



Centro Universitário de Brasília – Uniceub

Faculdade de Tecnologia e Ciências Aplicadas- FATECS

GUILHERME DE OLIVEIRA BORGES

**SIMULAÇÃO DE INCÊNDIO UTILIZANDO O SOFTWARE FIRE
DYNAMICS SIMULATOR**

BRASÍLIA

2018

GUILHERME DE OLIVEIRA BORGES

SIMULAÇÃO DE INCÊNDIO UTILIZANDO O SOFTWARE FDS

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de graduação em Engenharia Civil do Centro Universitário de Brasília como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Dr. Honório Assis Filho Crispim.

BRASÍLIA

2018

GUILHERME DE OLIVEIRA BORGES

SIMULAÇÃO DE INCÊNDIO UTILIZANDO O SOFTWARE FDS

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de graduação em Engenharia Civil do Centro Universitário de Brasília como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Dr. Honório Assis Filho Crispim.

Brasília, 29 de junho de 2018.

Banca Examinadora

Eng^o. Civil: Dr. Honório Assis Filho Crispim
Orientador

Professor: Dr. Marcos Rafael Guassi
Examinador Interno

Eng^o. Civil: Rogério Alves Dutra - Tenente Coronel do CBMDF
Examinador Externo

AGRADECIMENTOS

Ao apoio dos meus familiares que desde o início estiveram me apoiando e me dando força para concluir com sabedoria e perseverança um dos meus maiores desafios.

A Deus que me deu saúde e força para lutar e superar os bloqueios encontrados durante esta trajetória.

A minha namorada pelos momentos de apoio e confiança durante a constituição deste trabalho acadêmico.

Ao Uniceub - Centro Universitário de Brasília que durante os cinco anos de curso me permitiu ampliar meus horizontes para melhor encarar minha vida profissional.

E ao meu professor orientador por ter me guiado e impulsionado para atingir resultados positivos tanto em meu trabalho de conclusão quanto a ensinamento que levarei para o resto da vida.

“A vida é demasiado curta para nos permitir interessar-nos por todas as coisas, mas é bom que nos interessemos por tantas quantas forem necessárias para preencher os nossos dias.”

(Bertrad Russell)

RESUMO

A simulação computacional de incêndio é uma ferramenta que permite saber o comportamento da estrutura tanto de uma residência quanto de grandes edificações, sem que haja gastos com ensaios destrutivos. Por meio de alguns softwares é possível obter resultados com excelentes aproximações da realidade, os quais utilizados neste trabalho foram o FDS (Fire Dynamics Simulator), SMV (Smokeview) e o Pyrosim. Em virtude da facilidade que o Pyrosim proporciona ao usuário, que possui o FDS e o SMV integrados ao programa. Este foi desenvolvido pela empresa Thunderhead Engineering para auxiliar na simulação de incêndio composta por diversos elementos. Esse trabalho mostra o desenvolvimento da simulação computacional de incêndio de uma residência de dois pavimentos. Para melhor aproximar a simulação da realidade, as composições dos elementos a serem utilizados, como por exemplo madeira, plásticos, etc., foram as comumente encontradas na literatura. Também é necessário arbitrar o tempo de duração do incêndio, neste caso foi adotado 10 minutos em função do esforço computacional que é encontrado ao iniciar o processo. Como resultado deste tempo e da temperatura máxima de 520 ° C, não houve a observação do flashover, que significa o crescimento do incêndio até que os materiais combustíveis atinjam a temperatura para queima instantânea e concomitante desses materiais. As temperaturas notáveis, em uma simulação de grande duração podem ser obtidas para estudar o comportamento da estrutura quando submetida a altas temperaturas. Nesse estudo, especificamente, não se faz menção aos efeitos das temperaturas sobre vigas, pilares e lajes.

Palavras-chave: Simulação de Incêndios. Fire Dynamics Simulator. Incêndios em Residências. Centro Universitário de Brasília – Uniceub.

ABSTRACT

The computational simulation of fire is a tool that allows to know the behavior of the structure of both a dwelling and large buildings, without spending on destructive tests. By means of some softwares it is possible to obtain results with excellent approximations of the reality, which used in this work were Fire Dynamics Simulator (FDS), SMV (Smokeview) and Pyrosim. Because of the ease that Pyrosim provides to the user, it has FDS and SMV integrated into the program. This was developed by the company Thunderhead Engineering to aid in the simulation of fire composed of several elements. This work shows the development of computational fire simulation of a two-floor residence. To better approximate the simulation of reality, the compositions of the elements to be used, such as wood, plastics, etc., were those commonly found in the literature. It is also necessary to arbitrate the duration of the fire, in this case was adopted 10 minutes in function of the computational effort that is found when starting the process. As a result of this time and the maximum temperature of 520 ° C, there was no observation of the flashover, which means the growth of the fire until the combustible materials reach the temperature for instantaneous and concomitant burning of these materials. The remarkable temperatures, in a simulation of great duration can be obtained to study the behavior of the structure when subjected to high temperatures. In this study, specifically, no mention is made of the effects of temperatures on beams, pillars and slabs.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1– INCÊNDIO GRAN CIRCUS NORTE – AMERICANO	17
FIGURA 2- INCÊNDIO EDIFÍCIO JOELMA	18
FIGURA 3 - INCÊNDIO BOATE KISS	19
FIGURA 4- MODOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	24
FIGURA 5 - CHOQUE MOLECULAR.....	25
FIGURA 6 - PAREDE PLANA UNIDIMENSIONAL	26
FIGURA 7 - TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO	27
FIGURA 8 - TIPOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONVECÇÃO.....	28
FIGURA 9 - REPRESENTAÇÃO DA ENERGIA IRRADIADA EM UMA SUPERFÍCIE	30
FIGURA 10 - FDS	46
FIGURA 11- REPRESENTAÇÃO DE UMA EDIFICAÇÃO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO	47
FIGURA 12- REPRESENTAÇÃO PROGRAMA PYROSIM.	48
FIGURA 13 - REPRESENTAÇÃO DO EXPERIMENTO DA VELA	49
FIGURA 14 - PLANTA BAIXA DO TÉRREO	54
FIGURA 15 - PLANTA BAIXA DO PRIMEIRO PAVIMENTO	54
FIGURA 16 - CASA LANÇADA NO FDS	55
FIGURA 17 - PRIMEIRO PAVIMENTO	55
FIGURA 18 - SEGUNDO PAVIMENTO	55
FIGURA 19 - COMPORTAMENTO DO FLUIDO E DA TEMPERATURA AO LONGO DO INCÊNDIO	57
FIGURA 20 - TAXA DE LIBERAÇÃO DE CALOR.....	58
FIGURA 21 - ESCOAMENTO DO FLUIDO EM UMA VISÃO GLOBAL	59
FIGURA 22 - DEMONSTRAÇÃO DE ESCOAMENTO ENTRE PAVIMENTOS	59

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - UNIDADES DE R	31
TABELA 2 - CAPACIDADES DE CALOR DE GASES SELECIONADOS A PRESSÃO CONSTANTE (101,1 KN/M ²) ⁵	35
TABELA 3 – CALORES DE COMBUSTÃO DE COMBUSTÍVEIS SELECIONADOS A 25°C (298K).....	39

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ATM – Atmosfera

CBMDF – Corpo de Bombeiros Militar do Distrito Federal

CFD – *Computer Fluid Dynamics*

FDS – *Fire Dynamics Simulator*

NIST – *The National Institute of Standards and Technology*

RS – Rio Grande do Sul

SMV – *Smokeview*

LISTA DE SÍMBOLOS

q''_x = Fluxo térmico dado em (W/m^2);

dT/dx = Gradiente de temperatura na direção X;

-K = Parâmetro de condutividade térmica

T(x) = Temperatura

T1 = Temperatura 1

T2 = Temperatura 2

ΔT = Temperatura 1 - Temperatura 2

A = Área (m²)

L = Comprimento (m)

q_x = Taxa de transferência de calor (W)

T_s – Temperatura superfície

T_∞ - Temperatura do fluido

h – Coeficiente de transferência de calor por convecção

E_b = Taxa de energia liberada em (W/m^2)

T_s = Temperatura absoluta (K) da superfície

σ = Constante de Stefan-Boltzmann

E é a taxa de energia liberada pela superfície real em relação ao corpo negro em (W/m^2)

T_s = temperatura absoluta da superfície

ϵ = emissividade do material

K = Temperatura absoluta (Kelvin)

G_{abs} = Energia absorvida por irradiação

G = Total de energia por irradiação incidida na superfície

P = Pressão

V = Volume de n moles de gás

q = Calor transferido para o sistema

ω = Trabalho realizado pelo sistema

F = Força

q_v = Calor transferido para o volume constante do sistema

V_1 = Volumes inicial

V_2 = Volume final

ΔH = Entalpia

ΔE = Energia interna

ΔH_c = Calor de combustão

σ = Tensão normal

τ = Tensão de cisalhamento

P = Pressão estática

SUMÁRIO

Sumário

AGRADECIMENTOS	4
RESUMO	6
ABSTRACT.....	7
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	8
LISTA DE TABELAS	9
LISTA DE SIGLAS	10
LISTA DE SÍMBOLOS	11
SUMÁRIO	13
1 INTRODUÇÃO	15
2 OBJETIVOS.....	16
2.1 Objetivo Geral	16
2.2 Objetivos Específicos.....	16
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1 Histórico de Incêndios no Brasil	17
3.2 Normas dos Corpos de Bombeiro dos Estados.....	19
3.3 O Corpo de Bombeiros Militar do Distrito Federal – CBMDF	20
3.3.1 Departamento de Segurança Contra Incêndio – DESEG.....	20
3.3.2 Normas	21
3.4 Transferência de Calor e Massa	23
3.4.1 Calor.....	23
3.4.2 Modos de Transferência de Calor.....	23
3.4.3 Transferência de Calor por Condução	24
3.4.4 Transferência de Calor por Convecção.....	27
3.4.5 Transferência de Calor por Radiação	28
3.5 Termoquímica- Conceito Geral	31
3.5.1 Termoquímica.....	31

3.5.2	Calor específico	34
3.5.3	Calor de Combustão	36
3.5.4	Medição de Calor de Combustão.....	37
3.6	Simulação Computacional de Incêndio	41
3.6.1	Flashover.....	41
3.6.2	Modelamento Computacional	42
3.7	Softwares e Simulação	43
3.7.1	FDS (Fire Dynamics Simulator)	43
3.7.2	Smokeview	46
3.7.3	Pyrosim	47
3.8	Experimento da vela	48
4	METODOLOGIA.....	50
4.1	Apresentação.....	50
4.2	Classificação da pesquisa.....	50
4.2.1	Quanto à finalidade.....	50
4.2.2	Quanto a forma de abordagem.....	51
4.2.3	Quanto ao objetivo geral.....	51
4.2.4	Quanto aos procedimentos técnicos	51
4.2.5	Quanto à natureza das variáveis	52
4.2.6	Quanto a obtenção dos dados	52
5	DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO	53
6	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	57
7	CONCLUSÃO.....	60
8	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	61
	REFERÊNCIAS	62

1 INTRODUÇÃO

O fogo esteve presente em boa parte da vida dos seres humanos, como se conhece tem estudos que comprovam a existência do fogo e sua manipulação desde os primórdios. Com o aprimoramento da manipulação do fogo os seres humanos utilizavam para se aquecer, preparar seus alimentos, garantir distância de seus predadores e diversas outras utilizações. A presença do fogo e a evolução do homem foram marcadas por diversos casos de incêndios, pois a proximidade do fogo aos materiais combustíveis que eram e ainda são utilizados em residências e edificações foram fatais em diversos casos.

O Brasil, já na década de 1970, foi marcado por vários grandes casos devido à má utilização dos materiais e o pouco aprimoramento ao combate ao incêndio. Alguns incêndios foram marcantes para a história brasileira como o do edifício Andraus (1972) e o edifício Joelma (1974), após estes e outros casos a legislação e o aprimoramento ao combate ao fogo foram colocados em pauta de reuniões. O Corpo de Bombeiros na época possuía uma regulamentação básica, que era contida nas medidas de combate ao incêndio, localização dos hidrantes e extintores e as sinalizações adequadas dos equipamentos de combate ao fogo.

A simulação computacional de incêndio permite solucionar os problemas pertinentes a dinâmica do fogo e combate ao fogo. Este estudo possibilita saber o comportamento da edificação e a melhor forma de evacuação do local, pois os softwares fornecem a dinâmica e a temperatura dos cômodos da residência.

Este trabalho analisou uma residência com dois pavimentos, onde foi arbitrado o ponto de ignição do fogo (sofá da sala) e após este processo foi observado o comportamento da dinâmica do fogo e a propagação para os demais cômodos da residência.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Realizar uma simulação computacional de incêndio utilizando o software FDS (Fire Dynamics Simulator), para obter resultados do comportamento do fogo, como a temperatura crítica e dinâmica do incêndio. Após a simulação, por meio do Smokeview visualizar o elemento simulado software Pyrosim.

2.2 Objetivos específicos

- Apresentar de forma sucinta as histórias de incêndios e as normas dos Corpos de Bombeiros dos Estados;
- Expor a teoria básica de transferência de calor e massa, com ênfase nos modelos utilizados na implementação do FDS;
- Apresentar uma visão integrada do que é a simulação computacional de incêndio;
- Explicar de forma clara, concisa e precisa o que são os softwares Pyrosim, FDS e Smokeview.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Histórico de Incêndios no Brasil

O Brasil até a década de 60 possuía grande parte da população ainda nos campos e com o passar dos anos ocorreu uma migração do campo para as cidades na esperança de melhores condições de vida e com isto sobrecarregou diversos setores das cidades que não tinham condições de oferecer para os cidadãos segurança e infraestrutura. Um bom exemplo de cidade que recepcionou pessoas de todo o Brasil, foi São Paulo que na época era uma das maiores cidades e que oferecia maiores oportunidades de emprego, e com o esforço para construir a infraestrutura e as edificações necessárias para atender a todos, foi negligenciada medidas de segurança das estruturas que na época utilizavam materiais inflamáveis e tóxicos.

Toda a história do Brasil foi marcada por diversos casos de incêndio de grande porte, como o caso de um ex-funcionário de um circo (Gran Circus Norte-Americano) que tinha acabado de chegar no Rio de Janeiro em 1961. O rapaz na tentativa de se vingar do ex-chefe ateou gasolina e fogo na lona constituída de nylon que rapidamente propagou o fogo para todo o circo, causando a morte de 503 pessoas que assistia o espetáculo.

Figura 1– Incêndio Gran Circus Norte – Americano



FONTE: Bomfin (1961)

Já em 1974 tivemos outro grande caso de incêndio que ocorreu na cidade de São Paulo, por causa de um curto-circuito em um aparelho de ar condicionado do décimo segundo andar do Edifício Joelma. Em um curto prazo o fogo já tinha atingido os móveis, forros e os plásticos que se tornaram combustíveis do incêndio, e com isto a velocidade de propagação do fogo aumentou rapidamente

chegando até as escadas. Com o bloqueio da saída de emergência as pessoas não tiveram como evacuar o edifício, causando a morte de 188 pessoas, após este acontecimento as autoridades começaram a debater sobre a segurança e preparo para a prevenção ao combate a incêndio.

Figura 2- Incêndio Edifício Joelma



FONTE: Eivind Molberg (1964)

Recentemente outro caso chocou todo o Brasil, este incêndio ocorreu em uma boate na cidade de Santa Maria (RS), o incêndio teve início no palco da boate quando disparado um sinalizador em direção ao teto que pegou fogo e liberou grande quantidade de fumaça tóxica. A boate não tinha a quantidade de saídas de emergência adequadas para o número de pessoa que estava dentro do local e fora este problema os seguranças foram orientados a barrar todas as pessoas que ainda não tinham pago a conta, gerando a morte de 242 pessoas. Este caso voltou a atenção das autoridades para estes estabelecimentos, pois inúmeros locais verificados após o evento estavam foram das regulamentações adequadas e além deste problema utilizavam materiais inflamáveis para isolamento termo acústico.

Figura 3 - incêndio Boate Kiss



FONTE: Germano Rorrato (2013)

3.2 Normas dos Corpos de Bombeiro dos Estados

Os incêndios até o início dos anos 70 eram vistos como responsabilidade do Corpo de Bombeiros. A regulamentação era demasiada, contida apenas nos códigos de obras dos municípios, não tendo uma visão globalizada do exterior que já estava à frente do Brasil no quesito incêndio. Antigamente os projetos de incêndio de edificações se preocupavam quanto a largura das saídas, construção da escada com materiais não combustíveis e com a estrutura de edifícios altos. O Corpo de Bombeiros na época possuía uma regulamentação básica, que era contida nas medidas de combate ao incêndio, localização dos hidrantes e extintores e as sinalizações adequadas dos equipamentos de combate ao fogo.

Na década de 70 houve um grande avanço na regulamentação das normas de segurança contra incêndio, pois ocorreu dois grandes incêndios que foram o do edifício Joelma e do edifício Andraus. Após uma semana do ocorrido no edifício Joelma a Prefeitura de São Paulo editou o decreto de nº 10.878 e posteriormente surgiu a Lei nº 8266/1975 que era o código de edificações para o município de São Paulo. Também no mesmo período surgiu a norma publicada pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), a NB 208 que regulamentava as saídas de emergência em edifícios altos. Neste período foram realizados vários simpósios e elaborações de relatórios para melhorias no sistema de combate ao incêndio, no âmbito político os poderes legislativo e executivo fizeram diversas melhorias na normatização.

Os Corpos de Bombeiros atualmente possuem diversas ferramentas para melhoria ao combate a incêndio, sendo que em cada estado brasileiro funciona de forma particular.

3.3 O Corpo de Bombeiros Militar do Distrito Federal – CBMDF

De acordo com o site do corpo de bombeiros do Distrito Federal (<https://www.cbm.df.gov.br/>) , a instituição surgiu em 1960 após a mudança da Capital Federal, do então Estado da Guanabara (atual Rio de Janeiro - RJ), para Brasília. Com o passar dos anos a capital tem crescido e se desenvolvido, surgiram várias cidades periféricas e a quantidade de habitantes também cresceu significativamente.

Com essa evolução o corpo de bombeiros também precisou se evoluir para atender a demanda e cumprir com afincos os deveres definidos por lei, estabelecida pela Constituição Federal, em seu artigo 144, pela Lei Federal nº 8.255/91, alterada pela Lei Federal nº 12.086/2009, consiste em proporcionar a proteção pessoal e patrimonial da sociedade e do meio ambiente, por meio de ações de prevenção, combate e investigação de incêndios urbanos e florestais, salvamento, atendimento pré-hospitalar e ações de defesa civil, no âmbito do Distrito Federal.

Para desempenhar da melhor maneira sua missão, a instituição tem departamentos que facilitam a organização e o trato com a população. Um desses departamentos é a DESEG que é o Departamento de Segurança Contra Incêndio do Corpo de Bombeiro do DF.

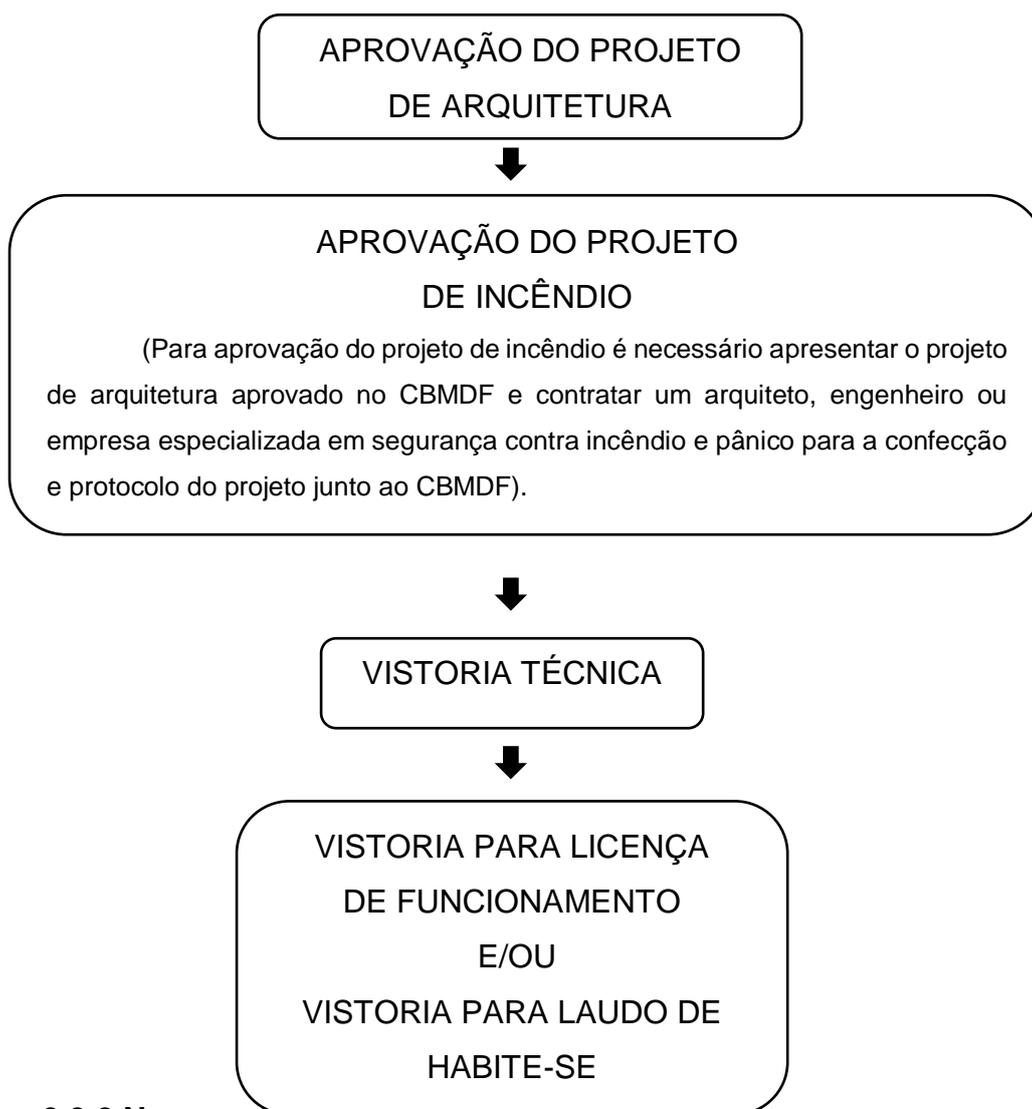
3.3.1 Departamento de Segurança Contra Incêndio – DESEG

Este é responsável por aprovar, fiscalizar e investigar as exigências e o funcionamento dos sistemas de segurança contra incêndio e pânico, otimizando a segurança dos frequentadores e usuários das edificações no âmbito do Distrito Federal (CRISPIM b, 2017).

O DESEG presta vários serviços à população que são: protocolo de toda e qualquer documentação relativa à pedido e acompanhamento de vistorias,

licença de funcionamento, licença de funcionamento de eventos; habite-se, projeto de arquitetura, projeto de instalações de Segurança contra Incêndio, credenciamento de empresas e profissionais, atividades de Brigada Particular de Incêndio, etc.

No site do CBMDF existe aba específica sobre esse departamento onde é possível esclarecer dúvidas e baixar a Normas Técnicas exigidas pela corporação para a realização e aprovação dos projetos, que podem ser sintetizados no fluxograma abaixo.



3.3.2 Normas

Para a elaboração dos projetos de prevenção e combate a incêndio deve-se seguir a legislação decretada pelo CBMDF, que em síntese, são:

- DECRETO n.º 23.015, de 11 de junho de 2002

- DECRETO n.º 21361, de 20 de julho de 2000 - Regulamento de Segurança Contra Incêndio do DF
- LEI Nº 2.747, de 20 de julho de 2001
- DECRETO Nº 23.154, de 09 de agosto de 2002
- NT nº 01/2015 Medidas de Segurança Contra Incêndio no Distrito Federal
- NT nº 02/2015 Risco de Incêndio e Carga de Incêndio
- NT nº 03/2015 Sistema de Proteção por Extintores de Incêndio
- NT nº 04/2015 Sistema de Proteção por Hidrantes
- NT nº 05/2015 Central Predial de GLP
- NT nº 06/2015 Emissão de Certificado de Credenciamento
- NT nº 07/2015 Brigada de Incêndio
- NT nº 08/2015 Fogos de Artifício
- NT nº 09/2015 Atividades Eventuais
- NT nº 10/2015 Saídas de Emergência
- NT nº 11/2015 Acesso de Viaturas
- NT nº 12/2015 Padronização Gráfica de Projetos
- NT nº 18/2015 Extintores de Incêndio
- NT nº 19/2015 Cadastramento de Empresa de Fabricação
- NT nº 20/2015 Apreensão de Equipamentos de Segurança Contra Incêndio e Pânico
- ABNT NBR 10898/2013 Sistema de iluminação de emergência;
- ABNT NBR 13434-1/2004 Sinalização de segurança contra incêndio e pânico, Parte 1: Princípios de projeto;
- ABNT NBR 13434-2/2004 Sinalização de segurança contra incêndio e pânico, Parte 2: Símbolos e suas formas, dimensões e cores;
- ABNT NBR 5419-1/2015 - Proteção contra descargas atmosféricas, Parte 1 - Princípios Gerais
- ABNT NBR 12693/2013 Sistemas de proteção por extintor de incêndio;
- ABNT NBR 13523/2017 Central de gás liquefeito de petróleo – GLP;
- ABNT NBR 14880/2014 Saídas de emergência em edifícios escadas de segurança – Controle de fumaça por pressurização;

- ABNT NBR 15514/2007 - Área de armazenamento de recipientes transportáveis de gás liquefeito de petróleo (GLP), destinados ou não à comercialização - Critérios de segurança;
- ABNT NBR 17240/2010 Sistemas de detecção e alarme de incêndio – Projeto, instalação, comissionamento e manutenção de sistemas de detecção e alarme de incêndio – Requisitos;
- NR 10 - Segurança em instalações e serviços em eletricidade;
- NR 20 - Segurança e saúde no trabalho com inflamáveis e combustíveis;
- NR 26 - Sinalização de Segurança;

Para facilitar o CBMDF disponibiliza em seu site uma lista de verificação, onde é possível o projetista ver os passos e as leis necessárias para a realização de um projeto que cumpra todas as leis exigidas pela corporação.

3.4 Transferência de Calor e Massa

3.4.1 Calor

A ocorrência de calor por condução ou convecção se dá quando no meio possui diferença de temperatura, sendo este meio sólido ou fluido. Na busca de um equilíbrio ocorre o que chamamos de calor, que é a transferência de energia térmica entre as duas partes que estão em potenciais diferentes de temperatura. Outro modo de transferência de calor é a radiação térmica, que não necessita do meio para se propagar.

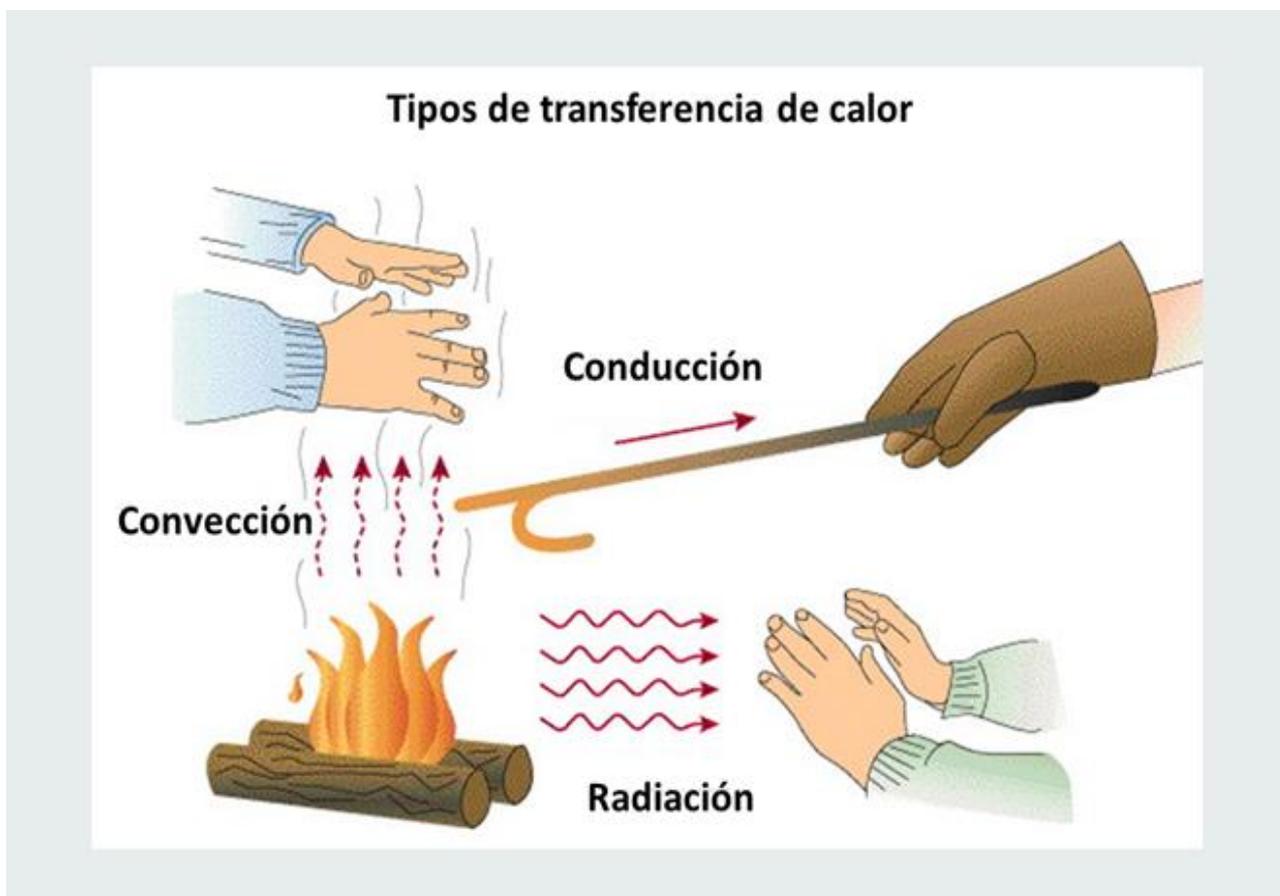
3.4.2 Modos de Transferência de Calor

A transferência de calor ocorre por três modos básicos que é: condução, convecção e radiação, sendo que a condução é a transferência de calor que ocorre através do meio, diferenciando por exemplo da convecção que é a transferência de calor que ocorre entre superfície e um fluido em movimento quando estes estiverem com temperaturas diferentes. Já a radiação ocorre a transferência de calor por todas as superfícies que não possuem energia

térmica nula, emitindo energia na forma de ondas eletromagnéticas. Esta transferência chamamos de radiação térmica.

A figura abaixo representa os três modos de transferência de calor:

Figura 4- Modos de Transferência de Calor

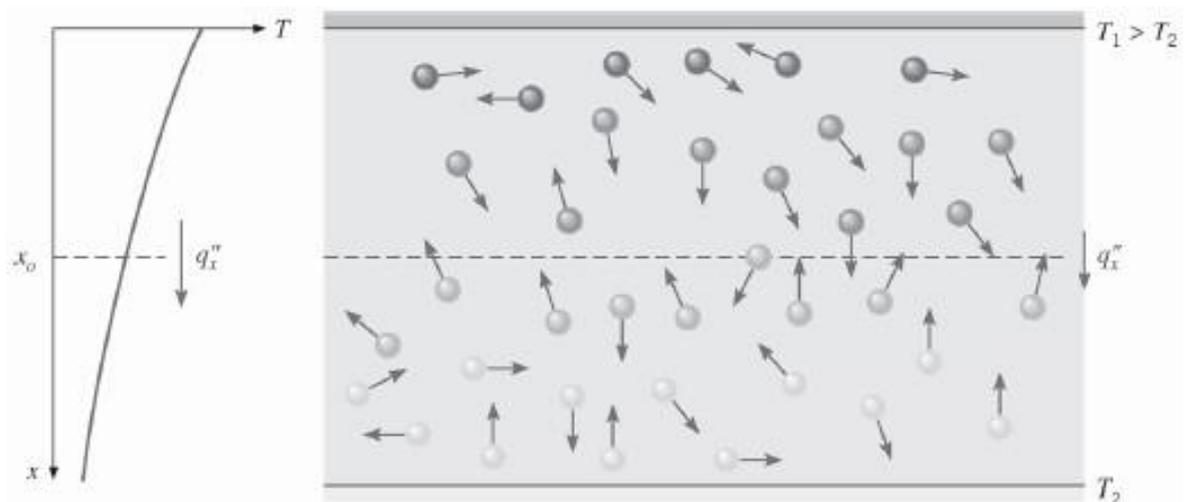


FONTE: Leon (2016).

3.4.3 Transferência de Calor por Condução

Para iniciar o estudo sobre condução térmica é necessário conhecer o conceito de atividades atômicas e moleculares. O grau de agitação molecular é alterado com a diferença de temperatura, pois as partículas com a agitação (energia) maior que as partículas de sua vizinhança irão transferir por choque mecânico a energia para as demais partículas menos energéticas, devido à proximidade e sua interação molecular.

Figura 5 - Choque molecular



FONTE: (BERGMAN et al., 2014).

A situação é muito semelhante nos líquidos, embora as moléculas estejam mais próximas e as interações moleculares sejam mais fortes e mais frequentes. Analogamente, em um sólido, a condução pode ser atribuída à atividade atômica na forma de vibrações dos retículos. A visão moderna associa a transferência de energia a ondas na estrutura de retículos induzidas pelo movimento atômico. Em um não condutor elétrico, a transferência de energia ocorre exclusivamente através dessas ondas; em um condutor, a transferência também ocorre em função do movimento de translação dos elétrons livres (FRANK, 2014).

Em nosso cotidiano nos deparamos com diversos exemplos do processo de condução térmica, como o da colher de material metálico em contato com um alimento quente, onde o fluxo de calor ocorre da fonte geradora até a extremidade do objeto em contato, isto é baseado no que já foi abordado acima, as partículas em contato com a fonte térmica (mais energética) ao se chocar com as partículas mais distantes da fonte por meio da transferência de calor transmite a temperatura até a extremidade do material em contato, mas como já sabemos todo choque mecânico ocorre dissipação de energia, logo a temperatura da extremidade não será a mesma da fonte térmica.

Os processos físicos ao longo da história vem sendo estudados e representados por meio de fórmulas matemáticas. O processo de transferência de calor pode ser quantificado por meio de equações de taxa. As equações são utilizadas para quantificar a quantidade de energia que é transferida por unidade de tempo. Já para a condução térmica, a equação da taxa é conhecida como lei

de Fourier. De acordo com o livro de Fundamentos de Transferência de Calor e Massa, para a parede plana unidimensional mostrada na figura 6, com uma distribuição de temperatura $T(x)$, a equação da taxa é escrita na forma:

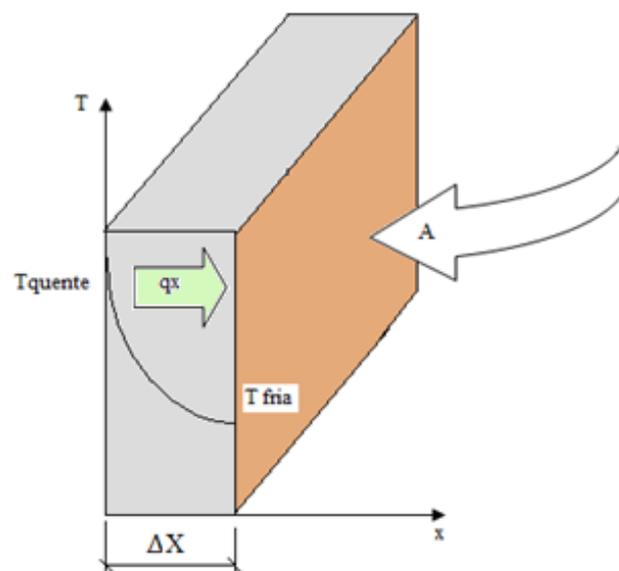
$$q''_x = -k \frac{dT}{dx}$$

Onde:

- q''_x é o fluxo térmico dado em (W/m²);
- dT/dx é o gradiente de temperatura na direção X;
- $-K$ é o parâmetro de condutividade térmica do material em questão, já o sinal negativo representa o fluxo de calor do meio mais energético para o meio menos energético.

Abaixo está a representação da parede para o estudo de fluxo de calor:

Figura 6 - Parede Plana unidimensional



FONTE: Panezi (2017).

A equação abaixo representa a equação estacionária para o fluxo térmico, com a taxa de transferência de calor por unidade de área. A taxa de transferência de calor por condução, $q_x(W)$, através de uma parede plana com área A , é então o produto do fluxo e da área, $q_x = q''_x \cdot A$.

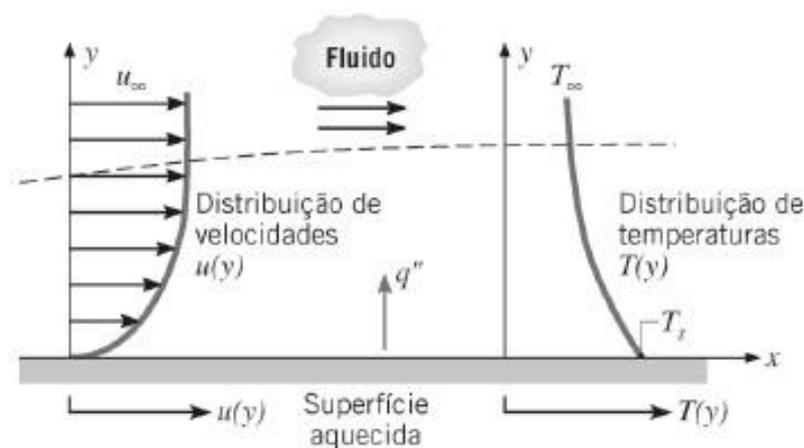
$$q'' x = k \frac{T_1 - T_2}{L} = k \frac{\Delta T}{L}$$

3.4.4 Transferência de Calor por Convecção

A convecção ocorre entre uma superfície e um fluido em movimento sobre essa superfície. O modo de transferência de calor por convecção envolve dois mecanismos, um deles é a transferência de energia devido ao movimento molecular aleatório que também é chamado de difusão, o outro mecanismo é com a transferência de energia devido ao movimento global do fluido sobre a superfície. Este movimento do fluido com um gradiente de temperatura, contribui para o processo de transferência de calor, o processo em uma visão global não permite visualizar a movimentação molecular, mas a transferência de calor por convecção envolve tanto a parte macroscópica como a microscópica (movimento molecular desordenado) que em conjunto transfere a energia entre o fluido e a superfície estudada.

Para este processo de transferência de calor é necessário saber que alguns fatores influenciam, como: as propriedades do fluido (massa específica, condutividade térmica e calor específico), propriedades do escoamento (velocidade e temperatura) e a geometria (escoamento interno, externo e a rugosidade da superfície).

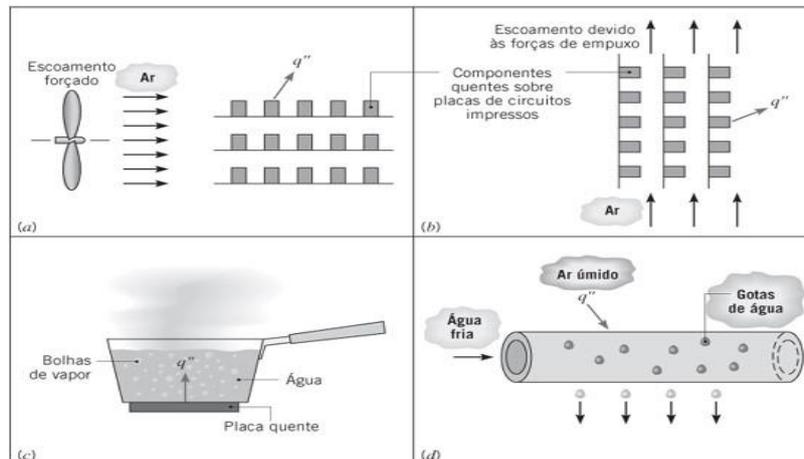
Figura 7 - Transferência de Calor por Convecção



FONTE: (BERGMAN et al., 2014)

A classificação de transferência de calor por convecção é por meio da natureza do escoamento do fluido, podendo ser: convecção forçada (causada por meio externo), convecção livre (é induzida por forças de empuxo) e pode ser uma mistura da convecção livre e forçada. A figura 8 representa os tipos de escoamentos.

Figura 8 - Tipos de Transferência de calor por Convecção



FONTE: (BERGMAN et al., 2014).

Ao estudar o processo convectivo, nota-se que a transferência de calor envolve a energia sensível (que é a térmica interna), mas em alguns casos ocorre também o calor latente (ocorrência de troca de fase entre os estados líquido e de vapor). Abaixo está representada a equação que descreve a taxa de transferência de calor.

$$q''x = h (Ts - T\infty)$$

Onde:

- $q''x$ é o fluxo de calor dado em (W/m²);
- h é o coeficiente de transferência de calor por convecção;
- $(Ts - T\infty)$ essa expressão é conhecida como a lei de resfriamento de Newton.

3.4.5 Transferência de Calor por Radiação

“Radiação térmica é a energia emitida pela matéria que se encontra a uma temperatura diferente de zero. Ainda que voltemos nossa atenção para a radiação a partir de superfícies sólidas, a emissão também ocorre a partir de gases e líquidos. Independentemente da forma da matéria, a emissão pode ser atribuída a mudanças nas configurações eletrônicas dos átomos ou moléculas que constituem a matéria. A energia do campo de radiação é transportada por ondas eletromagnéticas (ou, alternativamente, fótons). Enquanto a

transferência de energia por condução ou convecção requer a presença de um meio material, a radiação não necessita dele. Na realidade, a transferência por radiação ocorre mais eficientemente no vácuo” BERGMAN et al., Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa. 7 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014, p.102.

A radiação vem sendo estudada há algum tempo. Como é possível observar no trecho acima citado do livro de Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa. As ondas eletromagnéticas que neste caso se dá o nome de radiação é emitida por matéria sólida, líquida e gasosa. Essas ondas ao se chocar com moléculas vizinhas proporciona a transferência de energia quando tiver um gradiente de temperatura. A transferência de energia tem que ser observada, pois nem toda a energia é absorvida pela vizinhança (objetos), parte desta energia é irradiada para o meio.

Baseado na teoria apresentada no livro citado acima, temos que a radiação que é emitida pela superfície pode ser representada pela a Lei de Stefan-Boltzmann que demonstra a taxa na qual a energia é liberada por unidade de área, que denomina como poder emissivo limite da superfície (E). A expressão abaixo representa um caso onde é estudada um corpo negro, ou seja, onde se tem uma superfície que é um radiador ideal.

$$E_b = \sigma T_s^4$$

Onde:

- E_b é a taxa de energia liberada em (W/m^2);
- T_s é temperatura absoluta (K) da superfície;
- σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \frac{W}{(m^2 * K^4)}$).

Para um caso real é necessário acrescentar uma variável denominada emissividade (ϵ), onde o valor da variável varia entre 0 e 1, essa propriedade fornece uma medida da eficiência que o material que se encontra na superfície de emitir energia em relação ao corpo negro.

$$E = \epsilon \sigma T_s^4$$

Onde:

- **E** é a taxa de energia liberada pela superfície real em relação ao corpo negro em (W/m^2);
- **T_s** é temperatura absoluta (**K**) da superfície;
- **σ** é a constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}$);
- **ε** é a emissividade do material.

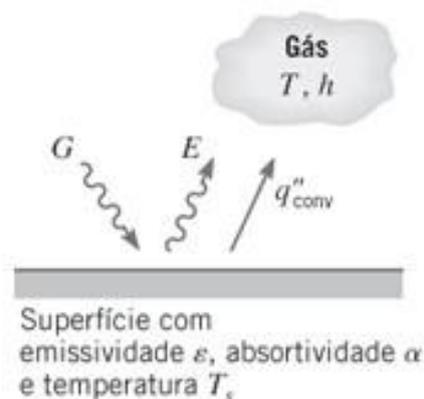
A radiação pode ser emitida por fontes externas, como o sol. Para representar a radiação independente da fonte é possível ao analisar uma área unitária da superfície que recebe todas as radiações por meio da irradiação (**G**). A expressão abaixo representa a taxa de energia absorvida, onde o **α** é uma variável que recebe valores entre 0 e 1 de acordo com a absorvidade do material. Por exemplo se o **α** for igual a 0, significa dizer que grande parte da energia é irradiada para o meio.

$$G_{abs} = \alpha * G$$

Onde:

- **G_{abs}** é a energia absorvida por irradiação;
- **G** é o total de energia por irradiação incidida na superfície;
- **α** é a absorvidade do material da superfície.

Figura 9 - Representação da energia irradiada em uma superfície



FONTE: (BERGMAN et al., 2014).

3.5 Termoquímica- Conceito Geral

3.5.1 Termoquímica

A termoquímica é uma das áreas da físico-química, cuja a principal função é observar as quantidades de energia liberada e absorvida em uma reação química. No fogo ocorre uma reação química conhecida que é a combustão, e por meio da termoquímica é possível obter a quantidade de energia liberada em um incêndio.

A primeira lei da termodinâmica embasa os estudos da termoquímica. Esta lei trata-se do princípio da conservação de energia. Mas a termodinâmica não fornece a taxa em que ocorre a mudança ou sobre o mecanismo de conversão. E com isto, para tornar o estudo mais completo é normalmente associado com outros dados.

As mudanças químicas e físicas que ocorre em um processo de combustão flamejante ocorre na fase gasosa, e com isto a lei dos gases ideais pode ser aplicada.

$$PV = n * RT$$

Onde:

- **P** é a pressão;
- **V** é o volume de n moles de gás;
- **T** é a temperatura em graus Kelvin.
-

Tabela 1 - Unidades de R

Unidades de Pressão	Unidades de Volume	Unidades de R	Valores de R
Pa(N/m ²)	m ³	J/K* <i>mol</i>	8.31341
atm	Cm ³	Cm ³ *atm/K* <i>mol</i>	82.0575
atm	L	L*atm/K* <i>mol</i>	0.0820575
atm	m ³	m ³ *atm/K* <i>mol</i>	8.20575x10 ⁻⁵

FONTE: B RUSSELL, **Química Geral**

Pelo princípio da conservação da energia, a primeira lei da termodinâmica envolve a relação do trabalho e o calor. Em um “sistema fechado”

não ocorre troca de calor com o ambiente, sabe-se que haverá uma mudança se o calor for adicionado ou removido, ou se o trabalho for feito pelo "sistema", por exemplo, por compressão. Essa mudança é geralmente acompanhada por um aumento ou diminuição da temperatura e pode ser quantificado se definirmos uma função de estado conhecida como a energia interna do sistema.

$$\Delta E = q - \omega$$

Onde:

- q é o calor transferido para o sistema;
- ω é o trabalho realizado pelo sistema.

Outra forma de representação da equação acima é na forma diferencial.

$$dE = dq - d\omega$$

Sendo uma função do estado, E varia com a temperatura e pressão, isto é, $E = E(T, P)$.

De acordo com a definição padrão, o trabalho ω é realizado quando uma força F move seu ponto de aplicação através de uma distância x . Assim, no limite:

$$d\omega = F * dx$$

O trabalho feito durante a expansão de um gás em um cilindro pode ser derivado e, portanto:

$$d\omega = P * A * dx = P * dV$$

Onde:

- P é a pressão do gás;
- A é a área do pistão;
- dx é a distância de deslocamento do pistão.

O incremento em volume é, portanto:

$$dV = A * dx$$

O trabalho total realizado é obtido integrando a equação anterior do estado inicial ao final. Assim, temos:

$$\omega = \int_{inicial}^{final} P * dV$$

Combinando as duas equações, temos:

$$dE = dq - P * dV$$

Isso mostra que, se o volume permanecer constante

$$P * dV = 0$$

Temos:

$$\Delta E = q_v$$

Onde:

- q_v é o calor transferido para o volume constante do sistema; isto é, a mudança na energia interna é igual ao calor absorvido ou liberado em volume constante.

Com exceção das explosões em ambientes fechados, incêndios ocorrem sob condições de pressão constante. Consequentemente, o trabalho feito como resultado da expansão do fogo e gases deve ser levado em conta. A pressão constante, temos:

$$\omega = P * (V_2 - V_1)$$

Onde:

- V_1 e V_2 são os volumes inicial e final, respectivamente.

Desta forma, obtém-se a seguinte equação:

$$\Delta E = E_2 - E_1 = q_p + (P * V)_1 - (P * V_2)$$

De forma organizada:

$$q_p = (E_2 + PV_2) - (E_1 + PV_1) = H_2 - H_1$$

Onde:

- q_v é o calor transferido para o volume constante do sistema;
- H é a entalpia do sistema ($H = E + PV$).

A mudança na entalpia é, portanto, o calor absorvido ou perdido liberado a pressão (desde que apenas P e V realizam trabalho). Desta forma, é a mudança na entalpia que deve ser considerada em problemas relacionados a incêndios.

3.5.2 Calor específico

O calor específico de um corpo ou sistema é definida como a quantidade de calor necessária para alterar a temperatura de uma unidade de massa por um grau Celsius. As unidades utilizadas são $J / Kg * K$, mas para os problemas termoquímicos utiliza as unidades $J / Mol * K$. O mole é definido pela a quantidade de uma substância (sólido, líquido ou gasoso), que contém unidades elementares (átomos ou moléculas) e átomos de carbono existente em exatamente 0,012 Kg de carbono-12 (C_{12}). E o resultado disto e a constante de Avogadro ($6,023 * 10^{23}$).

A hipótese de Avogadro foi aplicada a gases, e afirmou que números iguais de moléculas de gases diferentes com a mesma temperatura e pressão ocupam o mesmo volume. E com isto a quantidade de uma substância que corresponde a um mol é o peso molecular (em quilograma). Por exemplo, as seguintes quantidades dos gases N_2 , O_2 , CO_2 representam um mol do respectivo gás. Assim, cada gás ocupa 0,022414 m^3 a 273 K e 760 mmHg:

0,028 Kg Nitrogênio (N₂);

0,032 Kg Oxigênio (O₂);

0,044 Kg Dióxido de Carbono (CO₂);

0,028 Kg Monóxido de carbono (CO);

0,016 Kg Metano (CH₄);

0,044 Kg Propano (C₃H₈).

O conceito de calor específico é normalmente associado a sólidos e líquidos, mas é igualmente aplicável a gases. Tais calores específicos são necessários para o cálculo das temperaturas da chama, conforme apresentado abaixo.

Tabela 2 - Capacidades de calor de gases selecionados a pressão constante (101,1 kN/m²)⁵

Temperatura (K)	C_p (J/mol*K)				
	298	500	1000	1500	2000
Gases					
CO	29.14	29.79	33.18	35.22	36.25
CO ₂	37.129	44.626	54.308	58.379	60.350
H ₂ O(g)	33.577	35.208	41.217	46.999	51.103
N ₂	29.125	29.577	32.698	34.852	35.987
O ₂	29.372	31.091	34.878	36.560	37.777
He	20.786	20.786	20.786	20.786	20.786
CH ₄	35.639	46.342	71.797	86.559	94.399

Para prosseguir e necessário observar que possui duas capacidades caloríficas distintas. Uma delas é a pressão constante e a outra ao volume constante. Sendo a pressão constante expressa da seguinte forma:

$$dq_p = dH = C_p * dT$$

Já para volume constante:

$$dq_v = dE = C_v * dT$$

E para o gás ideal:

$$C_p = C_v + R$$

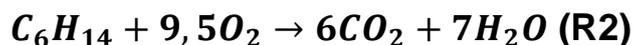
3.5.3 Calor de Combustão

As reações químicas são normalmente acompanhadas de liberação ou absorção de calor. A termoquímica é responsável por quantificar os fatores associados as mudanças de energia. E com isto chegamos as equações químicas que define os estados inicial e final, como por exemplo a equação abaixo:



Nesta equação os reagentes (propano e oxigênio) e produtos (dióxido de carbono e água) são especificados. A equação química balanceada define a estequiometria da reação. Assim, as proporções exatas dos dois reagentes (propano e oxigênio) para conversão completa em produtos (sem reagentes remanescentes). Note que os estados físicos dos reagentes e os produtos também devem ser especificados. Na maioria dos casos, as condições iniciais correspondem a temperatura ambiente (isto é, 25 ° C e 1 atm de pressão atmosférica). Neste caso, ambos são gasosos, mas é comum em incêndios para

o “combustível” está em estado condensado (líquido ou sólido). Como exemplo, temos a oxidação do n-hexano expressa pela equação química abaixo:



No caso acima, o combustível pode estar no estado líquido ou vapor, então temos reação 1 pode ser usada para calcular a massa de oxigênio ou ar necessário para a oxidação completa de uma dada massa de propano. Assim, temos que um mol de propano (44 g) reage completamente com cinco moles de oxigênio (5 moles de O₂ 5x32 = 160 g). Desta forma, 1 g de propano requer 3,64 g de oxigênio. Se o propano está queimando no ar, então a presença de nitrogênio precisa ser levada em consideração, embora não participe de forma significativa na reação química. Como a proporção de oxigênio para nitrogênio no ar é de aproximadamente 21:79 (ou 1: 3.76), a Reação 1 pode ser reescrita:



Os resultados obtidos da expressão química e o balanceamento estequiométrico é que a relação oxigênio/nitrogênio é de 1:3,76, então são necessários 18,8 gramas de nitrogênio (5*3,76 = 18,8 g), mostrando que 44 g de propano requer (160 + 18,8 / 28), ou 686,4 g de ar para combustão completa.

3.5.4 Medição de Calor de Combustão

O calor de combustão de um combustível é definido como a quantidade de calor liberada quando a quantidade unitária é oxidada completamente para produzir produtos finais estáveis. No presente contexto, os processos de combustão relevantes ocorrem a pressão constante de modo a observar a mudança da entalpia ΔH_c . Como ocorre a oxidação temos que as reações são exotérmicas, então o ΔH_c é sempre negativo, por convenção.

A expressão abaixo representa a entalpia do sistema, o experimento dá o calor liberado em volume constante; isto é, a mudança na energia interna energia, ΔE .

A mudança na entalpia é dada por:

$$\Delta H = \Delta E + \Delta(PV)$$

Onde $\Delta(PV)$ é calculado usando a lei universal dos gases.

$$\Delta(PV) = \Delta(nRT)$$

O método fornece o calor bruto de combustão, em que os reagentes e os produtos estão em seus estados padrões. O calor líquido de combustão, refere-se especificamente à situação em que a água é um produto que está no estado de vapor. Assim, o calor líquido da combustão é menor que o calor bruto de combustão em uma quantidade igual ao calor latente de evaporação de água (2,26 kJ / g), que é o valor que deve ser usado em cálculos de incêndio. Além disso, deve ser lembrado que existe um calor de gaseificação associado a qualquer combustível condensado (líquido ou vapor). Assim, uma correção deve ser feita quando o calor da combustão do vapor de combustível é necessário.

A Tabela 1-5.3 abaixo contém os calores de combustão (ΔH_c) de vários gases, líquidos e sólidos combustíveis, expressos de várias maneiras, isto é, kJ / mole (combustível), kJ / g (combustível), kJ / g (oxigênio) e kJ / g (ar).

Tabela 3 – Calores de combustão de combustíveis selecionados a 25°C (298K)

FUEL	ΔH_c (KJ/MOL)	ΔH_c (KJ/G)
MONOXIDO DE CARBONO (CO)	283	10.10
METANO (CH₄)	800	50.00
ETANO (C₂H₆)	1423	47.45
ETINO(C₂H₂)	1253	48.20
ETENO(C₂H₄)	1411	50.53
PROPANO(C₃H₈)	2044	46.45
N-BUTANO(N-C₄H₁₀)	2650	45.69
N-OCTANO(N-C₈H₁₈)	5104	44.77
N-PENTANO(N-C₅H₁₂)	3259	45.27
C-HEXANO(C-C₆H₁₂)	3680	43.81
BENZENO(C₆H₆)	3120	40.00
ETANOL(C₂H₅OH)	1232	26.78
ACETONA(CH₃COCH₃)	1786	30.79

FONTE: B RUSSELL, Química Geral

O terceiro e o quarto listado na tabela têm usos específicos em relação a problemas de incêndio. É imediatamente aparente da Tabela 1-5.3 que ΔH_c (O₂) e ΔH_c (ar) são aproximadamente constantes para a maioria dos combustíveis listados, valores médios de 13,1 kJ / g e 3 kJ / g, respectivamente. Os dados citados na Tabela 1-5.3 referem-se a calor de combustão medidos a temperatura ambiente, normalmente 25 ° C. Estes dados serão satisfatórios para praticamente todos os problemas de incêndio, mas ocasionalmente pode ser necessário considerar o calor liberado quando a combustão leva o ambiente a temperaturas mais altas.

Isso requer uma aplicação simples da primeira lei da termodinâmica. Se a reação envolve reagentes à temperatura T₀ reagindo para dar produtos na temperatura final T_F, o processo pode ser considerado de duas maneiras:

Os produtos são formados em T_0 , absorvem o calor da combustão, e são aquecidos até a temperatura final T_F .

O calor da combustão é utilizado primeiro para aquecer os reagentes para T_F , então a reação prossegue para a conclusão, sem aumento de temperatura adicional.

Pela primeira lei, temos

$$(\Delta H_c^{T_0}) + C_p^{Pr} * (T_F - T_0) = (\Delta H_c)^{T_f} + C_p^R * (T_F - T_0)$$

Onde:

- C_p^{Pr} e C_p^R são capacidade calorífica dos produtos e reagentes, respectivamente.

Assim, podemos escrever:

$$\frac{(\Delta H_c)^{T_f} - (\Delta H_c)^{T_0}}{T_f - T_0} = \Delta C_p$$

Ou de na forma diferencial pela equação de Kirchoff:

$$\frac{d(\Delta H_c)}{dT} = \Delta C_p$$

Onde:

- $\Delta C_p = C_p^{Pr} - C_p^R$.

Isso pode ser usado como forma de calcular o calor de combustão a temperatura T_2 se ΔH_c é conhecido à temperatura T_1 e a informação está disponível para as capacidades térmicas dos reagentes e produtos, assim :

$$(\Delta H_c)^{T_2} = (\Delta H_c)^{T_1} + \int_{T_1}^{T_2} \Delta C_p * dT$$

Onde:

$$\bullet \Delta C_p = \sum C_p(\text{produtos}) - \sum C_p(\text{reagentes})$$

3.6 Simulação Computacional de Incêndio

A simulação computacional de incêndio é uma importante ferramenta para o entendimento da dinâmica do fogo nas estruturas. Por meio dela, pode-se minimizar de forma significativa os aspectos negativos do incêndio antes mesmo que ocorra o evento em questão. A simulação permite compreender a influência dos aspectos estruturais e de utilização de materiais construtivos no desenvolvimento do fogo. Com isto, auxilia na melhoria e na criação de normas técnicas, na preservação ambiental e no controle de materiais construtivos utilizados, influenciando diretamente as questões econômicas e de segurança das estruturas.

3.6.1 Flashover

Quando há fogo em um espaço confinado existe uma etapa onde a radiação térmica total gera nos combustíveis ali existentes a pirólise (KENNEDY, 2013). Assim, os gases se tornam passíveis de fácil ignição e há partículas em suspensão. Desta forma, caso tenha uma fonte de ignição, pode ocorrer uma súbita transição de um incêndio progressivo em um incêndio generalizado, que é chamada de flashover.

Essa transição para um incêndio generalizado depende de variáveis tais como a influência térmica da radiação, da convecção, das condições de ventilação, da divisão física, do volume, da geometria do espaço incendiado e a combinação dos gases quentes presentes. Por fim, poucos segundos antes de ocorrer um flashover observa-se uma nuvem de gases movendo-se no local na forma de um redemoinho.

O término do flashover culmina em uma rápida escalada do fogo ou ainda em uma explosão (casos raros) acompanhada por uma onda de pressão que rompe as janelas e derruba as paredes. Assim, o fogo avança em uma grande velocidade, através do teto.

Flashovers podem ser impedidos através da ventilação adequada. Afinal, ela permite que o ar superaquecido e os gases da combustão escapem do compartimento ou da área. Esse processo expõe os combatentes a gases quentes e fumaça, logo deve ser feito com as técnicas adequadas.

Uma outra forma reduzir a possibilidade de flashover é resfriar a área de fogo com água, por exemplo. Por fim, escapar do flashover é muito difícil. Contudo, esse fenômeno deve ser enfrentado apenas por profissionais qualificados (bombeiros) com equipamentos de proteção individual de alto nível.

3.6.2 Modelamento Computacional

O modelamento computacional de incêndio possui dois métodos, sendo um deles o método probabilístico que não faz uso direto dos princípios físicos e químicos envolvidos no fogo, mas de predicações estatísticas sobre a transição de um estágio para outro da evolução do incêndio. Este modelo utiliza a distribuição de probabilidades de determinados eventos ocorrerem a partir de um caso específico. Sendo que este modelo necessita de eventos passados para se basear, obtendo as probabilidades de evolução do fogo de uma fase para outra.

O outro método é o determinístico que utiliza princípios físicos e químicos sobre a natureza do incêndio. Este método divide-se em várias categorias, de acordo com o tipo de problema a ser investigado. Sendo que os mais utilizados são os modelamentos computacionais por camadas (ou zonas) e o de campos (ou CFD – *Computational Fluid Dynamics*). Os modelos computacionais determinísticos mais sofisticados são os modelos de campos (ou CFD). A técnica de modelamento via dinâmica de fluidos computacional (CFD) é adotada em diversas áreas da engenharia e é baseada na solução completa, tridimensional e dependente do tempo das equações fundamentais de conservação de massa, de energia e de momento (KARLSSON & QUINTIERE, 2000).

No modelo de campos o ambiente incendiado é dividido em células. As equações de conservação são aplicadas a cada célula. No presente modelo a conservação de momento é explicitamente imposta. Assim, variáveis adicionais (as componentes da tensão viscosa devido ao escoamento do fluido) surgem no conjunto de equações. A substituição destas na equação de conservação de momento (segunda lei de Newton aplicada ao escoamento do fluido) resulta nas conhecidas equações de Navier-Stokes e a solução destas é central para qualquer algoritmo de CFD (ANDERSON, TANNEHILL & PLETCHER, 1984).

3.7 Softwares e Simulação

3.7.1 FDS (Fire Dynamics Simulator)

O FDS é um software muito utilizado como ferramenta computacional, pois permite obter resultados com alta precisão e além disto é liberado para utilização do público que possui interesse em estudar a dinâmica do fogo, o escoamento e a propagação em ambientes estruturais. Este software foi criado pelo o instituto NIST (*National Institute of Standards and Technology*) que tem como missão nos Estados Unidos, incentivar a competitividade industrial no país. O instituto se baseou na dinâmica computacional de fluidos (*Computational Fluid Dynamics – CFD*) que utiliza do modelo de campos.

O modelo de campos fraciona o ambiente incendiado em várias células, que de forma particular será submetida as equações de conservação. Para utilização do método a conservação do momento (segunda lei de Newton aplicada ao escoamento do fluido) é imposta e as variáveis que surge para fluidos e gases (tensão viscosa) vão sendo acrescentadas. O resultado da junção das variáveis e a equação de conservação de momento é a as equações de Navier-Stokes.

Abaixo está a forma geral das equações de Navier-Stokes:

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \nabla P + \rho f$$

Onde:

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} p & 0 & 0 \\ 0 & p & 0 \\ 0 & 0 & p \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix}$$

- σ é a tensão normal;
- τ é a tensão de cisalhamento;
- \mathbf{P} é a pressão estática.

Em uma visão ajustada para equação de Navier-Stokes:

$$\rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -\nabla p + \nabla T + \rho \mathbf{f}$$

As equações que descrevem o estudo de Navier-Stokes são equações diferenciais parciais que representam o escoamento de fluidos. Estas equações permitem determinar os campos de velocidade e de pressão em um escoamento. Elas estabelecem que mudanças no momento e na aceleração de uma partícula em um fluido são simplesmente o produto das mudanças na pressão e nas forças viscosas dissipativas (fricção) atuando no fluido. A força viscosa origina-se da interação molecular.

A implementação desse conceito está demonstrada na Figura 10, que apresenta um script básico do FDS. Abaixo está descrita a função de cada linha de código:

Linha 5 – Foi utilizado o comando HEAD CHID que significa caractere ID, que nada mais é uma palavra com 40 caracteres ou menos utilizada para marcar os arquivos de saída, também na linha 5 foi escrito após TITLE uma sequência de caracteres que pode conter até 256 caracteres ou menos que descreve a simulação. É simplesmente um texto descritivo que é passado para vários arquivos de saída.

Linha 6 – Temos a linha TIME que é o parâmetro utilizado para discriminar o tempo de simulação, contendo a duração e o tempo inicial. Este

passo foi utilizado para avançar a solução das equações descritivas. A expressão “T_END=5.0/”, significa dizer que o tempo de simulação será de 5 segundos.

Linha 7 – Significa dizer que deseja salvar os arquivos de reinicialização periodicamente durante uma execução, se assegurando contra quedas de energia ou problemas no sistema. Nesta linha ao escrever “DT_RESTART=300.0/” os arquivos de reinicialização serão salvos a cada 300 segundos.

Linha 8 – O MIST é o grupo de lista de nomes de parâmetros de entradas diversos globais. Este grupo contém parâmetros que não se encaixam logicamente em qualquer outra categoria.

Apenas uma linha do MIST deve ser inserida no arquivo de dados, por exemplo a linha 8 representada na figura 10 significa que ao inserir o termo “Baroclinic” está sendo levado em conta o torque baroclinico que é responsável por gerar vórtice devido ao não alinhamento dos gradientes de pressão e densidade. Caso não inclua o termo em problemas de simulação de casos reais, pode-se obter resultados errados.

Linha 10 – A palavra MESH representa o grupo de listas de nomes que define o domínio computacional. Todos os cálculos do FDS devem ser executados dentro de um domínio que é composto de volumes retilíneos chamados de malhas. Estas são divididos em células retangulares, cujo número depende da resolução desejada.

Uma malha é como se fosse uma caixa, onde o sistema de coordenadas dentro da malha obedece a regra da mão direita. O ponto de origem de uma malha é definido pelo primeiro, terceiro e quinto valores representado pelo Xb e o canto oposto é definido pelo segundo, quarto e sexto valores. No exemplo da figura 10, temos que da linha 10 até a linha 18 é a representação das células. O significado de cada termo é:

		Tamanho
		da célula
	Malha	
10	&MESH ID='48 x 48 x 80 mm Domain-a', IJK=6,6,40, XB=-0.024,-0.012,-0.024,-0.012,0.0,0.08/	
	Nome	Origem e canto oposto

Figura 10 - FDS

```

Model Records (Read-Only):
1 candle_MODIFICADO.fds
2 Generated by PyroSim - Version 2016.2.0922
3 01/05/2018 09:32:31
4
5 &HEAD CHID='candle_MODIFICADO', TITLE='21-mm Round candle'/
6 &TIME T_END=5.0/
7 &DUMP RENDER_FILE='candle_MODIFICADO.ge1', DT_RESTART=300.0/
8 &MISC BAROCLINIC=.FALSE., INITIAL_UNMIXED_FRACTION=0.0/
9
10 &MESH ID='48 x 48 x 80 mm Domain-a-a', IJK=6,6,40, XB=-0.024,-0.012,-0.024,-0.012,0.0,0.08/
11 &MESH ID='48 x 48 x 80 mm Domain-a-b', IJK=6,12,40, XB=-0.024,-0.012,-0.012,0.012,0.0,0.08/
12 &MESH ID='48 x 48 x 80 mm Domain-a-c', IJK=6,6,40, XB=-0.024,-0.012,0.012,0.024,0.0,0.08/
13 &MESH ID='48 x 48 x 80 mm Domain-b-a', IJK=12,6,40, XB=-0.012,0.012,-0.024,-0.012,0.0,0.08/
14 &MESH ID='48 x 48 x 80 mm Domain-b-b', IJK=24,24,80, XB=-0.012,0.012,-0.012,0.012,0.0,0.08/
15 &MESH ID='48 x 48 x 80 mm Domain-b-c', IJK=12,6,40, XB=-0.012,0.012,0.012,0.024,0.0,0.08/
16 &MESH ID='48 x 48 x 80 mm Domain-c-a', IJK=6,6,40, XB=0.012,0.024,-0.024,-0.012,0.0,0.08/
17 &MESH ID='48 x 48 x 80 mm Domain-c-b', IJK=6,12,40, XB=0.012,0.024,-0.012,0.012,0.0,0.08/
18 &MESH ID='48 x 48 x 80 mm Domain-c-c', IJK=6,6,40, XB=0.012,0.024,0.012,0.024,0.0,0.08/
19

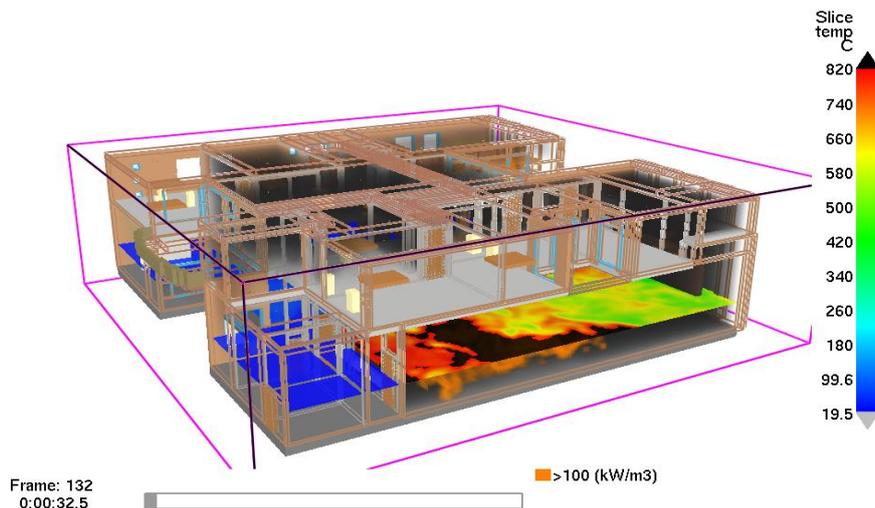
```

Fonte: O autor

3.7.2 Smokeview

O SMV (Smokeview) é um software desenvolvido pelo NIST (*National Institute of Standards and Technology*) com a finalidade de visualizar as projeções do FDS, foi escrito utilizando a linguagem C com em média 115000 linhas de código. Assim como o FDS, o smokeview é um software de livre acesso para download, logo a junção dos softwares FDS e Smokeview torna-se uma excelente ferramenta para entendimento da dinâmica do fogo em ambientes. Ele utiliza uma biblioteca de gráficos em 3D e OpenGL que tem a função de visualizar a implementação do algoritmo. O OpenGL é usado para definir localização, cor e luz dos objetos em forma 3D projetada pelo FDS.

Figura 11- Representação de uma edificação em situação de incêndio



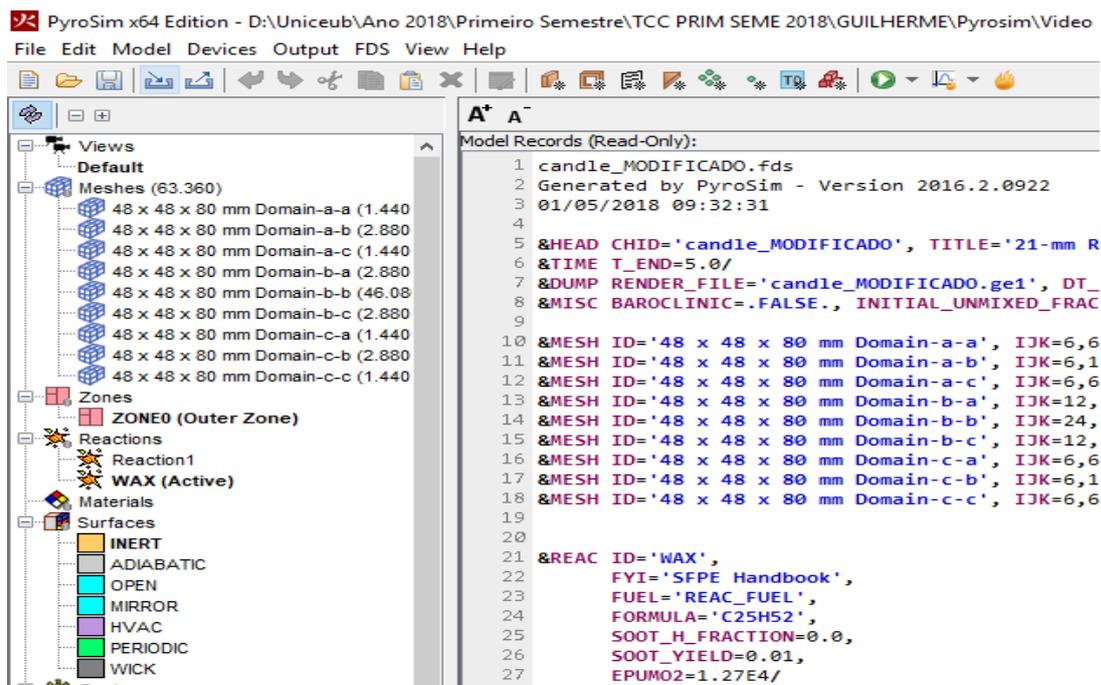
FONTE: <http://fds.en.cype.com/>

3.7.3 Pyrosim

O Pyrosim foi desenvolvido pela empresa Thunderhead Engineering para auxiliar na simulação de incêndio composta por diversos elementos, podendo criar e gerenciar de várias formas e formatos situações de incêndio. Este software é uma interface gráfica para o usuário dos softwares Fire Dynamics Simulator (FDS) e do Smokeview, que são gratuitos. Além disso, o Pyrosim permite a importação e exportação de arquivos de outro software muito utilizado que é o AutoCAD, nos formatos DXF e DWG.

A figura 13 é a representação gráfica do programa Pyrosim, onde temos na barra superior os comandos do programa, tais como a inicialização do Smokeview, que é responsável por representar por meio gráfico o elemento lançado no programa FDS que está inserido no programa Pyrosim. Na janela à esquerda da imagem representa a interface gráfica do programa Pyrosim para lançamento do elemento da simulação no software FDS. E a janela à direita da imagem é as linhas de código lançadas no FDS através do software Pyrosim.

Figura 12- Representação Programa Pyrosim.



Fonte: O autor

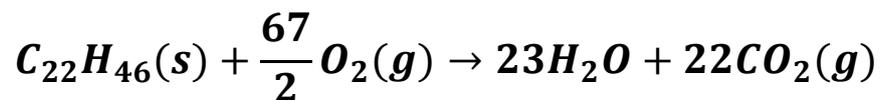
3.8 Experimento da vela

O experimento em questão trata-se da queima de uma vela que é formada de parafina e um pavio (de cordão). Neste caso a parafina sólida (em forma de cera) entra em fusão e o componente na fase líquida flui de forma capilar pelo o pavio. A parafina líquida vaporiza e o gás composto de hidrogênio e carbono combinado com o oxigênio existente no ar ocasiona a reação de combustão. Um processo semelhante ao da vela ocorre em casos de incêndio na queima da madeira, onde a queima provoca a pirolise da mesma com a consequência da liberação de gases que entra em combustão juntamente com o oxigênio do ambiente.

Todos os modelos para simulação computacional de incêndio que inclui uma reação de combustão devem ser definidos o combustível que irá reagir com o comburente. Esta reação química da combustão produz alguns produtos como liberação de calor, luz e diversos gases. Abaixo está uma reação simplificada de combustão:

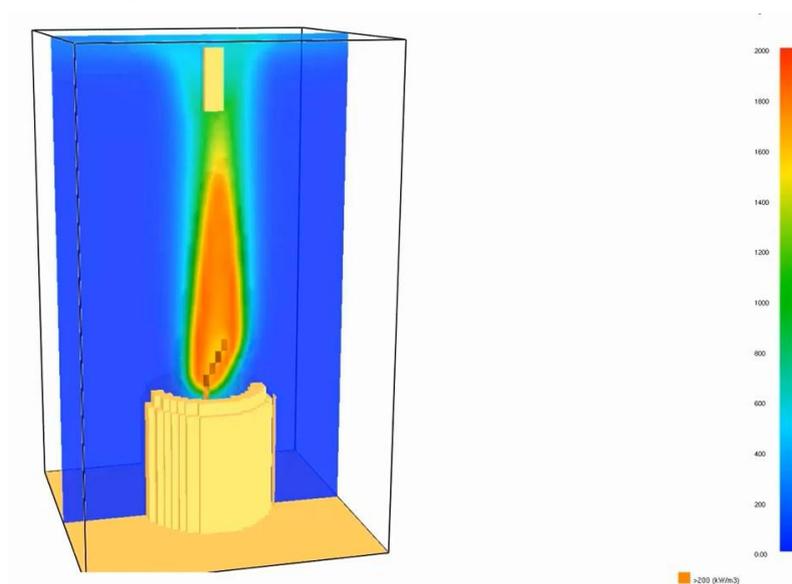


Já no caso específico da vela a reação química fica da seguinte forma:



No software de simulação computacional exige-se dois parâmetros para iniciar o processo de simulação do incêndio, que são o calor de combustão do combustível em questão e a fração radiativa. Existe um manual de manutenção de incêndio, nele contém informações pertinentes as especificações técnicas de diversos combustíveis. Este manual auxiliou no experimento da vela fornecendo informações como a quantidade de átomos existente na cera parafina no estado sólido, que é composta por um agrupamento de átomos, sendo 25 átomos de carbono e 52 átomos de hidrogênio.

Figura 13 - Representação do experimento da vela



FONTE: Software Pyrosim

4 METODOLOGIA

4.1 Apresentação

Na visão de Salomon (2004, p. 152), pesquisa é “o trabalho empreendido metodologicamente, quando surge um problema, para o qual se procura a solução adequada de natureza científica”

Ao tratar do tema, reproduzindo texto de sua obra, Gil (2010) deixa assente que:

A pesquisa é um processo racional e sistemático, desenvolvida mediante o somatório de conhecimentos disponíveis e a utilização cautelosa de métodos, técnicas e demais procedimentos científicos.

Assim, a presente pesquisa científica, se propõe apresentar diversos conceitos provenientes de livros, artigos científicos, publicações periódicas e revistas especializadas relacionadas a simulação computacional de incêndio, a fim de consolidar o embasamento teórico.

Por outro lado, os resultados das simulações e o conjunto de dados a serem coletados e analisados nas mesmas, norteará a construção das argumentações, resultados e discussão.

4.2 Classificação da pesquisa

4.2.1 Quanto à finalidade

Visando a consecução do objetivo proposto, qual seja o de simular computacionalmente um incêndio, através do Pyrosim, o presente trabalho se insere no conceito de pesquisa aplicada, haja vista a aplicação prática dos resultados na solução de um problema real.

Por oportuno, Gil (2010, p. 27) ressalta que “as pesquisas aplicadas são focadas na assimilação de conhecimentos com foco em uma aplicação específica”.

4.2.2 Quanto a forma de abordagem

Na abordagem de Marconi e Lakatos (2010), o método dedutivo caracteriza-se pela conexão descendente entre a teoria e a ocorrência dos fenômenos, ou seja, partindo das leis e teorias para a busca das constatações empíricas.

Tal método orienta o raciocínio do pesquisador no caminho do geral para o particular, que é a forma básica desse estudo.

4.2.3 Quanto ao objetivo geral

Quanto à natureza dos objetivos a pesquisa será em parte exploratória e em parte descritiva.

Exploratória, uma vez que visa, no pensamento de Gil (2010), proporcionar maior familiaridade com o problema com vistas a torná-lo explícito, fazendo-o por meio de levantamento bibliográfico e simulações de cenários específicos do problema.

Descritiva, vez que o presente estudo tem como objetivo específico apontar, em forma de resultados experimentais (simulação), os resultados notáveis quanto a temperatura e sua propagação no ambiente sinistrado.

4.2.4 Quanto aos procedimentos técnicos

Quanto aos procedimentos a serem utilizados esse estudo será composto pelas pesquisas: bibliográfica e simulação computacional.

Bibliográfica pois também será elaborada a partir de material já publicado, constituído por livros, artigos científicos, publicações periódicas e revistas especializadas relacionadas a simulação computacional de incêndio.

Marconi e Lakatos (2010) denotam que a pesquisa bibliográfica não é uma simples repetição do que já foi dito ou escrito sobre um assunto, mas o exame de um tema sob novo enfoque ou abordagem, remetendo a conclusões inovadoras.

Os dados da simulação são intrínsecos as características do evento a ser simulado e ao poder de expressão da ferramenta FDS.

4.2.5 Quanto à natureza das variáveis

A presente pesquisa será qualitativa e quantitativa, por se tratar de análise mais abrangente, sistemática e profunda sobre a simulação de incêndio.

A análise qualitativa consiste, segundo Flick (2004), em um processo rigoroso e lógico no qual se atribui sentido aos dados analisados e permite vincular os dados coletados com uma descrição e interpretação inicial, bem como desmembrá-la de maneira processual e em partes menores.

A análise quantitativa representa a apresentação dos valores associados as variáveis estudadas no experimento, como por exemplo a temperatura no ambiente.

4.2.6 Quanto a obtenção dos dados

Os levantamentos serão realizados por coleta documental, evidenciada no item procedimentos técnicos. Além disso, serão realizados experimentos descritos de forma clara, concisa e precisa.

5 DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

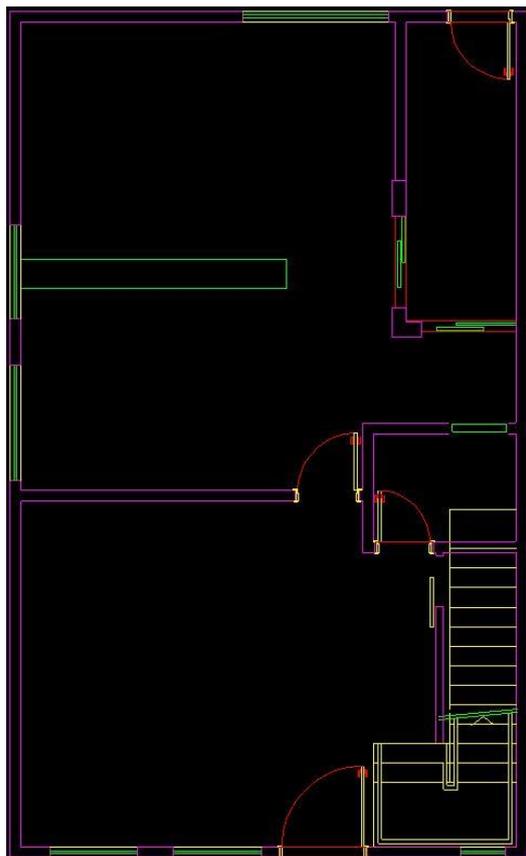
A casa utilizada para estudo de caso está situada em Brasília, próximo ao setor hospitalar e com isto possui acesso e pontos de estacionamentos prejudicados durante a semana devido ao grande fluxo de pessoas que circulam no setor. O acesso para parte interna da residência é voltado para o setor citado acima.

A divisão dos cômodos da casa está distribuída dentre os dois pavimentos, sendo o primeiro com acesso social, cuja a disposição é sala, cozinha, banheiro social e área de serviço. Já o primeiro pavimento é formado pelos quartos da família, totalizando 3 quartos com suíte onde um deles é de casal e os demais de solteiro.

O imóvel desde o princípio de sua constituição foi planejado, projetado e executado com profissionais e materiais de primeira qualidade, com isto o resultado obtido foi uma excelente casa com padrões elevados de qualidade.

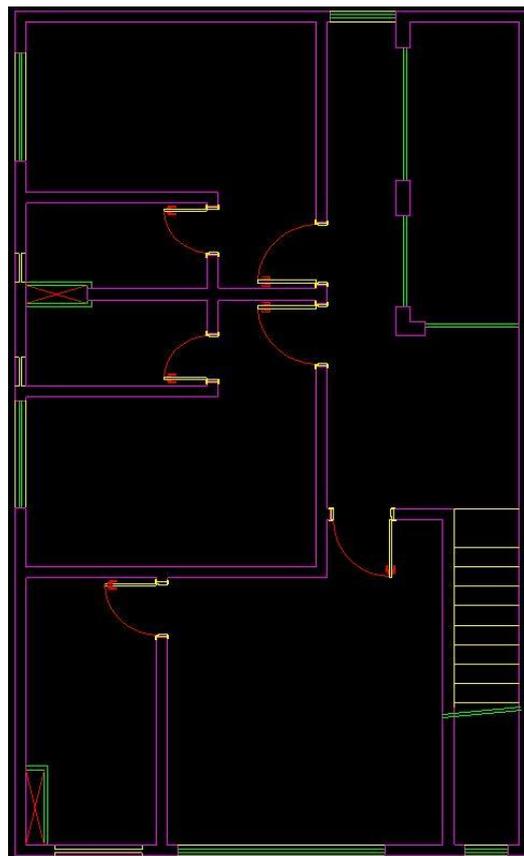
Abaixo seguem as figuras 13 e 14 que apresentam, em forma de croqui, a arquitetura da residência.

Figura 14 - Planta baixa do Térreo



FONTE: O autor

Figura 15 - Planta baixa do primeiro pavimento

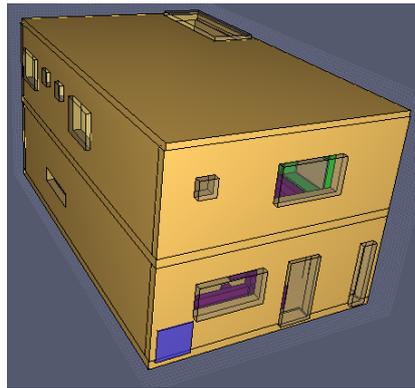


FONTE: O autor

A figura 15 apresenta a respectiva casa lançada no FDS, sendo a figura 16 o resumo do primeiro pavimento e a figura 17 do segundo. Nas portas e janelas aparecem projeções que se destacam e que representam a estrutura HOLE (buraco) do FDS.

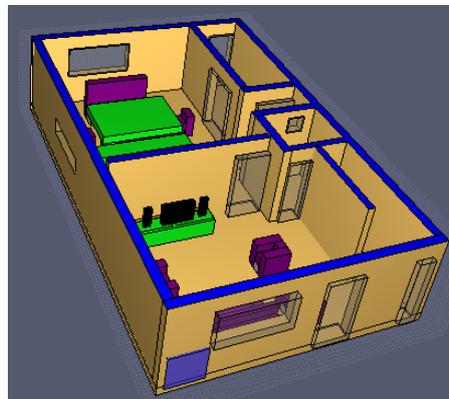
Assim, nas condições básicas de simulação, a casa está com as portas e janelas abertas.

Figura 16 - Casa Lançada no FDS



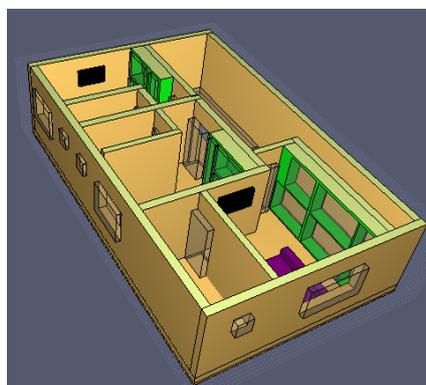
Fonte: o autor.

Figura 17 - Primeiro Pavimento



Fonte: o autor

Figura 18 - Segundo Pavimento



Fonte: o autor

Os elementos na cor verde, nas figuras acima, são formados por madeira. A cor preta em plástico e os na cor lilás de espuma com uma camada plástica de revestimento.

O objetivo do trabalho é materializar uma simulação e, portanto, os materiais usados possuem configurações simples e facilmente localizadas na internet.

Assim, uma simulação dessa natureza não poderia ser usada em perícia. Afinal, a origem e composição do material deveria ser classificada com uso de equipamentos específicos como o espectrofotômetro de massa e o gás-cromatógrafo.

Do ponto de vista dos materiais, a obra é formada por estrutura de concreto armado e alvenaria de vedação com tijolos comuns. As janelas e portas são em estrutura de alumínio e vidro. Por fim, vale ressaltar que a vedação está sendo considerada inerte (não contribui e nem reage ao incêndio).

A ignição foi planejada para começar no sofá da sala através de um agente ígneo de tamanho 30x30 cm e 10 cm de espessura. A taxa de liberação de calor desse agente é de 1000,0 kW/m².

Na porta da frente e no fosso de ventilação foram colocados três termopares em cada. Associado aos ambientes, foram especificados 12 time slices dispostos nas direções x e y de forma a permitir o estudo da temperatura e dispersão de fumaça ao longo dos diversos ambientes.

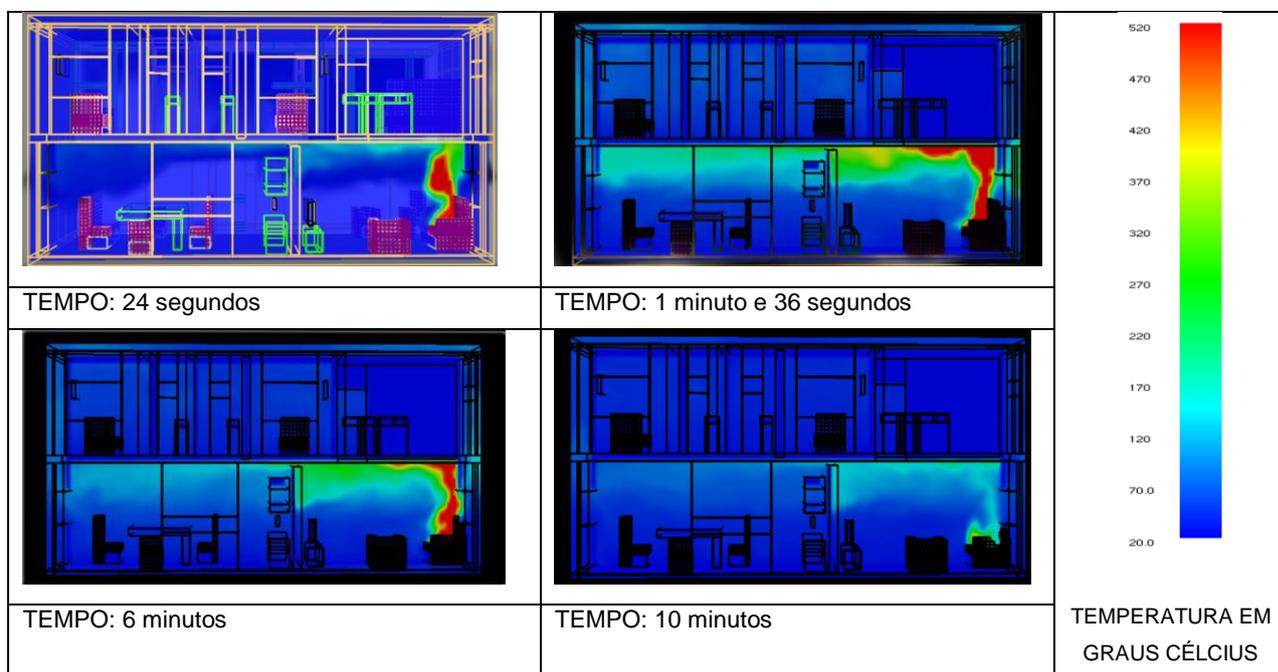
6 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A figura 18 apresenta uma sequência de quadros relativos a simulação realizada. Neste caso, o tempo de simulação foi arbitrado em 10 minutos em função das limitações computacionais e do tempo de execução, que foi de 4 dias.

A barra de temperatura em questão evidencia a temperatura máxima de 520 graus Célsius e, em princípio, o consumo completo do estofamento. Neste caso, não houve a observação do flashover em função do tempo e da temperatura.

As temperaturas notáveis, em uma simulação de grande duração, podem ser obtidas para estudar o comportamento da estrutura quando submetida a altas temperaturas. Nesse estudo, especificamente, não se faz menção aos efeitos das temperaturas sobre vigas, pilares e lajes.

Figura 19 - Comportamento do Fluido e da Temperatura ao Longo do Incêndio

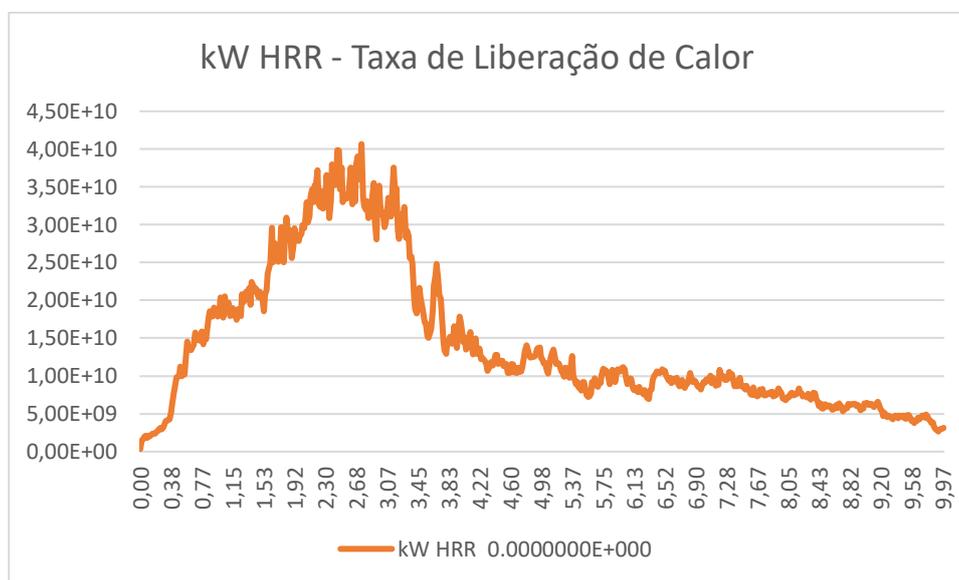


Fonte: O autor

A figura 18 apresenta como resultado o momento de maior taxa de liberação de calor, que ocorreu próximo dos três minutos de incêndio. Logo depois, o consumo do material combustível vai ocorrendo e a taxa diminuído. Assim, nessa simulação, verificou-se que o incêndio no sofá não foi suficiente para provocar alastramento das chamas até 10 minutos de queima.

Considerando que a residência em questão está próxima de uma unidade operacional do Corpo de Bombeiros, é razoável inferir que a extinção seria realizada antes que danos maiores pudessem ocorrer. Tal inferência não leva em consideração transito, disponibilidade de equipamentos adequados e eficiência de combate.

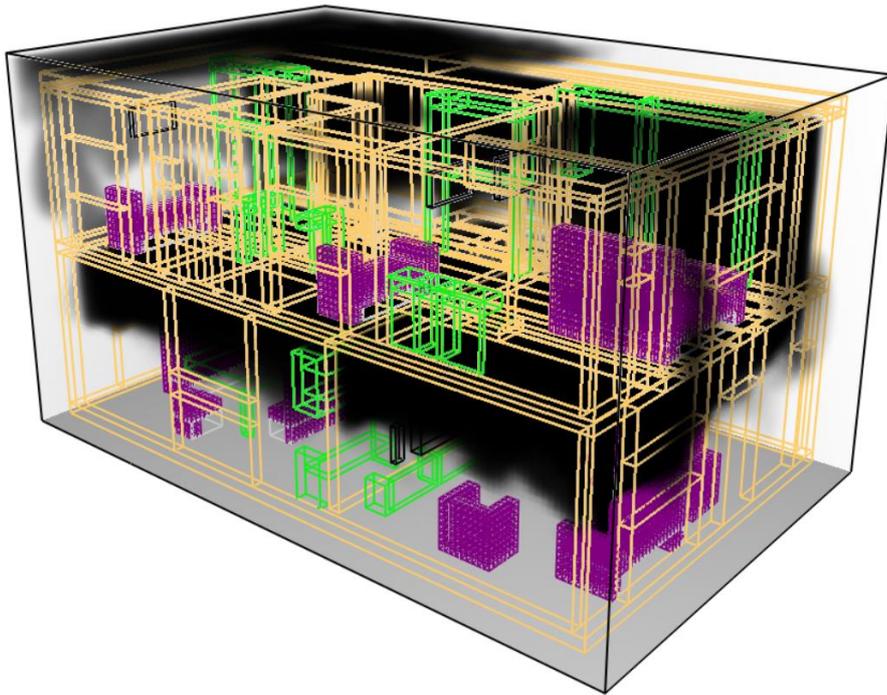
Figura 20 - Taxa de Liberação de Calor



Fonte: O autor

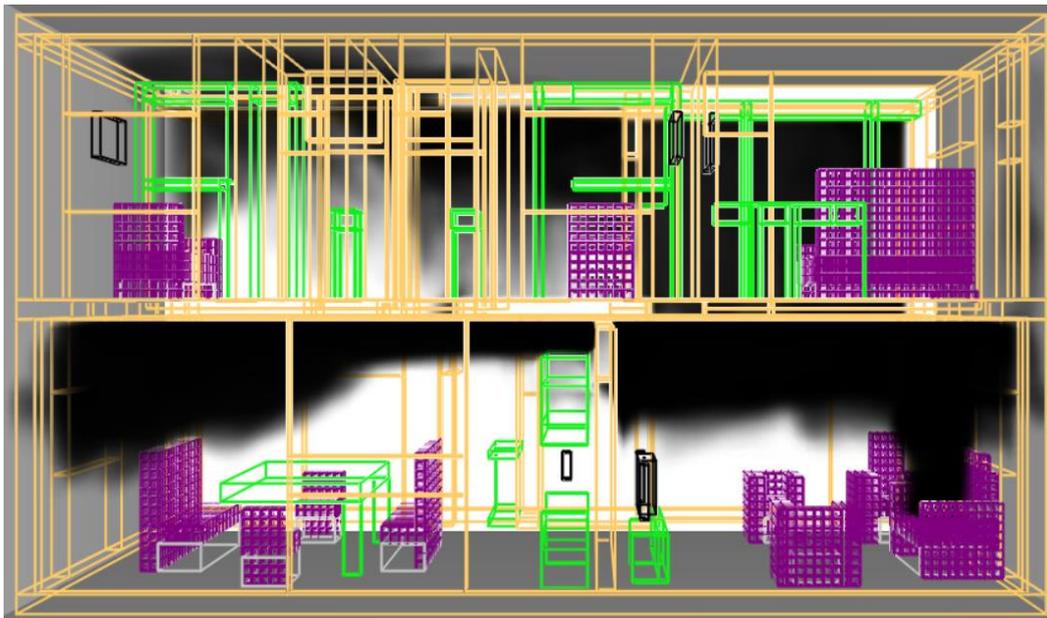
A propagação da fumaça, como pode ser observado na figura 20, em um estágio de 5 minutos em um total de 10 minutos, progride de forma rápida, como é característico de gases. Com isto, temos que a fumaça tóxica emitida pela queima do material composto (estofamento) localizado na sala. É fácil notar que a queima do sofá não foi suficiente para a propagação das chamas para os demais objetos ali situados.

Figura 21 - Escoamento do Fluido em uma Visão Global



Fonte: O autor

Figura 22 - Demonstração de Escoamento Entre Pavimentos



Fonte: O autor

7 CONCLUSÃO

O FDS é um excelente programa para ser utilizado em simulação computacional de incêndios. Entretanto, o uso do mesmo deve ser realizado com extremo cuidado tanto na preparação do experimento, quanto na análise e interpretação dos dados.

Quanto ao experimento em si, o software sofre sérios impactos quanto aos resultados e o tamanho da malha. Assim, para malhas muito refinadas, teremos um esforço computacional muito alto. (BAIGORRI, 2013).

Esta característica implica em ter computadores de alta performance associado a realização de demoradas simulações.

Quanto a composição dos elementos a serem utilizados na simulação como por exemplo madeira, plásticos, etc., deve-se ter extremo cuidados com as adoções a serem realizadas para caracterizar cada elemento. Neste caso específico, as composições utilizadas foram as comumente encontradas na literatura.

Para simulações computacionais que envolvam perícia de incêndio deve ser usado aparelhos como espectrofotômetro de massa e gás cromatógrafo. Após o emprego de tais equipamentos e a submissão de amostras específicas do cenário é que as simulações podem tomar envergadura pericial.

Por fim, para análises preliminares de temperaturas notáveis, dispersão de fumaça e demais elementos de propagação de calor e massa, o software é bastante eficiente.

8 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros pode-se destacar:

- 1) Análise do comportamento dessa mesma residência construída com madeira, steel frame, aço, concreto armado e alvenaria estrutural;
- 2) Pode-se definir cenários de simulação mais elaborados que implicam em usar sensores e elementos de maior controle de abertura de portas, janelas etc;
- 3) Para ambientes comerciais, através do uso de outros softwares complementares, pode ser simulada a evacuação do ambiente por parte dos moradores.

REFERÊNCIAS

ALVES, Alessandra B. C. G.; CAMPOS, André T.; BRAGA, George C. B. **Simulação Computacional de Incêndio Aplicada ao Projeto de Arquitetura**. Brasília: Universidade de São Paulo- USP, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14432: **Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15200: **Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio**. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

BAIGORRI, Pablo Federico; Aplicação das simulações computacionais para investigação de incêndios: Corpo de Bombeiros Militar do Distrito Federal – ABMIL, 2013.

BERGMAN et al., **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 7 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014, p.102

B RUSSELL, John (Org.). **Química Geral**. 2. ed. [S.l.]: Mcgraw Hill, 1994. 897 p. v. 1.

CARVALHO et al., R. T. **Manual Básico de Combate a Incêndio do CBMDF**. Brasília: Corpo de Bombeiros Militar do Distrito Federal, 2006.

CRISPIM, Honório Assis Filho. **Análise de estruturas de concreto armado em situação de incêndio** – um insight. Brasília: IPOG, 2016.

CRISPIM b, Calvin Mariano Rego. Projeto de Prevenção e Combate a Incêndio realizado em Softwares com tecnologia BIM. Trabalho de Conclusão de Curso – TCC. Brasília-DF. UniCEUB, 2017

FLICK, U. **Uma introdução à pesquisa qualitativa**. 2. Ed. Porto Alegre: Artmed, 2004.

GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

GOMES, Ary Gonçalves. **Sistemas de Prevenção Contra Incêndios**. São Paulo: Ed. Interciência, 1998.

KENNEDY , Patrick M. **A discussion of the practical use of Flashover in Fire Investigation**. Florida: 2013.

LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina de Andrade. **Metodologia Científica**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

MCGRATTAN, Kevin et al. **Fire Dynamics Simulator: User's Guide**. 6. 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.6028/NIST.SP.1019>>. Acesso em: 01 jun. 2018.

M. Germano, U. Piomelli, P. Moin, and W. Cabot. **A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model**. *Physics of Fluids A*, 3(7):1760–1765, 1991.

K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, C. Weinschenk, and K. Overholt. **Fire Dynamics Simulator, Technical Reference Guide, Volume 2: Verification**. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, USA, and VTT Technical Research Centre of Finland, Espoo, Finland, sixth edition, September 2013.

SALOMON, Délcio Vieira. **Como fazer uma monografia**. 11. Ed. São Paulo: Martins Fontes, 2004.

SEITO, Alexandre Itiu. **A segurança contra incêndio no Brasil**. São Paulo: Projeto editora, 2008.

SEVERINO, Antônio Joaquim. **Metodologia do trabalho científico – 23 ed. rev. E. atualizada**, São Paulo – SP: Cortez, 2007.

SILVA, Valdir Pignatta. **PROJETO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO: Conforme ABNT 15200:2012**. 2. ed. São Paulo: Blücher, 2016.

SOUZA JUNIOR, Valdenir de. **Simulação computacional do comportamento de estruturas de aço sob incêndio**. 2004. 126 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.