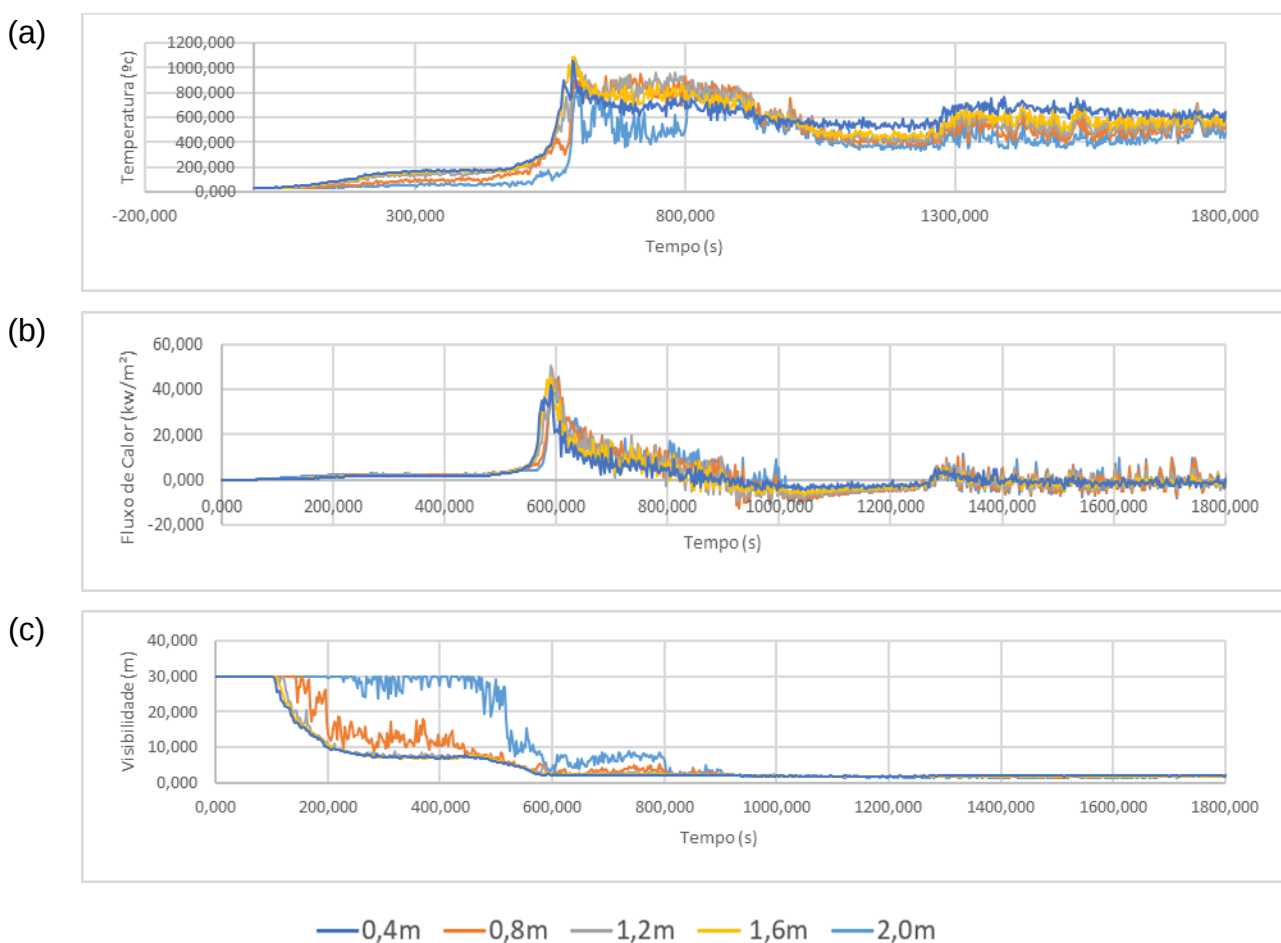


Figura 23. Variação dos parâmetros monitorados no interior do quarto.

Na Figura 23b foi apresentada o fluxo de calor monitorado no interior do quarto. Com base nos estudos realizado por Braga (2010)⁶³, identificou-se que o fluxo de calor limite que um ser humano suportaria no interior do ambiente fica em torno de $4,5 \text{ kW m}^{-2}$, portanto, foi utilizado esse valor para definir como condição inadequada para entrada e permanência de uma pessoa no interior do recinto. Observa-se que esse fluxo de calor na altura de 2,0m foi atingida no tempo de 540 segundos; na altura de 1,6m no tempo de 532 segundos; na altura de 1,2m no tempo de 530 segundos; na altura de 0,8m no tempo de 532 segundos e na altura de 0,4m no tempo de 568 segundos.

Na Figura 23c foi apresentada a visibilidade monitorada no interior do quarto. Os valores foram normalizados para uma distância de 30m, entendendo-se como a visibilidade máxima que uma pessoa consegue atingir. À medida que o incêndio se propaga, em decorrência do acúmulo da fumaça no interior da edificação, esse parâmetro foi alterando, aproximando-se do valor 0m que corresponde a nenhuma visibilidade do ambiente monitorado. Observa-se que a visibilidade atingiu um valor correspondente a 50% da sua capacidade na altura de 2,0m no tempo de 160 segundos; na altura de 1,6m no tempo de 163 segundos; na altura de 1,2m no tempo de 168 segundos; na altura de 0,8m no tempo de 208 segundos e na altura de 0,4m no tempo de 520 segundos. A visibilidade de 10% foi atingida, na altura de 2,0m, no tempo de 564 segundos; na altura de 1,6m no tempo de 566 segundos; na altura de 1,2m no tempo de 571 segundos; na altura de 0,8m no tempo de 590 segundos e na altura de 0,4m no tempo de 804 segundos.

Na Figura 24 foram apresentados os dados referentes a região externa do quarto, sendo posicionados os dispositivos para medição na região da entrada da edificação, onde os valores monitorados nas alturas de 0,4m; 0,8m; 1,2m; 1,6m e 2,0m, possibilitaram que fosse traçando um perfil das condições alcançadas com o desenvolvimento do incêndio.

Na Figura 24a foi apresentada a temperatura monitorada na entrada da edificação. Observa-se que a temperatura limite suportada pelo ser humano na altura de 2,0m foi atingida no tempo de 130 segundos; na altura de 1,6m no tempo de 149 segundos; na altura de 1,2m no tempo de 196 segundos; na altura de 0,8m no tempo de 523 segundos e na altura de 0,4m no tempo de 573 segundos.

Na Figura 24b foi apresentada o fluxo de calor monitorada na entrada da edificação. Observa-se que o fluxo de calor limite suportado pelo ser humano na

altura de 2,0m foi atingida no tempo de 573 segundos; na altura de 1,6m no tempo de 578 segundos; na altura de 1,2m no tempo de 581 segundos; na altura de 0,8m no tempo de 590 segundos e na altura de 0,4m no tempo de 605 segundos.

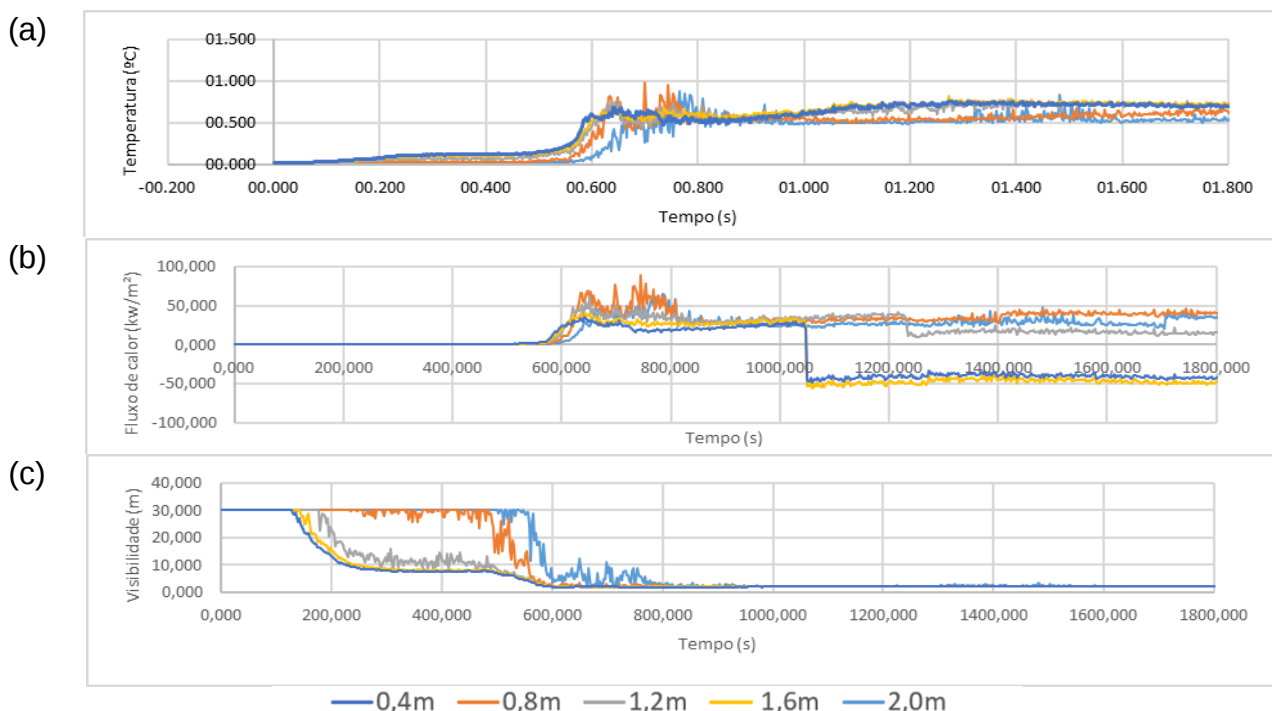


Figura 24. Variação dos parâmetros monitorados na entrada da residência.

Na Figura 24c foi apresentada a visibilidade monitorada na entrada da edificação. Observa-se que a visibilidade atingiu um valor correspondente a 50% da sua capacidade na altura de 2,0m foi atingida no tempo de 185 segundos; na altura de 1,6m no tempo de 201 segundos; na altura de 1,2m no tempo de 226 segundos; na altura de 0,8m no tempo de 523 segundos e na altura de 0,4m no tempo de 561 segundos. A visibilidade 10% foi atingida, na altura de 2,0m, no tempo de 571 segundos; na altura de 1,6m no tempo de 578 segundos; na altura de 1,2m no tempo de 578 segundos; na altura de 0,8m no tempo de 585 segundos e na altura de 0,4m no tempo de 619 segundos.

Em relação aos danos observados, foi monitorada a degradação ocorrida no colchão no qual foi iniciado o incêndio, na porta que do acesso ao banheiro e no sofá existente na região próxima à entrada da edificação, com base na observação visual da simulação realizada. Em relação aos danos do colchão no qual se iniciou o incêndio, observa-se que em um tempo de 994 segundos após o início da simulação, ocorreu sua total degradação. Em relação ao sofá, observa-se que sua degradação foi iniciada em um tempo de aproximadamente 600 segundos,

acentuando-se em um tempo de 750 segundos de simulação. Em relação a porta de entrada do banheiro, observa-se que sua queima iniciou no tempo de aproximadamente 1200 segundos, que sua região onde iniciou a sua degradação corresponde a região superior, ao lado direito de dentro do quarto para a região do banheiro, conforme Figura 25.

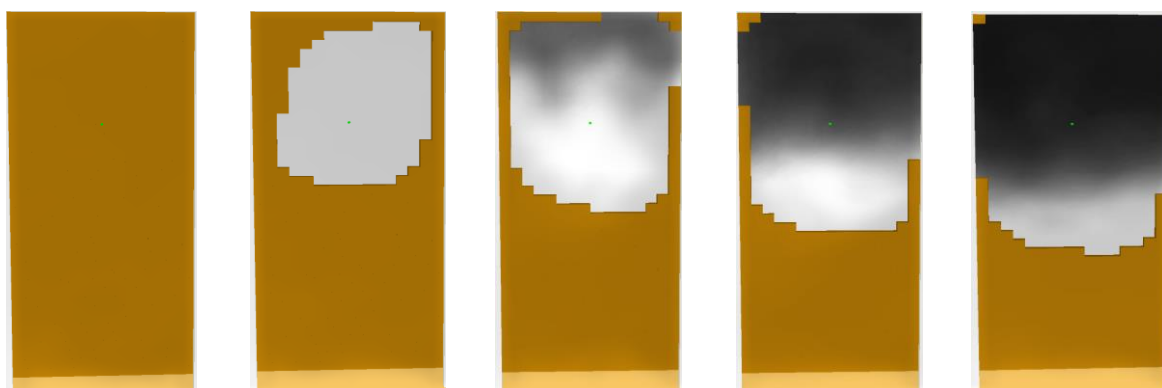


Figura 25. Sentido de degradação da porta de entrada do banheiro.

Para subsidiar essa análise da degradação da porta do banheiro, foram monitorados a temperatura, fluxo de calor e visibilidade do interior do banheiro a uma altura de 0,4m. Os valores obtidos foram plotados nas Figuras 26 (a, b e c) e analisados utilizando as premissas anteriormente empregada. Conforme observado, no tempo de 1270 segundos, foi observado um valor de temperatura de 50°C e fluxo de calor de $4,5\text{ kW/m}^2$, que impossibilita a permanência de uma pessoa no ambiente, no tempo de 1277 segundos, um decréscimo de 50% da visibilidade e no tempo de 1277 segundos, visibilidade próximo ao valor de 0 no interior do banheiro.

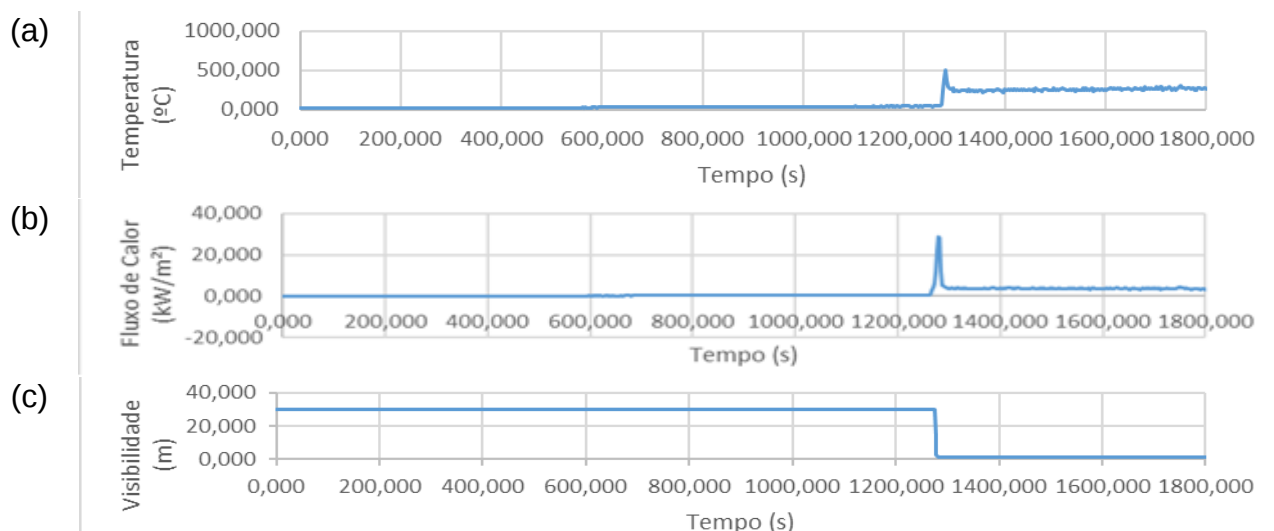


Figura 26. Variação dos parâmetros monitorados na entrada da residência.

A partir da Figura 26, é possível perceber uma alteração abrupta nos valores analisados em um tempo de aproximadamente 1280 segundos, resultante da degradação da porta de entrada do ambiente, o que possibilitou o desenvolvimento do incêndio nessa região na qual se encontrava isolado e com pressão absoluta inferior à do quarto o qual se iniciou o incêndio.

Em relação à visualização da fumaça saindo pela porta, foi realizada uma análise visual da simulação produzida, sendo representada na Figura 27 com os tempos referente a percepção visual que uma pessoa teria visualizando o incêndio pelo lado de fora da edificação.

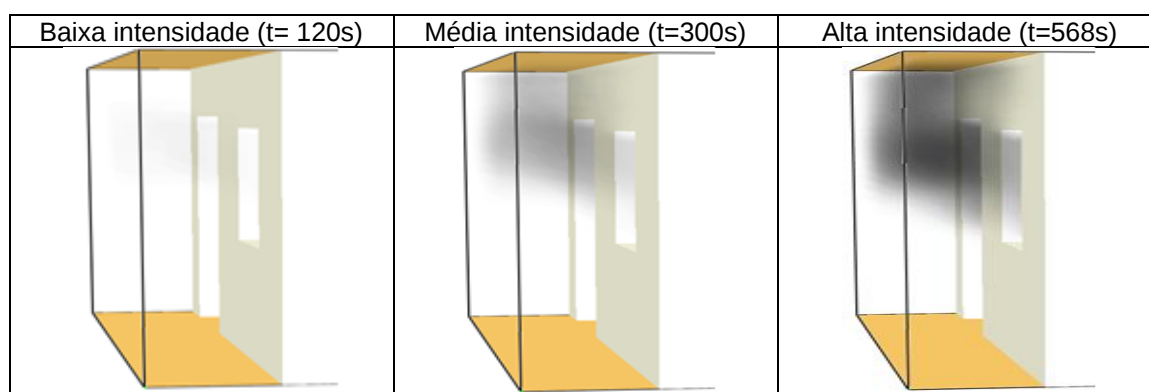


Figura 27. Análise visual da fumaça saindo da edificação que ocorreu o incêndio.

Observa-se que em um tempo de 120s, já é possível visualizar a fumaça saindo pela porta de entrada da edificação, tempo no qual uma pessoa ainda seria capaz de adentrar a todo o ambiente, conforme os parâmetros temperatura, fluxo de calor e visibilidade analisados. No tempo de 568s, visualiza-se uma fumaça de maior intensidade, que coincide com o tempo limite para uma pessoa possa adentrar até na porta do quarto da edificação.

A Tabela 7 traz um resumo dos fenômenos que foram observados na simulação e comparados com o observado no ambiente estudado.

Tabela 7. Resumo dos fenômenos verificados com a simulação com o FDS e constatados no local do incêndio.

FENÔMENO	NO LOCAL	NA SIMULAÇÃO (FDS)
Queima do colchão	Total	Total
Degradação do sofá	Parcial	Parcial
Queima da porta do banheiro	Parcial	Parcial
Condição de entrada no quarto	Não conseguiu adentrar	Até 3:30 após o início do incêndio
Condição de vida no interior do banheiro	Óbito no local	Condições de vida até 21 minutos

Observa-se que a queima do colchão, degradação do sofá e queima da porta do banheiro se deram de maneira análoga no ambiente estudado e na simulação realizada, condizendo com a hipótese de origem accidental do incêndio. Em relação as condições de entrada do quarto, tem-se que a dificuldade de adentrar no quarto foi corroborada pelos dados de tempo que se conseguiria entrar, demonstrando o rápido desenvolvimento do incêndio naquele ambiente. O monitoramento das condições de vida no interior do banheiro demonstrou-se compatível com o observado no local, tendo em vista que o acesso para salvamento da criança presa no banheiro se deu em um tempo superior a 21 minutos, ou seja, conforme a simulação realizada, esse tempo seria o máximo que uma pessoa conseguiria sobreviver dentro do ambiente.

5 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos demonstraram que é possível identificar a presença de gasolina e diesel em diferentes tipos de substratos queimados na presença desses acelerantes e que a utilização da fibra de carbono para a extração e preparação da amostra por ACS e a extração por SPME utilizando uma fibra mista de DVB/CAR/PMDS se mostraram métodos eficiente. Dessa forma, durante os trabalhos investigativos, pode-se perceber que uma amostra de um material poroso como uma espuma de colchão, é mais interessante de ser coletada, tendo em vista a melhor resposta na identificação do acelerante de interesse.

A similaridade dos compostos-alvo foi maior na extração por SPME, além disso, é uma técnica mais rápida de ser executada com um maior custo para operacionalizar (devido a necessidade do dispositivo e das fibras próprias), no entanto, a extração por ACS demonstrou ser uma técnica eficiente e satisfatória para o objetivo pretendido, que apesar de requerer um maior tempo para o preparo da amostra, o baixo custo da fibra utilizada é um fator importante a ser analisado na escolha da técnica. Além disso, nenhuma das técnicas demonstrou sofrer interferência de fundo pela queima dos substratos utilizados na pesquisa.

Em relação às simulações realizadas, no estudo de caso 1, a destruição completa da escrivaninha e a queima completa do colchão da cama superior não foi observada nos 10 minutos de simulação. Em relação as prateleiras do guarda-roupa presentes do extremo direito do móvel, evidenciou-se que ficaram parcialmente

protegidas, mantendo-se uma integridade superior ao restante do guarda-roupa. Sendo que a destruição generalizada no quarto só seria possível, dentro dos parâmetros estabelecidos, em um tempo superior a 10 minutos. Dessa forma, com um acentuado grau de destruição que ocorreu no cenário de incêndio real em um tempo inferior a 10 minutos, leva-se a uma possível suspeita na utilização de agente acelerante para o rápido desenvolvimento do incêndio.

No estudo de caso 2, os resultados obtidos demonstraram que o limite tolerável para acesso e permanência, de uma pessoa agachada a uma altura de 40 cm do solo, se deu até o tempo de aproximadamente 9 minutos e 30 segundos após o início da simulação. No interior do quarto, o limite tolerável para acesso e permanência, de uma pessoa agachada a uma altura de 40 cm do solo, se deu até o tempo de aproximadamente 3 minutos e 30 segundos após o início da simulação. No banheiro do quarto, após um tempo de aproximadamente 21 minutos, o ambiente tornou-se incompatível para a permanência de uma pessoa em seu interior. Em relação aos danos observados, conclui-se que o consumo total do colchão, que foi o foco inicial do incêndio, se deu em um tempo de 16 minutos e 30 segundos, a degradação do sofá em um tempo de 30 minutos. A porta do banheiro foi degradada pela metade em um tempo de aproximadamente 21 minutos após o início do incêndio, com uma direção diagonal e um sentido esquerda descendente.

Desse modo, a análise de acelerante e a simulação usando o FDS demonstraram ser importantes ferramentas para auxiliar o perito na investigação do incêndio para o descarte de hipóteses, auxiliando a entender quais substâncias estão presentes no cenário e as condições que foram atingidas no decorrer do incêndio, no entanto, deve ser encarada como uma ferramenta suplementar, visto que para a correta aproximação da simulação com a realidade, são necessárias um conjunto de variáveis que nem sempre estarão disponíveis no cenário de incêndio.

REFERÊNCIA

1. HARPER, Charles A. **Handbook of building materials for fire protection**. New York: McGraw-Hill, 2004.
2. DE HAAN, John D.; ICOVE, David J. **Kirk's Fire Investigation: Pearson New International Edition**. Pearson Higher Ed, 2013.

3. GEAC/ SESP. Gerencia de Estatística e Análise Criminal da Secretaria de Segurança Pública do Espírito Santo. Banco de dados de atendimento CIODES. Disponível em: solicitação via ofício. 2018.
4. DATASUS, Sistema de Informações sobre Mortalidade e Banco de Dados do Sistema Único de Saúde do Ministério da Saúde. Disponível em: < <http://tabnet.datasus.gov.br/cgi/defthtm.exe?sim/cnv/pobt10es.def> >. Acesso em: 15 dez. 2019.
5. HOUAISS, Antônio. **Dicionário inglês-português**. Record, 2002.
6. ESPANHOLA, REAL ACADEMIA. Dicionário. **Versão online**, 2018. Disponível em: < <http://www.rae.es/>>. Acesso em: 30 dez. 2017.
7. REZENDE, Antônio Martinez de; BIANCHET, Sandra Braga. Dicionário do latim essencial. **Belo Horizonte: Tessitura: Crisálida**, 2005.
8. NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION et al. NFPA 921: Guide for Fire & Explosion Investigations. Technical Committee on Fire Investigations, 2013.
9. BRASILIA, Corpo de Bombeiros Militar. **Manual básico de combate a incêndio**. Distrito Federal, 2009. 172 p.
10. GOIAS, Corpo de Bombeiros Militar. **Fundamentos de Combate a Incêndio**. Goiânia, 2016. 150 p.
11. SANTA CATARINA, Corpo de Bombeiros Militar. **Manual do Curso de Formação de Combate a Incêndios**. Florianópolis, 201x. 200 p.
12. COTE, Arthur E. Fire protection handbook. National Fire Protection Association, 2008.
13. FURNESS, Andrew; MUCKETT, Martin. **Introduction to fire safety management**. Routledge, 2007.
14. GANN, Richard; FRIEDMAN, Raymond. **Principles of Fire Behavior and Combustion**. Jones & Bartlett Publishers, 2014.
15. ARAGÃO, Ranvier Feitosa et al. Incêndios e explosivos: uma introdução à engenharia forense. **Campinas, SP: Millennium**, 2010.
16. SALGUEIRO, Pedro Alexandre dos Santos. **Desenvolvimento de modelos quimiométricos com fiabilidade examinológica conhecida para a previsão de**

acelerantes de combustão em amostras de resíduos de incêndios. Tese de doutorado. Universidade de Lisboa. 263 p. 2016.

17. DE JESUS, Damásio. **Código penal anotado.** Editora Saraiva, 2015.

18. HEATH, Karen; KOBUS, Hilton; BYARD, Roger W. Potential dangers of accelerant use in arson. **Journal of forensic and legal medicine**, v. 18, n. 2, p. 49-51, 2011.

19. VISOTIN, Alexander; LENNARD, Chris. Preliminary evaluation of a next-generation portable gas chromatograph mass spectrometer (GC-MS) for the on-site analysis of ignitable liquid residues. **Australian Journal of Forensic Sciences**, v. 48, n. 2, p. 203-221, 2016.

20. MONTANI, Isabelle; COMMENT, Stéfane; DELÉMONT, Olivier. The sampling of ignitable liquids on suspects' hands. **Forensic science international**, v. 194, n. 1, p. 115-124, 2010.

21. BBC News. Flames rip through Finchley bakery during arson attack. Disponível em: <<https://www.bbc.com/news/av/uk-england-london-36320462/flames-rip-through-finchley-bakery-during-arson-attack>>. Acesso em: 20 abril de 2019.

22. SALGUEIRO, Pedro AS; BORGES, Carlos MF; DA SILVA, Ricardo JN Bettencourt. Valid internal standard technique for arson detection based on gas chromatography–mass spectrometry. **Journal of Chromatography A**, v. 1257, p. 189-194, 2012.

23. NCFS. International Database of Ignitable Liquids: banco de dados desenvolvido por: Centro Nacional de Ciência Forense e pelo grupo de trabalho de Investigação de Incêndios e Explosões da Rede Europeia de Institutos de Ciências Forenses (ENFSI FEIWG). Disponível em: <<http://ncfs.ucf.edu/internationaldb/?design=ILRC1>>. Acesso em: 20 abril de 2018.

24. STAUFFER, Eric; BYRON, Doug. Alternative fuels in fire debris analysis: biodiesel basics. **Journal of forensic sciences**, v. 52, n. 2, p. 371-379, 2007.

25. CHEENMATCHAYA, Arunrat; KUNGWANKUNAKORN, Sukjit. The detection of residual gasoline for forensic soil investigation in arson. **Australian Journal of Forensic Sciences**, v. 50, n. 1, p. 110-121, 2018.

26. MONTANI, Isabelle; COMMENT, Stéfane; DELÉMONT, Olivier. The sampling of ignitable liquids on suspects' hands. **Forensic science international**, v. 194, n. 1, p. 115-124, 2010.

27. NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION et al. **NFPA 1033, Standard for Professional Qualifications for Fire Investigator**. National Fire Protection Association, 2013.
28. SANTO, Espírito. Constituição do estado do Espírito Santo. 2012.
29. Lei Estadual 9.269 do Estado do Espírito Santo
30. WANG, Shi; SHU, Zhong-jun. Research on Application of Abduction to Fire Investigation. **Procedia Engineering**, v. 135, p. 357-362, 2016.
31. MCFTOA. Fire Investigation. Disponível em: < <http://www.mcftoa.org/fire-investigation/>>. Acesso em: 20 abril de 2019.
32. CHOI, Soojin; YOH, Jack J. Fire debris analysis for forensic fire investigation using laser induced breakdown spectroscopy (LIBS). **Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy**, 2017.
33. CBMES. Norma Reguladora da Atividade de Perícia de Incêndio e Explosão. 2019
34. TWIBELL, J. D.; HOME, Janet M. Novel method for direct analysis of hydrocarbons in crime investigation and air pollution studies. **Nature**, v. 268, n. 5622, p. 711-713, 1977.
35. ASTM, E. 1412-00. Standard Practice for Separation of Ignitable Liquid Residues from Fire Debris Samples by Passive Headspace Concentration with Activated Charcoal. **Annual Book of ASTM Standards**, v. 14, 2000.
36. PRATHER, Kaitlin R.; MCGUFFIN, Victoria L.; SMITH, Ruth Waddell. Effect of evaporation and matrix interferences on the association of simulated ignitable liquid residues to the corresponding liquid standard. *Forensic science international*, v. 222, n. 1, p. 242-251, 2012.
37. SINKOV, Nikolai A.; SANDERCOCK, P. Mark L.; HARYNUK, James J. Chemometric classification of casework arson samples based on gasoline content. *Forensic science international*, v. 235, p. 24-31, 2014.
38. SANDERCOCK, P. Mark L. Passive headspace extraction of ignitable liquids using activated carbon cloth. **Canadian Society of Forensic Science Journal**, v. 49, n. 4, p. 176-188, 2016.

39. AZIZ-ZANJANI, Mohammad Ovais; MEHDINIA, Ali. A review on procedures for the preparation of coatings for solid phase microextraction. **Microchimica Acta**, v. 181, n. 11-12, p. 1169-1190, 2014.
40. PAWLISZYN, JANUSZ; PAWLISZYN, BARBARA; PAWLISZYN, MICHAEL. Solid phase microextraction (SPME). **The Chemical Educator**, v. 2, n. 4, p. 1-7, 1997.
41. SOUZA-SILVA, Érica A. et al. A critical review of the state of the art of solid-phase microextraction of complex matrices I. Environmental analysis. **TrAC Trends in Analytical Chemistry**, v. 71, p. 224-235, 2015.
42. VALENTE, Antonio Luiz Pires et al. Microextração por fase sólida. **Química Nova**, 2000.
43. SUPEL, C. O. Solid phase microextraction: theory and optimization of conditions. **Bulletin**, v. 923, p. 1-8, 1998.
44. TAN, Beijing; HARDY, James K.; SNAVELY, Ralph E. Accelerant classification by gas chromatography/mass spectrometry and multivariate pattern recognition. **Analytica Chimica Acta**, v. 422, n. 1, p. 37-46, 2000.
45. ASTM, E. 2154–01 standard practice for separation and concentration of ignitable liquid residues from fire debris samples by passive headspace concentration with solid phase microextraction (SPME). **American Society for Testing and Materials International, West Conshohocken, PA**, 2002.
46. CACHO, J. I. et al. Headspace sorptive extraction for the detection of combustion accelerants in fire debris. **Forensic science international**, v. 238, p. 26-32, 2014.
47. DHABBAH, Abdulrhman M. et al. Determination of Gasoline Residues on Carpets by SPME–GC-MS Technique. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 39, n. 9, p. 6749-6756, 2014.
48. FETTIG, Ina et al. Evaluation of a headspace solid-phase microextraction method for the analysis of ignitable liquids in fire debris. **Journal of forensic sciences**, v. 59, n. 3, p. 743-749, 2014.
49. KRÜGER, Simone et al. Experimental studies on the effect of fire accelerants during living room fires and detection of ignitable liquids in fire debris. **Fire and Materials**, v. 39, n. 7, p. 636-646, 2015.

50. GROB, Robert L.; BARRY, Eugene F. (Ed.). **Modern practice of gas chromatography**. John Wiley & Sons, 2004.
51. SHIMADZU. **Gas Chromatography**. Disponível em: <<https://www.shimadzu.com/an/gc/index.html>> . Acesso em: 10 jan. 2017.
52. UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA. **Método alternativo analisa gordura trans de forma mais rápida e econômica**. Juiz de Fora, 2015. Disponível em: <<http://www.ufjf.br/secom/2015/01/29/metodo-alternativo-analisa-gordura-trans-de-forma-mais-rapida-e-economica/>> . Acesso em: 10 jan. 2017.
53. MCNAIR, Harold M.; MILLER, James M. **Basic gas chromatography**. John Wiley & Sons, 2011.
54. MARTÍN-ALBERCA, Carlos; ORTEGA-OJEDA, Fernando Ernesto; GARCÍA-RUIZ, Carmen. Analytical tools for the analysis of fire debris. A review: 2008–2015. **Analytica chimica acta**, v. 928, p. 1-19, 2016.
55. CHOODUM, Aree; DAEID, Niamh Nic. Development and validation of an analytical method for hydrocarbon residues using gas chromatography-mass spectrometry. **Analytical methods**, v. 3, n. 5, p. 1136-1142, 2011.
56. BORUSIEWICZ, Rafal. Substrate interferences in identifying flammable liquids in food, environmental and biological samples: case studies. **Science & Justice**, v. 55, n. 3, p. 176-180, 2015.
57. LOPATKA, Martin et al. Class-conditional feature modeling for ignitable liquid classification with substantial substrate contribution in fire debris analysis. **Forensic science international**, v. 252, p. 177-186, 2015.
58. HALL, Sarah; WHITE, Garry; GAUTAM, Lata. The development of a novel adsorbent for collecting ignitable liquid residues from a fire scene. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 122, p. 304-314, 2016.
59. MCGRATTAN, Kevin, et al. Computational fluid dynamics modelling of fire. **International journal of computational fluid dynamics**, 2012, 26.6-8: 349-361.
60. NOVOZHILOV, V. Computational fluid dynamics modeling of compartment fires. **Progress in Energy and Combustion science**, 2001, 27.6: 611-666.

61. HURLEY, Morgan J., et al. (ed.). **SFPE handbook of fire protection engineering**. Springer, 2015.
62. McGRATTAN, Kevin et al. **Fire Dynamics Simulator (version 6.5.3): User's guide**. Washington: National Institute of Standards and Technology, 2017.
63. BRAGA, George C. B. **A temperatura e fluxo de calor em uma situação**. XI Seminário Nacional de Bombeiro/ SENABOM – Blumenau/SC, 2010.
64. MCGRATTAN, Kevin et al. Computational fluid dynamics modelling of fire. **International journal of computational fluid dynamics**, v. 26, n. 6-8, p. 349-361, 2012.
65. MCGRATTAN, Kevin B.; BOULDIN, Charles; FORNEY, Glenn P. **Computer simulation of the fires in the world trade center towers**. US Department of Commerce, Technology Administration, National Institute of Standards and Technology, 2005.
66. GROSSHANDLER, W. et al. Relatório da Investigação Técnica da Estação Nightclub Fire, vol. 1. **Escritório de Impressão do Governo dos EUA, Washington, DC** , 2005.
67. MADRZYKOWSKI, Daniel; VETTORI, Robert L. Simulation of the dynamics of the fire at 3146 Cherry Road NE, Washington DC, May 30, 1999. US Department of Commerce, Technology Administration, National Institute of Standards and Technology, 2000.
68. MADRZYKOWSKI, Daniel; FORNEY, Glenn P.; WALTON, W. Douglas. Simulation of the dynamics of a fire in a two-story duplex-Iowa, December 22, 1999. US Department of Commerce, Technology Administration, National Institute of Standards and Technology, 2002.
69. BRYNER, Nelson P.; KERBER, Stephen. Simulation of the Dynamics of a Fire in the Basement of a Hardware Store-New York, June 17, 2001. National Institute of Standards and Technology. Building and Fire Research Laboratory, 2004.
70. BAROWY, Adam; MADRZYKOWSKI, Daniel. Simulation of the Dynamics of a Wind-driven Fire in a Ranch-style House, Texas. National Institute of Standards and Technology, Fire Research Division Engineering Laboratory, 2012.
71. Speight, J. G.; The chemistry and technology of petroleum. CRC press, **2014**.
72. ASTM. E1387. Standard Test Method for Ignitable Liquid Residues in Extracts from Fire Debris Samples by Gas Chromatography. West Conshohocken, PA, **2010**.

73. FISPQ. Nome do produto: Diesel. Disponível em:

<https://sistemasinter.cetesb.sp.gov.br/produtos/ficha_completa1.asp?consulta=%C3%93LEO%20DIESEL> Acesso em: 12 ago. 2019.

74. FISPQ. Nome do produto: Gasolina. Disponível em:

<https://sistemasinter.cetesb.sp.gov.br/produtos/ficha_completa1.asp?consulta=GASOLINA:%20NATURAL> Acesso em: 12 ago. 2019.

75. Espírito Santo. *Norma técnica 04/2009 -Carga de incêndio nas edificações e áreas de risco*. Vitória, 2019

76. Babrauskas, V.; Glass breakage in fires. Fire Science and Technology, Inc. <http://www.doctorfire.com/GlassBreak.pdf>. Accessed, v. 22, **2011**.

77. Figueroa, M. J. M.; de Moraes, P. D.; Comportamento da madeira a temperaturas elevadas. *Ambiente construído*, v. 9, n. 4, p. 157-174, **2009**.

.

APÊNDICE A

Arquivo *input* utilizado na Simulação do Estudo de Caso 1 com a explicação dos códigos utilizados

A primeira coisa a fazer ao configurar um arquivo de entrada é dar um nome ao trabalho. O nome do trabalho é importante porque geralmente um projeto envolve inúmeras simulações. Nesse caso, os nomes das simulações individuais devem ser significativos e ajudar a organizar o projeto. O grupo de listas de nomes HEAD contém dois parâmetros, como neste exemplo:

CHID significa ID do caractere, é uma sequência de 50 caracteres ou menos usada para marcar os arquivos de saída. Se, por exemplo, CHID = 'WTC_05', é conveniente nomear o arquivo de dados de entrada WTC_05.fds para que o arquivo de entrada possa ser associado aos arquivos de saída. Nenhum período ou espaço é permitido no CHID porque os arquivos de saída são marcados com sufixos significativos para determinados sistemas operacionais do computador. Se CHID não for especificado, ele será definido como o nome do arquivo de entrada menos o valor no primeiro período e além dele.

TITLE é uma sequência de 256 caracteres ou menos que descreve a simulação. É simplesmente um texto descritivo que é passado para vários arquivos de saída.

&HEAD CHID='Hipotese', TITLE='Hipotese'/

TIME é o nome de um grupo de parâmetros que definem a duração da simulação e o passo inicial usado para avançar a solução das equações discretizadas. Normalmente, apenas a duração da simulação é necessária nesta linha, através do parâmetro T_END. Por exemplo, a linha a seguir instruirá o FDS a executar a simulação por 1800 s.

&TIME T_END=1800/

Todos os cálculos do FDS devem ser executados em um domínio composto por volumes retilíneos chamados malhas. Cada malha é dividida em células retangulares, cujo número depende da resolução desejada da dinâmica do fluxo. MESH é o grupo de lista de nomes que define o domínio computacional.

&MESH IJK=75,50,30, XB=-1,6.5,-1,4,0,3/

O grupo de listas de nomes OBST contém parâmetros usados para definir obstruções. Toda a geometria do modelo é composta inteiramente de sólidos retangulares, cada um deles introduzido em uma única linha no arquivo de entrada.

Cada linha OBST contém as coordenadas de um sólido retangular no domínio do fluxo. Esse sólido é definido por dois pontos (x1, y1, z1) e (x2, y2, z2) inseridos na linha OBST em termos do sextupeto real XB. Além das coordenadas, as condições de contorno da obstrução podem ser especificadas

com o parâmetro SURF_ID, que designa qual linha SURF deve ser aplicada na superfície da obstrução.

```
&OBST XB=0,5.57,0,0.2,0,2.95, SURF_ID='PAREDE' OUTLINE=.TRUE./
&OBST XB=0,5.57,2.65,2.85, 0,2.95, SURF_ID='PAREDE' OUTLINE=.TRUE. /
&OBST XB=5.37,5.57,0,2.85,0,2.95, SURF_ID='PAREDE' OUTLINE=.TRUE./
&OBST XB=0,0.2,0,2.85,0,2.95, SURF_ID='PAREDE' OUTLINE=.TRUE./
&OBST XB=3.8,4.0,0,2.85,0,2.95, SURF_ID='PAREDE' OUTLINE=.TRUE./
```

O grupo de listas de nomes HOLE define parâmetros que fazem um furo em uma obstrução existente ou conjunto de obstruções.

```
&HOLE XB=3.7,4.1,1.15,1.70,-0.5,1.67/ Porta Central
&HOLE XB=4.5,4.7,2.60,2.90, 2.45,2.75/ Báscula
```

Todos os dispositivos, no sentido mais amplo da palavra, são designados por meio do grupo de lista de nomes DEVC. O ID da cadeia de caracteres é apenas um descritor para identificar o dispositivo no os arquivos de saída e se alguma ação estiver vinculada à sua ativação. O SETPOINT é o valor do dispositivo no qual seu estado muda.

Para configurar a porta de entrada, foi configurado um DEVC_ID para gerar uma abertura (HOLE) depois de 1 minuto e 30 segundos, tempo esse repassado pelo perito que configura o momento que uma pessoa foi até o quarto e fez a abertura da porta.

```
PORTA ENTRADA
&HOLE XB=0.4,1.2,-0.1,0.3,0.1,2.1, , DEVC_ID='det9'/
&DEVC ID='det9', XYZ=1.3,0.2,1.7, QUANTITY='TIME', SETPOINT=90,
INITIAL_STATE=.FALSE.//
&HOLE XB=0.4,1.2,-0.1,0.3,-0.1,0.1/ Abertura inferior da porta
```

Para configurar a abertura da janela, foi utilizado o comando DEVC_ID onde foi configurada a sua quebra quando a temperatura atingir 200°C, conforme o apresentado na literatura.

```
&HOLE XB=2.0,3.25,2.60,2.90, 1.05,2.45, DEVC_ID='det6'/
&DEVC ID='det6', XYZ=3.2,2.6,2.0, QUANTITY='TEMPERATURE', SETPOINT=200,
INITIAL_STATE=.FALSE.//
```

Para configurar os móveis existentes no interior do quarto, foram utilizados o comando OBST e HOLE, já explicados anteriormente. A parametrização no material foi feita utilizando o comando SURF que é um grupo de lista de nomes que define a estrutura de todas as superfícies sólidas ou aberturas dentro ou delimitando o domínio do fluxo. As condições de contorno para obstruções e aberturas de ventilação são prescritas consultando as linhas SURF apropriadas.

A linha SURF consiste em uma sequência de identificação ID = '...' para permitir referências a ela por uma obstrução ou ventilação. Assim, em cada linha OBST e VENT que deve ser descrita abaixo, a sequência de caracteres SURF_ID = '...' indica o ID da linha SURF que contém os parâmetros de condição de limite desejados.

ARMÁRIO INTERNO

```
&OBST XB=3.40,3.8,0.2,0.8,2.15,2.25, SURF_ID='MADEIRA/PRATELEIRA 1
```

&OBST XB=3.40,3.8,0.2,0.8,1.65,1.75, SURF_ID='MADEIRA'/PRATELEIRA 2
 &OBST XB=3.40,3.8,0.2,0.8,1.15,1.25, SURF_ID='MADEIRA'/PRATELEIRA 3
 &OBST XB=3.40,3.8,0.2,0.8,0.65,0.75, SURF_ID='MADEIRA'/PRATELEIRA 4

&OBST XB=0.2,0.5,0.2,2.65,2.55,2.65, SURF_ID='MADEIRA'/PRATELEIRA 1 DO QUARTO
 &OBST XB=0.20,3.8,2.35,2.65,2.55,2.65, SURF_ID='MADEIRA'/PRATELEIRA 2 DO QUARTO
 &OBST XB=3.5,3.8,0.2,2.65,2.55,2.65, SURF_ID='MADEIRA'/PRATELEIRA 3 DO QUARTO
 &OBST XB=0.20,3.8,0.2,0.5,2.55,2.65, SURF_ID='MADEIRA'/PRATELEIRA 3 DO QUARTO

&OBST XB=3.40,3.8,0.8,1.1,0,2.25, SURF_ID='MADEIRA'/
 &OBST XB=3.40,3.8,1.1,1.7,0,2.25, SURF_ID='MADEIRA'/
 &OBST XB=3.40,3.8,1.7,2.65,0,2.25, SURF_ID='MADEIRA'/
 ARMÁRIO CLOSET

&OBST XB=5.07,5.37,0.2,2.65,0,2.65, SURF_ID='MADEIRA'/
 &OBST XB=4.0,4.30,0.3,1.05,2.15,2.25, SURF_ID='MADEIRA'/ PRATELEIRA 1
 &OBST XB=4.0,4.30,0.3,1.05,1.65,1.75, SURF_ID='MADEIRA'/ PRATELEIRA 2
 &OBST XB=4.0,4.30,0.3,1.05,1.15,1.25, SURF_ID='MADEIRA'/ PRATELEIRA 3
 &OBST XB=4.0,4.30,0.3,1.05,0.65,0.75, SURF_ID='MADEIRA'/ PRATELEIRA 4
 &OBST XB=4.0,4.30,0.3,1.05,0.0,0.25, SURF_ID='MADEIRA'/ PRATELEIRA 5

&OBST XB=4.0,4.30,0.2,0.3,0.0,2.25, SURF_ID='MADEIRA'/ Lateral 1
 &OBST XB=4.0,4.30,1.05,1.15,0.0,2.25, SURF_ID='MADEIRA'/ Lateral 2
 &OBST XB=4.0,4.30,0.65,0.75,0.0,1.25, SURF_ID='MADEIRA'/ Central

&OBST XB=4.0,4.30,1.6,2.55,2.15,2.25, SURF_ID='MADEIRA'/ PRATELEIRA 1
 &OBST XB=4.0,4.30,1.6,2.55,1.65,1.75, SURF_ID='MADEIRA'/ PRATELEIRA 2
 &OBST XB=4.0,4.30,1.6,2.55,1.15,1.25, SURF_ID='MADEIRA'/ PRATELEIRA 3
 &OBST XB=4.0,4.30,1.6,2.55,0.65,0.75, SURF_ID='MADEIRA'/ PRATELEIRA 4
 &OBST XB=4.0,4.30,1.6,2.55,0.0,0.25, SURF_ID='MADEIRA'/ PRATELEIRA 5

&OBST XB=4.0,4.30,1.5,1.6,0.0,2.25, SURF_ID='MADEIRA'/ Lateral 1
 &OBST XB=4.0,4.30,2.55,2.65,0.0,2.25, SURF_ID='MADEIRA'/ Lateral 2
 &OBST XB=4.0,4.30,2.05,2.15,0.0,1.25, SURF_ID='MADEIRA'/ Central

MESA

&OBST XB=1.5,3.0,0.2,0.8,1.2,1.4, SURF_ID='MADEIRA'/
 &OBST XB=2.15,2.35,0.2,0.8,0,1.2, SURF_ID='MADEIRA'/

BAÚ

&OBST XB=0.2,0.5,2.10,2.65,0,0.3, SURF_ID='MADEIRA'/

BELICHE

&OBST XB=0.5,2.95,2.65,1.60, 0,0.3, SURF_ID='MADEIRA'/ Cama 1
 &OBST XB=0.5,2.95,2.65,1.60, 0.3,0.7, SURF_ID='MADEIRA'/ Cama 2
 &OBST XB=0.7,2.70,2.55,1.70, 0.7,0.9, SURF_ID='COLCHAO'/ Colchão 2
 &OBST XB=0.5,0.7,1.8,1.60, 0.7,1.2, SURF_ID='MADEIRA'/ Braço 1
 &OBST XB=0.5,0.7,2.65,2.45, 0.7,1.2, SURF_ID='MADEIRA'/ Braço 2
 &OBST XB=2.95,2.80, 1.75,1.60, 0.7,1.2, SURF_ID='MADEIRA'/ Braço 3
 &OBST XB=2.95,2.75, 2.65,2.45, 0.7,1.2, SURF_ID='MADEIRA'/ Braço 4
 &OBST XB=0.5,2.95,2.65,1.60, 1.2,1.7, SURF_ID='MADEIRA'/ Cama 3
 &OBST XB=0.7,2.7,2.55,1.70, 1.7,1.9, SURF_ID='COLCHAO'/ Colchão 3
 &OBST XB=0.5,0.6,2.65,1.60, 1.7,1.9, SURF_ID='MADEIRA'/
 &OBST XB=2.95,2.85,2.65,1.60, 1.7,1.9, SURF_ID='MADEIRA'/

&HOLE XB=0.6,2.85,1.70,1.80, 1.2, 1.7/

```
&HOLE XB=0.6,2.85,1.90,2.00, 1.2, 1.7/
&HOLE XB=0.6,2.85,2.10,2.20, 1.2, 1.7/
&HOLE XB=0.6,2.85,2.30,2.40, 1.2, 1.7/
&HOLE XB=0.6,2.85,2.50,2.60, 1.2, 1.7/
&HOLE XB=0.6,2.85,1.7,2.60, 1.2, 1.60/
```

ESCADA

```
&OBST XB=1.15,1.25, 1.5, 1.6, 0.0,1.9, SURF_ID='MADEIRA'/ Banzo 1
&OBST XB=0.75,0.85, 1.5, 1.6, 0.0,1.9, SURF_ID='MADEIRA'/ Banzo 2
&OBST XB=0.85,1.15, 1.5, 1.6, 0.2,0.3, SURF_ID='MADEIRA'/ Degrau 01
&OBST XB=0.85,1.15, 1.5, 1.6, 0.5,0.6, SURF_ID='MADEIRA'/ Degrau 02
&OBST XB=0.85,1.15, 1.5, 1.6, 0.8,0.9, SURF_ID='MADEIRA'/ Degrau 03
&OBST XB=0.85,1.15, 1.5, 1.6, 1.1,1.2, SURF_ID='MADEIRA'/ Degrau 04
&OBST XB=0.85,1.15, 1.5, 1.6, 1.4,1.5, SURF_ID='MADEIRA'/ Degrau 05
&OBST XB=0.85,1.15, 1.5, 1.6, 1.7,1.8, SURF_ID='MADEIRA'/ Degrau 05
```

A seguir foram apresentadas todas as parametrizações dos objetos. Para isso foi utilizado o comando SURF ID, explicado anteriormente, onde cada objeto foi construído com base no comando MATL_ID, que agrega as propriedades do material como calor específico, condutividade, densidade, calor de combustão, obtidos a partir da literatura específica da área.

MATERIAL DA CAMA

```
&MATL ID = 'FABRIC'
FYI = 'Properties completely fabricated'
SPECIFIC_HEAT= 1.0
CONDUCTIVITY= 0.1
DENSITY= 100.0
HEAT_OF_COMBUSTION= 15000. /
```

```
&MATL ID= 'FOAM'
FYI= 'Properties completely fabricated'
SPECIFIC_HEAT= 1.0
CONDUCTIVITY = 0.05
DENSITY = 40.0
HEAT_OF_COMBUSTION= 30000. /
```

```
&SURF ID = 'COLCHAO'
FYI = 'Properties completely fabricated'
COLOR= 'WHITE'
BURN_AWAY = .TRUE.
MATL_ID(1:2,1) = 'FABRIC','FOAM'
THICKNESS(1:2) = 0.002,0.2
IGNITION_TEMPERATURE=350.00,
```

MATERIAL DOS ARMÁRIOS

```
&MATL ID='WOOD',
FYI='Ref=Spearpoint's thesis, except cp',
SPECIFIC_HEAT=1.80,
CONDUCTIVITY=0.1300,
DENSITY=502.00,
HEAT_OF_COMBUSTION=1.30E4/
```

```
&SURF ID='MADEIRA',
RGB=153,102,0,
TEXTURE_MAP='psm_wood2.jpg',
```

```

TEXTURE_WIDTH=0.61,
TEXTURE_HEIGHT=0.61,
IGNITION_TEMPERATURE=280,
BACKING='EXPOSED',
MATL_ID(1,1)='WOOD',
MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.00,
THICKNESS(1)=0.0190
BURN_AWAY = .TRUE./

```

MATERIAL DA PAREDE

```

&MATL ID = 'TIJOLO'
CONDUCTIVITY = 1.05
SPECIFIC_HEAT = 0.92
DENSITY = 1957.
N_REACTIONS = 1
HEAT_OF_REACTION = 700.
HEAT_OF_COMBUSTION = 30000.
REFERENCE_TEMPERATURE = 390.
NU_SPEC = 1.
SPEC_ID = 'PROPANE'/

```

```

&SURF ID = 'PAREDE'
COLOR = 'BEIGE'
BURN_AWAY = .FALSE.
MATL_ID = 'TIJOLO'
THICKNESS = 0.013
PART_ID = 'SMOKE'/

```

MATERIAL GESSO

```

MATL ID='Gypsum',
FYI='Drysedale, P. 36',
SPECIFIC_HEAT=1.09,
CONDUCTIVITY=0.1700,
DENSITY=930.00/

```

```

&SURF ID='APARELHO'
DEFAULT =.FALSE.
RGB = 205,205,205/

```

```

&SURF ID ='INVISIVEL'
DEFAULT =.FALSE.
COLOR ='INVISIBLE'/

```

Para parametrizar o foco inicial da hipótese testada, foi feita a parametrização conforme a seguir, onde o incêndio iniciou-se no ar condicionado, perdurando por um tempo de 60 segundos e liberando toda energia necessária para a degradação completa do equipamento.

PROGRAMAÇÃO DO AR CONDICIONADO

```

&HOLE XB=1.7,1.8,2.6,3.20, 2.40,2.1/
&HOLE XB=1.2,1.3,2.6,3.20, 2.40,2.1/
&HOLE XB=1.2,1.8,2.6,3.10, 2.4 ,2.5/
&OBST XB=1.3,1.7,2.6,3.10, 2.40,2.1, SURF_ID='APARELHO' / Ar condicionado

```

INCENDIO NO AR CONDICIONADO COM LIBERAÇÃO PROGRESSIVA DE REAÇÃO

```

&SURF ID='BURNER', HRRPUA=1000., PART_ID='SMOKE', RAMP_Q='ramp'/
&RAMP ID='ramp',T=0.0,F=0.8/

```

```

&RAMP ID='ramp',T=30,F=1.000/
&RAMP ID='ramp',T=200.0,F=1.000/
&RAMP ID='ramp',T=500,F=0.005/
&VENT XB=1.5,1.7,2.55,2.35,1.9,1.9, SURF_ID='BURNER', DEVC_ID='det3'/
&REAC SOOT_YIELD=0.01, FUEL='PROPANE'/
&PART ID='SMOKE', MASSLESS=.TRUE., SAMPLING_FACTOR=1 /
&DEVC ID='det3', XYZ=0,0,0, QUANTITY='TIME', SETPOINT=60,
INITIAL_STATE=.FALSE./

```

Para monitorar as condições atingidas foram utilizados o comando BNDF, SLCF e DEVC. Os parâmetros do grupo de listas de nomes BNDF permitem registrar as quantidades de superfície em todas as obstruções sólidas. O SLCF permite visualizar melhor os padrões de fluxo, formando fatias planares de dados. O DEVC é um dispositivo que armazena uma QUANTIDADE que ele monitora. Geralmente, essa QUANTIDADE é gravada em um limite limitado e no caso em questão, houve um monitoramento da temperatura da parede e fluxo de calor.

```

&BNDF QUANTITY='WALL_TEMPERATURE'/
&SLCF PBY=0.3, QUANTITY='TEMPERATURE'/
&SLCF PBY=2.1, QUANTITY='TEMPERATURE'/
&DEVC XYZ=2.3,0.5,1.4, IOR=+3 QUANTITY='WALL TEMPERATURE'/
&DEVC XYZ=2.3,0.6,1.4, IOR=+3 QUANTITY='HEAT_FLUX'/

&VENT MB='YMAX' SURF_ID='OPEN'/

&TAIL/ Arquivo de encerramento.

```

APÊNDICE B

Arquivo *input* utilizado na Simulação do Estudo de Caso 2

```
&HEAD CHID='Final', TITLE='Final'/
&TIME T_END=2400/
&MISC TMPA=27/
```

```
&MESH ID='Mesh01', IJK=85,30,26, XB=0.0,8.5,1.0,4.0,0.0,2.6/
&MESH ID='Mesh02', IJK=36,60,52, XB=8.5,10.3,1.0,4.0,0.0,2.6/
```

```
&SURF ID='ADIABATIC',
COLOR='GRAY 80',
ADIABATIC=.TRUE./
```

```
&MATL ID='Gypsum',
FYI='Drysedale, P. 36',
SPECIFIC_HEAT=1.09,
CONDUCTIVITY=0.1700,
DENSITY=930.00/
```

```
&SURF ID = 'PAREDEG'
COLOR = 'BEIGE'
BURN_AWAY = .TRUE.
MATL_ID = 'Gypsum'
THICKNESS = 0.013
BURN_AWAY = .TRUE.
IGNITION_TEMPERATURE=565.00
HRRPUA= 35/
```

MATERIAL DA PAREDE

```
&MATL ID = 'TIJOLO'
CONDUCTIVITY = 1.05
SPECIFIC_HEAT = 0.92
DENSITY = 1957.
N_REACTIONS = 1
HEAT_OF_REACTION = 700.
HEAT_OF_COMBUSTION = 30000.
REFERENCE_TEMPERATURE = 390.
NU_SPEC = 1.
SPEC_ID = 'PROPANE'/
```

```
&SURF ID = 'PAREDE'
COLOR = 'BEIGE'
BURN_AWAY = .FALSE.
MATL_ID = 'TIJOLO'
THICKNESS = 0.013 /
```

```
&OBST ID='Obstruction', XB=5.0,5.1,1.1,3.9,0.0,2.6, SURF_ID='PAREDEG'/
&OBST ID='Obstruction', XB=3.4,3.5,1.1,2.6,0.0,2.6, SURF_ID='PAREDEG'/
```

```
&OBST ID='Obstruction', XB=8.65,8.7,1.1,1.6,1.5,1.9, SURF_ID='PAREDEG'/
```

```
&OBST ID='Obstruction', XB=0.5,0.6,1.1,3.9,0.0,2.6, SURF_ID='PAREDE'/
&OBST ID='Obstruction', XB=0.5,8.6,1.0,1.1,0.0,2.6, SURF_ID='PAREDE'/
&OBST ID='Obstruction', XB=0.5,8.6,3.9,4.0,0.0,2.6, SURF_ID='PAREDEG'/
OBST ID='Obstruction', XB=8.4,8.5,1.1,1.7,0.0,2.6, SURF_ID='PAREDE'/
&OBST ID='Obstruction', XB=8.65,8.6,1.4,0.0,2.6, SURF_ID='PAREDE'/
OBST ID='Obstruction', XB=8.4,8.5,3.7,3.9,0.0,2.6, SURF_ID='PAREDE'/
```

```
&OBST ID='Obstruction', XB=8.6,10.3,1.7,1.8,0.0,2.6, SURF_ID='PAREDE'/
&OBST ID='Obstruction', XB=8.6,10.3,3.6,3.7,0.0,2.6, SURF_ID='PAREDE'/
&OBST ID='Obstruction', XB=10.2,10.3,1.8,3.6,0.0,2.6, SURF_ID='PAREDE'/
```

CAMA

```
&MATL ID = 'FABRIC'
FYI = 'Properties completely fabricated'
SPECIFIC_HEAT = 1.0
CONDUCTIVITY= 0.1
DENSITY = 100.0
HEAT_OF_COMBUSTION = 15000. /
```

```
&MATL ID = 'FOAM'
FYI = 'Properties completely fabricated'
SPECIFIC_HEAT = 1.0
CONDUCTIVITY= 0.05
DENSITY = 40.0
HEAT_OF_COMBUSTION = 30000. /
```

```
&SURF ID= 'COLCHAO'
FYI= 'Properties completely fabricated'
COLOR = 'WHITE'
BURN_AWAY = .TRUE.
MATL_ID(1:2,1) = 'FABRIC','FOAM'
THICKNESS(1:2) = 0.002,0.2
IGNITION_TEMPERATURE=415.00,

HRRPUA=350.00/
```

```
&SURF ID = 'COLCHAO2'
FYI= 'Properties completely fabricated'
COLOR= 'BLUE'
BURN_AWAY= .TRUE.
MATL_ID(1,1) = 'FABRIC','FOAM'
THICKNESS(1:2) = 0.002,0.2
IGNITION_TEMPERATURE=415.00,

HRRPUA=350.00/
```

```
&SURF ID = 'ROUPA'
FYI = 'Properties completely fabricated'
COLOR = 'PINK'
BURN_AWAY = .TRUE.
MATL_ID(1:2,1) = 'FABRIC'
THICKNESS(1)=0.0190
IGNITION_TEMPERATURE=400.00,

HRRPUA=350.00/
```

```
&OBST ID='CAMA', XB=8.4,6.5,1.2,2.7,0.0,0.5, SURF_ID='MADEIRA'/
&OBST ID='CAMA', XB=8.4,6.5,1.2,2.7,0.7,0.5, SURF_ID='COLCHAO'/
```

```
&OBST ID='COLCHÃO EXTRA', XB=6.5,8.0,1.3,2.7,0.7,0.8, SURF_ID='COLCHAO2',
DEVC_ID='det2'/
&OBST ID='COLCHÃO EXTRA', XB=6.5,8.0,1.2,1.3,0.7,1.7, SURF_ID='COLCHAO2',
DEVC_ID='det2'/
```

```

&DEVC ID='det2', XYZ=0,1,0, QUANTITY='TIME', SETPOINT=60,
    INITIAL_STATE=.TRUE./

&OBST ID='COLCHÃO EXTRAII', XB=5.2,6.7,2.1,3.9,0,0.1, SURF_ID='COLCHAO2',
    DEVC_ID='det3'/

&DEVC ID='det3', XYZ=0,1,0, QUANTITY='TIME', SETPOINT=60,
    INITIAL_STATE=.FALSE./

&OBST ID='ROUPA', XB=5.2,6,1.2,1.3,0.1,1.1, SURF_ID='ROUPA'/
&OBST ID='ROUPA', XB=5.2,6,1.4,1.5,0.1,1.1, SURF_ID='ROUPA'/
&OBST ID='ROUPA', XB=5.2,6,1.6,1.7,0.1,1.1, SURF_ID='ROUPA'/
&OBST ID='ROUPA', XB=5.2,6,1.8,1.9,0.1,1.1, SURF_ID='ROUPA'/
&OBST ID='ROUPA', XB=5.2,6,2.0,2.1,0.1,1.1, SURF_ID='ROUPA'/

    INCENDIO NO COLCHÃO (ISQUEIRO)

    &SURF ID='Fogo', HRRPUA=500., PART_ID='SMOKE'/
    &VENT XB=7.3,7.4,1.4,1.3,0.8,0.8, SURF_ID='Fogo', DEVC_ID='det1'/
    &DEVC ID='det1', XYZ=0,1,0, QUANTITY='TIME', SETPOINT=60,
        INITIAL_STATE=.TRUE./
    &REAC SOOT_YIELD=0.01, FUEL='PROPANE' /

&SURF ID='Fogoll', HRRPUA=500., RAMP_Q='ramp', PART_ID='SMOKE' /
    &RAMP ID='ramp',T=0,F=1/
    &RAMP ID='ramp',T=220,F=1/
    &RAMP ID='ramp',T=240,F=0.0/
    &VENT XB=6,6.2,3,3.2,0.1,0.1, SURF_ID='Fogo', DEVC_ID='det4'/
    &DEVC ID='det4', XYZ=0,1,0, QUANTITY='TIME', SETPOINT=1800,
        INITIAL_STATE=.FALSE./

&PART ID='SMOKE', MASSLESS=.TRUE., SAMPLING_FACTOR=1 /

    &MATL ID='WOOD',
    FYI='Ref=Spearpoint's thesis, except cp',
    SPECIFIC_HEAT=1.80,
    CONDUCTIVITY=0.1300,
    DENSITY=502.00,
    HEAT_OF_COMBUSTION=1.30E4/

    &SURF ID='MADEIRA',
    RGB=153,102,0,
    TEXTURE_MAP='psm_wood2.jpg',
    TEXTURE_WIDTH=0.61,
    TEXTURE_HEIGHT=0.61,
    HRRPUA=181.39,
    IGNITION_TEMPERATURE=280,
    BACKING='EXPOSED',
    MATL_ID(1,1)='WOOD',
    MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.00,
    THICKNESS(1)=0.0190
    BURN_AWAY = .TRUE./

&OBST ID='PORTA BANHEIRO', XB=8.65,8.7,2.7,3.5,0.1,2.1, SURF_ID='MADEIRA'/

&HOLE ID='Hole', XB=4.9,5.1,2.9,3.7,-0.01,2.1/

```

```

&HOLE ID='Hole', XB=0.5,0.7,1.6,2.2,1.0,2.0/
&HOLE ID='Hole', XB=0.5,0.7,2.9,3.7,-0.01,2.1/
&HOLE ID='Hole', XB=8.5,8.65,2.7,3.5,-0.01,2.1/
&HOLE ID='Hole', XB=8.8,9.2,1.7,1.9,1.5,1.9/
&HOLE ID='Hole', XB=8.65,8.6,1.1,1.6,1.5,1.9/

```

```

&VENT MB='XMIN' SURF_ID='OPEN'/
&VENT MB='XMAX' SURF_ID='OPEN'/
&VENT MB='YMIN' SURF_ID='OPEN'/
&VENT MB='YMAX' SURF_ID='OPEN'/

```

MONITORAMENTO

```
&DEVC XYZ=8.65,3.1,1.5, IOR=-1 QUANTITY='WALL TEMPERATURE'/ PORTA
```

```
&DEVC XYZ=1,2,1, IOR=+1 QUANTITY='WALL TEMPERATURE'/ SOFÁ
```

```
&BNDF QUANTITY='WALL_TEMPERATURE'/
```

ENTRADA T

```

&DEVC XYZ=0.6,2.8,0.4, IOR=+1 QUANTITY='GAS TEMPERATURE'/
&DEVC XYZ=0.6,2.8,0.8, IOR=+1 QUANTITY='GAS TEMPERATURE'/
&DEVC XYZ=0.6,2.8,1.2, IOR=+1 QUANTITY='GAS TEMPERATURE'/
&DEVC XYZ=0.6,2.8,1.6, IOR=+1 QUANTITY='GAS TEMPERATURE'/
&DEVC XYZ=0.6,2.8,2.0, IOR=+1 QUANTITY='GAS TEMPERATURE'/

```

```

&DEVC XYZ=5.1,2.8,0.4, IOR=+1 QUANTITY='GAS TEMPERATURE'/
&DEVC XYZ=5.1,2.8,0.8, IOR=+1 QUANTITY='GAS TEMPERATURE'/
&DEVC XYZ=5.1,2.8,1.2, IOR=+1 QUANTITY='GAS TEMPERATURE'/
&DEVC XYZ=5.1,2.8,1.6, IOR=+1 QUANTITY='GAS TEMPERATURE'/
&DEVC XYZ=5.1,2.8,2.0, IOR=+1 QUANTITY='GAS TEMPERATURE'/

```

QUARTO T

```

&DEVC XYZ=0.6,2.8,0.4, IOR=+1 QUANTITY='GAS TEMPERATURE'/
&DEVC XYZ=0.6,2.8,0.8, IOR=+1 QUANTITY='GAS TEMPERATURE'/
&DEVC XYZ=0.6,2.8,1.2, IOR=+1 QUANTITY='GAS TEMPERATURE'/
&DEVC XYZ=0.6,2.8,1.6, IOR=+1 QUANTITY='GAS TEMPERATURE'/
&DEVC XYZ=0.6,2.8,2.0, IOR=+1 QUANTITY='GAS TEMPERATURE'/

```

```

&DEVC XYZ=5.1,2.8,0.4, IOR=+1 QUANTITY='GAS TEMPERATURE'/
&DEVC XYZ=5.1,2.8,0.8, IOR=+1 QUANTITY='GAS TEMPERATURE'/
&DEVC XYZ=5.1,2.8,1.2, IOR=+1 QUANTITY='GAS TEMPERATURE'/
&DEVC XYZ=5.1,2.8,1.6, IOR=+1 QUANTITY='GAS TEMPERATURE'/
&DEVC XYZ=5.1,2.8,2.0, IOR=+1 QUANTITY='GAS TEMPERATURE'/

```

ENTRADA F

```

&DEVC XYZ=0.6,2.8,0.4, IOR=+1 QUANTITY='HEAT_FLUX'/
&DEVC XYZ=0.6,2.8,0.8, IOR=+1 QUANTITY='HEAT_FLUX'/
&DEVC XYZ=0.6,2.8,1.2, IOR=+1 QUANTITY='HEAT_FLUX'/
&DEVC XYZ=0.6,2.8,1.6, IOR=+1 QUANTITY='HEAT_FLUX'/
&DEVC XYZ=0.6,2.8,2.0, IOR=+1 QUANTITY='HEAT_FLUX'/

```

```

&DEVC XYZ=5.1,2.8,0.4, IOR=+1 QUANTITY='HEAT_FLUX'/
&DEVC XYZ=5.1,2.8,0.8, IOR=+1 QUANTITY='HEAT_FLUX'/
&DEVC XYZ=5.1,2.8,1.2, IOR=+1 QUANTITY='HEAT_FLUX'/

```

&DEVC XYZ=5.1,2.8,1.6, IOR=+1 QUANTITY='HEAT_FLUX'/
 &DEVC XYZ=5.1,2.8,2.0, IOR=+1 QUANTITY='HEAT_FLUX'/

QUARTO F

&DEVC XYZ=0.6,2.8,0.4, IOR=+1 QUANTITY='HEAT_FLUX'/
 &DEVC XYZ=0.6,2.8,0.8, IOR=+1 QUANTITY='HEAT_FLUX'/
 &DEVC XYZ=0.6,2.8,1.2, IOR=+1 QUANTITY='HEAT_FLUX'/
 &DEVC XYZ=0.6,2.8,1.6, IOR=+1 QUANTITY='HEAT_FLUX'/
 &DEVC XYZ=0.6,2.8,2.0, IOR=+1 QUANTITY='HEAT_FLUX'/

&DEVC XYZ=5.1,2.8,0.4, IOR=+1 QUANTITY='HEAT_FLUX'/
 &DEVC XYZ=5.1,2.8,0.8, IOR=+1 QUANTITY='HEAT_FLUX'/
 &DEVC XYZ=5.1,2.8,1.2, IOR=+1 QUANTITY='HEAT_FLUX'/
 &DEVC XYZ=5.1,2.8,1.6, IOR=+1 QUANTITY='HEAT_FLUX'/
 &DEVC XYZ=5.1,2.8,2.0, IOR=+1 QUANTITY='HEAT_FLUX'/

ENTRADA V

&DEVC XYZ=0.6,2.8,0.4, IOR=+1 QUANTITY='VISIBILITY'/
 &DEVC XYZ=0.6,2.8,0.8, IOR=+1 QUANTITY='VISIBILITY'/
 &DEVC XYZ=0.6,2.8,1.2, IOR=+1 QUANTITY='VISIBILITY'/
 &DEVC XYZ=0.6,2.8,1.6, IOR=+1 QUANTITY='VISIBILITY'/
 &DEVC XYZ=0.6,2.8,2.0, IOR=+1 QUANTITY='VISIBILITY'/

&DEVC XYZ=5.1,2.8,0.4, IOR=+1 QUANTITY='VISIBILITY'/
 &DEVC XYZ=5.1,2.8,0.8, IOR=+1 QUANTITY='VISIBILITY'/
 &DEVC XYZ=5.1,2.8,1.2, IOR=+1 QUANTITY='VISIBILITY'/
 &DEVC XYZ=5.1,2.8,1.6, IOR=+1 QUANTITY='VISIBILITY'/
 &DEVC XYZ=5.1,2.8,2.0, IOR=+1 QUANTITY='VISIBILITY'/

QUARTO V

&DEVC XYZ=0.6,2.8,0.4, IOR=+1 QUANTITY='VISIBILITY'/
 &DEVC XYZ=0.6,2.8,0.8, IOR=+1 QUANTITY='VISIBILITY'/
 &DEVC XYZ=0.6,2.8,1.2, IOR=+1 QUANTITY='VISIBILITY'/
 &DEVC XYZ=0.6,2.8,1.6, IOR=+1 QUANTITY='VISIBILITY'/
 &DEVC XYZ=0.6,2.8,2.0, IOR=+1 QUANTITY='VISIBILITY'/
 &DEVC XYZ=5.1,2.8,0.4, IOR=+1 QUANTITY='VISIBILITY'/
 &DEVC XYZ=5.1,2.8,0.8, IOR=+1 QUANTITY='VISIBILITY'/
 &DEVC XYZ=5.1,2.8,1.2, IOR=+1 QUANTITY='VISIBILITY'/
 &DEVC XYZ=5.1,2.8,1.6, IOR=+1 QUANTITY='VISIBILITY'/
 &DEVC XYZ=5.1,2.8,2.0, IOR=+1 QUANTITY='VISIBILITY'/

BANHEIRO

&DEVC XYZ=10.2,2.8,0.4, IOR=-1 QUANTITY='GAS TEMPERATURE'/
 &DEVC XYZ=10.2,2.9,0.4, IOR=-1 QUANTITY='HEAT_FLUX'/
 &DEVC XYZ=10.2,3.0,0.4, IOR=-1 QUANTITY='VISIBILITY'/

SOFA

&OBST XB= 0.8, 1.6,1.2, 1.4, 0.3, 1.10, SURF_ID='SOFA' / braço 0,128
 &OBST XB= 0.8, 1.0, 1.4, 2.60, 0.5, 1.5, SURF_ID='SOFA' / encosto 0,24
 &OBST XB= 0.8, 1.6,1.4, 2.6, 0.3, 0.5, SURF_ID='SOFA' / assento 0,192
 &OBST XB= 0.8, 1.6, 2.60, 2.80, 0.3, 1.10, SURF_ID='SOFA' / braço 0,128
 &OBST XB= 0.8, 1.6, 1.2, 2.8, 0, 0.3, SURF_ID='SOFA' / chão 0,384

&SURF ID = 'SOFA'

```
FYI = 'Properties completely fabricated'
      COLOR= 'RED'
      BURN_AWAY = .TRUE.
      MATL_ID(1:2,1) = 'FABRIC','FOAM'
      THICKNESS(1:2) = 0.002,0.2
      IGNITION_TEMPERATURE=350.00,

      HRRPUA=350.00/

&SLCF PBZ=0.5, QUANTITY='TEMPERATURE'/
&SLCF PBZ=0.5, QUANTITY='VISIBILITY'/
&TAIL /
```



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

PROTOCOLO DE ASSINATURA



O documento acima foi assinado digitalmente com senha eletrônica através do Protocolo Web, conforme Portaria UFES nº 1.269 de 30/08/2018, por
RICARDO MACHADO KUSTER - SIAPE 1213734
Departamento de Química - DQ/CCE
Em 29/05/2020 às 07:56

Para verificar as assinaturas e visualizar o documento original acesse o link:
<https://api.lepisma.ufes.br/arquivos-assinados/26261?tipoArquivo=O>

APÊNDICE C

Parâmetros utilizados nas simulações com FDS

Tabela C.1 Parametrização da fonte inicial do incêndio do Estudo de Caso nº01

Item	Descrição	Material Principal	Peso Total (Kg)	Características de Queima	
				Massa Inflamável (kg)	HRRMAX (kW)
Televisão, 28 "CRT	A televisão era uma televisão de 28 "tubo de raios catódicos (CRT) com um estojo de plástico rígido.	Plástico	31,83	5,2	274

Tabela C.2 Parametrização da matéria-prima presente nas simulações

Material	Densidade (kg/m ³)	Calor de Combustão (kJ/kg)	Condutividade (W/(m*K))	Calor Específico (kJ/(kg*K))
Tecido	100	15000	0,1	1
Espuma	40	33280	0,05	1
Madeira	489	14500	0,14	1,38

APÊNDICE D

Análises Química realizadas

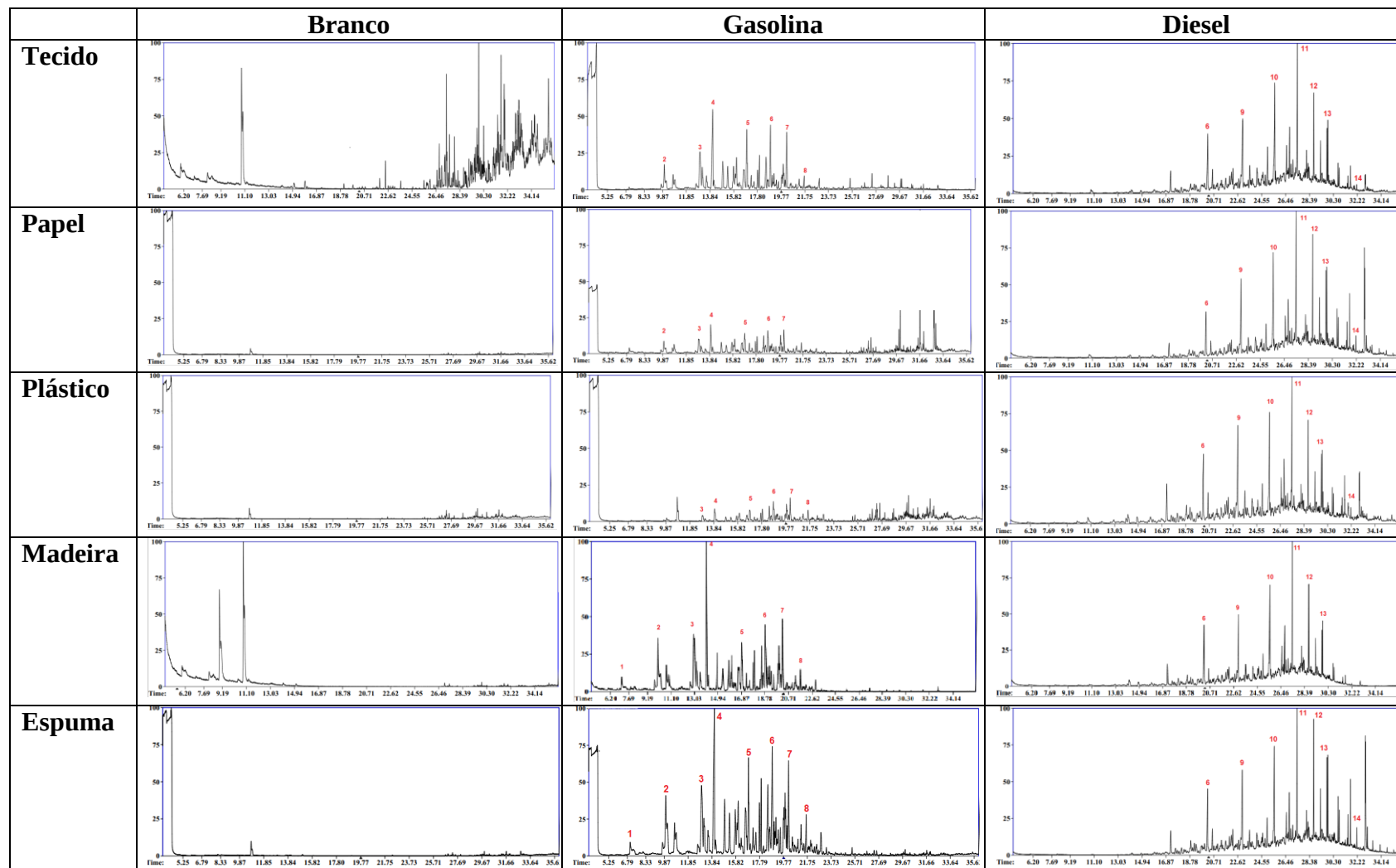


Figura D.1 Cromatogramas de CG-EM para detecção de acelerantes em diferentes tipos de materiais por extração ACS

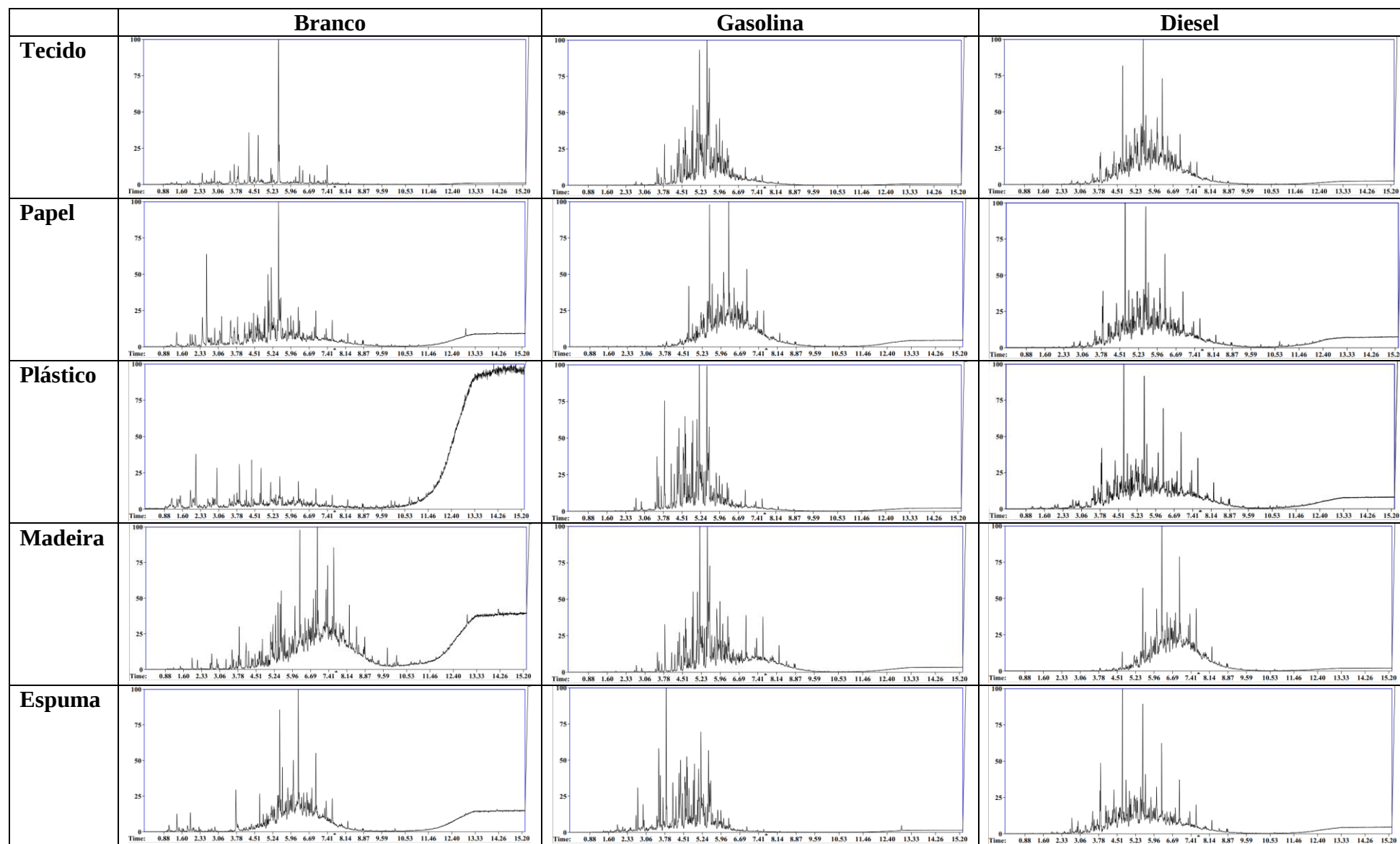


Figura D.2 Cromatogramas de CG-EM para detecção de acelerantes em diferentes tipos de materiais por extração SPME

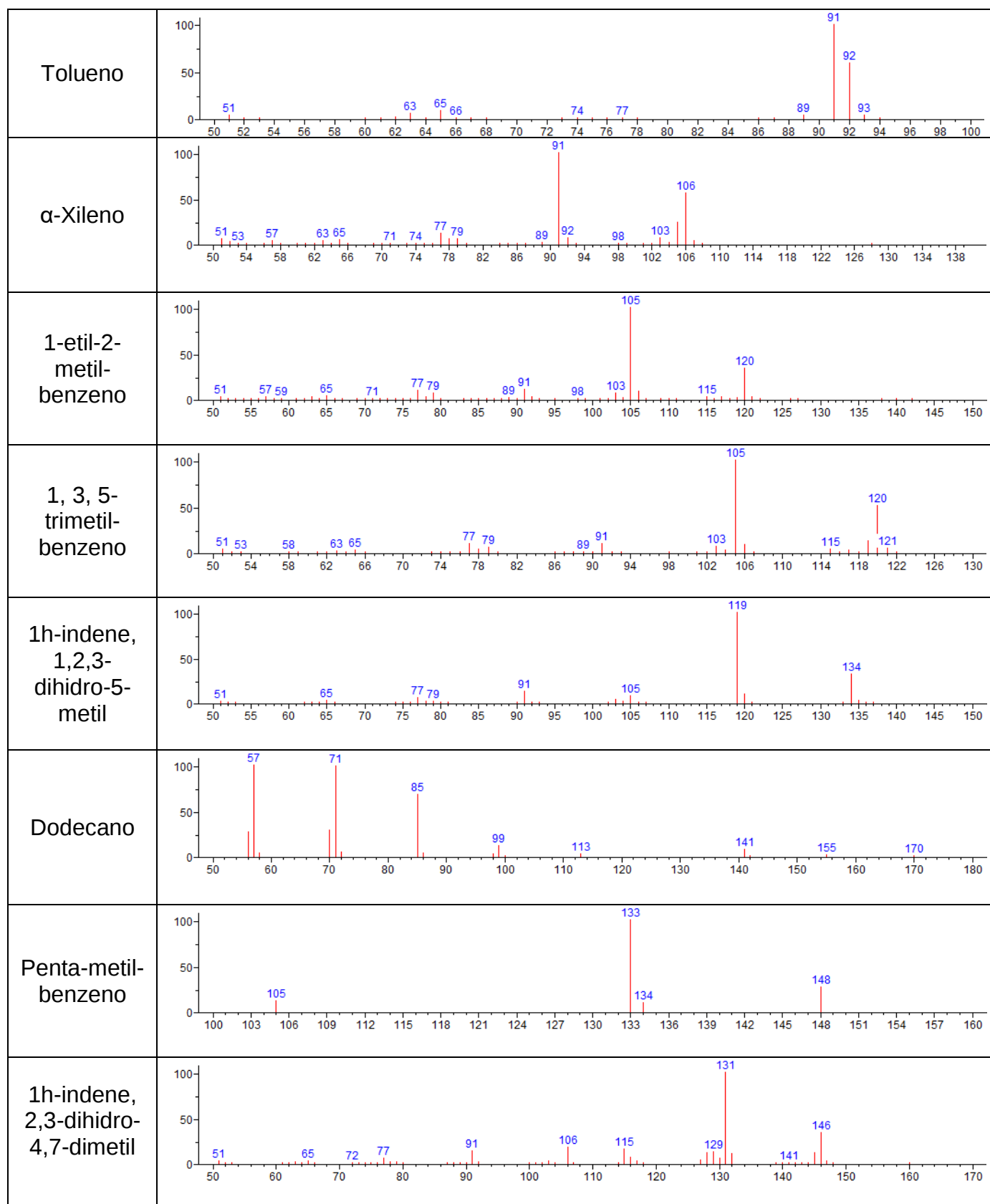


Figura D.3 Espectro de EI-MS dos principais componentes encontrados na composição química do acelerante gasolina

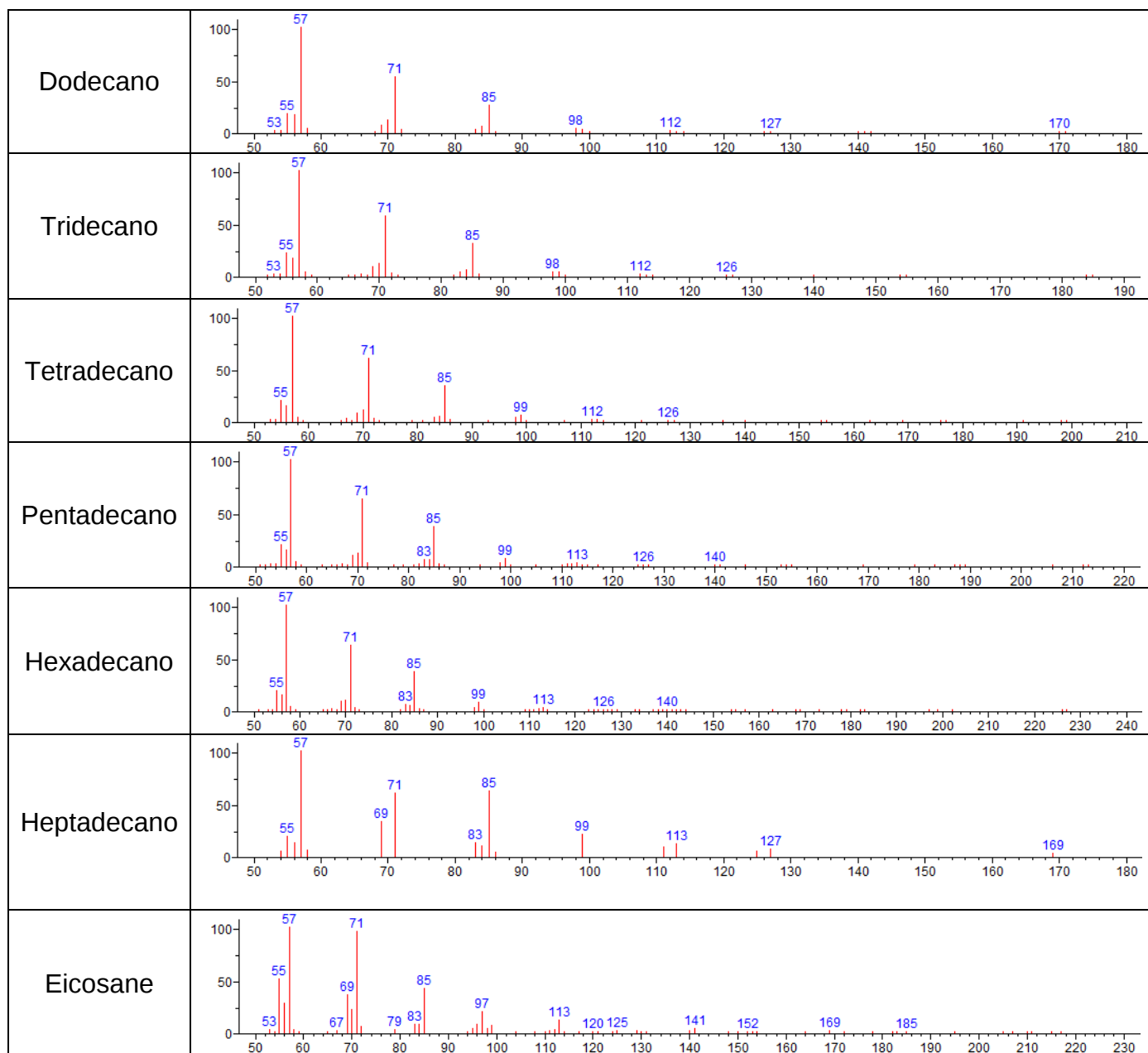


Figura D.4 Espectro de EI-MS dos principais componentes encontrados na composição química do acelerante diesel

APLICAÇÃO DA FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD) E ANÁLISE DE ACELERANTES NA INVESTIGAÇÃO DE INCÊNDIO

Igor O. P. da Cunha^{a,c}, Wanderson Romão^{a,b} e Valdemar Lacerda Junior^{a,*}

^aDepartamento de Química, Universidade Federal do Espírito Santo, 29075-910 Vitória – ES, Brasil

^bInstituto Federal do Espírito Santo, 29106-010 Vila Velha – ES, Brasil

^cDepartamento de Perícia de Incêndio e Explosão, Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Espírito Santo, 29050-555 Vitória – ES, Brasil

Recebido em 05/10/2019; aceito em 17/02/2020; publicado na web em 13/04/2020

APPLICATION OF COMPUTER FLUID DYNAMICS (CFD) AND ANALYSIS OF ACCELERATORS IN FIRE INVESTIGATION.

Fire investigation is a complex activity that involves skill, technology, knowledge and science and aims to elucidate fire-related events such as cause, origin, propagation, phenomena, etc. Chemical analysis to verify the presence of foreign substances in that location, as well as the use of fire simulation software are efficient and economical ways to study fire behavior during the occurrence of fire. This work demonstrates the application of Gas Chromatography coupled to Mass Spectrometry (GC-MS) in the analysis for gasoline and diesel identification in different substrates, as well as the application of computational fluid dynamics (CFD) to aid in the elucidation of fires. The chemical analyses performed showed the possibility of identifying the presence of accelerants even in small quantities (1 μ L) and in different types of materials (wood, polyethylene, polyurethane, polyamide and newsprint). The computational model generated by the software proved to be consistent with the data obtained at the scene by the fire expert, thus serving in the hypothesis discard and conclusion of the investigation.

Keywords: investigation; fire; accelerating; simulation.

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da atividade de perícia ou investigação de incêndio e explosão está diretamente ligado à evolução do conhecimento relacionado à ciência do fogo. No Brasil, somente em 2017, a Segurança Contra Incêndio foi reconhecida como área do conhecimento pela CAPES e, em razão disso, pouco conhecimento foi produzido devido à falta de estudos nessa área. Somente no triênio 2016-2018, 14.097 atendimentos relacionados a incêndios foram realizados pelo Corpo de Bombeiros no âmbito do Estado do Espírito Santo, desse total, 539 foram objetos de investigação de incêndio.¹

Diversos trabalhos são reportados aplicando *software Fire Dynamics Simulator* (FDS) para buscar entender os efeitos do incêndio e antecipar-se, caso viesse a ocorrer, incêndios em túnel,²⁻⁴ plataformas de exploração de petróleo,⁵ pontes,⁶ edifícios,⁷ entre outros. Na identificação de acelerantes destacam-se as aplicações quimiométricas,⁸ as otimizações realizadas por cromatografia gasosa acoplada a espectrometria de massas⁹ e análise direta por espectrometria de massas no espaço livre (E-Nose).¹⁰

Nesse escopo, surge a questão problema que deu origem a esse trabalho: quais aplicações práticas e limitações que as simulações computacionais de incêndio e análise química de acelerantes podem agregar de informações para a tomada de decisões do perito de incêndio?

Neste contexto, esse trabalho tem como objetivo descrever como essas práticas podem contribuir nos estudos investigativos da Perícia de Incêndio do Corpo de Bombeiros Militar do Espírito Santo. Para isso, foi realizada uma pesquisa de simulação computacional utilizando o *software Fire Dynamics Simulator* (FDS) em dois cenários reais de incêndio e uma análise química por cromatografia gasosa acoplada a espectrometria de massas (CG-EM) de diferentes tipos de

materiais queimados (madeira, polietileno, poliuretano, poliamida e papel-jornal) com gasolina e diesel (1 μ L).

Análise de acelerantes

Quando um incêndio é iniciado deliberadamente, os incendiários usam líquidos inflamáveis que derramam sobre o local para ajudar dar início ao fogo, propagar e assim acelerar a destruição.¹¹ Um acelerante é qualquer combustível ou oxidante, muitas vezes um líquido inflamável, usado para iniciar um incêndio, aumentar a taxa de crescimento e acelerar a propagação do fogo.¹²

Os acelerantes podem ser encontrados em qualquer estado físico: gás, líquido ou sólido. As provas para testes de aceleração devem ser coletadas e testadas de acordo com as normas da *American Society for Testing and Materials* (ASTM),¹² uma vez que a detecção de resíduos acelerados afeta de forma decisiva o curso de investigação de incêndio e constitui importantes evidências materiais do crime, a confiabilidade desses testes é de extrema importância.¹³

A gasolina é o combustível mais comumente utilizado como acelerante, porque é um líquido inflamável eficiente e pode ser comprado e transportado mesmo em grandes quantidades sem despertar as suspeitas dos vendedores e das autoridades, assim como os diluentes de tinta e o querosene que são combustíveis bastantes comuns e podem ser adquiridos em quantidades moderadas sem a suspeita, pois seu uso é liberado com pouca restrição.¹⁴

Durante as investigações se for determinado que um incêndio seja de causa criminosa ou de forma ilegal na propriedade, uma investigação criminal completa deve ser conduzida. Outros incêndios para os quais uma causa não pode ser facilmente determinada, incluindo aqueles classificados como suspeitos ou indeterminados, também devem ser investigados.¹⁵

Muitos incêndios criminosos estão associados à utilização de acelerantes, sendo que a presença de um acelerador numa cena de incêndio pode indicar que um ato de incêndio ocorreu em oposição

*e-mail: vljuniorqui@gmail.com

a um incêndio acidental. Um acelerador pode ser qualquer material usado para facilitar a ignição ou contribuir para a velocidade ou a propagação de um incêndio. O incêndio criminoso é considerado um dos crimes mais fáceis de cometer e uma das mais difíceis de investigar.¹⁶

Cromatografia gasosa acoplada a espectrometria de massas (CG-EM)

A cromatografia abrange uma série de técnicas que têm em comum a separação dos componentes de uma mistura por operações de equilíbrio que resultam na separação das espécies como resultado de sua partição (sorção diferencial) entre duas fases diferentes, uma estacionária com uma superfície grande e uma em movimento em contato com a primeira. A cromatografia não se restringe a separações analíticas podendo também ser usada na preparação de substâncias puras, no estudo da cinética das reações, nas investigações estruturais de escala molecular e na determinação de constantes físico-químicas, incluindo constantes de estabilidade de complexos, entalpia, entropia e energia livre.¹⁷

Em uma revisão realizada por Martín-Alberca *et al.* (2016)¹⁸ sobre as ferramentas de análise utilizadas para detectar a presença de acelerantes em detritos de incêndio durante os anos de 2008-2015, os autores trouxeram que é uma área amplamente dominada pela técnica de CG acoplada a um detector EM, apresentando apenas algumas limitações para separar e identificar isômeros estruturais e hidrocarbonetos pesados de misturas complexas.

Para a preparação da amostra para ser analisada por CG-EM é necessário seguir algumas metodologias próprias para esse tipo de material, com destaque para a ASTM E1412 que normatiza a utilização do extração por carvão ativado (ACS) para separação e concentração de resíduos líquidos inflamáveis de amostras de detritos de fogo, considerada ser uma técnica adequada para a detecção dos resíduos de líquidos inflamáveis (ILRs), para avaliar a sua concentração e para extrair-los das amostras.¹⁹

A técnica consiste em expor o carvão vegetal no recipiente da amostra para adsorver resíduos líquidos inflamáveis, sendo que o recipiente pode ser aquecido ou deixado à temperatura ambiente por um determinado tempo. Em seguida o carvão é removido e eluído com dissulfureto de carbono (CS₂), diclorometano (DCM) ou éter dietílico e analisado utilizando alguma técnica analítica, comumente sendo empregada a CG-EM.¹⁹

Diversos estudos utilizam o ACS para extração dos ILRs, com destaque para os trabalhos realizados por Salgueiro *et al.* (2012) que utilizaram o ACS a uma temperatura de 80 ± 1 °C por $14,0 \pm 0,5$ h no forno para extrair e identificar gasolina de 95 octanas, gasolina de 98 octanas, diluente de tinta, iniciador de carvão sólido e aguarrás.²⁰ No mesmo ano, Prather *et al.* (2012) também utilizou o ACS (de 2,5 mm por 5 mm, da marca *Albrayco Laboratories*) em seus trabalhos, otimizando a extração utilizando uma temperatura de 80 °C durante 4 h. Decorrido esse tempo, a tira de carbono foi eluída com 200 mL de diclorometano obtendo-se excelentes resultados na análise para detectar gasolina e querosene.²¹

Lopatka *et al.* (2015)²² utilizaram o ACS (também da marca *Albrayco Technologies*) e otimizaram a análise para a detecção de gasolina usando uma temperatura de 66 °C, um tempo de extração de 16 horas e o dissulfureto de carbono para eluir o carvão ativado. No ano seguinte, no trabalho de Sandercock (2016)²³ avaliou-se a utilização de um pano de carbono ativado (ACC) e uma tira de carbono ativado (ACS) na extração de vários líquidos inflamáveis. As extrações simultâneas de líquidos inflamáveis utilizando ACC e ACS foram realizadas durante um período de 16 horas em latas de tinta de um litro, tanto a temperatura ambiente quanto a 60 °C.

As extrações aquecidas também foram realizadas em uma mistura aceleradora de gasolina e diesel na presença de vapor de água e o efeito do vapor de água sobre a eficiência de extração de ACC e ACS foi avaliado.

Fire Dynamics Simulator (FDS)

O FDS é um *software* de dinâmica computacional de fluidos (CFD) que calcula o fluxo de calor impulsionado pelo fogo e é disponibilizado gratuitamente pelo *National Institute of Standards and Technology* (NIST). O *software* resolve numericamente uma forma das equações de Navier-Stokes apropriado para a baixa velocidade, fluxo térmico com ênfase na fumaça e no transporte de calor dos incêndios.²⁴

Ele resolve numericamente uma forma das equações de Navier-Stokes apropriadas para fluxo de baixa velocidade com ênfase no transporte de fumaça e calor dos incêndios. A turbulência é tratada de maneira padrão por meio da simulação de grandes redemoinhos (LES), no entanto, o modelo adotado pode ser alterado para simulação numérica de direção (DNS), simulação de redemoinhos muito grandes (VLES) e simulação de redemoinhos muito grandes simples (SVLES). A combustão é baseada na mistura de reação limitada, infinitamente rápida de espécies que se aglomeram e reagem em escalas que representam a misturas dessas espécies. A radiação térmica é calculada resolvendo a equação de transporte de radiação para o gás cinza utilizando o método do volume finito (MVF).²⁴

A primeira versão do FDS foi lançada publicamente em fevereiro do ano 2000, sendo usado para criar um modelo de transporte de calor, prever produtos da combustão em baixas velocidades, transferência de calor por radiação e convecção entre gases e superfícies sólidas, pirólise dos materiais sólidos, como ocorre a propagação das chamas e o crescimento do incêndio, capaz também de testar a ativação de chuveiros automáticos, detectores de temperatura, fumaça e supressão de incêndios com água por aspersão com chuveiros automáticos.²⁴

Todos os parâmetros de entrada requeridos pelo FDS para descrever um cenário de incêndio são transmitidos por meio de um arquivo de texto criado pelo usuário, baseado em comandos específicos de acordo com o guia de usuário disponível no *site*. Neste arquivo de entrada devem constar informações acerca do domínio físico e computacional, a geometria do ambiente e dos objetos, as propriedades físico-químicas dos materiais, bem como especificações sobre a reação de combustão e dados de saída a serem gravados.²⁵

Em uma busca realizada no *site* www.periodicosapes.gov.br utilizando-se o termo “*Fire Dynamics Simulator*”, observa-se um total de 1.178 publicações de periódicos revisados por pares desde o lançamento do *software* em 2000, sendo que 58,91% dessas publicações estão concentradas nos últimos 5 anos.²⁶ A Figura 1 apresenta a distribuição desses artigos em função do tempo.

Diversos estudos com aplicação do FDS na elucidação das causas do incêndio foram realizados, com destaque para os estudos desenvolvidos pelo NIST, entre eles: simulação da dinâmica do incêndio para o caso do *World Trade Center* (WTC) em 11 de setembro de 2001,²⁸ após o atentado terrorista; o incêndio na boate *Station* em Rhode Island em fevereiro de 2003,²⁹ simulação da dinâmica do fogo na *Cherry Road NE* em Washington D.C., ocorrido em 30 de maio de 1999;³⁰ simulação da dinâmica de um incêndio em um duplex em Iowa, ocorrido em 22 de dezembro de 1999;³¹ simulação da dinâmica de um incêndio no porão de uma loja de ferragens, Nova York, ocorrido em 17 de junho de 2001³² e a simulação da dinâmica de um fogo movido pelo vento em uma casa de estilo rural, Texas, ocorrido em 2009.³³

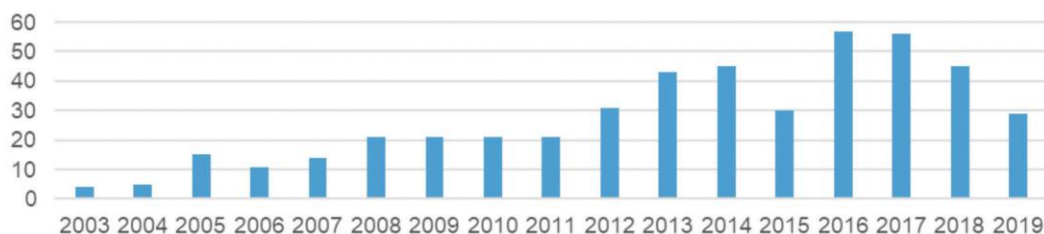


Figura 1. Evolução do quantitativo de publicações com aplicações do software FDS²⁷

PARTE EXPERIMENTAL

Análise de acelerantes

Os substratos utilizados foram: madeira (eucalipto), plástico (polietileno), espuma (poliuretano), tecido (poliamida) e papel-jornal (celulose). Todos os substratos foram depositados em três pedaços no interior de blocos de dimensões média de $10 \times 10 \text{ cm}^2$. Os acelerantes foram depositados em uma quantidade de $1 \mu\text{L}$ sobre cada pedaço do substrato, sendo eles: gasolina e diesel.

A ignição do substrato com o acelerante foi feita utilizando um isqueiro e a extinção das chamas foi realizada, após 30 segundos do início da ignição, utilizando o princípio do abafamento. Na extinção por abafamento, uma placa de madeira foi utilizada para bloquear a passagem do oxigênio atmosférico para a amostra. Posteriormente, a amostra sólida foi coletada para o interior de um recipiente metálico, onde um pedaço da fibra de carvão foi colocado sobre o espaço vazio do recipiente, sem contato direto com a amostra.

Para a extração dos elementos de interesse, foi utilizada uma fibra de carvão ativado empregada em exaustores de ar para filtragem de gases nocivos, que foi extraído durante um tempo de 12 horas em uma estufa de 120°C , e posteriormente dessorvido utilizando 2 mL de diclorometano (DCM).

A análise dos produtos de combustão foi realizada em um cromatógrafo a gás modelo Agilent 6890N com uma coluna HP-5ms com 30 metros de comprimento, diâmetro interno: $0,25 \text{ mm}$, e gás portador: hélio (pureza ultraelevada). Os parâmetros de análise foram: vazão constante de $0,80 \text{ mL min}^{-1}$, volume de injeção: 1 mL , temperatura de injeção: 40°C , tempo de espera inicial: 3 min , taxa de aquecimento de 5°C min^{-1} até 150°C e $15^\circ\text{C min}^{-1}$ até 300°C , tempo final de espera: 1 min , e tempo total de execução: 36 min .

Fluidodinâmica computacional (CFD)

O software utilizado para realização da simulação foi o *Fire Dynamics Simulator* (FDS). Toda simulação foi montada com base nas informações repassadas pelo perito responsável pelo local da perícia em seu laudo investigativo e por visita *in loco*, para verificar o tipo de material existente no local. Nenhum dos dois casos estudados foi identificado, restringindo-se assim a análise do desenvolvimento do incêndio, preservando as pessoas diretamente envolvidas. As propriedades térmicas dos materiais foram obtidas com base no banco de dados de itens queimados criado pelo Centro Nacional de Ciência Forense (NCFS) da Universidade da Flórida Central (UCF) em parceria com o Departamento de Engenharia de Proteção contra Incêndios da Universidade de Maryland College Park (UMCP).

Para a execução da simulação foi utilizada um Desktop HP EliteOne 800, processador Core i5-4590S, 8GB RAM e HD 500GB.

Estudo de caso nº 1

Trata-se de um incêndio ocorrido no Estado do Espírito Santo no ano de 2018 que resultou na morte de duas pessoas. O caso em si não será aprofundado para preservar o nome das vítimas e envolvidos,

limitando-se aos resultados obtidos pela análise computacional, comparando com os danos encontrados no cenário do incêndio. A simulação ocorreu em um tempo de 10 minutos, tendo em vista que se buscava entender as condições alcançadas no interior de um quarto, conforme croqui apresentado na Figura 2, e confrontar com as condições encontradas pela guarnição do Corpo de Bombeiros. O tempo de 10 minutos foi definido com base na linha do tempo construída utilizando-se as imagens de uma câmera de vídeo-monitoramento existente na região, onde entre o tempo que foi possível visualizar a saída da fumaça, até a chegada do caminhão dos bombeiros para realizar o combate ao incêndio, decorreu-se um tempo de 8 minutos.

A geometria da estrutura, aberturas de portas e janelas para o exterior, que influenciam criticamente o crescimento e a propagação do fogo, foram feitas com base na planta baixa da edificação, o tamanho da malha computacional foi de 10 cm , a localização da fonte de ignição foi feita levando em conta a hipótese formulada pelo perito, a liberação de energia da fonte de ignição foi feita distribuindo a energia liberada na queima de um televisor de 28 polegadas, propriedades térmicas de paredes, teto, pisos e móveis, e o tamanho, localização foram feitos com base no banco de dados da NCFS. Toda parametrização utilizada foi baseada em estudos realizados e validados para comparar a eficiência do software com incêndios ocorridos em escala real.

Para simular a queima do ar condicionado, foram utilizados os parâmetros de queima de um televisor de 28 polegadas por apresentarem formato, massa e constituição similar. Conforme banco de dados do Centro Nacional de Ciência Forense (NCFS) da Universidade da Flórida Central (UCF), a queima ocorrerá conforme as condições apresentadas na Tabela 1S. A base dos materiais presentes no quarto foi simplificada em 3 materiais constituintes, sendo eles: madeira, espuma de poliuretano e tecido, sendo apresentadas as especificações na Tabela 2S.

As condições atingidas durante o incêndio foram monitoradas a partir de 6 dispositivos que foram instalados para monitorar a temperatura e o fluxo de calor. Com os dados obtidos, foi possível obter um perfil de temperatura, fluxo de calor do ambiente e avaliar as condições que foram alcançadas com o desenvolvimento do incêndio.

Estudo de caso nº 2

Nesse estudo de caso, busca-se simular outro incêndio ocorrido no Estado do Espírito Santo no ano de 2018 que vitimou uma criança na capital do Estado. A simulação ocorreu durante um tempo de 1800 segundos (30 minutos) para tentar entender as condições alcançadas no interior da edificação, durante o desenvolvimento do incêndio e um possível cenário descrito pelo perito foi executado com as seguintes características: portas e janelas abertas, com exceção da porta de acesso ao banheiro, que permaneceu fechada após o início do incêndio, dimensões da cama e do sofá verificadas no local do ocorrido.

As parametrizações desses materiais foram obtidas com base em bibliografias que validaram esse tipo de material, utilizando-se de forma análoga as utilizadas no Estudo de caso nº 1. Como carga de incêndio na edificação, foram consideradas apenas: uma cama de

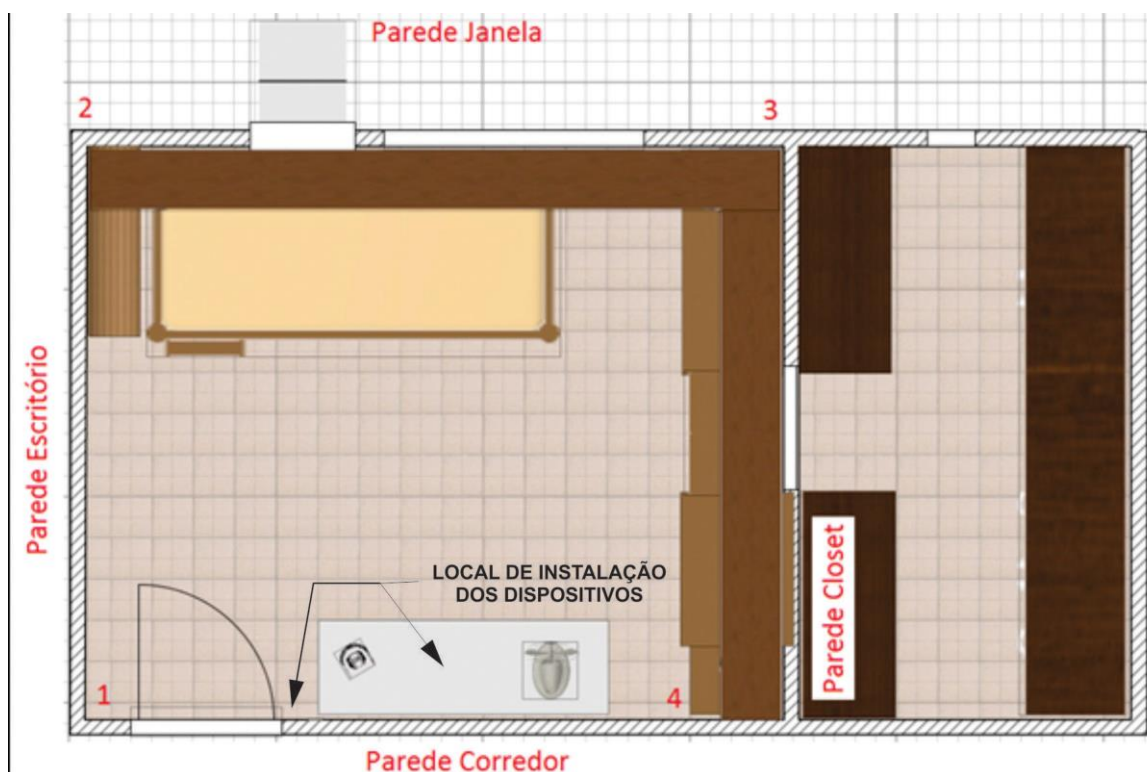


Figura 2. Planta baixa do quarto onde ocorreu o incêndio

casal do tipo box, dois colchões de casal, um cabideiro com roupas e a porta que liga o quarto ao banheiro, conforme apresentado no croqui da Figura 3. Dessa forma, o ambiente computacional simulado foi simplificado em comparação ao local do incêndio, por considerar que os colchões queimados são a principal fonte de energia liberada no incêndio, dessa forma com a maior parcela de contribuição para o incêndio ocorrido.

Para monitorar as condições atingidas durante o incêndio, foram colocados 35 dispositivos para medir a temperatura, fluxo de calor e visibilidade no ambiente investigado. Desses dispositivos, 15 foram posicionados na entrada da casa, nas alturas de 0,4 m; 0,8 m; 1,2 m; 1,6 m e 2,0 m, 15 dispositivos na região do quarto, nas mesmas alturas, próximo a porta de entrada do ambiente, 3 no interior do banheiro em uma altura de 0,4 m, 1 na porta do banheiro e 1 no sofá para monitorar a temperatura do objeto. Com os dados obtidos, foi possível obter um perfil de temperatura, fluxo de calor e visibilidade do ambiente e com isso avaliar as condições que foram alcançadas com o desenvolvimento do incêndio.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise de acelerantes

Os principais compostos químicos identificados nos cromatogramas da Figura 39S foram numerados e sua identidade revelada na Tabela 1. A gasolina e o diesel são frações do petróleo, o primeiro contendo de 4 a 12 átomos de carbono em estrutura molecular que enquadram em três tipos gerais: parafinas (incluindo cicloparafinas e materiais ramificados), olefinas e aromáticos, sendo sua distribuição básica composta por alcanos (4 a 8%), alcenos (2 a 5%), isoalcanos (25 a 40%), cicloalcanos (3 a 7%), cicloalcenos (1 a 4%) e aromáticos (20-50%), enquanto que o segundo contém, predominantemente, mais de nove átomos de carbonos em sua constituição, constituído por hidrocarbonetos parafínicos, olefínicos e aromáticos. O óleo diesel é formulado através da mistura de diversas correntes como gasóleos, nafta pesada, diesel leve e diesel pesado, provenientes das diversas etapas de processamento do petróleo bruto.³⁴



Figura 3. Planta baixa da edificação onde ocorreu o incêndio

Tabela 1. Compostos químicos identificados como marcadores dos acelerantes de gasolina (1-8) e diesel (6, 9-14)

Rótulo	Combustível	Composto	T _R (min)	Tecido	Papel	Plástico	Madeira	Espuma
1	Gasolina	Tolueno	7,0731	-	-	-	X	X
2		α -Xileno	10,0194	X	X	-	X	X
3		1-etil-2-metil-benzeno	12,9949	X	X	X	X	X
4		1,3,5-trimetil-benzeno	14,0609	X	X	X	X	X
5		1h-indene, 1,2,3-dihidro-5-metil	16,7543	X	X	X	X	X
6		Dodecano	18,9332 / 20,2296*	X	X	X	X	X
7		Penta-metil-benzeno	20,2830	X	X	X	X	X
8		1h-indene, 2,3-dihidro-4,7-dimetil	21,6522	X	-	X	X	X
9	Diesel	Tridecano	23,0214	X	X	X	X	X
10		Tetradecano	25,5865	X	X	X	X	X
11		Pentadecano	27,4010	X	X	X	X	X
12		Hexadecano	28,7239	X	X	X	X	X
13		Heptadecano	29,8529	X	X	X	X	X
14		Eicosane	32,1898	X	X	X	X	X

*Hidrocarboneto utilizado como marcador na gasolina (T_R = 18,9332 min) e no diesel (T_R = 20,2296 min).

No material suplementar foram apresentados os resultados das análises por CG-EM dos substratos espuma, tecido, papel jornal, plástico e madeira, respectivamente, que foram queimados de forma natural, com gasolina e com diesel (Figuras 39S-41S).

De uma maneira geral, quando comparamos à capacidade do acelerante em ser identificado, o diesel demonstrou ser melhor do que a gasolina, onde nos substratos com menor capacidade de absorção, como o plástico, jornal e o tecido sintético, sinais correspondendo a marcadores químicos do diesel (dodecano, tridecano, pentadecano, hexadecano, heptadecano e eicosano) foram facilmente identificados, sendo que os marcadores químicos da gasolina (tolueno, α -xileno, 1-etil-2-metil-benzeno, 1,3,5-trimetil-benzeno, 1h-indene, 1,2,3-dihidro-5-metil, dodecano, penta-metil-benzeno, 1h-indene, 1,2,3-dihidro-5-metil) apresentaram uma menor abundância.³⁵ Isso se deve ao fato do diesel ser formado por hidrocarbonetos com maior massa molar do que o da gasolina, e dessa forma, apresentando uma temperatura de vaporização de seus componentes na faixa de 288 a 338 °C,³⁶ o que dificulta a sua perda durante a queima do substrato. Por outro lado, a gasolina, apresenta uma temperatura de vaporização de seus componentes na faixa de 14 a 135 °C.³⁷

Entre os materiais estudados como substrato, percebe-se que a espuma teve a melhor capacidade de conservação dos combustíveis quando comparado aos outros substratos e mesmo após 12 horas da queima, realizada com diesel, foi possível identificar os compostos químicos marcadores do combustível. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato desse material (espuma de poliuretano) apresentar uma menor densidade (0,02 g cm⁻³) em relação aos demais (madeira: 0,49 g cm⁻³; polietileno: 1,35 g cm⁻³; papel-jornal: 0,93 g cm⁻³; poliamida: 1,13 g cm⁻³).³⁸ Como consequência dessa propriedade, sua elevada porosidade confere a espuma de PU uma alta capacidade de absorção de líquidos, fazendo com que a substância fique retida em seu interior, o que acaba inibindo-a da combustão durante um período maior.³⁸ Por outro lado, o polietileno demonstrou ter uma pior capacidade de conservação de combustível, devido ao fato de suas características de impermeabilidade, limitando o acelerante a permanecer em sua superfície. Além disso, o elevado potencial calorífico do plástico (44 MJ kg⁻¹), comparado aos outros materiais (madeira: 19 MJ kg⁻¹, papel-jornal: 17 MJ kg⁻¹, poliuretano: 23 MJ kg⁻¹, e poliamida: 32 MJ kg⁻¹)³⁹ faz com que a reação de combustão se desenvolva de maneira mais rápida, levando ao consumo do acelerante e dificultando sua posterior identificação.

A Tabela 2 apresenta a porcentagem de similaridade para cada composto-alvo identificado na queima dos substratos com o

acelerante, onde em todos os casos o valor foi superior a 80%. Entre os substratos utilizados, é possível perceber que a similaridade dos compostos-alvo foram maiores na espuma (>89%), devido a maior abundância desses componentes, o que facilita assim, uma maior área cromatográfica detectada para cada composto e como consequência uma melhor qualidade no espectro de CG-EM produzido.

Analisando a literatura, não foram encontrados trabalhos avaliando a capacidade de absorção e a taxa de evaporação de combustível nesses substratos, limitando-se a estudar a interferência causada pela queima do substrato na identificação do agente acelerante. Destacamos o trabalho de Stauffer e Byron⁴⁰ que, em 2008, perceberam que os detergentes de lavar louça, por vezes utilizados como alternativa de espumas comerciais pelo pessoal que trabalha com a atividade de combate a incêndios, apresentam em sua composição química moléculas de tolueno, etilbenzeno, xilenos, indano, naftaleno e naftalenos mono-substituído e padrões de alquilbenzenos lineares semelhantes ao padrão de alcanos em um destilado de petróleo. Esses compostos são portanto moléculas marcadores para a detecção de líquidos inflamáveis.

Já em 2015, nos trabalhos desenvolvidos por Visotin e Lennard,⁴¹ a gasolina foi corretamente identificada nas amostras de detritos de incêndio em tapetes de lã, telhas cerâmicas e queima de assoalho de madeira. Entretanto, para a amostra de tapete sintético, existiu uma interferência dos produtos de pirólise. Entre eles, o estireno era o composto mais abundante dentro do cromatograma.

Em relação à capacidade do fundo em interferir na identificação dos acelerantes, observa-se que em todos os substratos foi possível realizar a identificação do acelerante. No entanto, a queima do substrato do tipo tecido e madeira, apresentou uma elevada quantidade de outras substâncias observadas no cromatograma, como ácido 2-propanoico butil ester (t_R = 10,84 min) e fenol, 2,4-bis 1,1-dimetil-etil (t_R = 27,54 min), o que pode prejudicar a identificação caso o tempo de coleta do substrato com o acelerante seja mais elevado, diminuindo assim, a quantidade de combustível recuperado no processo de extração.

Fire Dynamics Simulator (FDS)

Estudo de caso nº 1

Foram feitos alguns apontamentos baseados nos efeitos da temperatura e fluxo de calor observado pelo incêndio que evoluiu partindo da região do ar condicionado e se espalhando pelo colchão da cama superior, que foi a hipótese testada para a ocorrência do

Tabela 2. Porcentagem de similaridade de cada composto-alvo identificado nos substratos

Substrato	Compostos-alvo (Gasolina)	Similaridade (%)	Compostos-alvo (Diesel)	Similaridade (%)
Tecido	α -Xileno	80	Dodecano	97
	1-etil-2-metil-benzeno	82	Tridecano	98
	1,3,5-trimetil-benzeno	83	Tetradecano	95
	1h-indene, 1,2,3-dihidro-5-metil	82	Pentadecano	89
	Dodecano	95	Hexadecano	82
	Penta-metil-benzeno	81	Heptadecano	83
	1h-indene, 2,3-dihidro-4,7-dimetil	89	Eicosane	82
Papel	α -Xileno	93	Dodecano	93
	1-etil-2-metil-benzeno	97	Tridecano	97
	1,3,5-trimetil-benzeno	80	Tetradecano	98
	1h-indene, 1,2,3-dihidro-5-metil	82	Pentadecano	95
	Dodecano	83	Hexadecano	99
	Penta-metil-benzeno	82	Heptadecano	95
	-	81	Eicosane	81
Plástico	1-etil-2-metil-benzeno	89	Dodecano	89
	1,3,5-trimetil-benzeno	93	Tridecano	93
	1h-indene, 1,2,3-dihidro-5-metil	85	Tetradecano	87
	Dodecano	80	Pentadecano	82
	Penta-metil-benzeno	82	Hexadecano	83
	1h-indene, 2,3-dihidro-4,7-dimetil	83	Heptadecano	82
	-		Eicosane	
Madeira	Tolueno	93	Dodecano	82
	α -Xileno	98	Tridecano	80
	1-etil-2-metil-benzeno	95	Tetradecano	80
	1,3,5- trimetil-benzeno	99	Pentadecano	82
	1h-indene, 1,2,3-dihidro-5-metil	95	Hexadecano	83
	Dodecano	81	Heptadecano	82
	Penta-metil-benzeno	89	Eicosane	80
	1h-indene, 2,3-dihidro-4,7-dimetil	93	-	
Espuma	Tolueno	97	Dodecano	97
	α -Xileno	98	Tridecano	98
	1-etil-2-metil-benzeno	95	Tetradecano	95
	1,3,5-trimetil-benzeno	99	Pentadecano	99
	1h-indene, 1,2,3-dihidro-5-metil	98	Hexadecano	95
	Dodecano	95	Heptadecano	93
	Penta-metil-benzeno	90	Eicosane	89
	1h-indene, 2,3-dihidro-4,7-dimetil	89	-	

incêndio. O detalhamento visual da simulação foi apresentado nas Figuras 1S-15S.

Na simulação, foi instalado um dispositivo para que a janela abrisse ao atingir a temperatura de 200 °C, como se houvesse acontecido à quebra, temperatura essa encontrada na literatura nos trabalhos desenvolvidos por Babrauskas.⁴² No tempo de 60 segundos, iniciou-se a queima do colchão da cama superior pelos efeitos do incêndio iniciado no ar condicionado. No tempo de 244 segundos, houve a ignição da escrivaninha e no tempo de 330 segundos, ocorreu o incêndio no colchão da cama inferior.

A Figura 4 demonstra as imagens do ambiente real e do simulado ou virtual obtida a partir do *software* FDS. Considerando que

o ambiente ventilado traz melhores condições de propagação para o incêndio, as conclusões extraídas nesse tipo de ambiente podem ser generalizadas para ambientes que apresentam condições mais desfavoráveis de ocorrer o desenvolvimento do incêndio.

Na Figura 4a observa-se um grande dano ocorrido na região externa à janela do quarto, onde por meio da simulação computacional apresentada na Figura 4c, é possível perceber a grande incidência das chamas na região externa na parede da janela, justificando o alto grau de destruição. Na Figura 4b observa-se um grande dano ocorrido no teto na saída do quarto onde se iniciou o incêndio, e por meio da simulação representada na Figura 4d, é possível notar uma grande incidência das chamas na região do teto.

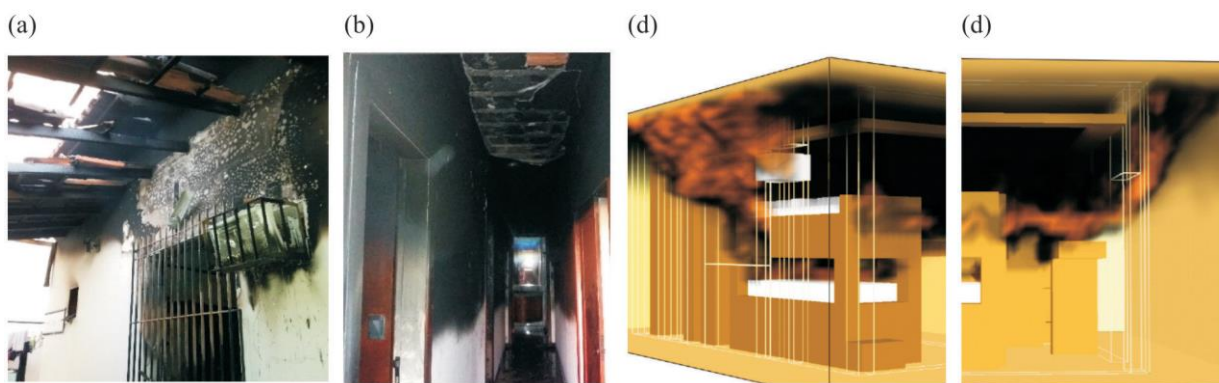


Figura 4. Comparativo com o cenário real do incêndio (a) e (b) com o cenário virtual (c) e (d)

A Figura 5 faz um comparativo entre a exposição sofrida na região do guarda-roupa e prateleiras (b) com os danos encontrados no cenário investigado (a) e (c). Apesar da temperatura que atingiu a parte externa do guarda-roupa chegar a 909 °C ser compatível com a carbonização completa da região,⁴³ convém salientar a baixa condutividade térmica desse tipo de material que varia entre 0,055 a 0,28 W m⁻¹ °C⁻¹,¹⁵ dependendo do tipo de madeira, corroborando ainda mais para uma preservação da parte interior, o que não foram constatados na Figura 5, com um profundo grau de carbonização. Um tempo maior de exposição seria necessário contendo um alto nível de fluxo de calor, para que assim, conseguisse o consumo completo desse tipo de material. Isso também foi perceptível visualmente pela simulação, onde a primeira camada das células de madeira compreendida pela região mais externa não foi consumida com o incêndio.

Os incêndios envolvem reagentes, geralmente combustível e ar, não intimamente misturados em nível molecular antes da combustão. Normalmente, o combustível está no estado sólido ou líquido, portanto, a transferência de material através de um limite de fase (mudança de fase) também deve ocorrer. O combustível vaporizado deve combinar com o oxigênio do ar para formar uma mistura inflamável que, quando inflamada, forma a zona da chama. Na maioria dos problemas de incêndio, essa mistura de vapor de combustível e oxigênio ocorre principalmente por difusão e leva mais tempo em ordem de magnitude do que em uma reação química. Portanto, a difusão de espécies é o principal processo de controle durante esse comportamento de queima.³⁸

A Figura 6 demonstra como ocorreu a variação da temperatura e do fluxo de calor ao longo do incêndio, em um termopar fixado na

região da escrivaninha na entrada do quarto incendiado. Conforme os parâmetros estabelecidos por Braga (2010)²⁵ e por Figueroa e Moraes (2009),⁴³ percebe-se que:

- 1) Os gases oriundos da pirólise da madeira da escrivaninha entraram em ignição em aproximadamente 260 segundos, tendo em vista o fluxo de calor nesse tempo encontrar-se em aproximadamente 13 kW m⁻²;
- 2) No tempo de aproximadamente 320 segundos observou-se a maior temperatura e fluxo de calor registrado nos termopares instalados sobre a escrivaninha. Atingindo um valor de 830 °C de temperatura e 33,5 kW m⁻² de fluxo de calor, no entanto, ambos se mantiveram por pouco tempo, tendo como consequência em virtude do fluxo de calor a ignição espontânea da madeira (sem a necessidade da presença do contato da chama). A temperatura é compatível com a carbonização da madeira, porém, isso só seria perceptível na camada exterior do móvel devido ao pouco tempo que se manteve a essa temperatura, não sendo suficiente para a queima completa;
- 3) Menos de 2 segundos após atingir o fluxo de calor máximo, o fluxo de calor caiu para a metade de seu valor e 8 segundos depois, para um terço do valor máximo, sendo esse valor suficiente para pirolisar o material combustível da escrivaninha.

A Figura 7 apresenta duas lâminas de monitoramento de temperatura que foram posicionadas, sendo uma com visão da região mais próxima ao beliche para parte interna do quarto (a) e outra com a visão da região da porta de acesso para o interior do quarto. A região de cor preta mostra a região do cômodo no qual a temperatura ainda

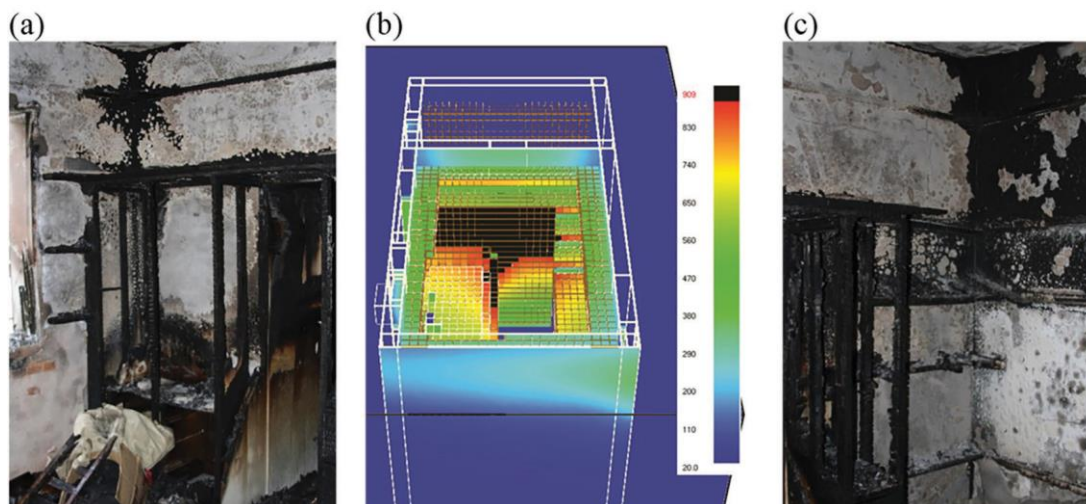


Figura 5. (t = 407 s) - Momento no qual a maior região do guarda-roupa foi exposta a temperatura de 909 °C. (a) Danos ocorridos na região do guarda-roupas. (b) Simulação mostrando a região do guarda-roupas e prateleiras, demarcando o local (cor preta) com a maior temperatura atingida. (c) Danos ocorridos na região das prateleiras em virtude do incêndio

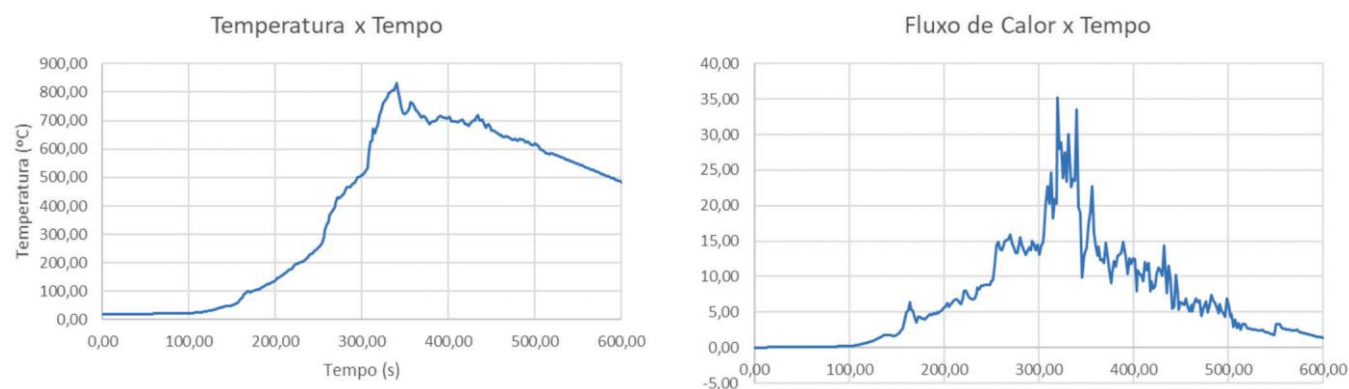


Figura 6. Variação da temperatura e do fluxo de calor do tempo da escrivaninha ao longo do tempo

proporciona condição de permanência de uma pessoa. Em relação às condições de vida no interior do quarto, com base na temperatura monitorada, observa-se que em um tempo de aproximadamente 6 minutos após o início do incêndio, ainda existe uma região no interior do cômodo onde a temperatura permitiria a presença de uma pessoa.

Não se podem desconsiderar os efeitos do fluxo de calor presentes em decorrência do incêndio que está em desenvolvimento, que apesar da temperatura na região demonstrar no tempo de 330 segundos é perfeitamente possível uma pessoa permanecer nessa região, o fluxo de calor poderia não permitir.

Levando-se isso em conta, nesse mesmo tempo registrado pelo termopar da escrivaninha, teve-se um fluxo de calor incompatível com a presença de uma pessoa no interior do ambiente. No entanto, no tempo de 230 segundos, é compatível em ter uma pessoa nessa região do quarto, devido à temperatura e o fluxo de calor serem compatíveis com os limites estabelecidos pelos trabalhos de Braga (2010).²⁵ Na Tabela 3 foi apresentado um resumo de todos os fenômenos observados no cenário de incêndio com o resultado da simulação caso o incêndio tivesse se desenvolvido de maneira natural, sem a utilização de um agente acelerante.

Estudo de caso nº 2

Foram feitos alguns apontamentos baseados nos efeitos da temperatura, fluxo de calor e visibilidade decorrentes do incêndio

que iniciou-se no colchão do quarto por meio da utilização de um dispositivo de acendimento do tipo isqueiro, que foi a hipótese testada para a ocorrência do incêndio. O detalhamento visual da simulação foram apresentados nas Figuras 16S-38S.

Na Figura 8 foi apresentada a temperatura monitorada no interior do quarto ao longo do desenvolvimento do incêndio. Com base nos estudos realizado por Braga (2010),²⁵ identificou-se que a temperatura limite que um ser humano suportaria no interior do ambiente fica em torno de 50 °C, portanto, foi utilizado esse valor para definir como condição inadequada para entrada e permanência de uma pessoa na região. Foram também apresentados os dados referentes à região interna do quarto onde se originou o incêndio, sendo os valores monitorados nas alturas de 0,4; 0,8; 1,2; 1,6 e 2,0 m, traçando-se dessa maneira um perfil das condições alcançadas com o desenvolvimento do incêndio. Com base na Figura 8a, observa-se que essa temperatura na altura de 2,0 m foi atingida no tempo de 77 segundos; na altura de 1,6 m no tempo de 103 segundos; na altura de 1,2 m no tempo de 112 segundos; na altura de 0,8 m no tempo de 146 segundos e na altura de 0,4 m no tempo de 202 segundos.

Na Figura 8b foi apresentada o fluxo de calor monitorado no interior do quarto. Com base nos estudos realizados por Braga (2010),²⁵ identificou-se que o fluxo de calor limite que um ser humano suportaria no interior do ambiente fica em torno de 4,5 kW m⁻², portanto, foi utilizado esse valor para definir como condição inadequada para

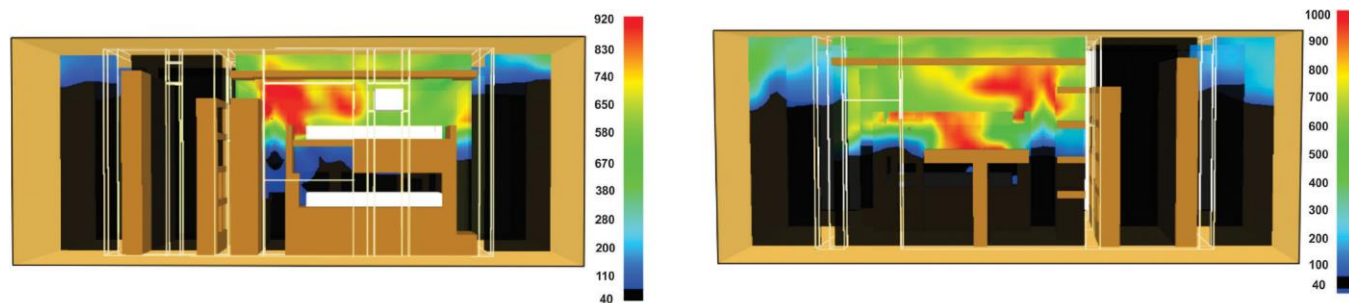


Figura 7. ($T = 330$ s) – Vista Posterior e Frontal – Temperatura de 40 °C na região da cama de inferior e abaixo da escrivaninha (região preta). (a) Corte feito da região próxima a casa. (b) Corte realizado na entrada do quarto

Tabela 3. Resumo dos fenômenos verificados com a simulação com o FDS e constatados no local do incêndio

Fenômeno	No local	Na simulação (FDS)
Destruição da Escrivaninha	Total	Parcial
Danos no Guarda Roupa	Total	Parcial
Queima do Colchão	Total	Parcial
Condição de Entrada no Ambiente (Sem visibilidade)	Adentrou sem causar queimaduras	Causaria queimadura de 2º grau
Condição de Vida do Interior do ambiente	Vítimas Fatais que não se movimentaram	Condições de sobreviver no colchão inferior até 4 minutos

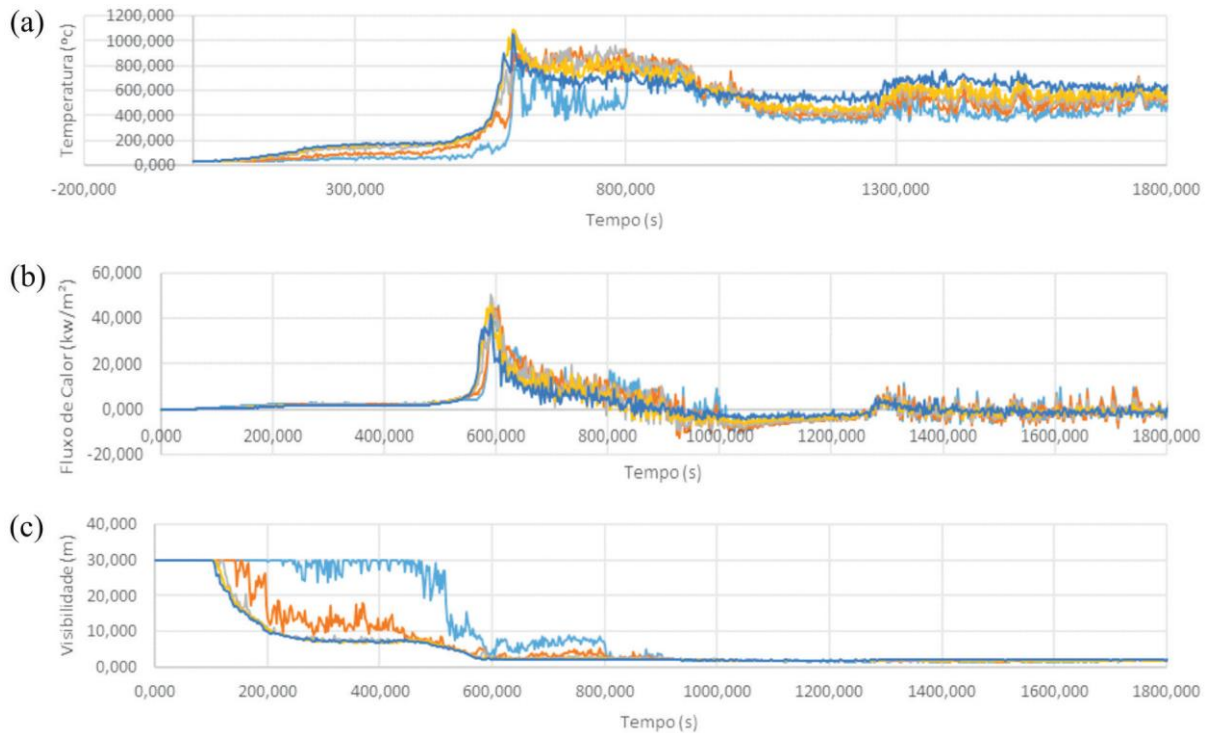


Figura 8. Variação dos parâmetros monitorados no interior do quarto

entrada e permanência de uma pessoa no interior do recinto. Observa-se que esse fluxo de calor na altura de 2,0 m foi atingida no tempo de 540 segundos; na altura de 1,6 m no tempo de 532 segundos; na altura de 1,2 m no tempo de 530 segundos; na altura de 0,8 m no tempo de 532 segundos e na altura de 0,4 m no tempo de 568 segundos.

Na Figura 8c foi apresentada a visibilidade monitorada no interior do quarto. Os valores foram normalizados para uma distância de 30 m, entendendo-se como a visibilidade máxima que uma pessoa consegue atingir. À medida que o incêndio se propaga, em decorrência do acúmulo da fumaça no interior da edificação, esse parâmetro foi alterando, aproximando-se do valor 0 m que corresponde a nenhuma visibilidade do ambiente monitorado. Observa-se que a visibilidade atingiu um valor correspondente a 50% da sua capacidade na altura de 2,0 m no tempo de 160 segundos; na altura de 1,6 m no tempo de 163 segundos; na altura de 1,2 m no tempo de 168 segundos; na altura de 0,8 m no tempo de 208 segundos e na altura de 0,4 m no tempo de 520 segundos. A visibilidade de 10% foi atingida, na altura de 2,0 m, no tempo de 564 segundos; na altura de 1,6 m no tempo de 566 segundos; na altura de 1,2 m no tempo de 571 segundos; na altura de 0,8 m no tempo de 590 segundos e na altura de 0,4 m no tempo de 804 segundos.

Na Figura 9 foram apresentados os dados referentes a região externa do quarto, sendo posicionados os dispositivos para medição na região da entrada da edificação, onde os valores monitorados nas alturas de 0,4 m; 0,8 m; 1,2 m; 1,6 m e 2,0 m, possibilitaram que fosse traçado um perfil das condições alcançadas com o desenvolvimento do incêndio.

Na Figura 9a foi apresentada a temperatura monitorada na entrada da edificação. Observa-se que a temperatura limite suportada pelo ser humano na altura de 2,0 m foi atingida no tempo de 130 segundos; na altura de 1,6 m no tempo de 149 segundos; na altura de 1,2 m no tempo de 196 segundos; na altura de 0,8 m no tempo de 523 segundos e na altura de 0,4 m no tempo de 573 segundos.

Na Figura 9b foi apresentada o fluxo de calor monitorada na entrada da edificação. Observa-se que o fluxo de calor limite suportado pelo ser humano na altura de 2,0 m foi atingida no tempo de 573

segundos; na altura de 1,6 m no tempo de 578 segundos; na altura de 1,2 m no tempo de 581 segundos; na altura de 0,8 m no tempo de 590 segundos e na altura de 0,4 m no tempo de 605 segundos.

Na Figura 9c foi apresentada a visibilidade monitorada na entrada da edificação. Observa-se que a visibilidade atingiu um valor correspondente a 50% da sua capacidade na altura de 2,0 m no tempo de 185 segundos; na altura de 1,6 m no tempo de 201 segundos; na altura de 1,2 m no tempo de 226 segundos; na altura de 0,8 m no tempo de 523 segundos e na altura de 0,4 m no tempo de 561 segundos. A visibilidade 10% foi atingida, na altura de 2,0 m, no tempo de 571 segundos; na altura de 1,6 m no tempo de 578 segundos; na altura de 1,2 m no tempo de 578 segundos; na altura de 0,8 m no tempo de 585 segundos e na altura de 0,4 m no tempo de 619 segundos.

Em relação aos danos observados, foi monitorada a degradação ocorrida no colchão no qual foi iniciado o incêndio, na porta de acesso ao banheiro e no sofá existente na região próxima à entrada da edificação, com base na observação visual da simulação realizada. Em relação aos danos do colchão no qual se iniciou o incêndio, observa-se que em um tempo de 994 segundos após o início da simulação, ocorreu sua total degradação. Em relação ao sofá, observa-se que sua degradação foi iniciada em um tempo de aproximadamente 600 segundos, acentuando-se em um tempo de 750 segundos de simulação. Em relação a porta de entrada do banheiro, observa-se que sua queima iniciou no tempo de aproximadamente 1200 segundos, que sua região onde iniciou a sua degradação corresponde a região superior, ao lado direito de dentro do quarto para a região do banheiro, conforme Figura 10.

Para subsidiar essa análise da degradação da porta do banheiro, foram monitorados a temperatura, fluxo de calor e visibilidade do interior do banheiro a uma altura de 0,4 m. Os valores obtidos foram plotados nas Figuras 11 (a, b e c) e analisados utilizando as premissas anteriormente empregadas. Conforme observado, no tempo de 1270 segundos, foi observado um valor de temperatura de 50 °C e fluxo de calor de 4,5 kW m⁻², que impossibilita a permanência de uma pessoa no ambiente, no tempo de 1277 segundos, visibilidade próximo ao valor de 0 no interior do banheiro.

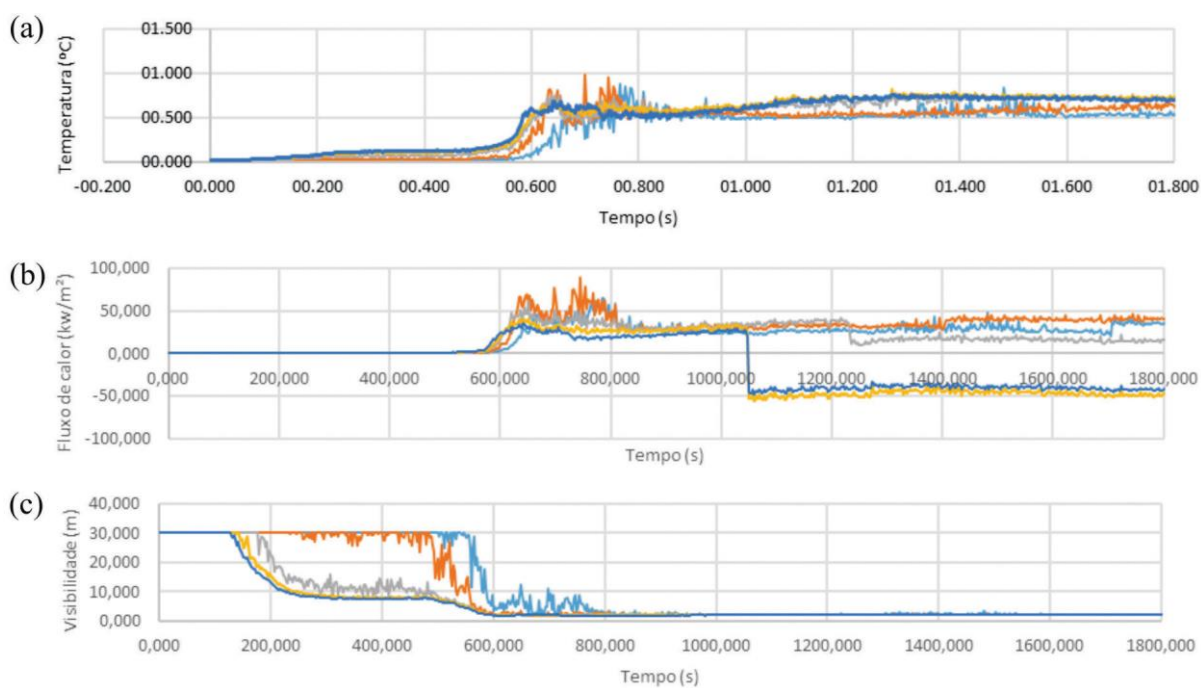


Figura 9. Variação dos parâmetros monitorados na entrada da residência

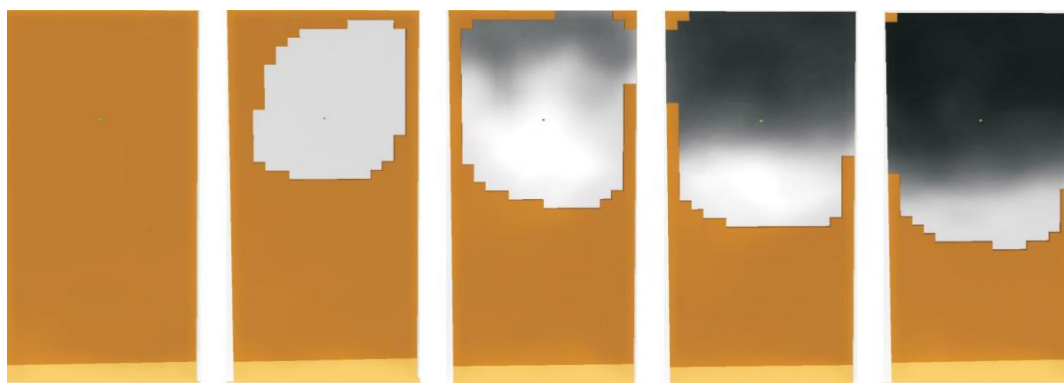


Figura 10. Sentido de degradação da porta de entrada do banheiro

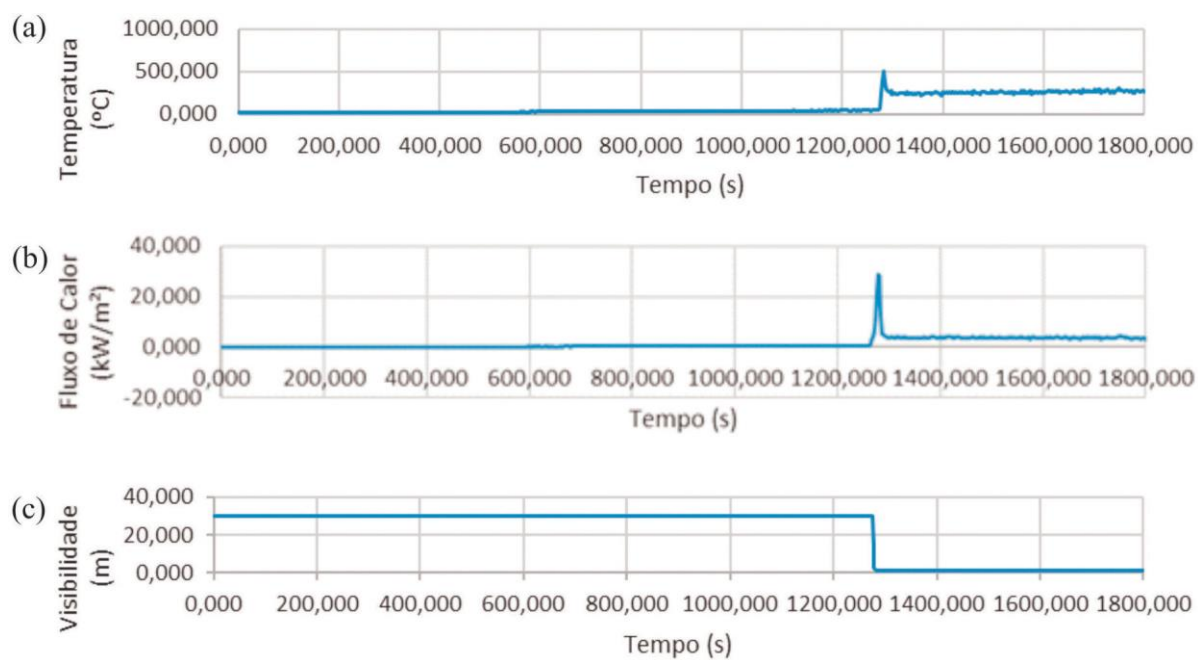


Figura 11. Variação dos parâmetros monitorados no interior do banheiro

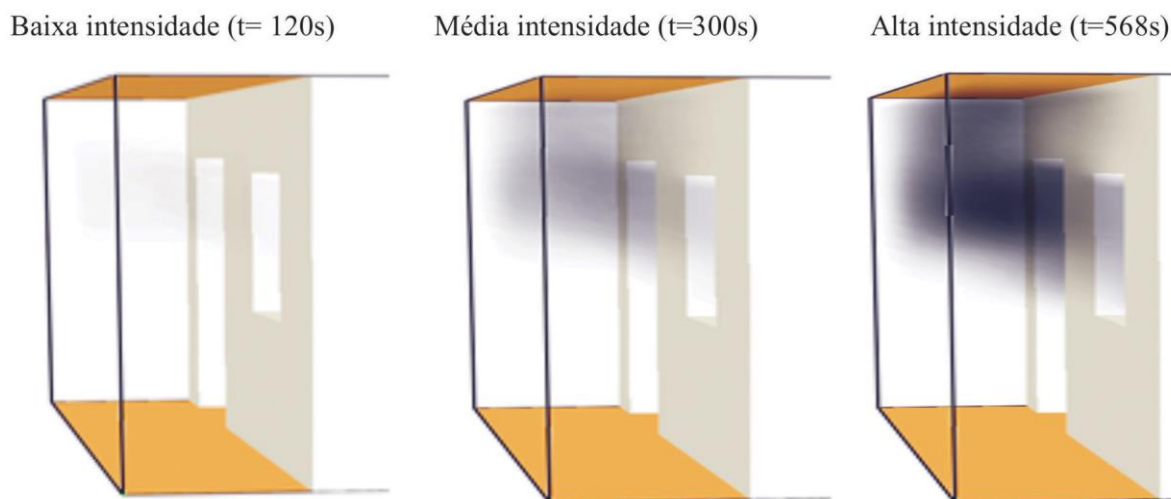


Figura 12. Análise visual da fumaça saindo da edificação que ocorreu o incêndio

A partir da Figura 11, é possível perceber uma alteração abrupta nos valores analisados em um tempo de aproximadamente 1280 segundos, resultante da degradação da porta de entrada do ambiente, o que possibilitou o desenvolvimento do incêndio nessa região na qual se encontrava isolado e com pressão absoluta inferior à do quarto o qual se iniciou o incêndio.

Em relação à visualização da fumaça saindo pela porta, foi realizada uma análise visual da simulação produzida, sendo representada na Figura 12 com os tempos referente a percepção visual que uma pessoa teria visualizando o incêndio pelo lado de fora da edificação.

Observa-se que em um tempo de 120 s, já é possível visualizar a fumaça saindo pela porta de entrada da edificação, tempo no qual uma pessoa ainda seria capaz de adentrar a todo o ambiente, conforme os parâmetros temperatura, fluxo de calor e visibilidade analisados. No tempo de 568 s, visualiza-se uma fumaça de maior intensidade, que coincide com o tempo limite para uma pessoa possa adentrar até na porta do quarto da edificação.

CONCLUSÃO

Os resultados obtidos demonstraram que é possível identificar a presença de gasolina e diesel em diferentes tipos de substratos queimados na presença desses acelerantes e que a utilização da fibra de carbono para a extração e preparação da amostra se mostrou ser um método eficiente. Dessa forma, durante os trabalhos investigativos, pode-se perceber que uma amostra de um material poroso, como uma espuma de colchão, é mais interessante de ser coletada, tendo em vista a melhor resposta na identificação do acelerante de interesse.

Em relação às simulações realizadas, no estudo de caso 1, a destruição completa da escrivaninha e a queima completa do colchão da cama superior não foi observada nos 10 minutos de simulação. Em relação as prateleiras do guarda-roupa presentes no extremo direito do móvel, evidenciou-se que ficaram parcialmente protegidas, mantendo-se uma integridade superior ao restante do guarda-roupa. A destruição generalizada no quarto só seria possível, dentro dos parâmetros estabelecidos, em um tempo superior a 10 minutos. Dessa forma, com um acentuado grau de destruição que ocorreu no cenário de incêndio real em um tempo inferior a 10 minutos, leva-se a uma possível suspeita na utilização de agente acelerante para o rápido desenvolvimento do incêndio.

No estudo de caso 2, os resultados obtidos demonstraram que o limite tolerável para acesso e permanência de uma pessoa agachada a uma altura de 40 cm do solo, se deu até o tempo de aproximadamente 9 minutos e 30 segundos após o início da simulação. No interior do

quarto, o limite tolerável para acesso e permanência de uma pessoa agachada a uma altura de 40 cm do solo, se deu até o tempo de aproximadamente 3 minutos e 30 segundos após o início da simulação. No banheiro do quarto, após um tempo de aproximadamente 21 minutos, o ambiente tornou-se incompatível para a permanência de uma pessoa em seu interior. Em relação aos danos observados, conclui-se que o consumo total do colchão, que foi o foco inicial do incêndio, se deu em um tempo de 16 minutos e 30 segundos, a degradação do sofá em um tempo de 30 minutos. A porta do banheiro foi degradada pela metade em um tempo de aproximadamente 21 minutos após o início do incêndio, com uma direção diagonal e um sentido esquerda descendente.

Desse modo, a análise de acelerante e a simulação usando o FDS demonstraram ser importantes ferramentas para auxiliar o perito na investigação do incêndio para o descarte de hipóteses, auxiliando a entender quais substâncias estão presentes no cenário e as condições que foram atingidas no decorrer do incêndio, no entanto, deve ser encarada como uma ferramenta suplementar, visto que para a correta aproximação da simulação com a realidade, é necessário um conjunto de variáveis que nem sempre estarão disponíveis no cenário de incêndio.

MATERIAL SUPLEMENTAR

Parametrização dos materiais da simulação, figuras demonstrando as etapas dos incêndios simulados, cromatogramas e espectros de massas das análises estão disponíveis em <http://quimicanova.s bq.org.br>, na forma de arquivo PDF, com acesso livre.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES (23038.007083/2014-40), FAPES (EDITAL CNPq/FAPES Nº 23/2018 - Programa de Apoio a Núcleos Emergentes - PRONEM), e a CNPq (422555/2018-5, and 305359/2017-7) pelo suporte financeiro. Os autores também gostariam de agradecer ao Núcleo de Competências em Química do Petróleo e ao LabPetro pelo uso de suas instalações e ao Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Espírito Santo pelas informações fornecidas para o desenvolvimento da pesquisa.

REFERÊNCIAS

1. <https://sesp.es.gov.br/estat%C3%ADsticas-criminais-2>, acessada em Setembro 2019.

2. Ji, J.; Guo, F.; Gao, Z.; Zhu, J.; Sun, J.; *Appl. Therm. Eng.* **2017**, *118*, 663.
3. Heidarinejad, G.; Mapar, M.; Pasharshahri, H.; *Tunnelling and Underground Space Technology* **2016**, *59*, 91.
4. Fan, C.; Zhang, L.; Jiao, S.; Yang, Z.; Li, M.; Liu, X.; *Tunnelling and Underground Space Technology* **2018**, *82*, 99.
5. Rajendram, A.; Khan, F.; Garaniya, V.; *Fire Saf. J.* **2015**, *71*, 79.
6. Gong, X.; Agrawal, A. K.; *Journal of Bridge Engineering* **2016**, *21*, 82.
7. Ding, Y.; Yang, L.; Weng, F.; Fu, Z.; Rao, P.; *Simulation Modelling Practice and Theory* **2015**, *53*, 60.
8. Falatová, B.; Ferreira-González, M.; Kašková, D.; Galla, S.; Palma, M.; Barroso, C. G.; *Acta Fac. Xylol. Zvolen* **2019**, *61*, 111.
9. Ferreira-González, M.; Ayuso, J.; Álvarez, J. A.; Palma, M.; Barroso, C. G.; *Talanta* **2015**, *142*, 150.
10. Ferreira-González, M.; Barbero, G. F.; Palma, M.; Ayuso, J.; Álvarez, J. A.; Barroso, C. G.; *Sensors* **2016**, *16*, 695.
11. Montani, I.; Comment, S.; Delémont, O.; *Forensic Sci. Int.* **2010**, *194*, 115.
12. National Fire Protection Association; *NFPA 921: Guide for Fire & Explosion Investigations*; Technical Committee on Fire Investigations, 2013.
13. Salgueiro, P.; Borges, C.; da Silva, R. J. N. B.; *J. Chromatogr. A* **2012**, *1257*, 189.
14. De Haan, J. D.; Icove, D. J.; *Kirk's Fire Investigation: Pearson New International Edition*; Pearson Higher Education: London, England, 2013.
15. Cote, A. E.; *Fire protection handbook*; National Fire Protection Association, Quincy, MA, USA, 2008.
16. Heath, K.; Kobus, H.; Byard, R. W.; *Journal of Forensic and Legal Medicine* **2011**, *18*, 49.
17. Grob, R. L.; Barry, E. F.; *Modern Practice of Gas Chromatography*; John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, 2004.
18. Martín-Alberca, C.; Ortega-Ojeda, F. E.; García-Ruiz, C.; *Anal. Chim. Acta* **2016**, *928*, 1.
19. ASTM E1412-00: *Standard Practice for Separation of Ignitable Liquid Residues from Fire Debris Samples by Passive Headspace Concentration with Activated Charcoal*; ASTM International, West Conshohocken, PA, 2000.
20. Salgueiro, P. A. S.; Borges, C. M. F.; da Silva, R.; *J. Chromatogr. A* **2012**, *1257*, 189.
21. Prather, K. R.; McGuffin, V. L.; Smith, R. W.; *Forensic Sci. Int.* **2012**, *222*, 242.
22. Lopatka, M.; Sigman, M. E.; Sjerps, M. J.; Williams, M. R.; Vivó-Truyols, G.; *Forensic Sci. Int.* **2015**, *252*, 177.
23. Sandercock, P. M. L.; J. - *Can. Soc. Forensic Sci.* **2016**, *49*, 176.
24. McGrattan, K.; Hostikka, S.; McDermott, R.; Floyd, J.; Weinschenk, C.; Overholt, K.; *Fire Dynamics Simulator (version 6.5.3): User's guide*; National Institute of Standards and Technology: Gaithersburg, 2017.
25. Braga, G. C. B.; *XI Seminário Nacional de Bombeiro/SENABOM*, Blumenau, Santa Catarina, Brasil, 2010.
26. <http://www.periodicos.capes.gov.br>, acessada em Setembro 2019.
27. Yong-Hak, J.; *Web of Science*; Thomson Reuters, 2013.
28. McGrattan, K. B.; Bouldin, C.; Forney, G. P.; *Computer simulation of the fires in the World Trade Center Towers*; US Department of Commerce, Technology Administration, National Institute of Standards and Technology: Washington, Gaithersburg, 2005.
29. Grosshandler, W.; Bryner, N.; Madrzykowski, D.; Kuntz, K.; *Report of the technical investigation of The Station Nightclub fire*, vol. 1; Escritório de Impressão do Governo dos EUA: Washington, DC, 2005.
30. Madrzykowski, D.; Vettori, R. L.; *Simulation of the dynamics of the fire at 3146 Cherry Road NE, Washington DC, May 30, 1999*; US Department of Commerce, Technology Administration, National Institute of Standards and Technology: Washington, Gaithersburg, 2000.
31. Madrzykowski, D.; Forney, G. P.; Walton, W. D.; *Simulation of the dynamics of a fire in a two-story duplex-Iowa, December 22, 1999*; US Department of Commerce, Technology Administration, National Institute of Standards and Technology: Washington, Gaithersburg, 2002.
32. Bryner, N. P.; Kerber, S.; *Simulation of the Dynamics of a Fire in the Basement of a Hardware Store-New York, June 17, 2001*; National Institute of Standards and Technology, Building and Fire Research Laboratory, Gaithersburg, 2004.
33. Barowy, A.; Madrzykowski, D.; *Simulation of the Dynamics of a Wind-driven Fire in a Ranch-style House, Texas*; National Institute of Standards and Technology, Fire Research Division Engineering Laboratory, Gaithersburg, 2012.
34. Speight, J. G.; *The chemistry and technology of petroleum*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2014.
35. ASTM E1387-01: *Standard Test Method for Ignitable Liquid Residues in Extracts from Fire Debris Samples by Gas Chromatography (Withdrawn 2010)*; ASTM International, West Conshohocken, PA, 2001.
36. https://sistemasinter.cetesb.sp.gov.br/produtos/ficha_completa1.asp?consulta=%C3%93LEO%20DIESEL, acessada em Agosto 2019.
37. https://sistemasinter.cetesb.sp.gov.br/produtos/ficha_completa1.asp?consulta=GASOLINA:%20NATURAL, acessada em Agosto 2019.
38. Hurley, M. J.; Gottuk, D. T.; Hall Jr., J. R.; Harada, K.; Kuligowski, E. D.; Puchovsky, M.; Wieczorek, C. J.; *SFPE handbook of fire protection engineering*; Springer: New York, USA, 2015.
39. Norma técnica 04/2009: *Carga de incêndio nas edificações e áreas de risco*; Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Espírito Santo: Vitória, 2019.
40. Stauffer, E.; Byron, D.; *Forensic Sci. Int.* **2007**, *52*, 371.
41. Visotin, A.; Lennard, C.; *Aust. J. Forensic Sci.* **2016**, *48*, 203.
42. Babrauskas, V.; *Glass breakage in fires*; Fire Science and Technology, Inc.: Issaquah, WA, 2011.
43. Figueroa, M. J. M.; de Moraes, P. D.; *Ambiente Construído* **2009**, *9*, 157.