

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Leonardo de Oliveira Brunetto

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE INCÊNDIOS:
UMA APLICAÇÃO NO PRÉDIO DA ESCOLA DE
ENGENHARIA NOVA DA UFRGS**

Avaliador:
Defesa: dia __/__/2015 às _____ horas
Local: UFRGS / Engenharia Nova Oswaldo Aranha, 99, sala 304
Anotações com sugestões para qualificar o trabalho são bem-vindas. O aluno fará as correções e lhe passará a versão final do trabalho, se for de seu interesse.

Porto Alegre
junho 2015

LEONARDO DE OLIVEIRA BRUNETTO

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE INCÊNDIOS:
UMA APLICAÇÃO NO PRÉDIO DA ESCOLA DE
ENGENHARIA NOVA DA UFRGS**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientadora: Ângela Gaio Graeff

Porto Alegre

junho 2015

LEONARDO DE OLIVEIRA BRUNETTO

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE INCÊNDIOS: UMA
APLICAÇÃO NO PRÉDIO DA ESCOLA DE ENGENHARIA
NOVA DA UFRGS**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pela Professora Orientadora e pela Coordenadora da atividade de ensino - Trabalho de Conclusão de Curso II - Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, junho de 2016

Profa. Ângela Gaio Graeff
Ph.D. pela Universidade de Sheffield
Orientadora

Profa. Luciani Somensi Lorenzi
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Coordenadora Substituta COMGRAD-ENG.CIVIL

BANCA EXAMINADORA

Profa. Ângela Gaio Graeff (UFRGS)
Ph.D. pela Universidade de Sheffield

Profa. Vanessa Fátima Pasa Dutra (UFRGS)
Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Major Eduardo Estevam Camargo Rodrigues (CBMRS)
Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul e pela Universidade de Coimbra

Dedico este trabalho a meus pais, Edemir e Rozani, e
minha irmã, Juliana, que sempre me apoiaram e
especialmente durante o período do meu Curso de
Graduação estiveram ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Profa. Ângela Gaio Graeff, orientadora deste trabalho, pela sabedoria e empenho dedicado à elaboração deste trabalho.

Agradeço aos meus pais, pelo amor, incentivo e apoio incondicional.

Agradeço aos meus colegas e amigos pelo apoio e amizade.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar,
não seremos capazes de resolver os problemas causados
pela forma como nos acostumamos a ver o mundo.

Albert Einstein

RESUMO

Ensaio de edificações submetidas a incêndio são extremamente caros e não podem ser realizados em escala reduzida, porque as variáveis envolvidas não são lineares, desta forma necessitando a construção de uma estrutura para realização de um ensaio destrutivo. Todavia, é possível utilizar a simulação computacional para prever o comportamento de um incêndio em uma edificação. O Fire Dynamics Simulator (FDS) é um software livre que é desenvolvido pelo *The National Institute of Standards and Technology* (NIST) dos Estados Unidos. O FDS é capaz de representar um incêndio em uma edificação de maneira adequada se os parâmetros a serem inseridos forem adequadamente escolhidos. Esse trabalho mostra, detalhadamente, o processo de montagem de uma simulação computacional de incêndio da Escola de Engenharia Nova da UFRGS através da interação de diferentes *softwares*. É também exemplificado a tentativa de importação de uma estrutura em 3D criada dentro do *software Revit* que não funcionou da maneira esperada. O modelo final foi criado através do *Pyrosim* que é uma interface gráfica para o FDS e processado computacionalmente através do Centro Nacional de Supercomputação (CESUP). Foram realizadas quatro simulações distintas do mesmo modelo computacional, alterando entre elas a localização do início do incêndio e em um caso a consideração de uma janela aberta, para verificar qual a diferença da livre ventilação. As simulações um, dois e três iniciaram na biblioteca, devido à alta carga de incêndio e a simulação 4 teve seu início aleatoriamente escolhido, que foi no terceiro pavimento. A simulação 3 apresentou uma propagação do fogo de forma acelerada em decorrência da livre ventilação fornecida pela janela aberta e da alta carga de incêndio presente na biblioteca. Com as condições de incêndio apresentadas na simulação 3, não haveria tempo suficiente para os usuários da Escola de Engenharia Nova da UFRGS evacuarem em segurança a edificação. As simulações 1 e 2 apresentaram um crescimento de incêndio retardado pela ventilação limitada. Já a simulação 4 teve início em uma sala próxima aos sanitários do terceiro pavimento e o incêndio ficou isolado no compartimento, dessa maneira não oferecendo risco aos usuários. Conclui-se que a Escola de Engenharia Nova da UFRGS, dentro das características apresentadas na simulação, não apresenta a segurança necessária para a evacuação dos usuários em uma situação de incêndio.

Palavras-chave: Simulação de Incêndios. Fire Dynamics Simulator. Incêndios em Edificações. Escola de Engenharia Nova da UFRGS.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Triângulo do fogo.....	13
Figura 2 – Diagrama da pesquisa	17
Figura 3 – Incêndio controlado pelos combustíveis	25
Figura 4 – Incêndio controlado pela ventilação.....	26
Figura 5 – Fases de um incêndio compartimentado.....	26
Figura 6 – Bombeiros combatendo o incêndio.....	29
Figura 7 – Elevado número de vítimas	29
Figura 8 – Desabamento do pavilhão ao meio dia.....	30
Figura 9 – Início do incêndio com grande quantidade de fumaça.....	30
Figura 10 – Edifício Andraus antes do incêndio.....	31
Figura 11 – Edifício Andraus durante o incêndio.....	31
Figura 12 – Incêndio generalizado no edifício Joelma.....	32
Figura 13 – Escola de Engenharia Nova da UFRGS modelada no <i>Revit</i>	42
Figura 14 – Escola de Engenharia Nova da UFRGS após importação para o <i>Pyrosim</i>	42
Figura 15 – Teste isolado das janelas em $t=0$ s.....	43
Figura 16 – Teste isolado das janelas em $t=300$ s.....	44
Figura 17 – Paredes representadas como ocas.....	44
Figura 18 – Entrada das coordenadas para representação dos elementos no <i>Pyrosim</i>	45
Figura 19 – Representação das paredes externas e lajes do primeiro pavimento..	46
Figura 20 – Criação dos pavimentos.....	46
Figura 21 – Representação das janelas através de aberturas.....	47
Figura 22 – Simulação teste para as janelas.....	48
Figura 23 – Posição das janelas e dispositivos do segundo pavimento.....	49
Figura 24 – Forma da equação estequiométrica para o modelo químico simples.	50
Figura 25 – Parâmetros da reação de combustão.....	50
Figura 26 – Energia liberada pela combustão de um bloco de papel.....	52
Figura 27 – Distribuição da carga de incêndio pelo segundo pavimento.....	54
Figura 28 – Definição da malha para a simulação.....	57
Figura 29 – Local de início do incêndio da simulação 1.....	59
Figura 30 – Taxa de calor liberada pela simulação 1.....	60
Figura 31 – Perfil de temperaturas ao final da simulação 1.....	60

Figura 32 – Propagação do fogo pela biblioteca durante a simulação 1.....	61
Figura 33 – Propagação da fumaça durante a simulação 1.....	62
Figura 34 – Continuação da propagação da fumaça durante a simulação 1.....	63
Figura 35 – Velocidade de movimentação do ar nas escadarias.....	64
Figura 36 – Movimentação do ar do térreo para o segundo pavimento.....	65
Figura 37 – Localização dos termopares.....	66
Figura 38 – Variação da temperatura dos termopares da simulação 1.....	67
Figura 39 – Local de início do incêndio da simulação 2.....	68
Figura 40 – Taxa de calor liberada pela simulação 2.....	69
Figura 41 – Perfil de temperaturas ao final da simulação 2.....	70
Figura 42 – Propagação do fogo pela biblioteca durante a simulação 2.....	71
Figura 43 – Propagação da fumaça durante a simulação 2.....	72
Figura 44 – Continuação da propagação da fumaça durante a simulação 2.....	73
Figura 45 – Velocidade de movimentação do ar nas escadarias.....	74
Figura 46 – Movimentação do ar do térreo para o segundo pavimento.....	74
Figura 47 – Variação da temperatura dos termopares da simulação 2.....	75
Figura 48 – Local de início do incêndio da simulação 3.....	76
Figura 49 – Taxa de calor liberada pela simulação 3.....	77
Figura 50 – Perfil de temperaturas ao final da simulação 3.....	78
Figura 51 – Propagação do fogo pela biblioteca durante a simulação 3.....	79
Figura 52 – Propagação da fumaça durante a simulação 3.....	80
Figura 53 – Continuação da propagação da fumaça durante a simulação 3.....	81
Figura 54 – Continuação da propagação da fumaça durante a simulação 3.....	82
Figura 55 – Velocidade de movimentação do ar nas escadarias.....	83
Figura 56 – Variação da temperatura dos termopares da simulação 3.....	84
Figura 57 – Variação da temperatura dos termopares da simulação 3.....	85
Figura 58 – Local de início do incêndio da simulação 4.....	86
Figura 59 – Taxa de calor liberada pela simulação 4.....	87
Figura 60 – Perfil de temperaturas ao final da simulação 4.....	88
Figura 61 – Propagação do fogo pelo terceiro pavimento.....	88
Figura 62 – Propagação da fumaça durante a simulação 4.....	89
Figura 63 – Vista externa da propagação da fumaça durante a simulação 4.....	90
Figura 64 – Comparativo da liberação de energia entre as diferentes simulações	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades térmicas de materiais comuns.....	21
Tabela 2 – Potencial calorífico de materiais comuns.....	22
Tabela 3 – Resumo das ações dos diferentes elementos associadas ao desenvolvimento de um incêndio controlado pela ventilação.....	27
Tabela 4 – Propriedades térmicas do papel comum.....	51
Tabela 5 – Distribuição e detalhamento dos materiais combustíveis.....	53
Tabela 6 – Teste de diferentes malhas.....	56
Tabela 7 – Comparativo entre os desempenhos computacionais.....	91
Tabela 8 – Temperatura máxima de incêndio atingida pelas diferentes simulações.....	92
Tabela 9 – Comparativo da propagação da fumaça entre as diferentes simulações.....	93

LISTA DE SIGLAS

BIM – *Building Information Modelling*

BSFM – *Building Fire Simulator Model*

CESUP – Centro Nacional de Supercomputação

CFD – *Computer Fluid Dynamics*

FDS – *Fire Dynamics Simulator*

NFPA – *National Fire Protection Association*

NIST – *The National Institute of Standards and Technology*

SMV – *Smokeview*

Suinfra – Superintendência de Infraestrutura da UFRGS

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

A_f = área do piso do compartimento (m^2)

H_i = potencial calorífico específico de cada componente do material combustível (MJ/kg)

J = joules, unidade utilizada para medir energia térmica

k = condutividade térmica do material ($W/m \cdot K$)

K = temperatura na escala Kelvin

kg = unidade de massa

m = metro

M_i = massa total de cada componente (i) do material combustível (kg)

q = fluxo de calor (W/m^2)

q_{fi} = valor da carga de incêndio específica (MJ/m²)

s = segundos

T = temperatura em Kelvin

W = potência (J/s)

x = dimensão do fluxo analisado (m)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 DIRETRIZES DA PESQUISA	15
2.1 QUESTÃO DA PESQUISA	15
2.2 OBJETIVO DA PESQUISA	15
2.2.1 Objetivo Principal	15
2.2.2 Objetivo Secundário	15
2.3 PRESSUPOSTO	15
2.4 DELIMITAÇÕES	16
2.5 LIMITAÇÕES	16
2.6 DELINEAMENTO	16
3 QUÍMICA E FÍSICA DO FOGO	18
3.1 FOGO E O PROCESSO DE COMBUSTÃO	18
3.2 MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR	18
3.2.1 Convecção	19
3.2.2 Condução	19
3.2.3 Radiação	20
3.3 PROPRIEDADES TÉRMICAS	21
3.4 CARGA DE INCÊNDIO	22
4 INCÊNDIO EM EDIFICAÇÕES	23
4.1 SEGURANÇA A INCÊNDIOS	23
4.1.1 Segurança da Vida Humana	23
4.1.2 Segurança da Propriedades	24
4.1.3 Segurança ao Ambiente	24
4.2 DESENVOLVIMENTO DO INCÊNDIO EM EDIFICAÇÕES	24
4.2.1 Incêndio Controlado pelos Combustíveis	24
4.2.2 Incêndio Controlado pela Ventilação	25
4.2.3 Flashover	26
4.2.4 Comportamento dos Diferentes Elementos Durante um Incêndio	27
4.2.4.1 Comportamento do Fogo	27
4.2.4.2 Comportamento Humano	27
4.2.4.3 Detecção do Fogo	28

4.2.4.4 Controle Ativo	28
4.2.4.5 Controle Passivo	28
4.3 HISTÓRICO DE INCÊNDIOS NO BRASIL	28
4.3.1 Gran Circo Norte-Americano – 1961	29
4.3.2 Fábrica da Volkswagen – 1970	29
4.3.3 Edifício Andraus – 1972	30
4.3.4 Edifício Joelma – 1974	31
4.4 INCÊNDIOS HISTÓRICOS NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL	32
4.4.1 Edifício das Lojas Renner – 1976	32
4.4.2 Edifício Cacique - 1996	33
4.4.3 Creche Casinha da Emília – 2000	33
4.4.4 Shopping Total – 2007	33
4.4.5 Boate Kiss – 2013	34
4.4.6 Mercado Público de Porto Alegre	34
5 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE INCÊNDIOS	36
5.1 MODELOS DE SIMULAÇÃO	36
5.1.1 Modelos de Zonas Múltiplas	37
5.1.2 Building Fire Simulation Model (BSFM)	37
5.1.3 Computer Fluid Dynamics (CFD)	37
5.2 SOFTWARES UTILIZADOS NO TRABALHO	37
5.2.1 Fire Dynamic Simulator (FDS)	38
5.2.2 Smokeview (SMV)	38
5.2.3 Pyrosim	38
5.2.4 Autodesk's Revit	39
5.3 UTILIZAÇÃO DE SUPERCOMPUTADORES	39
6 MODELO COMPUTACIONAL.....	41
6.1 MODELAGEM NO REVIT.....	41
6.2 MODELAGEM NO PYROSIM.....	44
6.2.1 Lajes e Paredes.....	45
6.2.2 Janelas.....	47
6.3 PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO.....	49
6.3.1 Reação de Combustão.....	49
6.3.2 Materiais Combustíveis.....	51
6.3.3 Dispositivos Para Coleta de Informações.....	54
6.3.4 Fonte de Ignição.....	55

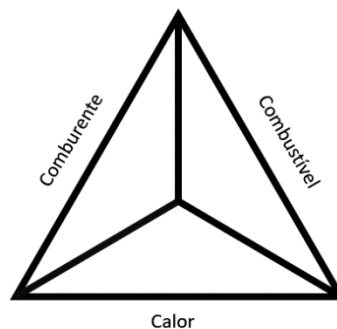
6.3.6 Taxa de Perda de Massa	56
6.3.7 Malha da Simulação	56
7 RESULTADOS	58
7.1 SIMULAÇÃO 1.....	58
7.2 SIMULAÇÃO 2.....	68
7.3 SIMULAÇÃO 3.....	76
7.4 SIMULAÇÃO 4.....	86
7.5 COMPARAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	90
7.5.1 Desempenho Computacional	90
7.5.2 Liberação de Energia	91
7.5.3 Propagação da Fumaça	93
8 CONCLUSÕES	94
REFERÊNCIAS.....	97
APENDICE A – Scripts utilizados para submeter as simulações no CESUP.....	101

1 INTRODUÇÃO

O fogo tem sido amplamente utilizado pelo ser humano desde os primórdios da humanidade com os mais diversos objetivos, tais como cozinhar alimentos e se proteger do frio. Com o passar do tempo, o homem começou a construir suas habitações com materiais combustíveis. Isso fez com que as edificações se tornassem mais susceptíveis ao risco de incêndio.

Segundo Landi (1986), somente é possível a queima de materiais combustíveis com a ação simultânea e contínua de oxigênio e calor em condições nas quais seja possível a contínua combinação do combustível com agentes oxidantes em uma reação exotérmica auto catalisada. A grande maioria das técnicas de controle e combate de incêndio são baseadas em retirar ou controlar um ou mais componentes da Figura 1.

Figura 1 – Triângulo do fogo



(fonte: elaborado pelo autor)

Infelizmente, os procedimentos de prevenção e combate ao incêndio foram considerados com mais vigor e importância somente após ocorrências de sinistros de incêndio com perdas de vidas e bens materiais. No Brasil, esse processo começou após grandes incêndios que aconteceram na década de 1970, tais como a indústria da Volkswagen do Brasil (1970), edifício Andraus (1972) e edifício Joelma (1974).

O processo de combustão de substâncias ainda não é perfeitamente conhecido, pois a queima de um combustível gera um elevado número de substâncias intermediárias. Isso torna o processo extraordinariamente complexo (LANDI, 1986).

Dada a complexidade de um incêndio em edificações, as pesquisas e estudos foram direcionadas para testes de elementos isolados como, por exemplo, a avaliação de uma viga de concreto submetida a altas temperaturas controladas em laboratório. Entretanto, o comportamento estrutural é muito mais complexo do que o de uma viga isolada, pois funciona como um conjunto de vários elementos. Apesar disso, testes em edificações em escala real, na maioria dos casos, não são realizados devido ao alto custo e ensaios em escalas reduzidas não apresentam resultados coerentes, uma vez que os parâmetros de incêndio não podem ser reduzidos de forma linear.

A solução para esse problema é utilizar a simulação computacional para que se possa entender a maneira como a edificação se comporta nas condições de incêndio. Além disso, as dinâmicas computacionais de fluidos são importantes para conseguir reproduzir o perfil de propagação do fogo e a dispersão da fumaça.

O grande impasse em utilizar a simulação computacional para representar a realidade é a validação dos resultados obtidos. Contudo, segundo Ruschel (2011), se estiverem disponíveis dados confiáveis sobre a natureza e quantidade de carga de incêndio, sobre propriedades dos materiais na edificação e sobre a sua arquitetura, é possível reproduzir um incêndio via simulação computacional. Os resultados obtidos pela simulação computacional permitem um melhor entendimento sobre o que acontece durante um incêndio e diversos dados podem ser retirados. Entre eles, os seguintes são de extrema importância:

- a) propagação do fogo e fumaça pela edificação com o tempo;
- b) determinação da duração e das etapas do incêndio;
- c) temperatura atingida pelos elementos estruturais;
- d) evacuação das pessoas durante o incêndio para as saídas de emergência;
- e) comportamento dos materiais com a temperatura;
- f) comportamento da estrutura com a temperatura.

Neste contexto, este trabalho visa analisar, através de simulação computacional, uma edificação submetida a diferentes situações de incêndio. A estrutura escolhida para realizar esta simulação é o prédio da Escola de Engenharia Nova da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Espera-se que, a partir da simulação computacional, seja possível entender como o edifício se comportaria em um incêndio e indicar medidas que aumentem a segurança da edificação, possibilitando também uma evacuação com menor número de vítimas.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

As diretrizes para desenvolvimento do trabalho são descritas nas seções a seguir.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa do trabalho é: dentre 4 cenários propostos, qual a pior situação, visando a segurança dos usuários, em que um incêndio poderia acontecer na Escola de Engenharia Nova da UFRGS?

2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Os objetivos da pesquisa estão classificados em principal e secundários e são descritos a seguir.

2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal do trabalho é determinar a propagação do fogo e fumaça pela Escola de Engenharia Nova em quatro situações de incêndio: três iniciadas no segundo pavimento, onde se encontra a biblioteca e uma iniciada no terceiro pavimento.

2.2.2 Objetivo secundário

O objetivo secundário do trabalho é a apresentação, análise e comparação dos resultados das simulações de incêndio do prédio da Escola de Engenharia Nova da UFRGS.

2.3 PRESSUPOSTO

O trabalho tem por pressuposto que os resultados obtidos via simulação computacional utilizando o *software Fire Dynamics Simulator (FDS)* são válidos para representar um sinistro de incêndio real na edificação.

2.4 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se a estudar somente o prédio da Escola de Engenharia da UFRGS na configuração e com a as características de uso existentes em 2015 e também a adotar cargas de incêndio estabelecidas pela legislação.

2.5 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

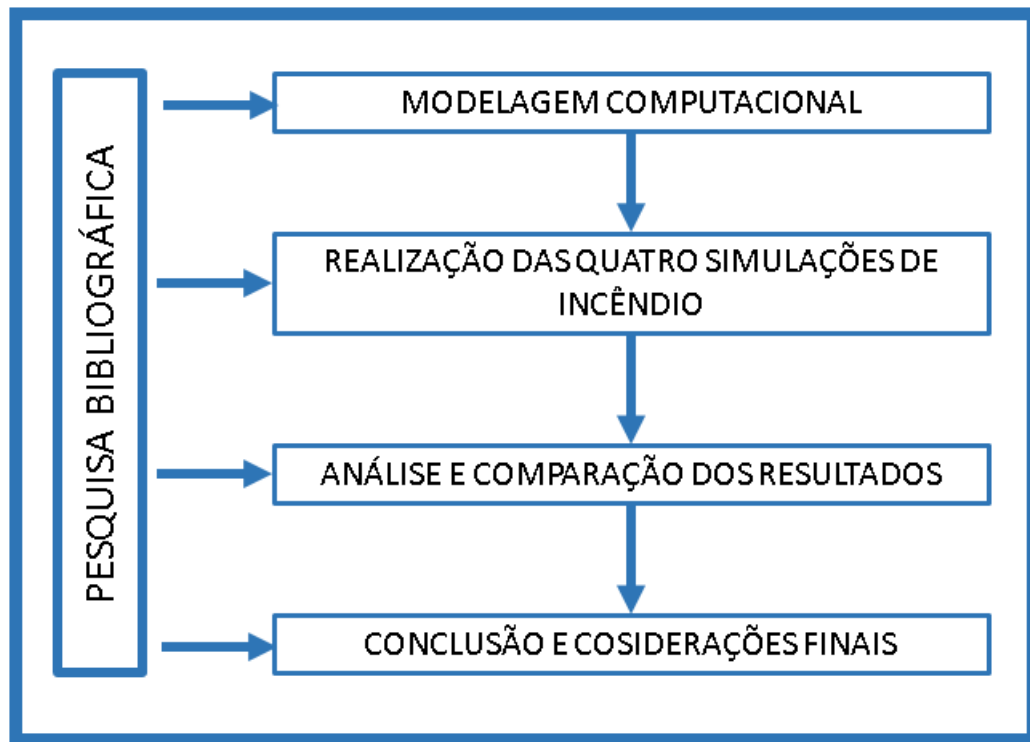
- a) o uso de somente uma ferramenta de simulação computacional;
- b) o uso de estimativas para as propriedades desconhecidas de alguns materiais para determinação da carga de incêndio;
- c) a utilização de somente quatro situações de incêndio;
- d) modelagem das divisórias do segundo e terceiro pavimento.

2.6 DELINEAMENTO

O trabalho será realizado através das etapas apresentadas a seguir que estão representadas na figura 2, e são descritas nos próximos parágrafos:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) modelagem computacional da Escola de Engenharia Nova da UFRGS;
- c) realização das simulações computacionais de incêndio do prédio da Escola de Engenharia Nova da UFRGS;
- d) análise dos resultados;
- e) conclusão e considerações finais.

Figura 2 – Diagrama da pesquisa



(fonte: elaborado pelo autor)

Com a pesquisa bibliográfica será possível compreender melhor como o fogo atua nas edificações. Além disso, serão determinados alguns parâmetros, que serão necessários nas etapas seguintes tais como as propriedades dos materiais.

A simulação computacional foi realizada com base na configuração das plantas obtidas com a Suinfra (Superintendência de Infraestrutura da UFRGS). Devido à grande variabilidade dos materiais existentes na edificação, o papel foi escolhido como o único material na simulação porque ele representa o elemento mais suscetível a pegar fogo e também porque está presente em grande quantidade na edificação.

3 QUÍMICA E FÍSICA DO FOGO

Para que seja possível utilizar o fogo, seja para cozinhar alimentos ou acender uma vela de aniversário, não é necessário conhecer as leis físicas e químicas que comandam o processo de combustão. Entretanto, quando se deseja analisar a segurança contra incêndio de uma edificação, conhecer essas leis se torna extremamente importante. É necessário entender as situações que possibilitam a combustão de um material e como a energia que é liberada pelo processo se propaga pelo ambiente.

3.1 FOGO E O PROCESSO DE COMBUSTÃO

O fogo é resultado do processo de combustão de um material, ele é definido como um conjunto turbulento de chamas, podendo apresentar espessuras na ordem de 10^{-3} m. A chama é proveniente de uma reação química exotérmica e geralmente produz temperaturas no ar na faixa de 1225°C a 2225°C (QUINTIERE, 2006, p. 3, tradução nossa). A medida em que a reação de combustão ocorre, o material combustível é consumido pela chama e a liberação de energia se relaciona com a massa de combustível disponível para queimar: quanto maior a massa, mais energia será liberada (TORERO, 2012, p. 105, tradução nossa).

A combustão, por se tratar de um fenômeno extremamente complexo e produzir diversas substâncias intermediárias durante a queima do material, não é inteiramente conhecida. Entretanto, de maneira geral é necessário que haja a ação contínua de oxigênio, geralmente retirado do ar, e calor em condições para que a queima dos materiais ocorra, pois isso possibilita o desenvolvimento de reações em cadeia. De maneira simples, para que exista combustão é necessário a combinação contínua de combustível, oxigênio e calor em reação exotérmica auto catalisada (LANDI, 1986, p. 1).

3.2 MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

A partir do momento de ignição de um material, ele libera energia na forma de calor. Essa energia liberada pode incendiar os elementos adjacentes. É de grande importância entender como o calor liberado se transfere para os outros materiais, pois é neste processo que ocorre o

crescimento do incêndio. Essa transferência de calor pode ocorrer de três diferentes maneiras: convecção, condução e radiação.

3.2.1 Convecção

A convecção pode ser definida como a transferência de calor por movimentação de fluídos. A convecção é um método de transferência de calor muito importante na propagação da chama, no transporte ascendente de fumaça e na permanência de gases quente no teto ou para o exterior das aberturas do compartimento incendiado. O movimento dos gases por convecção implica o transporte de uma grande quantidade de energia química liberada durante o incêndio para o ambiente que está próximo ao local, e essa movimentação pode ser induzida pelo próprio incêndio, através da ascensão do ar quente e substituição pelo ar frio. Além disso, também existem fatores externos que influenciam na movimentação de gases, tais como correntes de vento (SOARES, 2010, p. 40).

3.2.2 Condução

A condução de calor ocorre nas fases líquida, sólida e gasosa dos materiais. O fluxo de calor ocorre sempre da maior para a menor temperatura. De acordo com a lei de Fourier, o fluxo de calor resultante da condução térmica é proporcional ao gradiente de temperatura na dimensão de fluxo analisada, sendo a relação expressada na equação (1) (LIENHARD IV; LIENHARD V; 2015, p10, tradução nossa).

$$q = -k \cdot (dT/dx) \quad (\text{equação 1})$$

Sendo:

q = fluxo de calor (W/m²);

k = condutividade térmica do material (W/m*K);

T = temperatura em Kelvin;

x = dimensão do fluxo analisado.

De acordo com Soares (2010, p. 37), a transferência térmica por condução ocorre por dois motivos: a migração dos elétrons livres e das ondas vibracionais dos átomos ligados em arranjos. Materiais que são bons condutores de calor também são bons condutores elétricos, porque ambos efetuam interações envolvendo elétrons livres. Em contrapartida, outros materiais que efetuam a transferência de calor principalmente por vibrações da estrutura molecular, não apresentam um bom desempenho de transferência de calor.

3.2.3 Radiação

A radiação térmica é emitida através de ondas eletromagnéticas, que viajam pelo vácuo e são capazes de atravessar diversos materiais. Um elemento que esteja com a temperatura acima de 0 Kelvin emite radiação térmica. Objetos à temperatura ambiente emitem baixas frequências de radiação que não são perceptíveis ao olho humano, pois estão fora do nosso campo de visão, abaixo da faixa do infravermelho. Entretanto, quando olhamos para um pedaço de metal a alta temperatura, somos capazes de perceber com os olhos alguma parte da radiação térmica emitida pelo material (BLUNDELL, 2006, p. 247, tradução nossa). Isso acontece porque a radiação aumenta proporcionalmente com o aumento de temperatura.

De acordo com Bunchanan (2002, p. 52, tradução nossa), a radiação é muito importante nos incêndios, porque é o principal mecanismo de transferência de calor das chamas para a superfície dos combustíveis, da fumaça quente para os objetos do edifício e do edifício incendiado para o edifício adjacente.

3.3 PROPRIEDADES TÉRMICAS

Cada material possui um comportamento diferente à temperatura, dessa maneira possuindo diferentes propriedades relacionadas a seu desempenho em absorver e transmitir calor, as quais são denominadas propriedades térmicas. As propriedades térmicas dos materiais são importantes para a compreensão de como o calor se transmite entre os elementos de uma edificação. A tabela 1 mostra algumas propriedades térmicas de materiais comuns.

Tabela 1 – Propriedades térmicas de materiais comuns

Material	Condutividade Térmica k (W/mK)	Calor Específico c_p (J/kgK)	Densidade ρ (kg/m ³)	Difusidade Térmica α (m ² /s)	Inércia Térmica $k\rho c_p$ (W ² s/m ⁴ K ²)
Cobre	387	380	8940	1,14 x 10 ⁻⁴	1,3 x 10 ⁹
Aço (carbono)	45,8	460	7850	1,26 x 10 ⁻⁵	1,6 x 10 ⁸
Tijolo (comum)	0,69	840	1600	5,2 x 10 ⁻⁷	9,3 x 10 ⁵
Concreto	0,8-1,4	880	1900-2300	5,7 x 10 ⁻⁷	2 x 10 ⁶
Vidro (plano)	0,76	840	2700	3,3 x 10 ⁻⁷	1,7 x 10 ⁶
Gesso	0,48	840	1440	4,1 x 10 ⁻⁷	5,8 x 10 ⁵
Acrílico	0,19	1420	1190	1,1 x 10 ⁻⁷	3,2 x 10 ⁵
Carvalho	0,17	2380	800	8,9 x 10 ⁻⁸	3,2 x 10 ⁵
Pinus-eliote	0,14	2850	640	8,3 x 10 ⁻⁸	2,5 x 10 ⁵
Amianto	0,15	1050	577	2,5 x 10 ⁻⁷	9,1 x 10 ⁴
Placa de isolamento de fibra	0,0041	2090	229	8,6 x 10 ⁻⁸	2 x 10 ⁴
Espuma de poliuretano	0,0034	1400	20	1,2 x 10 ⁻⁶	9,5 x 10 ²
Ar	0,0026	1040	1,1	2,2 x 10 ⁻⁵	-

(fonte: adaptado de DRYSDALE¹, 1998 apud BUNCHANAN, 2002, p. 49, tradução nossa)

¹ DRYSDALE, D. **An Introduction to Fire Dynamics**. 2nd. ed. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 1998.

Quando um material entra no processo de combustão, ele começa a liberar energia em forma de calor. Essa energia liberada pode ser representada pelo potencial calorífico, que é utilizado na determinação da carga de incêndio. A tabela 2 mostra valores do potencial calorífico de alguns materiais.

Tabela 2 – Potencial calorífico de materiais comuns

Material	MJ/kg	Material	MJ/kg
Madeira	17,5	Poliéster	30
Roupas	20	Poliuretano	25
Cortiça	20	PVC	20
Algodão	20	Betume (asfalto)	40
Papel	20	Couro	20
Seda	20	Linólio	20
Palha	20	Borracha de Pneu	30
ABS (plástico)	35	Carvão	30

(fonte: adaptado de EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2002, p. 49, tradução nossa)

3.4 CARGA DE INCÊNDIO

A carga de incêndio é um importante fator que é utilizado na segurança contra incêndios. Ela é a soma do potencial combustível de todos os materiais presentes em um ambiente, valores disponíveis na tabela 2, dividido pela área do compartimento sendo expressado pela equação (2).

$$q_{fi} = \frac{(\sum M_i * H_i)}{A_f} \quad (\text{equação 2})$$

Sendo:

q_{fi} = valor da carga de incêndio específica (MJ/m²);

M_i = massa total de cada componente (i) do material combustível (kg);

H_i = potencial calorífico específico de cada componente do material combustível (MJ/kg);

A_f = área do piso do compartimento (m²).

4 INCÊNDIO EM EDIFICAÇÕES

Um incêndio não desejado é uma fonte destrutiva que pode causar centenas de mortes e incontáveis perdas de patrimônio todos os anos. As pessoas esperam estar seguras de incêndios não desejados em suas casas e locais de trabalho. Infelizmente, incêndios podem ocorrer em praticamente todos os tipos de edificações. A segurança dos ocupantes depende de muitos fatores, entre eles o projeto e a construção da edificação (BUNCHANAN, 2002, p. 2, tradução nossa).

4.1 SEGURANÇA A INCÊNDIOS

A probabilidade de ocorrência de um incêndio indesejado em qualquer edificação é baixa. Entretanto, os objetivos de segurança contra incêndio são determinados para que caso aconteça um incêndio indesejado, as probabilidades de que aconteçam mortes, lesões e perdas de patrimônio sejam reduzidas a níveis mínimos.

Os primeiros códigos e brigadas de combate a incêndio foram desenvolvidos pelas companhias seguradoras, que estavam mais interessadas na proteção de propriedade do que na segurança dos usuários. Recentemente, os códigos e normas têm seguido a tendência de priorizar a segurança da vida humana.

4.1.1 Segurança da Vida Humana

Segundo Guanquan e Jinhua (2008, p. 620, tradução nossa), se os usuários da edificação não conseguirem chegar a um local seguro, a partir do início do incêndio, eles podem sofrer injúrias do fogo. Resumindo, deve-se garantir que os ocupantes da edificação sejam alertados do incêndio e conduzidos por rotas de fuga, que devem ser protegidas de fogo e fumaça. Além disso, as pessoas dos edifícios adjacentes também devem ser protegidas e previsões devem ser feitas para a segurança dos bombeiros no combate ao incêndio.

4.1.2 Segurança da Propriedade

A segurança da propriedade tem como objetivo proteger o patrimônio, o que nem sempre está relacionado com a segurança dos usuários. Entretanto, alguns sistemas de segurança conseguem proteger os usuários e o patrimônio. Um exemplo é o sistema de *splinker* automático, capaz de detectar e extinguir princípios de incêndio de maneira autônoma.

4.1.3 Segurança ao Ambiente

A única maneira de garantir a segurança ao ambiente é extinguir o fogo enquanto ele ainda está em pequenas proporções. Os danos ambientais podem acontecer de diversas formas, entre elas a liberação de gases tóxicos na atmosfera e o carregamento de combustíveis pelo arraste da água.

Um exemplo recente de danos ambientais foi o incêndio que ocorreu no início de abril de 2015 na empresa Ultracargo, situada em Santos. A água utilizada para combater o incêndio nos tanques de combustíveis retornou ao mar poluída pelo contato com agentes químicos, causando uma alta mortalidade dos peixes na região (LYRA et. al., 2015, p. 1).

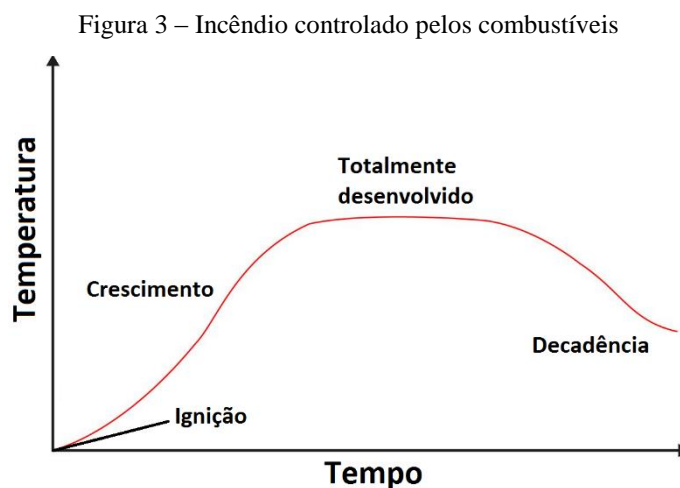
4.2 DESENVOLVIMENTO DO INCÊNDIO EM EDIFICAÇÕES

Segundo *National Institute of Standards and Technology* (2010, p. 3, tradução nossa), o desenvolvimento do fogo é função de vários fatores, incluindo: propriedade dos combustíveis, ventilação (natural ou mecânica), compartimentação geométrica, localização do fogo, e condições ambientais (vento, temperatura, umidade, etc.). Basicamente, há dois tipos de incêndios em edificações: os que são controlados pelos combustíveis e os controlados pela ventilação.

4.2.1 Incêndio Controlado pelos Combustíveis

Landi (1986, p. 2) afirma que: “Quando as aberturas são suficientemente grandes para não se constituírem obstáculos sérios à passagem de ar, então o suprimento deste é suficiente para que a combustão seja controlada pelo combustível disponível (melhor dizendo, pela superfície do combustível)”. A figura 3 mostra o desenvolvimento de um incêndio que tem grande

disponibilidade de oxigênio e se caracteriza como controlado somente pela queima do combustível.

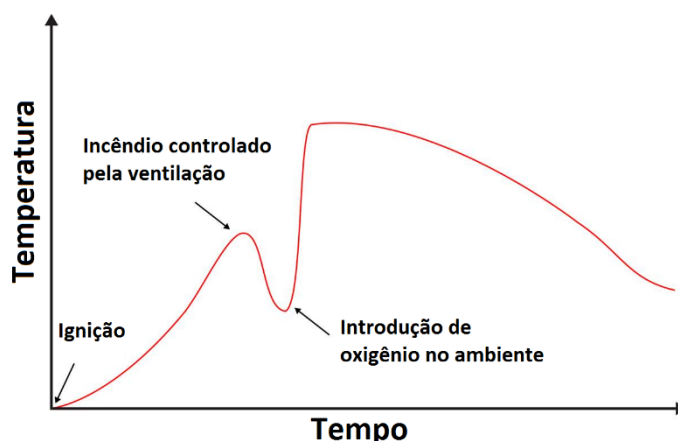


(fonte: THE NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY, 2010, p. 4, tradução nossa)

4.2.2 Incêndio Controlado pela Ventilação

Em uma estrutura, geralmente o incêndio é limitado pela quantidade de oxigênio disponível. Contudo, após o fogo consumir uma porta ou uma janela, ele permite a entrada de oxigênio no ambiente. Esse oxigênio introduzido se mistura com os gases inflamáveis confinados no compartimento, desta maneira fornecendo condições para a combustão acelerada destes gases, levando a uma rápida expansão na temperatura do ambiente (THE NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY, 2010, p. 4, tradução nossa). Na figura 4 podemos observar que após atingir um máximo de temperatura, o incêndio começa a decair até o momento que há introdução de oxigênio, que leva a uma rápida expansão na temperatura.

Figura 4 – Incêndio controlado pela ventilação

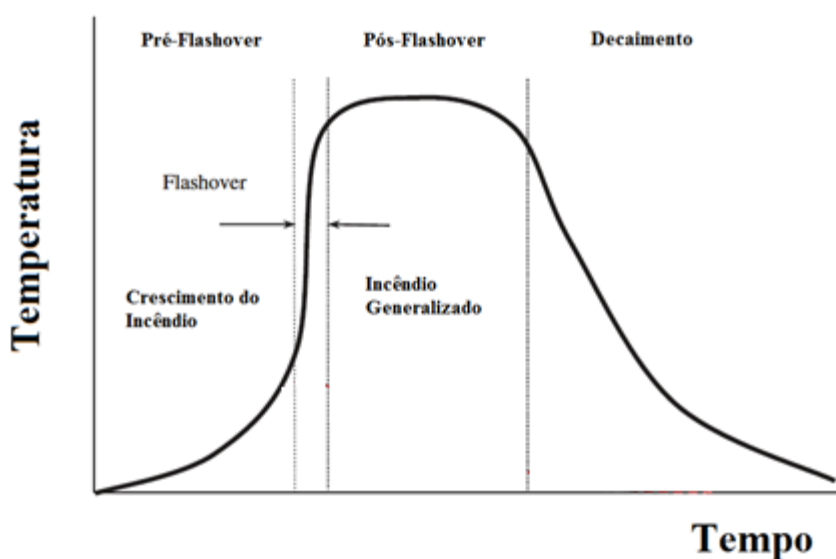


(fonte: THE NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY, 2010, p. 4, tradução nossa)

4.2.3 Flashover

Segundo Bunchanan (2002, p. 60, tradução nossa) o *flashover* é a transição de um incêndio localizado para todas as superfícies expostas dos combustíveis dentro de um compartimento. Ou seja, é uma transição entre dois estados. Na figura 5, é possível identificar que no período de flashover a temperatura aumenta muito em um curto espaço de tempo, assim levando a uma situação de incêndio generalizado.

Figura 5 – Fases de um incêndio compartimentado



(fonte: INGASON, 2015, p. 24, tradução nossa)

4.2.4 Comportamento dos Diferentes Elementos Durante um Incêndio

Uma edificação é composta por diversos elementos que atuam de formas diferenciadas durante um incêndio. A tabela 3 mostra um resumo das diferentes ações dos elementos associadas ao desenvolvimento do incêndio.

Tabela 3 – Resumo das ações dos diferentes elementos associadas ao desenvolvimento de um incêndio

	Ignição	Crescimento do incêndio	Incêndio generalizado	Decaimento
Comportamento do fogo	Aquecimento do combustível	Incêndio controlado pelo combustível	Incêndio controlado pela ventilação	Incêndio controlado pelo combustível
Comportamento humano	Prevenir a ignição	Extinguir o fogo e escapar	Morte	
Deteção	Detectores de fumaça	Detectores de fumaça e calor	Fumaça e fogo externos	
Controle ativo	Prevenir a Ignição	Extinguir por meio de sprinklers, bombeiros ou controle de fumaça	Controlado pelos bombeiros	
Controle passivo		Seleção de materiais resistentes ao espalhamento da chama	Garantir resistência ao fogo, contenção do incêndio e prevenir o colapso	

(fonte: adaptado de BUNCHANAN, 2002, p. 9, tradução nossa)

4.2.4.1 Comportamento do Fogo

O comportamento do fogo foi discutido anteriormente nos itens 4.2.1, 4.2.2 e 4.2.3. Basicamente o incêndio pode ser controlado pela ventilação ou pelos combustíveis.

4.2.4.2 Comportamento Humano

A resposta das pessoas na edificação ao incêndio será dada a partir do momento em que elas obtiverem conhecimento do fogo. A primeira reação é a de prevenir a ignição, caso não seja

possível, os ocupantes da edificação são capazes de extinguir o incêndio em seus estágios iniciais. A partir do momento que o incêndio assume proporções maiores, só resta as pessoas na edificação se deslocarem até um local seguro.

4.2.4.3 Detecção do Fogo

A detecção do fogo pode ser feita pelos humanos pela visão ou pelo olfato. Já a detecção automática é realizada por detectores de fumaça ou sensores de calor geralmente colocados nos forros dos compartimentos. Após o *flashover* o incêndio pode ser visualizado à distância pelas chamas saindo da edificação e grande quantidade de fumaça.

4.2.4.4 Controle Ativo

O controle ativo se refere a todo tipo de controle em que seja necessária alguma ação, sendo ela tomada por uma pessoa ou um dispositivo automático. O combate do incêndio pelos usuários e a ação da brigada de incêndio podem ser classificadas como ações humanas. Já a ativação de *splinkers* é automática.

4.2.4.5 Controle Passivo

É todo o controle que está construído junto a edificação e não necessita de acionamento. As funções do controle passivo são: de selecionar materiais e localizar compartimentos que retardem o espalhamento do fogo, de garantir rotas de fugas seguras aos usuários e de prevenir o colapso estrutural.

4.3 HITÓRICO DE INCÊNDIOS NO BRASIL

No início do século 20, a migração das pessoas do campo para a cidade resultou no aumento da densidade demográfica nos centros urbanos. As consequências desse processo foram que as edificações passaram a ser maiores e mais altas para acomodação das pessoas e melhor utilização do espaço. O problema que passou a existir nesse novo cenário é que, quando uma grande quantidade de material combustível é aglomerada, as consequências de um incêndio podem ser catastróficas.

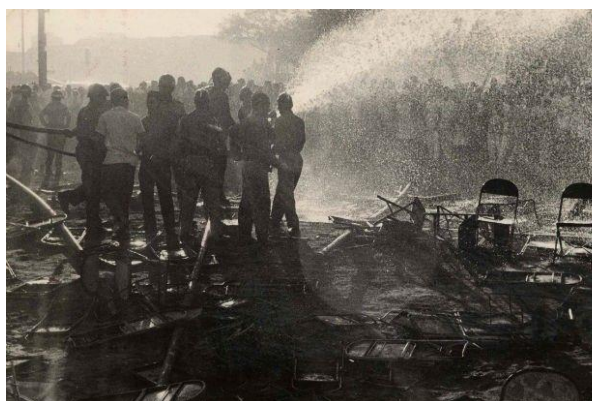
Em outros países no mundo, em que esse processo ocorreu antes do que no Brasil, grandes incêndios aconteceram causando perdas patrimoniais e de vida humana. Porém, medidas e critérios de segurança contra incêndio não foram seriamente considerados no Brasil dada a experiência internacional já existente. Assim, era uma questão de tempo para que as tragédias também acontecessem em território nacional.

4.3.1 Gran Circo Norte-Americano - 1961

O Gran Circo Norte-Americano foi o incêndio que teve o maior número de fatalidades no Brasil, deixando 503 mortos. Ele aconteceu no dia 17 de dezembro de 1961 na cidade de Niterói e teve início criminoso. O responsável foi um ex-funcionário que queria se vingar do dono do circo por ter sido demitido (BUSTAMANTE, 2011, P. 1).

O fogo se iniciou nas lonas da cobertura do circo e após três minutos de incêndio o toldo em chamas caiu sobre a plateia. Centenas de pessoas morreram queimadas e pisoteadas na porta central de saída. As figuras 6 e 7 mostram imagens dos bombeiros combatendo o fogo e do elevado número de vítimas, respectivamente.

Figura 6 – Bombeiros combatendo o incêndio



(fonte: BUSTAMANTE, 2011, p. 2)

Figura 7 – Elevado número de vítimas



(fonte: BUSTAMANTE, 2011, p. 3)

4.3.2 Fábrica da Volkswagen

No dia 18 de dezembro de 1970, ocorreu um incêndio na ala 13 da fábrica da Volkswagen localizada em São Bernardo dos Campos. A ala 13 era utilizada para estocagem de tapeçaria, de espumas de borracha, de nylon, de algodão e de materiais de pintura que são considerados

materiais de fácil combustão. O início do incêndio não teve oficialmente sua causa explicada. Segundo nota oficial divulgada pela Volkswagen somente um trabalhador, que fazia parte da equipe particular de combate a incêndio da fábrica, faleceu no ocorrido. Os danos à estrutura foram tão severos que foi decretado o fim da utilização da edificação (VEJA, 1970, p. 26-28).

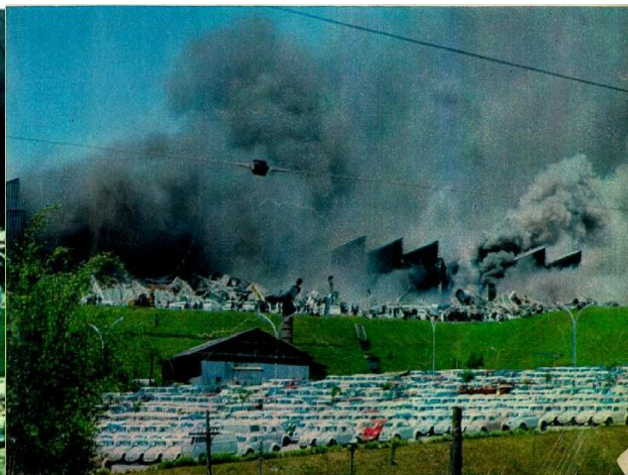
Cabe constar que a Volkswagen adotava uma brigada particular de incêndio, baseada em seus padrões internacionais de segurança. Esse procedimento não era exigido pela legislação brasileira e era considerado como exagerado pelas autoridades locais. Entretanto, mesmo com a ação imediata de combate ao incêndio, a brigada não foi capaz de conter o fogo por causa da alta combustibilidade e quantidade dos materiais estocados no prédio. As figuras 8 e 9 mostram imagens durante o incêndio na fábrica da Volkswagen.

Figura 8 – Desabamento do pavilhão ao meio dia



(fonte: VEJA, 1970, p. 27)

Figura 9 – Início do incêndio com grande quantidade de fumaça



(fonte: VEJA, 1970, p. 27)

4.3.3 Edifício Andraus - 1972

Foi o primeiro grande incêndio em um prédio elevado no Brasil. Ele é localizado na cidade de São Paulo e é utilizado até os dias de hoje. O edifício possui 31 andares, sua estrutura é de concreto armado e o revestimento externo é de pele de vidro. O incêndio começou nas lojas Pirani, localizada no térreo, e a película de vidro na fachada permitiu que o fogo facilmente se propagasse verticalmente para os outros pavimentos. Deste incêndio resultaram 352 vítimas, sendo 16 mortos. O prédio possuía um heliporto na cobertura, o que possibilitou o salvamento

de muitas pessoas (SEITO et. al., 2008, p. 23-24). A figura 10 mostra uma imagem do edifício antes do incêndio, enquanto que a figura 11 mostra uma imagem durante o incêndio.

Figura 10 – Edifício Andraus antes do incêndio



(fonte: ZONA DE RISCO, 2014, p. 1)

Figura 11 – Edifício Andraus durante o incêndio



(fonte: ZONA DE RISCO, 2014, p. 1)

3.2.4 Edifício Joelma - 1974

O incêndio aconteceu no dia 1 de fevereiro de 1974, na cidade de São Paulo, deixando 179 mortos e 300 feridos e teve início pela falha de um ar condicionado localizado no 12º pavimento. O incêndio não se alastrou para os andares inferiores o que pode ser visto na figura 12 (BOMBEIROS EMERGENCIA, 2015, p. 1).

Por ter acontecido dois anos após o incêndio no Edifício Andraus, o incêndio no Edifício Joelma gerou um grande impacto, também por fortes imagens divulgadas pela mídia de pessoas se atirando das janelas para escapar do calor, dando início ao processo de reformulação das medidas de segurança contra incêndio no Brasil (SEITO et. al., 2008, p. 24).

Figura 12 – Incêndio generalizado no edifício Joelma



(fonte: BOMBEIROS EMERGÊNCIA, [2000-2015], p. 4)

4.4 INCÊNDIOS HISTÓRICOS NO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL

Atualmente as normas de proteção contra incêndio no estado do Rio Grande do Sul estão entre as mais avançadas do Brasil. Infelizmente esse status não foi consequência dos sinistros que aconteceram anteriormente no Brasil e em outros países, mas sim dos próprios incêndios que aconteceram no estado.

4.4.1 Edifício das Lojas Renner – 1976

O edifício das Lojas Renner é um prédio de oito andares situado na cidade de Porto Alegre que possui área construída de 10.000 m². Havia aproximadamente 800 pessoas na edificação e o incêndio teve início no primeiro andar. Rapidamente o fogo se espalhou por toda edificação. A falta de hidrantes prejudicou o combate ao incêndio, sendo necessário o bombeamento de água do Lago Guaíba. Pela falta de disponibilidade de água, o combate se deu de forma mais lenta, facilitando que o fogo se espalhasse para os edifícios adjacentes. O incêndio deixou um número de 30 mortos e 200 feridos.

4.4.2 Edifício Cacique - 1996

O Edifício Cacique, localizado no centro de Porto Alegre, foi alvo de um incêndio que aconteceu no dia 27 de junho de 1996 e teve início em um bingo no andar térreo e atingiu 13 dos 27 andares do edifício, deixando 28 feridos. Felizmente nenhuma pessoa veio a falecer devido ao incêndio. Segundo o secretário municipal de obras, o edifício havia recebido uma notificação em 1995 para tomar medidas de prevenção contra incêndio e estava em situação irregular (SOUZA, 1996, p. 1). Sobre esse incêndio foi realizado um trabalho por Mazonni (2010, p. 62), que através de um modelo computacional simulado pelo *Fire Dynamics Simulator*, obteve resultados que estavam de acordo com o registro fotográfico do ambiente sinistrado.

4.4.3 Creche Casinha da Emília - 2000

A creche fica localizada na cidade de Uruguaiana e o incêndio aconteceu em uma salinha aonde 12 crianças de 2 a 3 anos estavam dormindo após o almoço. O incêndio teve início com um curto circuito de um aquecedor e se espalhou rapidamente pelos cobertores que as crianças estavam dormindo. Houve negligência por parte da creche, pois não havia nenhum adulto no local no momento do incêndio. As 12 crianças que estavam no local vieram a falecer (SOUZA; GERCHMANN, 2000, p. 1).

O incêndio teve um forte impacto na sociedade e comoveu bastante a população do estado do Rio Grande do Sul. Por se tratarem de crianças de idade entre 2 a 3 anos e preocupação das outras famílias, o debate sobre segurança contra incêndio foi fortemente levantado, trazendo melhorias na segurança.

4.4.4 Shopping Total - 2007

O incêndio no Shopping Total teve início em uma loja de brinquedos. O fogo estava concentrado em uma gôndola de brinquedos cercada por vidros. Os brigadistas, ao chegarem no local, quebraram os vidros possibilitando a entrada de oxigênio e a rápida propagação do fogo pela loja. A alta carga de incêndio e fumaças tóxicas liberadas por brinquedos plásticos dificultaram o combate do incêndio e a situação ficou ainda mais complicada com a queda do mezanino da loja. O Incêndio atingiu 20 das 490 lojas e não houve vítimas pelo fato de o

shopping já estar fechado e o cinema ter sido evacuado. Sobre esse incêndio foram desenvolvidas simulações computacionais que apresentaram perfis de temperatura próximos aos que aconteceram no incêndio real (RUSCHEL, 2011, p. 57 e 121).

4.4.5 Boate Kiss - 2013

No dia 27 de janeiro de 2013, aconteceu na cidade de Santa Maria o pior incêndio na história do Rio Grande do Sul. O incêndio na boate Kiss matou 242 pessoas e deixou outras 680 feridas. A causa do incêndio foi a utilização de fogos de artifício por um dos integrantes da banda que se apresentava na noite, que tentou combater o fogo com um extintor que apresentou falha e não foi capaz de combater o princípio do incêndio. De acordo com Irion et. al. (2013, p. 1-6) os fatores listados abaixo contribuíram para o agravamento das fatalidades:

- a) a boate Kiss apresentava uma série de irregularidades quanto aos alvarás dos bombeiros;
- b) o número de pessoas na boate Kiss excedia a lotação permitida;
- c) a espuma do isolamento acústico não era adequada, feita de poliuretano;
- d) existência de grades de contenção atrapalharam a saída dos usuários;
- e) em toda a boate Kiss, somente havia uma porta de entrada e saída;
- f) inexistência de rotas de fuga e sinalização de emergência;
- g) portas não haviam dimensões suficientes para o a passagem das pessoas;
- h) janelas obstruídas atrapalharam a exaustão do ar.

O incêndio teve como consequência direta o aumento na fiscalização dentro do Estado e em todo o Brasil. Diversas casas noturnas e estabelecimentos em situação irregular foram interditados. Também foi consequência direta do acontecido a criação da Comissão Especial de Revisão e Atualização da Legislação de Segurança, Prevenção e Proteção contra Incêndio no RS que resultou na elaboração da Lei Complementar 14.376, popularmente conhecida como Lei Kiss (RIO GRANDE DO SUL, 2013, p. 1).

4.4.6 Mercado Público de Porto Alegre - 2013

No dia 6 de julho de 2013, um incêndio atingiu o Mercado Público de Porto Alegre. O incêndio teve início no segundo andar e consumiu aproximadamente 10% de toda a edificação. Os bombeiros foram capazes de controlar o incêndio em cerca de duas horas. Como o incêndio

aconteceu à noite, os estabelecimentos já estavam fechados e não houve nenhuma vítima (LETÍCIA, 2014, p. 2).

5 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE INCÊNDIOS

A simulação computacional de incêndios é uma ferramenta utilizada para recriar incêndios reais que possam vir a acontecer em uma edificação. A necessidade de simular computacionalmente um incêndio é justificada pelo fato que é oneroso economicamente reproduzir ensaios de incêndio de edificações inteiras com objetivo de entender o seu comportamento ao fogo. Sendo assim os ensaios reais ficam limitados a elementos em separado.

É possível, através da simulação computacional, examinar as interações durante o desenvolvimento do incêndio, a movimentação da fumaça, o espalhamento do fogo para os outros materiais combustíveis, a movimentação das pessoas nas edificações durante o incêndio e uma série de outras características que dependerão do modelo computacional adotado.

5.1 MODELOS DE SIMULAÇÃO

Em termos gerais, um modelo computacional meramente representa numericamente o que se é conhecido sobre um assunto. O computador permite a uma pessoa fazer perguntas e obter respostas sobre processos de acordo com o comportamento no mundo real. Neste cenário, o resultado do modelo é produto da interação de fatores complexos, que não seriam facilmente visualizados sem o modelo. O que faz o modelo ser útil como um sistema lógico, é a manipulação dos dados que são inseridos e dos processos utilizados para análise (FAHY, 1985, p. 2, tradução nossa).

Existem diversos modelos computacionais para representar a realidade. Os primeiros modelos a surgir eram mais simplórios e faziam diversas simplificações. Com o passar dos anos, a teoria e os computadores se desenvolveram muito, possibilitando o desenvolvimento de modelos mais complexos e de resultados mais confiáveis. Na sequência estão descritos os principais modelos utilizados para simulação de incêndios.

5.1.1 Modelos de Zonas Múltiplas

Os modelos de zonas múltiplas foram os primeiros a serem utilizados para simulação de incêndio, sendo inicialmente implantados na década de 1970. O espaço computacional era dividido em zonas distintas que eram significativamente mais ou menos afetadas pelo fogo. Esses modelos eram baseados em leis de conservação de massa e energia suplementados por modelos de espalhamento de fumaça, fluxo de gases, transferência de calor, e pirólise das substâncias. A simplicidade física e computacional levou a uma grande utilização desses modelos. Entretanto, em certos cenários uma descrição mais detalhada das propriedades físicas era necessária e o programa não se mostrava adequado (GLASA, 2013, p. 1, tradução nossa).

5.1.2 Building Fire Simulation Model (BSFM)

O BSFM é um modelo de elementos finitos desenvolvido pela *National Fire Protection Association* (NFPA). Esse modelo foi originalmente projetado com uma metodologia para avaliar relativamente a segurança contra incêndio. Pelo fato de os dados serem limitados, os resultados devem ser considerados como ilustrativos. O modelo funciona baseado em diferentes domínios, que são estabelecidos experimentalmente e podem ser definidos como estágios do crescimento do fogo (FAHY, 1985, p. 1-2, tradução nossa).

5.1.3 Computer Fluid Dynamics (CFD)

A fundação dos modelos de CFD aconteceu no início da década de 1970, que foi quando soluções iterativas para as equações fundamentais de conservação foram derivadas. Os modelos em geral permitem a modelagem e divisão em malha de geometrias complexas em 3 dimensões. O modelo resolve as equações de *Navier-Stokes* e equações fundamentais de conservação para chegar ao resultado desejado (RYDER et. al., 2004, p. 1-2, tradução nossa).

5.2 SOFTWARES QUE SERÃO UTILIZADOS NO TRABALHO

Neste item são descritos os *softwares* utilizados para a realização da simulação computacional de incêndio deste trabalho. Alguns serão utilizados diretamente na realização da simulação, outros serão utilizados como plataformas de suporte para a modelagem geométrica do modelo.

5.2.1 Fire Dynamic Simulator (FDS)

Fire Dynamics Simulator (FDS) é um software baseado em *Computer Fluid Dynamics* (CFD) que resolve equações que descrevem a evolução do fogo. Ele é um programa que lê parâmetros importados de um arquivo, processa uma solução numérica para as equações governantes, e exporta seus resultados para um arquivo de dados. O FDS não tem uma interface, sendo necessário a utilização de outro programa para gerar o arquivo de pré-processamento com os parâmetros de importação (THE NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY, 2015, p. 11, tradução nossa).

O FDS é um *software* gratuito que é desenvolvido pelo NIST (*The National Institute of Standards and Technology*). Cabe destacar que, dependendo do problema analisado, o FDS pode levar de minutos até anos para resolver matematicamente o modelo. O tempo de resolução do modelo é função de duas variáveis: a complexidade das informações do problema inserido e da capacidade de processamento do computador que se está utilizando. Para solucionar este problema, trabalhos anteriores tais como o de Ruschel (2011, p. 83), fizeram uso de supercomputadores para o processamento das simulações.

5.2.2 Smokeview (SMV)

O *Smokeview* é uma ferramenta projetada para visualizar as previsões numéricas geradas por modelos computacionais de incêndio tais como: CFD e modelos de zonas. O *Smokeview* exibe graficamente os resultados de maneira dinâmica (exibe uma animação do fluxo e valor das partículas) e estática (desenho de contornos em 2 dimensões, vetores e níveis de superfície em 3 dimensões) (FORNEY, 2015, p. 3, tradução nossa).

5.2.3 Pyrosim

O *Pyrosim* fornece ao usuário uma interface gráfica para a utilização do FDS. Ele permite a entrada de todos os parâmetros e disponibiliza uma revisão imediata das informações, desta forma garantindo que os parâmetros estarão no formato adequado para exportação ao FDS. Os programas FDS e SMV são integrados ao *Pyrosim*, desta maneira facilitando a importação e exportação de arquivos entre os três *softwares*. Em adição, o *Pyrosim* permite a importação de

arquivos DXF que incluam objetos em 2 dimensões e 3 dimensões (THUNDERHEAD ENGINEERING, 2015, p. 1, tradução nossa).

5.2.4 Autodesk's Revit

A plataforma *Revit* para *Building Information Modelling* (BIM) é um sistema de projeto e documentação que suporta informações de projetos (arquitetônico, estrutural, elétrico, etc.), desenhos e planejamento utilizados na construção de uma edificação. O modelo BIM disponibiliza informações de projetos, dimensões, quantitativos e etapas, quando for necessário (AUTODESK, 2014, p. 1, tradução nossa).

O *software* também possibilita a importação e exportação dos projetos e informações associadas para diferentes formatos. Utilizar o *Revit* para a construção de um modelo em 3 dimensões é relativamente simples e rápido. Cabe destacar que esse software não possibilita a simulação computacional de incêndio. Desta forma ele fica limitado a apenas auxiliar no detalhamento da geometria do problema.

5.3 UTILIZAÇÃO DE SUPERCOMPUTADORES

Devido à necessidade de elevado tempo para processar modelos de simulação de incêndio gerados a partir do FDS, em muitos casos é necessária a utilização de supercomputadores para o processamento dos dados e obtenção de resultados. Segundo o Centro Nacional de Supercomputação ([entre 1995 e 2015], p. 1):

A computação de alto desempenho baseia-se no conceito de agrupamento, onde vários processadores, conectados através de diversos meios de comunicação físicos e lógicos, operam em conjunto, como se fossem uma única máquina. Esta técnica diminui consideravelmente os tempos de processamento, permitindo que cientistas e pesquisadores tratem de problemas em escalas maiores, o que não seria possível pelos métodos da computação convencional.

O CESUP/UFRGS (Centro Nacional de Supercomputação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul) disponibiliza serviços de processamento de dados que serão utilizados para resolver o modelo gerado pelo FDS.

Outra alternativa para ao problema de processamento é a utilização de serviços de processamento em nuvem. Segundo Salter (2015, p. 496, tradução nossa) é possível utilizar um

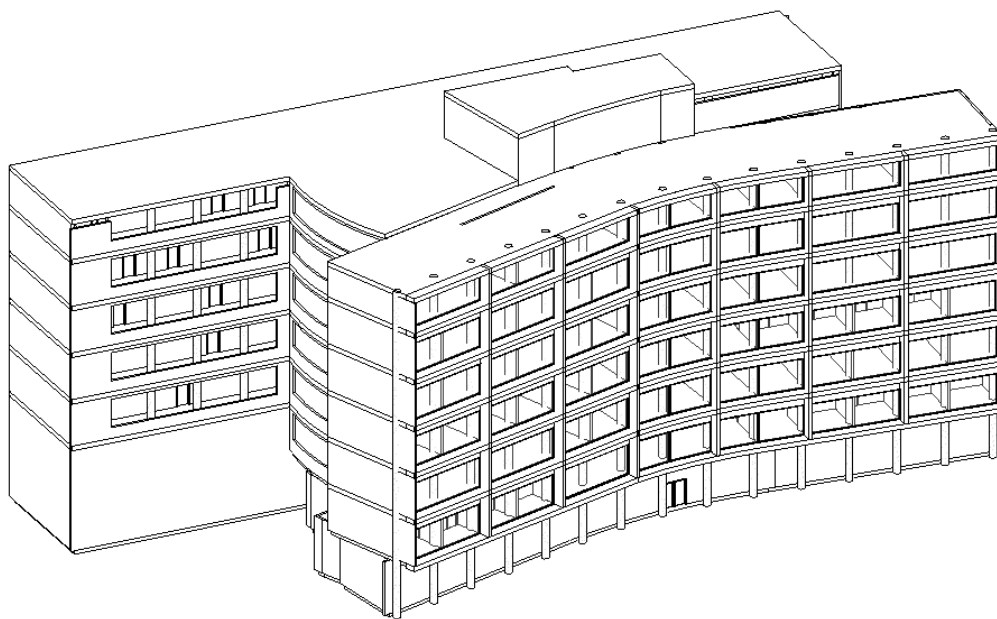
supercomputador para processar modelos criados no FDS. Em seu trabalho ele utiliza serviços de processamento em nuvem fornecidos pela empresa *Amazon EC2* e conclui que o desempenho é similar ao dos serviços regulares.

6 MODELO COMPUTACIONAL

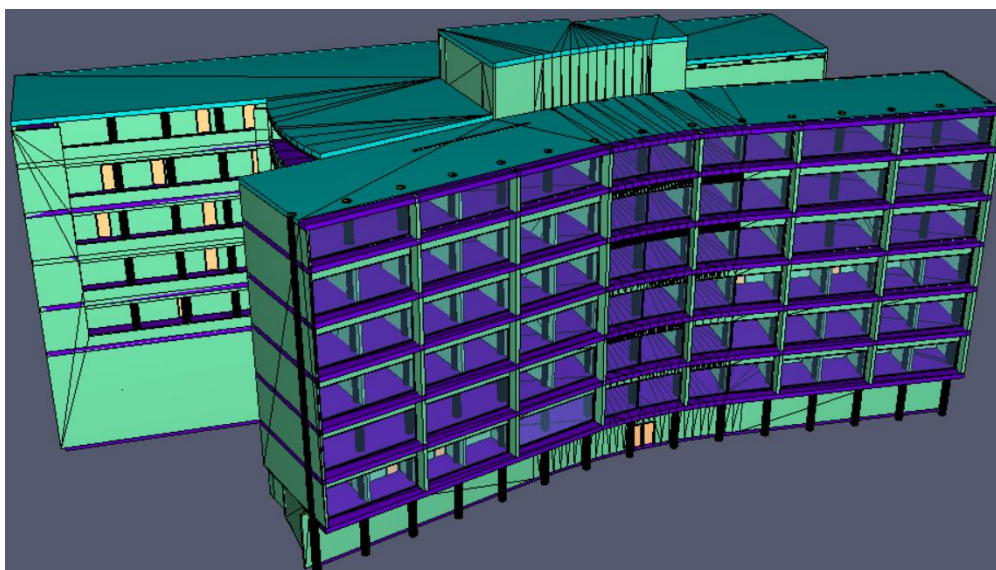
O prédio da Escola de Engenharia Nova da UFRGS trata-se de uma edificação existente e pelo fato de se tratar de uma edificação antiga e de ser uma obra pública (e não privada), não foi possível conseguir os seus projetos originais. Entretanto, a Suinfra (Superintendência de Infraestrutura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul) elaborou o projeto arquitetônico com base no prédio construído e essas plantas foram disponibilizadas, em formato *.dwg*, para o desenvolvimento desse trabalho. Cabe ressaltar que os projetos foram realizados por meio de medições locais, e que por este motivo não são a representação exata da edificação e, as vezes, divergem entre um pavimento e outro. Todavia, essas divergências apontadas são pequenas e os projetos fornecidos foram suficientes para a modelagem de um modelo aproximado do prédio da Escola de Engenharia Nova da UFRGS.

6.1 Modelagem no Revit

Através dos arquivos *.dwg* disponibilizados pela Suinfra, cada pavimento e seus respectivos detalhes foram modelados em 3D através do *software Revit*. Primeiramente, foram criados os diferentes níveis que correspondiam aos pavimentos da edificação, depois sobre cada nível foi importada a planta baixa de cada pavimento e, por cima deste, foram criados os demais elementos da edificação, como as paredes, pilares, lajes, portas e janelas. Após a conclusão, o modelo foi exportado para o formato *.dwg* e posteriormente importado no *Pyrosim*. A figura 13 mostra o modelo geométrico finalizado no *Revit* e a figura 14 após o modelo ser importado pelo *Pyrosim*.

Figura 13- Escola de Engenharia Nova da UFRGS modelada no *Revit*

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 14- Escola de Engenharia Nova da UFRGS após importação para o *Pyrosim*

(fonte: elaborado pelo autor)

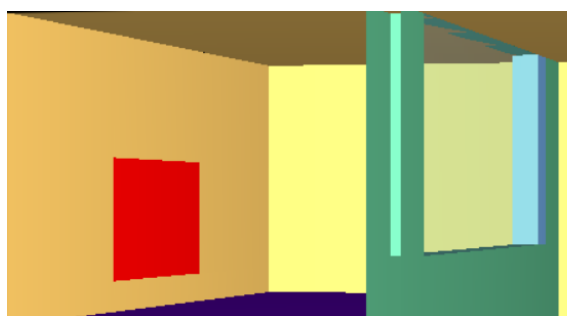
Com o modelo geométrico pronto e importado no *Pyrosim*, foram realizados alguns testes para verificar se não havia nenhum erro devido a incompatibilidade entre os *softwares* descritos anteriormente. Não foi verificado nenhum erro gerado pela exportação e importação entre os programas.

Conforme mencionado no item 5.2.1, as simulações computacionais realizadas através do *Fire Dynamics Simulator* podem necessitar de grande capacidade de processamento de dados para resolver um problema, modelos complexos podem levar anos para serem resolvidos por computadores comuns.

O modelo computacional deste trabalho pode ser considerado um modelo complexo, desta maneira, para garantir que os elementos estão funcionando de forma adequada e que não ocorram erros ao resolver o modelo, os diferentes elementos podem ser testados em simulações isoladas para verificação dos seus comportamentos.

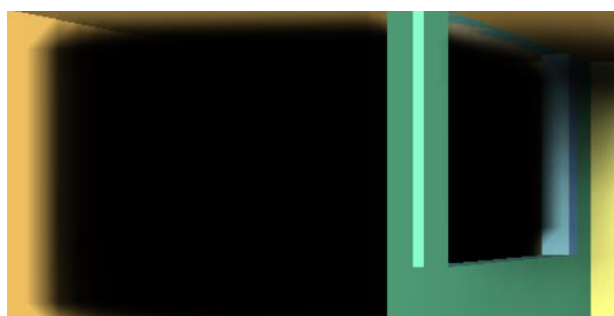
A geometria exportada do *Revit* para o *Pyrosim* apresentou problemas na representação das janelas, pois o *Revit* considera as mesmas com espessuras na ordem de 3 mm a 6 mm, que é a espessura real do vidro. Para representar esses elementos de maneira adequada, seria necessário adotar uma malha com tamanho das células de 3 mm x 3 mm x 3 mm, o que resultaria em um número total de células de $1,7 \times 10^9$. Não é possível se adotar uma malha tão fina, pois não haveriam recursos computacionais suficientes para resolver o problema. Por outro lado, utilizar a janela em uma malha com dimensões de células maiores levaria a simulação a não respeitar a estanqueidade da janela. Essa condição foi verificada em uma simulação isolada de uma janela, onde foi estabelecido um incêndio fictício e se percebeu que a fumaça simplesmente transpassava o vidro, conforme mostram as figuras 15 e 16.

Figura 15 – Teste isolado das janelas em $t = 0s$



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 16 – Teste isolado das janelas em $t = 300s$

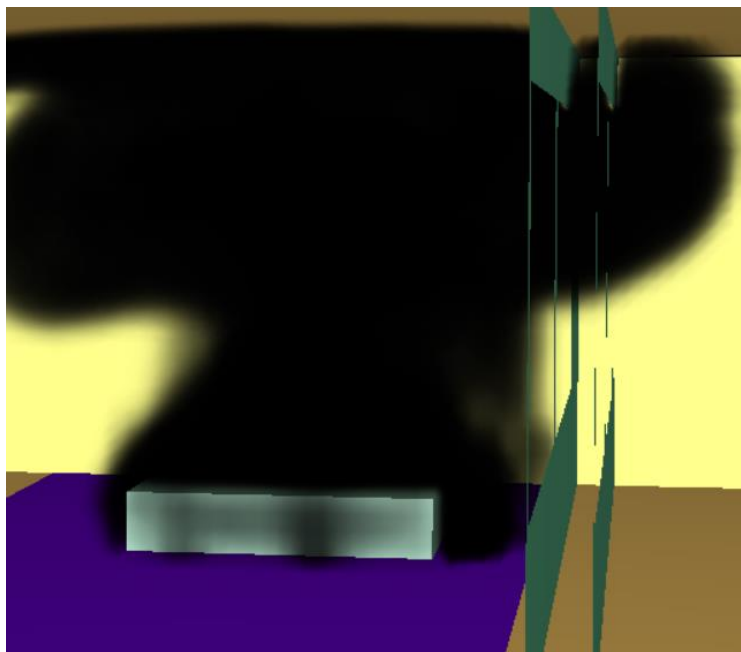


(fonte: elaborado pelo autor)

A primeira tentativa para resolver esse problema foi a retirada de todas as janelas no *Revit* com a posterior exportação/importação para o *Pyrosim*. Com o objetivo de representar as janelas na

simulação, foram criadas aberturas com as mesmas dimensões das janelas e foi estabelecido que elas somente iriam aparecer a partir de desejadas condições. Essa abordagem também não funcionou, pois, ao importar a geometria do prédio as paredes são reconhecidas como ocas, conforme mostra a figura 17, o que resulta na fumaça ascendendo por dentro das paredes. Após essa tentativa, a ideia de trabalhar com um modelo geométrico importado do *Revit* foi descartada.

Figura 17 – Paredes representadas como ocas



(fonte: elaborado pelo autor)

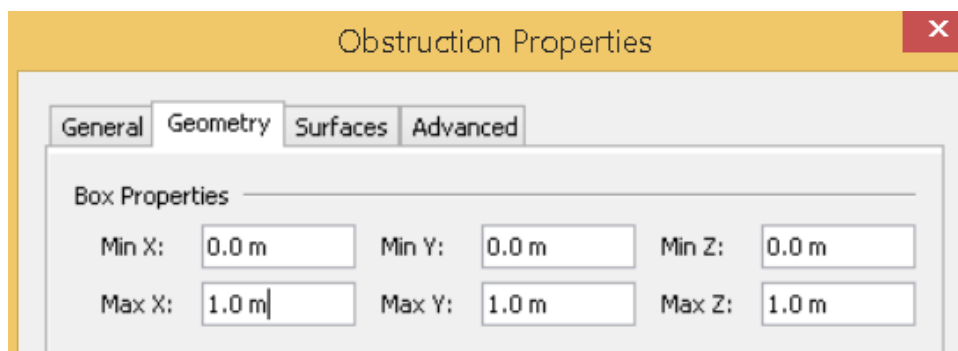
6.2 Modelagem no Pyrosim

Conforme discutido no item 5.2.3, o *Pyrosim* é uma interface gráfica para o *Fire Dynamics Simulator*, isso significa que é possível criar o modelo geométrico através dele. Apesar de saber desde o início que era possível desenvolver o modelo através do *Pyrosim*, buscou-se realizar a modelagem no *Revit* em função de o mesmo possuir mais recursos para modelagens tridimensionais e pela crescente tendência de utilização à tecnologia *BIM*.

A modelagem no *Pyrosim* é mais trabalhosa de ser realizada porque dispõe de menos recursos do que a realizada no *Revit*. A construção de cada elemento é realizada através de coordenadas e o *software* não permite o desenho de linhas curvas, por este motivo os traçados curvos da

Escola de Engenharia foram aproximados por elementos retos. A figura 18 mostra um exemplo de como é dada a entrada dos elementos tridimensionais no *Pyrosim*.

Figura 18 – Entrada das coordenadas para criação de elementos no *Pyrosim*



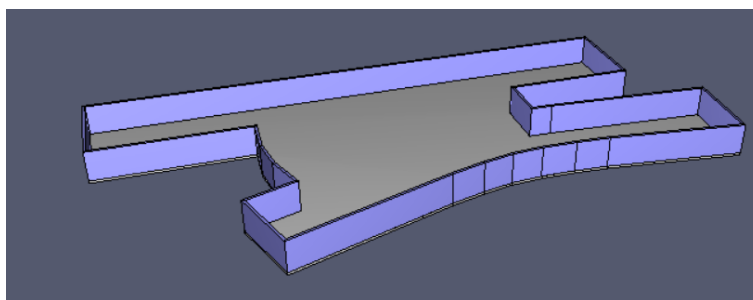
(fonte: elaborado pelo autor)

6.2.1 Lajes e Paredes

As lajes e paredes da Escola de Engenharia foram representadas na simulação como elementos inertes, o que significa que não participam das trocas de calor e são incombustíveis. Essa simplificação não prejudica os resultados, pois a transmitância de energia através das paredes é baixa. Essa medida também torna o modelo menos complexo e, conseqüentemente, reduz o tempo necessário para rodar a simulação. Também foi verificado que as lajes e paredes do prédio da Escola de Engenharia Nova da UFRGS são elementos com grande espessura a ponto de que sendo considerados inertes não teriam uma grande diferença nos resultados.

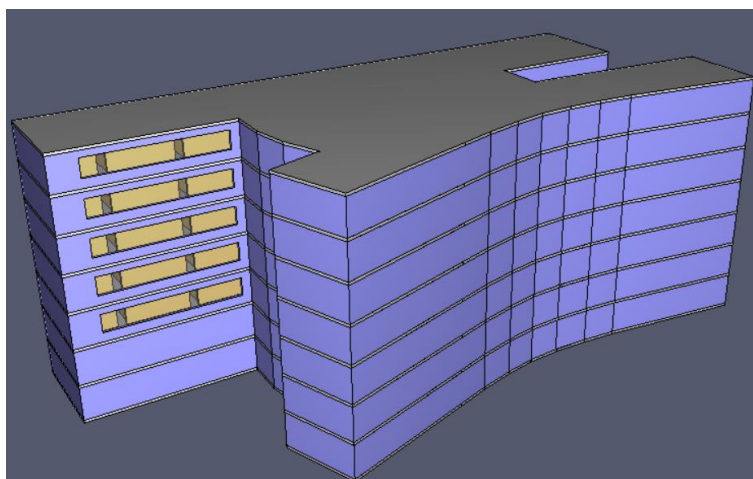
As paredes externas e a laje do pavimento térreo foram os primeiros elementos a serem desenhados, conforme a figura 19. Os demais pavimentos foram gerados a partir da cópia do pavimento térreo e foram criadas aberturas para representar os vãos existentes nos corredores que levam aos sanitários a partir do terceiro pavimento, como mostra a figura 19.

Figura 19 – Representação das paredes externas e laje do primeiro pavimento



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 20 – Criação dos pavimentos



(fonte: elaborado pelo autor)

Como não é possível criar escadas através do *Pyrosim*, foram desenhadas aberturas nos pavimentos, com as mesmas dimensões ocupadas pela escada do edifício. O maior prejuízo de não se ter conseguido importar o modelo do *Revit*, foi a dificuldade de se elaborar o projeto, que resultou em um nível de detalhamento interno dos compartimentos mais simplificado.

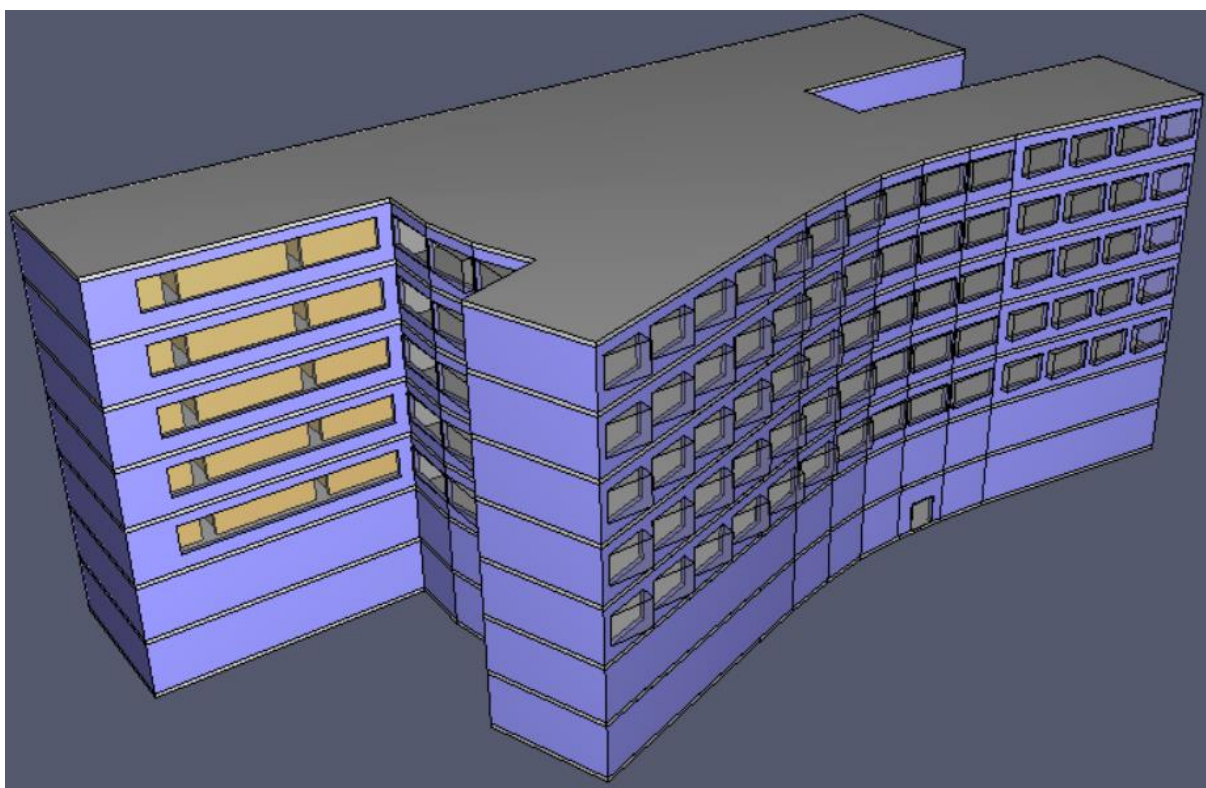
Para rodar a simulação é necessário escolher um ponto para o início do incêndio. Foi escolhido o local com a maior carga de incêndio que é a biblioteca. Por este motivo as paredes do segundo pavimento, que é onde fica localizada a biblioteca, foram desenhadas exatamente como as existentes no prédio da Escola de Engenharia Nova. Nos demais pavimentos foram adotadas configurações iguais às do terceiro pavimento. As portas foram representadas por aberturas e são consideradas abertas durante a simulação, o que seria a pior situação, já que proporciona maior disponibilidade de oxigênio.

6.2.2 Janelas

As janelas são importantes elementos em um incêndio, o fato de elas estarem abertas pode ser o fator determinante no crescimento do fogo, pois sempre é necessário oxigênio para que a combustão ocorra. Conforme discutido nos itens 4.2.1 (incêndio controlado pelos combustíveis) e 4.2.2 (incêndio controlado pela ventilação), a configuração de abertura das janelas será de extrema importância no comportamento do incêndio.

Foi constatado que todo o segundo pavimento do prédio da Escola de Engenharia possui sistema de ar condicionado, desta maneira as janelas se encontram fechadas em sua maior parte do tempo. Nos demais pavimentos não foi possível identificar um padrão determinante, algumas janelas estavam fechadas e outras abertas. Para a simulação será considerado que inicialmente as janelas do segundo pavimento estarão fechadas e dos demais pavimentos serão consideradas abertas, o que pode ser observado na figura 21.

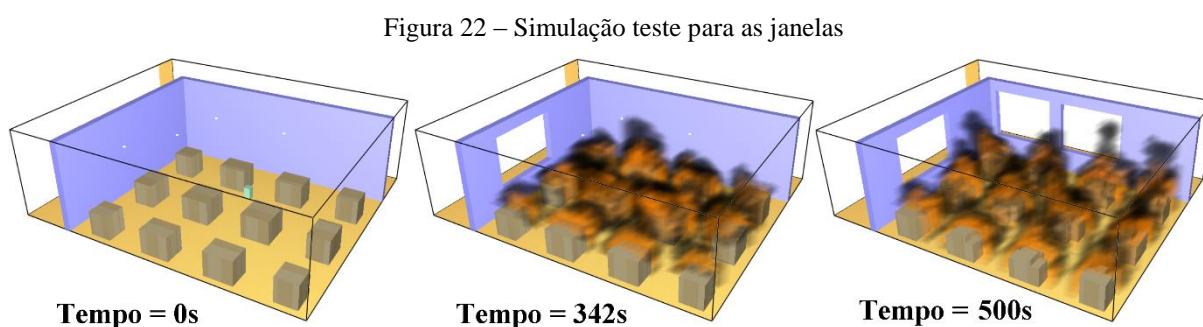
Figura 21 – Representação das janelas através de aberturas



(fonte: elaborado pelo autor)

Segundo um estudo realizado por Kang (2009, p. 423), em uma situação de incêndio, a temperatura em que o vidro se quebra e a janela desmorona é de aproximadamente 450° C. A quebra dos vidros ocorre quando a diferença de temperatura entre o ambiente interno e externo gera tensões que excedem as suportadas pelo material.

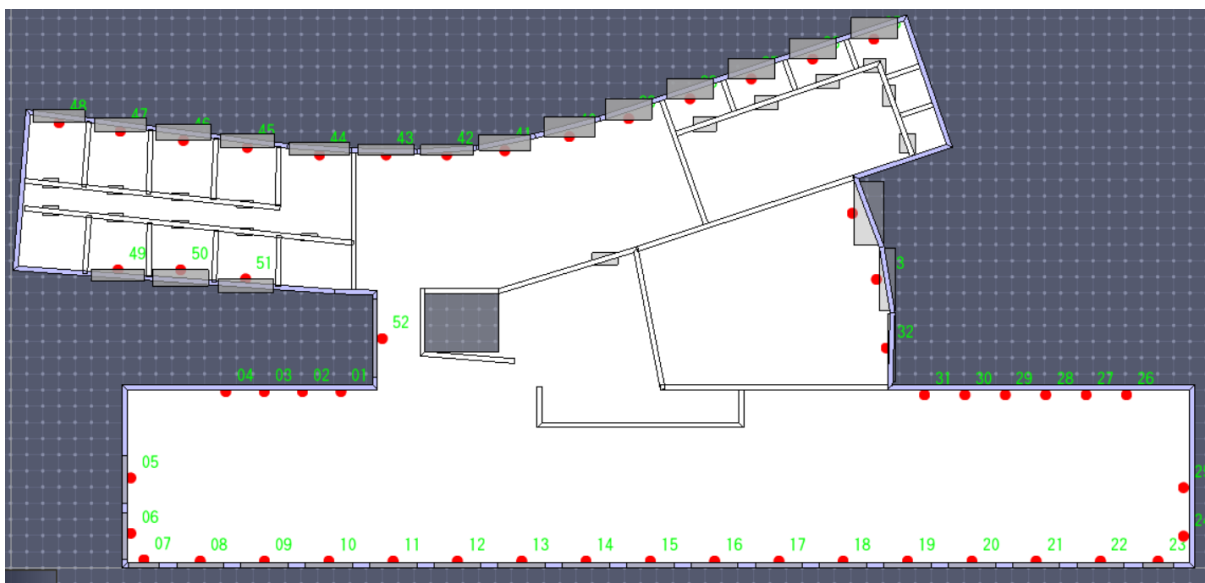
As janelas foram representadas simplesmente por aberturas e no segundo pavimento foi associada a cada janela um dispositivo de medição de temperatura que está programado para criar a abertura na simulação após atingir 450° C, de modo a simular o efeito descrito acima. Foi realizada uma simulação com o objetivo de testar o funcionamento deste dispositivo. Podemos observar na figura 22 que inicialmente as janelas estão fechadas, porém quando a temperatura no dispositivo atinge 450° C, aparecem as aberturas na simulação.



(fonte: elaborado pelo autor)

Após o teste e confirmação do funcionamento do dispositivo foi definida a mesma configuração para todas as janelas do segundo pavimento. A figura 23 mostra o segundo pavimento do prédio da Escola de Engenharia, os pontos vermelhos são os dispositivos de medição de temperatura.

Figura 23 – Posição de janelas e dispositivos do segundo pavimento



(fonte: elaborado pelo autor)

6.3 PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO

Os parâmetros da simulação são fatores importantíssimos em uma simulação computacional de incêndio, pois são eles que definem se os fenômenos a serem estudados estarão próximos da realidade. Na escolha destes parâmetros são adotadas diferentes simplificações que serão discutidas a seguir.

6.3.1 Reação de Combustão

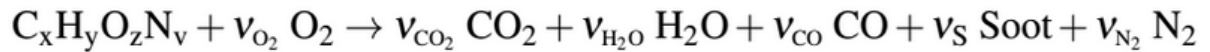
Os materiais possuem distintas composições químicas e, conseqüentemente, diferentes processos de combustão. Esses processos podem ser aproximados por reações químicas de combustão e é através delas que o *Fire Dynamics Simulator* define a queima dos materiais.

Será adotada uma única reação de combustão para o modelo computacional, essa simplificação é justificada pelo motivo de não se conhecer as propriedades e reações químicas de todos os materiais presentes no prédio da Escola de Engenharia Nova.

A Nova Zelândia possui um código de verificação de edificações a incêndio através simulação computacional, que define diferentes parâmetros e procedimentos necessários para verificar se a estrutura atende a segurança contra incêndio necessária. As características do fogo utilizadas

neste trabalho foram definidas conforme proposto para incêndios prévios ao *flashover* (NEW ZELAND BUILDING CODE, 2014, p. 28). Esse código define os produtos do fogo, mas não define a composição do material que está queimando. Escolhendo o um químico simples, se assume que a reação esteja na forma da figura 24.

Figura 24 – Forma da equação estequiométrica para o modelo químico simples



(fonte: THE NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY, 2015, p. 135)

Com o auxílio de uma calculadora disponibilizada pelo *Pyrosim*, é possível calcular os parâmetros a serem inseridos e que irão representar a reação de combustão conforme estabelecido pelo código de verificação de edificações a incêndio através de simulação computacional da Nova Zelândia para incêndios compartimentados (NEW ZELAND BUILDING CODE, 2014, p. 28). A figura 25 mostra os parâmetros utilizados de acordo com o código.

Figura 25 – Parâmetros da reação de combustão

Parameter	Value
Fuel Type	Simple Chemistry Model
Carbon atoms	1.0
Hydrogen atoms	2.20209
Oxygen atoms	0.622494
Nitrogen atoms	0.0
Specify release per unit mass oxygen	1.31E4 kJ/kg
Specify heat of combustion	2.0E4 kJ/kg
Radiative Fraction	0.35
CO Yield (Y_{CO})	0.04
Soot Yield (Y_S)	0.07
Hydrogen Fraction	0.0

(fonte: elaborado pelo autor)

6.3.2 Materiais Combustíveis

Conforme já mencionado anteriormente, se pretende iniciar o incêndio da simulação pela biblioteca, pois se sabe que é o local com maior carga de incêndio na edificação, devido à grande quantidade de material combustível presente. O material que existe em grande quantidade na biblioteca é o papel. A tabela 4 mostra as propriedades térmicas do papel que serão utilizadas na simulação. Para esse trabalho, somente foi considerado como material presente na Escola de Engenharia da UFRGS o papel.

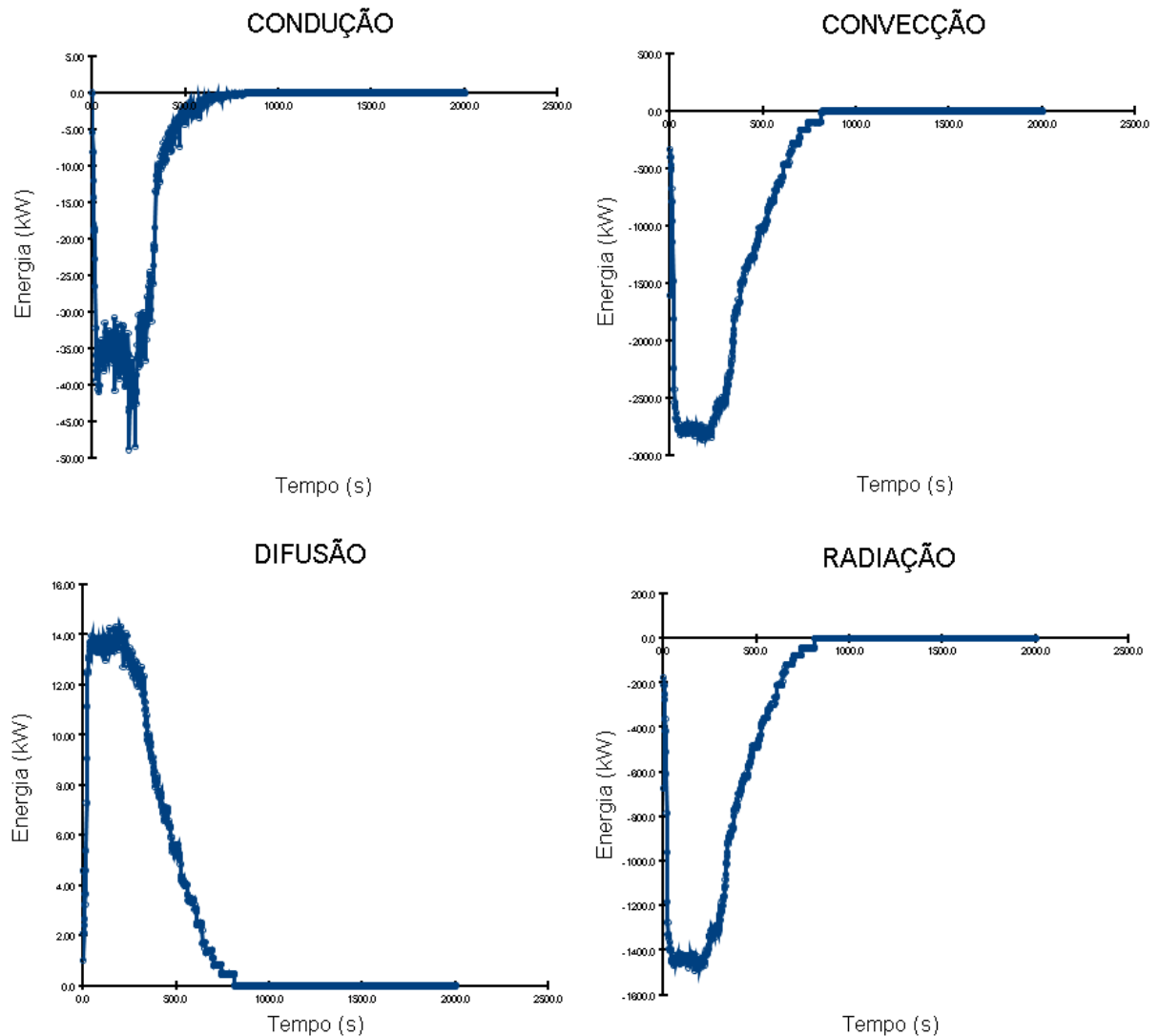
Tabela 4 – Propriedades térmicas do papel comum

Propriedades Químicas do Papel		
Densidade	750	kg/m ³
Calor Específico	1,336	KJ/(kg*K)
Condutividade	0,1	W/(m*K)
Emissividade	0.93	-
Coefficiente de Absorção	50000	m-1

(fonte: adaptado de THE ENGINEERING TOOL BOX, 2002, p. 49, tradução nossa)

Foi montada uma simulação para verificar se as propriedades do material e a reação de combustão estariam adequadas. Foi desenhado um bloco com dimensões de 1 m x 1 m x 1 m e foi escolhida uma densidade de 100 kg/m³ para o teste. Esse bloco foi programado para entrar em combustão imediata e a energia total liberada pela sua combustão pode ser comparada com o potencial calorífico apresentado na tabela 2. A figura 26 mostra os resultados desse teste.

Figura 26 – Energia liberada pela combustão de um bloco de papel



(fonte: elaborado pelo autor)

Na figura 26, é possível observar as quatro principais formas de liberação de energia que somadas correspondem a mais de 99% da energia total. Realizando a integral em função do tempo de cada um dos gráficos e somando os valores se consegue chegar na energia total liberada pela combustão de 1 m^3 do papel com densidade igual a 100 kg/m^3 . A energia liberada encontrada pelo cálculo acima foi de 1856,64 MJ. Sabemos que a energia máxima que pode ser liberada pela combustão do bloco é igual a 2000 MJ, que é resultado da equação 3.

$$E_m = d * V * E_p = \frac{100kg}{m^3} * 1m^3 * \frac{20MJ}{kg} = 2000MJ \quad (\text{equação 3})$$

Sendo:

E_m = energia máxima a ser liberada em MJ;

d = densidade do material (kg/m³);

E_p = energia potencial em MJ/kg;

V = volume em m³.

Comparando o resultado da equação 3 e o somatório da energia resultante da figura 27 temos uma diferença de aproximadamente 7%. Pelo motivo de ser a energia potencial, a diferença encontrada está correta, visto que o material combustível dificilmente vai atingir seu potencial máximo.

Segundo a Lei Complementar 14.376 (RIO GRANDE DO SUL, 2013, p. 27), a carga de incêndio para bibliotecas é de 2000MJ/m². Para representar essa carga de incêndio foram distribuídos uniformemente blocos de papel com 1m³ pelo segundo e terceiro pavimento. Nas outras localidades onde não existem depósitos de livros a carga adotada foi de 300MJ/m², que está de acordo com o estabelecido pela Lei Complementar 14.376. A distribuição dos blocos se a manteve igual e as suas densidades foram alteradas, conforme mostra a tabela 5.

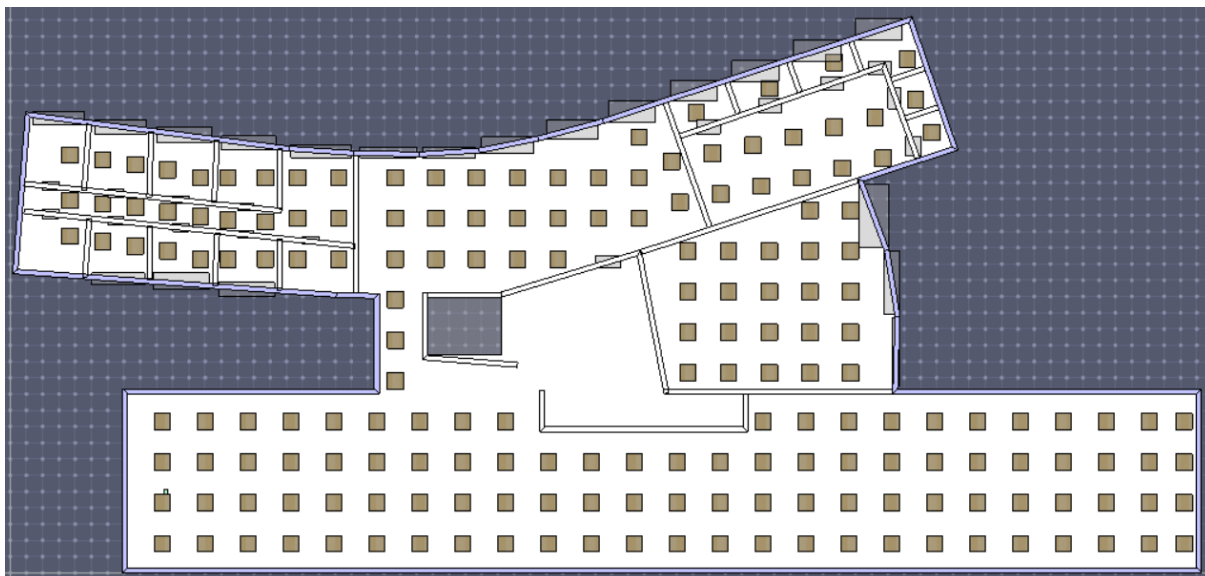
Tabela 5 – Distribuição e detalhamento do material combustível

Local	Área (m ²)	Carga de Incêndio (MJ/m ²) - Tabela 3.1 da Lei Complementar 14.376	Volume de Material (m ³)	Densidade dos Blocos (kg/m ³)
Biblioteca - Armazenamento dos livros	712,5	2000	95	750
Biblioteca - Área de estudo e outros	493,52	300	68	108,64
Auditório Segundo Pavimento	156,4	300	22	106,48
Terceiro Pavimento	1362,42	300	185	110,47

(fonte: elaborado pelo autor)

Não foram distribuídas as cargas de incêndio de todos os pavimentos pois não irão participar da simulação. Somente foram colocadas as cargas de incêndio do segundo e terceiro pavimentos porque são os locais em que o incêndio teria chances de se propagar. A figura 27 mostra a distribuição dos blocos de 1 m³ pelo segundo pavimento.

Figura 27 – Distribuição da carga de incêndio pelo segundo pavimento



(fonte: elaborado pelo autor)

6.3.3 Dispositivos Para Coleta de Informações

O *Fire Dynamics Simulator* permite que seja analisada uma gigantesca quantidade de informações após a conclusão da simulação. Entretanto, cabe ao usuário definir anteriormente a simulação quais informações serão relevantes para o trabalho em estudo.

Existem diferentes maneiras de se analisar os dados de uma simulação, uma delas foi utilizada para verificar a carga de incêndio, que é a energia total que foi liberada durante a simulação em função do tempo. Todavia, somente esse tipo de informação para um modelo mais complexo não consegue fornecer detalhes mais específicos pois somente fornece a energia em função do tempo total.

Termopares foram distribuídos ao longo de todo o segundo pavimento em duas alturas diferentes. A partir destes dispositivos é possível plotar um gráfico de temperatura em função

do tempo em cada dispositivo que foi inserido na simulação. Outra maneira de verificar a temperatura é a inserção de planos de temperatura. Essas fatias atravessam toda a estrutura e registram a projeção da variação de temperatura sobre o plano.

A movimentação do ar foi também analisada através de cortes com a representação da mesma se deu através do emprego de vetores indicando a velocidade do ar. Com esses resultados é possível visualizar as diferentes correntes que são formadas durante um incêndio, dessa maneira fornecendo um entendimento de como o fogo está sendo alimentado.

A propagação do fogo e fumaça foi realizada de forma qualitativa através de imagens em função do tempo da simulação. Uma forma muito interessante de analisar as informações coletadas é realizar a análise das diferentes informações em paralelo, o que permite que ao mesmo tempo que estamos olhando a propagação do incêndio, podemos olhar para resultados da medição pontual de um dispositivo.

6.3.4 Fonte de Ignição

Todo incêndio é iniciado por algum tipo de ignição, que pode acontecer de maneira acidental ou intencional. Existem diversas maneiras de representar a ignição no modelo computacional. Para esse trabalho foi utilizado um pequeno bloco de papel com massa de 0,02 kg que entra em combustão instantânea no início da simulação. A máxima energia adicional gerada por esse bloco será igual a 0,4 MJ, o que representa 0,000002% da carga de incêndio do segundo pavimento. Desta forma a energia liberada pelo dispositivo de ignição pode ser considerada como não significativa no comportamento do incêndio.

$$E_m = d * V * E_p = \frac{1kg}{m^3} * 0,02m^3 * \frac{20MJ}{kg} = 0,4MJ \quad (\text{equação 4})$$

Sendo:

E_m = energia máxima a ser liberada em MJ;

d = densidade do material (kg/m³);

E_p = energia potencial em MJ/kg;

V = volume em m³.

6.3.5 Taxa de Perda de Massa

Para a simulação será considerado que os materiais combustíveis possuem uma perda de massa fixa durante o incêndio. De acordo com THE NATIONAL BUREAU OF STANDARDS (2003, p. 1), a temperatura de ignição é de 200° C. Não foram encontradas referências da taxa de perda de massa do papel. Entretanto, um estudo aponta que os valores da taxa de perda de massa para madeiras estão na ordem de 0,01 kg/(m²*s) (SHI; CHEW, 2013, p. 1401). Com base nesse valor foi estimada a taxa de perda de massa de 0,04 kg/(m²*s) para o papel.

6.3.6 Malha da Simulação

O tamanho de malha da simulação é um dos principais fatores que definem a complexidade do modelo computacional. Malhas menores levam a resultados mais precisos, entretanto elevam o número de equações a serem resolvidas de maneira exponencial. O ideal é definir uma malha em que não se percam informações importantes durante a simulação e também que não demandem de muito processamento para a resolução do problema. Foram realizados testes para se obter uma malha que obtivesse um bom processamento e não comprometesse os resultados. A tabela 6 mostra os resultados das diferentes alternativas. Cabe ressaltar que os testes foram realizados para a simulação de 10 segundos de um bloco de material com 1m³ e dimensões da malha (x,y,z) de 2m x 2m x 2m.

Tabela 6 – Testes de diferentes malhas

Tamanho de Célula (m)	Número de Células (unid)	Tempo Para Resolver a Simulação (s)	Representação Gráfica Adequada do Incêndio
0,5	64	3s	Não
0,4	125	3s	Não
0,33	216	3s	Média
0,25	512	4s	Sim
0,2	1000	8s	Sim
0,1	8000	70s	Sim
0,05	64000	371s	Sim

(fonte: elaborado pelo autor)

A malha com tamanho de célula de 0,25m foi a primeira a se mostrar adequada para a representação de combustão de um bloco de 1m³, portanto foi a dimensão adotada para a simulação. A figura 28 mostra as coordenadas da malha final estabelecida, assim como o número total de células que estarão no modelo.

Figura 28 – Definição da malha para a simulação

Properties **Advanced**

Mesh Boundary:

Min X: Min Y: Min Z:

Max X: Max Y: Max Z:

Division Method:

X Cells: Cell Size Ratio: 1,00

Y Cells: Cell Size Ratio: 1,00

Z Cells: Cell Size Ratio: 1,00

Cell Size (m): 0,25 x 0,25 x 0,25

Number of cells for mesh: 7008768

(fonte: elaborado pelo autor)

7 RESULTADOS

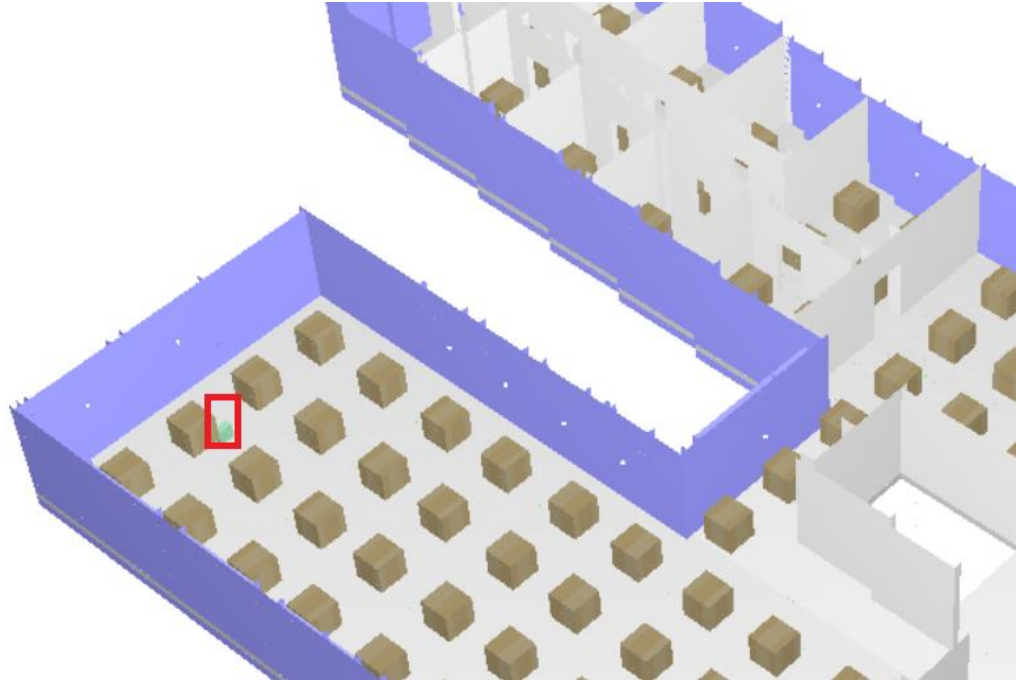
Quatro diferentes simulações foram realizadas. As simulações 1 e 2 tem início na biblioteca e começam com todas as janelas do segundo pavimento fechadas, o que diferencia as duas primeiras simulações é o local de ignição. A simulação três possui o mesmo local de ignição da simulação 1, porém, uma janela logo ao lado da fonte de ignição é aberta no início da simulação para verificar se a ventilação irá influenciar no incêndio. Por último a quarta simulação tem início em um compartimento do terceiro pavimento, onde as janelas estão abertas. Entretanto, a carga de incêndio do terceiro pavimento (300MJ/m^2) é inferior à da biblioteca (2000MJ/m^2).

7.1 SIMULAÇÃO 1

A simulação 1 foi processada através do CESUP. No Anexo A pode ser encontrado o script utilizado para submeter a simulação ao processamento através de acesso remoto. O modelo foi processado durante aproximadamente 19 dias, resultando na simulação de 576 segundos. Todos os parâmetros da simulação foram definidos conforme discutido no capítulo 6. O incêndio teve início em um local onde ficam armazenados os livros da biblioteca do segundo pavimento. A figura 29 mostra o local exato que foi adotado para se iniciar o incêndio.

Somente para a simulação 1 aconteceu o problema de não estarem disponíveis as janelas de visualização. A consequência dessa dificuldade é que foi mais difícil de visualizar e analisar os resultados.

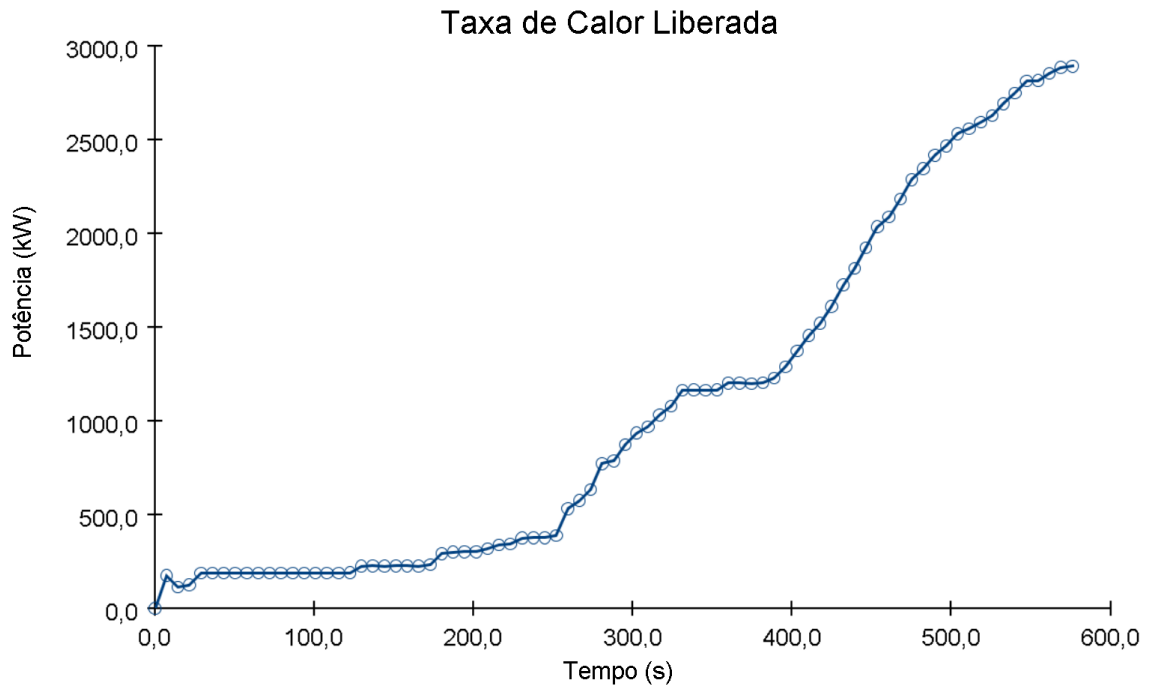
Figura 29 – Local de início do incêndio da simulação 1



(fonte: elaborado pelo autor)

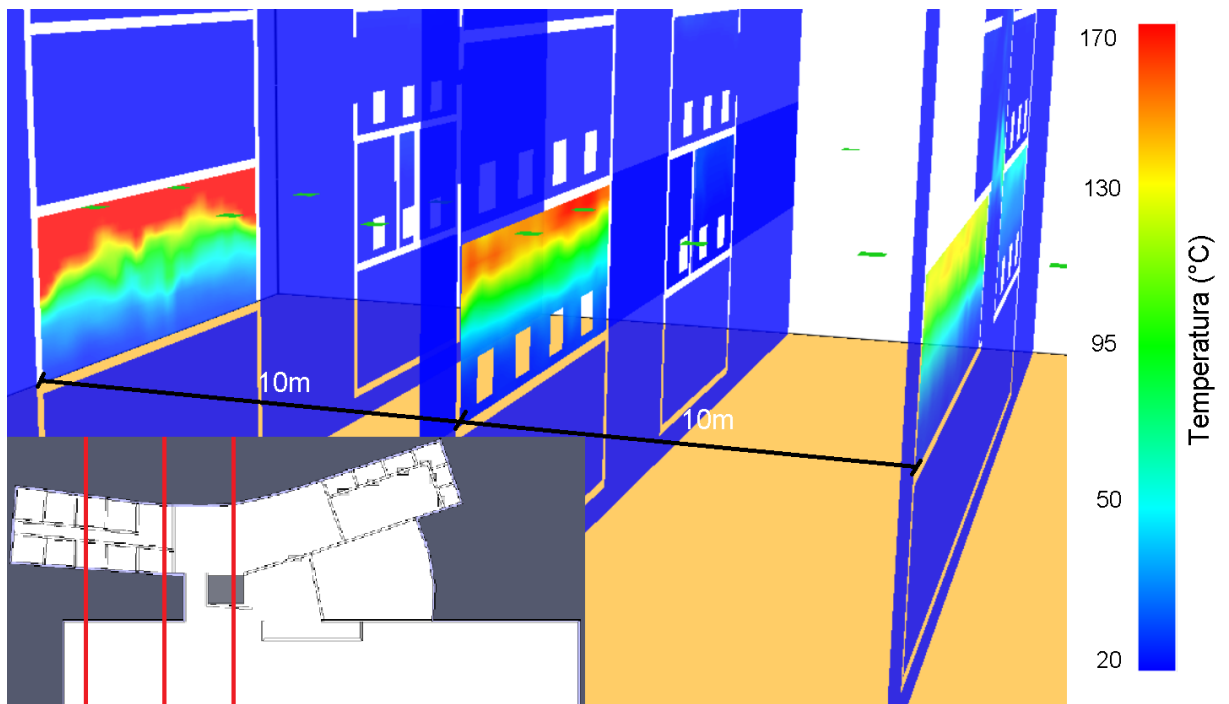
O desenvolvimento do incêndio pode ser associado à liberação de energia resultante da combustão dos materiais. A figura 30 apresenta um gráfico com a energia total liberada em função do tempo. Esse gráfico está diretamente ligado à figura 32, que mostra o crescimento e propagação das chamas. Devido à ausência das janelas de visualização, foi necessário configurar o *Smokeview* para exibir somente as linhas de contorno dos elementos, o que dificulta um pouco o entendimento. A figura 31 mostra um perfil de temperaturas ao final da simulação 1.

Figura 30 – Taxa de calor liberada pela simulação 1



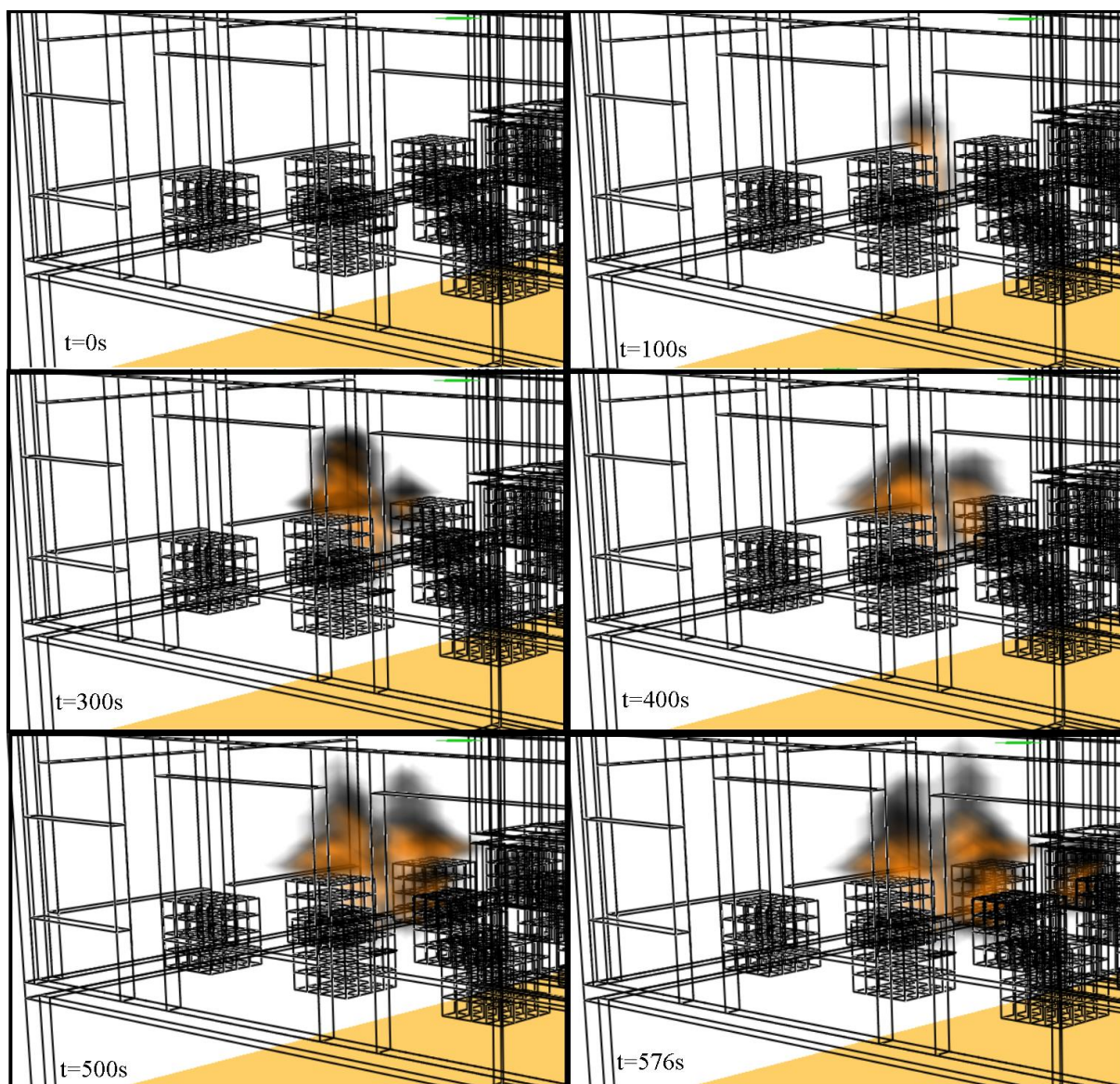
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 31 – Perfil de temperaturas ao final da simulação 1



(fonte: elaborado pelo autor)

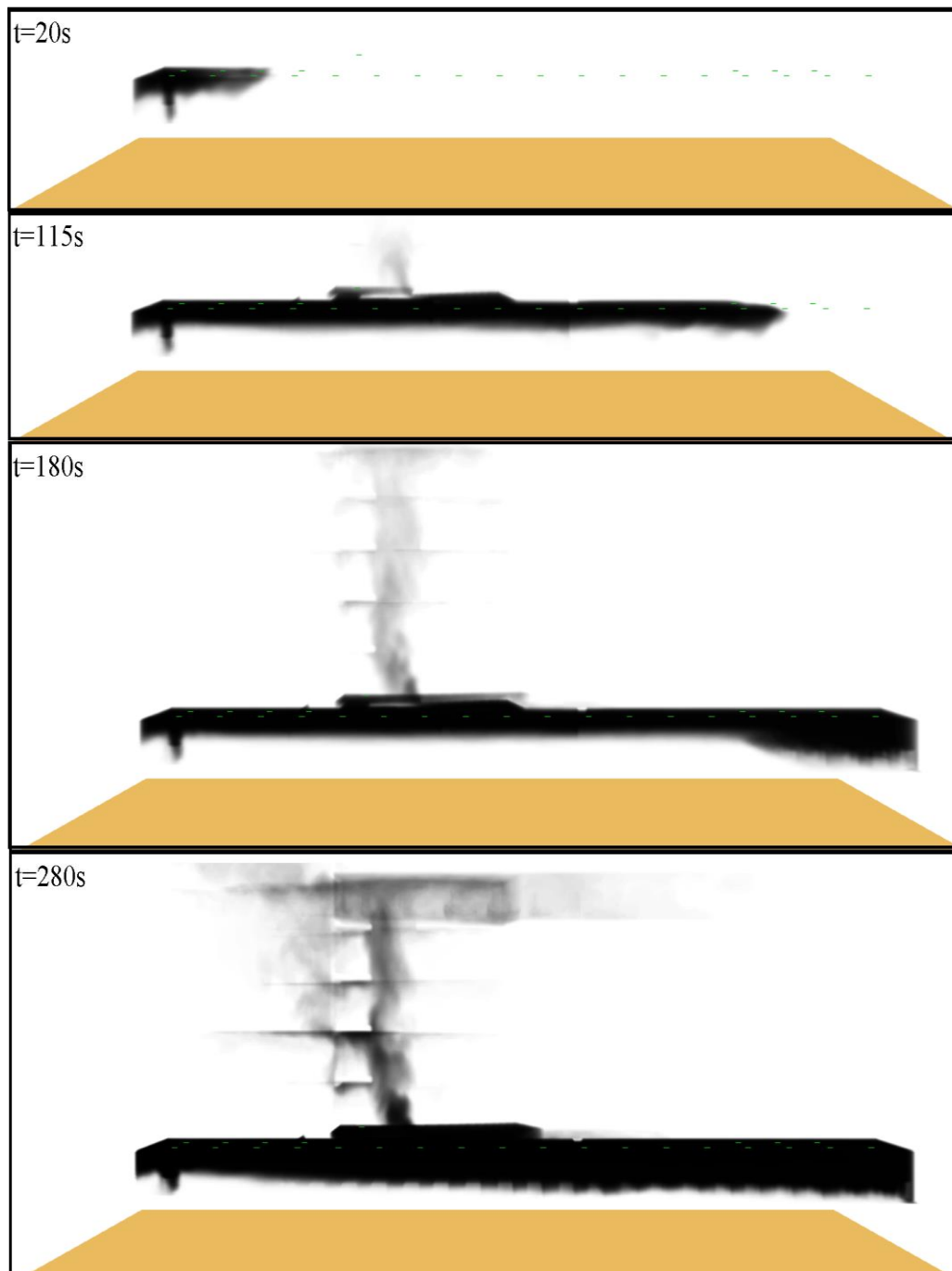
Figura 32 – Propagação do fogo pela biblioteca durante a simulação 1



(fonte: elaborado pelo autor)

Pela análise das figuras 31 e 33, podemos perceber que o incêndio não obteve um crescimento acelerado, se dissipando para somente quatro blocos de papel. Entretanto, a pouca quantidade de material em combustão foi suficiente para gerar uma grande quantidade de fumaça. A propagação da fumaça pela Escola de Engenharia Nova da UFRGS é mostrada nas figuras 34 e 35. Novamente, a visualização e análise das informações foi prejudicada pela ausência das janelas de visualização. Entretanto, o *smokeview* permite que todos os elementos sejam escondidos, e desta maneira se procedeu a análise da propagação da fumaça.

Figura 33 – Propagação da fumaça durante a simulação 1

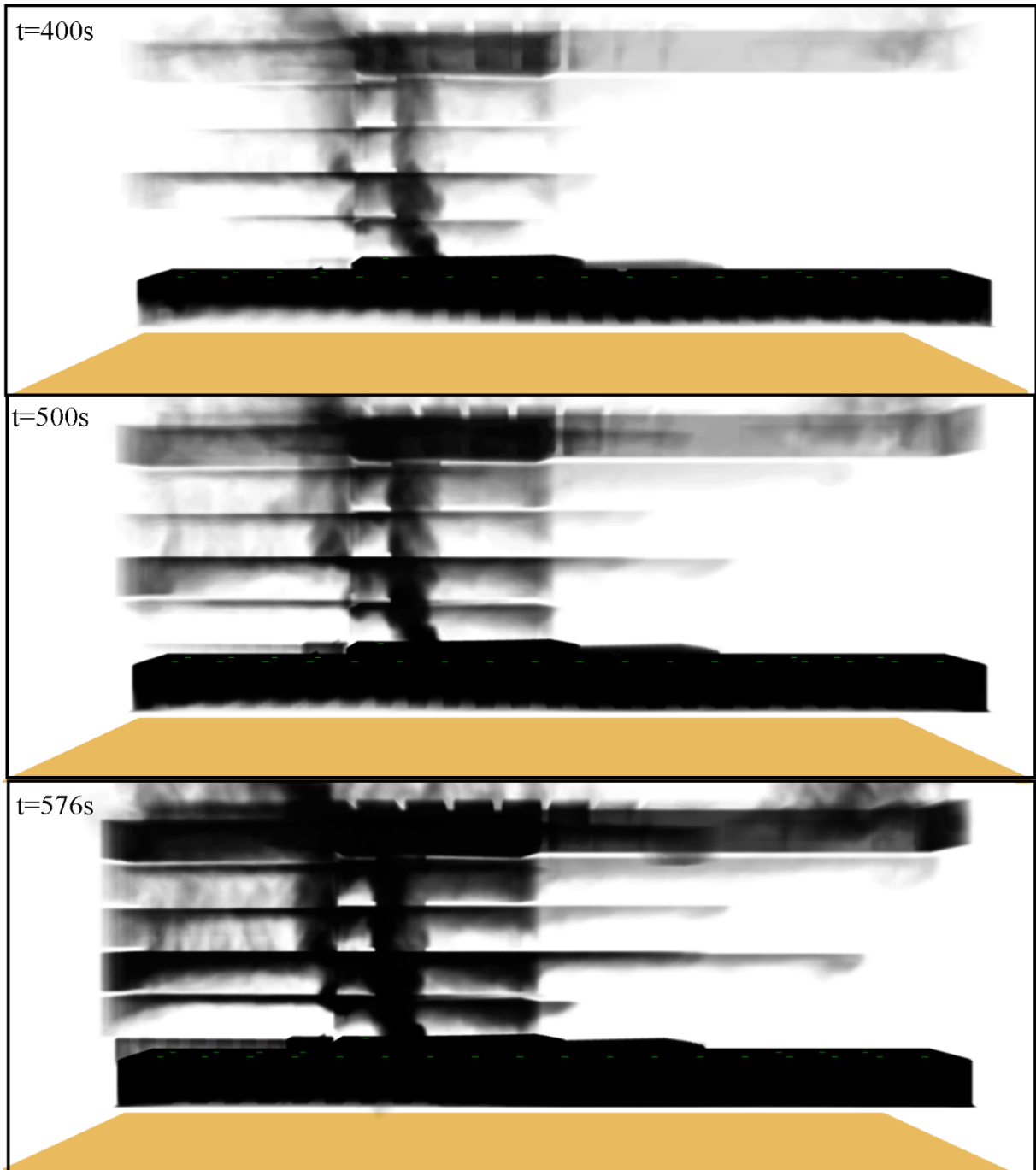


(fonte: elaborado pelo autor)

Podemos notar que aos 20 segundos a fumaça começa a se espalhar pelo segundo pavimento, aproximadamente 115 segundos após o início, ela já está presente em toda a biblioteca e começa a chegar no local aonde fica situada a escada. Com menos de 5 minutos se pode identificar um grande fluxo de fumaça ascendente pelas aberturas que representam a escadaria. A escada é a

única rota de fuga da edificação, o fato de toda a fumaça se direcionar em direção a escada é muito preocupante pois ela é a principal causa de mortes em situações de incêndios.

Figura 34 –Continuação da propagação da fumaça durante a simulação 1



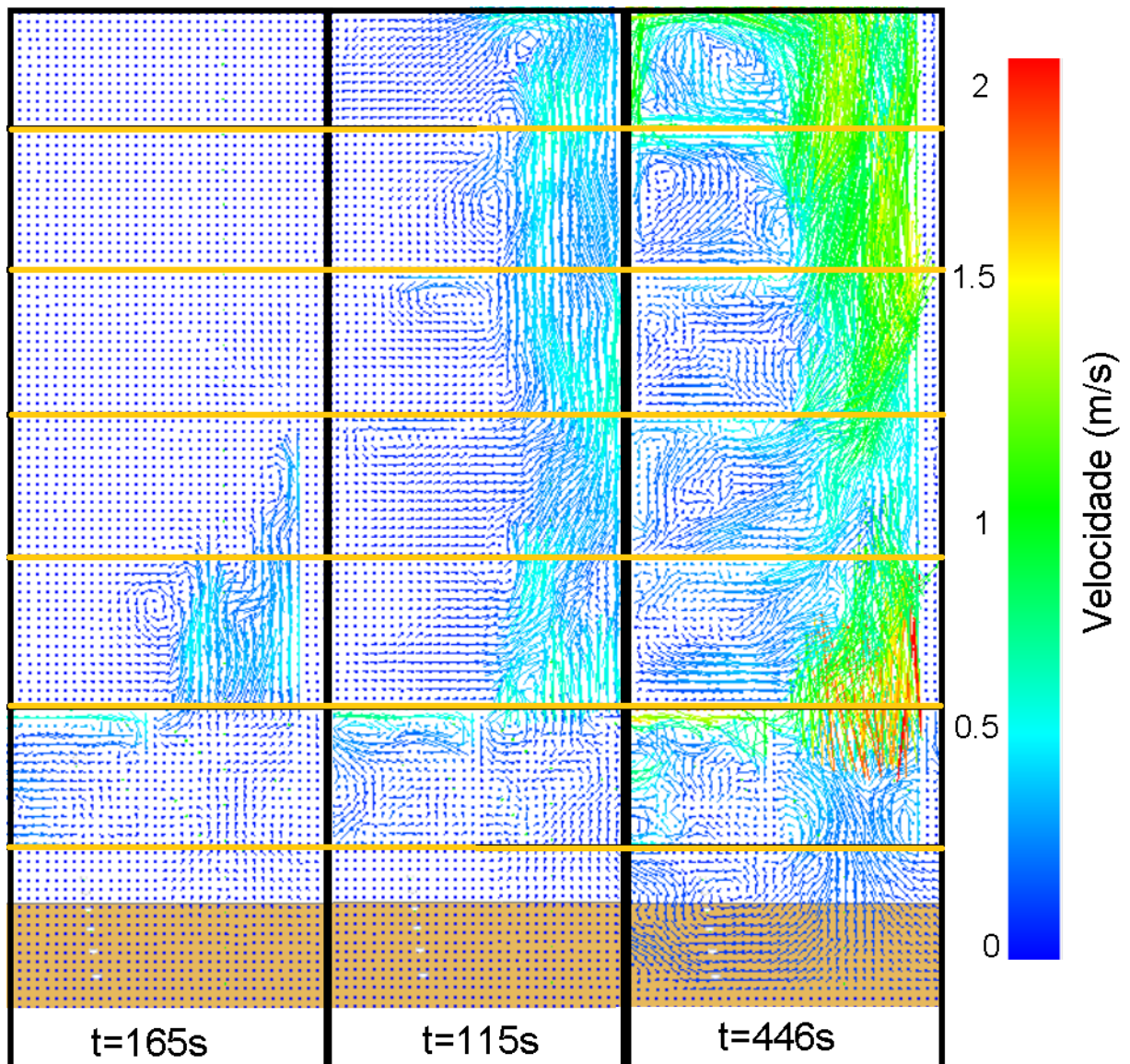
(fonte: elaborado pelo autor)

A figura 34 é a continuação da propagação da fumaça apresentada na figura 33, nela podemos verificar que a maior parte da fumaça emitida que chegou a escadaria está se concentrando no

sétimo pavimento, porém uma parcela desta fumaça acaba por se espalhar por cada um dos pavimentos. Ao final do tempo da simulação 1, a fumaça ainda não chegou a todos os locais da edificação e é identificada em menor quantidade no terceiro pavimento.

Simultaneamente à propagação da fumaça, ocorrem movimentações de correntes de ar dentro da edificação. A figura 35 apresenta um corte vertical do local aonde fica situada a escada e nela é apresentada uma fatia que representa com vetores a velocidade do ar durante a simulação, as linhas horizontais são as divisões entre os pavimentos.

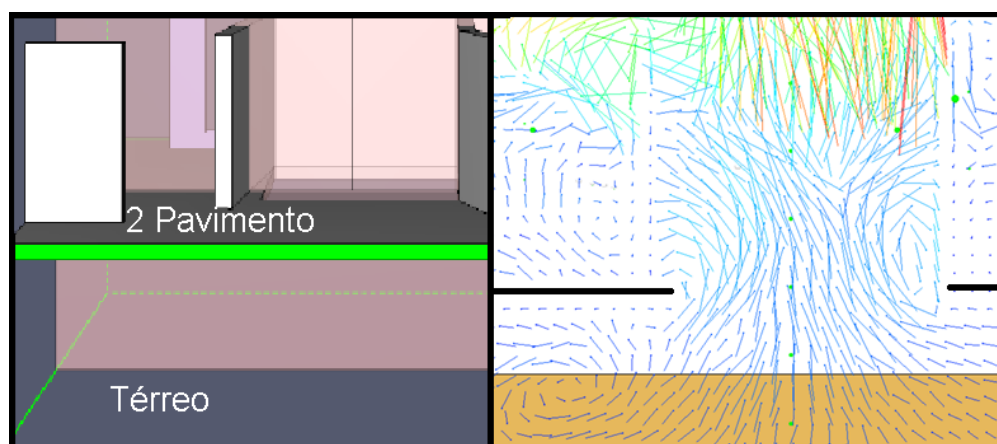
Figura 35 –Velocidades de movimentação do ar nas escadarias



(fonte: elaborado pelo autor)

Pode ser identificado na figura 35 os efeitos da ascensão da fumaça na movimentação do ar na edificação. Após 446 segundos do início da simulação a velocidade de ascensão da fumaça chega a 2 m/s. Outro fator interessante que pode ser observado é a movimentação de ar que sai do pavimento térreo com destino a biblioteca. A figura 36 apresenta uma ampliação do que está acontecendo, essa movimentação de ar está fornecendo oxigênio para a combustão dos materiais.

Figura 36 – Movimentação do ar do térreo para o segundo pavimento



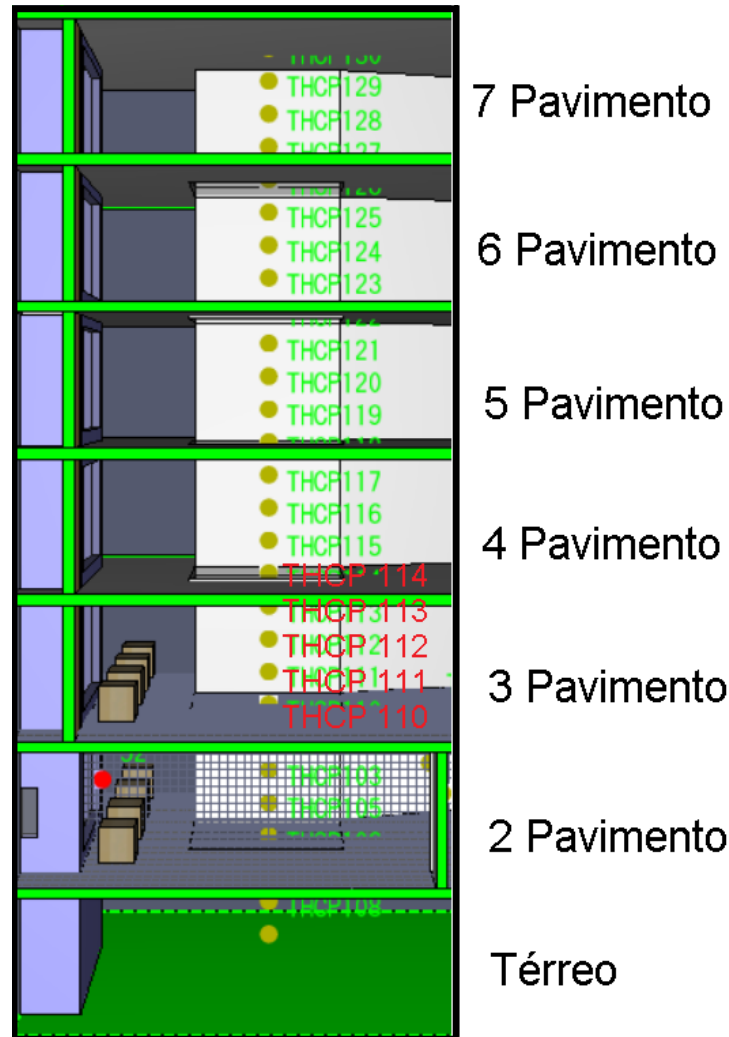
(fonte: elaborado pelo autor)

É possível de se verificar na figura 36, que correntes de ar estão se deslocando do pavimento térreo para o segundo pavimento através da abertura da escada. Esse fluxo acontece na parte inferior do segundo pavimento, próximo ao piso, e a saída da fumaça ocorre junto ao forro do segundo pavimento. No encontro das diferentes massas de ar ocorrem turbulências pois possuem sentidos de deslocamento diferentes. A entrada de ar para a biblioteca ocorre porque a fumaça gerada pela combustão dos materiais é menos densa que o ar encontrado na atmosfera, desta maneira quando a fumaça sobe pela escadaria a pressão atmosférica dentro da biblioteca cai e as correntes apresentadas são geradas devido a pressão atmosférica. Também é através desse novo ar apresentado que está ocorrendo a alimentação de oxigênio necessária para o processo de combustão.

Além da fumaça que passa pela escada é interessante saber qual a temperatura desta durante o incêndio, pois é o único local de saída para os usuários da edificação. Para se analisar isso, foram definidos termopares ao longo do eixo vertical da escada. A figura 37 mostra a

localização dos termopares adotados, em vermelho estão destacados os termopares que apresentaram as maiores temperaturas.

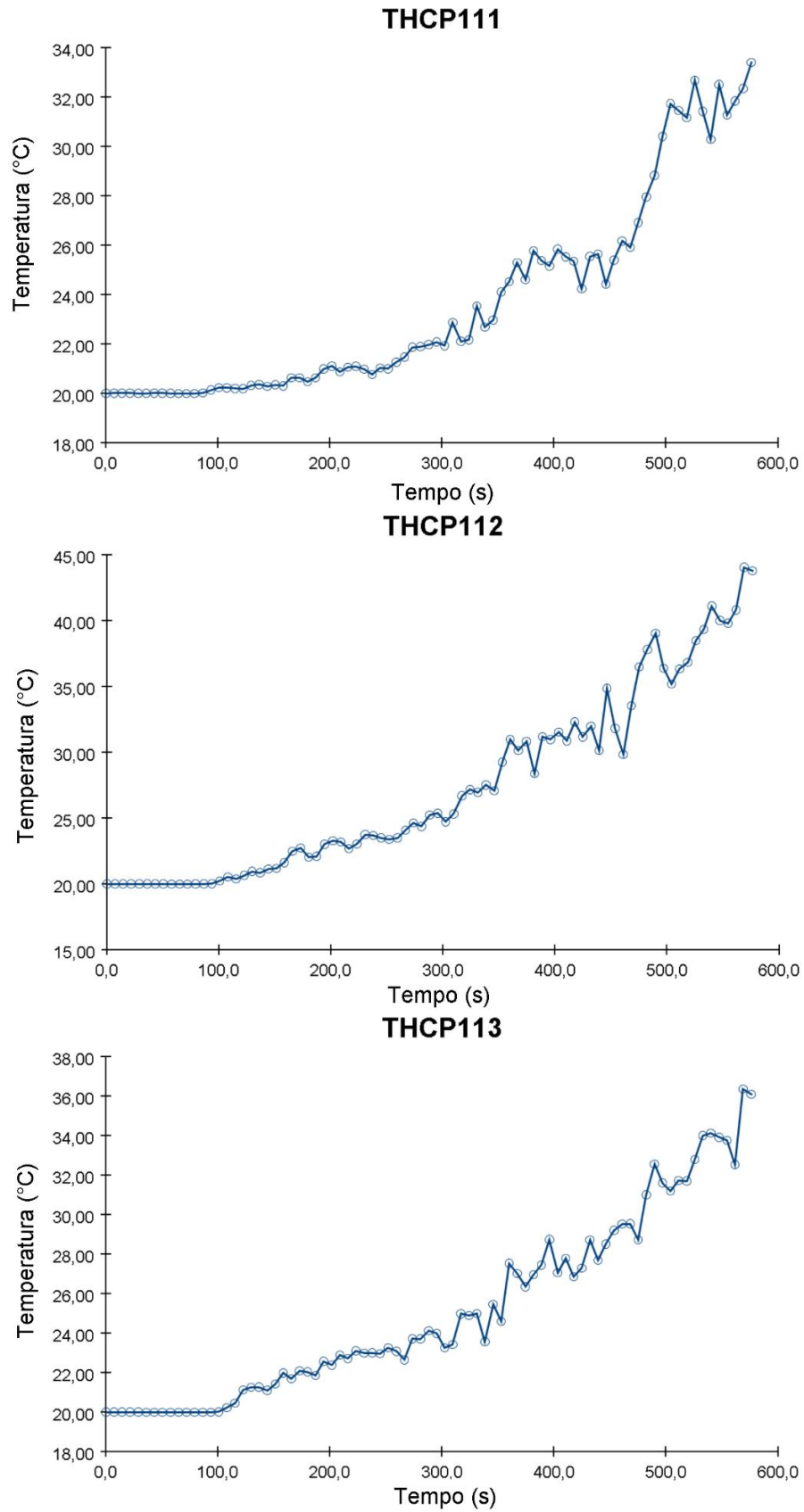
Figura 37 – Localização dos termopares



(fonte: elaborado pelo autor)

Para a simulação 1, os termopares THCF 111, THCF 112 e THCF 113 apresentaram os maiores valores de temperaturas e estão localizados no terceiro pavimento. A figura 38 apresenta a variação de temperatura em função do tempo de simulação desses termopares. Cabe destacar que a temperatura máxima atingida após 576 segundos do início da simulação foi atingida pelo THCF 112 e foi de aproximadamente 45 °C. Os termopares não representam a temperatura da fumaça, eles são dispositivos que tem massa e sofrem mudanças de temperaturas, logo a sua temperatura representa a temperatura de um elemento da escadaria, como por exemplo os corrimões. A temperatura da fumaça seria bastante superior à apresentada pelos termopares.

Figura 38 –Variação da temperatura dos termopares da simulação 1

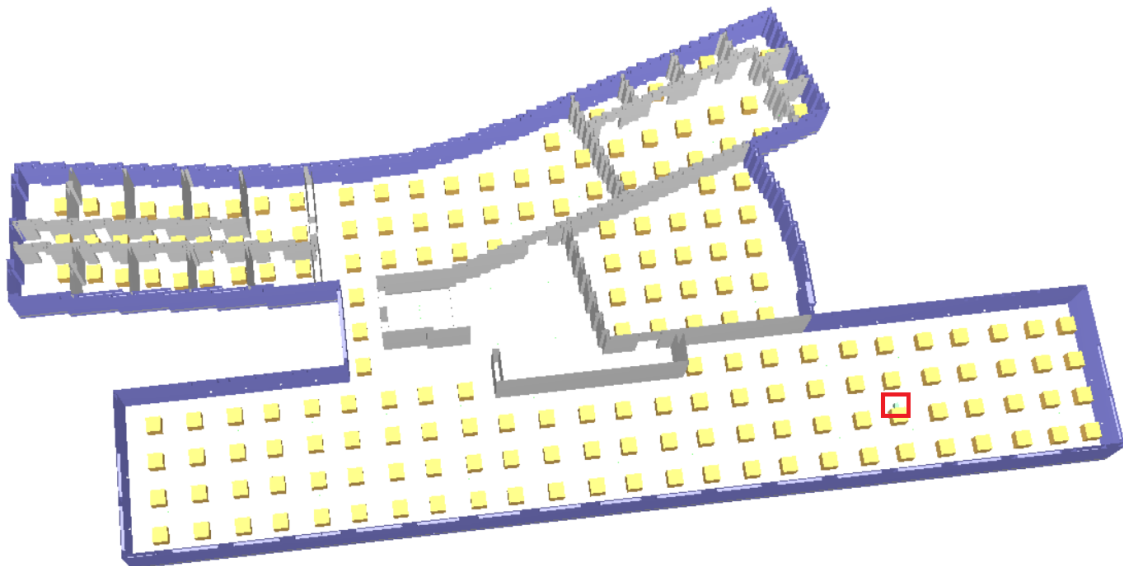


(fonte: elaborado pelo autor)

7.2 SIMULAÇÃO 2

A simulação 2 foi processada através do CESUP. No Anexo A pode ser encontrado o script utilizado para submeter a simulação ao processamento através de acesso remoto. O modelo foi processado durante aproximadamente 11 dias, resultando no tempo de 333 segundos. Cabe ressaltar que devido à um erro no processamento da simulação, ela foi interrompida após 11 dias, se pretendia chegar aos 20 dias de processamento. A simulação 2 segue todos os parâmetros da simulação 1, a diferença entre as duas é a localização do início do incêndio, que pode ser visualizada na figura 39.

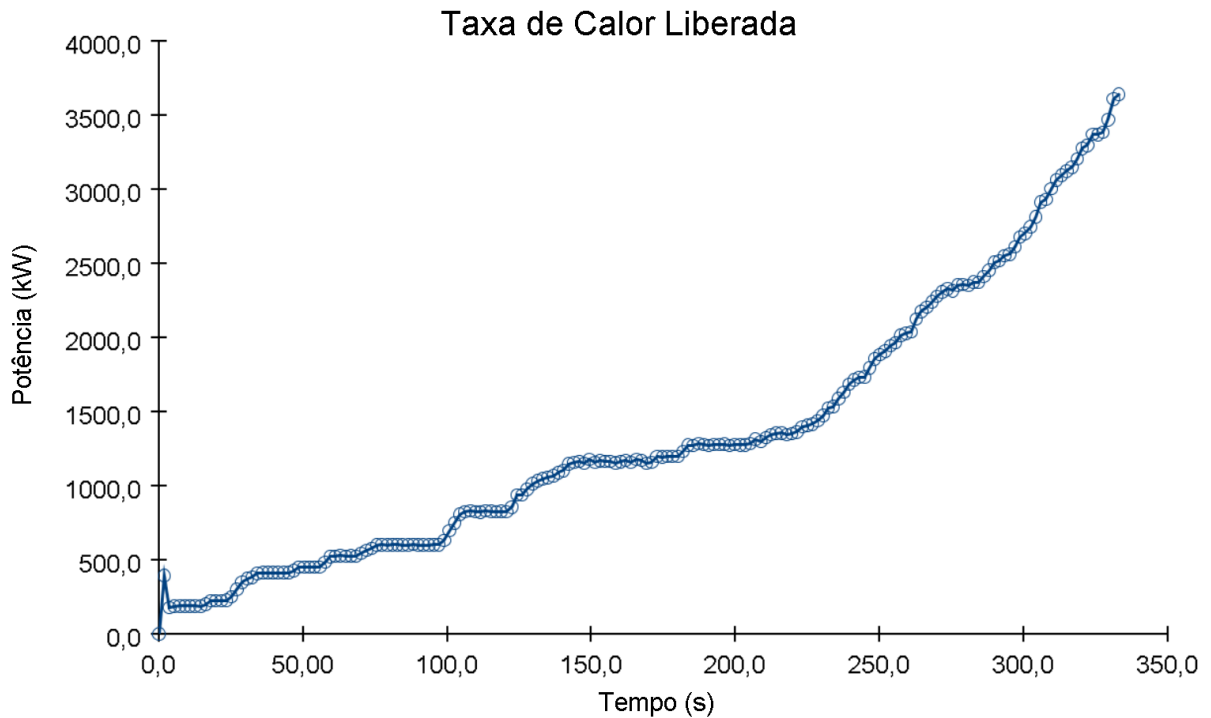
Figura 39 – Local de início do incêndio da simulação 2



(fonte: elaborado pelo autor)

O desenvolvimento do incêndio pode ser associado à liberação de energia resultante da combustão dos materiais. A figura 40 apresenta um gráfico com a energia total liberada em função do tempo. Esse gráfico está diretamente ligado à figura 42, que mostra o crescimento e propagação das chamas.

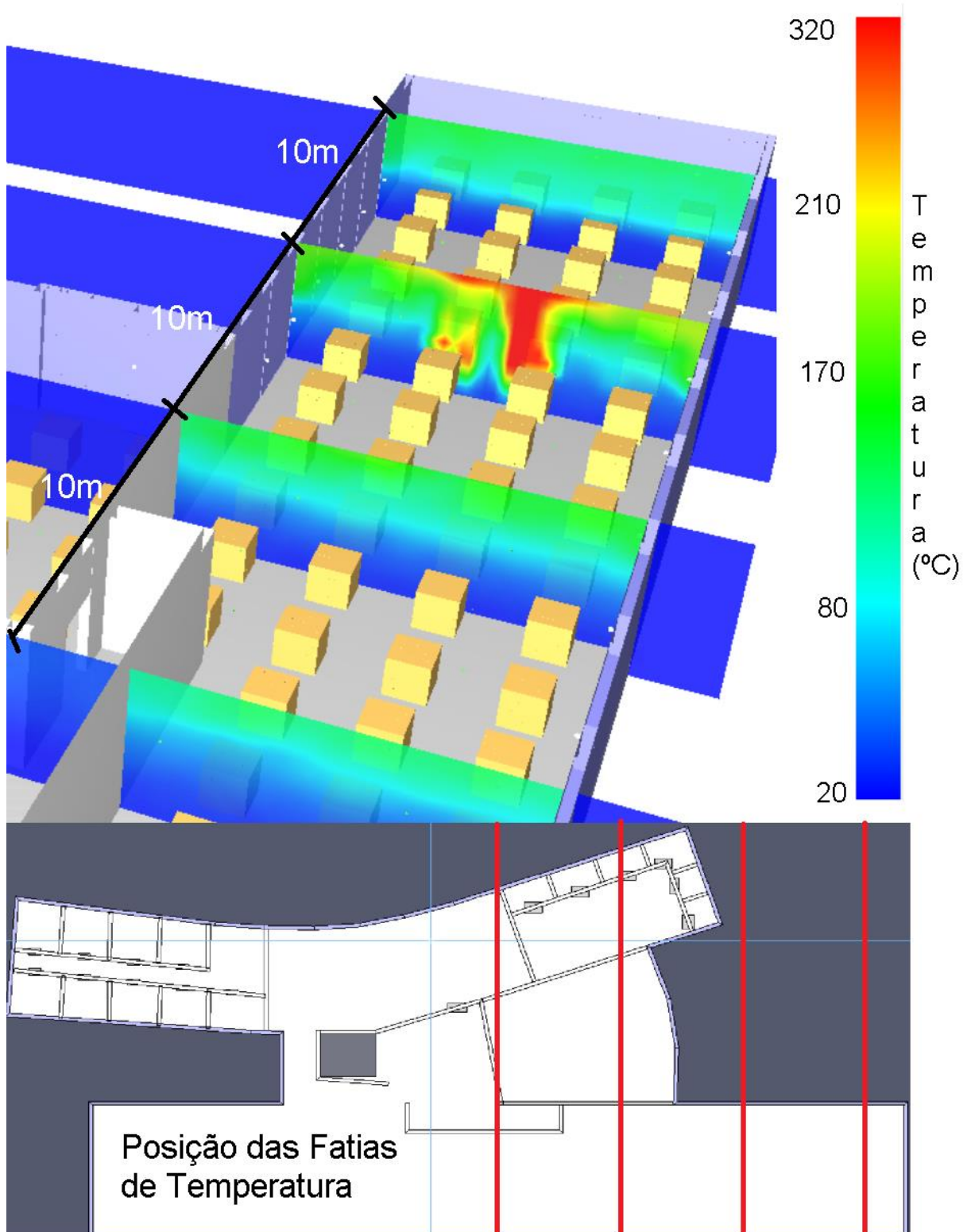
Figura 40 – Taxa de calor liberada pela simulação 2



(fonte: elaborado pelo autor)

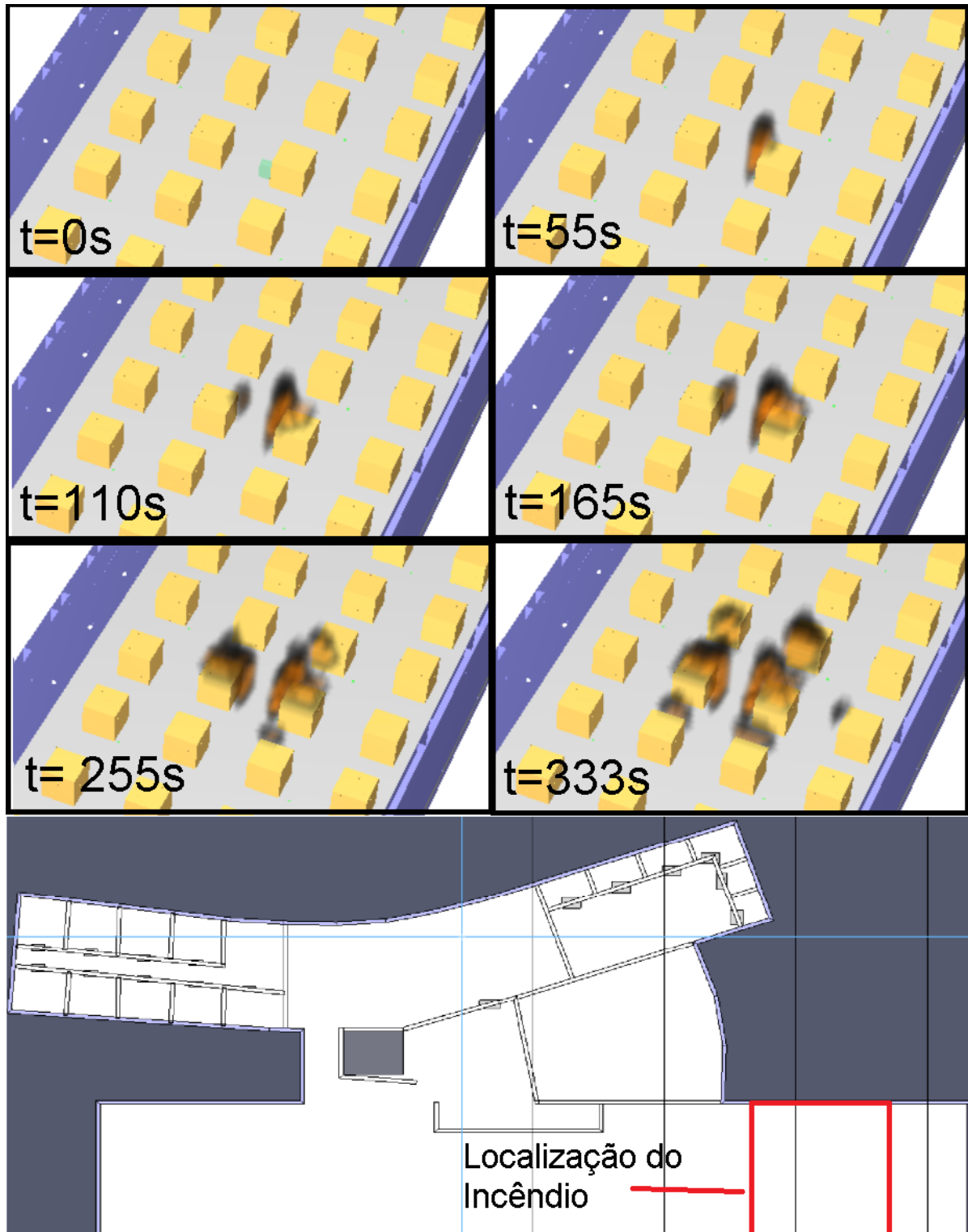
Pela figura 41, podemos ver o crescimento do incêndio dentro dos primeiros 333 segundos da simulação. O local de início do incêndio da simulação 02 permitiu um crescimento mais acelerado do que a simulação 1. Podemos perceber que com apenas 333 segundos o fogo já se espalhou para 6 blocos diferentes de papel e com liberação de energia atingindo os 3500 kW. A figura 41 mostra um perfil de temperaturas ao final da simulação 2.

Figura 41 – Perfil de temperaturas ao final da simulação 2



(fonte: elaborado pelo autor)

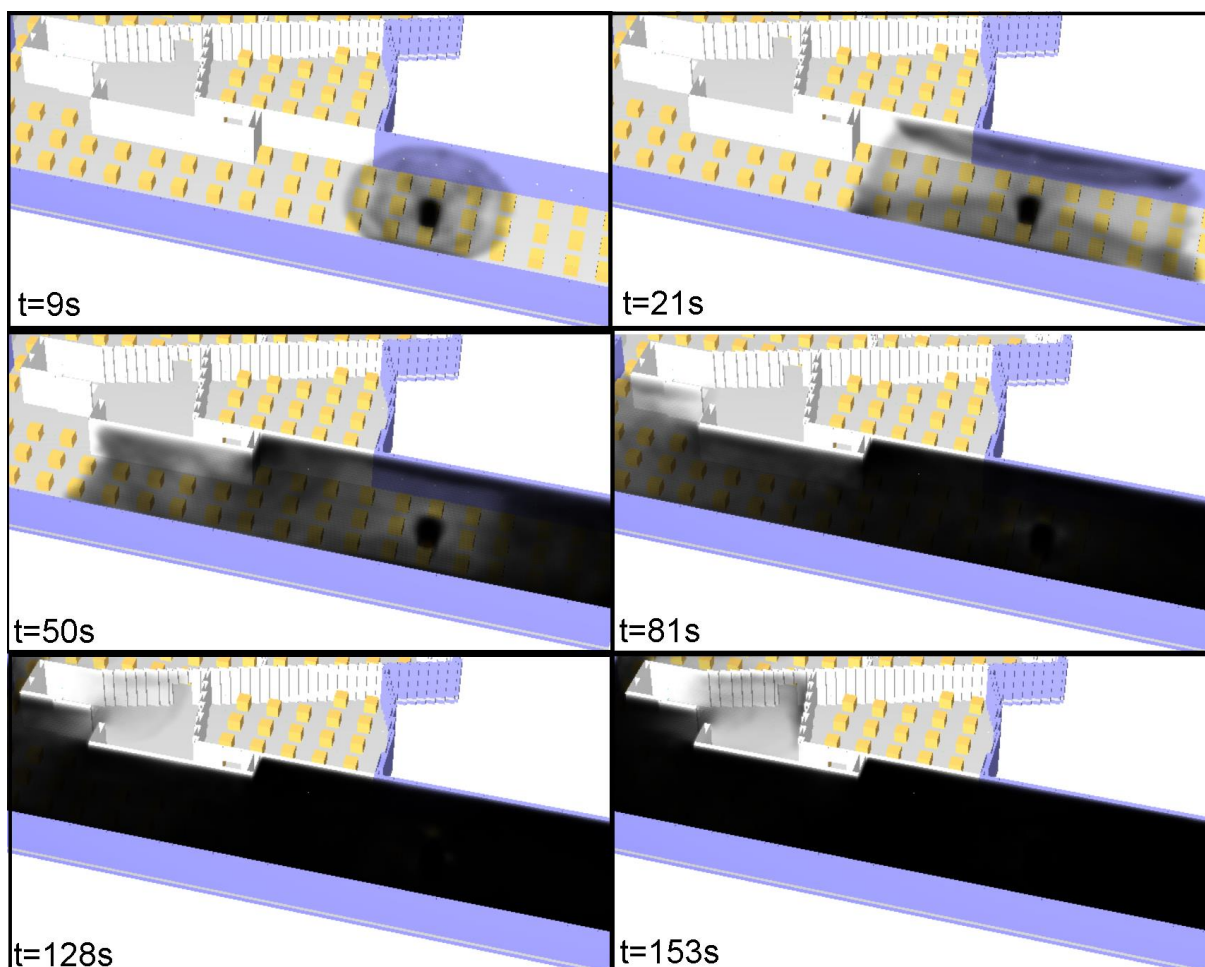
Figura 42 – Propagação do fogo pela biblioteca durante a simulação 2



(fonte: elaborado pelo autor)

Podemos observar na figura 43 a propagação da fumaça pela biblioteca. Com 128 segundos de simulação a fumaça começa a subir pela escada. Diferentemente da simulação 1, a visualização dos acontecimentos da simulação 2 são analisados através das janelas de visualização.

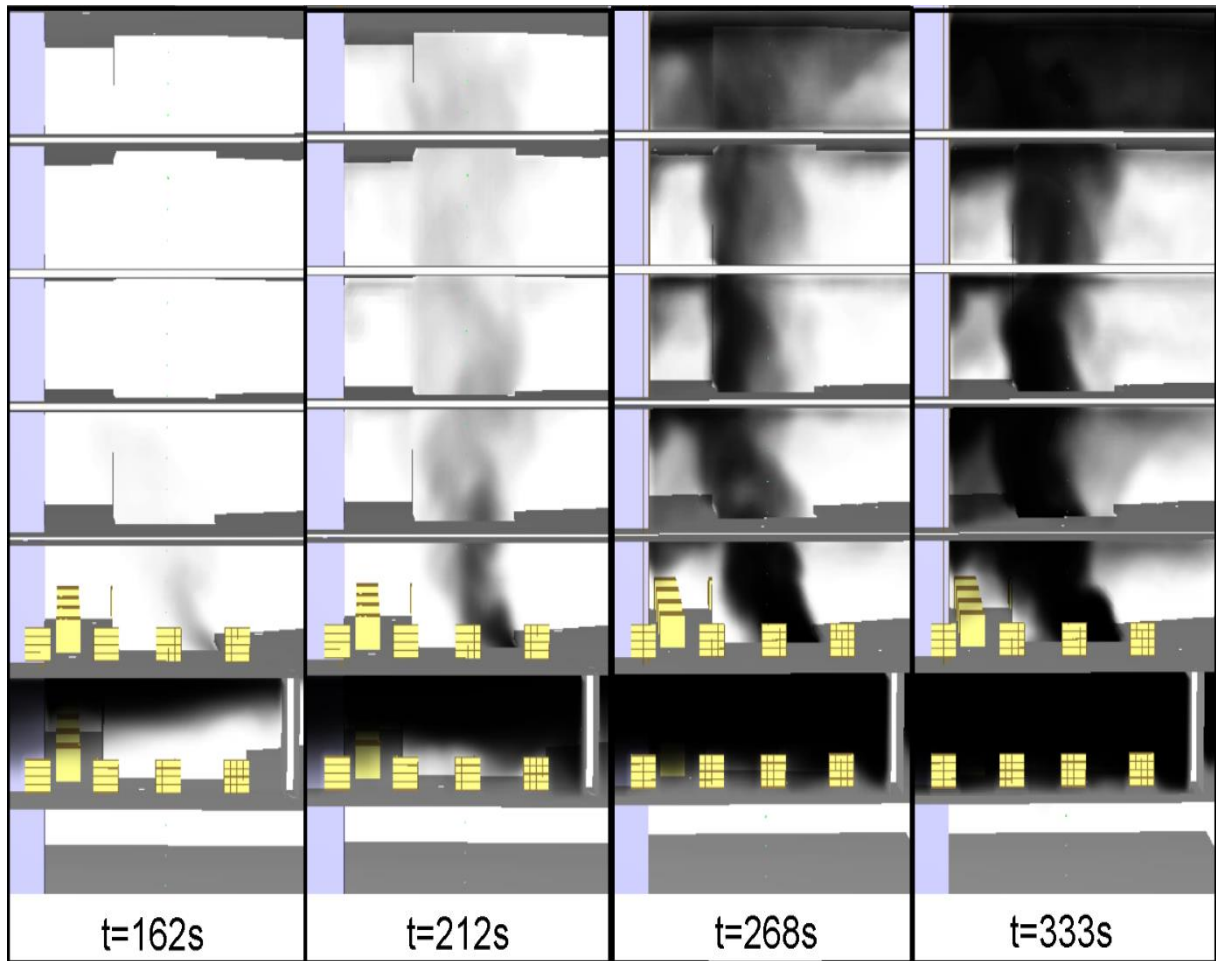
Figura 43 – Propagação da fumaça durante a simulação 2



(fonte: elaborado pelo autor)

A figura 44 mostra um corte da escadaria da escola de Engenharia Nova da UFRGS com a continuação da propagação da fumaça pelo edifício através de uma janela de visualização definida para mostrar somente a escadaria. Podemos identificar que da mesma maneira que na simulação 1, a grande maioria da fumaça sobe diretamente para o sétimo pavimento.

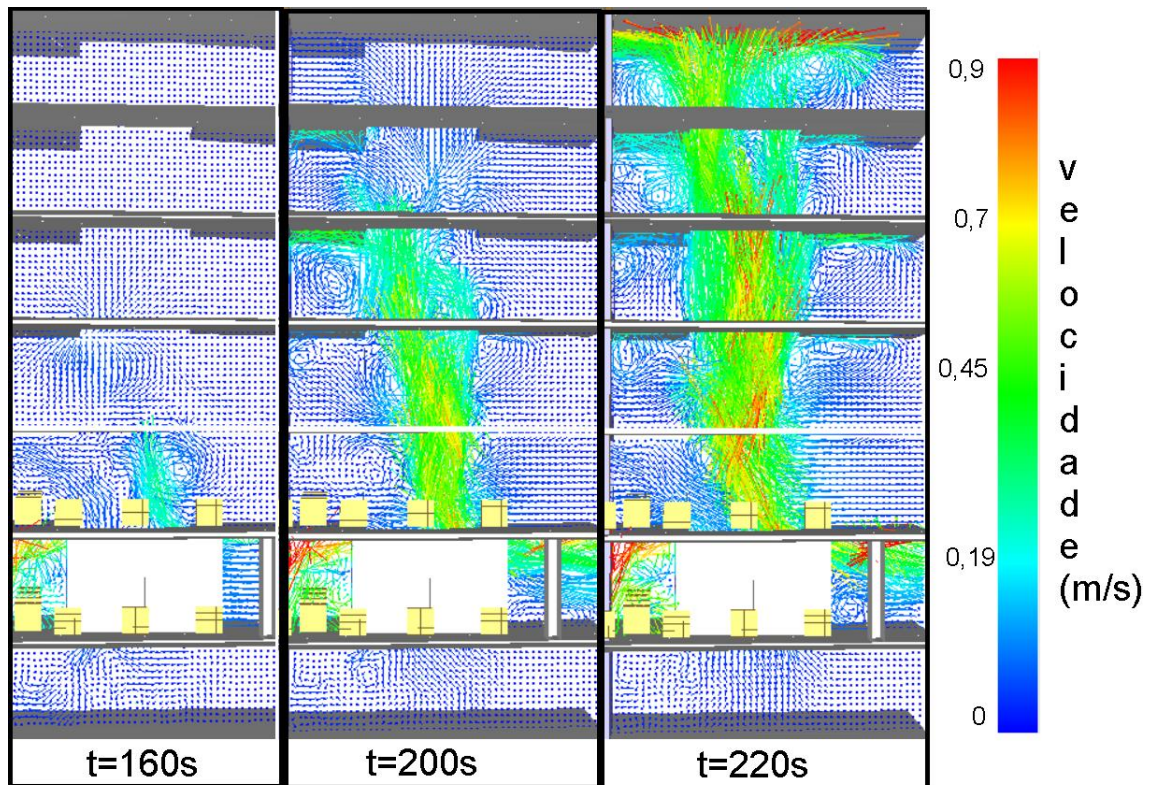
Figura 44 – Continuação da propagação da fumaça durante a simulação 2



(fonte: elaborado pelo autor)

As movimentações do ar dentro da edificação durante a simulação podem ser observadas na figura 45, que é um corte somente da escadaria. A fumaça ao subir causa turbulências no ar estagnado dos pavimentos, essas turbulências geram redemoinhos que acabam levando uma porcentagem da fumaça para os pavimentos. Pelo tempo reduzido desta simulação, a velocidade máxima que pode ser observada foi de 0,9 m/s.

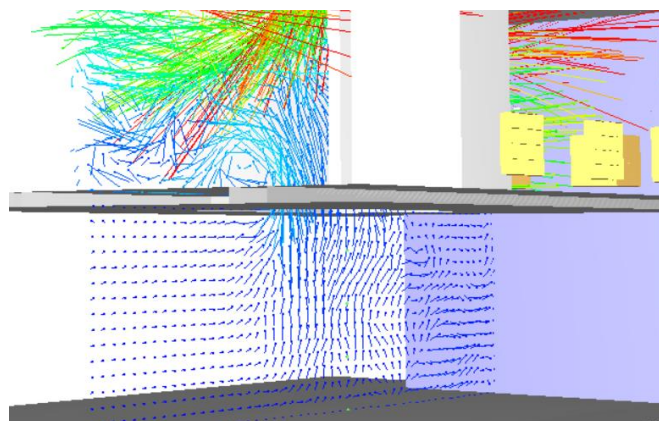
Figura 45 – Velocidade de movimentação do ar nas escadarias



(fonte: elaborado pelo autor)

A figura 46 é uma visualização em outro ângulo da movimentação de ar no instante de tempo $t=220s$. Pode-se verificar que correntes de ar estão se deslocando da mesma maneira explicada para a simulação 1. Em ambas as simulações apareceram correntes de ar que ascendem do térreo para o segundo pavimento, sendo essa a fonte de alimentação de oxigênio para a combustão dos materiais na biblioteca.

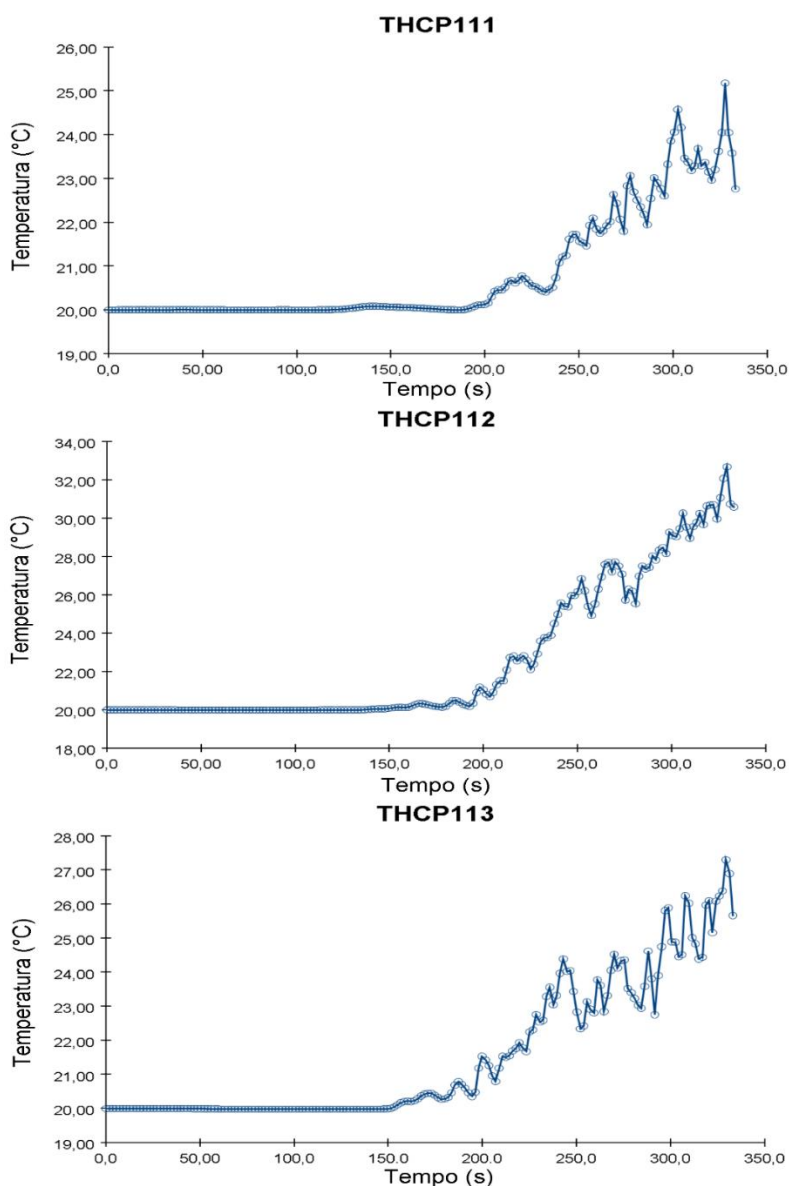
Figura 46 – Ventilação do térreo para o segundo pavimento



(fonte: elaborado pelo autor)

A localização dos termopares que são utilizados para a verificação da temperatura na escada são os mesmos da simulação 1 e são mostrados na figura 38. Para a simulação 2, os termopares que apresentaram as maiores temperaturas foram também os THCP 111, TCHP 112 e THCHP 113, que estão situados no terceiro pavimento. O THCP 112 atingiu a temperatura de aproximadamente 34 °C ao final da simulação. Os termopares não representam a temperatura da fumaça, eles são dispositivos que tem massa e sofrem mudanças de temperaturas, logo a sua temperatura representa a temperatura de um elemento da escadaria, como por exemplo os corrimões. A temperatura da fumaça seria bastante superior à apresentada pelos termopares.

Figura 47 – Variação da temperatura dos termopares da simulação 2

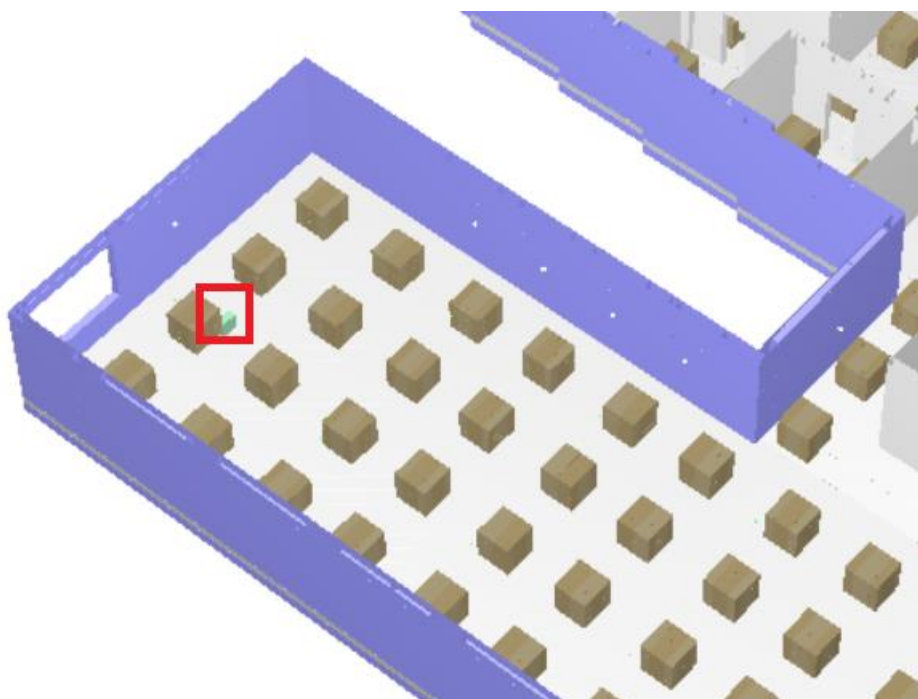


(fonte: elaborado pelo autor)

7.3 SIMULAÇÃO 3

A simulação 3 foi processada no computador pessoal do autor do trabalho, que possui um processador Intel Core i7-4700MQ CPU@ 2.4GHz e 16 GB de memória (RAM). O modelo foi processado durante 20 dias, resultando no tempo de 655 segundos. A simulação 03 foi montada exatamente igual à simulação 01, com a exceção de que uma janela foi deixada aberta desde o início da simulação. A figura 48 mostra a abertura no início da simulação.

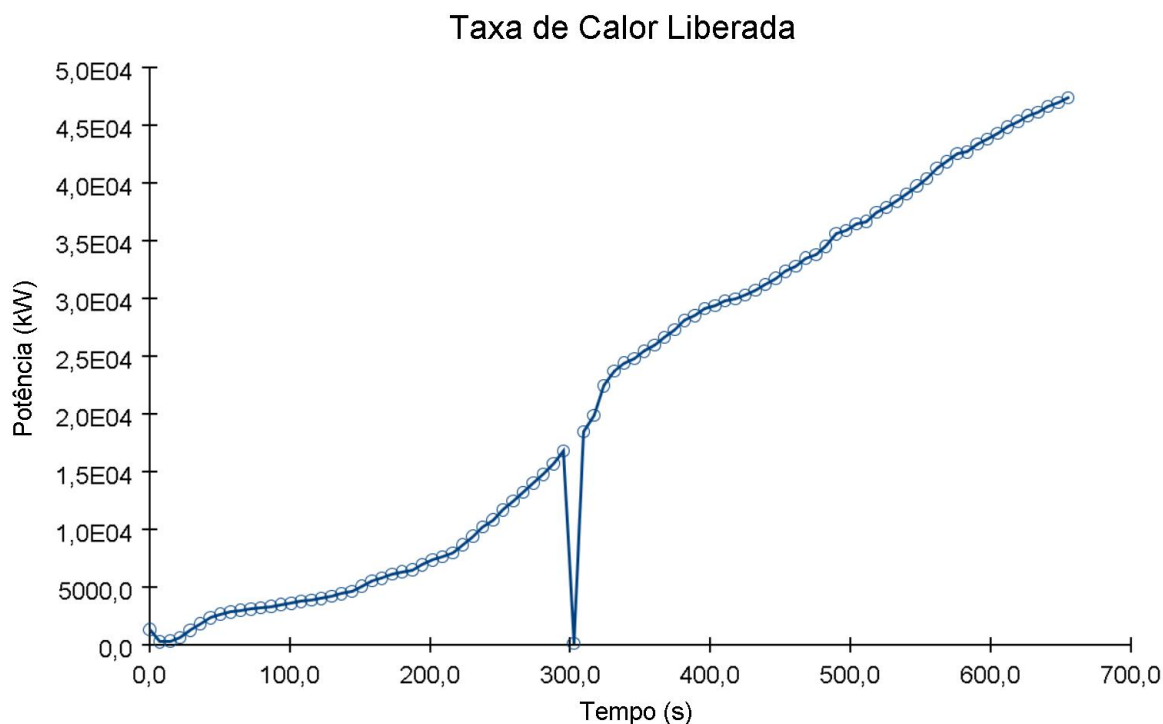
Figura 48 – Local de início do incêndio da simulação 3



(fonte: elaborado pelo autor)

Na figura 49 é mostrada a energia liberada pela combustão dos materiais na simulação. O crescimento do incêndio é muito superior, o que é consequência da livre ventilação obtida pela abertura janela, como será mostrado nas figuras seguintes. Na figura 49 também pode ser notado uma descontinuidade no gráfico de taxa de calor liberada. Isso foi consequência de uma queda de energia durante a simulação, fazendo com que a simulação fosse reiniciada, gerando a descontinuidade do gráfico.

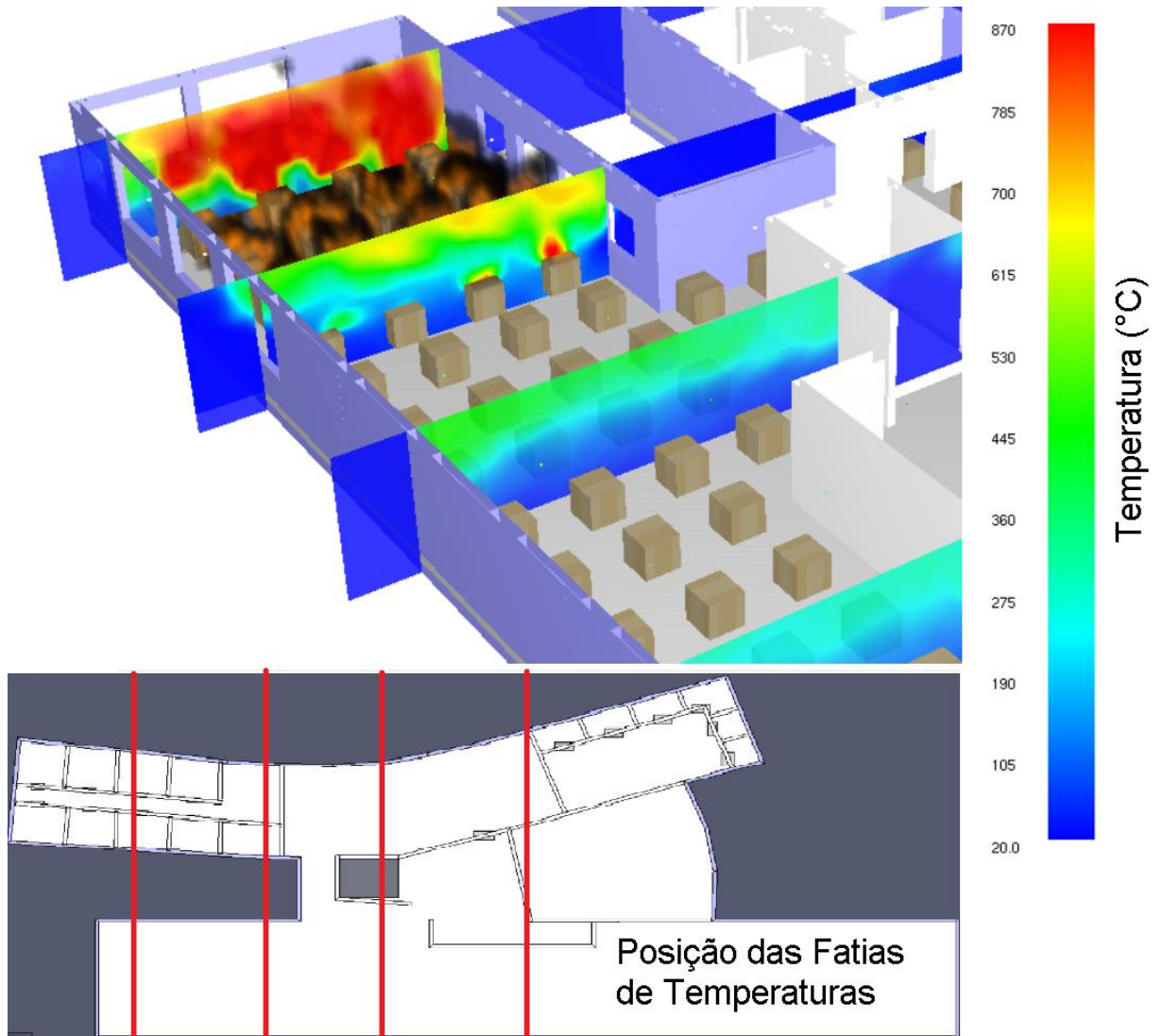
Figura 49 – Taxa de calor liberada pela simulação 3



(fonte: elaborado pelo autor)

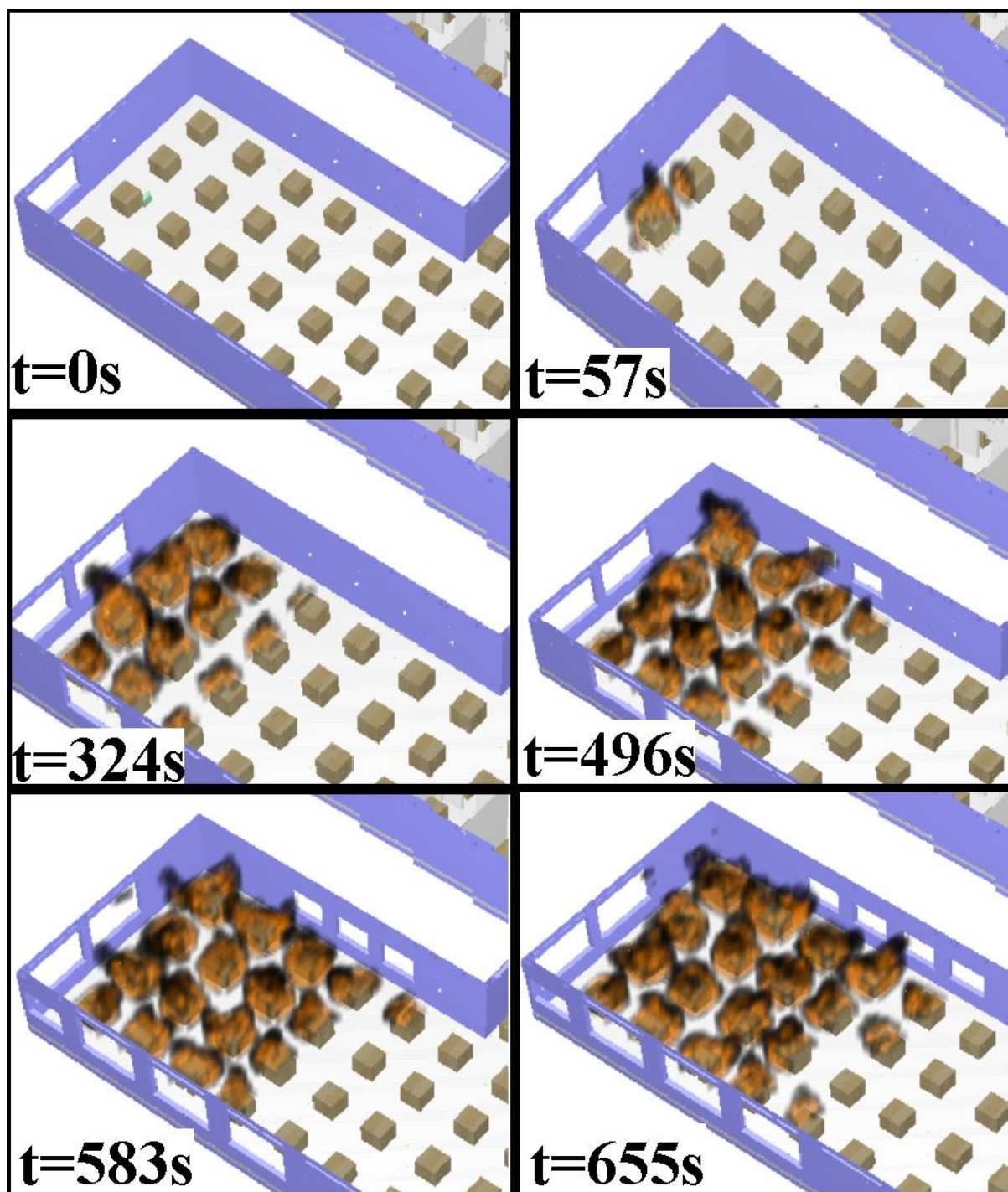
Os altos valores que são apresentados na figura 49 são bastante coerentes quando olhamos a propagação da chama pela biblioteca. A figura 51 mostra como o incêndio cresce de maneira rápida. Com apenas 324 segundos de simulação as janelas atingem os 450 °C e surgem aberturas para representar o seu desabamento. As aberturas aumentam a disponibilidade de oxigênio e o incêndio pode ser caracterizado como controlado pelos combustíveis, como discutido no item 4.2.1. Com 655 segundos de simulação já temos 19 blocos em ignição simultânea e 9 janelas já atingiram a temperatura estabelecida para o seu desabamento. Na figura 50 é possível observar um perfil de temperaturas na biblioteca ao final da simulação.

Figura 50 – Perfil de temperaturas ao final da simulação 3



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 51 – Propagação do fogo pela biblioteca durante a simulação 3

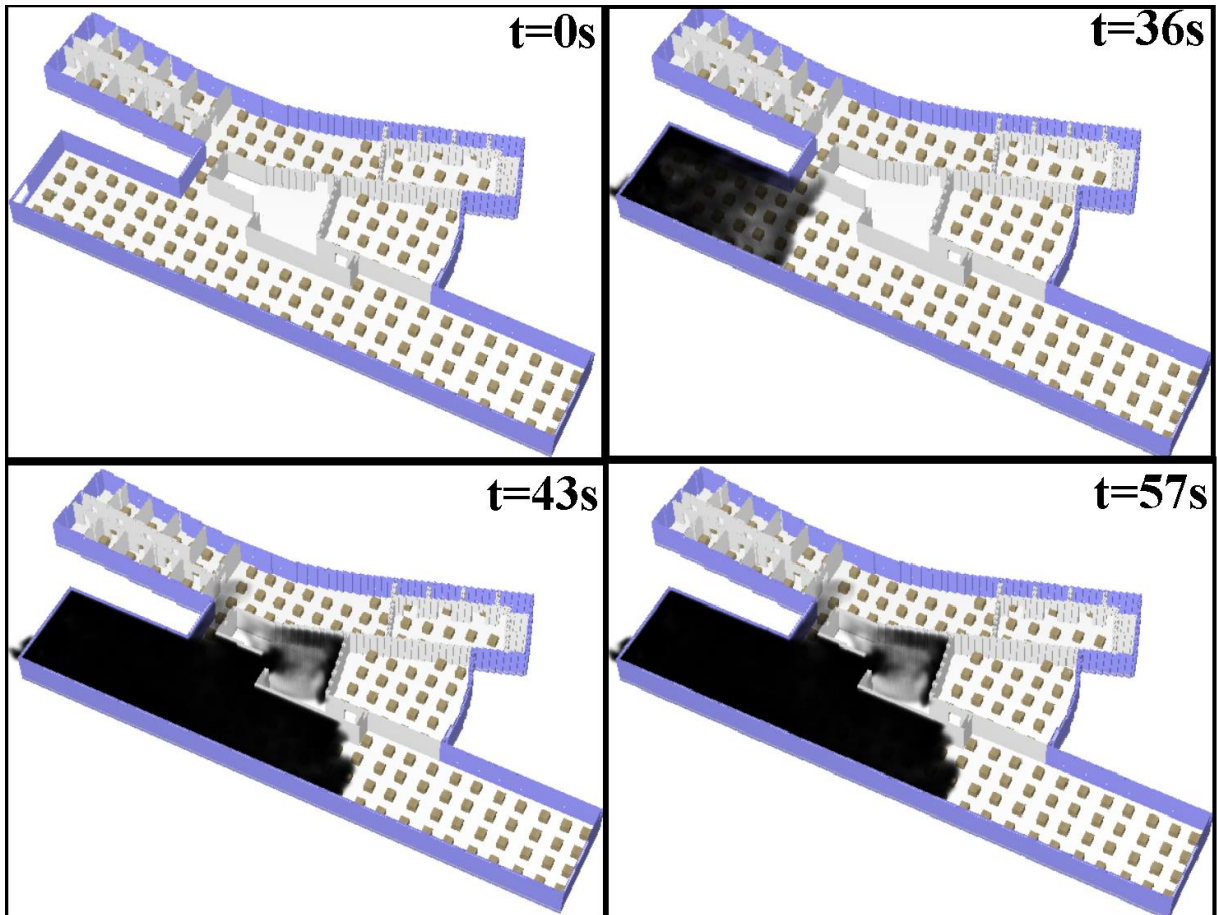


(fonte: elaborado pelo autor)

Junto com a rápida propagação do fogo também será emitida uma quantidade de fumaça proporcional. Na simulação 3, a abertura da janela no início da simulação permite o escoamento da fumaça para fora da edificação. Entretanto como podemos ver nas figuras 53 e 54, essa abertura e as aberturas que serão acionadas pelos dispositivos das janelas não serão suficientes

para impedir que a fumaça alcance a escada e forneça risco aos usuários. Podemos verificar que com apenas 57 segundos de simulação a fumaça já alcança e começa a subir pela escadaria.

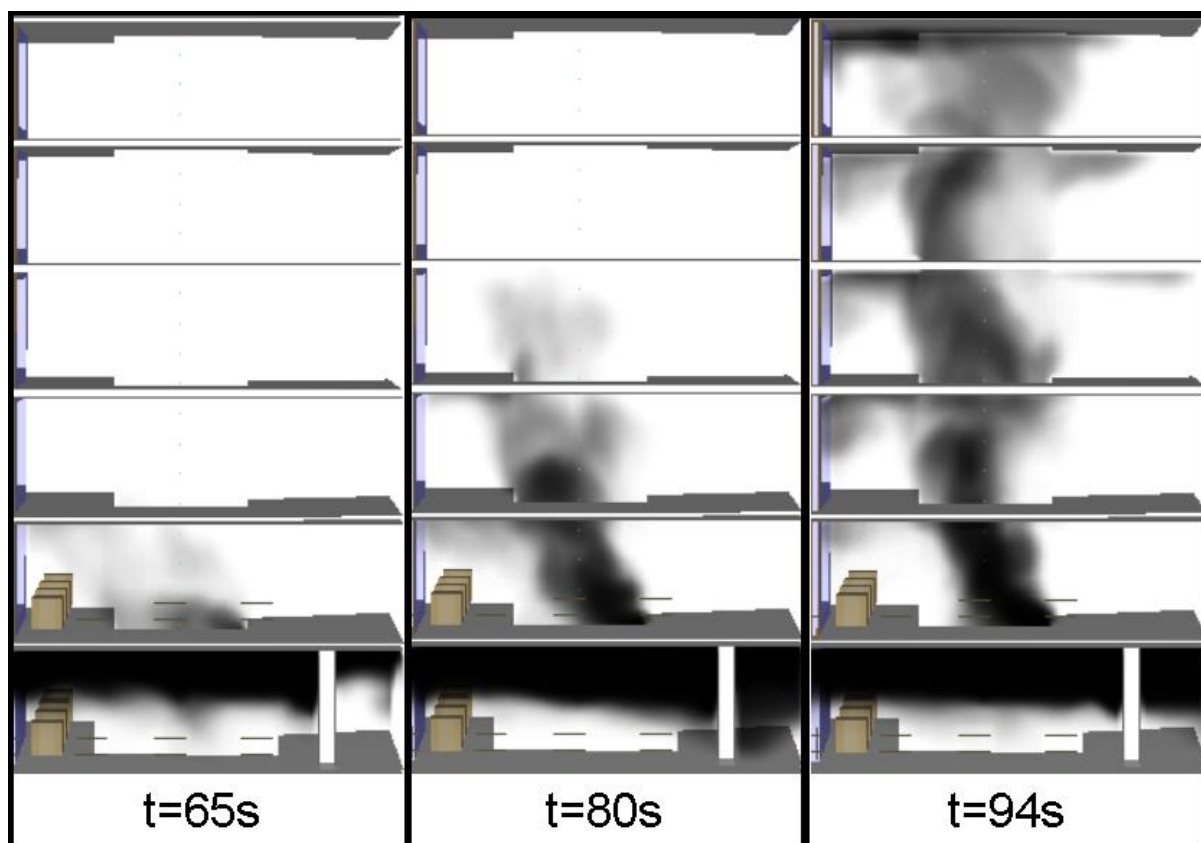
Figura 52 – Propagação do fogo pela biblioteca



(fonte: elaborado pelo autor)

A figura 53 mostra a janela de visualização que representa somente a localização da escada. Nela podemos verificar que com apenas 94 segundos de simulação a fumaça chega ao sétimo andar e está subindo em grande quantidade.

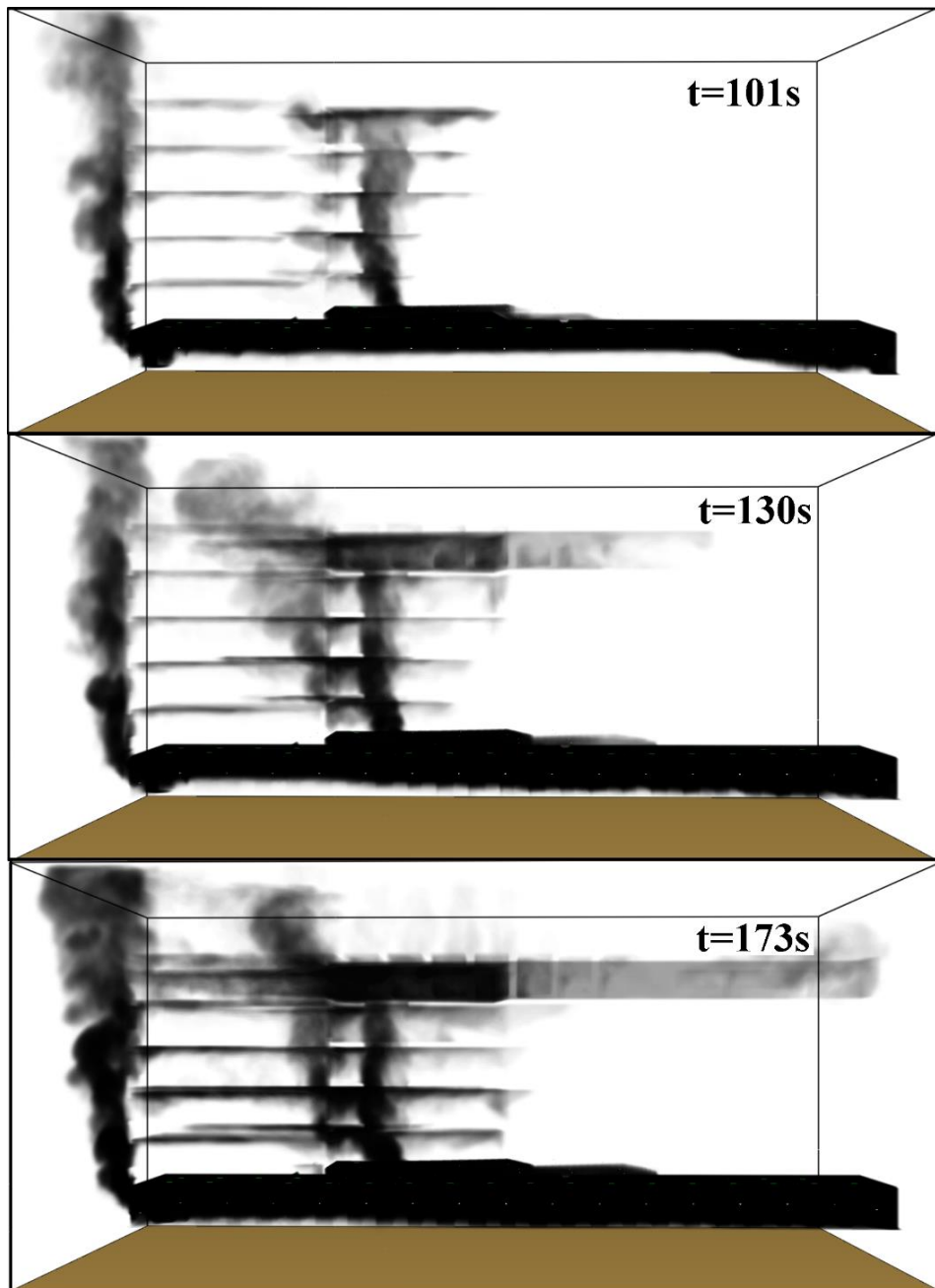
Figura 53 – Continuação da propagação da fumaça durante a simulação 3



(fonte: elaborado pelo autor)

Como comentado anteriormente, a abertura desde o momento inicial possibilita a saída de uma grande parte da fumaça decorrente da combustão dos materiais. Entretanto, o crescimento acelerado do incêndio consequente da livre disponibilidade de oxigênio, gera uma quantidade de fumaça maior do que a janela tem capacidade de dar vazão. A figura 54 mostra que a maior parte da fumaça é escoada pela abertura, porém a parte remanescente ainda é muito grande e é suficiente para se espalhar para o resto da edificação.

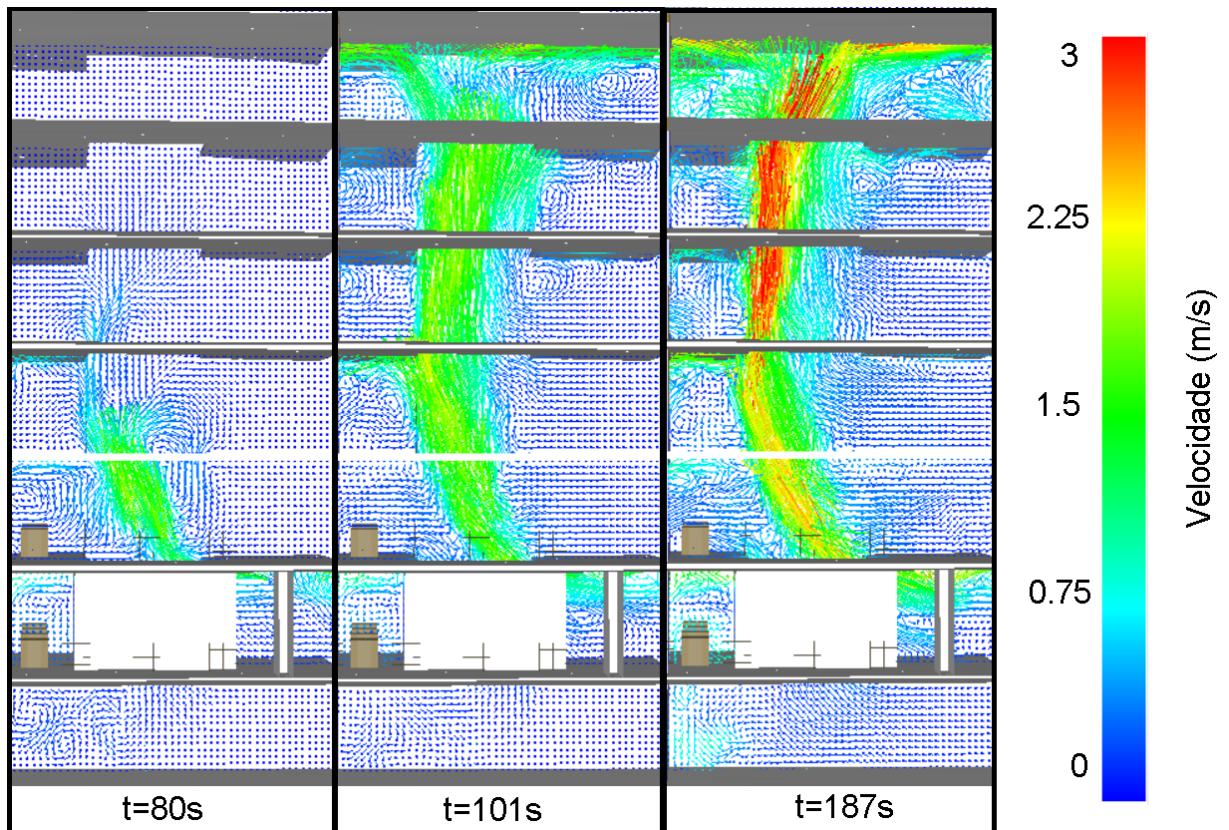
Figura 54 – Continuação da propagação da fumaça durante a simulação 3



(fonte: elaborado pelo autor)

A simulação 3 também é a que apresenta maiores velocidades de deslocamento do ar, chegando ao máximo de 3 m/s. A figura 55 mostra o plano da escada com vetores durante a propagação da fumaça pela edificação. Diferentemente das simulações 1 e 2, não foram identificadas correntes de ar do térreo para o segundo pavimento, o que deixa claro que toda a alimentação de oxigênio do incêndio é dada através da abertura.

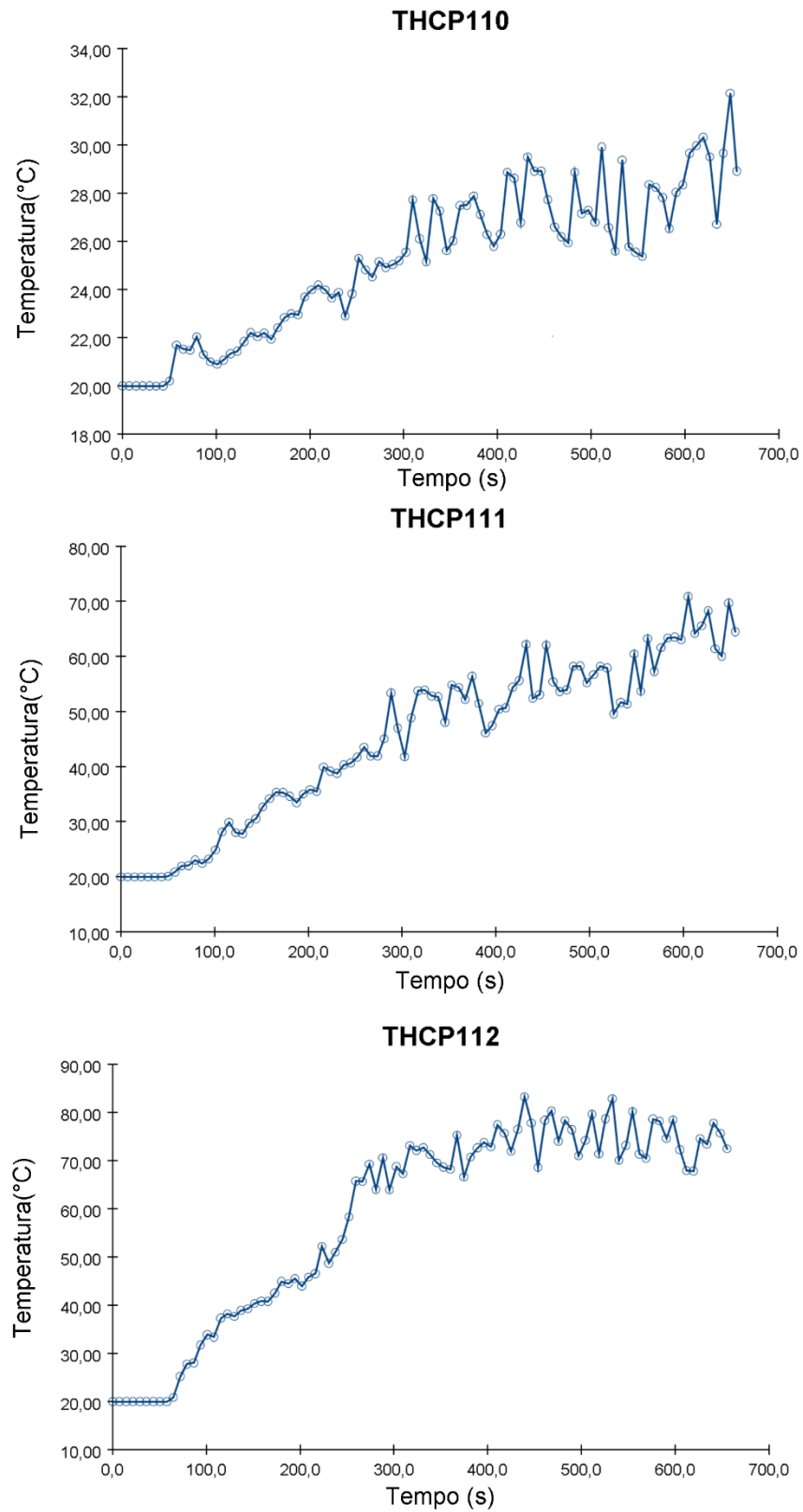
Figura 55 – Velocidade de movimentação do ar nas escadarias



(fonte: elaborado pelo autor)

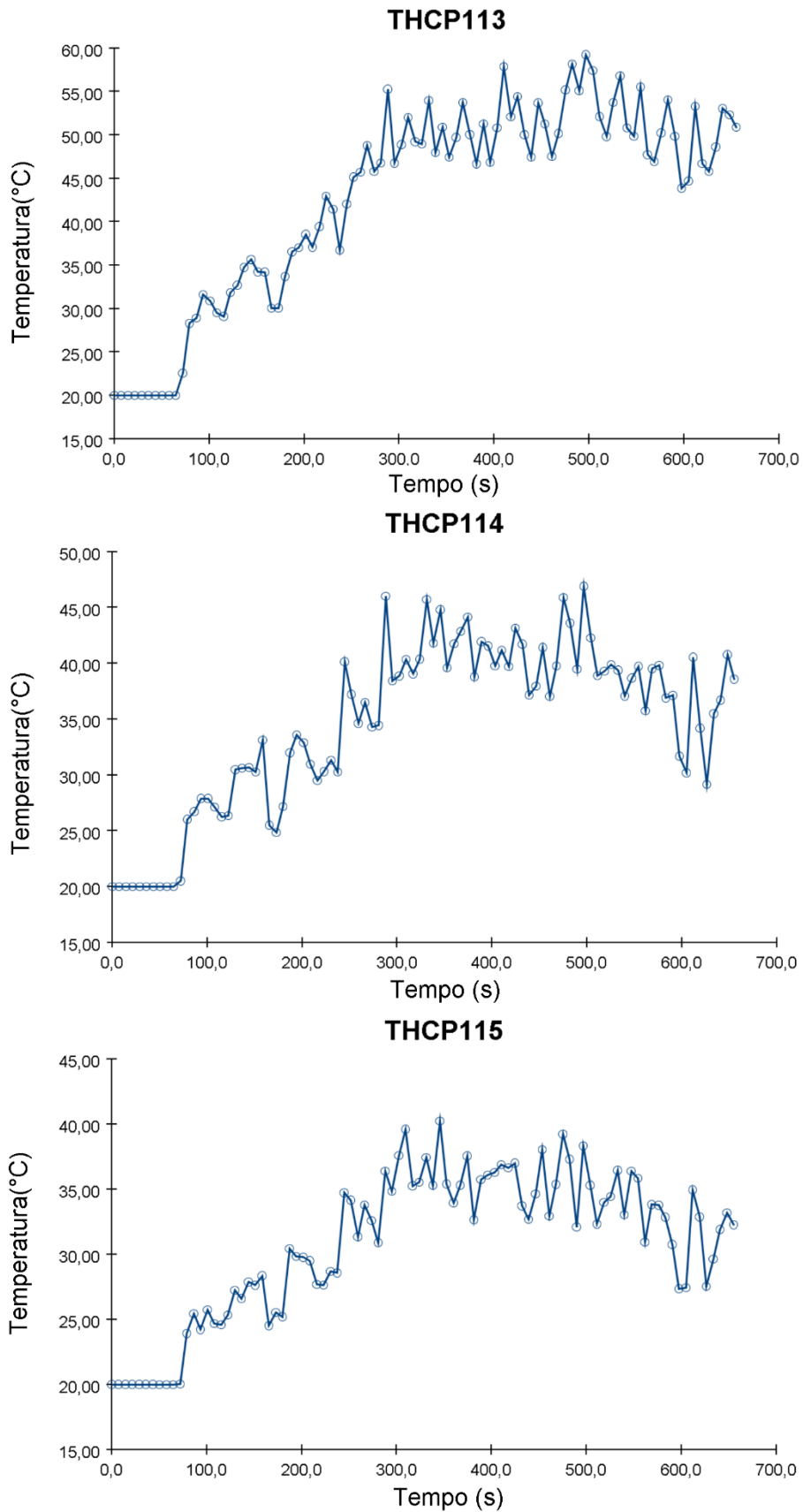
A distribuição dos termopares segue a mesma estabelecida na figura 37. Entretanto, a temperatura atingida pelos dispositivos na simulação 3 foram muito superiores às outras simulações. A figura 56 apresenta os THCP 110, THCP 111 e TCHP 112, enquanto a figura 57 mostra os THCP 113, THCP 114 e THCP 115. O THCP 112 apresentou temperaturas próximas a 80 °C a partir dos 400 segundos do início do incêndio.

Figura 56 – Variação da temperatura dos termopares da simulação 3



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 57 – Variação da temperatura dos termopares da simulação 3

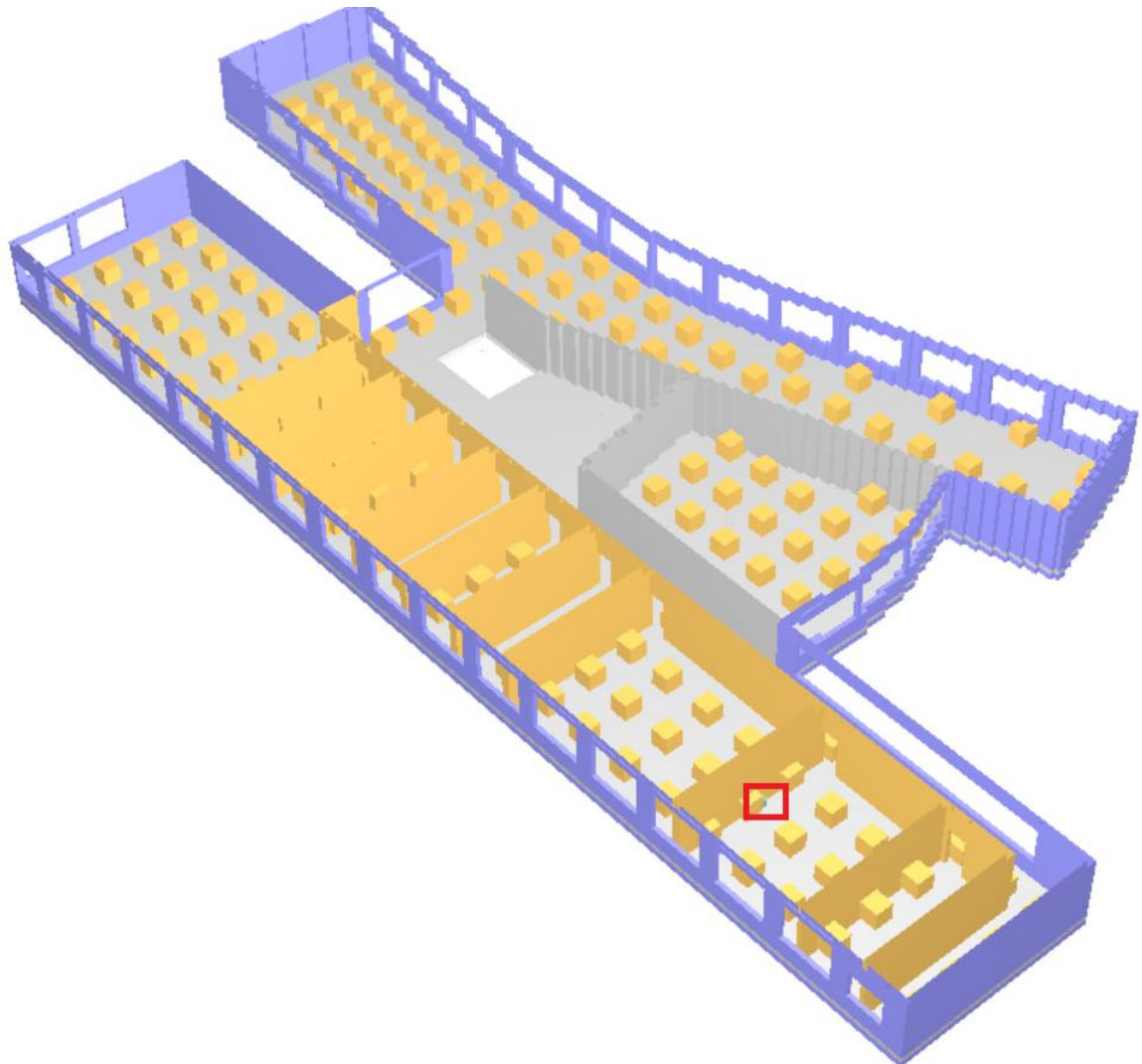


(fonte: elaborado pelo autor)

7.4 SIMULAÇÃO 4

A simulação 4 foi processada através do CESUP. No Anexo A pode ser encontrado o script utilizado para submeter a simulação ao processamento através de acesso remoto. O modelo foi processado durante aproximadamente 13 dias, resultando no tempo de 533 segundos. Todos os parâmetros da simulação foram definidos conforme discutido no capítulo 6. O incêndio teve início em um compartimento aleatório escolhido no terceiro pavimento. A figura 58 mostra o local exato que foi adotado para se iniciar o incêndio.

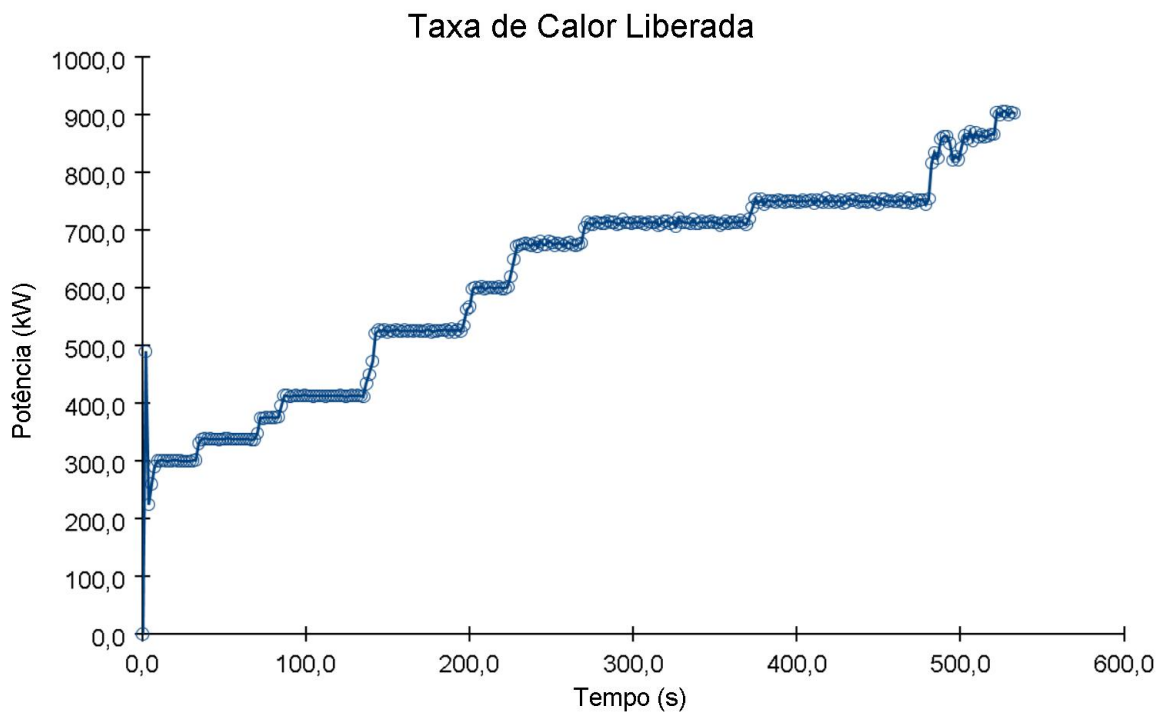
Figura 58 – Local de início do incêndio da simulação 4



(fonte: elaborado pelo autor)

Na simulação 4, estamos com uma carga de incêndio inferior à existente na biblioteca (igual a 300 MJ/m²), portanto é de se esperar valores menores de energia liberada pela combustão dos materiais e uma propagação de incêndio mais lenta. A figura 59 mostra a liberação de energia em função do tempo da simulação 4.

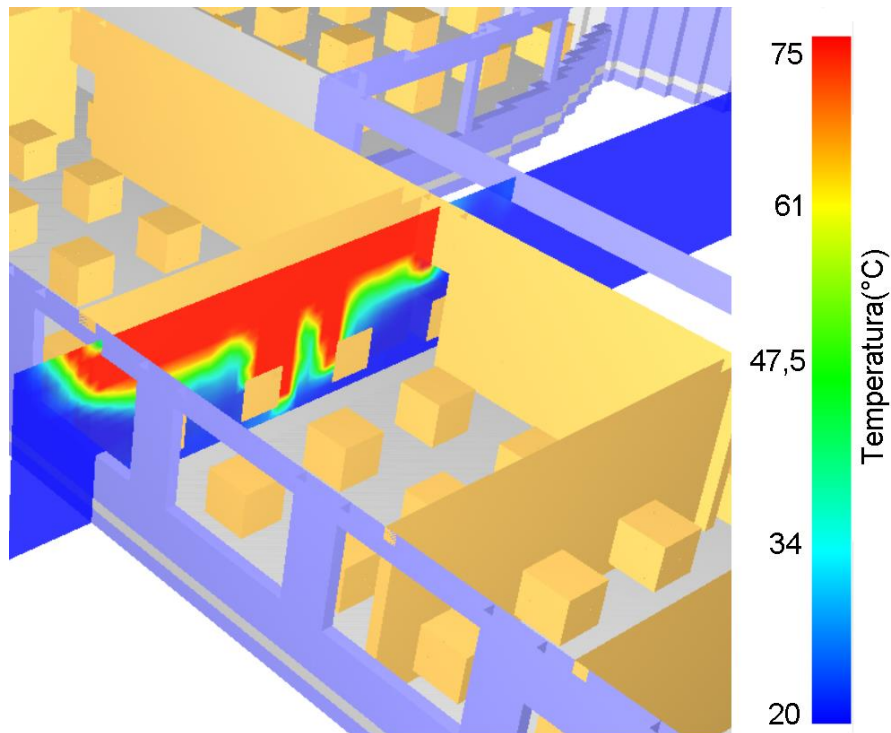
Figura 59 – Taxa de calor liberada pela simulação 4



(fonte: elaborado pelo autor)

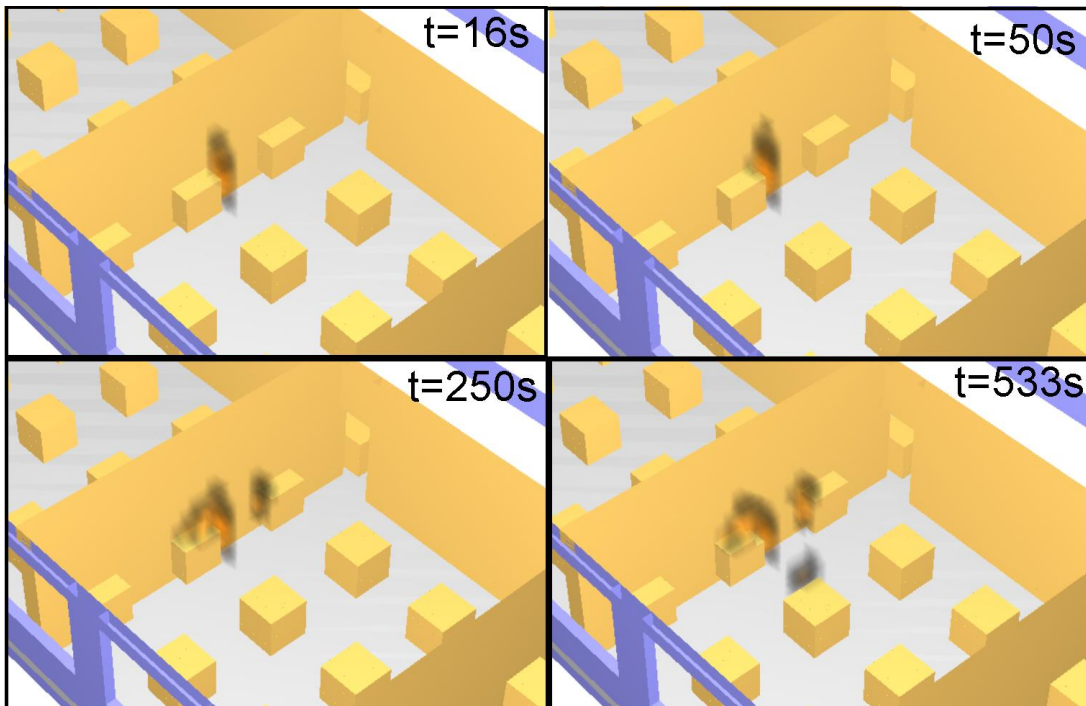
A propagação do fogo também acontece de maneira mais lenta. Cabe ressaltar que as janelas do terceiro pavimento foram consideradas abertas e esse é um incêndio controlado pelos combustíveis. Ao final dos 533 segundos da simulação o fogo se espalhou para somente 3 blocos, conforme mostra a figura 61. Um perfil de temperaturas ao final da simulação pode ser observado na figura 60.

Figura 60 – Perfil de temperaturas ao final da simulação 4



(fonte: elaborado pelo autor)

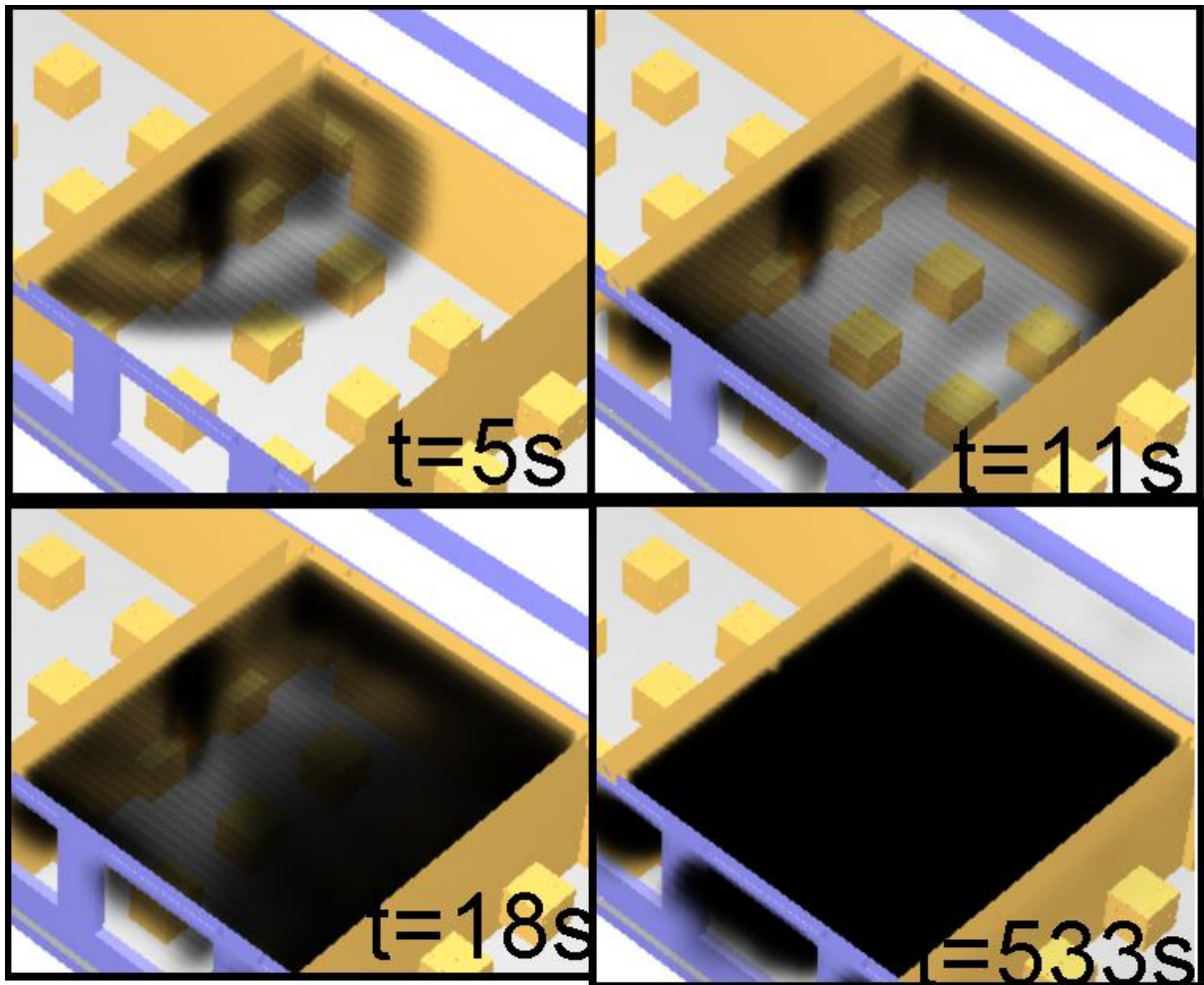
Figura 61 – Propagação do fogo pelo terceiro pavimento



(fonte: elaborado pelo autor)

A propagação da fumaça é mostrada pela figura 62. A fumaça rapidamente toma conta do compartimento, mas as aberturas permitem praticamente total escoamento da fumaça para fora da edificação, desta maneira não fornecendo risco aos usuários nos instantes iniciais do incêndio.

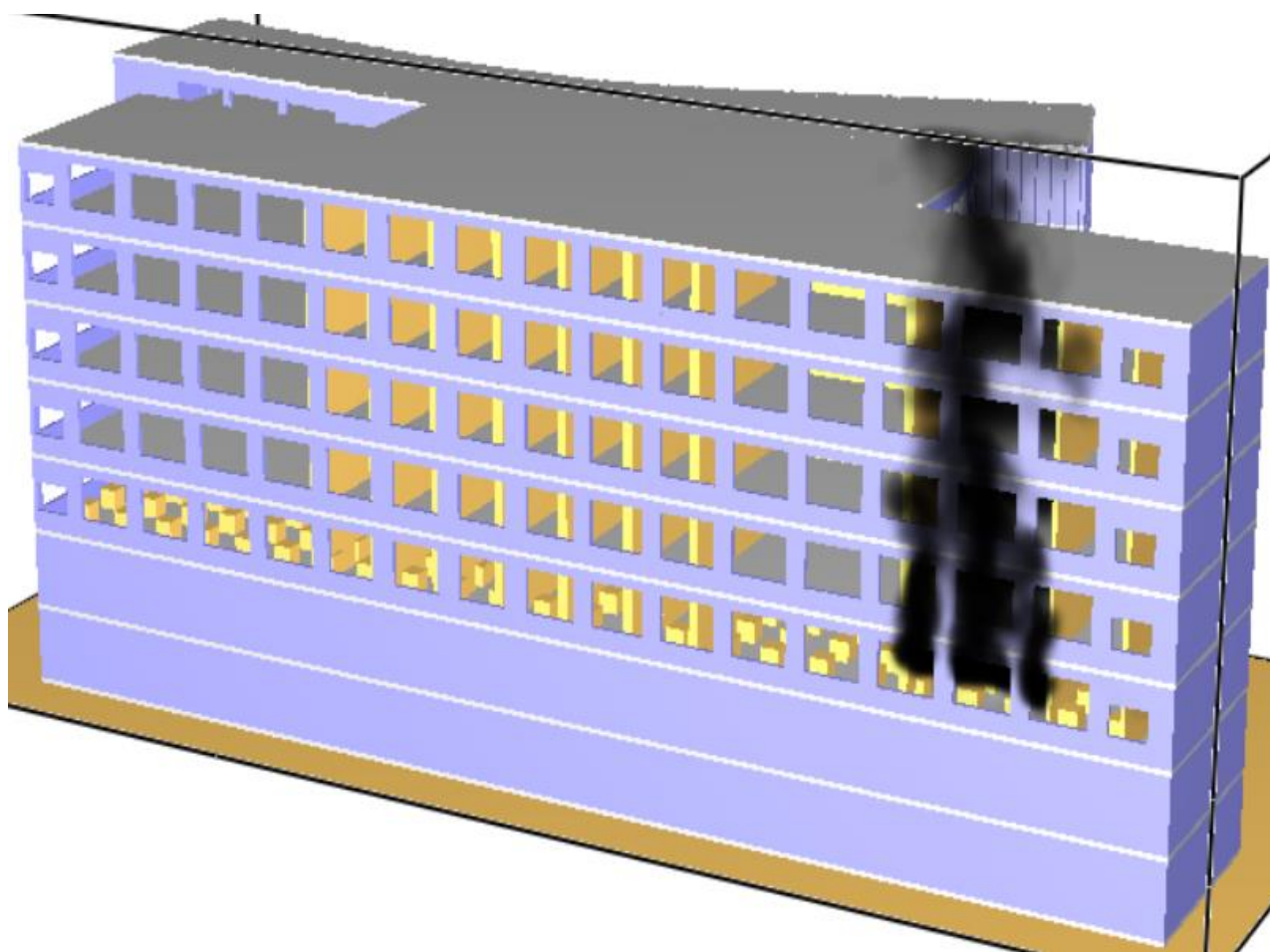
Figura 62 – Propagação da fumaça durante a simulação



(fonte: elaborado pelo autor)

Complementando a figura 62, a figura 63 mostra ao final da simulação uma vista externa da edificação. Nessa vista é possível notar que a fumaça que sai pelo terceiro pavimento não retorna para dentro da edificação.

Figura 63 – Vista externa da propagação da fumaça durante a simulação 4



(fonte: elaborado pelo autor)

7.5 COMPARAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste item serão comparados, discutidos e analisados os resultados obtidos nos quatro diferentes cenários de simulação computacional da Escola de Engenharia Nova da UFRGS.

7.5.1 Desempenho Computacional

As simulações obtiveram diferentes desempenhos e foram processadas de maneiras diferentes. A tabela 7 mostra as particularidades e consequências de cada uma das simulações.

Tabela 7 – Comparativo entre os desempenhos computacionais

Simulação	Processamento	Núcleos (CESUP)	Tempo de Processamento	Tempo de Simulação	Desempenho (segundos/dia)	Passo de Tempo da Simulação
1	CESUP	1	19 dias	576 s	30,32	7,2 s
2	CESUP	12	11 dias	333 s	30,27	1,8 s
3	Computador Próprio	-	20 dias	655 s	32,75	7,2 s
4	CESUP	12	13 dias	533 s	41	1,8 s

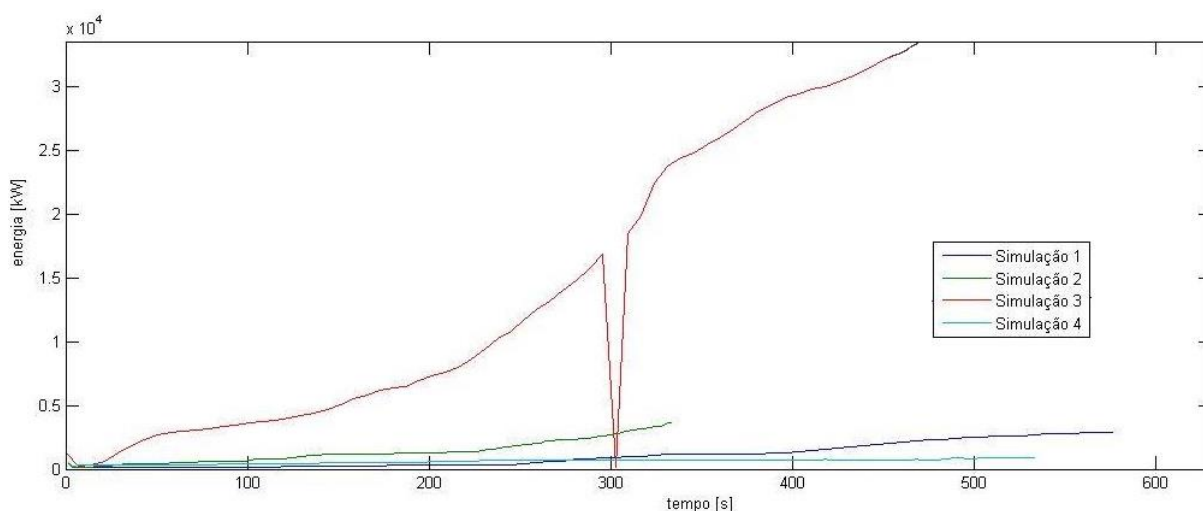
(fonte: elaborado pelo autor)

A quantidade máxima de núcleos que pode ser utilizada por simulação no CESUP é de 24. Entretanto não foi utilizada a quantidade máxima permitida porque existe um sistema de filas de usuários para submeter os trabalhos. Pode ser realizada uma analogia a um grupo de pessoas esperando liberar uma mesa em um restaurante, grupos menores de pessoas são passados na frente na fila ao liberarem mesas que atendam essas pessoas. O processamento no CESUP tinha como principal objetivo atingir tempos maiores de simulação, o que não foi levado em conta foi que o FDS define de maneira automática o passo de tempo da simulação com base na capacidade de processamento. Então para as simulações 2 e 4 que foram utilizados 12 núcleos o software assumiu automaticamente um passo de tempo para cálculo de 1,8 segundos, dessa maneira não resultando em maiores tempos de simulação. Esse problema poderia ter sido resolvido fixando o passo de tempo em 7,2 s, dessa maneira as simulações 2 e 4 poderiam atingir aproximadamente 1332 e 2132 segundos de simulação com o mesmo tempo de processamento. A simulação 4 por ser mais simples apresentou um desempenho de processamento melhor do que as outras simulações, chegando a atingir 41 segundos de simulação por dia.

7.5.2 Liberação de Energia

A figura 64 mostra um comparativo entre os gráficos de liberação de energia apresentados pelas quatro simulações. É possível de se perceber que a livre ventilação juntamente com a elevada carga de incêndio existente na biblioteca levou aos valores da simulação 3 a serem muito superiores aos das outras simulações nos instantes iniciais do incêndio.

Figura 64 – Comparativo da liberação de energia entre as diferentes simulações



(fonte: elaborado pelo autor)

O comportamento esperado para as simulações 1 e 2 é que continuassem aumentando a temperatura interna das janelas até atingirem a temperatura de 450 °C. Após esse momento, as aberturas seriam acionadas, permitindo a entrada de oxigênio e combustão quase que instantânea dos materiais, esse fenômeno é explicado no item 4.2.3 desse trabalho. As temperaturas máximas atingidas pelo incêndio podem ser comparadas na tabela 8.

Tabela 8 – Temperatura máxima de incêndio atingida pelas diferentes simulações

Ao final das simulações			Após atingirem o mesmo tempo		
Simulação	Tempo (s)	Temperatura Máxima (°C)	Simulação	Tempo (s)	Temperatura Máxima (°C)
1	576	170	1	333	125
2	333	320	2	333	320
3	655	870	3	333	600
4	533	75	4	333	75

(fonte: elaborado pelo autor)

7.5.3 Propagação da Fumaça

Sabemos que geralmente em incêndios as pessoas perecem pela inalação de fumaça antes de falecerem devido as altas temperaturas. Desta maneira é de fundamental importância que os usuários da edificação possam deixar o local sem contato com a fumaça, em uma situação de incêndio. Infelizmente, essa condição não pode ser verificada em todas as simulações da escola de engenharia. A tabela 9 mostra as etapas do desenvolvimento da propagação da fumaça pela edificação.

Tabela 9 – Comparativo da propagação da fumaça entre as diferentes simulações

Simulação	Etapas da Propagação da Fumaça			
	Espalha Pelo Compartimento	Chega a Escada	Chega Ao Sétimo Pavimento	Se Espalha Por Toda a Edificação
1	57 s	108 s	194 s	-
2	64 s	140 s	223 s	-
3	36 s	57 s	94 s	597 s
4	34 s	-	-	-

(fonte: elaborado pelo autor)

A simulação 3 é a mais crítica pois em apenas 57 segundos de simulação a fumaça já alcançou a escada e com 94 segundos existe um grande fluxo ascendente de fumaça pela única rota de saída da edificação. O rápido crescimento do incêndio proporcionado pela ventilação inicial de uma janela aberta gera uma quantidade de fumaça muito superior a capacidade de escoamento de fumaça da janela. Essa fumaça restante se propaga em direção as aberturas que representam a escada da escola de engenharia. Pode-se concluir que em todas as hipóteses de incêndio simuladas nesse trabalho o tempo em que a fumaça chega até a abertura é insuficiente para que ocorra a total evacuação do edifício, ficando os usuários expostos ao forte fluxo de fumaça na tentativa de abandonar a edificação.

8 CONCLUSÕES

Esse trabalho tem como objetivo realizar uma simulação computacional de incêndio da Escola de Engenharia Nova da UFRGS. O modelo foi criado através do Pyrosim e exportado para um modelo executável pelo FDS. Os resultados gerados pelo FDS foram lidos e analisados através do Smokeview.

Foram realizadas quatro simulações distintas, três com inícios no segundo pavimento da Escola de Engenharia da UFRGS e uma iniciando no terceiro pavimento. O cenário mais crítico para a segurança dos usuários foi o estabelecido na simulação 3. Nessa simulação a livre ventilação inicial permitiu que o incêndio crescesse de maneira acelerada, resultando na chegada da fumaça na escadaria com somente 57 segundos após o início do incêndio.

Nas simulações 1 e 2, a falta de ventilação na biblioteca impediu um crescimento tão acelerado como foi observado na simulação 3. Entretanto, toda a fumaça resultante da combustão dos materiais convergiu para a escada do prédio da Escola de Engenharia da UFRGS, o que também causaria bastantes problemas para a evacuação do edifício. A fumaça atingiu a escada após os 108 segundos para a simulação 1 e 140 segundos para a simulação 2. Cabe destacar que nas simulações 1 e 2 a quantidade de fumaça que está subindo pela escadaria é muito inferior ao que foi verificado na simulação 3.

As três simulações com início no segundo pavimento provaram que a escada existente na Escola de Engenharia da UFRGS não é segura e não permitiria a saída com segurança dos usuários do prédio em uma situação de incêndio.

Nas simulações 1 e 2 o crescimento do incêndio foi controlado pela ventilação disponível. Em ambas as simulações surgiram correntes de ar que saíam do pavimento térreo em direção à biblioteca através da abertura da escada. Foi essa ventilação que continuava a alimentar de oxigênio o incêndio. Já nas simulações 3 e 4 o crescimento do incêndio foi controlado somente pelos materiais, pois as aberturas forneciam livre ventilação.

É possível concluir que a Escola de Engenharia da UFRGS não apresenta segurança para a evacuação dos usuários em uma situação de incêndio, pois toda a fumaça é conduzida para a

única rota de saída em grande quantidade e em um curto espaço de tempo. Esse fator é muito crítico pois a inalação de fumaça é a principal causa de morte em incêndios. Para proteger os usuários da fumaça durante a evacuação, podem ser adotadas medidas de controle de fumaça e a adoção de uma escada enclausurada a prova de fumaça, medidas que são regulamentadas, respectivamente, pela Instrução Técnica n.º 15/2011, do Corpo de Bombeiros de São Paulo e pela Resolução Técnica n.º 11/2015 – Parte 1, do Corpo de Bombeiros Militares do Rio Grande do Sul. A implantação de sistemas de detecção de fumaça e alarme de incêndio faria com que a evacuação fosse agilizada, desta maneira adiantando em preciosos segundos a saída dos usuários da edificação. Para a edificação estudada, seria também recomendado a execução de uma escada aberta externa, próximo ao corredor que leva aos sanitários, pois se verificou que a fumaça não se propagou para aquela região, sendo assim uma área segura para colocação da escada.

Os objetivos foram parcialmente alcançados, pois se pretendia obter maiores tempos de simulação, o máximo alcançado foi de 655 segundos pela simulação 3. Todavia, o tempo obtido foi suficiente para analisar a segurança dos usuários da edificação, pois esses somente conseguem abandonar o edifício nos períodos iniciais de incêndio. Em todas as 4 simulações o incêndio não chegou a estágios completamente desenvolvidos. Caso as temperaturas atingidas não fossem baixas, seria possível realizar uma análise da segurança estrutural da Escola de Engenharia Nova da UFRGS baseada nas temperaturas e períodos de exposição dos elementos estruturais.

As elaborações das simulações computacionais foram bastante trabalhosas e para chegar ao resultado final diversas dificuldades foram superadas. Seguem recomendações para que trabalhos futuros a serem realizados utilizando os *softwares Fire Dynamics Simulator* e *Pyrosim* não necessitem passar pelos mesmos problemas encontrados na realização desse trabalho:

- a) muita atenção na importação de modelos geométricos elaborados em diferentes *softwares*, recomenda-se o total desenvolvimento do modelo no *Pyrosim* ou *FDS*;
- b) procurar resolver a simulação através de clusters, pois a demanda computacional é muito elevada para computadores de uso pessoal;
- c) fixação do “time step”(tempo de passo) da simulação;
- d) realização de uma simulação de evacuação do edifício e comparação com a propagação da fumaça obtida nas quatro simulações;

- e) realização de nova simulação computacional de incêndio com o objetivo de verificar a eficácia das soluções apontadas nesse trabalho.

REFERÊNCIAS

- AUTODESK. **About Revit**. [s.l.] Apr. 2014. Disponível em: <<https://knowledge.autodesk.com/support/revit-products/getting-started/caas/CloudHelp/cloudhelp/2014/ENU/Revit/files/GUID-D8835F8E-1330-4DBC-8A55-AF5941056C58-htm.html>>. Acesso em: 13 nov. 2015.
- BLUNDELL, S. J.; BLUNDELL, S. J. **Concepts in Thermal Physics**. Oxford: Oxford University Press, 2006.
- BOMBEIROS EMERGÊNCIA. **Incêndio Edifício Joelma**. [entre 2000 e 2015]. Disponível em: <<http://www.bombeirosemergencia.com.br/incendiojoelma.html>>. Acesso em: 9 out. 2015.
- BUNCHANAN, A. H. **Structural Design for Fire Safety**. Chichester: John Wiley & Sons, 2002.
- BUSTAMANTE, L. **Incêndio no Gran Circo em Niterói completa 50 anos. Relembre**. Rio de Janeiro: Jornal do Brasil. 2011. Disponível em: <<http://www.jb.com.br/rio/noticias/2011/12/17/incendio-no-gran-circo-em-niteroi-completa-50-anos-relembre/>>. Acesso em: 8 out. 2015.
- CENTRO NACIONAL DE SUPERCOMPUTAÇÃO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. **Processamento de alto desempenho**. [s.l.][entre 1995 e 2015]. Disponível em: <<http://www.cesup.ufrgs.br/>>. Acesso em: 17 nov 2015.
- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **Eurocode 1: actions on structures – part1-2: general actions – actions on structures exposed to fire**. Brussels, 2002.
- FAHY, R. F. Fire Safety Journal. **Building Fire Simulation Model. An Overview**, v. 9, n. 2, p. 189-203, July 1985. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0379711285900074>>. Acesso em: 12 nov. 2015.
- FORNEY, G. P. **Smokeview, A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data Volume I: user's guide**. 6th ed. [s.l.] National Institute of Standards and Technology, Apr. 2015. Disponível em: <<https://drive.google.com/file/d/0B-W-dkXwdHWNWZ5eVJUa3hzcUU/view>>. Acesso em: 17 nov. 2015.
- GLASA, J. et al. **Cinema Fire Modelling by FDS**. Journal of Physics: Conference Series, v. 410, p. 4, 2013. Disponível em: <<http://stacks.iop.org/1742-6596/410/i=1/a=012013?key=crossref.fdbbf844cbbc3c3ec94392b9a012536b>>. Acesso em: 12 nov. 2015.
- GUANQUAN, C.; JINHUA, S. Risk Analysis. **Quantitative Assessment of Building Fire Risk to Life Safety**. v.28, n.3, p. 615-625, June 2008.
- INGASON, H.; LI, Z. Y.; LÖNNERMARK, A. **Tunnel Fire Dynamics**. New York: Springer, 2015.

IRION, A.; AMORIM, F.; COLUSSI, J. **ZERO HORA: Boate Kiss desrespeitou normas básicas de segurança**. jan. 2013. Disponível em: <<http://zh.clicrbs.com.br/rs/noticias/noticia/2013/01/boate-kiss-desrespeitou-normas-basicas-de-seguranca-4026580.html#showNoticia=ZUdJe04hazw0MTMwMTQ3NzAxMDY3MTA4MzUyPGVzNzU1NDc4MDkwMDEwMDYyMDQ2Nm59ajIxNTEzODg2NDc4MzQ3Nzk2NDhGU05ITU NVdzVeOipIKVFyVjI=l>>. Acesso em: 29 jun. 2016.

LANDI, F. R. **Ação do incêndio sobre as estruturas de concreto armado**. São Paulo: EPUSP, 1986. Boletim técnico PCC n.01.

LETÍCIA, C. **Um ano depois do incêndio, Mercado Público segue em obras**. Porto alegre: clickRBS, jul. 2015. Disponível em: <<http://zh.clicrbs.com.br/rs/porto-alegre/noticia/2014/07/um-ano-depois-do-incendio-mercado-publico-segue-em-obras-4543603.html>>. Acesso em: 12 nov. 2015.

LIENHARD IV, J. H.; LIENHARD V, J. H. **A Heat Transfer Textbook**. 4th ed. Cambridge, USA: Phlogiston Press, 2015.

LYRA, C.; LUCIO, G. RODRIGUES, L. G1 Santos. **Incêndio provoca explosões em área industrial de Santos, SP**. abr. 2015. Disponível em: <<http://g1.globo.com/sp/santos-regiao/noticia/2015/04/incendio-atinge-industria-no-bairro-alemoa-em-santos-litoral-de-sp.html>>. Acesso em: 12 nov. 2015.

MAZONNI, F. **Simulação computacional de incêndios: aplicação no caso do condomínio Edifício Cacique em Porto Alegre-RS**. 2009. 67 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

NATIONAL BUREAU OF STANDARDS. **Self-ignition temperature of cellulose and magnesium**. Journal of the Franklin Institute, v. 234, n. 5, p. 492–493, 2003.

NEW ZELAND BUILDING CODE. **C/VM2 Verification method**: framework for fire safety design. Wellington, 2014.

QUINTIERE, J. G. **Fundamentals of Fire Phenomena**. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2006.

RIO GRANDE DO SUL. Assembleia Legislativa. Gabinete de Consultoria Legislativa. Lei Complementar n. 14.376, de 26 de dezembro de 2013. Estabelece normas sobre Segurança, Prevenção e Proteção contra Incêndios nas edificações e áreas de risco de incêndio no Estado do Rio Grande do Sul e dá outras providências. Porto Alegre, 2013. Disponível em: <<http://www.al.rs.gov.br/FileRepository/repLegisComp/Lec%20n%C2%BA%2014.376.pdf>>. Acesso em 31 maio 2016.

RUSCHEL, F. **Avaliação da utilização de ferramentas de simulação computacional para reconstituição de incêndios em edificações de concreto armado: aplicação ao caso shopping total em Porto Alegre-RS**. 2011. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

RYDER, N. L.; SUTULA, J.; SCHEMEL, C. F.; HAMER, A. J.; BRUNT, V. V. Consequence modeling using the fire dynamics simulator. **Journal of Hazardous Materials**, v. 115, n. 1-3, p. 149–154, 2004. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304389404003607>>. Acesso em: 13.nov.2015.

SALTER, C. Fire Modelling Within Cloud Based Resources. **Fire Technology**, v. 51, n. 3, p. 491–497, 2015.

SEITO, A. I.; GILL, A. A.; PANNONI, F. D.; ONO, R.; SILVA, S. B.; SILVA, V. P. **A segurança contra incêndio no Brasil**. São Paulo: Projeto Editora, 2008.

SHI, L.; CHEW, M. Y. L. **Experimental study of woods under external heat flux by autoignition: Ignition time and mass loss rate**. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 111, n. 2, p. 1399–1407, 2013.

SOARES, A. M. **Estruturas de aço sem revestimento contra fogo externas a edifícios em incêndio**. 2010. 302 p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

SOUZA, C. A. Folha de São Paulo. **Fogo atinge prédio de 27 andares em Porto Alegre**. Porto Alegre, jun. 1996. Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/fsp/1996/6/27/cotidiano/12.html>>. Acesso em: 12 nov. 2015.

SOUZA, C. A.; GERCHMANN, L. Folha de São Paulo. **Incêndio em creche mata 12 crianças**. Porto Alegre, jun. 2000. Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/fsp/cotidian/ff2106200028.htm>>. Acesso em: 12 nov. 2015.

THE NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY. **Fire Dynamics**. [s.l.], Nov. 2010. Disponível em: <http://www.nist.gov/fire/fire_behavior.cfm>. Acesso em: 13 nov. 2015.

_____. **Fire Dynamics Simulator User's Guide**. 6th ed.[s.l.] Nov. 2015. Disponível em: <<https://drive.google.com/file/d/0B-W-dkXwdHWNawZ5eVJUa3hzcUU/view>>. Acesso em: 13 nov. 2015.

THUNDERHEAD ENGINEERING. **Pyrosim User Manual**. 2015. Disponível em: <<http://www.thunderheadeng.net/pyrosim/docs/PyroSimManual.pdf>>.

TORERO, J. L. Scaling-Up fire. **Proceedings of the Combustion Institute**, v. 34, n. 1, p. 99–124, 2013. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S154074891200394X>>. Acesso em: 8 out. 2015.

VEJA. **A contagem do censo: O Brasil a caminho dos 100 milhões**. São Paulo: Editora Abril. 1970. Edição n. 120.

ZONA DE RISCO. História: **Incêndio no edifício Andraus**. nov. 2014. Disponível em: <<http://zonaderisco.blogspot.com.br/2014/11/historiaincendio-no-edificio-andraus.html>>. Acesso em: 9 nov. 2015.

_____. Lembrança: **Incêndio nas Lojas Renner**. jan. 2015. Disponível em:
<<http://zonaderisco.blogspot.com.br/2015/01/lembranca-incendio-nas-lojas-renner.html>>.
Acesso em: 12 nov. 2015.

APENDICE A

Scripts utilizados para submeter via acesso remoto as simulações no CESUP.

A.1 Simulação 1

```
#!/bin/sh
#PBS -S /bin/sh
#PBS -N SimulacaoEE1
#PBS -l nodes=1
#PBS -j oe
cd $PBS_O_WORKDIR
export LD_LIBRARY_PATH=/home/u/brunetto/FDS/FDS6/bin/LIB64:$LD_LIBRARY_PATH
/home/u/brunetto/FDS/FDS6/bin/fds ModeloFinal.fds
```

A.2 Simulação 2

```
#!/bin/sh
#PBS -S /bin/sh
#PBS -N SimulacaoEE2
#PBS -l nodes=1:cpp=12
#PBS -j oe
cd $PBS_O_WORKDIR
export LD_LIBRARY_PATH=/home/u/brunetto/FDS/FDS6/bin/LIB64:$LD_LIBRARY_PATH
/home/u/brunetto/FDS/FDS6/bin/fds 02.fds
```

A.3 Simulação 4

```
#!/bin/sh
#PBS -S /bin/sh
#PBS -N SimulacaoEE3
#PBS -l nodes=1:cpp=12
#PBS -j oe
cd $PBS_O_WORKDIR
export LD_LIBRARY_PATH=/home/u/brunetto/FDS/FDS6/bin/LIB64:$LD_LIBRARY_PATH
/home/u/brunetto/FDS/FDS6/bin/fds 03.fds
```