

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**ROBERTA TABACZENSKI DE SÁ**

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE INCÊNDIOS EM EDIFICAÇÕES**

**Recife**

**2018**

**ROBERTA TABACZENSKI DE SÁ**

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE INCÊNDIOS EM EDIFICAÇÕES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

**Área de concentração:** Estruturas

**Orientador:** Prof. Dr. Tiago Ancelmo de Carvalho Pires de Oliveira

**Recife**

**2018**

Catálogo na fonte  
Bibliotecária Maria Luiza de Moura Ferreira, CRB-4 / 1469

S111s Sá, Roberta Tabacznski de.  
Simulação numérica de incêndios em edificações / Roberta Tabacznski de Sá. -  
2018.  
177 folhas, il., tabs., abr.

Orientador: Prof. Dr. Tiago Ancelmo de Carvalho Pires de Oliveira.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2018.  
Inclui Referências e Apêndices.

1. Engenharia Civil. 2. Segurança contra incêndios em edificações. 3. Incêndios em  
edificações. 4. Simulação numérica de incêndios. 5. *Fire Dynamics Simulator (FDS)*.  
6. *OZone*. I. Oliveira, Tiago Ancelmo de Carvalho Pires de (Orientador). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2018-60



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**ATA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE**  
**ROBERTA TABACZENSKI DE SÁ**

Ao 1º (primeiro) dia do mês de fevereiro de 2018 (dois mil e dezoito), às 9 (nove) horas, no Auditório do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, reuniu-se a Banca Examinadora para a defesa de Dissertação de Mestrado de **ROBERTA TABACZENSKI DE SÁ**, aluna do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração **ESTRUTURAS**, composta pelos Professores Doutores **TIAGO ANCELMO DE CARVALHO PIRES DE OLIVEIRA**, D. Sc., Orientador e Presidente da Banca Examinadora, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco; **EDNA MOURA PINTO**, D. Sc., Examinadora Externa, Departamento de Arquitetura, Universidade Federal do Rio Grande do Norte; **DAYSE CAVALCANTI DE LEMOS DUARTE**, D. Sc., Examinadora Externa, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco. Como suplentes foram indicados os Professores **ARNALDO MANOEL PEREIRA CARNEIRO**, D. Sc., Suplente Interno, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco; **LILIANE DE ALLAN FONSECA**, D. Sc., Suplente Externa, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco. A Banca Examinadora com os suplentes foi indicada em Reunião do Colegiado do Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil no dia 30 (trinta) de outubro de 2017 (dois mil e dezessete) e aprovada pelo Diretor de Pós-Graduação da Pró-Reitoria para Assuntos de Pesquisa e Pós-Graduação, conforme a Resolução 10/2008, Artigo 42º (quadragésimo segundo) do Conselho Coordenador de Ensino, Pesquisa e Extensão da Universidade Federal de Pernambuco. Cumprindo as formalidades, o Professor **TIAGO ANCELMO DE CARVALHO PIRES DE OLIVEIRA**, Orientador e Presidente da Banca, apresentou a Banca Examinadora e em seguida convidou a mestranda **ROBERTA TABACZENSKI DE SÁ** a discorrer sobre o conteúdo da Dissertação de Mestrado intitulada **“SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE INCÊNDIOS EM EDIFICAÇÕES”**. Concluída a explanação, a mestranda foi arguida pela Banca Examinadora sob a forma de debate. Em seguida, o Professor **TIAGO ANCELMO DE CARVALHO PIRES DE OLIVEIRA** finalizou a arguição solicitando aos presentes que se retirassem do recinto para que a Banca Examinadora se reunisse. Em sessão secreta, a Banca Examinadora deliberou sobre o trabalho e resolveu aprovar a mestranda, concedendo a menção **APROVADA**, conforme a Resolução 10/2008, Artigo 44º (quadragésimo quarto) do Conselho Coordenador de Ensino, Pesquisa e Extensão da Universidade Federal de Pernambuco. Finalizando os trâmites, foi reaberta a sessão e tornada pública a menção. E, para constar, eu, **ANDRÉA NEGROMONTE VIEIRA MATOSO**, Secretária da Pós-Graduação em Engenharia Civil, lavrei a presente **ATA** que vai assinada pelo mestrando e pela Banca Examinadora. Recife, 01 (um) de fevereiro de 2018 (dois mil e dezoito).

TIAGO ANCELMO DE CARVALHO PIRES DE OLIVEIRA

EDNA MOURA PINTO

DAYSE CAVALCANTI DE LEMOS DUARTE

ROBERTA TABACZENSKI DE SÁ

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pelo dom da vida e todas as bênçãos concedidas.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo fomento desta pesquisa.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), em especial ao professor Tiago Ancelmo de Carvalho Pires de Oliveira pelo apoio e orientação que proporcionaram o desenvolvimento da pesquisa aqui apresentada.

Ao meu companheiro Victor Roberto Santos Claudy pelo suporte e compreensão nas horas mais difíceis.

Aos meus amigos Marina Machado Leal dos Santos, Ruth Barros, Paulo Fernando Silva Sousa, e Iago de Albuquerque Borges que me acompanharam durante os dois anos de mestrado dando suporte e auxílio sempre que necessário.

Ao Corpo de Bombeiros Militar do Estado de Pernambuco (CBMPE) da cidade de Recife, em especial ao Major Cristiano Corrêa, e ao Tenente Coronel George Cajaty Barbosa Braga do Corpo de Bombeiros Militar do Distrito Federal (CBMDF) pelos esforços direcionados no desenvolvimento do estudo experimental aqui apresentado.

A todos, meu sincero agradecimento!

## RESUMO

Estudos do comportamento de incêndios em edificações são de suma importância para auxiliar pesquisadores na compreensão deste fenômeno. Com esses estudos é possível, dentre outros, estimar temperaturas e prever a movimentação de fumaça em edificações incendiadas antes mesmo da ocorrência do sinistro, auxiliando no desenvolvimento de estratégias que visam a proteção à vida de seus ocupantes e ao patrimônio. Neste trabalho é apresentado os resultados da pesquisa que aborda a utilização de *softwares* de simulação de incêndios como ferramentas auxiliares no estudo do comportamento de incêndios em edificações. É explorado o uso dos *softwares* OZone e *Fire Dynamics Simulator* (FDS). O objetivo principal do estudo é avaliar a eficácia da utilização destes *softwares* para simular incêndios em edificações, bem como aprimorar o conhecimento sobre o uso dessas ferramentas. Para isso, foi realizado um levantamento bibliográfico das pesquisas realizadas no Brasil e no mundo que utilizaram algum *software* de simulação de incêndios em edificações como ferramenta auxiliar, constatando que o FDS é um dos mais utilizado para esta finalidade, assim, este se tornou a principal ferramenta computacional analisada neste trabalho. A escolha do OZone como uma das ferramentas analisadas se deu pelo fato deste ser um dos *softwares* mais simples e de fácil utilização disponíveis. Com base em um estudo experimental e numérico de incêndio encontrado na literatura, um modelo computacional foi desenvolvido no FDS e reproduzido no OZone. Partindo do pressuposto que as simulações realizadas foram validadas, um segundo estudo de caso foi desenvolvido com o objetivo de reproduzir um incêndio realizado experimentalmente em um cômodo representativo de um dormitório pertencente a edificações tipicamente incendiadas na cidade de Recife / PE. Na análise dos resultados obtidos constatou-se que ambos os *softwares*, quando calibrados adequadamente, tiveram concordância com os resultados experimentais, apresentando previsões confiáveis de desenvolvimento de temperaturas e comportamento dos incêndios.

**Palavras-chave:** Segurança contra incêndios em edificações. Incêndios em edificações. Simulação numérica de incêndios. *Fire Dynamics Simulator* (FDS). OZone.

## ABSTRACT

Studies of fire behavior in buildings are important to assist researchers to understand this phenomenon. With these studies, it is possible, among others, to estimate temperatures and predict the movement of smoke in burned buildings before the occurrence of the incident, helping in the development of strategies to protect the life of its occupants and the patrimony. This work presents the results of the research that addresses the use of fire simulation software as auxiliary tools in the study of fire behavior in buildings. The use of OZone and Fire Dynamics Simulator (FDS) software is explored. The main objective of the study is to evaluate the effectiveness of the use of these software to simulate fires in buildings, as to improve the knowledge about the use of these tools. For this, a bibliographic survey was carried out of Brazilian and international researches that used some fire simulation software in buildings as an auxiliary tool, noting that the FDS is one of the most used for this purpose, thus, this became the main computational tool analyzed in this work. The choice of OZone as one of the tools analyzed was due to the fact that it is one of the simplest and most user-friendly software available. Based on an experimental and numerical study of fire found in literature, a computational model was developed in the FDS and reproduced in OZone. Based on the assumption that the simulations carried out were validated, a second case study was developed with the objective of reproducing a fire performed experimentally in a room that represents a dormitory on typically burnt buildings in the city of Recife / PE. In the analysis of the obtained results it was verified that both softwares, when properly calibrated, had agreement with the experimental results, presenting reliable predictions of development of temperatures and fire behavior.

**Keywords:** Fire safety in buildings. Fires in buildings. Computational simulation of fires. Fire Dynamics Simulator (FDS). OZone.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Ocorrência de Incêndios no mundo no ano de 2010.....	17
Figura 2 – Ocorrências de incêndios em edificações (exceto residenciais), nos estados de SP, PE, BA e CE nos anos de 2012 a 2015.....	19
Figura 3 – Ocorrências de incêndios no estado de PE, anos de 2011 a 2013, por ano e por tipo de incêndio.....	20
Figura 4 – Modelo de zonas .....	24
Figura 5 – Interface inicial do <i>software</i> OZone (versão 2.2.6).....	26
Figura 6 – Interface para definição do compartimento no <i>software</i> OZone (versão 2.2.6).....	27
Figura 7 – Interface para definição da espessura e propriedades térmicas dos materiais constituintes das camadas das paredes, teto e piso, e aberturas do compartimento no <i>software</i> OZone (versão 2.2.6).....	28
Figura 8 – Interface para definição do incêndio no <i>software</i> OZone (versão 2.2.6).....	29
Figura 9 – Interface para obtenção dos resultados gerados por uma simulação no <i>software</i> OZone (versão 2.2.6).....	30
Figura 10 – Domínio de um modelo CFD.....	31
Figura 11 – Exemplo simples de entrada de dados de um modelo no FDS .....	32
Figura 12 – Processamento de um modelo no FDS.....	33
Figura 13 – Exemplo de visualização gráfica no SMV: (a) movimento de fumaça e liberação de calor; (b) temperaturas ao longo de um plano .....	33
Figura 14 – Objeto de estudo de Byström <i>et al.</i> (2012): (a) edificação real; (b) modelo desenvolvido no FDS .....	34
Figura 15 – Resultados experimental e numérico do desenvolvimento de temperaturas durante o incêndio na edificação analisada por Byström <i>et al.</i> (2012): (a) a 2,0 m do piso; (b) próximo ao teto.....	35
Figura 16 – Objeto de estudo de Honma <i>et al.</i> (2013): (a) compartimento real; (b) modelo desenvolvido no FDS .....	37
Figura 17 – Resultados obtidos no estudo de Honma <i>et al.</i> (2013): (a) momento de máxima propagação do fogo na Simulação 1; (b) fotografia de dano do fogo no Experimento 1.....	38
Figura 18 – Resultados obtidos no estudo de Honma <i>et al.</i> (2013): (a) queimado na área do teto na Simulação 3; (b) fotografia de dano do fogo nos painéis do teto no Experimento 3....	38
Figura 19 – Início de um dos ensaios de incêndio em dormitório realizado por Yuen <i>et al.</i> (2014): (a) cenário real; (b) modelo desenvolvido no FDS.....	39
Figura 20 – Resultados de temperatura dos gases obtidos no estudo de Yuen <i>et al.</i> (2013): (a) a 2,3 m de altura do piso; (b) a 1,7 m de altura do piso; (c) a 1,2 m do piso .....	40
Figura 21 – Objeto de estudo de Weinschenk <i>et al.</i> (2014): (a) edificação real; (b) modelo desenvolvido no FDS .....	41
Figura 22 – Resultados da simulação de Weinschenk <i>et al.</i> (2014): (a) combustão ocorrendo na janela, local rico em oxigênio; (b) condições de pressão calculados no interior da estrutura instantes antes da porta interior falhar; (c) vetores de velocidade do ar, 15 s após falha da porta interior .....	42

Figura 23 – Resultados de temperaturas desenvolvidas na simulação de Weinschenk <i>et al.</i> (2014): (a) 1 s antes da falha da porta interior; (b) 15 s após falha da porta interior .....	42
Figura 24 – Objeto de estudo de Teixeira <i>et al.</i> (2012): (a) <i>container</i> ; (b) dimensões internas do <i>container</i> .....	44
Figura 25 – Resultados de temperaturas máximas obtidas no estudo de Teixeira <i>et al.</i> (2012): (a) ensaios experimentais vs OZone; (b) ensaios experimentais vs CFAST .....	45
Figura 26 – Objeto de estudo de Rodrigues (2009): (a) modelo experimental em escala reduzida; (b) modelo desenvolvido no FDS .....	48
Figura 27 – Objeto de estudo de Ruschel (2011): (a) edificação real, antes do sinistro; (b) modelo desenvolvido no FDS.....	49
Figura 28 – Objeto de estudo de Mazzoni (2015): (a) edificação real antes do incêndio, (2) desenvolvimento inicial do incêndio na simulação no FDS.....	51
Figura 29 – Objeto de estudo de Brunetto (2015), modelo desenvolvido no PyroSim / FDS .	52
Figura 30 – Objeto de estudo de Centeno <i>et al.</i> (2015).....	54
Figura 31 – Resultados obtidos por Centeno <i>et al.</i> (2015): (a) FDS (malha refinada) vs ensaio experimental; (b) FDS nas malhas refinada, média e grosseira .....	55
Figura 32 – Compartimentação seletiva proposta por Cunha (2016): (a) vista superior; (b) corte longitudinal.....	57
Figura 33 – Alguns cenários analisados por Cunha (2016), simulação aos 180 s: (a) caso-base; (b) caso-base com uma divisória transversal central; (c) caso com Altura da abertura na divisória = 0,25 m e largura do vão na laje = 0,25 m; (d) caso com Altura da abertura na divisória = 1,00 m e largura do vão na laje = 1,00 m.....	58
Figura 34 – Perfil de temperaturas obtido através do FDS em um dos cenários analisados no estudo de Kiryu (2017).....	59
Figura 35 – Campo vetorial de velocidade dos gases obtidos através do <i>software</i> FDS no estudo de Matos (2017) .....	60
Figura 36 – Compartimento modelado no FDS e medidores de temperatura aplicados na simulação.....	75
Figura 37 – HRR registrada nas simulações realizadas no FDS e no OZone .....	78
Figura 38 – Incêndio plenamente desenvolvido, simulação no FDS aos 30 minutos: (a) Situação 1 (vista externa); (b) Situação 2 (vista externa); (c) Situação 1 (vista interna); (d) Situação 2 (vista interna) .....	80
Figura 39 – Incêndio em plenamente desenvolvido, simulação no FDS aos 30 minutos: (a) ensaio experimental de Teixeira <i>et al.</i> (2012); (b) Situação 2.....	80
Figura 40 – Evolução das temperaturas nos gases, obtidas através da simulação no FDS da Situação 1 (termopar A6) vs Experimental (termopar A6).....	81
Figura 41 – Instantes finais do consumo da madeira na simulação no FDS da Situação 1: (a) aos 60 minutos; (b) aos 72 minutos .....	82
Figura 42 – Evolução das temperaturas máximas nos gases, obtidas através das simulações no OZone (zona quente) e no FDS da Situação 2 (termopar A6) vs Experimental (termopar A6) .....	83

Figura 43 – Evolução das temperaturas dos gases na camada superior do compartimento obtidas através das simulações no OZone (zona quente) e no FDS da Situação 2 (termopar Ten8) vs Experimental (termopar Ten8) .....	84
Figura 44 – Evolução das temperaturas dos gases registradas próximo a parede do compartimento obtidas através da simulação no FDS da Situação 2 (termopar Pen8) vs Experimental (termopar Pen8).....	85
Figura 45 – Evolução das temperaturas dos gases registradas através de um plano de medição e visualizado no SMV (obtidas na simulação no FDS da Situação 2) .....	87
Figura 46 – Convecção dos gases registrada através de um plano de medição e visualizado no SMV (simulação no FDS da Situação 2).....	88
Figura 47 – Oficina de treinamento de combate a incêndio do centro de ensino e instrução do Corpo de Bombeiros Militar de Pernambuco (CBMPE).....	91
Figura 48 – Dormitório antes do ensaio experimental .....	92
Figura 49 – Início do ensaio experimental do dormitório: (a) ignição; (b) instantes iniciais do ensaio .....	94
Figura 50 – Distribuição dos termopares no dormitório.....	94
Figura 51 – Croqui esquemático o pavimento térreo da edificação onde ocorreu o ensaio experimental do dormitório .....	97
Figura 52 – Incidência do vento na edificação onde ocorreu o ensaio experimental do dormitório.....	98
Figura 53 – Modelo desenvolvido para simulação do inêndio no FDS do ensaio experimental do dormitório.....	102
Figura 54 – Concentração de oxigênio no dormitório: FDS vs OZone.....	104
Figura 55 – Propagação do fogo no dormitório, obtida através da simulação computacional realizada no FDS .....	105
Figura 56 – Propagação da fumaça no dormitório: FDS vs Experimental .....	106
Figura 57 – Altura da camada livre de fumaça: FDS vs OZone.....	107
Figura 58 – Temperaturas dos gases na camada superior do dormitório: Experimental (termopar 08, h = 2,4 m), FDS (h = 2,3 m), OZone (zona quente) .....	108
Figura 59 – Temperaturas dos gases na camada intermediária do dormitório (termopar 04, h = 1,20 m): Experimental vs FDS .....	109
Figura 60 – Temperaturas dos gases na camada inferior do dormitório (termopar 01, h = 30 cm): Experimental vs FDS.....	110
Figura 61 – Temperaturas dos gases obtidas através dos termopares de 01 a 08 na simulação realizada no FDS .....	110
Figura 62 – Perfis de temperaturas no centro do dormitório (termopares 01 ao 08).....	111
Figura 63 – Evolução das temperaturas dos gases registradas através de um plano de medição e visualizado no SMV .....	112
Figura 64 – Convecção dos gases registrada através de um plano de medição e visualizado no SMV .....	113
Figura 65 – Temperaturas aferidas nos gases próximos à parede P3: (a) face interna, exposta ao incêndio (termopar 09); (b) face externa, não exposta ao incêndio (termopar 10).....	113

Figura 66 – Temperaturas aferidas nos gases próximos à parede P2: (a) face interna, exposta ao incêndio (termopar 11); (b) face externa, não exposta ao incêndio (termopar 12)..... 114

Figura 67 – Temperaturas aferidas nos gases próximos à parede P1: (a) face interna, exposta ao incêndio (termopar 13); (b) face externa, não exposta ao incêndio (termopar 14)..... 114

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo dos estudos encontrados na literatura brasileira .....	62
Tabela 2 – Resumo das principais características e comparação entre os <i>softwares</i> OZone e FDS.....	67
Tabela 3 – Propriedades térmicas dos materiais empregados no modelo computacional.....	70
Tabela 4 – Superfícies das obstruções presentes no modelo computacional .....	72
Tabela 5 – Parâmetros adotados na simulação do estudo de caso 1 realizada no <i>software</i> OZone .....	77
Tabela 6 – Móveis e objetos que compuseram a carga de incêndio presente no dormitório incendiado.....	93
Tabela 7 – Propriedades térmicas dos materiais incombustíveis utilizados nas simulações computacionais do dormitório .....	99
Tabela 8 – Espessura e materiais das camadas das paredes, teto, piso presentes na edificação .....	100
Tabela 9 – Parâmetros adotados na simulação do estudo de caso 2 realizada no <i>software</i> OZone .....	102

## LISTA DE ABREVIATURAS

<b>ABNT</b>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<b>BA</b>	Bahia (Unidade Federativa)
<b>CAPES</b>	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
<b>CBMDF</b>	Corpo de Bombeiros Militar do Distrito Federal
<b>CBMPE</b>	Corpo de Bombeiros Militar do Estado de Pernambuco
<b>CE</b>	Ceará (Unidade Federativa)
<b>CFD</b>	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
<b>EUA</b>	Estados Unidos da América
<b>FDS</b>	<i>Fire Dynamics Simulator (software)</i>
<b>HRR</b>	<i>Heat Release Rate</i> (taxa de liberação de calor)
<b>HRRPUA</b>	<i>Heat Release Rate Per Unit Area</i> (taxa de liberação de calor por unidade de área)
<b>IN</b>	Instrução Normativa
<b>INMET</b>	Instituto Nacional de Meteorologia
<b>ISB</b>	Instituto Sprinkler Brasil
<b>ISO</b>	<i>International Organization for Standardization</i>
<b>NIST</b>	<i>National Institute of Standards and Technology</i> / EUA
<b>NP</b>	Norma Portuguesa
<b>PE</b>	Pernambuco (Unidade Federativa)
<b>PPGEC</b>	Pós-Graduação em Engenharia Civil
<b>RJ</b>	Rio de Janeiro (Unidade Federativa)
<b>RS</b>	Rio Grande do Sul (Unidade Federativa)
<b>SCIE</b>	Segurança Contra Incêndio em Edificações
<b>SI</b>	Situação de Incêndio
<b>SMV</b>	<i>Smokeview (software)</i>
<b>SP</b>	São Paulo (Unidade Federativa)
<b>UFPE</b>	Universidade Federal de Pernambuco

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
1.1	JUSTIFICATIVA .....	16
1.2	OBJETIVOS .....	20
<b>1.2.1</b>	<b>Objetivo geral.....</b>	<b>20</b>
<b>1.2.2</b>	<b>Objetivos específicos.....</b>	<b>20</b>
1.3	ESCOPO .....	21
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>23</b>
2.1	SOFTWARES PARA SIMULAÇÃO DE INCÊNDIOS .....	23
<b>2.1.1</b>	<b>Modelos de zonas .....</b>	<b>23</b>
2.1.1.1	<i>OZone .....</i>	25
<b>2.1.2</b>	<b>Modelos de fluidodinâmica computacional (CFD) .....</b>	<b>30</b>
2.1.2.1	<i>Fire Dynamics Simulator (FDS).....</i>	31
2.2	ESTADO DA ARTE .....	34
<b>2.2.1</b>	<b>Trabalhos internacionais.....</b>	<b>34</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Trabalhos nacionais.....</b>	<b>45</b>
2.3	RESUMO DO CAPÍTULO .....	63
<b>3</b>	<b>ESTUDO DE CASO 01 .....</b>	<b>68</b>
3.1	MODELO DESENVOLVIDO NO <i>SOFTWARE</i> FDS .....	68
<b>3.1.1</b>	<b>Domínio computacional e malha .....</b>	<b>68</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Condições ambientais iniciais .....</b>	<b>69</b>
<b>3.1.3</b>	<b>Propriedades térmicas e de combustão dos materiais.....</b>	<b>69</b>
<b>3.1.4</b>	<b>Gás combustível .....</b>	<b>72</b>
<b>3.1.5</b>	<b>Ignição do incêndio.....</b>	<b>73</b>
<b>3.1.6</b>	<b>Geometria .....</b>	<b>73</b>
<b>3.1.7</b>	<b>Aberturas.....</b>	<b>73</b>
<b>3.1.8</b>	<b>Outputs .....</b>	<b>74</b>
<b>3.1.9</b>	<b>Modelo desenvolvido .....</b>	<b>74</b>
<b>3.1.10</b>	<b>Situações propostas.....</b>	<b>76</b>
3.2	MODELO DESENVOLVIDO NO <i>SOFTWARE</i> OZONE.....	76
3.3	RESULTADOS .....	77
<b>3.3.1</b>	<b>Tempo de processamento .....</b>	<b>77</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Taxa de liberação de calor (HRR).....</b>	<b>78</b>
<b>3.3.3</b>	<b>Propagação do incêndio .....</b>	<b>79</b>
<b>3.3.4</b>	<b>Temperatura dos gases.....</b>	<b>81</b>
3.4	RESUMO DO CAPÍTULO .....	88

<b>4</b>	<b>ESTUDO DE CASO 02</b> .....	<b>91</b>
4.1	ESTUDO EXPERIMENTAL .....	91
4.2	MODELO DESENVOLVIDO NO <i>SOFTWARE</i> FDS .....	95
<b>4.2.1</b>	<b>Domínio computacional e malha</b> .....	<b>96</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Condições ambientais iniciais</b> .....	<b>97</b>
<b>4.2.3</b>	<b>Propriedades térmicas e de combustão dos materiais</b> .....	<b>99</b>
<b>4.2.4</b>	<b>Gás combustível</b> .....	<b>100</b>
<b>4.2.5</b>	<b>Ignição do incêndio</b> .....	<b>100</b>
<b>4.2.6</b>	<b>Geometria</b> .....	<b>101</b>
<b>4.2.7</b>	<b>Aberturas</b> .....	<b>101</b>
<b>4.2.8</b>	<b>Outputs</b> .....	<b>101</b>
<b>4.2.9</b>	<b>Modelo desenvolvido</b> .....	<b>101</b>
4.3	MODELO DESENVOLVIDO NO <i>SOFTWARE</i> OZONE .....	102
4.4	RESULTADOS .....	103
<b>4.4.1</b>	<b>Concentração de oxigênio e propagação do incêndio</b> .....	<b>103</b>
<b>4.4.2</b>	<b>Altura da camada livre de fumaça</b> .....	<b>105</b>
<b>4.4.3</b>	<b>Temperaturas</b> .....	<b>107</b>
4.5	RESUMO DO CAPÍTULO .....	115
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>117</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>120</b>
	<b>APÊNDICE A</b> .....	<b>126</b>
	<b>APÊNDICE B</b> .....	<b>132</b>
	<b>APÊNDICE C</b> .....	<b>141</b>
	<b>APÊNDICE D</b> .....	<b>144</b>
	<b>APÊNDICE E</b> .....	<b>147</b>
	<b>APÊNDICE F</b> .....	<b>151</b>
	<b>APÊNDICE G</b> .....	<b>157</b>
	<b>APÊNDICE H</b> .....	<b>165</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A Segurança Contra Incêndio em Edificações (SCIE) é vista no mundo como uma ciência e vem recebendo cada vez mais incentivos e investimentos em suas diversas áreas de pesquisa. Inúmeras instituições e laboratórios internacionais se dedicam à análise e testes de materiais, componentes estruturais, sistemas construtivos, equipamentos e utensílios usados nas edificações do ponto de vista da SCIE (DEL CARLO, 2008a).

Atualmente, observa-se que a grande maioria dos estudos desenvolvidos na área de SCIE no Brasil são voltados para a análise do comportamento de elementos estruturais e construtivos submetidos a altas temperaturas isoladamente. Nestes estudos, a representação do incêndio é feita através de curvas padronizadas internacionalmente. Resumidamente, estas são representadas por uma curva logarítmica ascendente de temperatura que aumenta em relação ao tempo, como a curva de incêndio-padrão apresentada na ISO 834-1 (1999).

Apesar de ser largamente usada em ensaios de elementos estruturais e construtivos para avaliar a sua resistência a fogo, a curva de incêndio-padrão não representa o desenvolvimento de incêndios reais, visto que, o comportamento destes depende de inúmeras variáveis, tais como, quantidade e posicionamento de aberturas, distribuição da carga de incêndio no ambiente, tipo de materiais combustíveis e incombustíveis presente no ambiente, utilização de exaustores e dispositivos de detecção e combate a incêndio, dentre muitos outros fatores que tornam cada incêndio único, com características próprias (COSTA & SILVA, 2006).

Ademais, em incêndios reais, além do desenvolvimento de altas temperaturas há também liberação de fumaça e gases tóxicos que se tornam determinantes para a sobrevivência humana, pois, em caso de incêndios, são estas as maiores causas imediatas de mortes (CUNHA & MARTINELLI Jr., 2008).

Sendo assim, é evidente a necessidade de uma análise mais profunda deste fenômeno tão complexo que é o incêndio. O estudo do comportamento de incêndios em edificações é uma vertente da SCIE de suma importância que pode ainda dar origem a outras pesquisas, das quais se pode citar: avaliação da propagação do incêndio em edificações; avaliação do comportamento do incêndio quando sujeito ação do corpo de bombeiros; avaliação do comportamento do incêndio quando sujeito ação de *sprinklers*; avaliação da eficiência da utilização de sistemas construtivos que visam à contenção de incêndios (portas corta-fogo, marquises, compartimentação, etc.); determinação de rotas de fuga; determinação de *layouts* mais eficientes na contenção de incêndios; determinação da dimensão e/ou localização de aberturas (portas, janelas, fosso de elevador, escadarias, etc.); reconstituição de incêndios e

avaliação de edificações sinistradas; averiguação de hipóteses de origem e possíveis causas de incêndios em edificações; estimação do tempo facultado para evacuação de edificações; estimação de curvas de temperaturas de incêndios reais; estimação da altura da camada de fumaça; dentre outros.

Entretanto, o alto custo dos equipamentos e das instalações necessárias para a realização de experimentos que envolvam edificações completas em escala real torna esse tipo de pesquisa escassa no mundo e praticamente inexistente no Brasil (RUSCHEL, 2011; CUNHA, 2016).

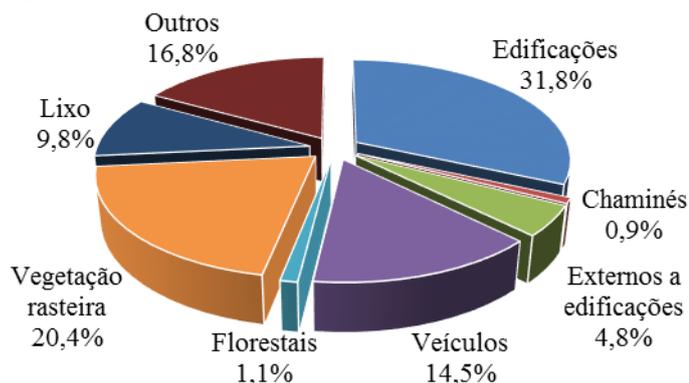
Como solução a estes impasses, a simulação computacional é uma ferramenta que vem sendo cada vez mais utilizada para a avaliação de edificações completas em escala real em situação de incêndio, uma vez que possibilita a realização de análises de múltiplas alternativas, sem os riscos e os custos advindos de ensaios com modelos reais. Assim, se ajustadas adequadamente, essas simulações podem auxiliar na compreensão do comportamento do incêndio, tanto em aspectos estruturais servindo de suporte a análise das estruturas em Situação de Incêndio (SI), como também na definição de geometria dos ambientes, distribuição de aberturas, e materiais utilizados na construção, favorecendo a criação, revisão e aperfeiçoamento de projetos e normas técnicas de SCIE (RUSCHEL, 2011; CUNHA, 2016).

No entanto, no Brasil, a utilização de *softwares* para este fim ainda é pouco difundida entre os pesquisadores, fato que acarreta em uma escassa disponibilidade de literatura para auxiliar a utilização dos mesmos.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Incêndios são eventos trágicos que ocorrem com frequência no Brasil e no mundo, possuindo um grande potencial destrutivo de patrimônio e de vidas. Como mostrado na Figura 1, estima-se que cerca de um terço de todas as ocorrências de incêndio registradas no mundo ocorrem em edificações (comerciais, de prestação de serviço, industriais ou residenciais) (CORRÊA *et al.*, 2015).

Figura 1 – Ocorrência de Incêndios no mundo no ano de 2010



Fonte: Adaptado de IAFRS/CTIF (2012 apud Corrêa *et al.*, 2015)

No Brasil, esses números não são claramente medidos, mostrando que há uma necessidade de realização de mais pesquisas quanto quantificação dos casos de incêndio, o que traz uma série de consequências negativas para as pesquisas de SCIE no país, dentre elas a restrição de discussões e a elaboração de políticas públicas para enfrentamento do problema, escassez de investimentos financeiros e, conseqüentemente, falta de sensibilização das pessoas para com o assunto.

Além disso, há uma carência de literatura em língua portuguesa especializada na área de SCIE, e isso provavelmente se dá principalmente porque ainda não existe uma formação acadêmica formalizada para essa área no país. De maneira geral, o avanço científico-tecnológico fica a cargo do acontecimento de grandes desastres com vítimas fatais que causam comoção na sociedade, estimulando o desenvolvimento de normas, leis e pesquisas que visam a SCIE.

A exemplo disso, após a ocorrência dos incêndios nos Edifícios Andraus no ano de 1972 (16 vítimas fatais e mais de 330 feridos) e Joelma no ano de 1974 (191 vítimas fatais e mais de 300 feridas), ambos na cidade de São Paulo/SP, diversas manifestações do meio técnico-científico foram realizadas e culminaram no desenvolvimento das primeiras normas de segurança contra incêndios e pânico em edificações no país (GILL *et al.*, 2008).

Desde então, o desenvolvimento de normas, leis e pesquisas que visam a SCIE avançam a passos lentos e são impulsionadas com a ocorrência de novos desastres que chocam o país, como foi o exemplo da Boate Kiss no ano de 2013 (242 vítimas fatais e mais de 680 feridos), na cidade de Santa Maria/RS, que intensificou diversas discussões acerca do assunto.

Em 14 de outubro de 2015 foi lançada, no Congresso Nacional, em Brasília, a Frente Parlamentar Mista de Segurança Contra Incêndio, cujo principal objetivo é:

[...] ampliar o debate sobre a problemática de incêndios em todo o território nacional e elaborar políticas públicas que ampliem a prevenção e o combate a

incêndios, reduzindo o número de vítimas, além de prevenir a ocorrência de novas tragédias e evitar perdas para o meio ambiente e para o patrimônio cultural e privado (BRASIL, 2015).

Em 30 de março de 2017, foi criada a Lei nº 13.425, que estabelece diretrizes gerais sobre medidas de prevenção e combate a incêndio e a desastres em estabelecimentos, edificações e áreas de reunião de público. Neste documento, dentre outros, é estabelecido que todos os cursos de graduação em Engenharia e Arquitetura em funcionamento no país, em universidades e organizações de ensino públicas e privadas, bem como os cursos de tecnologia e de ensino médio, devem incluir em suas disciplinas ministradas conteúdos relativos à prevenção e ao combate a incêndio e a desastres (BRASIL, 2017).

Sobre a quantificação e caracterização de incêndios ocorridos no Brasil, algumas pesquisas são realizadas extraoficialmente para mostrar a dimensão do problema a ser enfrentado. A partir do ano de 2012 o Instituto Sprinkler Brasil (ISB) começou a monitorar diariamente as notícias sobre incêndios em edificações (exceto residenciais) no país. Neste monitoramento o instituto obtém dados estatísticos de incêndios que ocorrem em diversas edificações (exceto residenciais) que poderiam ter sido evitados e/ou atenuados com o uso de *sprinklers* ou de outros mecanismos de proteção ativa ou passiva.

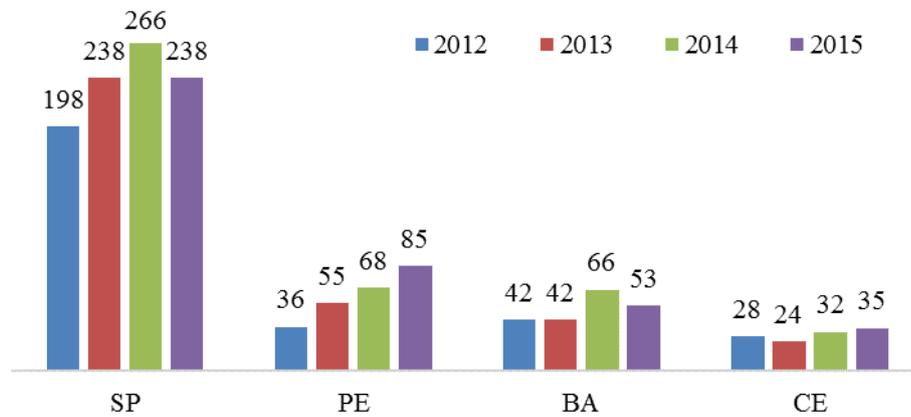
De acordo com ISB (s.d.), no ano de 2015, foram contabilizadas 1.349 ocorrências de incêndio no Brasil, em estabelecimentos comerciais (lojas, shopping centers, supermercados, 373 casos, 27,7 % do total), indústrias (225 casos, 16,7 % do total), depósitos (194 casos, 14,4 % do total), local de reunião de público (igreja, teatro, aeroporto, clube, estádio, escola de samba, casa noturna, restaurante, biblioteca, 172 casos, 12,8 % do total), e em outras categorias, como educacional e cultura física (escola e universidade), serviço profissional (agência bancária e prédio comercial), serviço de saúde e institucional (hospital, posto de saúde e clínica), prédio e empresa pública, e serviço de hospedagem.

Desses dados, a exemplo dos anos anteriores, São Paulo (SP) foi o estado que registrou o maior número de ocorrências de incêndio (17,6% dos casos noticiados), fato que se justifica por este ser o estado mais populoso do Brasil, visto que, como exposto por Del Carlo (2008b), de maneira geral em regiões mais densamente povoadas as ocorrências de incêndios são maiores.

Dentre os estados da região nordeste do país, Pernambuco (PE) é o que registrou o maior número de ocorrência (6,3 % dos casos noticiados). A Figura 2 mostra o monitoramento desses incêndios, no estado de SP, que apresentou o maior número de ocorrências, e em PE, Bahia

(BA) e Ceará (CE), estados nordestinos que apresentaram os maiores números de ocorrências, nos anos de 2012 a 2015.

Figura 2 – Ocorrências de incêndios em edificações (exceto residenciais), nos estados de SP, PE, BA e CE nos anos de 2012 a 2015

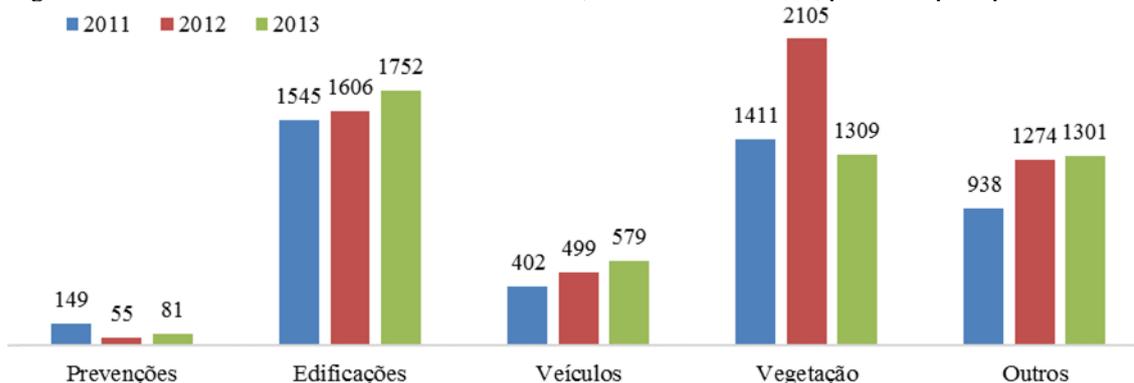


Fonte: Adaptado de ISB (s.d.)

Destaca-se que o estado de PE apresentou um aumento no número de ocorrências noticiadas em todos os anos monitorados pelo ISB. Ainda assim, apesar desses dados serem expressivos, segundo o ISB (s.d.), estima-se que os números apurados representem menos que 3% da quantidade real de ocorrências, visto que há um grande número de incêndios que não são relatados, então, certamente esses valores são maiores. Além disso, ressalta-se que o monitoramento realizado pelo ISB não abrange as ocorrências em edificações residenciais.

Segundo o estudo realizado por Corrêa *et al.* (2015), foram registradas 4.903 ocorrências de incêndios em edificações no estado de PE nos anos de 2011 a 2013. Este número corresponde a 32,67% do total de ocorrências no período analisado (15.006 incêndios), estatística compatível com a mundial (Figura 1). Como pode-se observar na Figura 3, o número de incêndios em edificações (comerciais, de prestação de serviço, industriais ou residenciais) no estado apresentou um crescimento progressivo, estando sempre acima de 1,5 mil ocorrências anuais (valor bem acima do estipulado pelo ISB).

Figura 3 – Ocorrências de incêndios no estado de PE, anos de 2011 a 2013, por ano e por tipo de incêndio



Fonte: Adaptado de Corrêa *et al.* (2015)

Na cidade de Recife, capital do estado de PE, apenas no ano de 2011 foram registradas 946 ocorrências de incêndios, dentre as quais, 32,77% (310 ocorrências) foram em edificações. Deste último número, 65,16% (202 ocorrências) correspondeu a edificações residenciais, sendo que, a grande maioria destes eventos, 73,27% (148 ocorrências), ocorreu em residências unifamiliares (CORRÊA *et al.*, 2015).

A exposição destes dados, mostra que a problemática sobre incêndios existe e cresce a cada ano no Brasil, no estado de PE e na cidade de Recife. Segundo Corrêa *et al.* (2015), os números sobre incêndios em edificações residenciais unifamiliares são preocupantes, visto que, no país, esse tipo de edificação não possui orientações normativas sobre segurança contra incêndios, mostrando a necessidade de investimento em pesquisas nesta área de conhecimento.

Ressalta-se que estudos do comportamento de incêndios ainda são novos no Brasil, existindo poucas pesquisas experimentais e numéricas acerca do assunto. É imprescindível que as pesquisas e criações de leis e normas regulamentadoras sejam realizadas de maneira continuada, antes da ocorrência de novos desastres, para que sejam evitados e/ou minimizados os danos ao patrimônio e, sobretudo, a ocorrência de mortes em tais fatalidades.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

Avaliar a eficácia da utilização de *softwares* para simulação de incêndios como ferramenta auxiliar em estudos de SCIE.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste estudo visam, entre outros:

- Relacionar alguns dos principais *softwares* para simulação de incêndio disponíveis atualmente;
- Desenvolver um modelo computacional que represente adequadamente o comportamento de incêndios em edificações através do *software Fire Dynamics Simulator* (FDS);
- Avaliar a eficácia e limitações da utilização dos *softwares* FDS e OZone para simulação de incêndios em edificações;
- Aprimorar o conhecimento sobre o uso dessas ferramentas e introduzi-las no grupo de pesquisa de segurança contra incêndios da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).
- Estimular a aplicação de ferramentas computacionais no desenvolvimento de pesquisas acadêmicas a nível graduação e pós-graduação na área de segurança contra incêndios no Brasil.

### 1.3 ESCOPO

Esta dissertação é composta de 5 capítulos, cujos conteúdos são:

No primeiro capítulo, é apresentado um apanhado geral sobre a SCIE e simulação computacional de incêndios em edificações no Brasil, bem como a justificativa da necessidade de pesquisas referentes a esses temas, e objetivos geral e específicos deste trabalho.

No segundo capítulo, é apresentada uma revisão de literatura dos *softwares* de simulação de incêndio e dos estudos realizados com o auxílio dessas ferramentas computacionais. Ao final do capítulo são expostos os pontos mais relevantes encontrados nessa revisão.

No terceiro capítulo, é apresentado o estudo de caso 01, com o desenvolvimento de um modelo computacional de simulação de incêndio nos *softwares* FDS e OZone, baseado em um estudo experimental encontrado na literatura. Ao final do capítulo são expostos os pontos mais relevantes constatados com o desenvolvimento deste modelo.

No quarto capítulo, é apresentado o estudo de caso 02, com a simulação computacional de incêndio em um dormitório pertencente a edificações tipicamente incendiadas na cidade de Recife / PE, através dos *softwares* FDS e OZone. Ao final do capítulo são expostos os pontos mais relevantes constatados com realização destas simulações.

No quinto capítulo, são apresentadas as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

Complementarmente, ao final do trabalho são apresentados alguns Apêndices com os arquivos de entrada de dados dos modelos desenvolvidos nos *softwares* FDS e OZone, bem como alguns resultados das simulações realizadas.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentados os modelos de zonas e o modelo de fluidodinâmica computacional (em inglês *Computational Fluid Dynamics*, CFD), nos quais são baseados alguns dos *softwares* de simulação de incêndios disponíveis atualmente, bem como um breve resumo sobre os *softwares* FDS e OZone.

Serão apresentados também alguns estudos, nacionais e internacionais, que utilizaram o FDS como ferramentas para desenvolvimento de pesquisas voltadas para SCIE, e um estudo internacional que utilizou o OZone como ferramenta auxiliar.

### 2.1 SOFTWARES PARA SIMULAÇÃO DE INCÊNDIOS

Os *softwares* para simulação de incêndio são ferramentas que permitem ao usuário visualizar a evolução de um incêndio de acordo com os modelos desenvolvidos para o entendimento deste fenômeno. No entanto, em razão da complexidade assunto e do grande número de variáveis envolvidas, este fenômeno é tratado de forma simplificada (SCHEER & BARANOSKI, 2007).

Apesar disso, de maneira geral, quando calibrados adequadamente os modelos de edificações em situação de incêndio (SI) desenvolvidos nesses programas são capazes de representar adequadamente o comportamento desses eventos. Ressalta-se que cabe ao pesquisador avaliar o custo-benefício da utilização destas ferramentas através da definição de quais dados de saída são realmente importantes no estudo desenvolvido, e quais recursos computacionais se tem disponível.

Existem diversos modelos computacionais para representação de incêndios, a maioria dos *softwares* de simulação de incêndios são baseados nos modelos de zonas ou no modelo de fluidodinâmica computacional (em inglês *Computational Fluid Dynamics*, CFD).

#### 2.1.1 Modelos de zonas

Os modelos de zonas têm como hipótese que, durante a ocorrência do incêndio, o compartimento é dividido em zonas nas quais as características dos gases (temperatura, massa, energia interna e a pressão) são uniformes a qualquer momento na camada quente (CADORIN *et al.*, 2001; BRAGA & LANDIM, 2008; NP EN 1991-1-2, 2010; GOUVEIA, 2017). Este modelo pode ser dividido em:

- (i) Uma zona, válidos em casos de incêndios plenamente desenvolvidos, onde pressupõe-se que as características dos gases são homogêneas em todo o

compartimento. Neste caso é admitido que o ambiente é composto por apenas um volume, a camada quente;

- (ii) Duas zonas, válidas em casos de incêndios localizados, baseada na hipótese de acúmulo dos produtos de combustão numa camada sob o teto, com uma interface horizontal, sendo admitido que o ambiente é dividido em dois volumes: a camada superior, denominada “camada quente” ou “camada de fumaça”, e a camada inferior, denominada “camada fria” ou “camada livre de fumaça”. Neste último caso, admite-se que as características dos gases são uniformes na camada superior do compartimento.

Nestes modelos, no decorrer do incêndio, caso não haja intervenção para extinção do mesmo, com o acúmulo dos gases, um compartimento que inicialmente possui características de duas zonas, pode evoluir para uma zona, caracterizando melhor a situação em seu interior neste momento. Isso ocorre diante das seguintes situações: se a temperatura dos gases na camada superior ultrapassar os 500 °C; se a espessura da camada superior ocupar 80 % da altura do compartimento (CADORIN *et al.*, 2001; NP EN 1991-1-2, 2010). A Figura 4 ilustra essa transição.

Figura 4 – Modelo de zonas



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Alguns exemplos de *softwares* que utilizam estes modelos são: o OZone, desenvolvido pela *University of Liège* (CADORIN *et al.*, 2001), e o *Consolidated Model of Fire and Smoke Transport* (CFAST), desenvolvido pelo *National Institute of Standards and Technology* dos Estados Unidos da América (NIST/EUA) (PEACOCK *et al.*, 2017).

Estes programas permitem, dentre outros, a obtenção de temperatura dos gases, concentração de oxigênio e, altura da camada livre de fumaça no ambiente simulado. No entanto, seus valores são considerados sempre homogêneos em toda a camada analisada.

Por ser um *software* de fácil utilização e com interface gráfica agradável e intuitiva, o OZone foi o programa de modelo de zonas escolhido como ferramenta auxiliar deste trabalho.

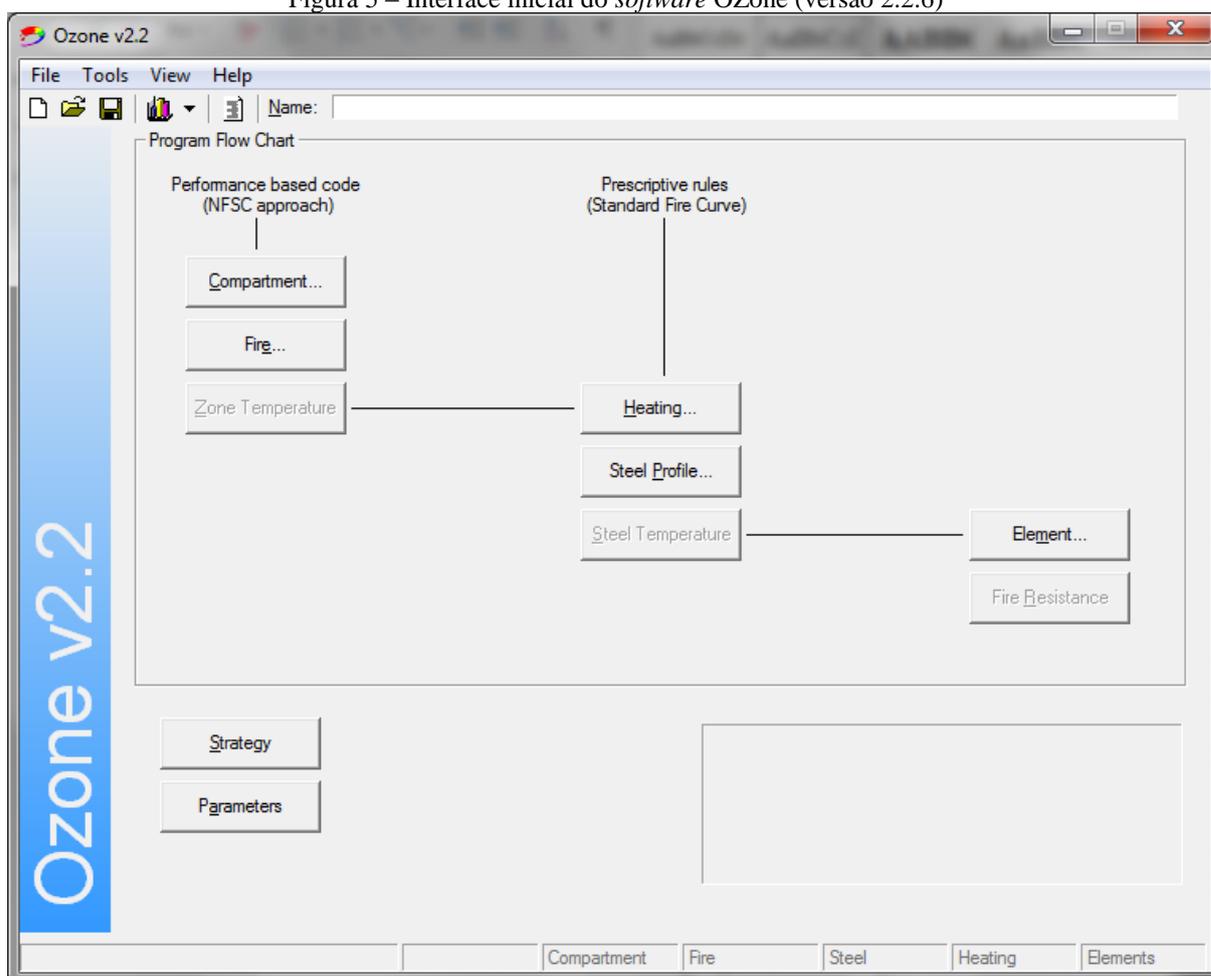
#### 2.1.1.1 OZone

O OZone é um *software* de simulação de incêndio desenvolvido pela *University of Liège* (CADORIN *et al.*, 2001), baseado nos modelos de zonas que calcula as temperaturas dos gases em caso de incêndio de acordo com a EN 1991-1-2 e temperaturas de aço de acordo com a EN 1993-1-2.

Neste *software*, a simulação é realizada em apenas um compartimento de cada vez, e permite a análise apenas no interior do mesmo, sendo este, um dos fatos que o torna significativamente mais simples que os *softwares* CFD.

Para o cálculo das temperaturas dos gases em caso de incêndio o usuário deve entrar com as definições do compartimento e do incêndio a ser analisado, além de poder definir outros parâmetros, como a temperatura e pressão ambiente.

Uma das vantagens de sua utilização é que este programa possui uma interface gráfica agradável e intuitiva. A Figura 5 mostra a interface inicial deste *software*.

Figura 5 – Interface inicial do *software* OZone (versão 2.2.6)

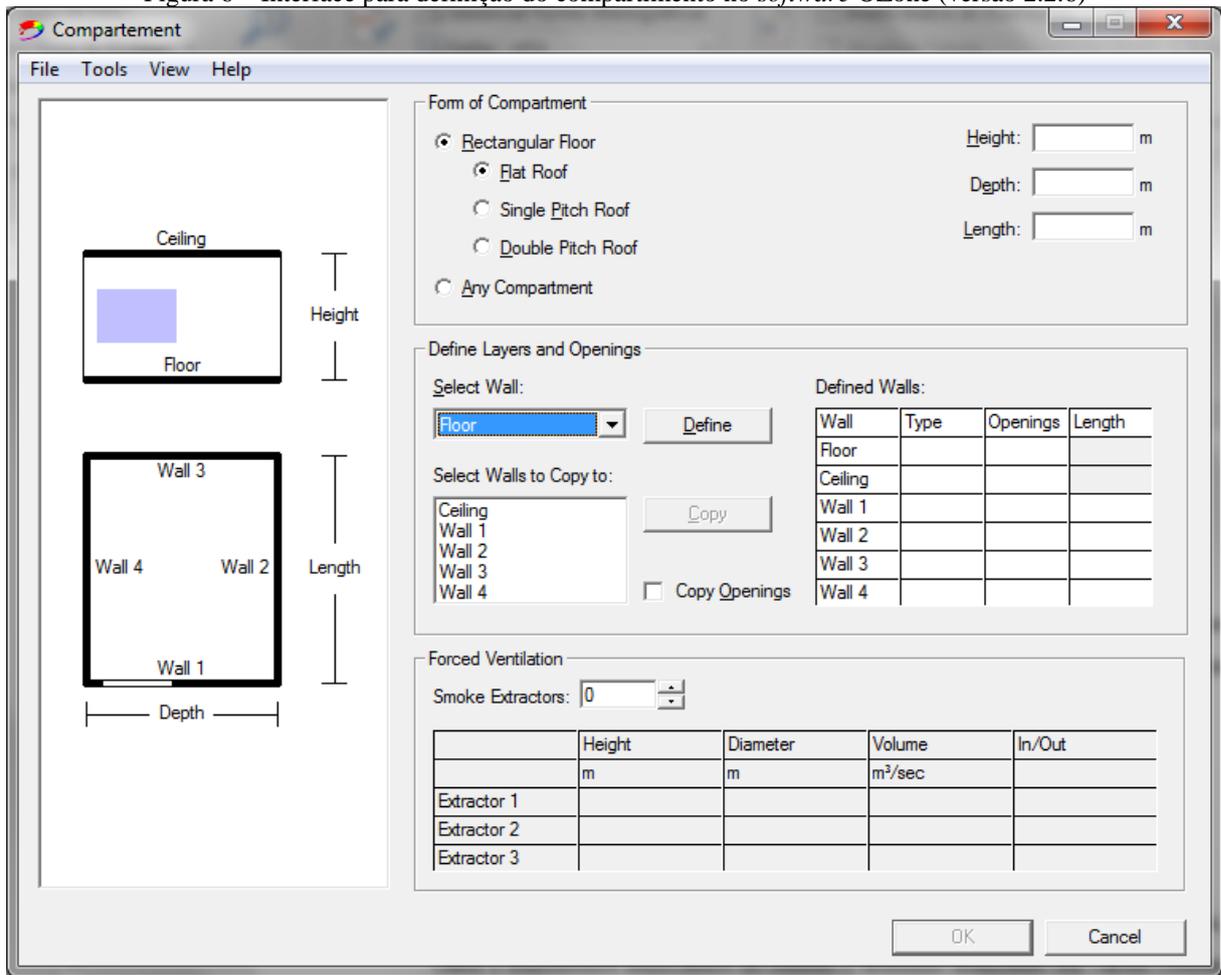
Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Em suma, o compartimento a ser analisado é descrito por sua geometria, dimensões das paredes, e altura do piso ao teto, incluindo o tamanho e posição das aberturas (verticais e horizontais) e, espessura e propriedades térmicas dos materiais das camadas das paredes, teto e piso. Para definição das propriedades térmicas dos materiais o usuário conta com uma biblioteca com alguns dos materiais mais usuais das construções.

Além disso, há a possibilidade da consideração de exatores de fumaça nas simulações.

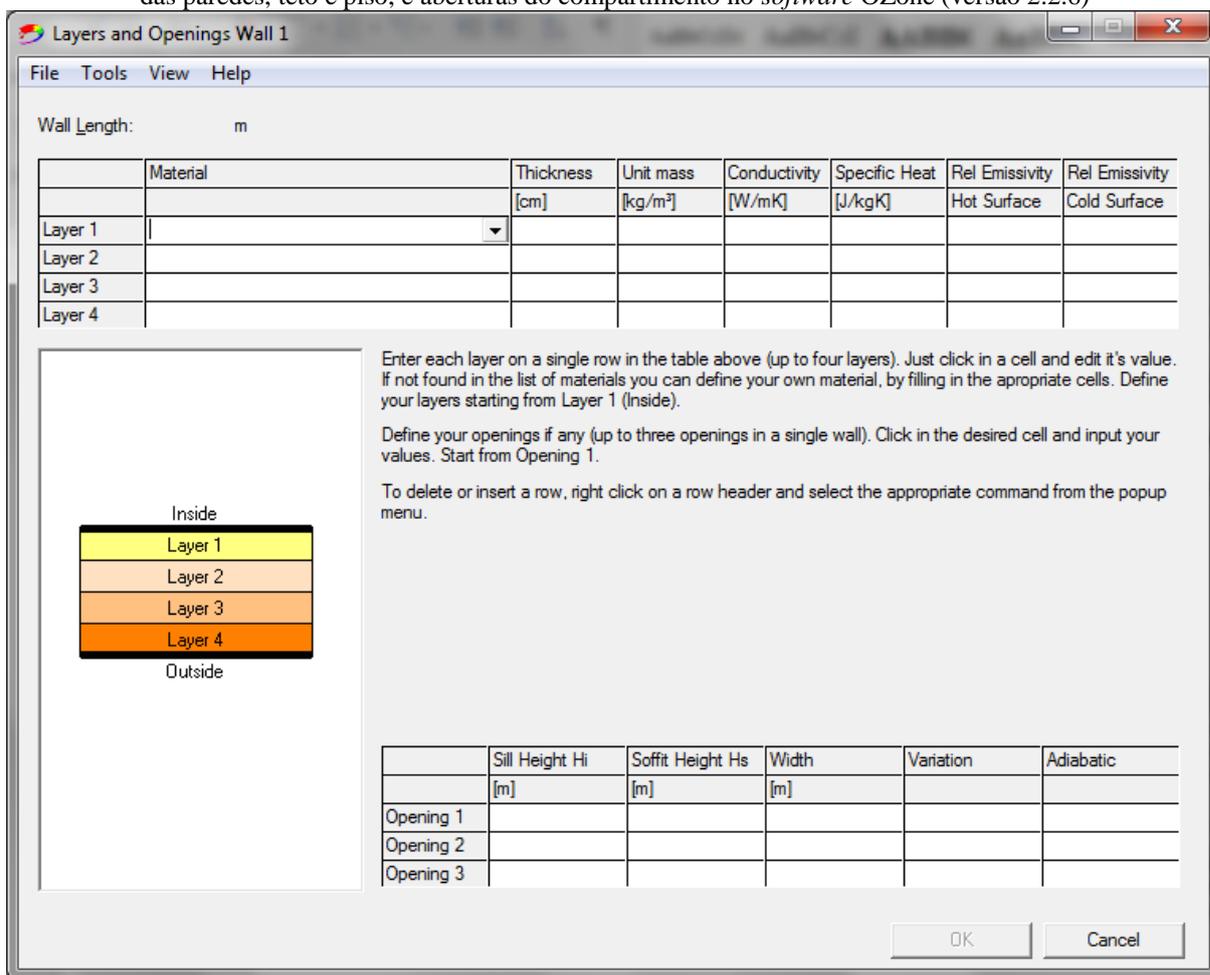
A Figura 6 e Figura 7 mostram as interfaces de definição do compartimento neste *software*.

Figura 6 – Interface para definição do compartimento no *software* OZone (versão 2.2.6)



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Figura 7 – Interface para definição da espessura e propriedades térmicas dos materiais constituintes das camadas das paredes, teto e piso, e aberturas do compartimento no *software* OZone (versão 2.2.6)



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Para a definição do incêndio o usuário tem a opção de utilizar o padrão do *software* (baseado na EN 1991-1-2) ou criar suas próprias definições. Utilizando a opção baseada na EN 1991-1-2, pode-se definir a taxa de crescimento do fogo, taxa máxima de liberação de calor, densidade da carga de incêndio, perigo de ativação do incêndio, área máxima do fogo, calor de combustão do combustível, eficiência de combustão, modelo de combustão, dentre outros, baseados na referida norma.

A Figura 8 mostra a interface de definição do incêndio neste *software*.

Figura 8 – Interface para definição do incêndio no *software* OZone (versão 2.2.6)

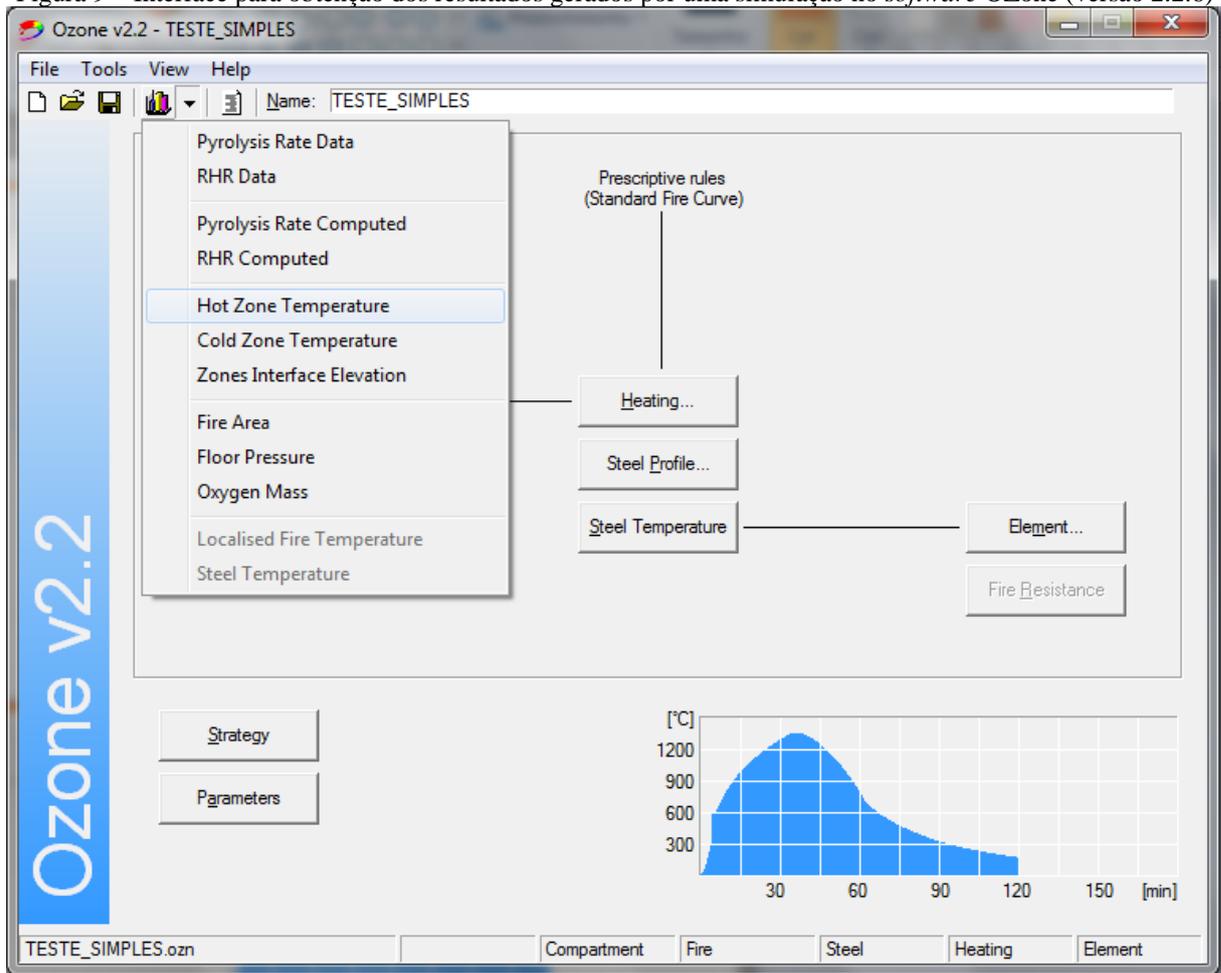
Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Ao realizar uma simulação de incêndio no OZone, obtém-se resultados ao longo do tempo de taxa de pirólise do material combustível, taxa de liberação de calor, temperaturas dos gases na zona quente, temperaturas dos gases na zona fria, altura da camada livre de fumaça, área do incêndio, pressão dos gases e massa de oxigênio.

Ressalta-se que as simulações realizadas neste *software* requerem um tempo de processamento de apenas alguns segundos, sendo esta uma das maiores vantagens de sua utilização.

A Figura 9 mostra a interface para obtenção dos resultados gerados por uma simulação neste *software*.

Figura 9 – Interface para obtenção dos resultados gerados por uma simulação no *software* OZone (versão 2.2.6)

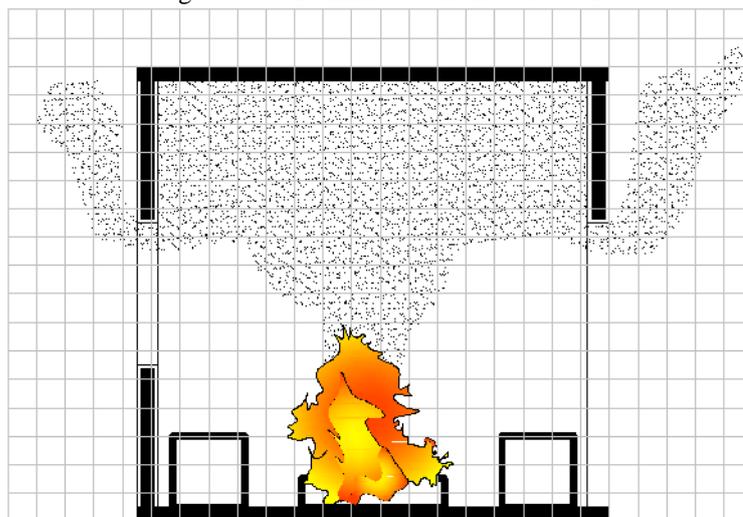


Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

### 2.1.2 Modelos de fluidodinâmica computacional (CFD)

Os modelos CFD analisam sistemas que envolvem fluxo de fluidos, transferência de calor e fenômenos associados dividindo o domínio analisado em várias células (como mostrado na Figura 10), onde, para cada célula são resolvidas numericamente as equações diferenciais parciais fundamentais do escoamento de fluidos. Estas equações definem matematicamente as leis de conservação da física: a massa de um fluido mantém-se constante; a taxa de variação do momento linear de uma partícula de fluido é igual à resultante das forças atuantes sobre ela (segunda lei de Newton); a taxa de variação da energia é igual à soma da taxa de aumento da quantidade de calor com a taxa de trabalho realizado sobre uma partícula de fluido (primeira lei da termodinâmica). Com esse modelo, as variáveis termodinâmicas e aerodinâmicas são conhecidas em todos os pontos do compartimento (NP EN 1991-1-2, 2010).

Figura 10 – Domínio de um modelo CFD



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Alguns exemplos de *softwares* que utilizam este modelo são: o *Fire Dynamics Simulator* (FDS), também desenvolvido pelo NIST (McGRATTAN *et al.*, 2017b), e o SMARTFIRE, desenvolvido pela *University of Greenwich* (EWER *et al.*, 2013).

Estes programas permitem, dentre outros, a obtenção de temperaturas dos gases, temperaturas em objetos sólidos, concentração de gases, altura da camada livre de fumaça, além de representar graficamente o comportamento da propagação de incêndios e movimentação de fumaça em todos os pontos da edificação simulada.

Dos *softwares* de simulação de incêndios, o FDS é o mais utilizado em pesquisas técnico-científicas, e conseqüentemente o mais rico em literatura disponível. Desde o início da sua divulgação, no ano de 2000, este vem sendo amplamente utilizado em estudos de SCIE no mundo. No Brasil, as primeiras publicações de pesquisas realizadas com o auxílio deste *software* datam o ano de 2008 e, aos poucos este tem ganhado espaço no meio técnico-científico como ferramenta para auxiliar estudos voltados tanto para diagnóstico, como para prognósticos de edificações em situação de incêndio.

#### 2.1.2.1 *Fire Dynamics Simulator (FDS)*

O FDS, principal ferramenta computacional analisada neste trabalho, é um *software* CFD que resolve numericamente as equações de Navier-Stokes adequada para fluxo de baixa velocidade movido termicamente, com ênfase no transporte de fumaça e calor provocados por incêndios (McGRATTAN *et al.*, 2017a).

Sua versão mais atual é a 6.6.0, e está disponível para os sistemas operacionais Windows, Linux e Mac OS X. Seu pacote de instalação inclui o programa Smokeview (SMV), também desenvolvido pelo NIST (um programa de visualização criado para reproduzir

animações da propagação do fogo e fumaça, concentrações de gás e de crescimento e movimento de fumaça em toda a estrutura submetida à simulação), ambos disponibilizados gratuitamente no site do desenvolvedor (<https://pages.nist.gov/fds-smv/downloads.html>).

Devido ao *software* não dispor de interface gráfica, os dados de entrada são inseridos pelo usuário através de linhas de comando em um único arquivo de entrada, através de um editor de texto que deve conter todas as informações do modelo, tais como: título da simulação, dimensões do domínio computacional, divisões da malha, tempo de simulação, condições iniciais do ambiente, propriedades dos materiais combustíveis e incombustíveis, condições de combustão, outputs desejados, dentre outros. O programa entende como comando os caracteres escritos entre os símbolos “&” e “/”, cujos dados necessários para a análise são especificados no arquivo de entrada usando uma lista de comandos com formatos pré-definidos em sua programação (*namelist*) (McGRATTAN *et al.*, 2017a). A Figura 11 mostra um exemplo simples de entrada de dados no FDS através de um arquivo de bloco de notas.

Figura 11 – Exemplo simples de entrada de dados de um modelo no FDS

```

Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda
&HEAD CHID='TESTE_SIMPLES', TITLE='TESTE_SIMPLES' /
&MESH IJK=10,10,10, XB=0.0,1.0,0.0,1.0,0.0,1.0 /
&TIME T_END=60.0 /
&VENT MB='XMIN', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='XMAX', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='YMIN', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='YMAX', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='ZMAX', SURF_ID='OPEN' /
&REAC ID='BUTANE', SOOT_YIELD=0.01 /
&SURF ID='FOGO'
  COLOR='RED'
  HRRPUA=1500 /
&VENT XB=0.4,0.6,0.4,0.6,0.0,0.0, SURF_ID='FOGO' /
&DEVC XYZ=0.5,0.5,0.9, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TERMOPAR' /
&SLCF PBY=0.5, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='TEMPERATURA_FATIA' /
&TAIL /

```

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Ao final da criação do arquivo de entrada, o usuário deve salva-lo no formato “nome.fds” e abri-lo com o FDS para que o programa possa executar o processamento, este por sua vez, ocorre em modo MS-DOS e o usuário é informado apenas do tempo transcorrido da simulação, como mostrado na Figura 12. No decorrer do processamento, que dependendo da complexidade do cenário de incêndio analisado pode requerer horas ou até dias, o programa cria automaticamente diversos arquivos de saída em formatos distintos, dentre eles arquivos tabulados (organizados em linhas e colunas, separados por vírgulas e visualizáveis por meio de editores de planilhas eletrônicas) e de visualização gráfica através do SMV (CUNHA, 2016). A Figura 13 mostra alguns exemplos de visualização gráfica no SMV.

Figura 12 – Processamento de um modelo no FDS

```

C:\Program Files\firemodels\FDS6\bin\fds.exe
Mesh 1 is assigned to MPI Process 0
OpenMP thread 1 of 1 assigned to MPI process 0 of 0
OpenMP thread 0 of 1 assigned to MPI process 0 of 0
Completed Initialization Step 1
Completed Initialization Step 2
Completed Initialization Step 3
Completed Initialization Step 4

Fire Dynamics Simulator

Current Date : August 21, 2017 10:24:30
Version : FDS 6.5.2
Revision : Git-r21-0-g4e9103f
Revision Date : Wed Aug 24 16:29:46 2016 -0400
Compilation Date : Wed 08/24/2016 10:28 PM

MPI Enabled; Number of MPI Processes: 1
OpenMP Enabled; Number of OpenMP Threads: 2

MPI version: 3.0
MPI library version: Intel(R) MPI Library 5.1.3 for Windows* OS

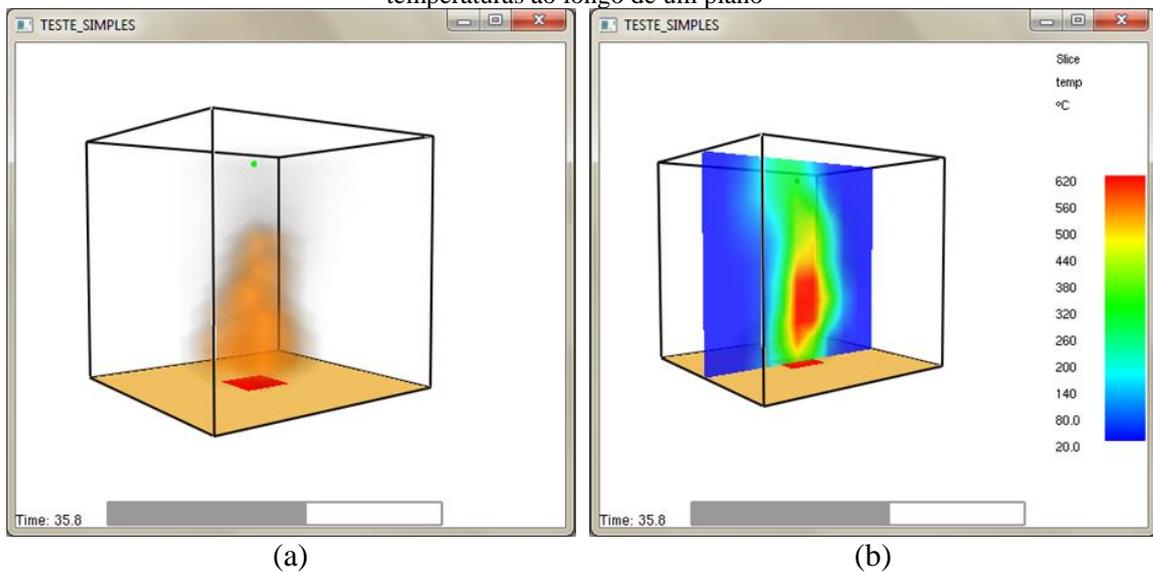
Job TITLE : TESTE_SIMPLES
Job ID string : TESTE_SIMPLES

Time Step: 1, Simulation Time: 0.16 s
Time Step: 2, Simulation Time: 0.32 s
Time Step: 3, Simulation Time: 0.47 s
Time Step: 4, Simulation Time: 0.53 s
Time Step: 5, Simulation Time: 0.57 s
Time Step: 6, Simulation Time: 0.61 s
Time Step: 7, Simulation Time: 0.64 s

```

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Figura 13 – Exemplo de visualização gráfica no SMV: (a) movimento de fumaça e liberação de calor; (b) temperaturas ao longo de um plano



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Salienta-se ainda que, por ser um programa de código fonte aberto e gratuito, o FDS facilita a identificação de possíveis erros em sua estruturação, culminando em seu aperfeiçoamento e estimulando várias instituições a dedicar-se no desenvolvimento de plataformas que facilitem o uso do software, além de acoplar os seus resultados em módulos para outros estudos. A exemplo disto, menciona-se os *softwares*: PyroSim (comercial), desenvolvido pela *Thunderhead Engineering Consultants*, que funciona como uma interface gráfica de entrada do FDS, auxiliando o usuário no desenvolvimento de modelos de incêndio

(THUNDERHEAD ENGINEERING, 2016); e Evac (gratuito), desenvolvido pelo *Technical Research Centre of Finland (VTT)*, que é um módulo de simulação de evacuação de pessoas que pode ser acoplado aos modelos de incêndios do FDS.

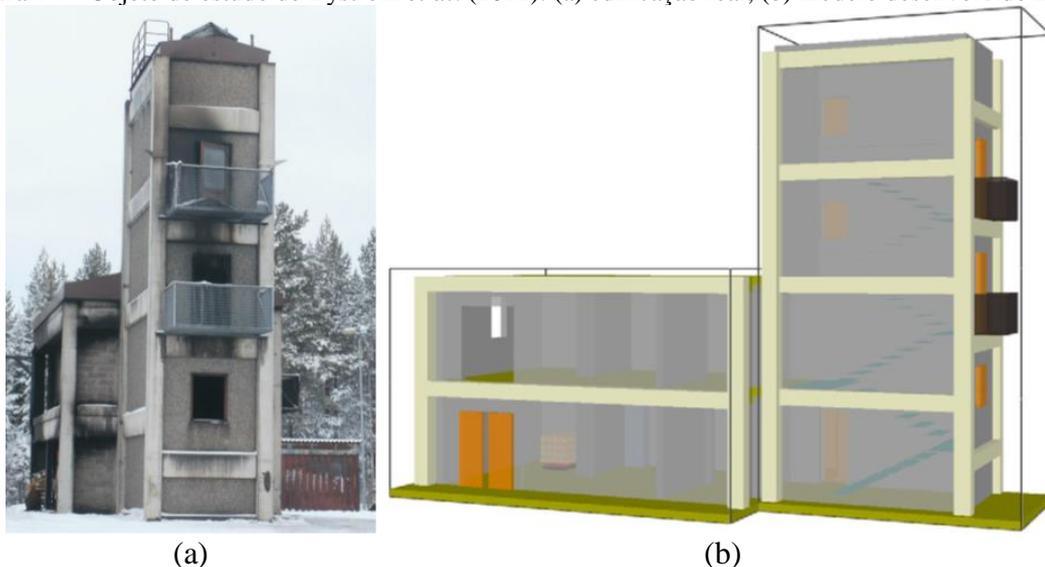
## 2.2 ESTADO DA ARTE

### 2.2.1 Trabalhos internacionais

No panorama mundial, diversos estudos utilizam o FDS como ferramenta auxiliar para análise das temperaturas desenvolvidas e do comportamento de incêndios em edificações.

A exemplo disto, Byström *et al.* (2012) realizaram um estudo cujo objetivo foi avaliar o desenvolvimento de incêndio e a distribuição de temperaturas, sob baixa temperatura ambiente, em uma edificação típica da cidade de Luleå (Suécia). Para isso, os autores realizaram um estudo experimental de incêndio em escala real em uma edificação de concreto de dois andares do centro de treinamentos do corpo de bombeiros desta cidade à uma temperatura ambiente de  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Figura 14a), e, posteriormente desenvolveram um modelo computacional deste experimento no FDS (Figura 14b).

Figura 14 – Objeto de estudo de Byström *et al.* (2012): (a) edificação real; (b) modelo desenvolvido no FDS



Fonte: Adaptado de Byström *et al.* (2012)

Neste estudo, tanto no ensaio experimental, quanto na simulação computacional, a carga de incêndio foi materializada com caibros de madeira. No modelo desenvolvido no FDS, tanto os materiais combustíveis, designados para a carga de incêndio (madeira), quanto os incombustíveis, designados para as paredes, teto, portas e etc (concreto e aço), tiveram suas propriedades térmicas e combustíveis consideradas, obtidas a partir da literatura existente.

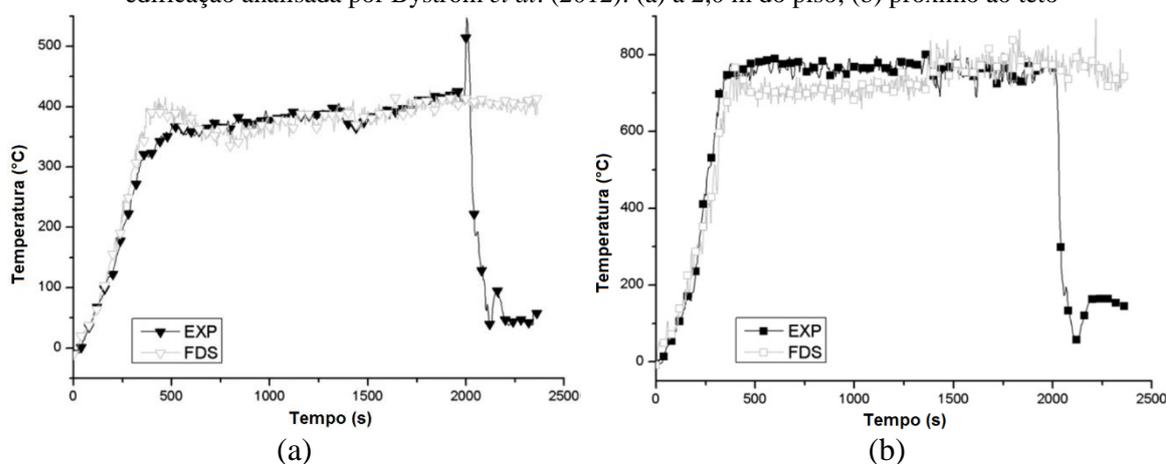
Como pode-se observar na Figura 14b, a fim de analisar o fluxo de fumaça através das aberturas, na simulação realizada no FDS, Byström *et al.* (2012) admitiram um domínio computacional um pouco maior que a edificação analisada, sendo este dividido em oito partes para utilização de processamento em paralelo.

Quanto a malha utilizada, segundo os autores, as dimensões desta podem afetar diretamente os resultados da simulação, assim é necessário um cuidado especial ao fazer sua definição. McGrattan *et al.* (1998 apud BYSTRÖM *et al.*, 2012) mostraram que, para cenários comuns de incêndio em edificações, malhas de arestas de 10 cm são aceitáveis para as simulações no FDS, retornando resultados coerentes. Neste estudo, Byström *et al.* (2012) definiram duas dimensões de aresta de malha cúbica, sendo uma de 10 cm para as regiões distantes da fonte de incêndio e, outra de 5 cm para as regiões próximas da fonte de incêndio. Segundo os autores, essa estratégia foi admitida para se obter resultados mais precisos.

Para iniciar a queima dos caibros de madeira, os autores utilizaram de uma superfície queimante (denominada VENT) posicionada sob os mesmos durante os minutos iniciais da simulação. Os termopares para medição das temperaturas foram posicionados exatamente no mesmo local que no experimento. E, a supressão do incêndio por água (aos 2000 s) não foi considerada na simulação numérica (BYSTRÖM *et al.*, 2012).

Com este estudo, Byström *et al.* (2012) puderam comparar os resultados experimentais do desenvolvimento de temperaturas com os resultados das simulações numéricas, mostrando que o modelo desenvolvido apresentou resultados coerentes, como mostrado na Figura 15.

Figura 15 – Resultados experimental e numérico do desenvolvimento de temperaturas durante o incêndio na edificação analisada por Byström *et al.* (2012): (a) a 2,0 m do piso; (b) próximo ao teto



Fonte: Adaptado de Byström *et al.* (2012)

Para os autores, devido ao conhecimento insuficiente das propriedades dos materiais (principalmente dos materiais combustíveis), e de modelos completos de pirólise e

comportamento de combustão destes materiais, ainda há uma necessidade de melhorias nas técnicas de simulação no *software* FDS. Sendo assim, os ensaios experimentais de incêndio em escala completa são de suma importância para aprimorar os conhecimentos acerca do comportamento deste fenômeno, possibilitando a comparação de medições aferidas com os resultados numéricos, afim de melhorar a precisão dos modelos desenvolvidos (BYSTRÖM *et al.*, 2012).

Outro exemplo da utilização de ensaios experimentais aliados ao uso do FDS como ferramenta auxiliar no estudo de SCIE é mostrado por Honma *et al.* (2013), cujo objetivo foi avaliar a eficiência da utilização deste *software* em investigações de cenas de crime desenvolvidas pelo Instituto Nacional de Investigação da Ciência Policial do Japão. Neste estudo foram realizados três experimentos de incêndio em escala real de quartos típicos de estilo japonês, com diferentes configurações de aberturas de portas e janelas, a fim de investigar o desenvolvimento e propagação do fogo quando iniciado a partir da utilização de líquido inflamável, com enfoque nos efeitos da ventilação advinda das aberturas.

Segundo Honma *et al.* (2013), os testes de reconstrução de incêndio usando modelos em escala real de compartimentos em cenas de crime são frequentemente solicitados pelos procuradores no Japão. No entanto, as dificuldades advindas dos elevados custos, disponibilização de tempo e de grandes espaços abertos ou instalação de teste, tornaram-se um bom motivo para se examinar a aplicabilidade do FDS neste tipo de investigação criminal.

Os experimentos foram realizados no Instituto Nacional de Pesquisa de Ciência Policial a partir da construção de um quarto típico de estilo japonês de dimensões internas de 3,60 m x 2,70 m com 2,35 m do piso ao teto, com tapetes de tatame, pilares de madeira, paredes de placas de gesso cobertas com papel de parede e teto com tábuas de madeira. A partir disso, em todos os experimentos foi colocada no chão de tatame (no lado oposto das aberturas) uma bandeja de aço inoxidável de 0,60 m x 0,60 m com uma camada líquida de 1 cm de gasolina (3,60 litros), que foi acesa com uma tocha afim de simular a fonte do incêndio e o método de ignição dos mesmos (HONMA *et al.*, 2013). As configurações de abertura do compartimento foram as seguintes:

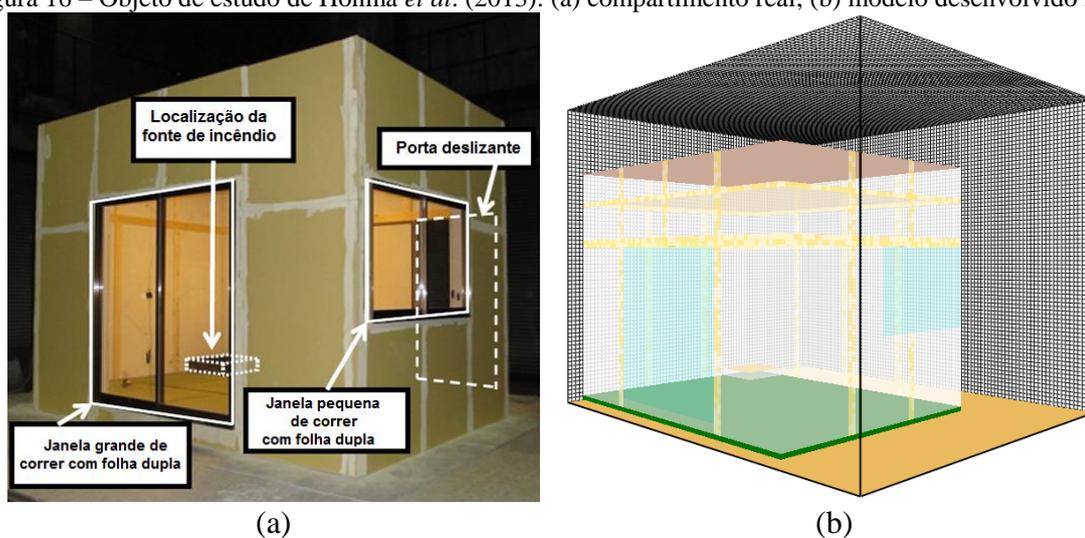
- (i) Experimento 1: todas as portas e janelas foram mantidas fechadas, configurando um compartimento sem ventilação;
- (ii) Experimento 2: uma pequena janela deslizante dupla com abertura inicial de 0,65 m x 0,90 m estava aberta, configurando um compartimento ventilado com uma pequena abertura;

- (iii) Experimento 3: uma porta deslizante de abertura inicial de 0,90 m x 1,80 m estava completamente aberta, configurando um compartimento ventilado com uma grande abertura.

Segundo os autores, o monitoramento de desenvolvimento e propagação do fogo dentro dos compartimentos foi realizado com câmeras de vídeo localizadas na parte da frontal (onde foi instalada uma grande janela deslizante), e na lateral direita do quarto. A duração tanto dos testes reais quanto das simulações numéricas foi de 10 minutos para o Experimento 1 e Experimento 3, e 30 minutos para o Experimento 2. Ao término dos testes, os incêndios nos experimentos 2 e 3 foram extinguidos com água, enquanto no Experimento 1 o fogo se extinguiu naturalmente por falta de oxigênio no ambiente.

Na Figura 16a pode-se observar o compartimento experimental com a localização das janelas e porta, bem como a fonte de incêndio. A Figura 16b mostra a reprodução deste compartimento no modelo desenvolvido no FDS.

Figura 16 – Objeto de estudo de Honma *et al.* (2013): (a) compartimento real; (b) modelo desenvolvido no FDS

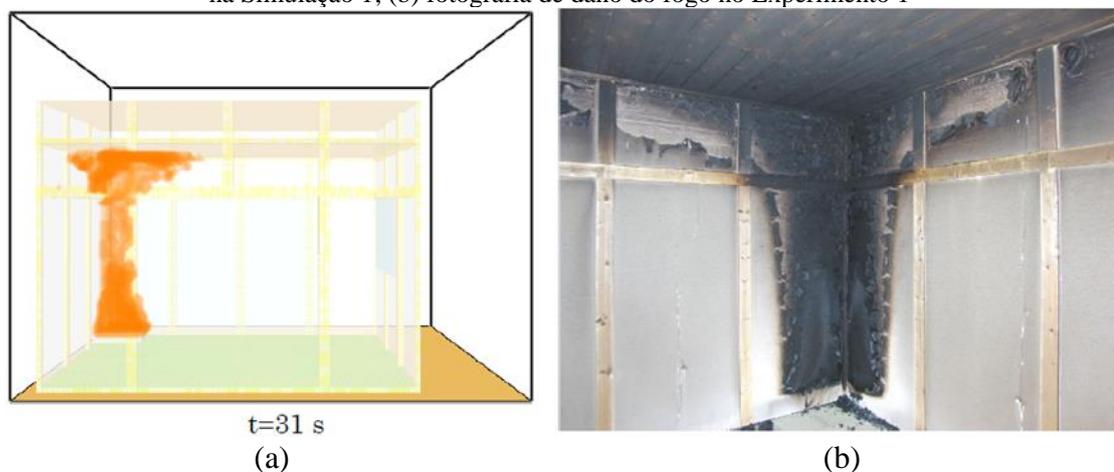


Fonte: Adaptado de Honma *et al.* (2013)

Nas simulações realizadas no FDS, Honma *et al.* (2013) utilizaram um domínio computacional um pouco maior que o compartimento estudado e a malha foi admitida cúbica, com 5 cm de aresta, totalizando 552.960 células. Foram realizadas três simulações com as configurações de abertura exatamente iguais às utilizadas experimentalmente, com tempo de duração correspondente a cada um dos três experimentos. A pirólise da gasolina foi descrita no FDS com um modelo de gasolina previamente desenvolvido, considerando que a gasolina era composta de várias frações inflamáveis com diferentes temperaturas de ebulição. As demais propriedades dos materiais presentes no quarto também foram consideradas e obtidas a partir da literatura existente.

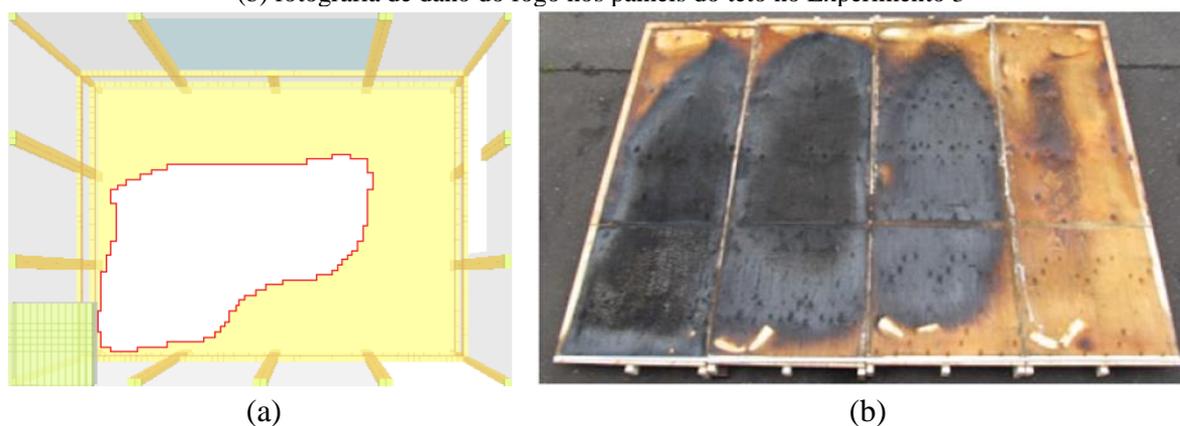
Quanto aos resultados obtidos, de maneira geral, em todas as simulações Honma *et al.* (2013) constataram que o padrão de propagação do incêndio foi bastante semelhante ao padrão observado nos experimentos. Na Simulação 1 pôde-se confirmar que o termino do incêndio foi o resultado da falta de oxigênio no ambiente, assim como ocorrido no Experimento 1. Nas Simulações 2 e 3 pôde-se observar que a propagação das chamas e os danos causados pelo incêndio foram muito semelhantes aos testemunhados nos Experimentos 2 e 3 respectivamente. As Figura 17 e Figura 18 mostram algumas comparações entre os experimentos e a simulações.

Figura 17 – Resultados obtidos no estudo de Honma *et al.* (2013): (a) momento de máxima propagação do fogo na Simulação 1; (b) fotografia de dano do fogo no Experimento 1



Fonte: Adaptado de Honma *et al.* (2013)

Figura 18 – Resultados obtidos no estudo de Honma *et al.* (2013): (a) queimado na área do teto na Simulação 3; (b) fotografia de dano do fogo nos painéis do teto no Experimento 3



Fonte: Honma *et al.* (2013)

Com este estudo, Honma *et al.* (2013) puderam examinar como diferentes condições de ventilação afetam o comportamento de incêndios em ambientes compartimentados. Observou-se que, tanto nos experimentos, quanto nas simulações, em compartimentos não ventilados o arrefecimento do incêndio ocorre muito mais rapidamente do que em compartimentos

ventilados, e que, esses últimos produzem diferentes comportamentos de queima em diferentes condições de ventilação. Desta forma pôde-se concluir que as simulações e os resultados experimentais estão em concordância, mostrando que a simulação numérica no FDS é uma ferramenta que se mostra perfeitamente adequada para investigar o desenvolvimento e propagação de incêndios em diferentes condições de ventilação.

Com o objetivo de auxiliar o treinamento do corpo de bombeiros através da compreensão do desenvolvimento de incêndios em ambientes compartimentados, Yuen *et al.* (2014) conduziram alguns ensaios experimentais de incêndio em um dormitório totalmente mobiliado em Parkes, New South Wales (Austrália), que, posteriormente foram reproduzidos em um modelo computacional no FDS.

Para Yuen *et al.* (2014), a precisão das simulações numéricas de incêndio depende muito da correta definição dos materiais combustíveis do cenário analisado. Sendo assim, as propriedades dos materiais aplicados nas simulações (tecido, espuma de poliuretano, madeira e gesso) foram validadas a partir de vários estudos encontrados na literatura, incluindo experimentos em cone calorimétrico.

Quanto ao domínio computacional adotado, para melhorar a modelagem de entrada e saída do fluxo de ar na simulação, Yuen *et al.* (2014) estendeu os limites do domínio para além do compartimento analisado, e, através de testes de sensibilidade, concluiu que uma malha cúbica de 10 cm de aresta era mais adequada para este estudo.

Nos ensaios experimentais, o início do incêndio ocorreu em uma lixeira localizada no canto do dormitório, próximo a um sofá (Figura 19a). No FDS a ignição do incêndio se deu através da admissão que todos os papéis encontrados dentro da lixeira estariam queimando imediatamente no início da simulação (Figura 19b) e, a partir disso, através de uma reação em cadeia, os demais móveis entraram em ignição também.

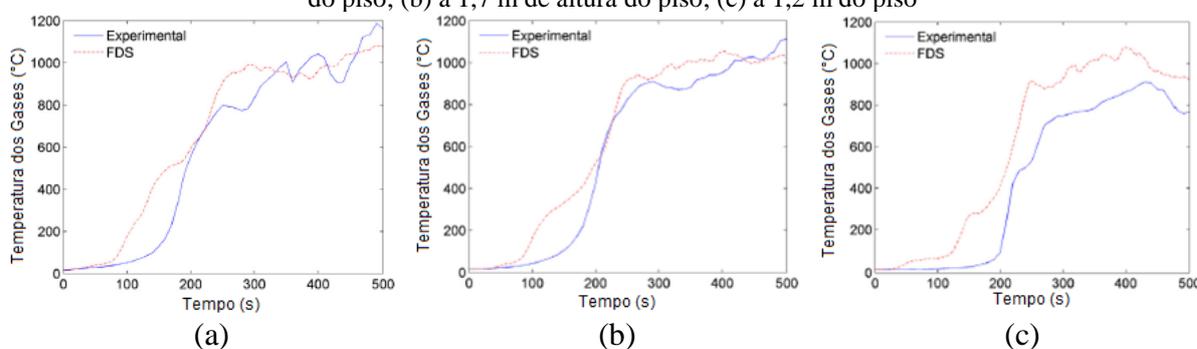
Figura 19 – Início de um dos ensaios de incêndio em dormitório realizado por Yuen *et al.* (2014): (a) cenário real; (b) modelo desenvolvido no FDS



Fonte: Adaptado de Yuen *et al.* (2014)

A análise dos resultados mostrou que o modelo computacional foi capaz de proporcionar previsões razoáveis de temperatura, fluxo de calor, e propagação do incêndio e fumaça coerentes com os obtidos experimentalmente. Através da Figura 20, os autores mostram que, em geral, a simulação deste cenário no FDS apresentou temperaturas nos gases muito semelhantes aos obtidos nos ensaios experimentais, sobretudo nas camadas mais superiores do compartimento. Entretanto, nas camadas mais inferiores, os valores obtidos numericamente foram maiores (cerca de 200 °C) que os obtidos experimentalmente. Além disso, como pode-se observar na Figura 20, na simulação realizada no FDS o crescimento do incêndio ocorreu mais rapidamente se comparado aos ensaios experimentais, prevendo uma ocorrência anterior do *Flashover* (YUEN *et al.*, 2014).

Figura 20 – Resultados de temperatura dos gases obtidos no estudo de Yuen *et al.* (2013): (a) a 2,3 m de altura do piso; (b) a 1,7 m de altura do piso; (c) a 1,2 m do piso



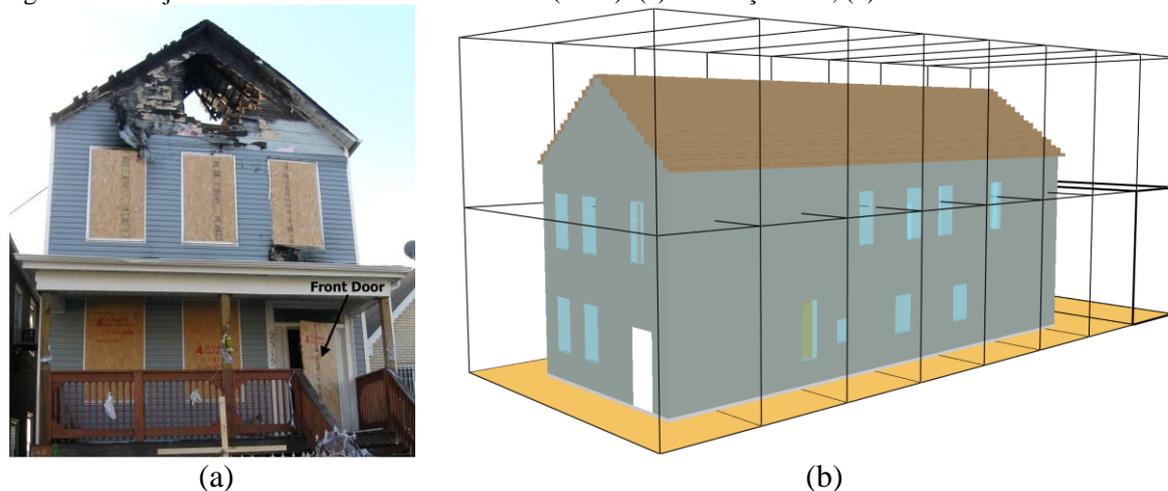
Fonte: Adaptado de Yuen *et al.* (2014)

Apesar de algumas pequenas diferenças, Yuen *et al.* (2014) relatam que os fenômenos da propagação do fogo e da fumaça foram reproduzidos com sucesso pelo FDS, mostrando que este *software* pode ser considerado uma ferramenta confiável para a reconstrução de cenas de incêndio, podendo ser adotado como uma ferramenta de treinamento do corpo de bombeiros para entender melhor o desenvolvimento de incêndios compartimentados.

Outra potencialidade muito explorada no FDS é a reconstituição de incêndios ocorridos em edificações. A exemplo disso, Weinschenk *et al.* (2014) desenvolveram um estudo cujo objetivo foi melhorar a segurança e eficácia da atuação de bombeiros, através da reconstituição um incêndio ocorrido em uma edificação residencial unifamiliar localizada em Chicago, Illinois (Estados Unidos da América, EUA), que resultou na morte de um capitão do departamento de corpo de bombeiros. Segundo os autores, as simulações realizadas no FDS foram desenvolvidas usando uma combinação do conhecimento do cenário do sinistro (geometria da edificação, mobiliário, condições de ventilação, danos causados e relatos das testemunhas) e consideração de algumas aproximações e premissas de engenharia. A análise dos resultados da simulação é focada nas condições internas da edificação antes e depois da falha de uma porta no interior da

mesma. A edificação incendiada, bem como o modelo desenvolvido no FDS são mostrados na Figura 21.

Figura 21 – Objeto de estudo de Weinschenk *et al.* (2014): (a) edificação real; (b) modelo desenvolvido no FDS



Fonte: Adaptado de Weinschenk *et al.* (2014)

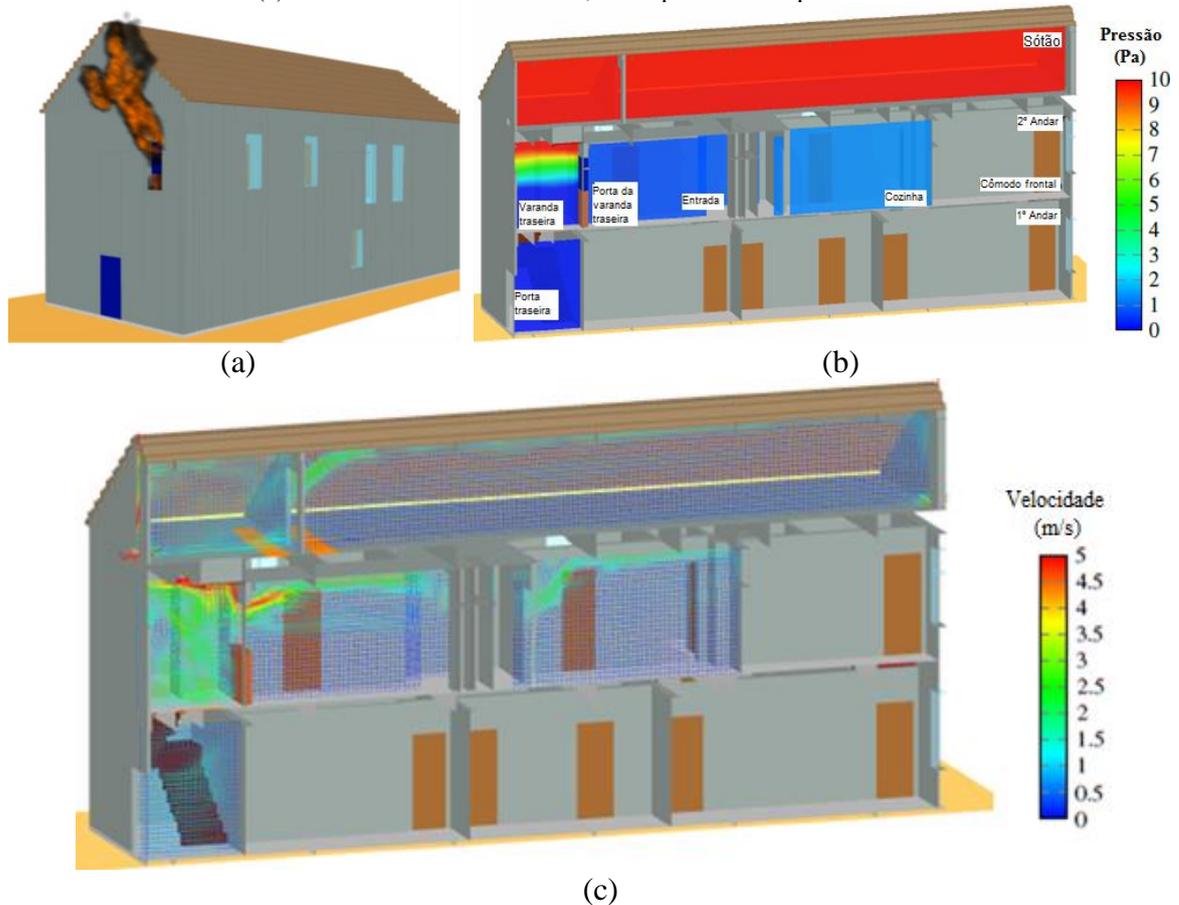
A carga de incêndio desta edificação era constituída basicamente por madeira que foi representada no FDS pela fórmula química:  $CH_{1,7}O_{0,74}N_{0,002}$ , com rendimentos de monóxido de carbono e fuligem de 0,004 kg/kg e 0,015 kg/kg respectivamente (TEWARSON, 2008 apud WEINSCHENK *et al.* 2014). Segundo os autores, outras propriedades tanto para a madeira quanto para o gesso (material constituinte das paredes) também foram consideradas através da literatura especializada.

Para garantir um fluxo de ar adequado entre o interior e o exterior do domínio computacional, este foi estendido para além das dimensões da edificação. Foi utilizada uma malha cúbica de arestas de 10 cm, totalizando 2,4 milhões de células computacionais, que foram divididas em 16 malhas de tamanho igual para realização de processamento em paralelo. Com essa estratégia o tempo de processamento das simulações realizada por Weinschenk *et al.* (2014) foi de aproximadamente 1,5 dias.

Com esse estudo, Weinschenk *et al.* (2014) puderam analisar a taxa de liberação de calor (em inglês *Heat Release Rate*, HRR), a pressão e as temperaturas desenvolvidas no interior da edificação analisada.

Como mostrado na Figura 22a, os autores observaram que antes da falha da porta, como há uma quantidade insuficiente de oxigênio no interior da edificação para queimar todo o combustível, a combustão ocorre localmente nas aberturas para o exterior, onde o ar fresco é disponível. Pôde-se observar também que após a falha da porta interna, conforme o incêndio crescia, a pressão no interior da edificação subia e os gases quentes fluíam da região de maior pressão para onde a pressão era menor, conforme mostrado nas Figura 22b e Figura 22c.

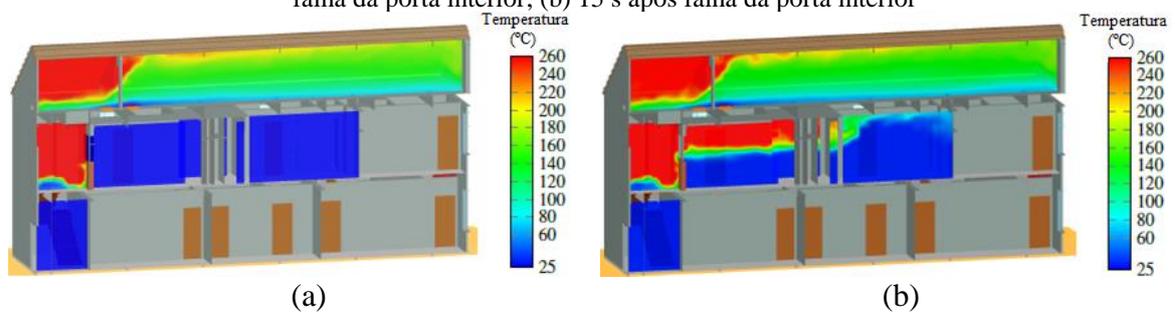
Figura 22 – Resultados da simulação de Weinschenk *et al.* (2014): (a) combustão ocorrendo na janela, local rico em oxigênio; (b) condições de pressão calculados no interior da estrutura instantes antes da porta interior falhar; (c) vetores de velocidade do ar, 15 s após falha da porta interior



Fonte: Adaptado de Weinschenk *et al.* (2014)

Quanto as temperaturas desenvolvidas, Weinschenk *et al.* (2014) constataram que a falha (ou abertura) de uma porta no interior de uma edificação incendiada causa a rápida propagação de gases quentes para o restante da mesma (uma vez que os gases tendem a fluir para locais de menor pressão), podendo causar o surgimento de novos focos de incêndio, como é mostrado na Figura 23.

Figura 23 – Resultados de temperaturas desenvolvidas na simulação de Weinschenk *et al.* (2014): (a) 1 s antes da falha da porta interior; (b) 15 s após falha da porta interior



Fonte: Adaptado de Weinschenk *et al.* (2014)

Com a falha da porta no interior da edificação, Weinschenk *et al.* (2014) observaram que houve uma rápida mudança das condições ambientes na mesma. Antes deste acontecimento, as temperaturas nos cômodos adjacentes ao foco do incêndio eram em torno de 25 °C a 60 °C, após isso, em apenas 15 s, pôde-se observar o surgimento de uma extensa camada de gases quentes de até 260 °C nesses mesmos compartimentos.

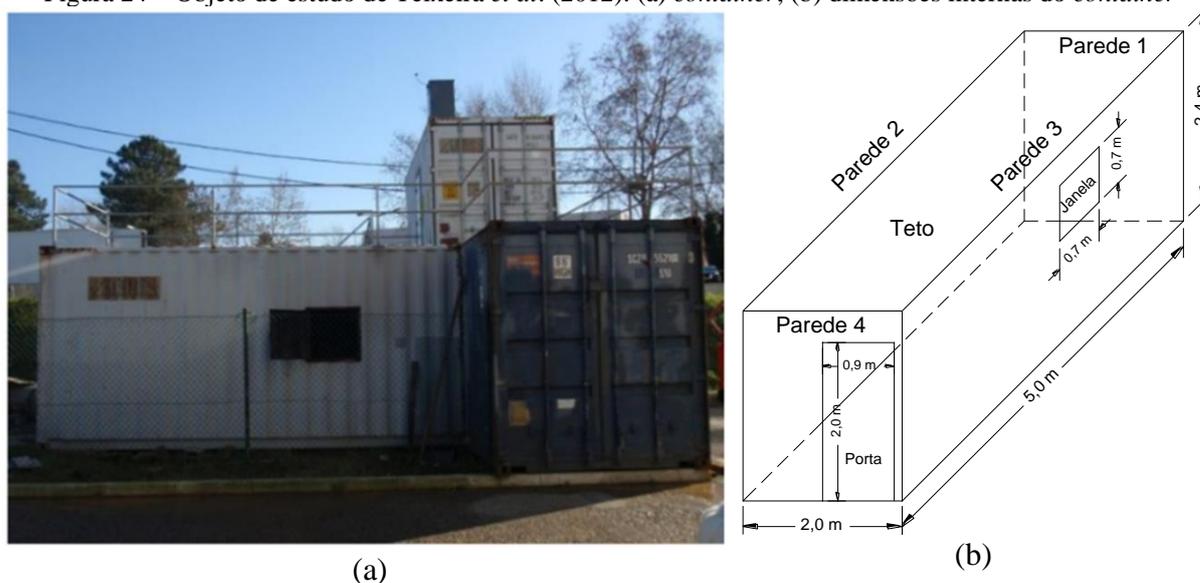
Com base neste e na revisão de outros incidentes, os autores mostram que incêndios que apresentam mudanças abruptas no fluxo de gases ou se desenvolvem rapidamente são um perigo significativo para o serviço de corpo de bombeiros. Neste incidente, a morte do capitão do corpo de bombeiros provavelmente ocorreu devido a rápida mudança das condições internas da edificação, que resultou na falta de tempo hábil para que ele pudesse sair com segurança da mesma (WEINSCHENK *et al.*, 2014).

Além destes trabalhos, e inúmeros outros que utilizaram o FDS como ferramenta auxiliar, alguns estudos mostram que os *softwares* de modelo de zonas também possuem potencialidades, principalmente no que diz respeito à obtenção de temperaturas desenvolvidas durante a ocorrência de incêndios.

A exemplo disto, Teixeira *et al.* (2012), realizaram um estudo cujo objetivo foi analisar a dinâmica e desenvolvimento de incêndio em um *container*, cujas características e carga de incêndio representou um escritório. Para isso, os autores realizaram alguns ensaios experimentais, e posteriormente realizaram simulações computacionais nos *softwares* CFAST e OZone, e soluções analíticas obtidas com as curvas de incêndio natural definidas na EN 1991-1.2 (2002 apud TEIXEIRA *et al.*, 2012), para comparação dos resultados de desenvolvimento de temperaturas no interior do compartimento.

Para realização dos ensaios experimentais, os autores utilizaram um *container* com dimensões internas de 2,00 m x 5,00 m com 2,40 m do piso ao teto, possuindo uma janela de 0,70 m x 0,70 m (que permaneceu totalmente aberta durante todo o experimento) e uma porta de 0,90 m x 2,00 m (que permaneceu parcialmente aberta durante o experimento) utilizadas para ventilação e extração da fumaça. A Figura 24 mostra o *container* utilizado para realização dos ensaios experimentais de Teixeira *et al.* (2012).

Figura 24 – Objeto de estudo de Teixeira *et al.* (2012): (a) *container*; (b) dimensões internas do *container*



Fonte: Adaptado Teixeira *et al.* (2012)

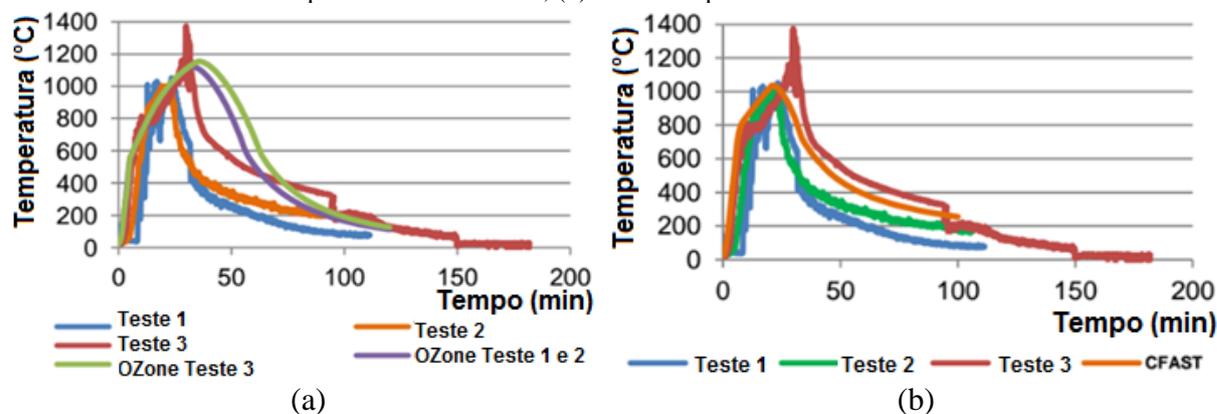
Neste compartimento, as paredes e o teto foram revestidos internamente com placas de lã de rocha de 50 mm de espessura e densidade de  $40 \text{ kg/m}^3$ , cobertas com placas de gesso de 25 mm de espessura. O piso foi revestido com uma camada de lã de rocha de  $175 \text{ kg/m}^3$  de densidade, e posteriormente coberto com placas cerâmicas de 5 mm de espessura (TEIXEIRA *et al.*, 2012).

A carga de incêndio foi materializada através de caibros de madeira com dimensões de  $1,00 \text{ m} \times 0,05 \text{ m} \times 0,055 \text{ m}$ , distribuídos em três pilhas no interior do compartimento. Segundo os autores, a capacidade térmica dos caibros de madeira foi determinada experimentalmente, e o seu volume foi calculado de maneira que as pilhas correspondem a uma densidade de carga de incêndio de  $390 \text{ MJ/m}^2$  no primeiro e no segundo ensaios e,  $500 \text{ MJ/m}^2$  no terceiro ensaio realizado. Além disso, a distribuição dos caibros de madeira nas pilhas foi diferente nos três ensaios, condicionado ligeiramente o desenvolvimento de fogo e as temperaturas no compartimento (TEIXEIRA *et al.*, 2012).

Com este experimento, Teixeira *et al.* (2012) mostram que os resultados obtidos através dos *softwares* OZone e CFAST tiveram uma boa concordância com os obtidos experimentalmente tanto na fase de crescimento quanto arrefecimento do incêndio. A comparação dos resultados obtidos através dos *softwares* e dos ensaios experimentais podem ser observados na Figura 25. Nestes gráficos, os autores comparam os resultados de temperaturas máximas desenvolvidas em cada ensaio experimental (obtidas através de termopares posicionados no centro do compartimento, próximos as pilhas de madeira), com as

temperaturas obtidas nas simulações computacionais (referentes as temperaturas desenvolvidas na camada quente do compartimento).

Figura 25 – Resultados de temperaturas máximas obtidas no estudo de Teixeira *et al.* (2012): (a) ensaios experimentais vs OZone; (b) ensaios experimentais vs CFAST



Fonte: Adaptado de Teixeira *et al.* (2012)

Com este estudo, Teixeira *et al.* (2012) observaram que nos ensaios experimentais as temperaturas mais altas foram medidas no centro do compartimento e nas paredes. No teto, as temperaturas foram maiores um pouco abaixo da superfície devido ao efeito da camada limite. Quanto aos resultados obtidos através das simulações computacionais nos *softwares* OZone e CFAST, aos autores afirmam que, apesar de algumas sutis diferenças, estes foram capazes de descrever corretamente a evolução da temperatura no compartimento estudado, mostrando que estes programas, assim como o FDS, também possuem potencialidades como ferramenta auxiliar para o desenvolvimento de estudos de SCIE.

### 2.2.2 Trabalhos nacionais

No Brasil, apesar dos estudos em SCIE serem embrionários e a utilização de simuladores de incêndios ainda não ser muito difundida, o FDS tem ganhado espaço nos últimos anos, provando ser uma ferramenta adequada para auxiliar estudos voltados para diversas finalidades, como: definição de projetos arquitetônicos mais eficientes do ponto de vista de SCIE (ALVES *et al.*, 2008), avaliação da eficiência da utilização de sistemas construtivos que visam à contenção de incêndios (RODRIGUES, 2009; CUNHA, 2016), reconstituição de incêndios e avaliação de edificações sinistradas (RUSCHEL, 2011; BRAGA & LANDIM, 2008), análise de segurança de instalações sensíveis como túneis rodoviários em situação de incêndio (CARVALHO, 2013), avaliação da propagação do incêndio em edificações (BRUNETTO, 2015), averiguação de hipóteses da origem de incêndios em edificações (BRAGA & LANDIM, 2008; MAZZONI, 2015); estimação de curvas de temperaturas de

incêndios (CENTENO *et al.*, 2015; KIRYU, 2017); análise do comportamento de incêndios (CENTENO *et al.*, 2015; MATOS, 2017); estimacão do tempo facultado para evacuacão de edificações e da altura da camada livre de fumaça (CARLOS *et al.*, 2016; MARIANI & CARLOS, 2016); avaliacaão de tanques de armazenamento de combustíveis em situacão de incêndio (FONTENELLE, 2012; HAUSER, 2016); dentre outros.

Visando a SCIE, Alves *et al.* (2008) realizaram um estudo com um prédio comercial de escritórios com características típicas e representativas das edificações brasileiras, cujo objetivo foi aplicar a simulacão computacional de incêndios para verificar a influencia da fumaça nas rotas de fuga. Para isso, os autores elaboraram o projeto arquitetônico desta edificaçaão atendendo as prescrições das normas brasileiras de SCIE e, posteriormente realizaram simulacões computacionais nos *softwares* FDS e Simulex<sup>1</sup>, a fim de determinar a influencia da fumaça e da temperatura na evacuacão de pessoas e a eficiencia das orientações normativas.

Com este estudo, Alves *et al.* (2008) demonstrou que a simulacão computacional de incêndios é um recurso que pode auxiliar na fase de projeto de edificações, ajudando a definir *layouts*, melhor posicionamento de escadas de emergencia, portas corta-fogo e outros parâmetros fundamentais para assegurar a segurancã de seus ocupantes. Para os autores, este recurso pode contribuir para a minimizaçaão dos efeitos danosos dos incêndios antes mesmo de ocorrerem:

A simulacão permite compreender como os aspectos estruturais, ambientais e de materiais utilizados no processo construtivo influenciam no desenvolvimento do fogo, favorecendo a melhoria na criaçaão das normas técnicas, na preservacão do meio-ambiente e no maior controle dos materiais empregados na construcaão civil. Desse modo, os projetos tornam-se mais viáveis economicamente e adequados às peculiaridades de cada empreendimento, sem deixar de atender aos aspectos de segurancã (ALVES *et al.*, 2008).

Com um propósito investigativo, Braga & Landim (2008) testaram as hipóteses de origem de incêndio ocorrido em uma unidade residencial na cidade de Brasília no ano de 2007, com o auxílio do FDS. Para isso, foi desenvolvido no *software* um modelo representativo da geometria, propriedades térmicas e carga de incêndio desta residênciã. Para os autores, “apesar de cada incêndio possuir particularidades, há um padrão de comportamento entre os incêndios ocorridos em ambientes com características construtivas e cargas de incêndio semelhantes”

---

<sup>1</sup> Simulex é um *software* para simulacão de evacuacão de pessoas de edificações incendiadas, desenvolvido pela empresa *Integrated Environmental Solutions Limited* (IES), do Reino Unido (<https://www.iesve.com/software/ve-for-engineers/module/Simulex/480>).

(BRAGA & LANDIM, 2008). Sendo assim, antes de averiguar um incêndio, o investigador deve ter conhecimentos sobre o comportamento do fogo nos diversos tipos de edificação, para que possa analisar corretamente seus vestígios deixados pelo sinistro.

Braga & Landim (2008) afirmam que a simulação computacional é uma importante ferramenta que pode auxiliar investigadores na compreensão de incêndios, uma vez que propicia a execução de diversos testes de hipóteses elaboradas. No entanto, é importante saber que esta ferramenta não trará todas as respostas sobre o sinistro:

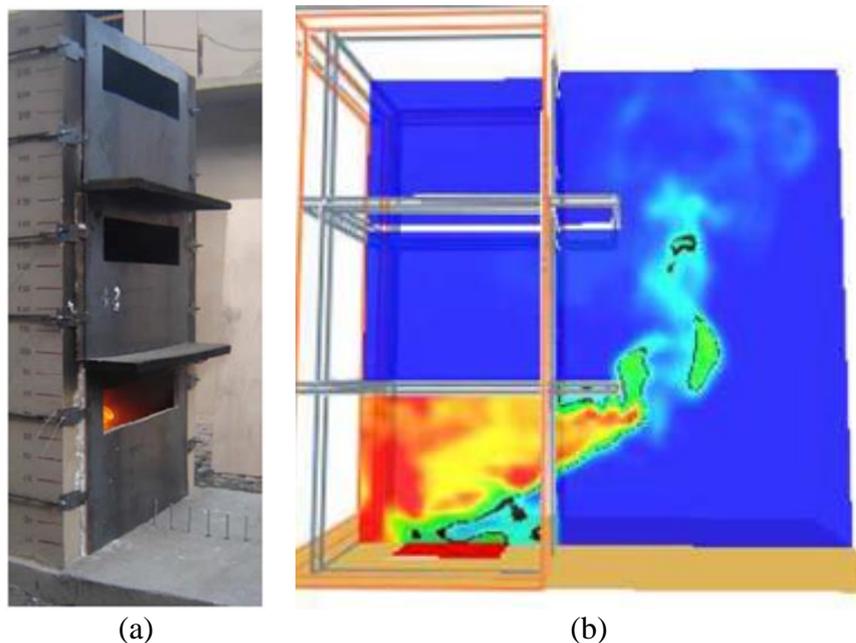
O objetivo é o de encontrar a causa mais provável do incêndio, mas também permite verificar se o projeto arquitetônico da edificação foi negligente quanto à segurança contra incêndio ou se há falha nos sistemas de detecção e supressão, o que permitiria mudanças necessárias nas normas e códigos de proteção contra incêndio e pânico para evitar que um incêndio similar não aconteça no futuro (BRAGA & LANDIM, 2008)

Com este estudo, Braga & Landim (2008) observaram que a simulação do incêndio através do FDS desenvolveu características que coincidiram perfeitamente com as fotografias da residência após a ocorrência do sinistro. Além disso, verificaram que na ocorrência da generalização do incêndio, as temperaturas dentro do ambiente podem ter ultrapassado 1.000 °C.

A fim de analisar a eficiência do sistema de compartimentação vertical externa por afastamento entre as janelas e por implantação de projeções horizontais como continuidade dos pisos, segundo as exigências das normas brasileiras, Rodrigues (2009) desenvolveu um estudo em que foram realizados ensaios experimentais em escala reduzida em conjunto com simulações computacionais com o auxílio do FDS.

Para isso, foi construído, no quartel do Comando do Corpo de Bombeiros do Rio Grande do Sul, um modelo em escala reduzida (1/3 das dimensões reais) de um simulador que representaria um compartimento de uma habitação popular. Nesse simulador, foram realizados ensaios experimentais com diferentes configurações de fachadas e cargas de incêndio, e, posteriormente simulações computacionais destes cenários foram realizadas no FDS. A Figura 26 mostra um dos cenários analisados nesta pesquisa.

Figura 26 – Objeto de estudo de Rodrigues (2009): (a) modelo experimental em escala reduzida; (b) modelo desenvolvido no FDS



Fonte: Adaptado de Rodrigues (2009)

Nos ensaios experimentais, o autor verificou visualmente a trajetória das chamas e da fumaça do compartimento onde o incêndio ocorreu para o adjacente superior, e registrou as temperaturas atingidas na parte externa da fachada para determinar a propagação do incêndio para os demais pavimentos. A carga de incêndio foi materializada por uma pilha de caibros de madeira com dimensões de 4,5 cm x 4,5 cm e 50 cm de comprimento, sendo sua ignição realizada através da queima de 1 litro de gasolina de aviação, contida em um recipiente confeccionado em aço e posicionado sob a pilha de madeira. Segundo o autor, em todos os ensaios realizados a ventilação do local era nula (RODRIGUES, 2009).

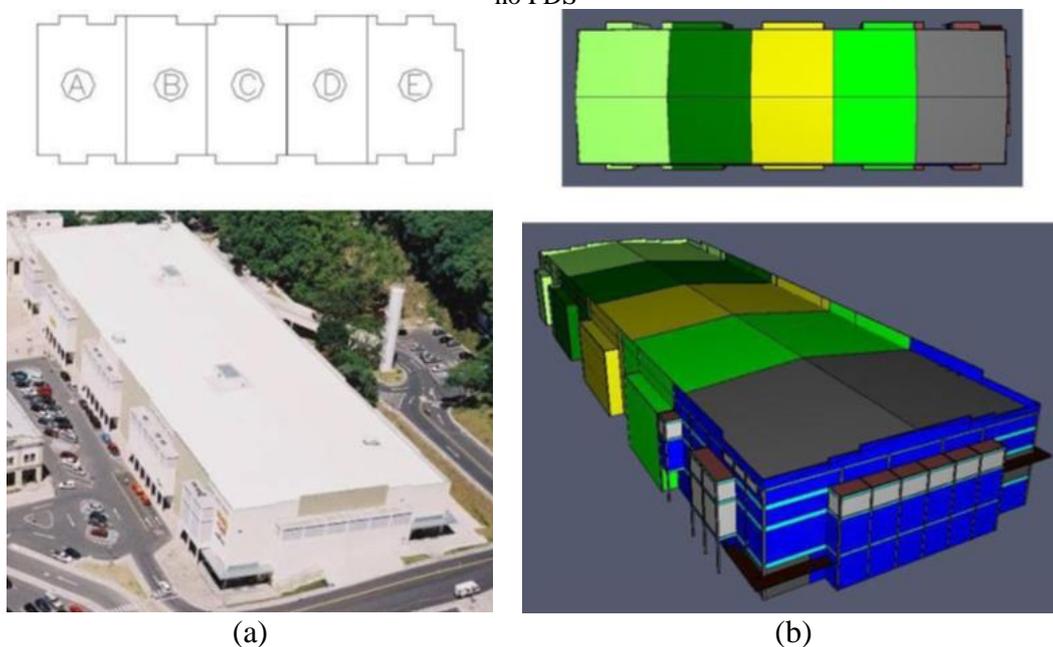
Na simulação computacional, o autor utilizou de um queimador (VENT) para representar a carga de incêndio, e “Todos os materiais constituintes do simulador foram considerados inertes, evitando perdas e trocas de calor com as paredes, dando ênfase à dinâmica do fogo, reduzindo o tempo computacional de cálculo” (RODRIGUES, 2009). O domínio computacional foi extrapolado para além das dimensões do simulador, e a malha utilizada teve arestas entre 3,5 e 4 centímetros. Para obtenção dos resultados, além das imagens geradas pelo SMV, o autor introduziu nos modelos: termopares posicionados analogamente aos ensaios experimentais; e planos de medição (denominadas *slice*) de temperaturas e taxa de liberação de calor, como mostrado na Figura 26b.

Com este estudo, Rodrigues (2009) constatou que a geometria da edificação e das aberturas podem modificar a dinâmica de propagação do fogo. Além disso, na maioria dos casos a compartimentação externa funciona como barreira para a propagação do incêndio para os

pavimentos superiores da edificação. Para o autor, o FDS é uma ferramenta potente capaz de prever corretamente o comportamento de incêndios, servindo de embasamento para avaliação da eficiência de sistemas de proteção passiva e confecção de pareceres técnicos sem os custos advindos de ensaios experimentais. Entretanto, para que isso seja possível, é necessário que sejam realizados estudos de caracterização das propriedades dos materiais comumente utilizados no Brasil para que os modelos computacionais desenvolvidos possam representar mais adequadamente a realidade do país.

A reconstituição de incêndios ocorridos em edificações também é uma potencialidade do FDS explorada nos estudos brasileiros. A exemplo disso, Ruschel (2011) simulou computacionalmente, através do *software* FDS, o incêndio ocorrido no Shopping Total, localizado na cidade em Porto Alegre, Rio Grande do Sul (RS), no ano de 2007, a fim de reproduzir as características reais do sinistro, que foram estimadas baseadas em ensaios de difratometria de raios-x de amostras de pó de diversos elementos da estrutura, extraídas após a ocorrência do mesmo. A Figura 27 mostra a edificação antes do sinistro, bem como o modelo computacional desenvolvido para este estudo.

Figura 27 – Objeto de estudo de Ruschel (2011): (a) edificação real, antes do sinistro; (b) modelo desenvolvido no FDS



Fonte: Adaptado de Ruschel (2011)

Na simulação computacional, a carga de incêndio foi materializada através de caixas plástico (PVC) e espuma de poliuretano (materiais que representaram a maioria dos objetos presentes na edificação) espalhadas pela edificação. Para realizar a ignição do incêndio, uma pequena porcentagem da carga (0,001%) foi atribuída a um queimador (VENT) posicionado no

centro da loja em que houve o início do sinistro, desencadeando uma reação em cadeia e provocando a propagação gradual do fogo no interior da edificação.

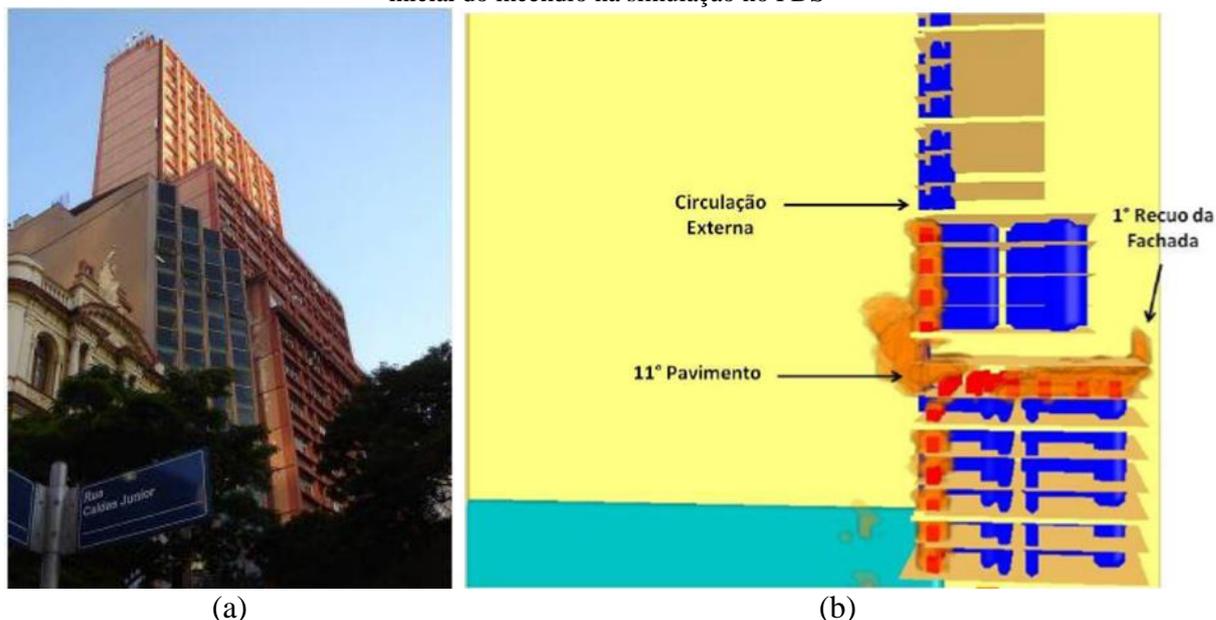
A autora relata que, durante o desenvolvimento do modelo computacional foi percebida uma carência de referencial bibliográfico contendo informações a respeito do desempenho e das características térmicas de diversos materiais presentes na edificação, e dos critérios a serem adotados nas simulações. Em virtude dessa dificuldade, “nas simulações realizadas todos os materiais foram considerados inertes, exceto o material combustível no interior da loja” (RUSCHEL, 2011).

Para o processamento desta simulação a autora dividiu o domínio computacional em duas malhas: uma com células de dimensões de 0,48 m x 0,48 m x 0,20 m (na região onde necessitava de uma maior precisão de resultados) e outra com dimensões de 1,02 m x 0,95 m x 0,20 m (no restante da edificação). Segundo Ruschel (2011), essa estratégia, dentre outras, foi adotada a fim de diminuir o custo computacional, possibilitando a utilização do recurso de processamento em paralelo do modelo.

Após a devida calibração do modelo, Ruschel (2011) afirma que os resultados obtidos se mostram coerentes com os indícios verificados na estrutura sinistrada, mostrando que, se os parâmetros forem ajustados adequadamente, a simulação computacional pode auxiliar na compreensão do comportamento de incêndios em diferentes cenários de uma edificação, sem o alto custo das instalações e equipamentos geralmente empregados em estudos experimentais.

Outro exemplo de reconstituição de incêndios é mostrado por Mazzoni (2015), que realizou um estudo com o objetivo testar a hipótese apontada por peritos da provável causa do sinistro ocorrido no Edifício Cacique, situado na cidade de Porto Alegre, RS, no ano de 1996. Para isso, o autor desenvolveu um modelo tridimensional do edifício no *software* AutoCad, importou esta geometria para o *software* PyroSim, e posteriormente realizou a simulação do incêndio no *software* FDS. A Figura 28 mostra o edifício analisado, bem como o modelo desenvolvido para realização da simulação computacional.

Figura 28 – Objeto de estudo de Mazzoni (2015): (a) edificação real antes do incêndio, (2) desenvolvimento inicial do incêndio na simulação no FDS



Fonte: Adaptado de Mazzoni (2015)

Nesta simulação, a carga de incêndio foi materializada por papel, madeira e espuma de polipropileno, materiais predominantes na edificação no momento do sinistro. A ignição foi realizada através de queimadores (VENTS), que receberam a atribuição de uma porcentagem da carga de incêndio total presente na edificação (0,01 %), posicionados nos locais apontados como foco do sinistro. Os demais materiais presentes na edificação “foram considerados inertes, para que não houvesse perda de calor para as paredes, tendo em vista que o foco principal era observar a dinâmica do fogo” (MAZZONI, 2015).

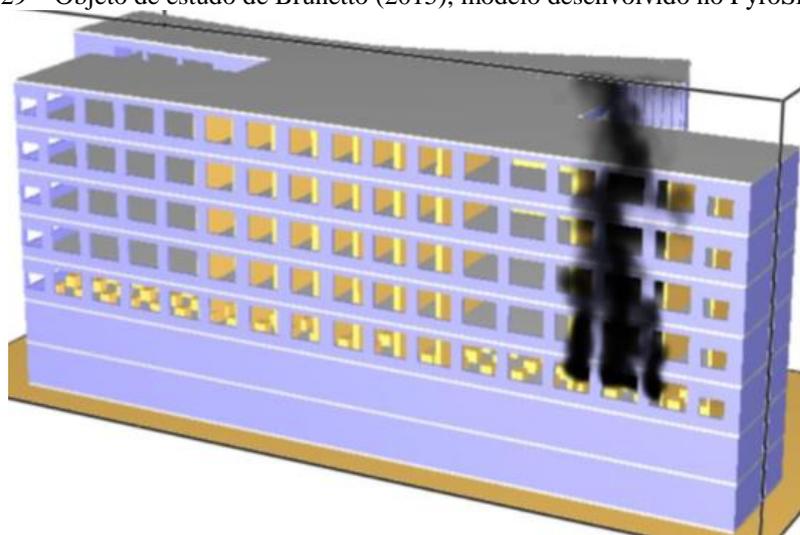
Quanto ao domínio computacional utilizado, a fim de avaliar o desenvolvimento do fogo através da fachada frontal, este foi estendido para além das dimensões da edificação, e foi dividido por uma malha de aresta de 46 cm (MAZZONI, 2015).

Com este estudo, Mazzoni (2015) concluiu que os resultados da simulação realizada no FDS foram coerentes com os danos provocados pelo incêndio ocorrido no edifício, confirmando a hipótese levantada pela perícia. Além disso, o autor observou que recuos existentes na fachada frontal da edificação bem como as circulações externas presentes em alguns pavimentos, contribuíram para o afastamento das chamas, evitando a propagação do incêndio para os andares superiores aos mesmos.

Para o autor o *software* FDS é uma ferramenta que pode auxiliar a produção de laudos técnicos sobre incêndios, uma vez que a visualização do comportamento do incêndio e dos resultados obtidos permite uma comparação com as informações colhidas junto às testemunhas, facilitando a análise das hipóteses formuladas (MAZZONI, 2015).

Visando um estudo prognóstico de incêndio em uma instituição de ensino superior através da simulação computacional no *software* FDS, Brunetto (2015) testou quatro situações hipotéticas para o acontecimento do sinistro, nas quais foram alteradas a localização do início do incêndio e a configuração de ventilação da edificação. Nestas simulações foram aferidas medições de temperaturas e liberação de energia, além dos dados visuais fornecidos pelo SMV, tais como: velocidade da movimentação do ar, movimento e propagação do fogo e da fumaça e perfis de temperaturas. A Figura 29 mostra o modelo computacional desenvolvido para este estudo.

Figura 29 – Objeto de estudo de Brunetto (2015), modelo desenvolvido no PyroSim / FDS



Fonte: Brunetto (2015)

Como pode-se observar na Figura 29, neste estudo, Brunetto (2015) adotou um domínio computacional também com dimensões maiores que as da edificação analisada. Quanto a dimensão da malha utilizada, o autor realizou testes para determinar a que resultasse em um bom processamento sem comprometer os resultados obtidos, concluindo que uma malha cúbica aresta de 25 cm seria adequada para a simulação pretendida.

Neste estudo, a materialização da carga de incêndio se deu através de blocos de papel com dimensões de 1,0 m x 1,0 m x 1,0 m. Para ignição, utilizou-se de um pequeno bloco de papel que entrou em combustão imediatamente no início da simulação, provocando uma reação cadeia que causou propagação do incêndio na edificação. As lajes e paredes da edificação foram consideradas como inertes na simulação. Segundo o autor, isso significa que esses elementos não participam da troca de calor e são elementos incombustíveis, além disso:

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 (BRUNETTO, 2015).

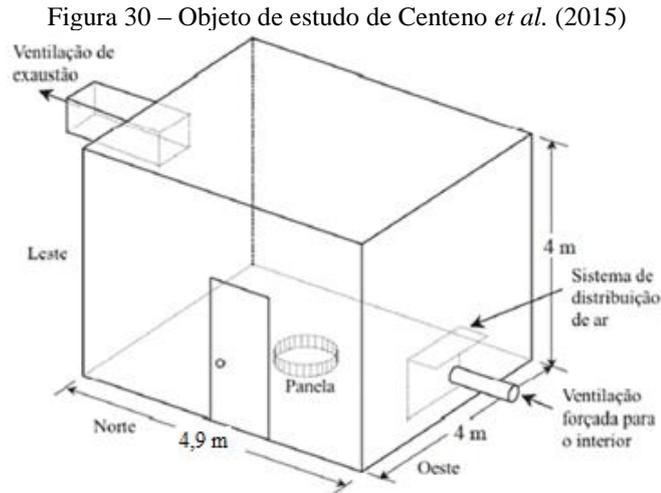
Com as simulações realizadas, Brunetto (2015) observou que em situações em que a edificação possuiria uma configuração de ventilação livre (com janelas abertas), a propagação do fogo ocorreria mais rapidamente do que em uma situação de janelas fechadas, resultando em um tempo de evacuação segura insuficiente para os usuários da instituição. Concluiu-se também que esta edificação não apresentaria segurança para a evacuação dos usuários em uma situação de incêndio, uma vez que toda a fumaça seria conduzida rapidamente para a escadaria do prédio (a única rota de saída da edificação).

Com este estudo, o autor pôde observar a movimentação e propagação das chamas e da fumaça em toda a edificação estudada. Assim, foi possível apresentar algumas soluções que visam à segurança dos ocupantes da instituição de ensino em uma situação de incêndio, tais como: a implantação de sistemas de detecção de fumaça e alarme de incêndio e recomendação da locação de escadas e saída de emergências (BRUNETTO, 2015).

Sobre a validação das simulações computacionais, Centeno *et al.* (2015) desenvolveram um modelo de um incêndio de poça (em inglês *pool fire*) confinado em um ambiente residencial baseado em um trabalho experimental encontrado na literatura, cujo objetivo foi comparar as medições de temperatura ao longo do tempo e demonstrar a confiabilidade dos resultados obtidos através da simulação computacional de incêndios no FDS.

Para os autores, “o FDS é recomendado por sua grande variedade de aplicações em proteção contra incêndios ou problemas térmicos com escoamento de fluidos”, apresentando um modelo de combustão eficiente que descrevem satisfatoriamente a propagação do fogo em edifícios (CENTENO *et al.*, 2015).

A simulação numérica realizada foi baseada em um estudo experimental apresentado por Brohez *et al.* (2004 apud CENTENO *et al.*, 2015), que consistiu em um experimento realizado em um ambiente habitacional com ventilação forçada e sistema de exaustão, com paredes, piso e forro estruturado em concreto com espessura de 2 cm, sujeito a um incêndio de poça, cujo combustível foi piridina (calor de combustão de  $334,6 \times 10^5$  J/kg) (CENTENO *et al.*, 2015). A geometria deste experimento é mostrada na Figura 30.

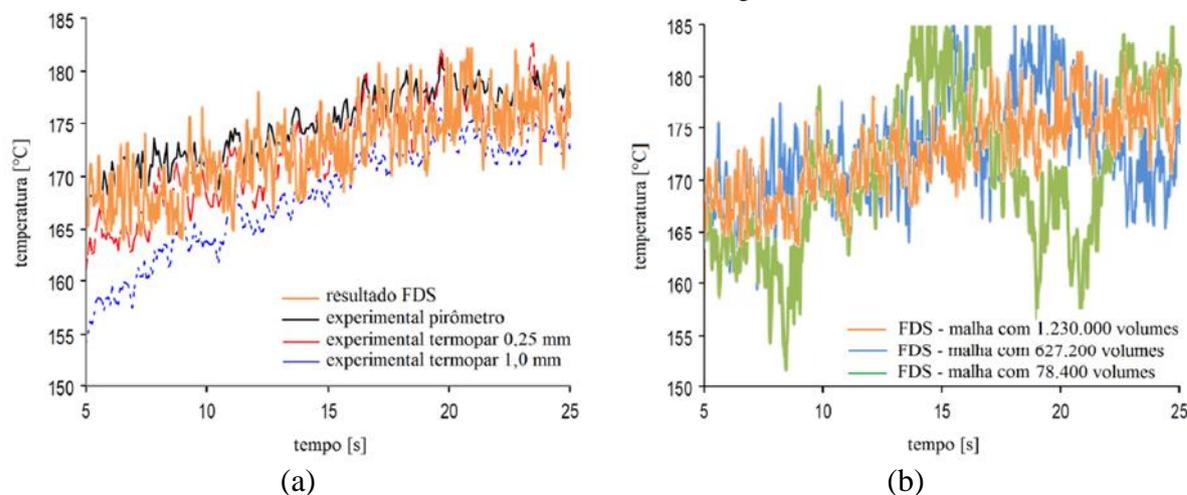


Fonte: Adaptado de Brohe *et al.* (2004 apud CENTENO *et al.*, 2015)

A “Panela” mostrada na Figura 30 foi posicionada no centro do compartimento, possuía 56,4 cm de diâmetro e serviu de recipiente para a piridina gerando uma energia de 150 kW. A ventilação forçada para o interior do compartimento foi realizada através de uma abertura com 20 cm de diâmetro é localizada a 40 cm acima do piso estabelecendo uma vazão de 280 m<sup>3</sup>/h, a ventilação de exaustão de ar foi realizada através de uma abertura com dimensões de 50 cm x 50 cm localizada na parede oposta a uma altura de 3,0 m. As medições foram aferidas com três tipos de sensores: pirômetro de sucção, termopar com junção de 0,25 mm de diâmetro, e termopar com junção de 1,0 mm de diâmetro (CENTENO *et al.*, 2015).

Para a simulação computacional deste experimento, Centeno *et al.* (2015) afirmam que “por se tratar de uma análise de dinâmica de fluidos computacional, é sempre importante a verificação da discretização geométrica do domínio físico em relação à quantidade de volumes de controle que este está sendo dividido”, sendo assim foram desenvolvidos três modelos com as seguintes malhas: malha refinada (com 1.230.000 volumes de 4 cm de aresta), malha média (com 627.200 volumes de 5 cm de aresta), e malha grosseira (com 78.400 volumes de 10 cm de aresta). Os resultados obtidos nas simulações são mostrados na Figura 31.

Figura 31 – Resultados obtidos por Centeno *et al.* (2015): (a) FDS (malha refinada) vs ensaio experimental; (b) FDS nas malhas refinada, média e grosseira



Fonte: Adaptado de Centeno *et al.* (2015)

Segundo Centeno *et al.* (2015), incêndios são compostos por diversos fenômenos físicos acoplados que tornam sua natureza fenomenologicamente oscilatória. Sendo assim, as flutuações nas medições de temperatura apresentadas tanto no estudo experimental quanto no modelo computacional representam esta natureza, demonstrando a capacidade do *software* de prever este tipo de fenômeno.

Com este estudo, Centeno *et al.* (2015) observaram que o perfil de temperatura obtido com o FDS com a malha refinada (Figura 31a) teve concordância com os resultados experimentais, demonstrando a capacidade do *software* em reproduzir o incêndio estudado. No entanto, os resultados obtidos através das malhas média e grosseria (Figura 31b) apresentaram oscilações maiores em relação ao estudo experimental, mostrando a importância do refinamento da malha no estudo de incêndios neste programa.

Ademais, Centeno *et al.* (2015) mostram os campos de temperaturas e de visibilidade no plano central do compartimento, e distribuição de fumaça no ambiente habitacional. Para os autores, estas informações são úteis em análises relativas ao posicionamento de utensílios combustíveis e projeto de exaustores dentro da habitação, estudo de evacuação da habitação e projeto de sistemas de detecção de fumaça.

Carlos *et al.* (2016), realizaram o estudo do desempenho do sistema de controle de fumaça de um edifício de 5 pavimentos, com ênfase na análise de um ambiente de grandes dimensões, conforme as normas portuguesas EN 1037-1 (2002) e EN 1991-1-4 (2010), Decreto-Lei de Portugal n° 220 (2008), Portaria n° 1532 (2008), e a norma francesa IT-246 (2004), além de determinar o tempo de evacuação de pessoas desta edificação em situação de incêndio

utilizando o método de cálculo proposto por Nelson & MacLennan (1995 apud CARLOS *et al.*, 2016).

Posteriormente os autores realizaram uma análise numérica do escoamento de fumaça desta edificação em situação de incêndio com o auxílio do *software* FDS, a fim de se determinar o *Fractional Effective Dose* (FED), um índice que determina as condições de incapacitação de uma pessoa dependendo da concentração de gases provenientes dos produtos do incêndio (CARLOS *et al.*, 2016), a visibilidade e a temperatura no ambiente.

Para Carlos *et al.* (2016) a realização do controle de fumaça em edificações é de suma importância para a preservação da vida, uma vez que a intoxicação pelos gases produzidos em um incêndio pode provocar a incapacitação dos ocupantes, dificultando a evacuação e em casos extremos provocando a morte dos mesmos. Com este estudo, os autores constaram que a legislação portuguesa apresenta ausência de informações específicas de valores para projeto de sistemas de controle de fumaça e, a partir da utilização do FDS, afirmam que o ambiente estudado merece análises mais criteriosas quanto à eficiência destes sistemas.

Mariani & Carlos (2016) desenvolveram um estudo de evacuação em uma edificação de dois pavimentos destinada ao uso de um restaurante, localizado na cidade de Brasília. Para isso foram considerados os cenários da edificação sob a ação de incêndio em sua situação real, e a situação hipotética de dimensionamento de saídas de emergência conforme as prescrições normativas brasileiras e portuguesas. Sendo que, a determinação do tempo de evacuação foi realizada conforme o método de Nelson & MacLennan (1995 apud MARIANI & CARLOS, 2016) e simulação computacional com o uso dos *softwares* FDS e Evac. Além disso, os autores ainda fizeram verificações de temperaturas, camada de fumaça e FED desenvolvidas durante a simulação computacional.

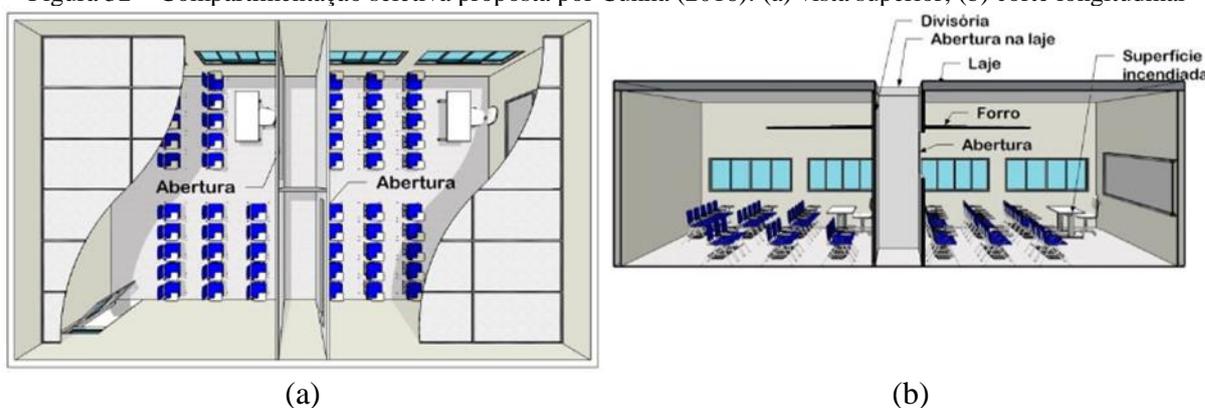
Com este estudo, Mariani & Carlos (2016) puderam identificar as principais diferenças na legislação brasileira e portuguesa, quanto aos cálculos de saídas de emergência deste tipo de edificação, além de comparar os resultados com os obtidos nas simulações computacionais. Com estes resultados os autores concluíram que as saídas de emergência na situação real da edificação se encontram em desacordo para ambas as normas.

Com as simulações realizadas, além de determinar o tempo de evacuação, os autores puderam estimar o número de vítimas fatais de um incêndio hipotético ocorrido nesta edificação. Esses resultados mostram que, mesmo atendendo as indicações das normas, ainda haveria vítimas fatais decorrentes do sinistro. Desta forma, Mariani & Carlos (2016) concluíram que uma evacuação segura em situação de incêndio não pode ser garantida somente pela

aplicação das prescrições normativas em relação ao número de saídas de emergência e quantidade de unidades de passagem.

A fim de efetuar melhorias na SCIE, Cunha (2016) desenvolveu uma pesquisa cujo objetivo foi analisar o desempenho da compartimentação horizontal seletiva. Para isso, o autor analisou, por meio de simulação no FDS, o desempenho de diversas configurações de compartimentação horizontal em um modelo representativo de uma sala de aula de um edifício padrão de dois pavimentos. Para o autor, a compartimentação é uma importante medida de proteção passiva capaz de confinar a ação do incêndio no ambiente de origem, e assim propiciar a garantia da segurança contra incêndio das edificações e seus ocupantes. A Figura 32 mostra o desenho esquemático da compartimentação seletiva proposta por Cunha (2016).

Figura 32 – Compartimentação seletiva proposta por Cunha (2016): (a) vista superior; (b) corte longitudinal



Fonte: Cunha (2016)

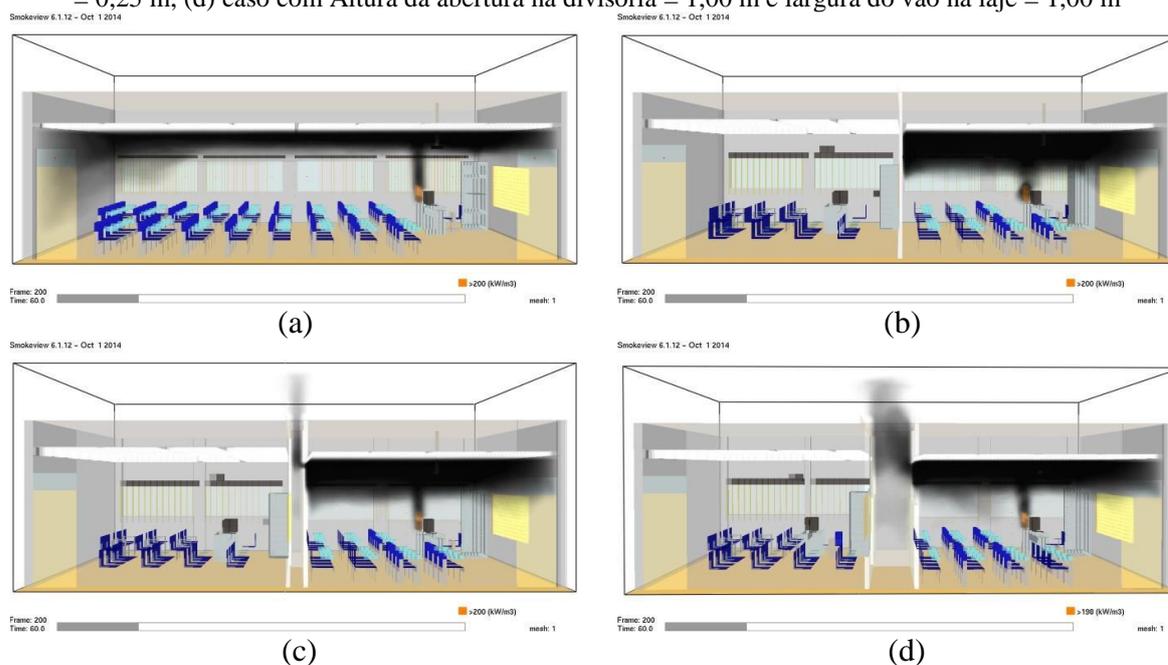
Neste estudo, Cunha (2016) faz diversas observações interessantes sobre o desenvolvimento de modelos computacionais no FDS. Dentre essas observações o autor afirma que “O sucesso de uma simulação em CFD está diretamente ligado à correta definição da malha” (CUNHA, 2016). Além disso:

Não há um valor exato a ser empregado no dimensionamento da malha e diversos fatores precisam ser considerados, tanto de ordem teórica quanto operacional. O procedimento usual é iniciar as simulações com malhas espaçadas e ir reduzindo as dimensões das células a cada nova simulação até que os resultados se estabilizem (MCGRATTAN *et al.*, 2014, p. 37). Para problemas típicos de arquitetura, células com dimensões entre 0,10 m e 0,05 m costumam apresentar resultados satisfatórios (CUNHA, 2016).

Para definição da dimensão da malha empregada em suas simulações, o autor realizou diversos testes de sensibilidade que o fizeram concluir que células cúbicas de 10 cm de aresta eram as mais adequadas para o modelo proposto, permitindo aproximar a simulação de uma situação real.

Neste estudo Cunha (2016), materializou o incêndio através de uma superfície queimante (VENT), com uma taxa de liberação de calor por área (em inglês, *Heat Release Rate Per Unit Area*, HRRPUA) constante, fixada sobre uma mesa localizada no interior do ambiente simulado, como pode-se observar na Figura 33.

Figura 33 – Alguns cenários analisados por Cunha (2016), simulação aos 180 s: (a) caso-base; (b) caso-base com uma divisória transversal central; (c) caso com Altura da abertura na divisória = 0,25 m e largura do vão na laje = 0,25 m; (d) caso com Altura da abertura na divisória = 1,00 m e largura do vão na laje = 1,00 m



Fonte: Adaptado de Cunha (2016)

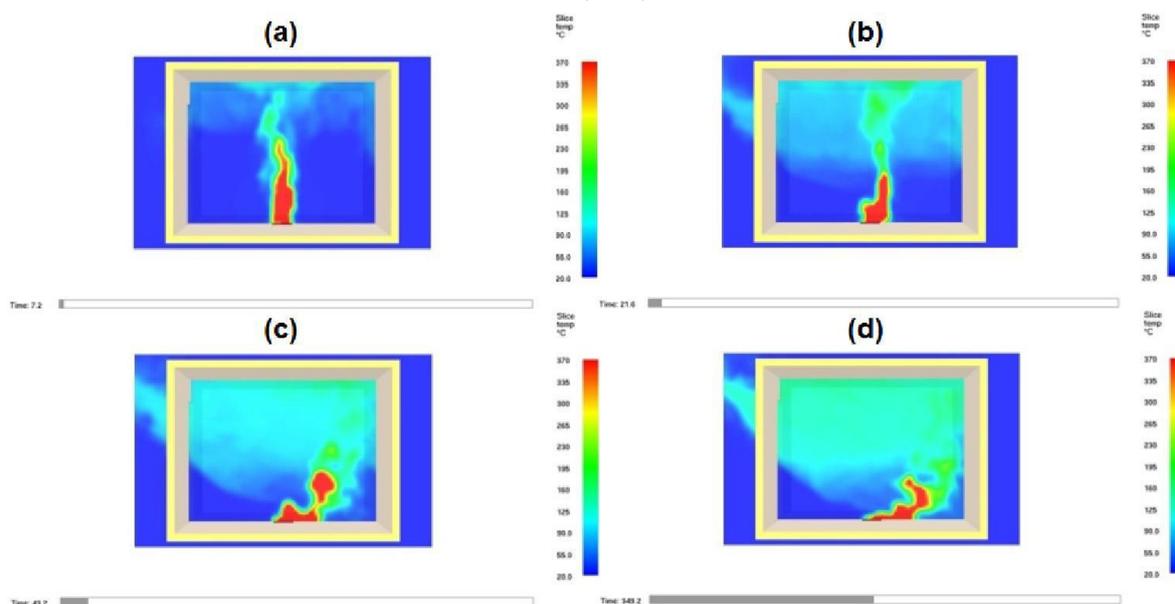
Com esta pesquisa, Cunha (2016) constatou que a compartimentação proposta, sobretudo no caso de aberturas maiores para exaustão, foi capaz de aumentar significativamente o tempo necessário para a camada de fumaça ocupar todo o ambiente incendiado. Em uma situação real, isto proporcionaria aos ocupantes da edificação um tempo maior de evacuação culminando em um maior número de vidas salvas durante estes sinistros.

Entretanto, para o autor, quanto mais o modelo computacional tenta reproduzir a realidade, mais ele se afasta da prática projetual arquitetônica: o tempo de processamento demasiado, a falta de interface gráfica para a entrada de dados e *templates* pré-definidos, exigindo um elevado grau de conhecimento teórico para a correta descrição dos fenômenos físicos envolvidos em um incêndio, se tornam os pontos negativos para o uso do FDS (CUNHA, 2016).

Kiryu (2017) desenvolveu um estudo cujo objetivo foi determinar a temperatura média na camada de gases quentes para diversos cenários de incêndio em um compartimento. Para isso, o autor desenvolveu um modelo no FDS baseado em um estudo experimental encontrado

na literatura, variando as dimensões das aberturas deste compartimento, e posteriormente comparou os resultados obtidos com valores obtidos experimental, analítica e empiricamente. A Figura 34 mostra um perfil de temperaturas obtido através do FDS em um dos cenários analisados neste estudo.

Figura 34 – Perfil de temperaturas obtido através do FDS em um dos cenários analisados no estudo de Kiryu (2017)



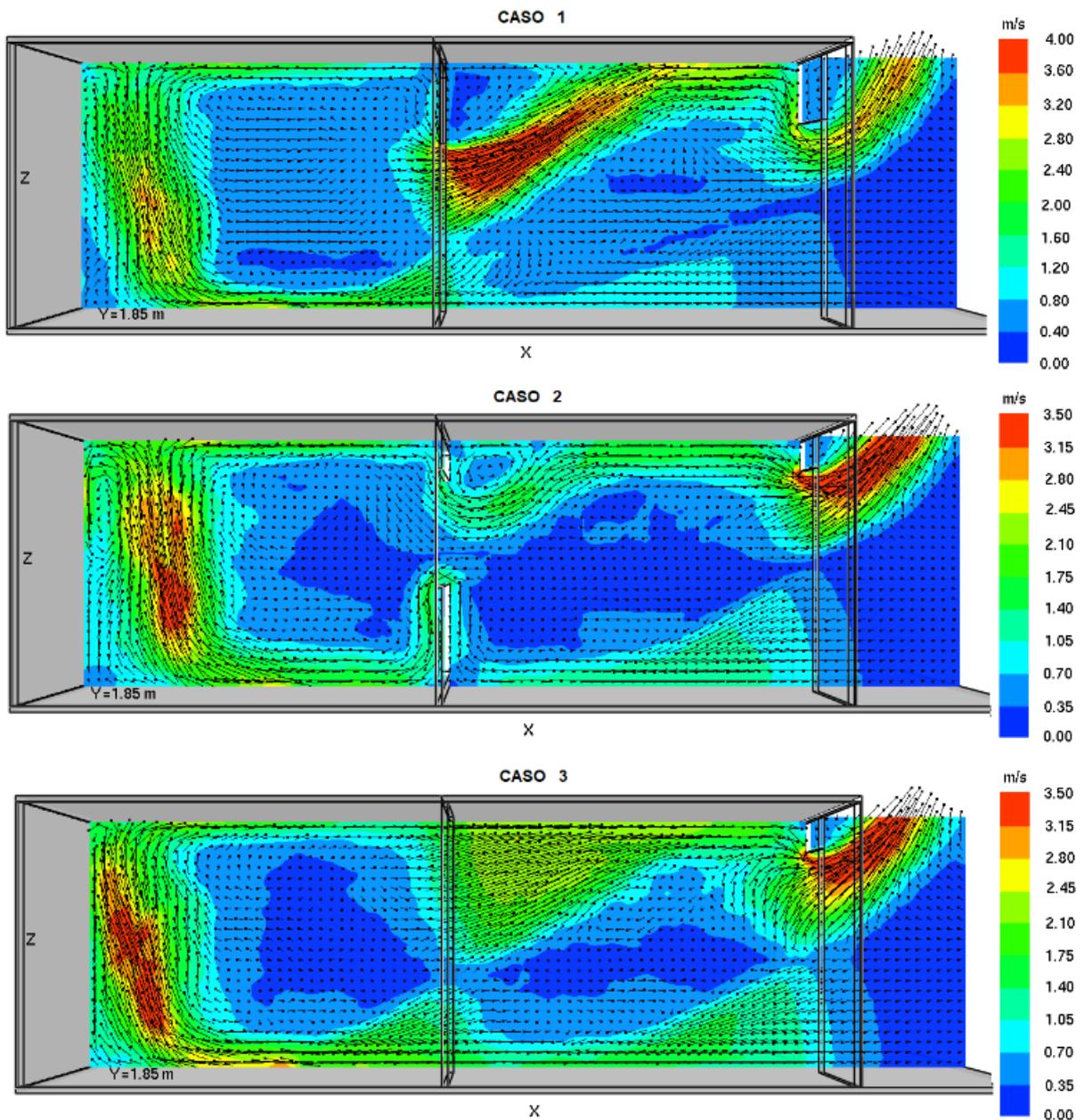
Fonte: Kiryu (2017)

Para o autor, “a temperatura da camada de gases quentes é um dos critérios mais importantes para a Engenharia de segurança contra incêndios” e “a maior compreensão do fenômeno do fogo possibilita a prevenção de ocorrência de incêndios e redução de danos a estruturas e à saúde humana” (KIRYU, 2017).

Com este estudo, Kiryu (2017) verificou que os modelos numéricos desenvolvidos no FDS produziram resultados mais próximos dos valores experimentais do que os resultados analíticos e empíricos, mostrando que este *software* é uma ferramenta útil para determinar as temperaturas desenvolvidas em incêndios dentro de compartimentos.

Matos (2017) desenvolveu um estudo cujo objetivo foi analisar a vazão mássica, provocada por incêndios, entre ambientes conjugados interligados por uma abertura, simulando uma situação comum em residências de arquitetura moderna. Para isso, o autor desenvolveu três modelos (cuja geometria dos ambientes foi baseada em um estudo experimental encontrado na literatura) com diferentes geometrias de aberturas entre os compartimentos e posteriormente comparou os resultados obtidos com valores obtidos experimental e analiticamente. Alguns dos resultados obtidos neste estudo são mostrados na Figura 35.

Figura 35 – Campo vetorial de velocidade dos gases obtidos através do *software* FDS no estudo de Matos (2017)



Fonte: Matos (2017)

Uma observação importante feita por Matos (2017) diz respeito a definição de propriedades dos materiais nas simulações realizadas no FDS. O autor verificou que os resultados de vazão mássica “têm uma pequena fonte de incerteza associada à condução de calor através das paredes” (MATOS, 2017). Assim, foram realizados testes atribuindo às paredes a propriedade de superfícies adiabáticas e isolamento perfeito (pré-definidas no FDS) a fim de “anular a influência errônea da condução de calor nos resultados finais” (MATOS, 2017). Entretanto os resultados obtidos com essas estratégias foram divergentes aos resultados experimentais, mostrando que as incertezas das propriedades e dimensões das paredes, causam

erros menores que os causados com a consideração de condições de contorno distantes dos casos reais.

Segundo Matos (2017), as pesquisas voltadas para estudos da vazão mássica entre compartimentos fechados são importantes, visto que, a grande maioria das fatalidades relacionadas a intoxicação por fumaça ocorrem em ambientes distantes do foco de incêndio. O autor observou que nos três casos analisados houve uma representatividade dos resultados experimentais pela simulação realizada no FDS. Para ele, a forma mais eficiente para análise de incêndios compartimentados é a associação de conhecimento teórico, simulação numérica e correlações específicas, baseadas em experimentos, para cada caso estudado.

Além destes trabalhos, Dolvitsch & Klein (2015) realizaram uma análise de três diferentes casos de estudos realizados com o auxílio dos *softwares* FDS, PyroSim e Evac, tanto a nível nacional, quanto internacional, e apresentaram possíveis aplicações especificamente comerciais para este tipo de ferramenta. Com isso, os autores demonstraram o potencial das ferramentas computacionais para a reprodução de incêndios reais, análise da eficiência do uso de *sprinklers* e, principalmente na simulação de evacuação de pessoas em caso de incêndio, uma vez que a realização deste tipo de ensaio real possui um alto risco à vida e elevado custo financeiro. Para os autores, apesar da validade dos resultados obtidos com a utilização dos *softwares* de simulação de incêndios ainda ser questionada (visto que estes foram desenvolvidas a partir de princípios teóricos simplificados), estas ferramentas vêm sendo amplamente utilizadas para reprodução de incêndios reais e sua eficácia está diretamente relacionada ao conhecimento do operador com relação à dinâmica de incêndios e às limitações do programa.

Desta forma, Dolvitsch & Klein (2015) concluíram que a simulação de evacuação de pessoas possibilita estimar a eficiência de rotas de fuga em edificações complexas, enquanto que a simulação do comportamento do incêndio pode auxiliar tanto na análise de diferentes geometrias de edificações (verificando a eficiência da compartimentação vertical e de outros sistemas passivos de combate a incêndios), quanto na verificação da melhor distribuição de *sprinklers* (com o objetivo de maximizar o combate em caso da ocorrência de sinistros e minimizar custos de instalação destes equipamentos), tornando-se umas das potenciais aplicações comerciais para este tipo de ferramenta.

A Tabela 1 mostra o resumo dos estudos realizados no Brasil com o auxílio do *software* FDS, enfatizando o tipo de análise (diagnóstica ou prognóstica), tipo das edificações estudadas, principais objetivos e validação das pesquisas.

Tabela 1 – Resumo dos estudos encontrados na literatura brasileira

<b>Autor (ano)</b>	<b>Tipo de análise</b>	<b>Tipo da edificação analisada</b>	<b>Principal objetivo do estudo</b>	<b>Validação</b>
Alves <i>et al.</i> (2008)	Prognóstico	Comercial	Determinar a influência da fumaça e da temperatura na evacuação de pessoas e a eficiência das orientações normativas	Não houve
Braga & Landim (2008)	Diagnóstico	Residencial	Determinar a causa mais provável do incêndio e testar hipóteses levantadas pela perícia	Caso real
Rodrigues (2009)	Prognóstico	Residencial e comercial	Analisar a eficiência do sistema de compartimentação vertical externa segundo as exigências das normas brasileiras	Ensaio experimental
Ruschel (2011)	Diagnóstico e prognóstico	Comercial (Shopping)	Reproduzir a dinâmica de incêndio e determinar as temperaturas desenvolvidas	Caso real
Fontenelle (2012)	Prognóstico	Tanques de combustível	Avaliar a segurança de tanques metálicos de armazenamento de etanol em situação de incêndio	Não houve
Carvalho (2013)	Prognóstico	Túneis rodoviários	Demonstrar a aplicabilidade do FDS para análise de segurança em túneis rodoviários em situação de incêndio	Não houve
Brunetto (2015)	Prognóstico	Instituição de ensino superior	Analisar a propagação do fogo e fumaça em uma situação hipotética de incêndio	Não houve
Mazzoni (2015)	Diagnóstico	Não informado	Determinar a causa mais provável do incêndio e testar hipóteses levantadas pela perícia	Caso real
Centeno <i>et al.</i> (2015)	Prognóstico	Residencial	Determinar as temperaturas desenvolvidas em um incêndio compartimentado	Ensaio experimental*
Cunha (2016)	Prognóstico	Instituição de ensino superior	Propor e analisar uma forma de compartimentação horizontal seletiva	Não houve
Carlos <i>et al.</i> (2016)	Prognóstico	Administrativo	Estudar o dimensionamento do sistema de controle de fumaça, de acordo com as condições prescritas na regulamentação e estimar do tempo de evacuação de pessoas	Não houve
Mariani & Carlos (2016)	Prognóstico	Restaurante e Áreas de apoio	Estudar o dimensionamento de saídas de emergência e determinar o tempo de evacuação de pessoas	Não houve

Hauser (2016)	Prognóstico	Tanques de combustível	Avaliar a influência que um tanque contendo óleo combustível em chamas tem sobre outro tanque adjacente considerado isolado pela ABNT NBR 17505-7	Não houve
Kiryu (2017)	Prognóstico	Não informado	Determinar a temperatura média na camada de gases quentes para diversos cenários de incêndio em um compartimento	Ensaio experimental* e modelos analíticos e empíricos
Matos (2017)	Prognóstico	Residencial	Analisar a vazão mássica, provocada por incêndios, entre ambientes conjugados interligados por uma abertura	Ensaio experimental* e modelos analíticos

\* ensaios experimentais não realizados pelos autores

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

A partir dos estudos apresentados constatou-se a grande variabilidade de aplicação deste *software* nas pesquisas realizadas no Brasil. Observa-se que a maioria dos estudos realizados estiveram voltados para o prognóstico de edificações, mostrando o potencial deste *software* no auxílio de prevenção de incêndios e proteção à vida de seus ocupantes. Entretanto, é notório que estudos que aliam a simulação computacional de incêndios à ensaios experimentais ainda são raros no país

### 2.3 RESUMO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentados os *softwares* FDS e OZone, alguns estudos que utilizaram o FDS como ferramentas para desenvolvimento de pesquisas voltadas para SCIE, e um estudo internacional que utilizou o OZone como ferramenta auxiliar.

Durante a realização da revisão de literatura de trabalhos que utilizaram algum *software* de simulação de incêndio, percebeu-se uma predominância de pesquisas que utilizaram o FDS como ferramenta auxiliar no desenvolvimento de estudos de SCIE. Sendo assim, este se tornou a principal ferramenta computacional analisada neste trabalho.

No panorama mundial, percebe-se que a grande maioria dos trabalhos utiliza o FDS em conjunto com ensaios experimentais para validação dos resultados e desenvolvimento de modelos mais fidedignos com edificações reais. Percebe-se também que muitos desses estudos são realizados em conjunto com o corpo de bombeiros local, visando o entendimento do comportamento de incêndios em edificações e a segurança desses profissionais no cumprimento de sua função.

No Brasil, dentre a literatura encontrada alguns pontos chamaram a atenção:

- Percebeu-se uma predominância de análises prognósticas, no entanto, há uma carência de ensaios experimentais que possam validar os modelos computacionais;
- Apenas um estudo (RODRIGUES, 2009), apresentou a realização de ensaios experimentais em conjunto com simulações computacionais no *software* FDS para validação dos resultados;
- Há uma carência de literatura que auxilie no desenvolvimento dos modelos no FDS, sobretudo no que diz respeito as propriedades térmicas e de combustão dos materiais presentes nas edificações;
- Apenas um estudo (CUNHA, 2016), disponibilizou em anexo ao trabalho o arquivo de entrada de dados no FDS. Observa-se que esta atitude pode ser de grande ajuda para pesquisadores que pretendem desenvolver modelos nesse *software*, sobretudo para aqueles que estão iniciando suas pesquisas e não possuem familiaridade com o mesmo.

Sobre os modelos computacionais desenvolvidos no FDS, as questões que parecem ser mais pertinentes são:

- Domínio computacional: todos os autores que apresentaram essa informação relatam que o domínio foi estendido para além das dimensões da edificação analisada, principalmente nas faces onde se localizavam as aberturas (portas ou janelas), a fim de avaliar o fluxo de fumaça e fogo através das mesmas. Salienta-se que essa consideração é indicada pelos próprios desenvolvedores do *software* em seu manual do usuário (McGRATTAN *et al.*, 2017a);
- Dimensão da malha:
  - Na literatura internacional os autores apresentam malhas com dimensões entre 5 cm e 10 cm. Segundo McGrattan *et al.* (1998 apud BYSTRÖM *et al.*, 2012) e Cunha (2016), para cenários comuns de incêndio em edificações, malhas de arestas de 10 cm são aceitáveis para as simulações no FDS, e costuma retornar resultados satisfatórios;
  - Na literatura nacional os autores são mais divergentes, apresentando malhas com dimensões que variam entre 3,5 cm e 1,02 m, sendo que alguns não apresentam essa informação;
- Propriedades dos Materiais:

- Na literatura internacional, os autores trazem as informações de propriedade de todos os materiais envolvidos nas simulações (combustíveis e incombustíveis), dando a entender que esse é um ponto importante a ser considerado nos modelos;
- Na literatura nacional, há uma divergência entre as opiniões dos autores: Rodrigues (2009), Ruschel (2011), Mazzoni (2015) e Brunetto (2015), afirmam que a não atribuição das propriedades térmicas de paredes, teto e piso nas simulações realizadas no FDS, ou seja, considerar esses elementos como inertes, não causa alterações nos resultados obtidos, resultando ainda na redução de tempo necessário para processamento dos modelos; Matos (2017) afirma que a consideração de propriedades distantes da realidade, acarretam em resultados errôneos; alguns autores não apresentam essa informação;
- Materialização da carga de incêndio: os autores que apresentam essa informação relatam que a materialização da carga de incêndio se dá, ou através da caracterização de objetos sólidos (geralmente madeira, papel, PVC ou espuma de polipropileno), ou através de transformação desta carga em superfícies queimantes (VENT). Sendo que, a caracterização de objetos sólidos combustíveis é uma das maiores dificuldades enfrentadas no desenvolvimento dos modelos:

Segundo o manual do usuário do FDS (McGRATTAN *et al.*, 2017a), o desenvolvimento de um incêndio é muito sensível às propriedades térmicas dos materiais pertencentes a simulação, e, mesmo conhecendo todas a propriedade desses materiais, os fenômenos físicos de interesse podem não ser corretamente simulados devido a limitações dos algoritmos ou resolução da malha do modelo;
- Ignição: os autores que apresentam essa informação costumam utilizar de superfícies queimantes (VENT) que liberam uma pequena porcentagem da carga de incêndio a fim de desencadear uma reação em cadeia provocando a propagação do incêndio;
- Custo computacional: os autores que apresentam essa informação, relatam que o tempo de processamento dos modelos costuma ser demasiado, se estendendo por horas e até dias;

- Outputs para obtenção de resultados: nos estudos encontrados, os autores costumam apresentar resultados de: temperaturas (obtidas através termopares); perfis de temperaturas, velocidade do fluxo de gases devido a convecção, pressão, etc. (obtidos através de planos de medição e visualizados no SMV); movimentação e propagação de fumaça e chamas (obtidos através das animações gráficas geradas pelo SMV).

Sobre os *softwares* de modelo de zonas, como o OZone e CFAST, apesar de não serem tão recorrentes na literatura, constatou-se que estes são capazes de descrever corretamente o comportamento da evolução de temperaturas dos gases em compartimentos.

Percebeu-se também que a utilização desses *softwares* é mais simples e intuitiva. Entretanto, os resultados obtidos são mais limitados, se comparados com as possibilidades proporcionadas pelo FDS.

A Tabela 2 mostra um resumo das principais características, bem como a recomendação de utilização de ambos os *softwares* com base no estudo realizado.

Tabela 2 – Resumo das principais características e comparação entre os *softwares* OZone e FDS

	<b>OZone</b>	<b>FDS</b>
<b>Licença</b>	Gratuita	Gratuita
<b>Propósito</b>	Cálculo de temperaturas dos gases e em elementos de aço em situação de incêndio	Cálculo de temperaturas dos gases e em elementos sólidos, visualização da propagação do fogo e movimentação da fumaça, etc.
<b>Modelo</b>	Zonas (definição dos parâmetros e cálculos segundo o EN 1991-1-2)	CFD (resolve numericamente as equações diferenciais parciais fundamentais do escoamento de fluidos)
<b>Nível de dificuldade de utilização</b>	Fácil utilização	Requer um nível de conhecimento mais elevado
<b>Entrada de dados</b>	Possui interface gráfica agradável e intuitiva	Não possui interface gráfica, a entrada de dados é realizada através de arquivos de texto (o PyroSim é uma interface gráfica comercial)
<b>Abrangência</b>	Possibilita a simulação de apenas um compartimento de cada vez	Possibilita a simulação de edificações completas
<b>Tempo de processamento</b>	Rápido (segundos)	Demasiado (dependendo da complexidade do modelo, as simulações podem demorar horas ou até dias)
<b>Resultados</b>	Apenas resultados tabulados, para a "zona quente" do compartimento	Resultados tabulados e imagens através do SMV, para qualquer ponto do domínio computacional
<b>Recomendações de utilização</b>	Determinação de temperaturas máximas atingidas nos gases em um compartimento durante um incêndio*; Análise de temperaturas desenvolvidas em elementos de aço durante um incêndio*; Suporte para calibração de modelos no FDS.	Determinação de temperaturas desenvolvidas em pontos específicos de uma edificação*; Análise da propagação do fogo e movimentação da fumaça em uma edificação; Análises de edificações completas.

\* Esses dados podem servir de entrada para análise do comportamento mecânico de elementos estruturais em outros *softwares*, como por exemplo, o Abaqus, ANSYS e similares.

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

### 3 ESTUDO DE CASO 01

Como visto no capítulo anterior, a grande maioria dos estudos brasileiros tem utilizado o FDS como ferramenta para simulação de incêndios em edificações sem que haja uma validação destes com ensaios experimentais.

Neste contexto, e, compartilhando da opinião exposta por Byström *et al.* (2012), sobre a importância de estudos experimentais para validação dos modelos desenvolvidos neste *software*, a fim de avaliar a eficácia e limitações da utilização do FDS para simulação de incêndios em edificações, neste capítulo será apresentado o desenvolvimento de um modelo computacional baseado no estudo experimental apresentado por Teixeira *et al.* (2012).

Complementarmente, para comparação dos resultados de temperaturas e taxa de liberação de calor (HRR), uma simulação deste mesmo experimento foi reproduzida no *software* OZone.

Para realização das simulações foi utilizado os *softwares* FDS versão 6.5.3 (McGRATTAN, 2017a) e, OZone versão 2.2 (CADORIN *et al.*, 2001), instalados em um *desktop* com processador Intel® Core™ i7 3.40 GHz e 16.0 GB de memória RAM.

#### 3.1 MODELO DESENVOLVIDO NO SOFTWARE FDS

O desenvolvimento do modelo no FDS se deu com o objetivo de reproduzir da melhor forma possível o experimento de Teixeira *et al.* (2012).

No decorrer deste capítulo, serão comentados alguns pontos considerados mais relevantes no desenvolvimento deste modelo. O arquivo de entrada de dados completo encontra-se no “APÊNDICE A” deste trabalho.

##### 3.1.1 Domínio computacional e malha

Para o cenário analisado, considerou-se um domínio computacional com as seguintes dimensões: 6,4 m de comprimento (eixo x), 3,6 metros de profundidade (eixo y) e, 3,2 m de altura (eixo z), com uma malha cúbica de 10 cm, totalizando 73.728 elementos. Para definição deste domínio e das dimensões da malha no FDS foi inserida no arquivo de entrada através da *namelist* MESH com a seguinte linha de comando:

```
&MESH IJK=64,36,32, XB=-0.5,5.9,-0.5,3.1,-0.1,3.1 /
```

As dimensões da malha foram assim definidas por dois motivos: (i) limitação computacional: uma malha mais refinada foi testada (com arestas de 5 cm), entretanto, o tempo

requerido para o processamento do modelo foi muito acima do praticável; (ii) na revisão da literatura essa dimensão foi a mais indicada pelos autores.

No FDS, “por padrão, os limites externos do domínio computacional são assumidos como sendo um limite sólido que é mantido à temperatura ambiente” (McGRATTAN *et al.*, 2017a, tradução nossa), semelhante a uma parede inerte. Sendo assim, nos extremos máximos e mínimos dos eixos x e y, e no extremo máximo do eixo z foram criadas superfícies abertas denominadas OPEN VENTS indicando uma abertura passiva para o lado exterior do domínio computacional, garantindo desta forma que haja comunicação entre os ambientes interno e externo e alimentação do incêndio com oxigênio. Esta definição foi inserida no arquivo de entrada através das seguintes linhas de comando:

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

A extrapolação da malha para além das dimensões do *container* é justificada pela presença da porta e da janela abertas para o exterior do compartimento e, pelo fato de que, segundo McGrattan *et al.* (2017a), as OPENS VENTS geralmente possuem condição de limite de pressão imperfeita e, neste caso é recomendado que se estenda o domínio alguns metros a fim de não afetar o padrão de fluxo desta região.

### 3.1.2 Condições ambientais iniciais

Algumas condições ambientais foram consideradas, tais como: temperatura ambiente inicial de 20,0 °C, pressão atmosférica de 101.325,0 Pa e, umidade relativa do ar de 50%, ambos atribuídos na *namelist* MISC, responsável pela entrada de parâmetros globais variados no FDS. Não foi considerado o fluxo inicial devido ao vento. Esses parâmetros foram inseridos no arquivo de entrada através das seguintes linhas de comando:

```
&MISC TMPA=20.0
      P_INF=101325.0
      HUMIDITY=50.0 /
```

### 3.1.3 Propriedades térmicas e de combustão dos materiais

No FDS, por padrão, ao serem inseridos em um modelo, todos os objetos (chamados de obstruções) são considerados como inertes, com a temperatura fixada na temperatura ambiente inicial (TMPA) durante toda a simulação. Para que um objeto tenha sua temperatura

influenciada pelo ambiente, é necessário que suas propriedades sejam definidas através dos *namelist* MATL e SURF (McGRATTAN *et al.*, 2017a).

Para definir as propriedades de um sólido, o usuário deve criar uma superfície (através da *namelist* SURF) que pode ser composta de camadas de diferentes espessuras e materiais. As propriedades desses materiais são definidas na *namelist* MATL, que deve ter uma identificação (ID) para que possa ser associado a uma superfície (McGRATTAN *et al.*, 2017a).

As propriedades térmicas dos materiais utilizados nas simulações foram as mesmas indicadas por Teixeira *et al.* (2012). Apenas da madeira que, por falta de dados, teve suas propriedades definidas baseadas nas bibliografias e normas existentes. Salienta-se que todas as propriedades de todos os materiais foram admitidas constantes nas simulações.

A Tabela 3 mostra as propriedades dos *materiais* empregados neste modelo.

Tabela 3 – Propriedades térmicas dos materiais empregados no modelo computacional

<b>Material</b>	<b>Densidade (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Emissividade</b>	<b>Condutividade Térmica (W/m.K)</b>	<b>Calor específico (kJ/kg.K)</b>
Madeira	400,0 (1)	0,90 (*)	0,120 (1)	1,34 (1)
Gesso	1150,0	0,80	0,485	1,00
Azulejo	2000,0	0,80	1,200	1,00
Lã de rocha 1	40,0	0,80	0,037	1,03
Lã de rocha 2	175,0	0,80	0,040	1,03

(\*) adotado  
(1) ABNT NBR 15220-2 (2005)

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

As propriedades citadas nesta tabela foram inseridas no arquivo de entrada através da *namelist* MATL. No caso dos materiais incombustíveis, as seguintes linhas de comando foram inseridas:

```
&MATL ID='GESSO'
  DENSITY=1150.0
  CONDUCTIVITY=0.485
  SPECIFIC_HEAT=1.0
  EMISSIVITY=0.80 /
```

Quanto à modelagem de objetos sólidos combustíveis no FDS, o usuário pode optar entre duas maneiras: (i) a primeira, e mais simples, é especificar o calor de combustão, juntamente com uma taxa de liberação de calor por unidade de área (HRRPUA) e temperatura de ignição do material; (ii) a segunda, e mais complexa, é especificar um calor de reação, juntamente com outros parâmetros térmicos e de combustão do material.

Devido à escassez de dados relativos à madeira, neste modelo optou-se pela utilização da primeira alternativa, sendo esta a maneira mais simples pois, não necessita a inserção de muitos parâmetros referentes ao material combustível presente no modelo.

Assim, considerou-se que esse material possui um calor de combustão de 17500 kJ/kg, como sugerido por NP EN 1991-1-2 (2010), e atribuiu-se à sua superfície uma HRRPUA de 100 kW/m<sup>2</sup>, admitido conforme estudo realizado por Rocha (2014), e, temperatura de ignição de 210 °C, conforme estudo realizado por Figueroa & Moraes (2009).

O calor de combustão, é utilizado pelo FDS para calcular o calor total liberado pelo objeto, a HRRPUA indica ao *software* o quão rápido esse objeto queimará, e a temperatura de ignição indica quando (quando atingir determinada temperatura) esse objeto entrará em combustão.

Ressalta-se que, para este modelo, a HRRPUA e a temperatura de ignição são propriedades essenciais para a determinação do comportamento do incêndio. Devido a variabilidade<sup>2</sup> dos valores dessas propriedades, diversos testes de calibração foram realizados até se chegar aos valores adotados.

O calor de combustão é um parâmetro que é inserido no arquivo de entrada como parte do material (através da *namelist* MATL), enquanto a HRRPUA e a temperatura de ignição são inseridas como parte de uma superfície (através da *namelist* SURF), para isso, as seguintes linhas de comando foram inseridas:

```
&MATL ID='MADEIRA'  
    SPECIFIC_HEAT=1.34  
    CONDUCTIVITY=0.12  
    EMISSIVITY=0.9  
    DENSITY=400.0  
    HEAT_OF_COMBUSTION=17500.0 /  
  
&SURF ID='MAD'  
    COLOR='BROWN'  
    BURN_AWAY=.TRUE.  
    BACKING='EXPOSED'  
    MATL_ID='MADEIRA'  
    THICKNESS=0.1  
    IGNITION_TEMPERATURE=210  
    HRRPUA=100 /
```

---

<sup>2</sup> Figueroa & Moraes (2009) mostram que a temperatura considerada como a temperatura de ignição da madeira tem um valor que varia entre 200 °C e 280 °C; Rocha (2014) realizou um estudo experimental sobre as propriedades de combustão das madeiras maciças brasileiras, chegando à conclusão que a taxa de liberação de calor desse material possui valor em torno de 100 kW/m<sup>2</sup> a 200 kW/m<sup>2</sup>.

Destas linhas: “BURN\_AWAY=.TRUE.” indica ao FDS que o objeto deve desaparecer da simulação conforme for consumido; “THICKNESS” é a espessura do material, utilizada pelo *software* para os cálculos de, entre outros, consumo (no caso de materiais combustíveis) e condução de calor pelo o objeto; “BACKING='EXPOSED'” indica ao FDS que calcule a condução de calor através de todo a “THICKNESS” (essa condição é indicada para objetos que não estão na borda do domínio) (McGRATTAN *et al.*, 2017a).

Para definição das paredes, teto e piso, algumas superfícies foram criadas sendo compostas dos materiais pertencentes a cada obstrução, de acordo com as informações de Teixeira *et al.* (2012).

A Tabela 4 mostra o resumo das superfícies criadas para o modelo desenvolvido.

Tabela 4 – Superfícies das obstruções presentes no modelo computacional

Superfície	Material (camadas)	Espessura (m)	Temperatura de ignição (°C)	Taxa de liberação de calor por área (kW/m <sup>2</sup> )
Parede	Gesso	0,025	-	-
	Lã de rocha 1	0,05		
Teto	Gesso	0,025	-	-
	Lã de rocha 1	0,05		
Piso	Azulejo	0,005	-	-
	Lã de rocha 2	0,05		
Mad	Madeira	0,1	210,0	100,0
Mad_hot	Madeira	0,1	0,0	200,0

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Ressalta-se que as espessuras das camadas dos materiais que compõe os sólidos independem das dimensões da malha adotada.

### 3.1.4 Gás combustível

Nas simulações de incêndios feitas no FDS, é necessária a definição de um combustível gasoso que atuará como um substituto para todas as fontes de combustível em potencial. Assim, no caso de um modelo de química simples (caso esta reação não esteja definida na biblioteca padrão do *software*) o usuário pode especificar a fórmula química do combustível gasoso junto com os rendimentos de monóxido de carbono (CO), fuligem e outros parâmetros referentes ao mesmo. Neste caso, programa assumirá que esses parâmetros serão gerados em proporção direta à taxa de liberação de calor do combustível (McGRATTAN *et al.*, 2017a).

Considerando que a madeira foi o único material combustível presente no experimento, neste modelo a formulação química do combustível foi definida como  $\text{CH}_{1,7}\text{O}_{0,74}\text{N}_{0,002}$ , e foram definidos rendimentos CO e fuligem de 0,004 kg/kg e 0,015 kg/kg respectivamente, como

indicado por Tewarson (2008 apud WEINSCHENK *et al.* 2014). Além disso, atribuiu-se a esse gás a propriedade de calor de combustão de 17500 kJ/kg, como sugerido por NP EN 1991-1-2 (2010). Esses parâmetros foram inseridos no arquivo de entrada através das seguintes linhas de comando:

```
&SPEC ID='wood', FORMULA='CH1.700.74N0.002' /  
&REAC ID='WOOD'  
      FUEL='wood'  
      SOOT_YIELD=0.015  
      CO_YIELD=0.004  
      HEAT_OF_COMBUSTION=17500.0 /
```

### 3.1.5 Ignição do incêndio

No experimento desenvolvido por Teixeira *et al.* (2012) a ignição das pilhas foi feita através de um trilho de aço envolvido por lã cerâmica embebida com álcool sob as pilhas de madeira.

No modelo desenvolvido no FDS, para desencadear o processo de queima das pilhas de madeira considerou-se que um dos caibros da pilha do centro do compartimento entraria em combustão imediatamente ao início da simulação. Para isso, criou-se uma superfície com temperatura de ignição de 0 °C e, para acelerar o processo de queima, considerou-se que sua HRRPUA é de 200 kW/m<sup>2</sup>. Assim, com o aumento de temperatura, os demais caibros entram em ignição ao atingirem suas respectivas temperaturas de ignição, provocando uma reação em cadeia e a propagação do incêndio pelo compartimento.

### 3.1.6 Geometria

A representação das paredes, teto, piso e pilhas de madeira se deu através da modelagem de obstruções (*namelist* OBST) cuja geometria e distribuição no ambiente foram devidamente ajustadas com a malha adotada para que se assemelhem o máximo possível com o experimento. Assim, todos os objetos sólidos presentes nesta simulação foram modelados com dimensões múltiplas de 10 cm.

Para compatibilizar as dimensões dos caibros de madeira, estes foram modelados com dimensões de 1,0 m x 0,1 m x 0,1 m, também distribuídos em três pilhas que corresponderam a uma densidade de carga de incêndio total de 500 MJ/m<sup>2</sup>, referente ao terceiro ensaio experimental realizado por Teixeira *et al.* (2012).

### 3.1.7 Aberturas

As aberturas da janela e da porta são inseridas no modelo através da *namelist* HOLE.

No caso da janela, como esta permaneceu totalmente aberta durante o experimento, foi inserida uma abertura de 0,7 m x 0,7 m com peitoril de 1,3 m, posicionada analogamente a mesma no ensaio experimental.

No entanto, a impossibilidade de representar obstruções rotacionadas no FDS fez com que a consideração da porta semiaberta fosse feita através da inserção de uma abertura com largura menor que a original, ou seja, com dimensões de 0,3 m x 2,0 m posicionada analogamente ao experimento.

### 3.1.8 Outputs

Para obtenção dos resultados da simulação, alguns medidores pontuais de temperaturas foram posicionados no interior do compartimento (inseridos através da *namelist* DEVC) analogamente aos termopares no experimento analisado. Para garantir o registro das temperaturas dos gases, esses medidores foram posicionados 10 cm afastados de todas as obstruções do compartimento.

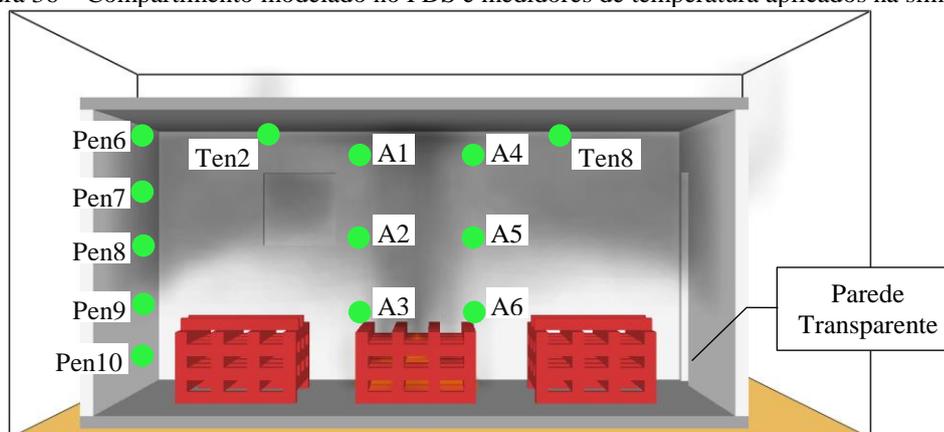
Complementarmente, foram inseridos dois planos de medição de temperaturas, denominados *slice* (inseridos através da *namelist* SLCF), sendo: um posicionado longitudinalmente ao compartimento, entre as pilhas de madeira e a parede que contem a janela e passando no meio da porta; e o outro posicionado transversalmente ao compartimento, passando no meio da janela.

Ressalta-se que os medidores inseridos na simulação através da *namelist* DEVC retornam resultados tabulados, enquanto os medidores inseridos através da *namelist* SLCF retornam resultados de visualização gráfica através do SMV.

### 3.1.9 Modelo desenvolvido

A Figura 36 mostra o compartimento e os caibros de madeira modelados no FDS, bem como os termopares considerados, baseados no ensaio experimental de Teixeira *et al.* (2012). Nesta figura também é possível visualizar que a parede oposta a janela foi considerada transparente, para a visualização da dinâmica do incêndio dentro do compartimento. As chamas e a fumaça emanando da pilha de madeira central indica o início da simulação.

Figura 36 – Compartimento modelado no FDS e medidores de temperatura aplicados na simulação



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Uma observação interessante a ser feita sobre o desenvolvimento de simulações de incêndio no FDS é que muitos *outputs* não são pré-definidos. Apesar de algumas informações serem geradas automaticamente, os dados de temperaturas nos gases (tanto pontual quanto em planos), temperaturas em objetos, velocidade do ar, e muitos outros, só serão capturados na simulação se o usuário introduzir os dispositivos de medição no modelo.

Esquecer de colocar um termopar no modelo, por exemplo, implica em perder a informação que seria capturada pelo dispositivo. Caso o usuário deseje obter esse dado, terá que voltar ao arquivo de entrada de dados, posicionar o termopar no modelo e, processar novamente a simulação.

Alguns ajustes pequenos podem ser feitos durante o processamento, entretanto, os dados gerados no tempo de simulação já processado são perdidos (no caso de posicionar um termopar ou qualquer outro dispositivo no modelo após o processamento ter iniciado). Uma forma de fazer isso é introduzir no arquivo de entrada um comando que faz com que o FDS crie arquivos de *restart* durante o processamento das simulações. Assim, caso seja necessário, o usuário pode pausar o processamento, fazer pequenos ajustes, e continuar simulação do último ponto de *restart* criado. Ressalta-se que esse recurso só é ativado no *software* se o usuário o introduzir no arquivo de entrada. Isso pode ser feito através da seguinte linha de comando:

```
&DUMP DT_RESTART=10.0 /
```

Neste caso, é solicitado ao programa que crie um arquivo de *restart* a cada 10 segundos de processamento. Para iniciar um *restart* o usuário deve acrescentar a seguinte linha de comando no arquivo de entrada:

```
&MISC ESTART=.TRUE. /
```

Esse artifício também é útil no caso de queda de energia, ou se o usuário desejar desligar o computador antes do final do processamento, pois, se isso acontecer e não houver um arquivo de *restart* criado, para finalizar a simulação, o processamento deverá ser executado desde o início novamente.

Diante desses impasses, aconselha-se que para o desenvolvimento de um modelo no FDS seja realizado um “plano de simulação”, semelhante ao “plano experimental” de ensaios de experimentais. Assim, o usuário pode planejar melhor as etapas de desenvolvimento do modelo, evitando esquecimentos ou imprevistos indesejados.

### 3.1.10 Situações propostas

Desenvolvido o modelo computacional, para comparação e análise das informações adquiridas da revisão da literatura, foram admitidas duas situações para as simulações:

- (i) Situação 1: todas as obstruções, com exceção das pilhas de madeira, foram consideradas inertes;
- (ii) Situação 2: todas as obstruções receberam suas respectivas propriedades conforme o indicado nas Tabela 3 e Tabela 4.

Para ambas as situações o tempo de simulação estabelecido foi de 120 minutos.

## 3.2 MODELO DESENVOLVIDO NO *SOFTWARE* OZONE

Para realização da simulação do incêndio no OZone a descrição do *container* se deu através das dimensões da geometria e aberturas mostradas na Figura 24b, e as propriedades térmicas e espessuras das camadas das paredes, teto e piso, foram atribuídas de acordo a Tabela 3 e Tabela 4.

Salienta-se que a Situação 1 proposta para a simulação no FDS não foi executada no OZone, uma vez que não há a opção de considerar as paredes, teto e piso do compartimento como inertes, desta forma, apenas a Situação 2 proposta foi simulada neste *software*.

Para modelar o incêndio considerou-se as indicações de Teixeira *et al.* (2012) e alguns parâmetros de acordo com as indicações da NP EN 1991-1-2 (2010) para Escritório como tipo de ocupação, conforme mostrado na Tabela 5.

Devido ao modelo desenvolvido no FDS não ter contemplado a produção de carvão em decorrência da queima da madeira, para fins comparativos, na simulação realizada no OZone

adotou-se um fator de combustão ( $\delta_n$ ) igual a 1, indicando que o material combustível deve ser totalmente consumido pelo incêndio.

Tabela 5 – Parâmetros adotados na simulação do estudo de caso 1 realizada no *software* OZone

Área máxima de incêndio	10,0	m <sup>2</sup>
Elevação do fogo	1,00	m
Altura do combustível	0,50	m
Valor característico da densidade de carga de incêndio ( $q_{f,k}$ )	500	MJ/m <sup>2</sup>
Taxa de crescimento do incêndio	Média	-
Tempo necessário para atingir uma taxa de libertação de calor de 1 MW ( $t_a$ )	300	s
Taxa máxima de libertação de calor por metro quadrado (RHRf)	250	kW/m <sup>2</sup>
Perigo de ativação do fogo ( $\delta_{q,2}$ )	1,00	-
Fator de combustão ( $\delta_n$ )	1,00	-
Calor de combustão do combustível	17,50	MJ/kg
Modelo de combustão	Extended fire duration	

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Como parâmetros ambientais iniciais foram adotados apenas a temperatura ambiente de 20,0 °C e pressão atmosférica ao nível do mar de 101.325,0 Pa.

Os demais critérios foram mantidos de acordo com as configurações padrão do *software*.

Destaca-se que, por padrão, o OZone admite uma estratégia de combinação entre os modelos de uma e duas zonas. Desta maneira, no início da simulação o modelo comporta-se como duas zonas e, ao atingir o pleno desenvolvimento do incêndio, este evolui para uma zona, conforme mostrado no capítulo 2.

A entrada de dados completa dessa simulação encontra-se no “APÊNDICE B” deste trabalho.

### 3.3 RESULTADOS

#### 3.3.1 Tempo de processamento

O primeiro ponto observado nas simulações realizada no FDS diz respeito ao tempo de processamento, que foi de aproximadamente 33 horas para a Situação 1, e 52 horas para a Situação 2.

Isso indica que o pressuposto exposto por alguns autores citados na revisão da literatura (que a consideração das propriedades térmicas de todos os materiais presentes nos cenários de incêndio simulados no FDS aumenta o tempo requerido para o processamento dos modelos) pode estar correto. Entretanto, para que tal afirmação seja conclusiva, recomenda-se que mais testes sejam realizados.

No OZone, o tempo de processamento foi de apenas alguns segundos. Sendo assim, fica evidente que esta é uma das vantagens deste *software* frente ao FDS.

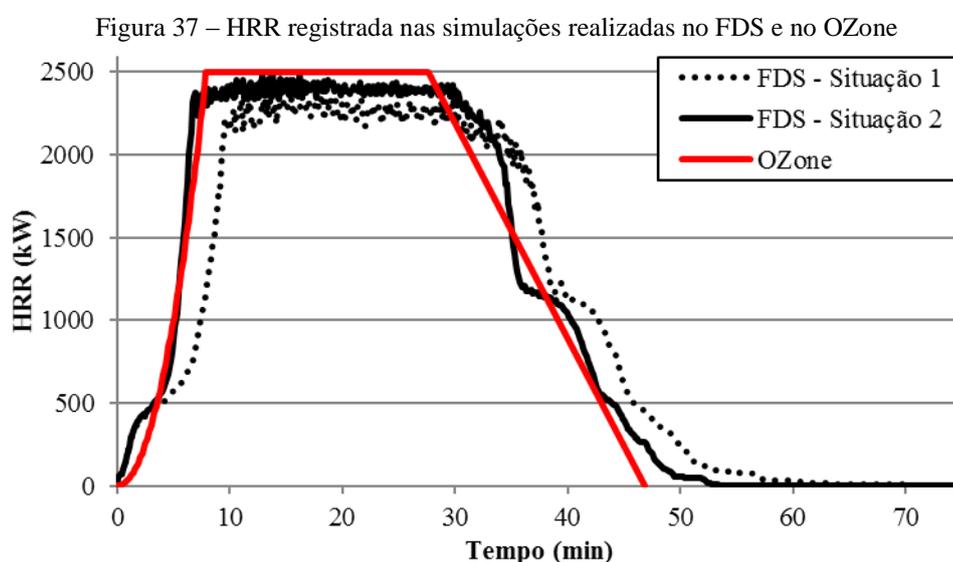
### 3.3.2 Taxa de liberação de calor (HRR)

A taxa de liberação de calor (HRR) é a quantidade de energia liberada por um combustível por unidade de tempo (NP EN 1991-1-2, 2010). Esta medida quantifica o tamanho do incêndio e é um dos poucos *outputs* que são gerados automaticamente pelo FDS.

No OZone este dado é calculado com base nos pressupostos do “Anexo E” da EN 1991-1-2, levando em consideração a densidade da carga de incêndio, o tipo de ocupação da edificação analisada, dentre outros parâmetros. Neste anexo é possível identificar que o cálculo da HRR é realizado para três fases: (i) fase de crescimento; (ii) fase estacionária; (iii) fase de arrefecimento.

Com este dado é possível verificar a energia total liberada na simulação, analisar o comportamento da liberação de calor, verificar o tempo requerido para consumo total da carga de incêndio, dentre outros.

A Figura 37 mostra a HRR registrada nas simulações da Situação 1 e Situação 2 no FDS e na simulação realizada no OZone (de acordo com os pressupostos da EN 1991-1-2).



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Analisando a HRR obtida através do OZone (calculada com base na EN 1991-1-2), constou-se que a fase de crescimento é limitada aos 8 minutos. Nesse momento inicia a fase estacionária com valor fixado em 2500 kW. Aos 28 minutos a fase estacionária termina, dando início à fase de arrefecimento. Nesse momento, 70 % da carga de incêndio presente no

compartimento foi consumida. Aos 47 minutos a carga de incêndio é totalmente consumida, dando fim a liberação de calor pelo combustível.

Analisando a HRR registrada nas simulações realizadas no FDS (Situação 1 e Situação 2), constatou-se um comportamento similar ao determinado analiticamente através do OZone.

Na Situação 1, a fase de crescimento é limitada aos 7 minutos. A partir deste momento até os 30 minutos de simulação, é mantida a fase estacionária, com valores em torno de 2400 kW. Aos 54 minutos a madeira é totalmente consumida.

Na Situação 2, a fase de crescimento é limitada aos 10 minutos. A partir deste momento até os 35 minutos de simulação, é mantida a fase estacionária, com valores em torno de 2250 kW. Aos 72 minutos a madeira é totalmente consumida.

Calculando a área abaixo do gráfico da HRR obtém-se a energia total liberada no incêndio. Com esse cálculo constatou-se que em todas as simulações realizadas a energia liberada foi igual a 100% da carga de incêndio considerada, ou seja, 5000 MJ.

Apesar do comportamento semelhante e de a energia total liberada ter sido a mesma em ambas as situações analisadas no FDS, a Situação 2 foi a que mais se aproximou dos valores calculados analiticamente através do OZone. Indicando que a consideração das propriedades das paredes, teto e piso, podem influenciar no comportamento do crescimento do incêndio.

### **3.3.3 Propagação do incêndio**

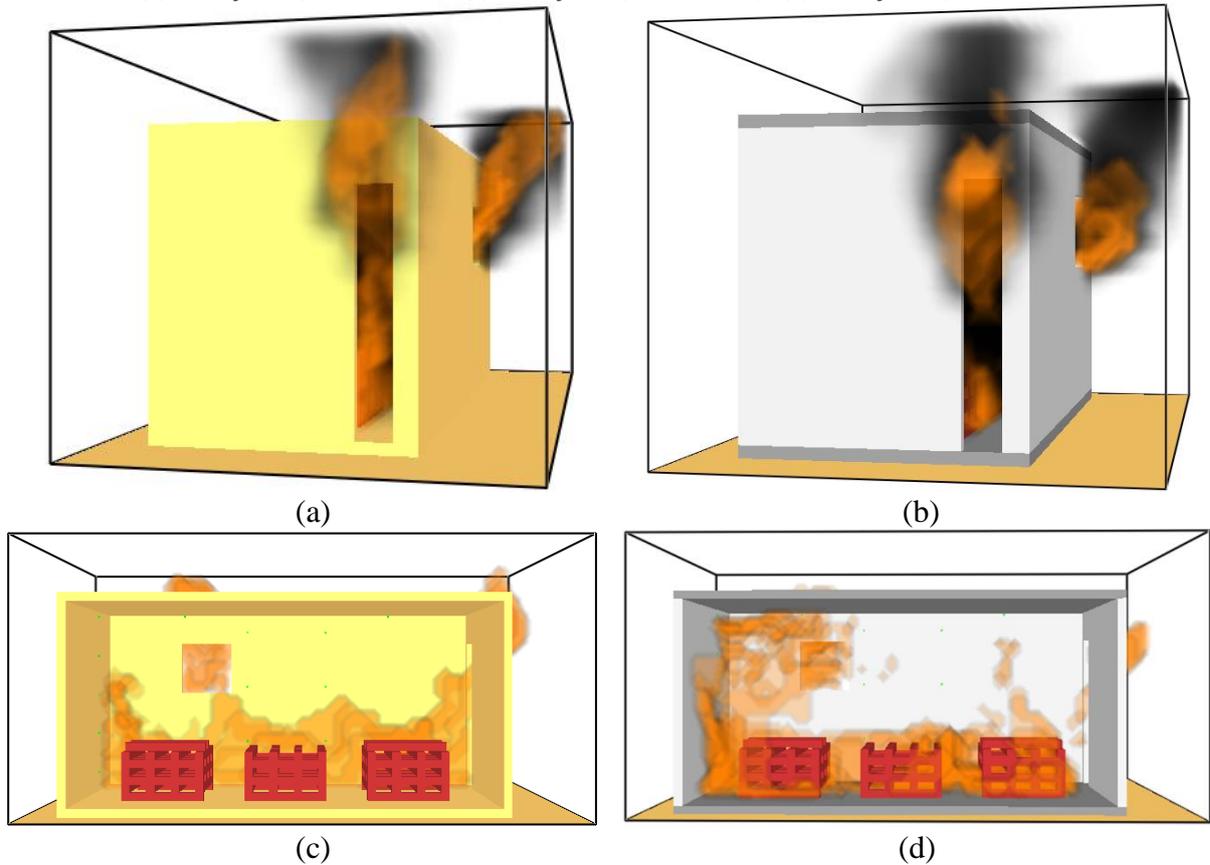
Quanto ao comportamento da propagação do fogo e da fumaça, observou-se que, em ambas as situações simuladas no FDS (Situação 1 e Situação 2), este foi semelhante ao ocorrido no ensaio experimental. No OZone tal comportamento não pode ser observado, visto que os resultados obtidos neste *software* são apenas tabulados.

A Figura 38 mostra o incêndio plenamente desenvolvido nas simulações realizadas no FDS (aproximadamente aos 30 minutos). Observa-se que as chamas que saíram pelas aberturas do compartimento aos 30 minutos eram mais volumosas na Situação 1 (Figura 38a) do que na Situação 2 (Figura 38b).

Ao analisar a dinâmica das chamas no interior do compartimento, constatou-se que durante praticamente todo o tempo de simulação da Situação 1 (Figura 38c) as chamas ficaram localizadas próximas a parede que continha a janela, justificando o volume que saía pelas aberturas.

Ao analisar do interior do compartimento na simulação da Situação 2 (Figura 38d) constatou-se que as chamas ficaram mais concentradas nas pilhas de madeira, mostrando um comportamento mais próximo da realidade.

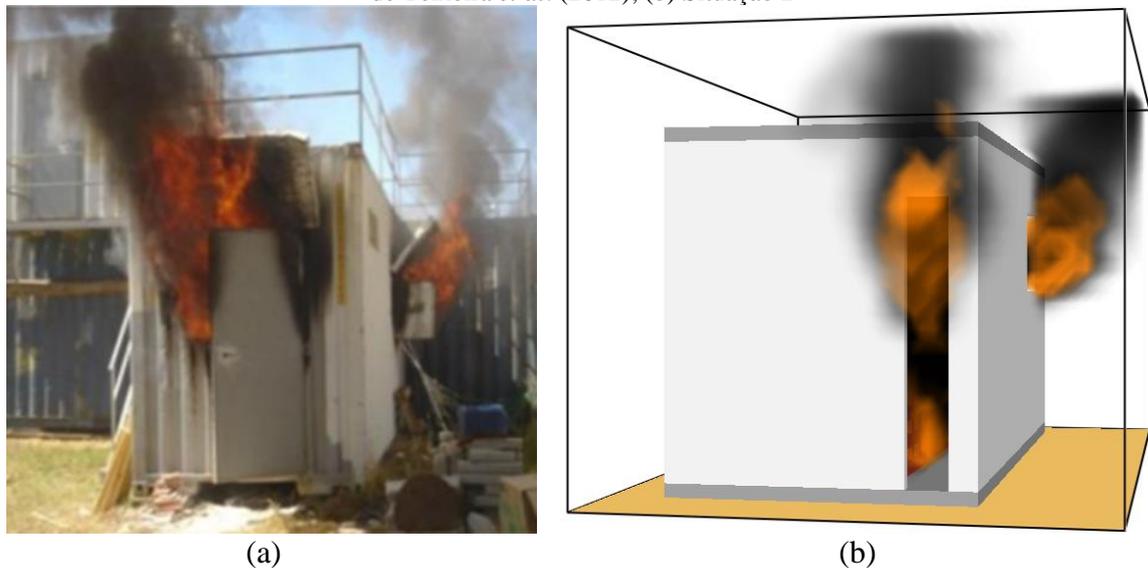
Figura 38 – Incêndio plenamente desenvolvido, simulação no FDS aos 30 minutos: (a) Situação 1 (vista externa); (b) Situação 2 (vista externa); (c) Situação 1 (vista interna); (d) Situação 2 (vista interna)



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

A Figura 39 mostra uma imagem externa do compartimento, onde é possível visualizar o comportamento do incêndio plenamente desenvolvido no ensaio experimental de Teixeira *et al.* (2012) e na simulação da Situação 2.

Figura 39 – Incêndio em plenamente desenvolvido, simulação no FDS aos 30 minutos: (a) ensaio experimental de Teixeira *et al.* (2012); (b) Situação 2



Fonte: Adaptado de Teixeira *et al.* (2012)

Como pode-se observar, houve uma boa concordância entre o comportamento da propagação do incêndio apresentado pela simulação computacional realizada FDS na Situação 2 e o ensaio experimental de Teixeira *et al.* (2012).

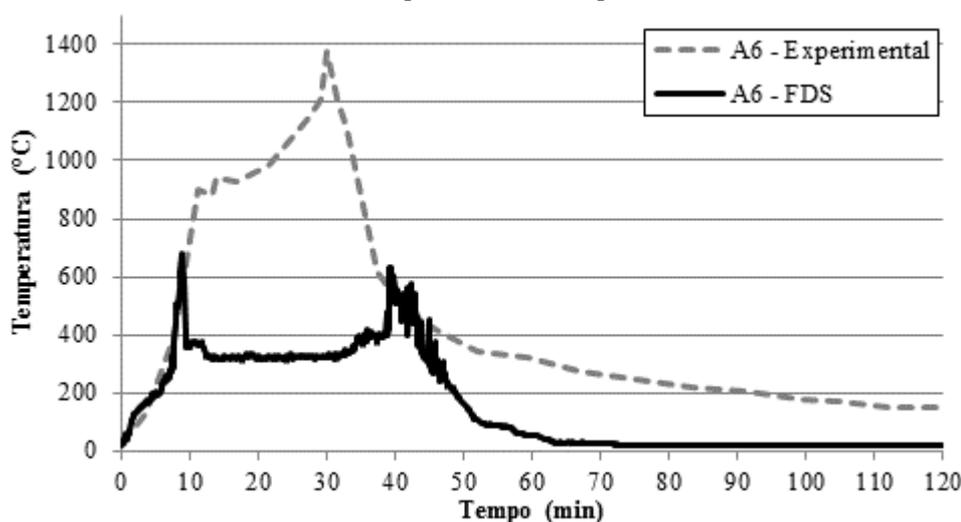
Ressalta-se que a Figura 38b e Figura 39b mostram apenas o comportamento do incêndio aos 30 minutos de simulação da Situação 2, a cronologia completa pode ser observada no “APÊNDICE C”, “APÊNDICE D” e “APÊNDICE E” deste trabalho.

### 3.3.4 Temperatura dos gases

Para comparar os resultados de temperaturas obtidos através das simulações realizadas no OZone e no FDS (Situação 1 e Situação 2) com os apresentados por Teixeira *et al.* (2012), serão mostrados a seguir os valores máximos registrados nos gases dentro do compartimento. Esses resultados foram registrados pelo termopar A6 tanto no ensaio experimental quanto nas simulações realizadas no FDS. No OZone, os resultados foram registrados na “zona quente” do compartimento.

Na Figura 40 é apresentada a evolução das temperaturas no compartimento obtidas através da simulação no FDS da Situação 1 vs as obtidas no ensaio experimental de Teixeira *et al.* (2012).

Figura 40 – Evolução das temperaturas nos gases, obtidas através da simulação no FDS da Situação 1 (termopar A6) vs Experimental (termopar A6)



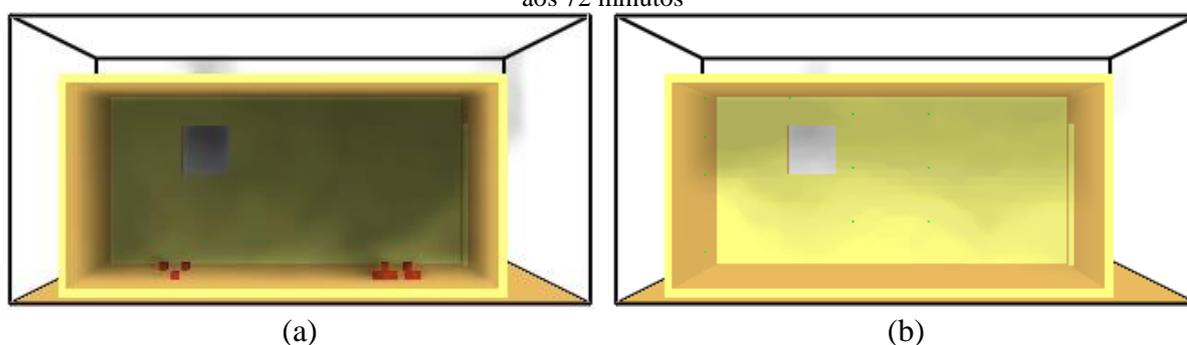
Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Observa-se que na fase de crescimento do incêndio as temperaturas aumentam de forma coerente com o experimento até os 9 minutos, quando atinge o valor máximo de 670 °C.

Depois disso, entre 10 e 38 minutos, as temperaturas caem e mantêm-se com valores abaixo de 400 °C. Aos 39 minutos há um novo pico de temperaturas que chega a 635 °C.

A partir daí as temperaturas caem rapidamente novamente: aos 60 minutos (momento em que a madeira já está quase toda consumida, vide Figura 41a) a temperatura registrada é de 54 °C, e, aos 72 minutos (instante em que a madeira é toda consumida, vide Figura 41b) todos os termopares considerados nesta simulação estão registrando 20 °C. Nesse mesmo instante (72 minutos) a temperatura registrada no experimento era de 250 °C, e, aos 120 minutos era de 150 °C, ou seja, diferente do observado na simulação da Situação 1, o calor ainda não havia dissipado completamente no compartimento, visto que a extinção do incêndio se deu de forma natural.

Figura 41 – Instantes finais do consumo da madeira na simulação no FDS da Situação 1: (a) aos 60 minutos; (b) aos 72 minutos

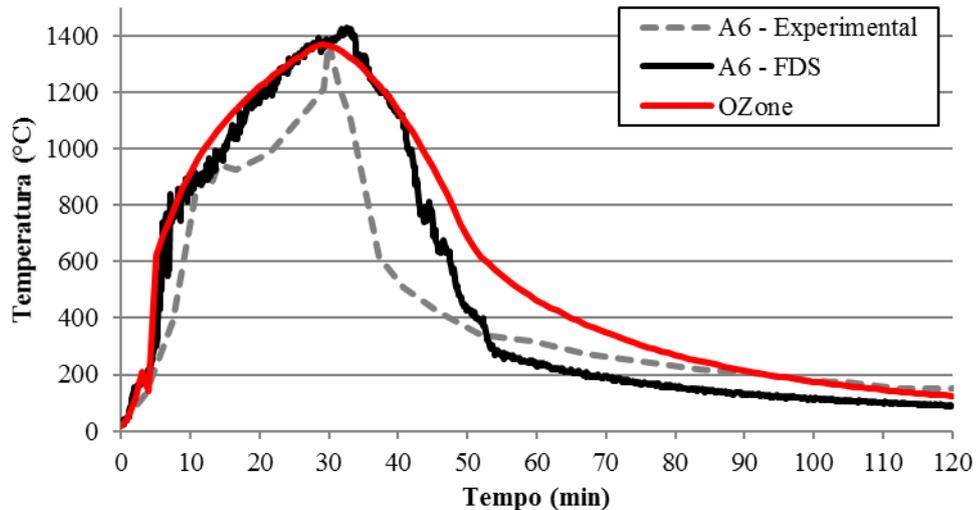


Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Observando os resultados expostos na Figura 40, fica evidente que a Situação 1 simulada no FDS não foi capaz de representar adequadamente o desenvolvimento das temperaturas no compartimento analisado. Isso mostra que a não consideração das propriedades térmicas dos materiais não combustíveis na simulação (paredes, teto e piso) acarreta na obtenção de resultados de temperaturas dos gases incoerentes com a realidade.

Na Figura 42 é apresentada a evolução das temperaturas no compartimento obtidas através das simulações no OZone e no FDS da Situação 2 vs as obtidas no ensaio experimental de Teixeira *et al.* (2012).

Figura 42 – Evolução das temperaturas máximas nos gases, obtidas através das simulações no OZone (zona quente) e no FDS da Situação 2 (termopar A6) vs Experimental (termopar A6)



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Observa-se que, na fase de crescimento do incêndio as temperaturas registradas nas simulações no OZone e no FDS aumentam de forma coerente ao experimento. No FDS a temperatura máxima registrada foi de 1420 °C aos 33 minutos de simulação. No OZone este valor foi de 1370 °C aos 29 minutos de simulação. Este comportamento foi similar ao ocorrido no experimento de Teixeira *et al.* (2012), onde a temperatura máxima é atingida aos 30 minutos, com o valor de 1400 °C.

Na fase de arrefecimento, o decaimento das temperaturas obtidas através de ambas as simulações computacionais (FDS e OZone) apresenta um comportamento coerente (apesar de serem maiores que as obtidas no ensaio experimental). No FDS, as temperaturas caem após o pico máximo até atingir 165 °C aos 54 minutos (neste instante a madeira foi totalmente consumida na simulação). No OZone o decaimento ocorre mais lentamente, registrando 570 °C aos 54 minutos.

A partir desse instante (54 minutos) as temperaturas caem mais lentamente na simulação realizada no FDS, apresentando um comportamento muito semelhante ao ensaio experimental, porém, sempre com valores cerca de 60 °C mais baixos. Isso talvez tenha ocorrido devido ao fato do modelo desenvolvido no FDS não ter contemplado a produção de carvão durante a queima da madeira, diferentemente do ocorrido no ensaio experimental, onde, segundo Teixeira *et al.* (2012) estes produziram uma radiação intensa que provavelmente contribuiu para manter as temperaturas do ambiente mais elevadas no final do experimento.

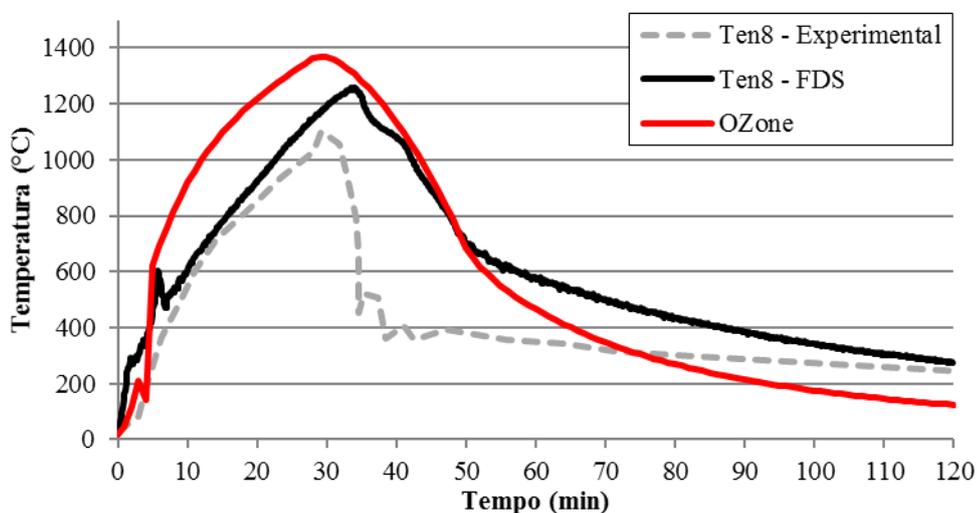
Ao final das simulações (aos 120 minutos) a temperatura registrada através do FDS foi de 90 °C e do OZone foi de 124 °C, enquanto que no experimento esse valor era de 150 °C.

Apesar da diferença, pode-se afirmar que nesta situação, o calor ainda não havia dissipado completamente, o que mostra um comportamento coerente com a realidade.

Observando os resultados expostos na Figura 42, fica evidente que, apesar de algumas sutis diferenças, a Situação 2, tanto na simulação realizada no OZone quanto no FDS, foi capaz de representar adequadamente o desenvolvimento das temperaturas no compartimento analisado. Isso mostra que a consideração dos materiais envolvidos numa simulação computacional, bem como o conhecimento de sua natureza (combustível ou incombustível) e, propriedades térmicas e de combustão (ainda que de forma aproximada) são de suma importância para a obtenção de temperaturas dos gases coerentes com a realidade.

Os demais termopares considerados nas simulações realizadas no FDS apresentaram comportamentos semelhantes ao termopar A6 em ambas as situações analisadas. Na Figura 43 é mostrada a evolução de temperaturas registrada no termopar Ten8, posicionado 10 cm abaixo do teto do compartimento (camada superior), na simulação da Situação 2 no FDS e no ensaio experimental. É apresentada também a evolução de temperaturas registrada na “zona quente” do compartimento na simulação realizada no OZone.

Figura 43 – Evolução das temperaturas dos gases na camada superior do compartimento obtidas através das simulações no OZone (zona quente) e no FDS da Situação 2 (termopar Ten8) vs Experimental (termopar Ten8)



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

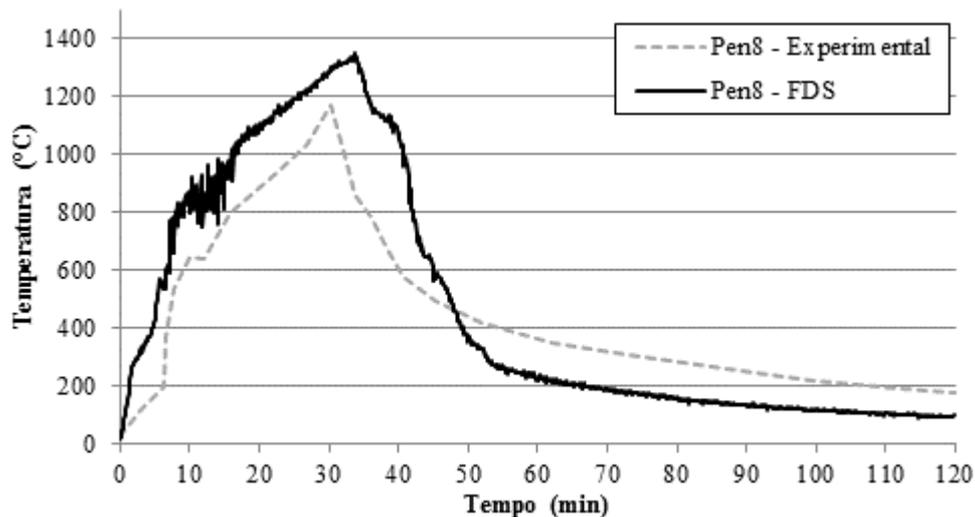
Observa-se que durante todo o tempo de simulação realizada no FDS as temperaturas registradas foram maiores que as registradas no ensaio experimental, até mesmo após ocorrer o consumo total da madeira. Isso provavelmente ocorreu devido ao fato de que quando aquecidos os gases se tornam menos densos tendendo a se concentrar na camada superior do compartimento, tornando essa região naturalmente mais quente após o consumo total do material combustível do incêndio. Esse fenômeno pode ser observado na Figura 45.

Na simulação realizada no FDS, a temperatura máxima registrada ocorreu aos 35 minutos com o valor de 1260 °C, enquanto que no ensaio experimental isso ocorreu aos 29 minutos com o valor de 1100 °C. Nota-se que, em ambos os casos (experimental e computacional no FDS), essa temperatura foi inferior à capturada no centro do compartimento pelo termopar A6 (Figura 42): isso provavelmente ocorreu porque este termopar foi posicionado muito próximo das pilhas de madeira, assim, tanto durante o experimento, quanto durante a simulação, as chamas do incêndio incidiram diretamente no mesmo, acarretando na leitura de temperaturas mais elevadas neste local.

Nota-se também que as temperaturas registradas próximo ao teto, tanto na simulação realizada no FDS quanto no ensaio experimental, foram inferiores às registradas na “zona quente” na simulação realizada no OZone.

Na Figura 44 é mostrada a evolução de temperaturas registradas no termopar Pen8, posicionado próximo a parede do compartimento, na simulação no FDS da Situação 2 e no ensaio experimental.

Figura 44 – Evolução das temperaturas dos gases registradas próximo a parede do compartimento obtidas através da simulação no FDS da Situação 2 (termopar Pen8) vs Experimental (termopar Pen8)



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Observa-se que as temperaturas registradas na simulação computacional no FDS foram maiores que as registradas no ensaio experimental até os 48 minutos, quando o incêndio já estava na fase de arrefecimento. Após isso, os valores registrados na simulação foram menores que os registrados durante o experimento, ficando sempre em torno de 130 °C abaixo das temperaturas reais (comportamento semelhante ao observado no termopar A6).

Na simulação computacional no FDS, a temperatura máxima capturada por este termopar (Pen8) foi de 1350 °C aos 34 minutos, enquanto no ensaio experimental esta foi de 1170 °C aos 30 minutos.

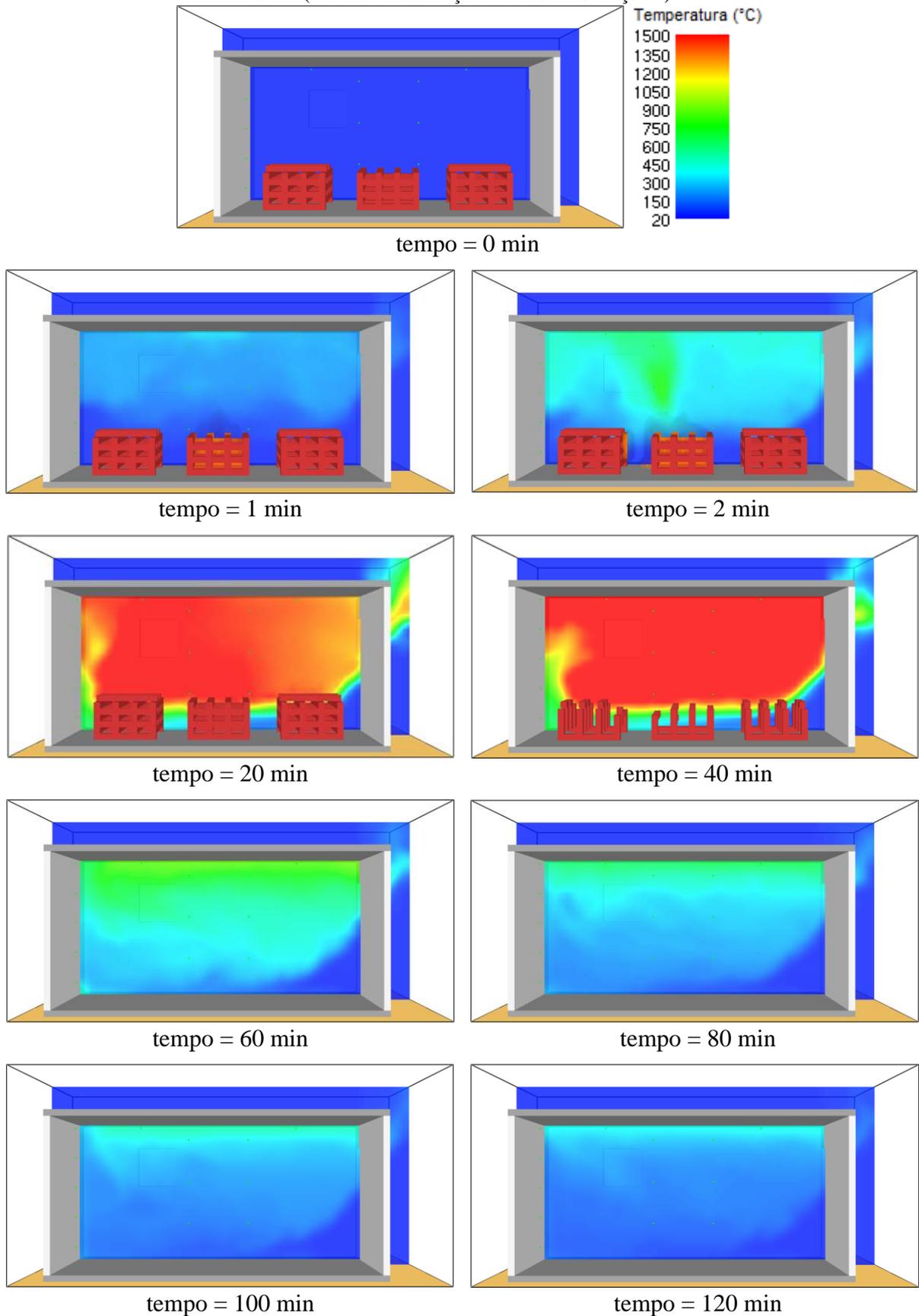
Apesar de algumas diferenças (principalmente na fase de arrefecimento), observou-se que o comportamento de desenvolvimento de temperaturas dos gases obtido através da simulação no FDS da Situação 2 foi coerente com o constatado no ensaio experimental. Da fase de crescimento do incêndio até o seu máximo desenvolvimento, observou-se resultados de temperaturas satisfatórios, mantendo-se sempre um pouco acima dos resultados experimentais.

A Figura 45 mostra as temperaturas desenvolvidas no compartimento na simulação no FDS da Situação 2. Esses dados foram registrados através de um plano de medição que foi posicionado longitudinalmente ao compartimento, entre as pilhas de madeira e a parede que contem a janela e passando no meio da porta.

Ressalta-se que apenas alguns recortes de tempo são mostrados nesta figura, a cronologia completa pode ser observada no “APÊNDICE F” deste trabalho.

Na Figura 45 é possível visualizar que a convecção dos gases quentes faz com que esses se acumulem próximo ao teto do compartimento conforme as pilhas de madeira entram em combustão. Isso ocorre rapidamente logo nos instantes iniciais da simulação e vai se intensificando até aproximadamente 33 minutos, quando há o pico máximo de temperaturas. Depois disso, conforme o volume de madeira vai diminuindo os gases quentes saem do compartimento, e ficam mais concentrados próximo ao teto.

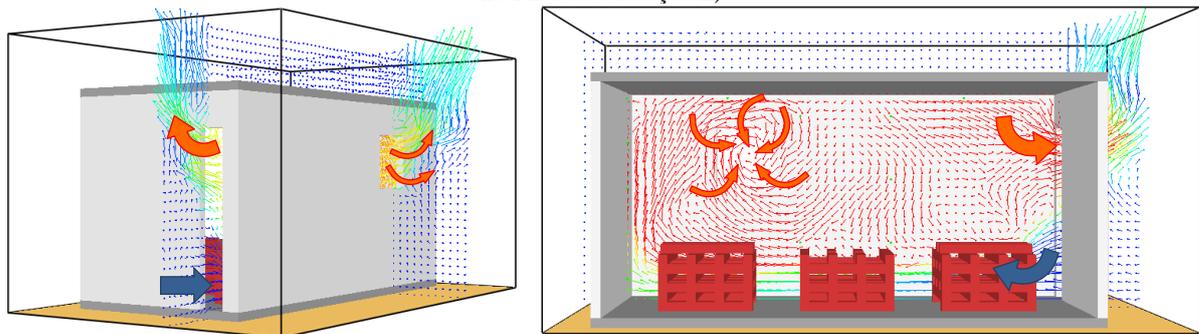
Figura 45 – Evolução das temperaturas dos gases registradas através de um plano de medição e visualizado no SMV (obtidas na simulação no FDS da Situação 2)



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Quando a camada de gases quentes atinge a altura da porta e da janela, é possível visualizá-los saindo do compartimento através dessas aberturas. Enquanto isso o incêndio é alimentado pelos gases frios que entram pela parte de baixo da abertura da porta. Esse fenômeno pode ser observado na Figura 46.

Figura 46 – Convecção dos gases registrada através de um plano de medição e visualizado no SMV (simulação no FDS da Situação 2)



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

### 3.4 RESUMO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi apresentado o desenvolvimento de um modelo computacional de simulação de incêndio nos *softwares* FDS e OZone, cuja validação foi realizada com o estudo experimental apresentado por Teixeira *et al.* (2012).

Alguns pontos considerados mais relevantes foram descritos de forma detalhada ao longo do capítulo e o arquivo de entrada de dados do FDS criado para este modelo encontra-se no “APÊNDICE A” e a entrada de dados completa realizada no OZone encontra-se no “APÊNDICE B” deste trabalho.

Com base nos pressupostos observados na revisão da literatura dos trabalhos que utilizaram o FDS como ferramenta auxiliar, foram propostas duas situações para simulação: (i) Situação 1: todas as obstruções, com exceção do material combustível, foram consideradas inertes no modelo; (ii) Situação 2: todas as obstruções receberam suas respectivas propriedades térmicas. No OZone, apenas a Situação 2 foi considerada.

Com essas simulações pôde-se constatar que:

- no FDS, a Situação 1 teve um tempo de processamento de aproximadamente 33 horas, enquanto a Situação 2 esse tempo foi de 52 horas. Indicando que a consideração das propriedades térmicas dos materiais das paredes, teto e piso, dos cenários de incêndio simulados no FDS pode aumentar o tempo requerido para o processamento dos modelos. No OZone esse tempo foi de apenas alguns segundos;

- a taxa de liberação de calor registrada nas simulações de ambas as situações no FDS teve um comportamento semelhante ao calculado através do OZone (EN 1991-1-2);
- no FDS, a Situação 1 não foi capaz representar adequadamente o desenvolvimento das temperaturas dos gases no compartimento analisado. Mostrando que a não consideração das propriedades térmicas dos materiais das paredes, teto e piso, acarreta na obtenção de resultados de temperaturas incoerentes com a realidade;
- a Situação 2, nas simulações em ambos os *softwares*, foi capaz representar adequadamente o desenvolvimento das temperaturas no compartimento analisado. Mostrando que o conhecimento dos materiais envolvidos numa simulação computacional, bem como sua natureza (combustível ou incombustível) e, propriedades térmicas e de combustão (ainda que de forma aproximada) é de suma importância para a obtenção de temperaturas de gases coerentes com a realidade;
- apesar de algumas diferenças (principalmente na fase de arrefecimento), observou-se que o comportamento de desenvolvimento de temperaturas dos gases obtido através das simulações da Situação 2 (tanto no FDS quanto no OZone) foi coerente com constatado no ensaio experimental. Da fase de crescimento do incêndio até o seu máximo desenvolvimento observou-se resultados satisfatórios de temperaturas, mantendo-se sempre um pouco acima dos resultados experimentais;
- no FDS, apesar das situações propostas apresentarem um comportamento de propagação de chamas e fumaça semelhante, a Situação 2 foi a que representou de forma mais fidedigna o comportamento observado no ensaio experimental.

Além disso, percebeu-se que os maiores desafios enfrentados durante o desenvolvimento dos modelos computacionais no FDS são: a obtenção das propriedades térmicas e de combustão dos materiais a serem empregados na simulação, e a definição dos critérios a serem adotados nas simulações.

Com a escassez de referencial bibliográfico e/ou dados precisos, para um modelo simples (como o apresentado nesse capítulo) alguns parâmetros podem ser definidos através de testes de sensibilidade. Entretanto, tal estratégia só é possível de ser executada quando há algum

resultado real para ser comparado e calibrar o modelo, reforçando a ideia de que os ensaios experimentais são de suma importância para validação dos modelos desenvolvidos no FDS.

Por fim, diante de algumas dificuldades enfrentadas, aconselha-se que para o desenvolvimento de um modelo no FDS seja realizado um “plano de simulação”, semelhante ao “plano experimental” de ensaios experimentais. Assim, o usuário pode planejar melhor as etapas de desenvolvimento do modelo, evitando esquecimentos ou imprevistos indesejados.

Constatou-se também que a utilização do OZone é mais simples e intuitiva se comparado ao FDS, sendo capaz de descrever o desenvolvimento de temperaturas máximas dos gases no compartimento de maneira coerente com o ensaio experimental apresentado por Teixeira *et al.* (2012). Entretanto, os resultados obtidos são mais limitados, se comparados com as possibilidades proporcionadas pelo FDS.

## 4 ESTUDO DE CASO 02

Neste capítulo será apresentada a simulação computacional de incêndio em um dormitório pertencente a edificações tipicamente incendiadas na cidade de Recife / PE, através dos *softwares* FDS e OZone.

Para realização das simulações foi utilizado os *softwares* FDS versão 6.5.3 (McGRATTAN, 2017a) e, OZone versão 2.2 (CADORIN *et al.*, 2001), instalados em um *desktop* com processador Intel® Core™ i7 3.40 GHz e 16.0 GB de memória RAM.

O estudo experimental deste dormitório é apresentado por Corrêa *et al.* (2017).

### 4.1 ESTUDO EXPERIMENTAL

Um estudo experimental de incêndio em um cômodo cujas características representaram um dormitório pertencente a edificações tipicamente incendiadas na cidade de Recife / PE, foi realizado a fim de analisar o desenvolvimento de temperaturas decorrentes do sinistro no interior do mesmo.

As características deste dormitório foram determinadas através de um estudo sobre a ocorrência de incêndios na cidade de Recife durante os anos de 2011 a 2013 (CORRÊA *et al.*, 2015), que resultou na determinação de uma edificação modal que representa as edificações tipicamente incendiadas nesta cidade durante esse período (CORRÊA *et al.*, 2016).

O estudo experimental foi realizado em um cômodo pertencente ao pavimento térreo da oficina de treinamento de combate a incêndio (Figura 47) do centro de ensino e instrução do Corpo de Bombeiros Militar de Pernambuco (CBMPE).

Figura 47 – Oficina de treinamento de combate a incêndio do centro de ensino e instrução do Corpo de Bombeiros Militar de Pernambuco (CBMPE)



Fonte: O autor (2018)

O cômodo utilizado para realização deste estudo experimental foi adaptado para reproduzir um dormitório semelhante aos pertencentes a residências unifamiliares tipicamente incendiadas na cidade de Recife / PE. A carga de incêndio deste dormitório foi materializada através dos móveis e objetos determinados através do estudo de Corrêa *et al.* (2016), baseada no mapeamento de incêndios em edificações realizado nesta cidade por Corrêa *et al.* (2015).

A Figura 48 mostra as dimensões internas e a carga de incêndio inserida neste cômodo.

Figura 48 – Dormitório antes do ensaio experimental



Fonte: Adaptado de Corrêa *et al.* (2017)

Esses móveis e objetos tiveram seu peso mensurados para, através do potencial calorífico dos materiais predominantes em sua composição, ser determinado o valor da densidade da carga de incêndio presente no dormitório.

A Tabela 6 relaciona os móveis e objetos, seus materiais constituintes, peso e poder calorífico, e a carga de incêndio presentes neste dormitório.

O poder calorífico dos materiais foi obtido através da CBMSC IN 003 (2014) e, através dessa propriedade e do peso dos objetos pôde-se determinar que a densidade da carga de incêndio presente neste dormitório foi de 499,56 MJ/m<sup>2</sup>.

Tabela 6 – Móveis e objetos que compuseram a carga de incêndio presente no dormitório incendiado

Móvel / Objeto	Material constituinte	Quant.	Peso (kg)	Potencial calorífico (MJ/kg)	Carga total (MJ)
Televisor de tubo 18"	Polipropileno, vidro, componentes eletrônicos, etc.	1,00	9,90	43,00	425,70
Ventilador 40 cm, 6 pás	Polipropileno, componentes eletrônicos, etc.	1,00	2,86	43,00	122,98
Ventilador 40 cm, 3 pás	Polipropileno, componentes eletrônicos, etc.	1,00	2,40	43,00	103,20
Roupas	Tecido	1,00	20,00	21,00	420,00
Apostilas	Papel, plástico	1,00	4,00	17,00	68,00
Guarda roupas	MDP ( <i>medium density particleboard</i> ), plástico, etc.	1,00	90,00	21,00	1890,00
Criado mudo pequeno	MDP, plástico, etc.	1,00	5,60	21,00	117,60
Criado mudo grande (tinta intumescente)	MDF ( <i>medium density fiberboard</i> ), plástico, etc.	1,00	12,90	21,00	270,90
Criado mudo grande	MDF, plástico, etc.	1,00	12,90	21,00	270,90
Cama de solteiro	Madeira, compensado de madeira	1,00	33,40	21,00	701,40
Beliche	Madeira	1,00	48,00	21,00	1008,00
Colchão (cama de solteiro)	Espuma de poliuretano	1,00	5,20	23,00	119,60
Colchão (beliche)	Espuma de poliuretano	2,00	7,10	23,00	326,60
<b>Carga Total (MJ)</b>					<b>5844,88</b>

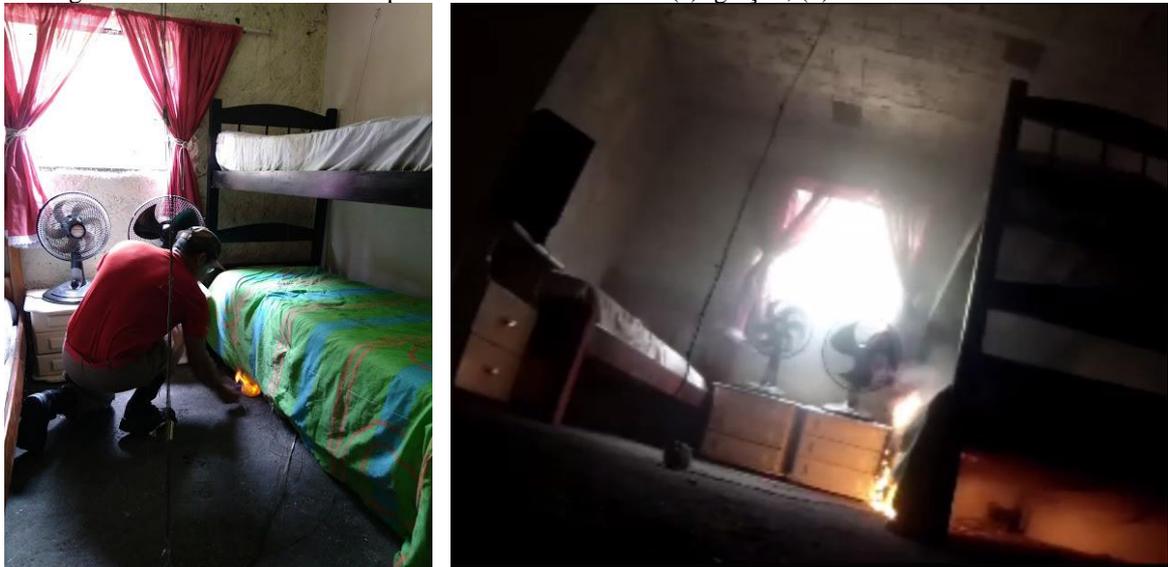
Fonte: Adaptado de Corrêa *et al.* (2017)

A estrutura deste dormitório, bem como de toda a edificação, era de concreto armado, o piso de concreto simples e o forro do pavimento térreo de laje pré-moldada com preenchimento de lajotas cerâmicas e capa de concreto.

As paredes do dormitório eram constituídas de tijolos cerâmicos não estrutural, revestidas externamente com argamassa de cimento e internamente com diferentes materiais, sendo eles: chapisco cimentício (paredes P1 e P4), argamassa de gesso (parede P2) e argamassa de cimento (parede P3), conforme indicação da Figura 50.

Para ignição do incêndio, um dispositivo em parafina para acendimento de lareiras foi posicionado sob o leito inferior do beliche, provocando uma reação em cadeia que incendiou o restante do móvel, como mostrado na Figura 49.

Figura 49 – Início do ensaio experimental do dormitório: (a) ignição; (b) instantes iniciais do ensaio



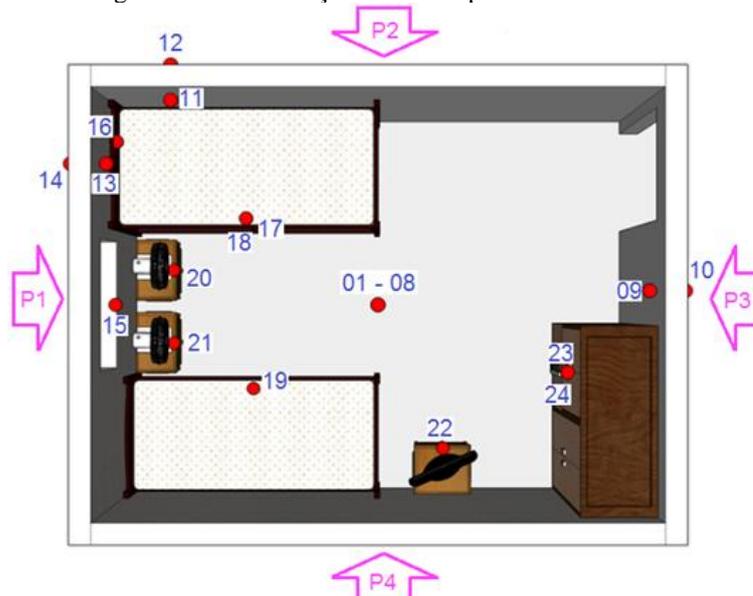
(a)

(b)

Fonte: Adaptado de Corrêa *et al.* (2017)

Para aferição de temperaturas, foram instalados 24 termopares tipo K, distribuídos nos móveis, centro e paredes do compartimento conforme mostrado na Figura 50.

Figura 50 – Distribuição dos termopares no dormitório



Fonte: Adaptado de Corrêa *et al.* (2017)

Desta figura, os termopares de 01 a 08 referem-se as temperaturas no centro do dormitório nas seguintes alturas:

- Termopar 01 = 30 cm de altura do piso;
- Termopar 02 = 60 cm de altura do piso;
- Termopar 03 = 90 cm de altura do piso;
- Termopar 04 = 120 cm de altura do piso;
- Termopar 05 = 150 cm de altura do piso;
- Termopar 06 = 180 cm de altura do piso;
- Termopar 07 = 210 cm de altura do piso;
- Termopar 08 = 240 cm de altura do piso;

Os termopares 09, 10, 11, 12, 13 e 14 referem-se as temperaturas nas paredes, posicionados nas faces internas e externas, a uma altura de 2,1 m do piso e distância de 0,5 m dos vértices (0,5 m da porta, no caso dos termopares 09 e 10).

Durante o ensaio experimental, que durou 48 minutos, a janela pertencente ao dormitório incendiado ficou totalmente aberta, enquanto a porta permaneceu fechada durante os primeiros minutos, fazendo com que o incêndio fosse controlado pela ventilação e desenvolvesse ciclos de combustão e exaustão.

Aos 18 minutos, para impedir a extinção natural do incêndio, a porta do compartimento foi aberta, proporcionando uma ventilação cruzada, levando o fluxo de calor rapidamente para o compartimento adjacente ao ensaiado. Entretanto, apesar desta estratégia, não houve uma generalização do incêndio, ao invés disso, após mais alguns ciclos de combustão e exaustão o mesmo entrou em declive até que uma equipe de Combate a Incêndio do Corpo de Bombeiros o adentrou ao ambiente promovendo a extinção das chamas remanescentes e resfriamento das paredes.

#### 4.2 MODELO DESENVOLVIDO NO *SOFTWARE* FDS

O desenvolvimento do modelo computacional no FDS se deu com o objetivo de reproduzir da melhor forma possível o ensaio experimental realizado por Corrêa *et al.* (2017). Os parâmetros de entrada e estratégias adotadas para desenvolver o modelo foram baseados na cronologia do evento, geometria e especificidades da edificação, observação das condições ambientais e normas técnicas pertinentes.

Esta simulação e análise dos resultados é limitada aos primeiros 18 minutos de incêndio, antes da abertura da porta do dormitório.

Admitindo que o modelo computacional apresentado no capítulo anterior foi calibrado, e é capaz de representar adequadamente o comportamento de incêndios em edificações, este

serviu de suporte para o desenvolvimento da simulação realizada no FDS apresentada neste capítulo. No decorrer do capítulo, serão comentados alguns pontos considerados mais relevantes no desenvolvimento deste modelo. O arquivo de entrada de dados completo encontra-se no “APÊNDICE G” deste trabalho.

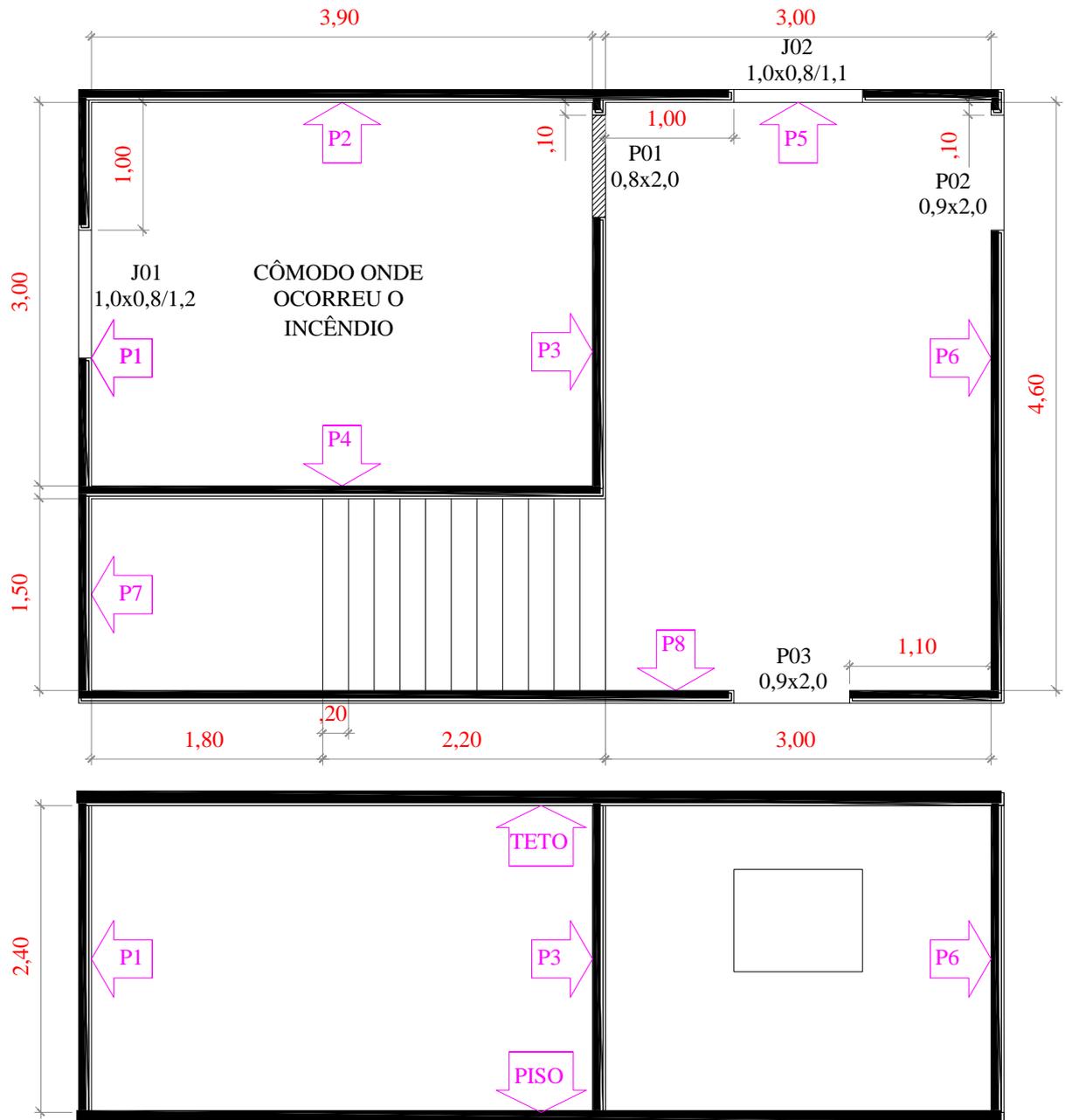
#### **4.2.1 Domínio computacional e malha**

Para realização da simulação computacional no FDS apenas o pavimento térreo da edificação mostrada na Figura 47 foi considerado no modelo computacional desenvolvido no FDS. A Figura 51 mostra o croqui esquemático o pavimento térreo desta edificação.

A fim de analisar o fluxo de fumaça através das aberturas para o exterior, considerou-se um domínio computacional que extrapolou alguns metros além das dimensões do pavimento (Figura 51), sendo esse com as seguintes dimensões: 10,0 m (eixo x) x 7,5 m (eixo y) x 4,0 m (eixo z), com uma malha cúbica de 10 cm, totalizando 300.000 elementos.

Nos extremos máximos e mínimos dos eixos x e y, e no extremo máximo do eixo z foram criadas superfícies abertas (OPEN VENTS) indicando uma abertura para o exterior do domínio computacional, garantindo que haja comunicação entre os ambientes interno e externo do domínio e alimentação do incêndio com oxigênio.

Figura 51 – Croqui esquemático do pavimento térreo da edificação onde ocorreu o ensaio experimental do dormitório



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

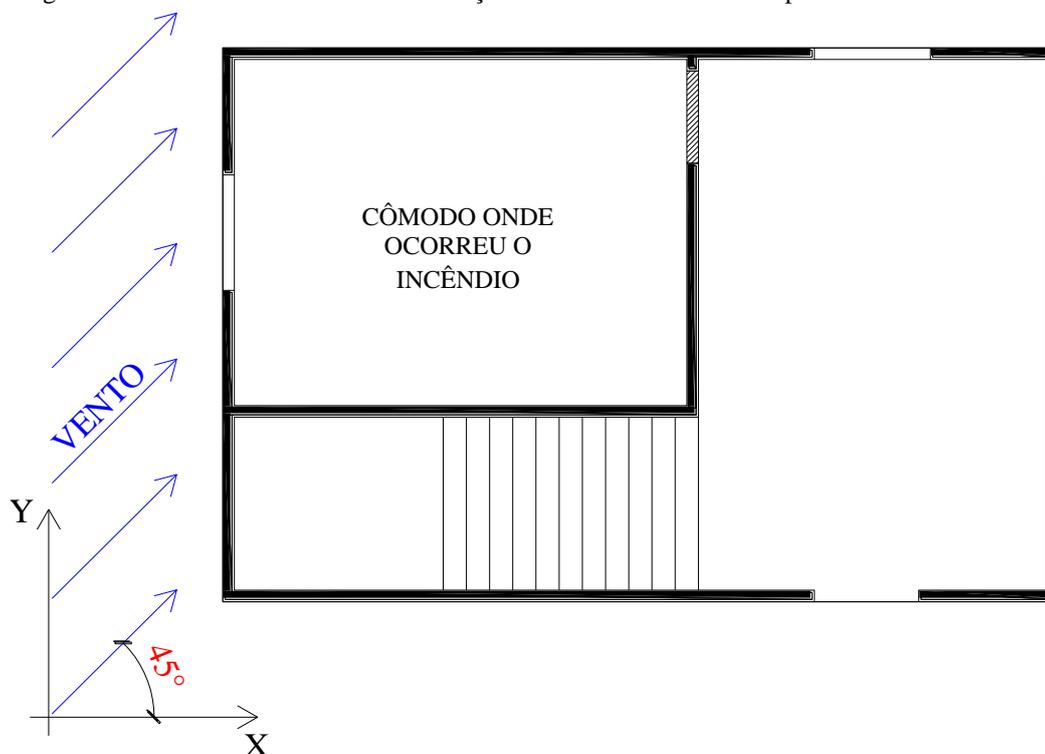
#### 4.2.2 Condições ambientais iniciais

As condições ambientais iniciais consideradas foram:

- temperatura ambiente de 29,50 °C, de acordo com as leituras obtidas por Corrêa *et al.* (2017);
- pressão atmosférica ao nível do mar de 101.325,0 Pa;
- umidade relativa do ar de 80%, tal como ocorrido no dia do ensaio experimental de acordo com o indicado por INMET (2017);

- velocidade do vento de 3,0 m/s, tal como ocorrido no dia do ensaio experimental de acordo com o indicado por INMET (2017), incidindo a  $45^\circ$  do eixo x na edificação, como mostrado na Figura 52.

Figura 52 – Incidência do vento na edificação onde ocorreu o ensaio experimental do dormitório



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Ressalta-se que, nos primeiros testes para esta simulação apenas os parâmetros de temperatura ambiente, pressão atmosférica e umidade relativa do ar haviam sido considerados como condições iniciais.

Entretanto, devido ao fato da edificação analisada (Figura 47) estar exposta em um terreno relativamente aberto, e no dia do ensaio experimental a incidência de vento na região estar intensa, constatou-se que a velocidade do vento seria um parâmetro importante para esta simulação, tendo grande influência sobre o comportamento da propagação do fogo e da fumaça.

Esse parâmetro foi inserido no arquivo de entrada, juntamente com as outras condições ambientais iniciais, através das seguintes linhas de comando:

```
&MISC TMPA=29.5
      P_INF=101325.0
      HUMIDITY=80.0
      MEAN_FORCING(1:2)=.TRUE.,.TRUE.
      U0=2.12
      V0=2.12
      DT_MEAN_FORCING=10.0 /
```

Dessas linhas, “MEAN\_FORCING(1:2)=.TRUE.,.TRUE.” indica ao FDS que o fluxo de ar será forçado a uma velocidade inicial de “U0” na direção do eixo x, e “V0” na direção do eixo y; “DT\_MEAN\_FORCING” indica um relaxamento da malha com relação a esse forçamento, esse parâmetro confere ao vento sua característica oscilatória, e seu valor foi adotado a partir de diversos testes de calibração.

Salienta-se que, se apenas “U0”, “V0” e “DT\_MEAN\_FORCING” for indicado no arquivo de entrada de dados (sem “MEAN\_FORCING”), imediatamente após a simulação de incêndio começar, o FDS deixa de considerar movimento do ar devido ao vento e passa a realizar dos cálculos de fluxo do fluido levando em consideração apenas a convecção.

Com essas considerações, a movimentação dos gases no domínio computacional passa a ser forçada também pela velocidade do vento, e não exclusivamente pela convecção.

#### 4.2.3 Propriedades térmicas e de combustão dos materiais

Na ausência de dados exatos das propriedades térmicas dos materiais constituintes das paredes, teto e piso presentes na edificação, essas foram definidas de acordo com as indicações da norma ABNT NBR 15220-2 (2005) e são mostradas na Tabela 7.

Tabela 7 – Propriedades térmicas dos materiais incombustíveis utilizados nas simulações computacionais do dormitório

<b>Material</b>	<b>Densidade (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Condutividade térmica (W/m.K)</b>	<b>Calor específico (kJ/kg.K)</b>	<b>Emissividade</b>
Tijolo Cerâmico	1400	0,90	0,92	0,90
Argamassa de Gesso	1200	0,70	0,84	0,90
Argamassa de Cimento	2000	1,15	1,00	0,90
Concreto	2300	1,75	1,00	0,90

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Devido à dificuldade de obtenção de propriedades térmicas e de combustão de todos os materiais combustíveis presentes no ensaio experimental, para modelar o incêndio neste cômodo considerou-se uma estratégia simplificada onde, a carga de incêndio foi materializada com caibros de madeira, distribuídos no ambiente conforme a distribuição dos móveis e objetos presentes no ensaio experimental.

As propriedades térmicas adotadas para a madeira foram as mesmas mostradas no capítulo anterior: densidade de 400 kg/m<sup>3</sup>; emissividade de 0,9; condutividade térmica de 0,120 W/m.K; calor específico de 1,34 kJ/kg.K; calor de combustão de 17500 kJ/kg; temperatura de ignição de 210 °C; e taxa de liberação de calor de 100 kW/m<sup>2</sup>.

Analogamente ao ocorrido no ensaio experimental, na simulação realizada computacionalmente as paredes do dormitório foram consideradas com diferentes revestimentos internos.

Devido a impossibilidade de representar a rugosidade advinda do chapisco cimentício, este foi descrito no *software* como sendo uma camada de argamassa de cimento com espessura menor que as demais camadas compostas por este material. As espessuras e materiais que compuseram as camadas das paredes, teto e piso são mostradas na Tabela 8.

Tabela 8 – Espessura e materiais das camadas das paredes, teto, piso presentes na edificação

Lado	Camada 1		Camada 2		Camada 3	
	Espessura (cm)	Material	Espessura (cm)	Material	Espessura (cm)	Material
Parede P1	1,0	Argamassa de Cimento	10,0	Tijolo Cerâmico	2,5	Argamassa de Cimento
Parede P2	2,5	Argamassa de Gesso	10,0	Tijolo Cerâmico	2,5	Argamassa de Cimento
Parede P3	2,5	Argamassa de Cimento	10,0	Tijolo Cerâmico	2,5	Argamassa de Cimento
Parede P4	1,0	Argamassa de Cimento	10,0	Tijolo Cerâmico	2,5	Argamassa de Cimento
Teto	7,0	Tijolo Cerâmico	3,0	Concreto		
Piso	10,0	Concreto				

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Desta tabela, Camada 1 é a camada interior, Camada 2 é a camada intermediária e Camada 3 é a camada exterior ao compartimento. As demais paredes da edificação foram assumidas com as mesmas características da parede P3.

#### 4.2.4 Gás combustível

Considerando que os materiais combustíveis dessa simulação foram substituídos pela madeira, o gás combustível também foi definido conforme mostrado no capítulo anterior: formulação química  $CH_{1,7}O_{0,74}N_{0,002}$ , com rendimentos CO de 0,004 kg/kg e fuligem de 0,015 kg/kg, e calor de combustão de 17500 kJ/kg.

#### 4.2.5 Ignição do incêndio

A ignição do incêndio se deu através de um queimador posicionado sob as pilhas de madeira que representaram o beliche, analogamente ao dispositivo de parafina no ensaio experimental.

Este queimador foi desativado após 150 segundos, liberando aproximadamente 0,06% da carga de incêndio total, e teve a função de apenas iniciar o incêndio. Com isso, o aumento de temperatura gerou uma reação em cadeia, provocando a propagação do fogo pelo cômodo.

#### **4.2.6 Geometria**

Todas as geometrias do modelo (paredes, teto, piso, portas, janelas, escada e material combustível) tiveram suas dimensões e posicionamento ajustado para que suas arestas fossem múltiplas de 10 cm, ocupando sempre um elemento inteiro no domínio computacional.

#### **4.2.7 Aberturas**

Assim como no ensaio experimental, nesta simulação computacional a janela (representada na Figura 46 como J01) do cômodo incendiado foi considerada aberta durante toda a simulação, enquanto a porta (representada na Figura 46 como P01) foi aberta somente aos 18 minutos.

#### **4.2.8 Outputs**

Para obtenção de leituras das temperaturas desenvolvidas durante o incêndio, foram inseridos alguns medidores posicionados analogamente aos termopares no ensaio experimental (vide Figura 50).

Foram considerados os seguintes termopares:

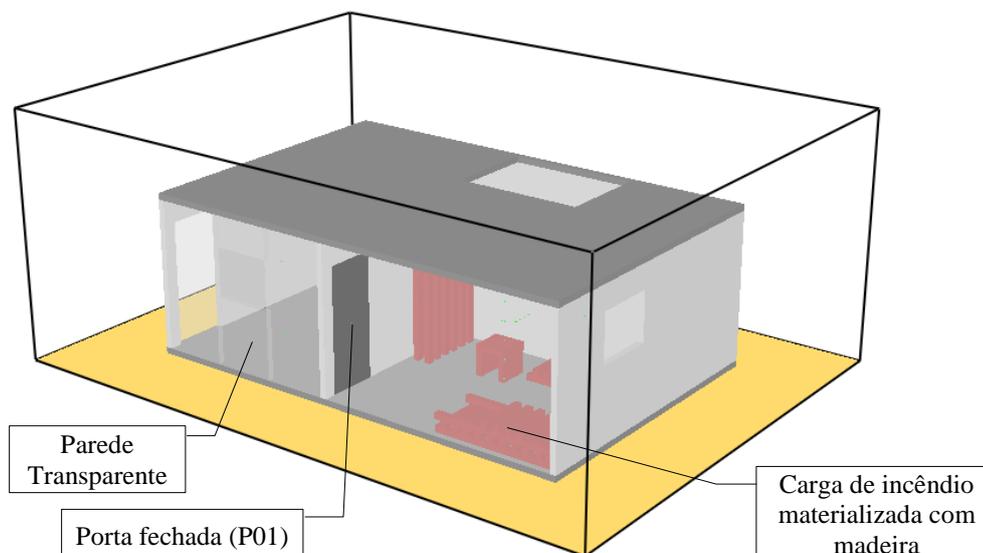
- 01 – 08, referente aos gases no centro do dormitório;
- 09 e 10, referente às faces interna e externa da parede P3;
- 11 e 12, referente às faces interna e externa da parede P2;
- 13 e 14, referente às faces interna e externa da parede P1.

Complementarmente, foi inserido um plano de medição de temperaturas dos gases (posicionado longitudinalmente ao dormitório, passando no meio da janela), e medidores da altura da camada livre de fumaça e concentração de oxigênio no compartimento.

#### **4.2.9 Modelo desenvolvido**

A Figura 53 mostra a geometria do modelo desenvolvido para simulação computacional do incêndio no FDS.

Figura 53 – Modelo desenvolvido para simulação do incêndio no FDS do ensaio experimental do dormitório



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

#### 4.3 MODELO DESENVOLVIDO NO *SOFTWARE* OZONE

Para realização da simulação do incêndio no OZone apenas o cômodo incendiado pôde ser considerado. Desta forma, a descrição do dormitório se deu através das dimensões da geometria e aberturas indicadas na Figura 51 e, as propriedades térmicas e espessuras das camadas das paredes, teto e piso, foram atribuídas de acordo a Tabela 7 e Tabela 8.

Para modelar o incêndio considerou-se alguns parâmetros de acordo com as indicações da NP EN 1991-1-2 (2010) para Habitação como tipo de ocupação, conforme mostrado na Tabela 9.

Tabela 9 – Parâmetros adotados na simulação do estudo de caso 2 realizada no *software* OZone

Área máxima de incêndio	11,70	m <sup>2</sup>
Elevação do fogo	0,50	m
Altura do combustível	0,50	m
Valor característico da densidade de carga de incêndio ( $q_{f,k}$ )	500	MJ/m <sup>2</sup>
Taxa de crescimento do incêndio	Média	-
Tempo necessário para atingir uma taxa de libertação de calor de 1 MW ( $t_a$ )	300	s
Taxa máxima de libertação de calor por metro quadrado (RHRf)	250	kW/m <sup>2</sup>
Perigo de ativação do fogo ( $\delta_{q,2}$ )	1,00	-
Fator de combustão ( $\delta_n$ )	1,00	-
Calor de combustão do combustível	17,50	MJ/kg
Modelo de combustão	Extended fire duration	

Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

O modelo de combustão *Extended fire duration* supõe que a liberação de calor pode ser limitada pela quantidade de oxigênio disponível no ambiente. O combustível é queimado dentro do compartimento e a duração do incêndio é aumentada (CADORIN *et al.*, 2001). Essa

consideração é de suma importância para a simulação do dormitório analisado, pois a porta desse compartimento foi mantida fechada nos primeiros minutos de ensaio experimental, caracterizando um incêndio com pouco oxigênio, controlado pela ventilação.

Como parâmetros ambientais iniciais foram adotados apenas a temperatura ambiente de 29,50 °C e pressão atmosférica ao nível do mar de 101.325,0 Pa.

Os demais critérios foram mantidos de acordo com as configurações padrão do *software*.

A entrada de dados completa dessa simulação encontra-se no “APÊNDICE H” deste trabalho.

#### 4.4 RESULTADOS

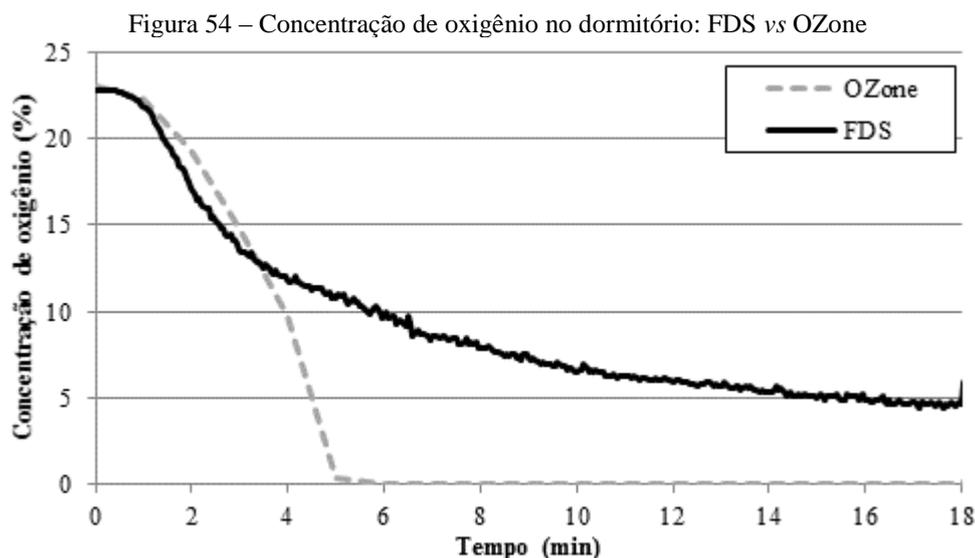
##### 4.4.1 Concentração de oxigênio e propagação do incêndio

Assim como no ensaio experimental, na simulação computacional realizada através do *software* FDS (até 18 minutos) não houve generalização do incêndio (*Flashover*). Isso se deu devido ao esgotamento de oxigênio no ambiente, visto que, com a porta fechada não houve ventilação cruzada que pudesse proporcionar o fornecimento da quantidade suficiente do comburente para desenvolvimento do fogo.

Como pode-se observar na Figura 54, devido ao fato da porta estar fechada, em ambas as simulações realizadas (no FDS e no OZone) a concentração de oxigênio no ambiente cai rapidamente e, aos 3 minutos já está abaixo de 15 %.

Nestas condições, apesar do ambiente continuar aquecido, as chamas são extintas (CBMDF, 2006).

Da Figura 54 é possível observar que até os 3 minutos e 30 segundos há uma concordância entre os resultados de concentração de oxigênio obtidos através do FDS e do OZone. A partir desse momento, os resultados começam a divergir: no OZone a concentração de oxigênio diminui rapidamente, e aos 5 minutos o valor registrado é de 0 %, mantendo-se assim até os 18 minutos de simulação; no FDS a diminuição ocorre mais lentamente, e ao final da simulação a concentração de oxigênio registrada no cômodo é de 5 %.



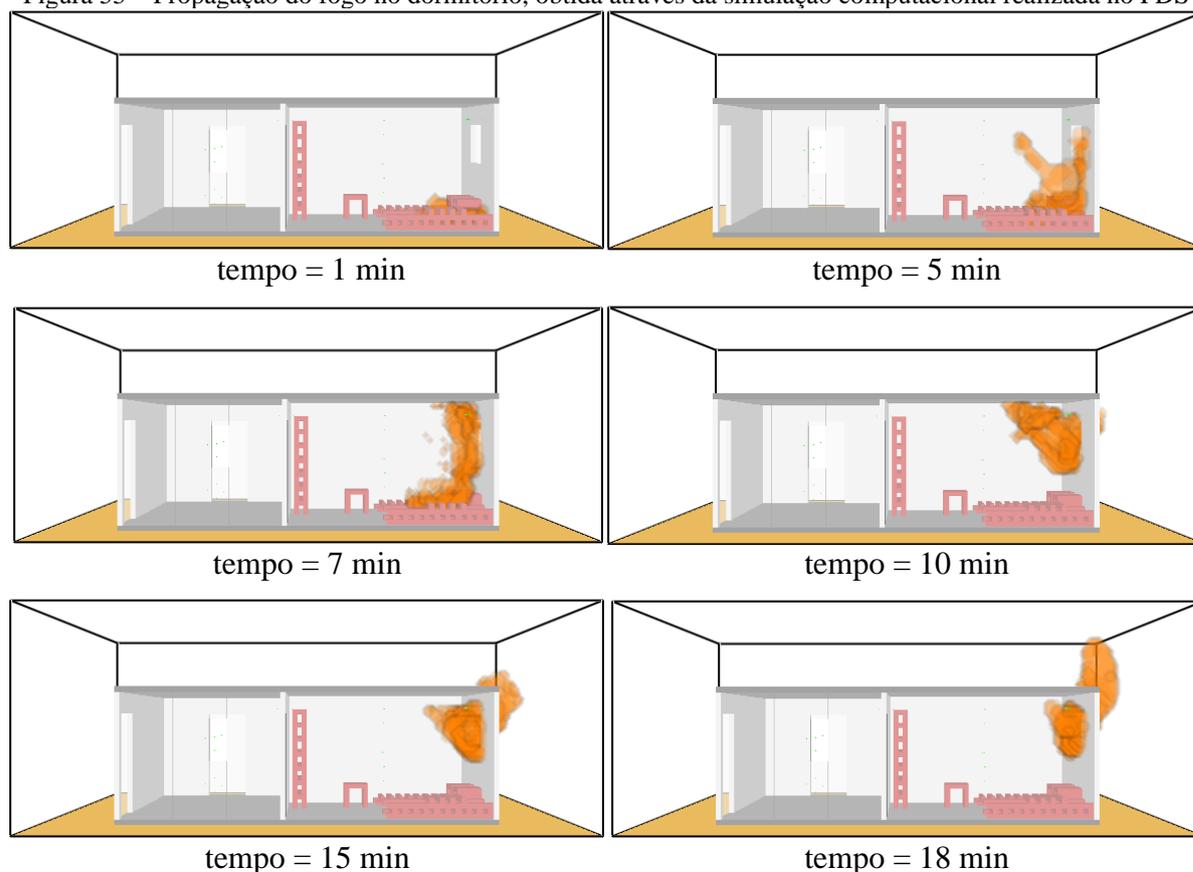
Ressalta-se que em ambos os *softwares*, essa medida foi realizada para o volume inteiro do cômodo. Sendo assim, possivelmente a concentração de oxigênio era maior nas regiões próximas à janela.

Como pode-se observar na Figura 55, na simulação realizada no FDS as chamas ficaram concentradas nos caibros de madeira que representaram o beliche presente no ensaio experimental.

Após 8 minutos de simulação, quando a concentração de oxigênio no ambiente era de 8 %, como não havia comburente o suficiente para fazer com que o combustível entre em combustão, as chamas concentraram-se na janela, onde havia oxigênio em abundância (apesar de não haver material combustível neste local).

Este comportamento também foi observado por Weinschenk *et al.* (2014), indicando que essa pode ser uma característica do FDS em cenários cuja concentração de oxigênio é limitada.

Figura 55 – Propagação do fogo no dormitório, obtida através da simulação computacional realizada no FDS



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

#### 4.4.2 Altura da camada livre de fumaça

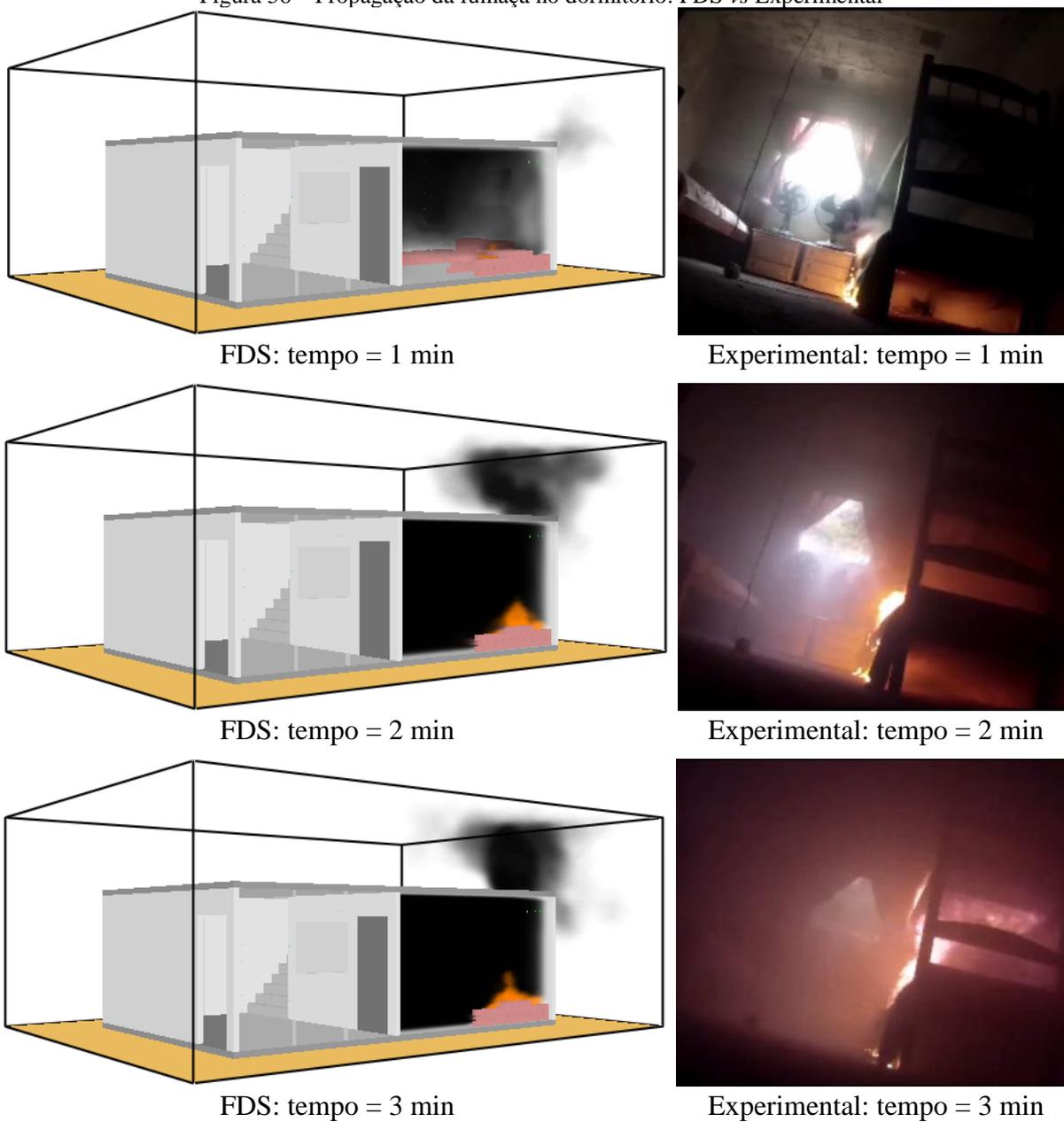
Como pode-se observar na Figura 56, assim como no ensaio experimental, na simulação realizada no FDS observou-se que a fumaça ocupa o cômodo rapidamente logo nos minutos iniciais do incêndio.

Entretanto, é possível observar que a propagação da fumaça ocorreu mais rápido na simulação realizada no FDS do que de fato ocorreu no ensaio experimental.

Além disso, nesta simulação computacional não foram observados os ciclos de combustão e exaustão como no ensaio experimental. Ou seja, não houve ciclos de saída da fumaça e entrada de ar fresco (rico em oxigênio) no cômodo.

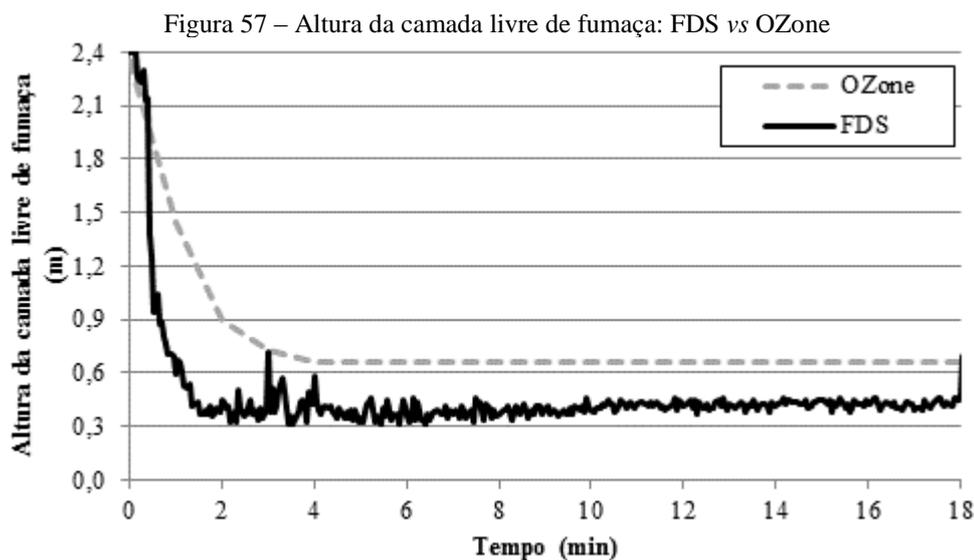
Isso é evidenciado na Figura 54, onde foi mostrado que a concentração de oxigênio no cômodo manteve-se sempre decrescente, e na Figura 57, onde é possível observar que, após a saturação de fumaça no cômodo, a altura da camada livre de fumaça se manteve praticamente constante durante toda simulação computacional.

Figura 56 – Propagação da fumaça no dormitório: FDS vs Experimental



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

As medidas da altura da camada livre de fumaça registradas nas simulações nos *softwares* FDS e OZone são mostradas na Figura 57.



Como pode-se observar, na simulação realizada no FDS a altura da camada livre de fumaça cai rapidamente nos instantes iniciais e, com 1 minuto e 20 segundos de simulação atinge o valor de 40 cm, mantendo-se nesta média durante os 18 minutos de simulação.

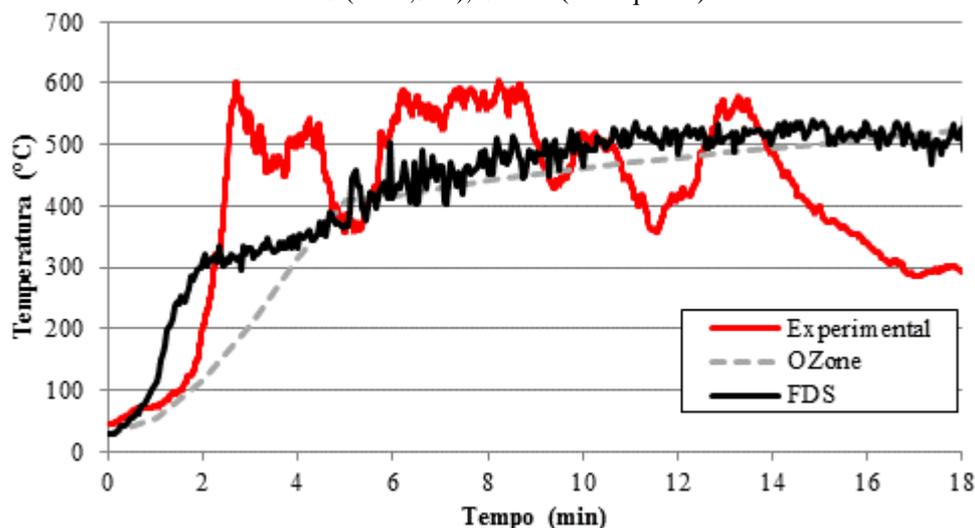
Já na simulação realizada no OZone, essa queda ocorre mais devagar, atingindo o valor máximo de 66 cm aos 4 minutos e mantendo-se neste valor durante o restante da simulação.

#### 4.4.3 Temperaturas

Como mostrado anteriormente, nas simulações computacionais não foram observados os ciclos de combustão e exaustão como no ensaio experimental. Isso refletiu diretamente no comportamento do desenvolvimento das temperaturas dos gases no dormitório. Consequentemente, os ciclos de aumento e diminuição das temperaturas também não foram registrados. Apesar disso, de maneira geral observou-se que as temperaturas obtidas com as simulações realizadas no FDS e OZone foram próximas das temperaturas médias obtidas no ensaio experimental.

Na Figura 58 são apresentadas as temperaturas dos gases registradas na camada superior do dormitório.

Figura 58 – Temperaturas dos gases na camada superior do dormitório: Experimental (termopar 08, h = 2,4 m), FDS (h = 2,3 m), OZone (zona quente)



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Desta figura é possível observar que na simulação realizada no OZone o crescimento das temperaturas dos gases entre 0 e 5 minutos, ocorreu mais lentamente do que na simulação realizada no FDS. Entretanto, a partir dos 5 minutos os resultados começam a convergir, atingindo valores próximos a 520 °C aos 18 minutos.

Na simulação computacional realizada no FDS, observou-se um rápido crescimento das temperaturas dos gases logo nos instantes iniciais da simulação, atingindo 300 °C aos 2 minutos. Depois disso o crescimento ocorre mais lentamente até atingir valores próximos a 450 °C aos 5 minutos.

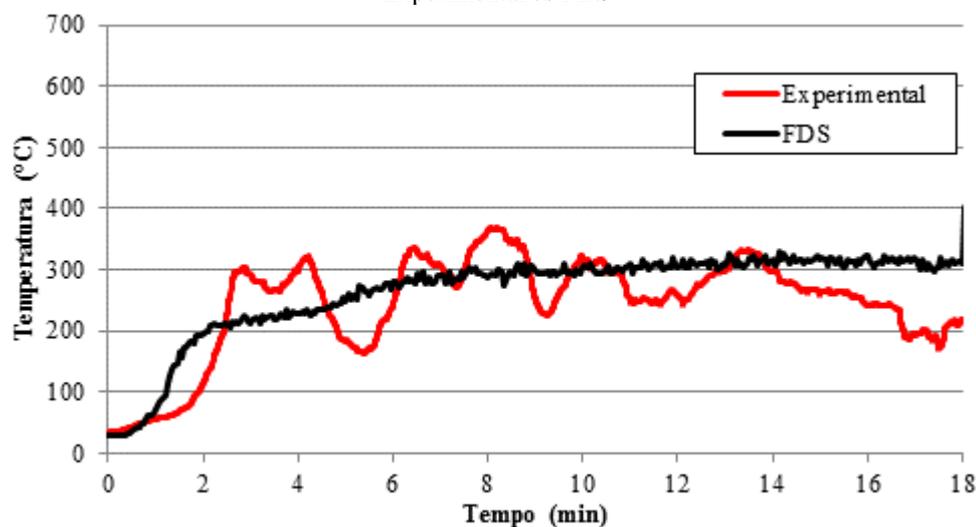
Como mostrado na Figura 55, dos 8 até os 18 minutos de simulação, devido ao esgotamento do oxigênio no cômodo, a combustão ocorreu localizada na janela. Com isso, as temperaturas dos gases na camada superior do centro do compartimento mantiveram-se com valores próximos a 500 °C, sem a ocorrência dos ciclos de aquecimento e arrefecimento observados no ensaio experimental.

No ensaio experimental este crescimento repentino ocorre entre 1min30s e 2min30s até o dormitório ser tomado pela fumaça promovendo uma saturação gasosa no ambiente, depois disso começam os ciclos de combustão e exaustão culminando em picos máximos de até 600 °C e mínimos de 360 °C. Aos 13min30s, após atingir um pico de 570 °C, o incêndio entra em arrefecimento e, aos 18 minutos a porta é aberta na tentativa, sem sucesso, de o reacender.

O comportamento mostrado na Figura 58 se repete em todos os pontos de medição no centro do dormitório, tanto na simulação computacional realizada no FDS, quanto no ensaio experimental. Ressalta-se que na simulação realizada no OZone não foi possível realizar medições em outros pontos do dormitório.

Na Figura 59 são apresentadas as temperaturas dos gases obtidas através do termopar 04, posicionado a uma altura de 120 cm do piso do dormitório (camada intermediária), tanto na simulação realizada no FDS, quanto no ensaio experimental.

Figura 59 – Temperaturas dos gases na camada intermediária do dormitório (termopar 04, h = 1,20 m):  
Experimental vs FDS



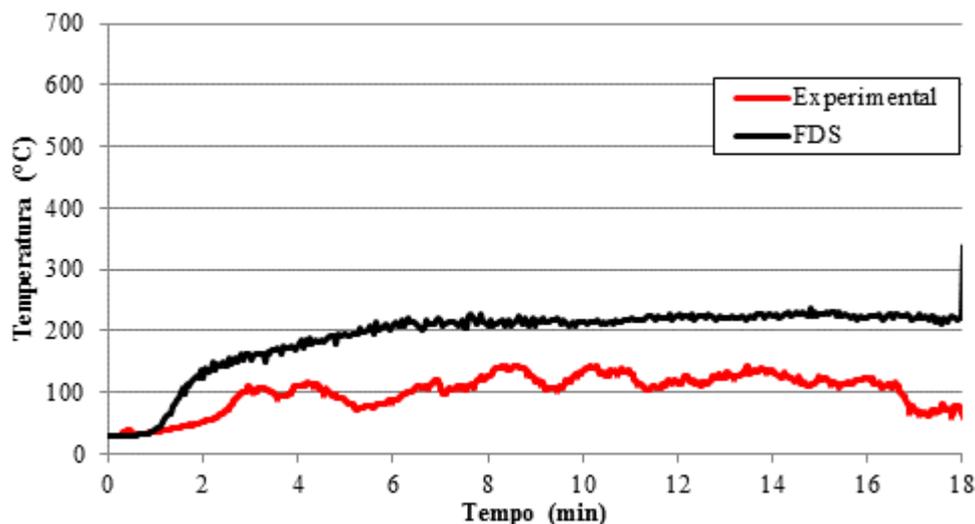
Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Na camada intermediária do dormitório as diferenças nos resultados experimental e computacional se tornam mais discretas. Observa-se que no ensaio experimental a temperatura máxima é atingida aos 10 minutos com valor 360 °C. Neste mesmo momento na simulação computacional a temperatura aferida é de 300 °C.

Na camada mais inferior do compartimento os valores se invertem. Neste ponto, as temperaturas aferidas através da simulação computacional se tornam maiores que as aferidas experimentalmente, ainda assim, a diferença entre esses valores mantém-se sempre entre 50 °C e 100 °C.

Na Figura 60 são apresentadas as temperaturas dos gases obtidas através do termopar 01, posicionado a uma altura de 30 cm do piso do dormitório (camada inferior).

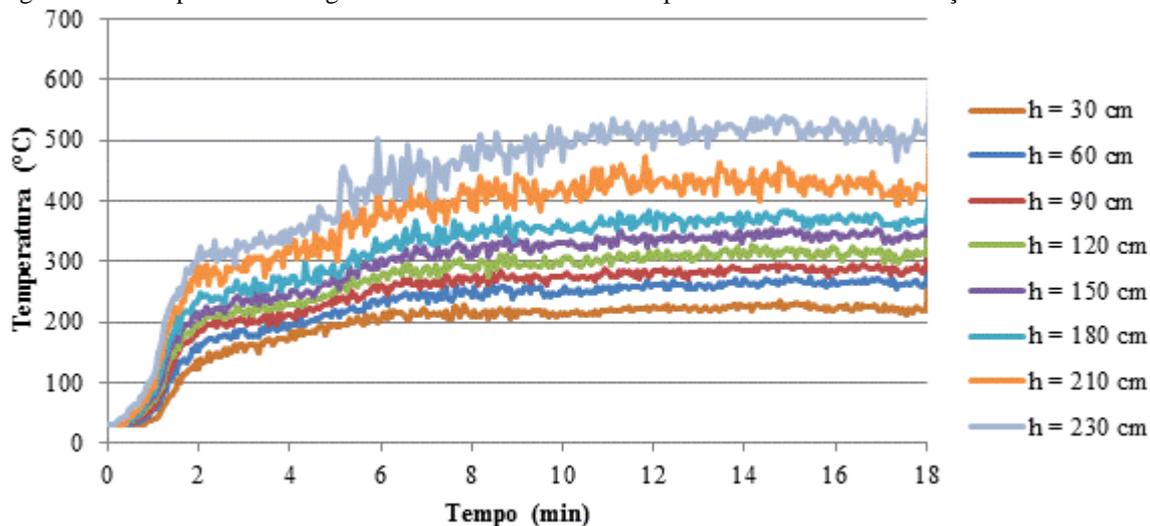
Figura 60 – Temperaturas dos gases na camada inferior do dormitório (termopar 01, h = 30 cm): Experimental vs FDS



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

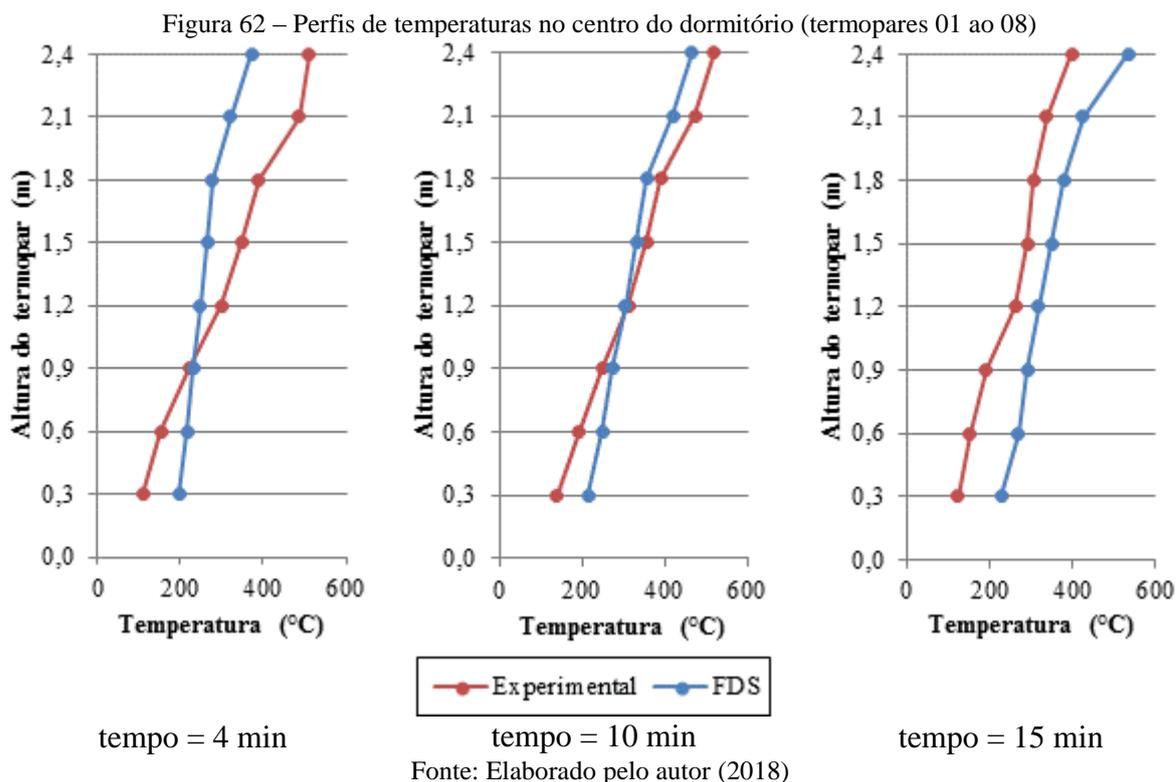
A Figura 61 mostra os resultados obtidos através dos termopares 01 a 08 na simulação realizada no FDS. Nesta figura é possível observar o gradiente de temperaturas dos gases desenvolvido no centro do dormitório. Com algumas diferenças, esse fenômeno também foi observado no ensaio experimental.

Figura 61 – Temperaturas dos gases obtidas através dos termopares de 01 a 08 na simulação realizada no FDS



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Dos resultados obtidos através dos termopares 01 a 08 pode-se traçar alguns perfis de temperatura obtidos no centro do dormitório, como mostrado na Figura 62.



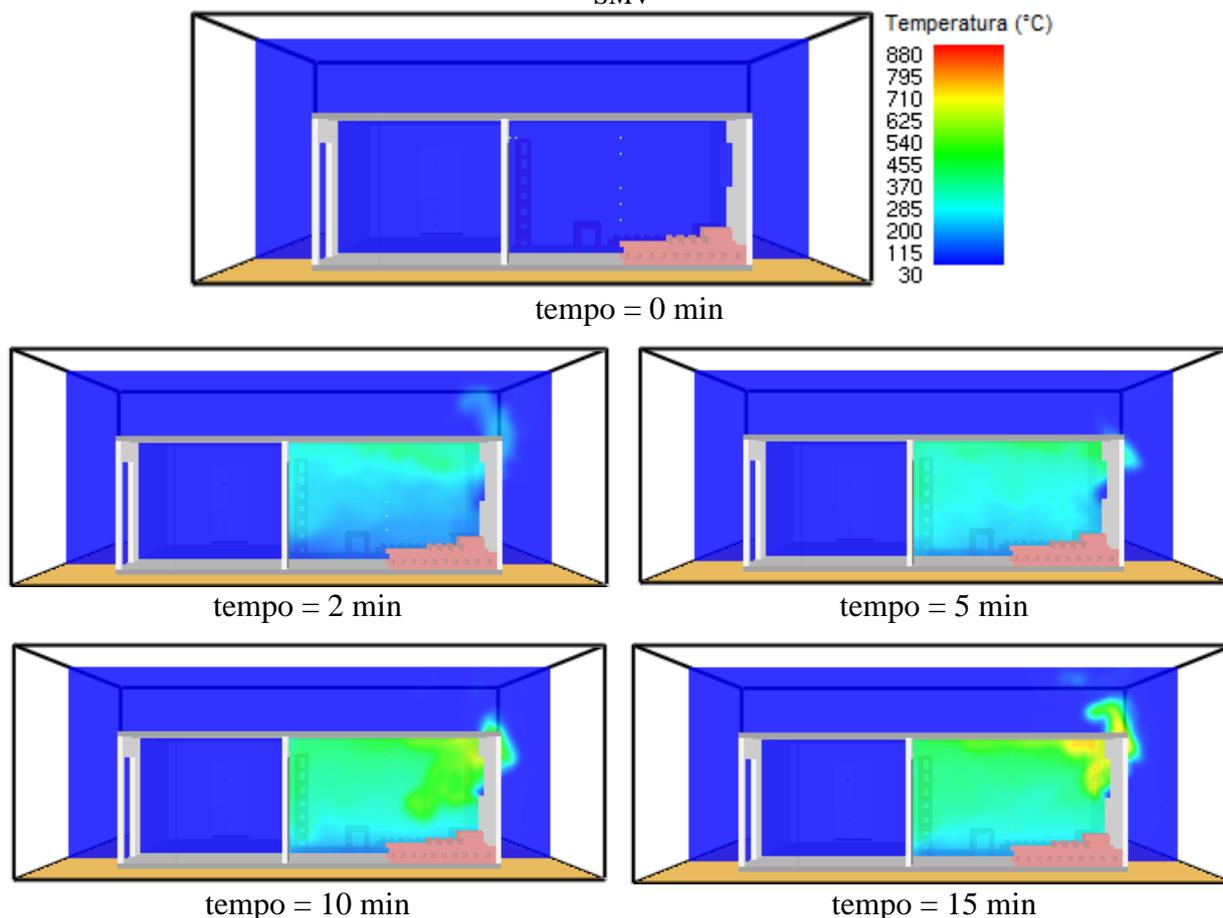
Como pode-se observar, a simulação computacional realizada no FDS apresentou resultados de temperaturas mais homogêneas ao longo da altura do compartimento. Observa-se que, nas camadas inferiores do dormitório, os resultados de temperaturas obtidas através da simulação no FDS sempre foram maiores que os obtidos experimentalmente. Já nas camadas superiores os resultados obtidos experimentalmente, até o início do arrefecimento do incêndio, aos 13min30s, foram ligeiramente maiores que os obtidos através da simulação computacional. Um comportamento semelhante foi observado por Yuen *et al.* (2014), indicando que essa pode ser uma característica deste *software*.

Após os 13min30s, em virtude do arrefecimento do incêndio observado no ensaio experimental, os resultados obtidos computacionalmente em todos os pontos monitorados foram maiores que os obtidos experimentalmente.

Apesar da simulação computacional proporcionar um gradiente de temperaturas mesmo expressivo, é evidente a diferença entre as alturas analisadas. Aos 15 minutos de simulação, a temperatura registrada na camada mais inferior do compartimento (a 30 cm do piso) foi de 220 °C, enquanto que a camada mais superior, próxima ao teto (a 230 cm do piso), foi de 540 °C, uma diferença de 320 °C, verificando-se um comportamento típico de incêndios em espaços fechados, decorrente da convecção dos gases quentes no ambiente.

A Figura 63 mostra alguns planos de temperaturas desenvolvidas no dormitório. Esses dados foram registrados através de um plano de medição que foi posicionado longitudinalmente ao dormitório, passando no meio da janela.

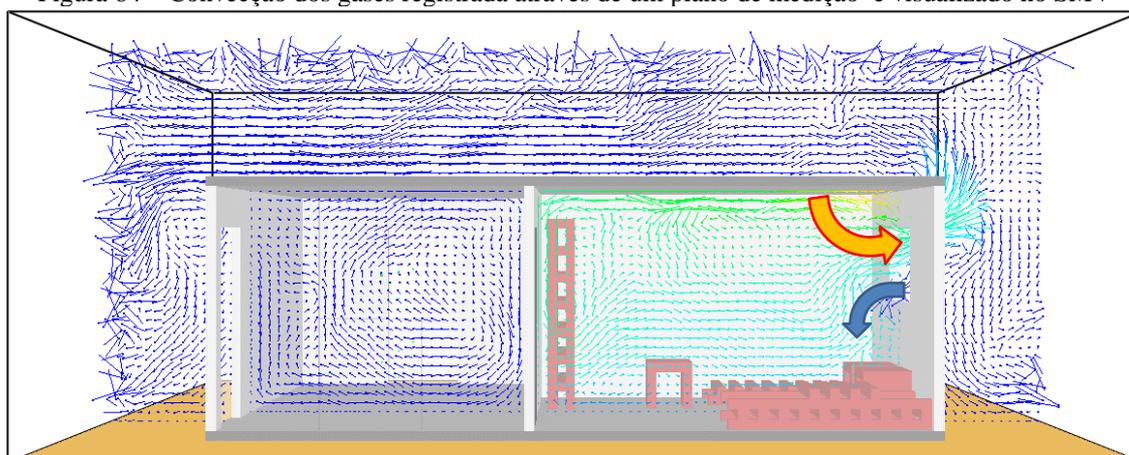
Figura 63 – Evolução das temperaturas dos gases registradas através de um plano de medição e visualizado no SMV



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Através deste perfil é possível visualizar o gradiente de temperaturas desenvolvido em todo o plano XZ no dormitório decorrente da convecção dos gases no ambiente. Fica evidente que as temperaturas máximas ocorrem próximo ao teto e à janela que estava aberta. Neste mesmo local também é possível visualizar uma pequena entrada de ar fresco vindo do exterior da edificação, como mostrado na Figura 64.

Figura 64 – Convecção dos gases registrada através de um plano de medição e visualizado no SMV

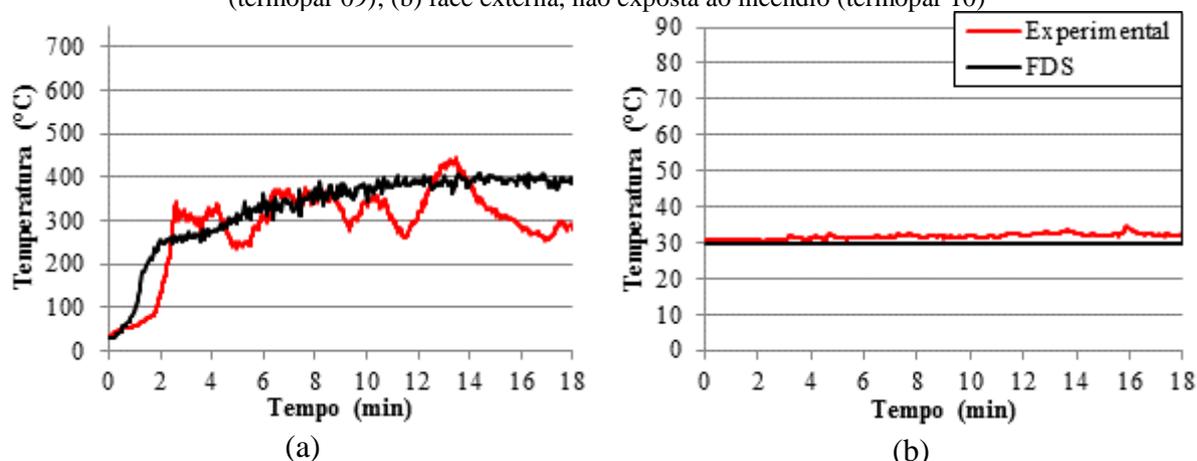


Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Quanto às temperaturas aferidas nas paredes, devido à incerteza da medição destas ter sido realmente nas faces das mesmas no ensaio experimental, foram posicionados medidores analogamente aos termopares no ensaio experimental (proporcionando a aferição de temperaturas que de fato foram absorvidas pelas paredes) e, complementarmente foram posicionados medidores afastados 10 cm das faces destas (proporcionando a aferição de temperaturas nos gases próximos às mesmas). Assim, na análise dos resultados, constatou-se que as temperaturas capturadas na simulação computacional que mais se aproximaram das obtidas experimentalmente foram as aferidas nos gases próximos às paredes, e não na face das mesmas.

A Figura 65 mostra as temperaturas aferidas nos gases próximos à parede P3, cujo revestimento interno foi argamassa de cimento.

Figura 65 – Temperaturas aferidas nos gases próximos à parede P3: (a) face interna, exposta ao incêndio (termopar 09); (b) face externa, não exposta ao incêndio (termopar 10)



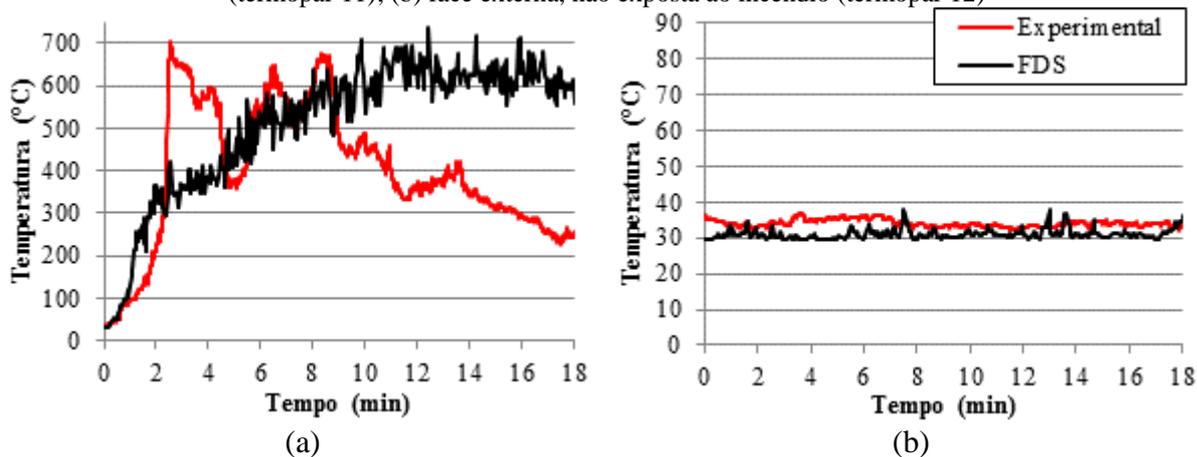
Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Na face interna da parede (face exposta ao incêndio), as temperaturas máximas desenvolvidas foram de 400 °C, valor bem próximo do obtido experimentalmente. Na face

externa da parede, as temperaturas aferidas, tanto computacionalmente quanto experimentalmente, não ultrapassaram 35 °C.

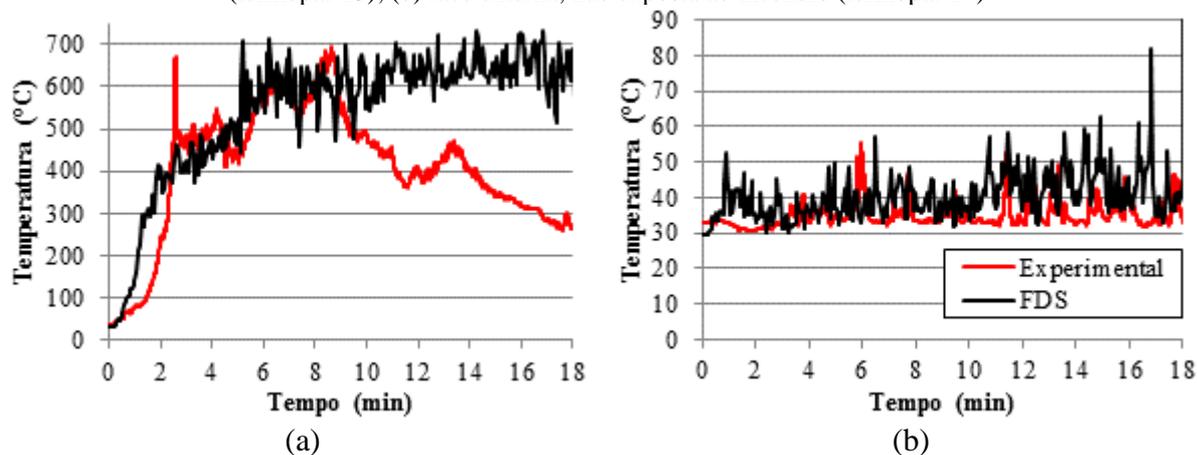
As Figura 66 e Figura 67 mostram as temperaturas aferidas nos gases próximos às paredes P2 e P1, cujo revestimento interno foi argamassa de gesso e chapisco cimentício, respectivamente.

Figura 66 – Temperaturas aferidas nos gases próximos à parede P2: (a) face interna, exposta ao incêndio (termopar 11); (b) face externa, não exposta ao incêndio (termopar 12)



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Figura 67 – Temperaturas aferidas nos gases próximos à parede P1: (a) face interna, exposta ao incêndio (termopar 13); (b) face externa, não exposta ao incêndio (termopar 14)



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Nas faces internas das paredes (faces expostas ao incêndio), as temperaturas máximas desenvolvidas foram de aproximadamente 730 °C, valor bem próximo do obtido experimentalmente. Essas foram as temperaturas máximas registradas no dormitório através do FDS, o que é justificado pelo fato desses medidores estarem mais próximos do foco do incêndio.

Nestes registros nota-se uma oscilação maior nos resultados nas faces externas das paredes, sobretudo na parede P1. Este fato justifica-se pelos termopares estarem posicionado

próximos a janela do dormitório. Assim, devido a incidência do vento no local, este medidor aferiu as temperaturas advindas da convecção dos gases que saíram do dormitório.

Na face externa da parede P2, as temperaturas aferidas, tanto computacionalmente quanto experimentalmente, não ultrapassaram 38 °C. Na parede P1 a diferença entre os resultados foi um pouco maior: no ensaio experimental a temperatura máxima registrada foi de 65 °C, enquanto que na simulação computacional esse valor foi de 82 °C.

#### 4.5 RESUMO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi apresentada a simulação computacional de incêndio em um dormitório pertencente a edificações tipicamente incendiadas na cidade de Recife / PE, através dos *softwares* FDS e OZone.

Alguns pontos considerados mais relevantes foram descritos de forma detalhada ao longo do capítulo e, o arquivo de entrada de dados criado para a simulação realizada no FDS encontra-se no “APÊNDICE G” e a entrada de dados da simulação realizada no OZone encontra-se no “APÊNDICE H” deste trabalho.

Diante da dificuldade de obtenção de propriedades térmicas e de combustão de todos os materiais combustíveis presentes no ensaio experimental, para simular este incêndio no FDS considerou-se uma estratégia simplificada onde, a carga de incêndio foi materializada com caibros de madeira, distribuídos no ambiente conforme a distribuição dos móveis e objetos presentes no ensaio experimental. No OZone essa carga de incêndio foi atribuída em função da área do piso do compartimento.

Diante dos resultados apresentados pode-se enumerar as seguintes conclusões:

- Os resultados de temperatura dos gases próximos ao teto do dormitório (na camada quente) obtidos através das simulações nos *softwares* foram semelhantes entre si, sobretudo a partir dos 5 minutos de simulação, atingindo valores máximos de 520 °C;
- Nas camadas inferiores do dormitório, os resultados de temperaturas dos gases obtidas através da simulação computacional no FDS sempre foram maiores que os obtidos experimentalmente. Já nas camadas superiores os resultados obtidos experimentalmente foram maiores que os obtidos através da simulação computacional;
- As temperaturas máximas obtidas através da simulação no FDS tiveram valores próximos de 730 °C e foram registradas próximo às faces internas das paredes P1 e P2;

- Nas simulações computacionais realizadas em ambos os *softwares* não foram observados os ciclos de combustão e exaustão do incêndio tal qual no ensaio experimental;
- Assim como no ensaio experimental, na simulação realizada no FDS não houve generalização do incêndio, devido ao esgotamento de oxigênio no ambiente.

De modo geral, apesar de algumas diferenças, pode-se afirmar que o comportamento do desenvolvimento de temperaturas dos gases, obtido através da simulação computacional no FDS e no OZone, foi coerente com o observado no ensaio experimental.

Além disso, no decorrer do desenvolvimento do modelo no FDS concluiu-se que a velocidade do vento era uma variável importante para a obtenção de resultados mais coerentes com a realidade. Chegou-se a esta conclusão a partir da observação dos acontecimentos do ensaio experimental e da comparação dos resultados obtidos computacionalmente com os obtidos experimentalmente, reforçando novamente a ideia de que os ensaios experimentais são de suma importância de para validação dos modelos desenvolvidos no FDS.

## 5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentada a simulação numérica de incêndios em edificações através dos *softwares* FDS e OZone.

Durante a realização da revisão de literatura percebeu-se uma predominância de pesquisas que utilizaram o *software* FDS como ferramenta auxiliar no desenvolvimento de estudos de SCIE. Sendo assim, este se tornou a principal ferramenta computacional analisada neste trabalho.

Baseado nos pressupostos encontrados nesta revisão, no capítulo três foi apresentado um modelo de incêndio compartimentado desenvolvido nos *softwares* FDS e OZone e validado com um estudo experimental encontrado na literatura. Com esse estudo de caso pôde-se concluir que:

- Os maiores desafios enfrentados durante o desenvolvimento dos modelos computacionais no FDS são: a obtenção das propriedades térmicas e de combustão dos materiais a serem empregado e a definição dos critérios a serem adotados nas simulações;
- Com a escassez de referencial bibliográfico e/ou dados precisos, para o desenvolvimento de um modelo simples de combustão, alguns parâmetros podem ser definidos através de testes de sensibilidade. Entretanto, tal estratégia só é possível de ser executada quando há resultados reais para comparação e calibração do modelo. Ficando evidente que os ensaios experimentais são de suma importância para validação dos modelos desenvolvidos no FDS;
- A consideração dos materiais envolvidos numa simulação computacional, tanto *software* FDS quanto no OZone, bem como conhecimento de sua natureza (combustível ou incombustível) e, propriedades térmicas e de combustão (ainda que de forma aproximada) são de suma importância para a obtenção de resultados coerentes com a realidade;
- Quanto aos resultados obtidos, conclui-se que, quando calibrados adequadamente, ambos os *softwares* são capazes de representar adequadamente o comportamento do desenvolvimento de temperaturas dos gases decorrentes de incêndios em compartimentos.

Partindo do pressuposto que os modelos desenvolvidos no FDS e no OZone no capítulo três está calibrado e é capaz de representar o desenvolvimento de incêndio em edificações, no capítulo quatro foi apresentada a simulação computacional de incêndio em um dormitório

pertencente a edificações tipicamente incendiadas na cidade de Recife / PE, através de ambos os *softwares*.

Na simulação realizada através do FDS, uma estratégia simplificada foi adotada: diante da dificuldade de obtenção de propriedades térmicas e de combustão de todos os materiais combustíveis presentes neste dormitório, toda a carga de incêndio do cômodo foi convertida em caibros de madeira. No OZone, essa carga foi atribuída em função da área do piso do dormitório.

Com essas simulações pôde-se concluir que:

- A grande vantagem do OZone frente ao FDS diz respeito ao tempo de processamento das simulações: enquanto no OZone esse não passa de alguns segundos, no FDS pode facilmente demorar horas ou até dias, dependendo da complexidade do modelo desenvolvido. Além disso, a descrição dos cenários de incêndio realizada no OZone é significativamente mais simples que a realizada no FDS;
- Em contrapartida, a variabilidade dos resultados que podem ser obtidos se torna uma das maiores vantagens do FDS frente ao OZone. Dentre outros, destacam-se:
  - Temperatura dos gases: no OZone os resultados são obtidos apenas para a “zona quente” e para a “zona fria” do compartimento, enquanto que no FDS esses podem ser obtidos para qualquer ponto no domínio computacional;
  - Temperaturas em objetos sólidos: no OZone os resultados são obtidos apenas em elementos de aço, enquanto que no FDS esses podem ser obtidos em qualquer tipo de material;
  - Visualização da propagação do incêndio: no OZone os resultados obtidos são todos tabulados, enquanto que no FDS, além desses é possível visualizar a propagação do fogo e movimentação da fumaça através das animações gráficas geradas no SMV.
- Quanto aos resultados obtidos: de modo geral, apesar de algumas diferenças, pode-se afirmar que o comportamento do desenvolvimento de temperaturas dos gases, obtido através da simulação computacional no FDS e no OZone, foi coerente com o observado no ensaio experimental;
- Os resultados de temperatura dos gases registrados na zona quente do dormitório através do OZone foram compatíveis com os resultados obtidos através do FDS.

Especificamente sobre os modelos desenvolvidos no FDS, conclui-se que para a simulação de incêndio em cenários simples (com apenas um material caracterizando a carga de incêndio e com ventilação cruzada proporcionando condições de concentração de oxigênio ideal para a propagação do fogo), como mostrado no capítulo três, a adoção de estratégias simplificadas para a caracterização da carga de incêndio é aceitável para a obtenção de resultados próximos da realidade.

Entretanto, em cenários mais complexos (com vários materiais combustíveis compondo a carga de incêndio e com disponibilidade de oxigênio limitada), como mostrado no capítulo quatro, a adoção de tais estratégias pode culminar na obtenção de resultados, ainda que coerentes, mais distantes da realidade.

Sendo assim, para realização de trabalhos futuros as seguintes sugestões são feitas:

- Estudar novas formas de representação da carga de incêndio dos cenários analisados, como por exemplo, a caracterização de todos os materiais combustíveis presentes nos mesmos;
- Analisar o comportamento do incêndio sob cenários com diferentes configurações de aberturas e distribuição da carga de incêndio na edificação;
- Realizar novos ensaios experimentais considerando cenários onde a concentração de oxigênio no ambiente não é limitada, proporcionando o pleno desenvolvimento do incêndio;
- Realizar ensaios experimentais de caracterização das propriedades da madeira e outros materiais combustíveis comumente presente em edificações, para que estes sirvam de entrada de dados nas simulações numéricas.

## REFERÊNCIAS

ALVES, A. B. C. G.; CAMPOS, A. T.; BRAGA, G. C. B. **Simulação Computacional de Incêndio Aplicada ao Projeto de Arquitetura**. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL NUTAU'2008 – Espaço Sustentável: Inovações em Edifícios e Cidades, Núcleo de Pesquisa em Tecnologia da Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (USP), São Paulo/SP (Brasil), 2008. Disponível em: <<https://www.usp.br/nutau/CD/71%20196.pdf>>. Acessado em: 25 set. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT NBR 15220-2: Desempenho térmico de edificações - Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações**. Rio de Janeiro, 2005.

BRAGA, G. C. B. & LANDIM, H. R. O. Investigação de Incêndio. In: SEITO, A. I.; GILL, A. A.; PANNONI, F. D.; ONO, R.; SILVA, S. B.; CARLO, U. D.; SILVA, V. P. – **A segurança contra incêndio no Brasil**. São Paulo: Projeto Editora, p.333-345, 2008.

BRASIL. Câmara dos Deputados. **Frente Parlamentar de Segurança Contra Incêndio é lançada no Congresso Nacional**. Brasília/DF, 2015. Disponível em: <<http://www2.camara.leg.br/camaranoticias/noticias/SEGURANCA/498305-FRENTE-PARLAMENTAR-DE-SEGURANCA-CONTRA-INCENDIO-E-LANCADA-NO-CONGRESSO-NACIONAL.html>>. Acessado em: 05 nov. 2017.

BRASIL. **Lei nº 13.425, de 30 de março de 2017**. Estabelece diretrizes gerais sobre medidas de prevenção e combate a incêndio e a desastres em estabelecimentos, edificações e áreas de reunião de público; altera as Leis nºs 8.078, de 11 de setembro de 1990, e 10.406, de 10 de janeiro de 2002 – Código Civil; e dá outras providências. Disponível em: <[https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2015-2018/2017/lei/113425.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/lei/113425.htm)>. Acessado em: 05 nov. 2017.

BRUNETTO, L. O. **Simulação computacional de incêndios: uma aplicação no prédio da escola de engenharia nova da UFRGS**. Trabalho de Diplomação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre/RS (Brasil), 105 p., 2015. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/148710>>. Acessado em: 25 set. 2017.

BYSTRÖM, A.; CHENG, X.; WICKSTRÖM, U.; VELJKOVIC, M. Full-scale experimental and numerical studies on compartment fire under low ambient temperature. **Building and Environment**, v.51, p. 255-262, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.11.010>>. Acessado em: 25 set. 2017.

CADORIN, J. F.; PINTEA, D.; FRANSSSEN, J. M. **The Design Fire Tool OZone V2.0 - Theoretical Description and Validation On Experimental Fire Tests**. 1st DRAFT, University of Liege, Belgium, 11th of June 2001.

CARLOS, T. B.; MARIANI, L. M.; MORAES, H. H. Q. Avaliação do desempenho de sistemas de controle de fumaça por modelagem numérica. **Ignis: Revista Técnico Científica do Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina**, Florianópolis/SC (Brasil), Edição Especial: Anais do XVI SENABOM, v.1, n.2, p. 3-16, 2016. Disponível em: <<https://periodicos.cbm.sc.gov.br/index.php/revistaignis/article/view/119>>. Acessado em: 25 set. 2017.

CARVALHO, J. E. C. **Aplicação de fluidodinâmica computacional para análise de segurança de túneis rodoviários sob incêndio**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro/RJ (Brasil), 73 p., 2013. Disponível em: <[http://www.coc.ufrj.br/index.php?option=com\\_content&view=article&id=4164:julia-epichin-cheroto-de-carvalho&catid=378&Itemid=153&lang=pt-br](http://www.coc.ufrj.br/index.php?option=com_content&view=article&id=4164:julia-epichin-cheroto-de-carvalho&catid=378&Itemid=153&lang=pt-br)>. Acessado em: 25 set. 2017.

CENTENO, F. R.; CASSOL, F.; RODRIGUES, E. E. C. **Validação de modelagem numérica empregando o Software Fire Dynamics Simulator para um ambiente habitacional em situação de incêndio**. In: 3º CILASCI, Congresso Ibero-Latino-Americano sobre Segurança Contra Incêndios, Porto Alegre/RS (Brasil), 2015.

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO DISTRITO FEDERAL – CBMDF: **Manual básico de combate a incêndio. Módulo 1 - Comportamento do fogo**. Brasília / DF, 10 nov. 2006. Disponível em: <<https://www.cbm.df.gov.br/2012-11-12-17-42-33/2012-11-13-16-14-57?task=document.download&id=748>>. Acessado em: 20 dez. 2017.

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DE SANTA CATARINA – CBMSC IN 003: **Carga de incêndio**. Santa Catarina, 2014. Disponível em: <[http://www.cbm.sc.gov.br/dat/images/arquivo\\_pdf/IN/IN\\_29\\_06\\_2014/IN\\_03%20.pdf](http://www.cbm.sc.gov.br/dat/images/arquivo_pdf/IN/IN_29_06_2014/IN_03%20.pdf)>. Acessado em: 20 dez. 2017.

CORRÊA, C.; SILVA, J. J. R.; OLIVEIRA, T. A. C. P.; BRAGA, G. C. Mapeamento de Incêndios em Edificações: um estudo de caso na cidade do Recife. **Revista de Engenharia Civil IMED**, Passo Fundo / RS (Brasil), v.2 n.3, p. 15-34, 2015. Disponível em: <<https://seer.imed.edu.br/index.php/revistaec/article/view/1115/763>>. Acesso em: 25 set. 2017.

CORRÊA, C.; SILVA, J. J. R.; PIRES, T. A.; BRAGA, G. C.; MELO, I. A. V. Edifício Modal: Uma representação para o Estudo de Incêndios na cidade de Recife. **Revista Cientec**, Recife/PE (Brasil), v.8, n.2, 2016.

CORRÊA, C.; BRAGA, G. C.; JUNIOR, J. B.; SILVA, J. J. R.; TABACZENSKI, R.; PIRES, T. A. Incêndio em compartimento de residência na Cidade do Recife: Um estudo experimental. **Revista ALCONPAT**, Mérida/Yucatán (México), v.7 n.3, p. 215-230, 2017. Disponível em: <<http://www.revistas-conacyt.unam.mx/alconpat/index.php/RA/article/view/221>>. Acessado em: 29 set. 2017.

COSTA, C. N. & SILVA, V. P. **Revisão histórica das curvas padronizadas de incêndio**. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL NUTAU'2006 – Inovações Tecnológicas e Sustentabilidade, Núcleo de Pesquisa em Tecnologia da Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, São Paulo/SP (Brasil), 2006. Disponível em: <<http://www.lmc.ep.usp.br/grupos/gsi/wp-content/nutau/costa.pdf>>. Acessado em: 20 out. 2017.

CUNHA, L. J. B. F. **O desempenho da compartimentação horizontal seletiva na promoção da segurança contra incêndio em edificações**. Tese de Doutorado em Arquitetura e Urbanismo, Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal/RN (Brasil), 237 p., 2016.

Disponível em: <<https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/21137>>. Acessado em: 25 set. 2017.

CUNHA, L. L. & MARTINELLI Jr., R. H. Sistema de controle de fumaça. In: SEITO, A. I.; GILL, A. A.; PANNONI, F. D.; ONO, R.; SILVA, S. B.; DEL CARLO, U.; SILVA, V. P. **A segurança contra incêndio no Brasil**. São Paulo/SP (Brasil): Projeto Editora, p.257-275, 2008.

DEL CARLO, U. A segurança contra incêndio no mundo. In: SEITO, A. I.; GILL, A. A.; PANNONI, F. D.; ONO, R.; SILVA, S. B.; DEL CARLO, U.; SILVA, V. P. **A segurança contra incêndio no Brasil**. São Paulo/SP (Brasil): Projeto Editora, p.1-7, 2008a.

\_\_\_\_\_. A segurança contra incêndio no Brasil. In: SEITO, A. I.; GILL, A. A.; PANNONI, F. D.; ONO, R.; SILVA, S. B.; DEL CARLO, U.; SILVA, V. P. **A segurança contra incêndio no Brasil**. São Paulo/SP (Brasil): Projeto Editora, p. 9-17, 2008b.

DOLVITSCH, J. N.; KLEIN, D. L. **Segurança contra incêndios: simulação computacional**. In: 3º CILASCI, Congresso Ibero-Latino-Americano sobre Segurança Contra Incêndios, Porto Alegre/RS (Brasil), 2015.

EWER, J.; JIA, F.; GRANDISON, A.; GALEA, E.; PATEL, M. **SMARTFIRE v4.3: USER GUIDE AND TECHNICAL MANUAL SMARTFIRE TUTORIALS**. 2013. Disponível em: <[https://fseg.gre.ac.uk/smartfire/smartfire\\_docs/SMARTFIRE\\_Tutorials\\_v4\\_3.pdf](https://fseg.gre.ac.uk/smartfire/smartfire_docs/SMARTFIRE_Tutorials_v4_3.pdf)>. Acessado em: 30 nov. 2017.

FIGUEROA, M. J. M. & MORAES, P. D. Comportamento da madeira a temperaturas elevadas. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 9, n. 4, p. 157-174, out./dez. 2009. Disponível em:

<<http://www.seer.ufrgs.br/index.php/ambienteconstruido/article/view/9547/7050>>. Acessado em: 15 dez. 2017.

FONTENELLE, F. M. A. **Análise Térmica em Estruturas de Tanques de Armazenamento de Etanol em Situação de Incêndio**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro/RJ (Brasil), 112 p., 2012. Disponível em: <[http://www.coc.ufrj.br/index.php?option=com\\_content&view=article&id=4142:flavia-marques-antunes-fontenelle&catid=112&Itemid=153&lang=pt-br](http://www.coc.ufrj.br/index.php?option=com_content&view=article&id=4142:flavia-marques-antunes-fontenelle&catid=112&Itemid=153&lang=pt-br)>. Acessado em: 12 dez. 2017.

GILL, A. A.; NEGRISOLO, W.; OLIVEIRA, S. A. Aprendendo com os grandes incêndios. In: SEITO, A. I.; GILL, A. A.; PANNONI, F. D.; ONO, R.; SILVA, S. B.; DEL CARLO, U.; SILVA, V. P. **A segurança contra incêndio no Brasil**. São Paulo/SP (Brasil): Projeto Editora, p.19-33, 2008.

GOUVEIA, A. M. C. **Introdução à engenharia de incêndio: para estudantes, arquitetos, engenheiros, administradores e bombeiros**. Belo Horizonte/MG (Brasil): 3i Editora, 230 p., 2017.

HAUSER, A. J. **Simulação computacional de incêndio em tanque contendo óleo combustível: avaliação em tanques isolados conforme NBR 17505-7**. Trabalho de Diplomação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio

Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre/RS (Brasil), 65 p., 2016. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/148762>>. Acessado em: 12 dez. 2017.

HONMA, M.; OTAKE, T.; MIYAMOTO, H.; OKAMOTO, K.; WATANABE, N. **Simulation of fire development and spread in japanese-style rooms under different ventilation conditions**. In: 13th INTERFLAM, International Fire Science & Engineering Conference, Londres, Reino Unido, p. 1371-1382, 2013.

KIRYU, T. M. **Avaliação da temperatura média das camadas de gases em um compartimento em situação de incêndio: comparação de dados experimentais, resultados numéricos e de modelos analíticos e empíricos**. Trabalho de Diplomação em Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre/RS (Brasil), 25 p., 2017. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/165290>>. Acessado em: 12 dez. 2017.

INTERNATIONAL STANDARD – **ISO 834-1: Fire-resistance tests - Elements of building construction. Part 1: General requirements**. Suíça, 1999.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. **Estações automáticas - gráficos**. Brasil, 2017. Disponível em: <[http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=rede\\_estacoes\\_auto\\_graf](http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=rede_estacoes_auto_graf)>. Acessado em: 20 mar. 2017.

INSTITUTO SPRINKLER BRASIL – ISB. **Estatísticas**. s.d. Disponível em: <<http://www.sprinklerbrasil.org.br/instituto-sprinkler-brasil/estatisticas/>>. Acessado em: 20 out. 2017.

MARIANI, L. M. & CARLOS, T. B. Estudo de evacuação em edificação em Brasília com o uso do FDS-EVAC. **Ignis: Revista Técnico Científica do Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina**, Florianópolis/SC (Brasil), Edição Especial: Anais do XVI SENABOM, v.1, n.2, p. 120-134, 2016. Disponível em: <<https://periodicos.cbm.sc.gov.br/index.php/revistaignis/article/view/129>>. Acessado em: 12 dez. 2017.

MATOS, L. V. **Estudo numérico do escoamento de gases por uma abertura durante um incêndio em ambiente conjugado**. Trabalho de Diplomação em Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre/RS (Brasil), 25 p., 2017. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/165208>>. Acessado em: 12 dez. 2017.

MAZZONI, F. **Simulação computacional de incêndios: aplicação no caso do Condomínio Edifício Cacique em Porto Alegre – RS**. Trabalho de Diplomação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre/RS (Brasil), 68 p., 2010. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/26041>>. Acessado em: 12 dez. 2017.

McGRATTAN, K.; HOSTIKKA, S.; McDERMOTT, R.; FLOYD, J.; WEINSCHENK, C.; OVERHOLT, K. **Fire Dynamics Simulator – User’s Guide**. NIST Special Publication 1019 Sixth Edition, Gaithersburg, Maryland, (EUA), (FDS Version 6.5.3), 18 jan. 2017a. Disponível em: <<https://github.com/firemodels/fds/releases>>. Acessado em: 20 dez. 2017.

McGRATTAN, K.; HOSTIKKA, S.; McDERMOTT, R.; FLOYD, J.; VANELLA, M.; WEINSCHENK, C.; OVERHOLT, K. **Fire Dynamics Simulator – User’s Guide**. NIST Special Publication 1019 Sixth Edition, Gaithersburg, Maryland, (EUA), (FDS Version 6.6.0), 1 nov. 2017b. Disponível em: <<https://pages.nist.gov/fds-smv/manuals.html>>. Acessado em: 30 nov. 2017.

NORMA PORTUGUESA – **NP EN 1991-1-2: Acções em estruturas Parte 1-2: Acções gerais. Acções em estruturas expostas ao fogo**. Caparica (Portugal), 2010.

ONO, R.; VENEZIA, A. P. P. G.; VALENTIN, M. V. Arquitetura e urbanismo. In: SEITO, A. I.; GILL, A. A.; PANNONI, F. D.; ONO, R.; SILVA, S. B.; DEL CARLO, U.; SILVA, V. P. **A segurança contra incêndio no Brasil**. São Paulo/SP (Brasil): Projeto Editora, p.123-134, 2008.

PEACOCK, R. D.; RENEKE, P. A.; FORNEY, G. P. **CFAST – Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport (Version 7). Volume 2: User’s Guide**. NIST Technical Note 1889v2, Gaithersburg, Maryland, (EUA), 2017. Disponível em: <<https://www.nist.gov/el/fire-research-division-73300/product-services/consolidated-fire-and-smoke-transport-model-cfast>>. Acessado em: 30 nov. 2017.

ROCHA, M. A. F. **Determinação experimental de propriedades de combustão de madeiras maciças brasileiras**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro/RJ, 147 p., 2014. Disponível em: <[http://www.coc.ufrj.br/index.php?option=com\\_content&view=article&id=4483:monique-amaro-de-freitas-rocha&catid=380&Itemid=153&lang=pt-br](http://www.coc.ufrj.br/index.php?option=com_content&view=article&id=4483:monique-amaro-de-freitas-rocha&catid=380&Itemid=153&lang=pt-br)>. Acessado em: 12 dez. 2017.

RODRIGUES, E. E. C. **Análise da eficiência do sistema de compartimentação vertical externa por afastamento entre janelas e por projeções horizontais segundo as exigências normativas brasileiras**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre/RS (Brasil), 178 p., 2009. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/19045>>. Acessado em 25 set. 2017.

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**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre/RS (Brasil), 131 p., 2011. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/29047>>. Acessado em: 25 set. 2017.

SCHEER, S. & BARANOSKI, E. L. **A utilização de simuladores de incêndio como ferramenta auxiliar para o desenvolvimento de projetos de arquitetura e de prevenção de incêndio**. In: VII WBGPPCE 2007, Workshop Brasileiro de Gestão do Processo de Projeto na Construção de Edifícios, Curitiba, Brasil, 2007.

TEIXEIRA, C. M.; RODRIGUES, J. P. C.; BARATA, P.; PIRES, T. A. C. **Experimental and Numerical Simulations of a natural Fire in a Compartment**. In: 15th ICEM15, International Conference on Experimental Mechanics, Porto (Portugal), 2012.

THUNDERHEAD ENGINEERING. **PyroSim User Manual**. 2016.

WEINSCHENK, C. G.; OVERHOLT, K. J.; MADRZYKOWSKI, D. **Simulation of an Attic Fire in a Wood Frame Residential Structure -Chicago, IL**. NIST – Technical Note 1838: National Institute of Standards and Technology (EUA), 39 p., 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.6028/NIST.TN.1838>>. Acessado em: 12 dez. 2017.

YUEN, A.C.Y.; YEOH, G.H.; ALEXANDER, R.; COOK, M. Fire scene reconstruction of a furnished compartment room in a house fire. **Case Studies in Fire Safety**, v.1, p. 29-35, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.csfs.2014.01.001>>. Acessado em: 12 dez. 2017.

## APÊNDICE A - ARQUIVO DE ENTRADA DE DADOS DO MODELO DESENVOLVIDO NO FDS PARA O ESTUDO DE CASO 01

A seguir é apresentado o arquivo de entrada de dados desenvolvido para a simulação computacional de incêndio no *software* FDS (Situação 2), referente ao ensaio experimental realizado por Teixeira *et al.* (2012).

```

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

-----
DEFINIÇÃO DA MALHA (10 cm):
-----
&MESH IJK=64,36,32, XB=-0.5,5.9,-0.5,3.1,-0.1,3.1 /
-----
DEFINIÇÃO DO TEMPO DE SIMULAÇÃO (EM SEGUNDOS):
-----
&TIME T_END=7200./

&DUMP DT_RESTART=10.0 / cria arquivos de restart a cada 10 s de
simulação
-----
PARÂMETROS INICIAIS DO AMBIENTE:
-----
TEMPERATURA AMBIENTE = 20°c
PRESSÃO ATMOSFÉRICA = 101325 Pa
HUMIDADE RELATIVA DO AR = 50%

&MISC TMPA=20.0
      P_INF=101325.0
      HUMIDITY=50.0 /

ESTART=.TRUE. /
/\
>>> caso seja necessário, para iniciar um restart deve-se ativar
este comando na namelist MISC <<<
-----
ABRINDO A MALHA PARA O EXTERIOR (INTERAÇÃO COM O AMBIENTE):
-----
&VENT MB='XMIN', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='XMAX', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='YMIN', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='YMAX', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='ZMAX', SURF_ID='OPEN' /
-----
REAÇÃO GASOSA DO INCÊNDIO:
-----
Em uma simulação de incêndio no FDS, há apenas um combustível
gasoso que atua como um substituto para todas as fontes de
combustível em potencial.
Propriedades obtidas de Tewarson (2008 apud WEINSCHENK et al.,
2014) e NP EN 1991-1-2 (2010).

&SPEC ID='wood', FORMULA='CH1.70O.74N0.002' /

```

```

&REAC ID='WOOD'
      FUEL='wood'
      SOOT_YIELD=0.015
      CO_YIELD=0.004
      HEAT_OF_COMBUSTION=17500.0 /

```

-----  
MATERIAIS NÃO COMBUSTÍVEIS:  
-----

Propriedades obtidas de Teixeira *et al.* (2012).

-----  
GESSO:

```

DENSIDADE = 1150 kg/m³
CONDUTIVIDADE TÉRMICA = 0.485 w/m.K
CALOR ESPECIFICO = 1.0 kJ/(kg.K)
EMISSIVIDADE = 0.80

```

```

&MATL ID='GESSO'
      DENSITY=1150.0
      CONDUCTIVITY=0.485
      SPECIFIC_HEAT=1.0
      EMISSIVITY=0.80 /

```

-----  
LÃ DE ROCHA 1 (PAREDES E TETO):

```

DENSIDADE = 40 kg/m³
CONDUTIVIDADE TÉRMICA = 0.037 w/m.K
CALOR ESPECIFICO = 1.03 kJ/(kg.K)
EMISSIVIDADE = 0.80

```

```

&MATL ID='LA_ROCHA1'
      DENSITY=40.0
      CONDUCTIVITY=0.037
      SPECIFIC_HEAT=1.03
      EMISSIVITY=0.80 /

```

-----  
LÃ DE ROCHA 2 (PISO):

```

DENSIDADE = 175 kg/m³
CONDUTIVIDADE TÉRMICA = 0.04 w/m.K
CALOR ESPECIFICO = 1.03 kJ/(kg.K)
EMISSIVIDADE = 0.80

```

```

&MATL ID='LA_ROCHA2'
      DENSITY=175.0
      CONDUCTIVITY=0.04
      SPECIFIC_HEAT=1.03
      EMISSIVITY=0.80 /

```

-----  
AZULEJO:

```

DENSIDADE = 2000 kg/m³
CONDUTIVIDADE TÉRMICA = 1.2 w/m.K
CALOR ESPECIFICO = 1.0 kJ/(kg.K)
EMISSIVIDADE = 0.80

```

```
&MATL ID='AZULEJO'
      DENSITY=2000.0
      CONDUCTIVITY=1.2
      SPECIFIC_HEAT=1.0
      EMISSIVITY=0.80 /
```

```
-----
&SURF ID='PISO'
      COLOR='GRAY'
      BACKING='EXPOSED'
      MATL_ID='AZULEJO','LA_ROCHA2'
      THICKNESS=0.005,0.05 /
```

```
-----
&SURF ID='TETO'
      COLOR='GRAY'
      BACKING='EXPOSED'
      MATL_ID='GESSO','LA_ROCHA1'
      THICKNESS=0.025,0.05 /
```

```
-----
&SURF ID='PAREDES'
      COLOR='SILVER'
      BACKING='EXPOSED'
      MATL_ID='GESSO','LA_ROCHA1'
      THICKNESS = 0.025,0.05 /
```

```
-----
MATERIAIS COMBUSTÍVEIS:
-----
```

```
-----
MADEIRA:
```

Propriedades obtidas de: (\*) Adotado; (1) ABNT NBR 15220-2 (2005); (2) Figueroa & Moraes (2009); (3) NP EN 1991-1-2 (2010); (4) Rocha (2014)

DENSIDADE = 400 kg/m<sup>3</sup> (1)  
 EMISSIVIDADE = 0.9 (\*)  
 CONDUTIVIDADE TÉRMICA = 0.12 w/m.K (1)  
 CALOR ESPECIFICO = 1.34 kJ/(kg.K) (1)  
 CALOR DE COMBUSTÃO = 17500 kJ/kg (3)  
 TEMPERATURA DE IGNIÇÃO = 210 °C (2)  
 TAXA DE LIBERAÇÃO DE CALOR = 100 kw/m<sup>2</sup> (4)

```
&MATL ID='MADEIRA'
      SPECIFIC_HEAT=1.34
      CONDUCTIVITY=0.12
      EMISSIVITY=0.9
      DENSITY=400.0
      HEAT_OF_COMBUSTION=17500.0 /
```

```
-----
&SURF ID='MAD'
      COLOR='BROWN'
      BURN_AWAY=.TRUE.
      BACKING='EXPOSED'
      MATL_ID='MADEIRA'
      THICKNESS=0.1
      IGNITION_TEMPERATURE=210
      HRRPUA=100 /
```

```

-----
&SURF ID='MAD_HOT'
      COLOR='BROWN'
      BURN_AWAY=.TRUE.
      BACKING='EXPOSED'
      MATL_ID='MADEIRA'
      THICKNESS=0.1
      IGNITION_TEMPERATURE=0.0
      HRRPUA=200 /

```

```

-----
GEOMETRIA DO COMPARTIMENTO:
-----

```

```

-----
PISO:
&OBST XB=-0.1,5.1,-0.1,2.1,-0.1,0.0, SURF_ID='PISO' /

```

```

-----
TETO:
&OBST XB=-0.1,5.1,-0.1,2.1,2.4,2.5, SURF_ID='TETO' /

```

```

-----
PAREDE 01:
&OBST XB=5.0,5.1,-0.1,2.1,0.0,2.4, SURF_ID='PAREDES' /

```

```

-----
PAREDE 02:
&OBST XB=0.0,5.0,-0.1,0.0,0.0,2.4, SURF_ID='PAREDES',
COLOR='INVISIBLE' /

```

```

-----
PAREDE 03:
&OBST XB=-0.1,0.0,-0.1,2.1,0.0,2.4, SURF_ID='PAREDES' /

```

```

-----
PAREDE 04:
&OBST XB=0.0,5.0,2.0,2.1,0.0,2.4, SURF_ID='PAREDES' /

```

```

-----
JANELA J01:
&HOLE XB=1.0,1.7,1.9,2.2,1.3,2.0 /

```

```

-----
PORTA P01:
&HOLE XB=4.9,5.2,1.6,1.9,0.0,2.0 /

```

```

-----
CARGA DE INCÊNDIO:
-----

```

```

&MULT ID='M11', DY=0.9, DX0=0.5, DY0=0.5, DZ0=0.0, J_LOWER=0,
J_UPPER=1 /
&OBST XB=0.0,1.0,0.0,0.1,0.0,0.1, MULT_ID='M11', SURF_ID='MAD' /

```

```

&MULT ID='M12', DX=0.3, DX0=0.5, DY0=0.5, DZ0=0.1, I_LOWER=0,
I_UPPER=3 /
&OBST XB=0.0,0.1,0.0,1.0,0.0,0.1, MULT_ID='M12', SURF_ID='MAD' /

```

```

&MULT ID='M13', DY=0.3, DX0=0.5, DY0=0.5, DZ0=0.2, J_LOWER=0,
J_UPPER=3 /
&OBST XB=0.0,1.0,0.0,0.1,0.0,0.1, MULT_ID='M13', SURF_ID='MAD' /

&MULT ID='M14', DX=0.3, DX0=0.5, DY0=0.5, DZ0=0.3, I_LOWER=0,
I_UPPER=3 /
&OBST XB=0.0,0.1,0.0,1.0,0.0,0.1, MULT_ID='M14', SURF_ID='MAD' /

&MULT ID='M15', DY=0.3, DX0=0.5, DY0=0.5, DZ0=0.4, J_LOWER=0,
J_UPPER=3 /
&OBST XB=0.0,1.0,0.0,0.1,0.0,0.1, MULT_ID='M15', SURF_ID='MAD' /

&MULT ID='M16', DX=0.3, DX0=0.5, DY0=0.5, DZ0=0.5, I_LOWER=0,
I_UPPER=3 /
&OBST XB=0.0,0.1,0.0,1.0,0.0,0.1, MULT_ID='M16', SURF_ID='MAD' /

&MULT ID='M17', DY=0.3, DX0=0.5, DY0=0.7, DZ0=0.6, J_LOWER=0,
J_UPPER=1 /
&OBST XB=0.0,1.0,0.0,0.1,0.0,0.1, MULT_ID='M17', SURF_ID='MAD' /

-----

&MULT ID='M21', DY=0.9, DX0=2.0, DY0=0.5, DZ0=0.0, J_LOWER=0,
J_UPPER=1 /
&OBST XB=0.0,1.0,0.0,0.1,0.0,0.1, MULT_ID='M21', SURF_ID='MAD' /

&MULT ID='M22', DX=0.3, DX0=2.0, DY0=0.5, DZ0=0.1, I_LOWER=0,
I_UPPER=3 /
&OBST XB=0.0,0.1,0.0,1.0,0.0,0.1, MULT_ID='M22', SURF_ID='MAD' /

&MULT ID='M23', DY=0.3, DX0=2.0, DY0=0.5, DZ0=0.2, J_LOWER=0,
J_UPPER=3 /
&OBST XB=0.0,1.0,0.0,0.1,0.0,0.1, MULT_ID='M23', SURF_ID='MAD' /

&MULT ID='M24', DX=0.3, DX0=2.0, DY0=0.5, DZ0=0.3, I_LOWER=0,
I_UPPER=3 /
&OBST XB=0.0,0.1,0.0,1.0,0.0,0.1, MULT_ID='M24', SURF_ID='MAD' /

&MULT ID='M25', DY=0.3, DX0=2.0, DY0=0.5, DZ0=0.4, J_LOWER=0,
J_UPPER=3 /
&OBST XB=0.0,1.0,0.0,0.1,0.0,0.1, MULT_ID='M25', SURF_ID='MAD' /

&MULT ID='M26', DX=0.3, DX0=2.0, DY0=0.5, DZ0=0.5, I_LOWER=0,
I_UPPER=3 /
&OBST XB=0.0,0.1,0.0,1.0,0.0,0.1, MULT_ID='M26', SURF_ID='MAD' /

&MULT ID='M27', DY=0.3, DX0=2.0, DY0=0.9, DZ0=0.0, J_LOWER=0,
J_UPPER=0 /
&OBST XB=0.0,1.0,0.0,0.1,0.0,0.1, MULT_ID='M27', SURF_ID='MAD_HOT'
/

-----

&MULT ID='M31', DY=0.9, DX0=3.5, DY0=0.5, DZ0=0.0, J_LOWER=0,
J_UPPER=1 /
&OBST XB=0.0,1.0,0.0,0.1,0.0,0.1, MULT_ID='M31', SURF_ID='MAD' /

&MULT ID='M32', DX=0.3, DX0=3.5, DY0=0.5, DZ0=0.1, I_LOWER=0,
I_UPPER=3 /
&OBST XB=0.0,0.1,0.0,1.0,0.0,0.1, MULT_ID='M32', SURF_ID='MAD' /

```

```

&MULT ID='M33', DY=0.3, DX0=3.5, DY0=0.5, DZ0=0.2, J_LOWER=0,
J_UPPER=3 /
&OBST XB=0.0,1.0,0.0,0.1,0.0,0.1, MULT_ID='M33', SURF_ID='MAD' /

&MULT ID='M34', DX=0.3, DX0=3.5, DY0=0.5, DZ0=0.3, I_LOWER=0,
I_UPPER=3 /
&OBST XB=0.0,0.1,0.0,1.0,0.0,0.1, MULT_ID='M34', SURF_ID='MAD' /

&MULT ID='M35', DY=0.3, DX0=3.5, DY0=0.5, DZ0=0.4, J_LOWER=0,
J_UPPER=3 /
&OBST XB=0.0,1.0,0.0,0.1,0.0,0.1, MULT_ID='M35', SURF_ID='MAD' /

&MULT ID='M36', DX=0.3, DX0=3.5, DY0=0.5, DZ0=0.5, I_LOWER=0,
I_UPPER=3 /
&OBST XB=0.0,0.1,0.0,1.0,0.0,0.1, MULT_ID='M36', SURF_ID='MAD' /

&MULT ID='M37', DY=0.3, DX0=3.5, DY0=0.7, DZ0=0.6, J_LOWER=0,
J_UPPER=1 /
&OBST XB=0.0,1.0,0.0,0.1,0.0,0.1, MULT_ID='M37', SURF_ID='MAD' /

```

```

-----
MEDIDORES:
-----

```

```

-----
TERMOPARES:

```

```

&DEVC XYZ=0.1,1.0,2.3, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Pen6' /
&DEVC XYZ=0.1,1.0,1.8, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Pen7' /
&DEVC XYZ=0.1,1.0,1.3, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Pen8' /
&DEVC XYZ=0.1,1.0,0.8, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Pen9' /
&DEVC XYZ=0.1,1.0,0.3, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Pen10' /

&DEVC XYZ=1.2,1.0,2.3, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Ten2' /
&DEVC XYZ=3.8,1.0,2.3, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Ten8' /

&DEVC XYZ=2.0,1.0,2.1, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='A1' /
&DEVC XYZ=2.0,1.0,1.4, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='A2' /
&DEVC XYZ=2.0,1.0,0.7, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='A3' /

&DEVC XYZ=3.0,1.0,2.1, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='A4' /
&DEVC XYZ=3.0,1.0,1.4, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='A5' /
&DEVC XYZ=3.0,1.0,0.7, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='A6' /

```

```

-----
PLANOS DE TEMPERATURAS:

```

```

&SLCF PBY=1.7, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE.,
ID='PerfilTemp_Y170' /

```

```

&SLCF PBX=1.3, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE.,
ID='PerfilTemp_X130' /

```

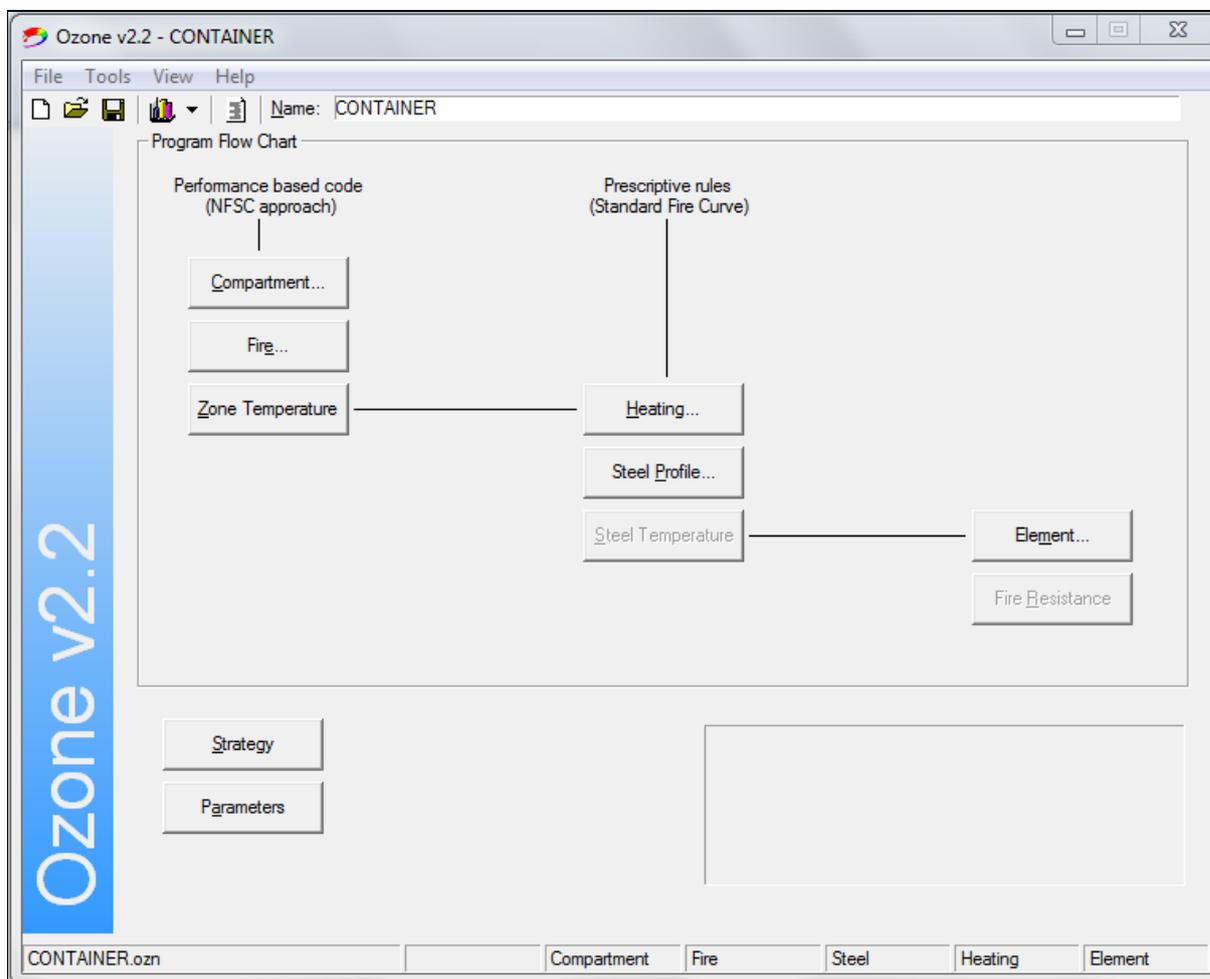
```

-----
&TAIL / FIM DO ARQUIVO

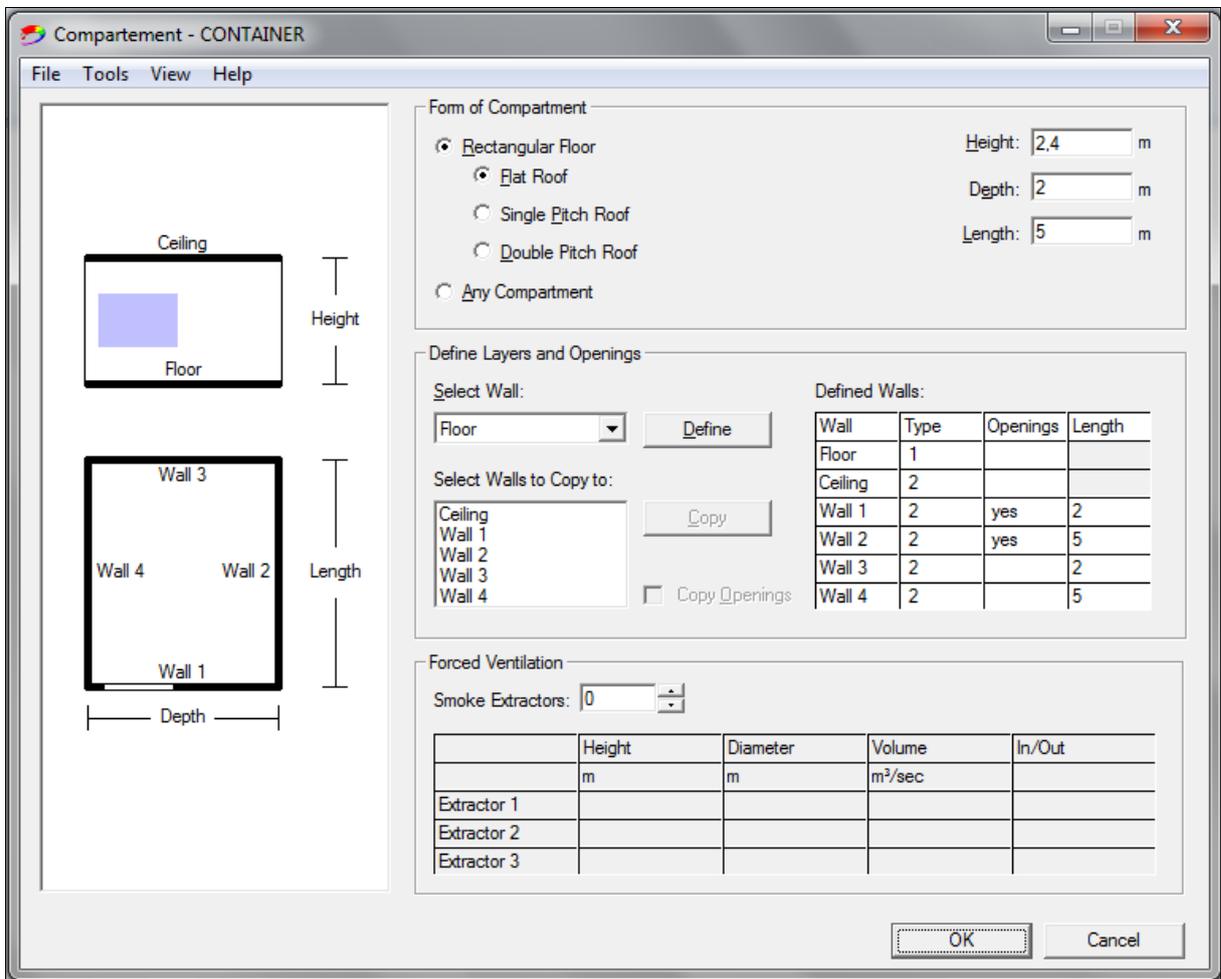
```

## APÊNDICE B - ENTRADA DE DADOS DA SIMULAÇÃO REALIZADA NO OZONE PARA O ESTUDO DE CASO 01

- Interface inicial do *software* OZone:



- Definição do compartimento, acordo com a Figura 24b:  
 (Wall 1 = Parede 4; Wall 2 = Parede 3; Wall 3 = Parede 1; Wall 4 = Parede 2)



- Definição do compartimento, materiais do piso de acordo com a Tabela 3 e Tabela 4:

Layers Floor - CONTAINER

File Tools View Help

	Material	Thickness [cm]	Unit mass [kg/m <sup>3</sup> ]	Conductivity [W/mK]	Specific Heat [J/kgK]	Rel Emissivity Hot Surface	Rel Emissivity Cold Surface
Layer 1	azulejo	0,5	2000	1,2	1000	0,8	0,8
Layer 2	lã de rocha 2	5	175	0,04	1030	0,8	0,8
Layer 3							
Layer 4							

Enter each layer on a single row in the table above (up to four layers). Just click in a cell and edit it's value. If not found in the list of materials you can define your own material, by filling in the appropriate cells. Define your layers starting from Layer 1 (Inside).

Define your openings if any (up to three openings in a single wall). Click in the desired cell and input your values. Start from Opening 1.

To delete or insert a row, right click on a row header and select the appropriate command from the popup menu.

Inside

Layer 1
Layer 2
Layer 3
Layer 4

Outside

Equal Diameter Groups:

	Diameter [m]	Number of Openings	Variation
Group 1			
Group 2			
Group 3			

OK Cancel

- Definição do compartimento, materiais do teto e paredes de acordo com a Tabela 3 e Tabela 4:

Layers Ceiling - CONTAINER

File Tools View Help

	Material	Thickness [cm]	Unit mass [kg/m <sup>3</sup> ]	Conductivity [W/mK]	Specific Heat [J/kgK]	Rel Emissivity Hot Surface	Rel Emissivity Cold Surface
Layer 1	gesso	2,5	1150	0,485	1000	0,8	0,8
Layer 2	lã de rocha 1	5	40	0,037	1030	0,8	0,8
Layer 3							
Layer 4							

Enter each layer on a single row in the table above (up to four layers). Just click in a cell and edit it's value. If not found in the list of materials you can define your own material, by filling in the appropriate cells. Define your layers starting from Layer 1 (Inside).

Define your openings if any (up to three openings in a single wall). Click in the desired cell and input your values. Start from Opening 1.

To delete or insert a row, right click on a row header and select the appropriate command from the popup menu.

Inside

Layer 1
Layer 2
Layer 3
Layer 4

Outside

Equal Diameter Groups:

	Diameter [m]	Number of Openings	Variation
Group 1			
Group 2			
Group 3			

OK Cancel

- Definição do compartimento, porta da parede 4 de acordo com a Figura 24b:

Layers and Openings Wall 1 - CONTAINER

File Tools View Help

Wall Length: 2 m

	Material	Thickness [cm]	Unit mass [kg/m <sup>3</sup> ]	Conductivity [W/mK]	Specific Heat [J/kgK]	Rel Emissivity Hot Surface	Rel Emissivity Cold Surface
Layer 1	gesso	2,5	1150	0,485	1000	0,8	0,8
Layer 2	lã de rocha 1	5	40	0,037	1030	0,8	0,8
Layer 3							
Layer 4							

Enter each layer on a single row in the table above (up to four layers). Just click in a cell and edit it's value. If not found in the list of materials you can define your own material, by filling in the appropriate cells. Define your layers starting from Layer 1 (Inside).

Define your openings if any (up to three openings in a single wall). Click in the desired cell and input your values. Start from Opening 1.

To delete or insert a row, right click on a row header and select the appropriate command from the popup menu.

	Sill Height H <sub>i</sub> [m]	Soffit Height H <sub>s</sub> [m]	Width [m]	Variation	Adiabatic
Opening 1		2	0,3	Constant	no
Opening 2					
Opening 3					

OK Cancel

A definição de variação constante na abertura (*Opening 1* > *Variation* > *Constant*) indica ao OZone que a porta ficará aberta (com 30 cm de abertura) durante todo o tempo de simulação.

- Definição do compartimento, janela da parede 3 de acordo com a Figura 24b:

Layers and Openings Wall 2 - CONTAINER

File Tools View Help

Wall Length: 5 m

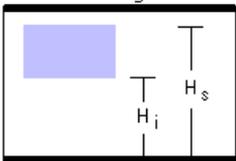
	Material	Thickness	Unit mass	Conductivity	Specific Heat	Rel Emissivity	Rel Emissivity
		[cm]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[W/mK]	[J/kgK]	Hot Surface	Cold Surface
Layer 1	gesso	2,5	1150	0,485	1000	0,8	0,8
Layer 2	lã de rocha 1	5	40	0,037	1030	0,8	0,8
Layer 3							
Layer 4							

Enter each layer on a single row in the table above (up to four layers). Just click in a cell and edit it's value. If not found in the list of materials you can define your own material, by filling in the appropriate cells. Define your layers starting from Layer 1 (Inside).

Define your openings if any (up to three openings in a single wall). Click in the desired cell and input your values. Start from Opening 1.

To delete or insert a row, right click on a row header and select the appropriate command from the popup menu.

Ceiling



Floor

	Sill Height H <sub>i</sub>	Soffit Height H <sub>s</sub>	Width	Variation	Adiabatic
	[m]	[m]	[m]		
Opening 1	1,3	2	0,7	Constant	no
Opening 2					
Opening 3					

OK Cancel

A definição de variação constante na abertura (*Opening 1 > Variation > Constant*) indica ao OZone que a janela ficará aberta durante todo o tempo de simulação.

- Definição do incêndio:

Fire - CONTAINER

File Tools View Help

Fire Curve

EN 1991 - 1 - 2       User Defined Fire

Occupancy	Fire Growth Rate	RHRf	Fire Load q <sub>f,k</sub>	Danger of Fire Activation	
		[kW/m <sup>2</sup> ]	80% Fractile [MJ/m <sup>2</sup> ]		
User Defined	300		250	500	1
Description	Medium	Building use is offices		Medium	

Active Fire Fighting Measures

- Automatic Water Extinguishing System       $\delta_{n,1} = 1$
- Independent Water Supplies (1 2)       $\delta_{n,2} = 1$
- Automatic Fire Detection by Heat       $\delta_{n,3} = 1$
- Automatic Fire Detection by Smoke       $\delta_{n,5} = 1$
- Automatic Alarm Transmission to Fire Brigade       $\delta_{n,6} = 1$
- Work Fire Brigade       $\delta_{n,8} = 1$
- Off Site Fire Brigade
- Safe Access Routes       $\delta_{n,9} = 1$
- Staircases Under Overpressure in Fire Alarm
- Fire Fighting Devices       $\delta_{n,10} = 1$
- Smoke Exhaust System

Fire Info

Max Fire Area: 10 m<sup>2</sup>

Fire Elevation: 1 m      Fuel Height: 0,5 m

Design Fire Load

Fire Risk Area: 10 m<sup>2</sup>       $\delta_{q,1} = 0,96$

Danger of Fire Activation:       $\delta_{q,2} = 1$

Active Measures:       $\prod \delta_{n,i} = 1$

$q_{f,d} = \delta_{q,1} \cdot \delta_{q,2} \cdot \prod \delta_{n,i} \cdot q_{f,k} = 480,0 \text{ MJ/m}^2$

Combustion

Combustion Heat of Fuel: 17,5 MJ/kg

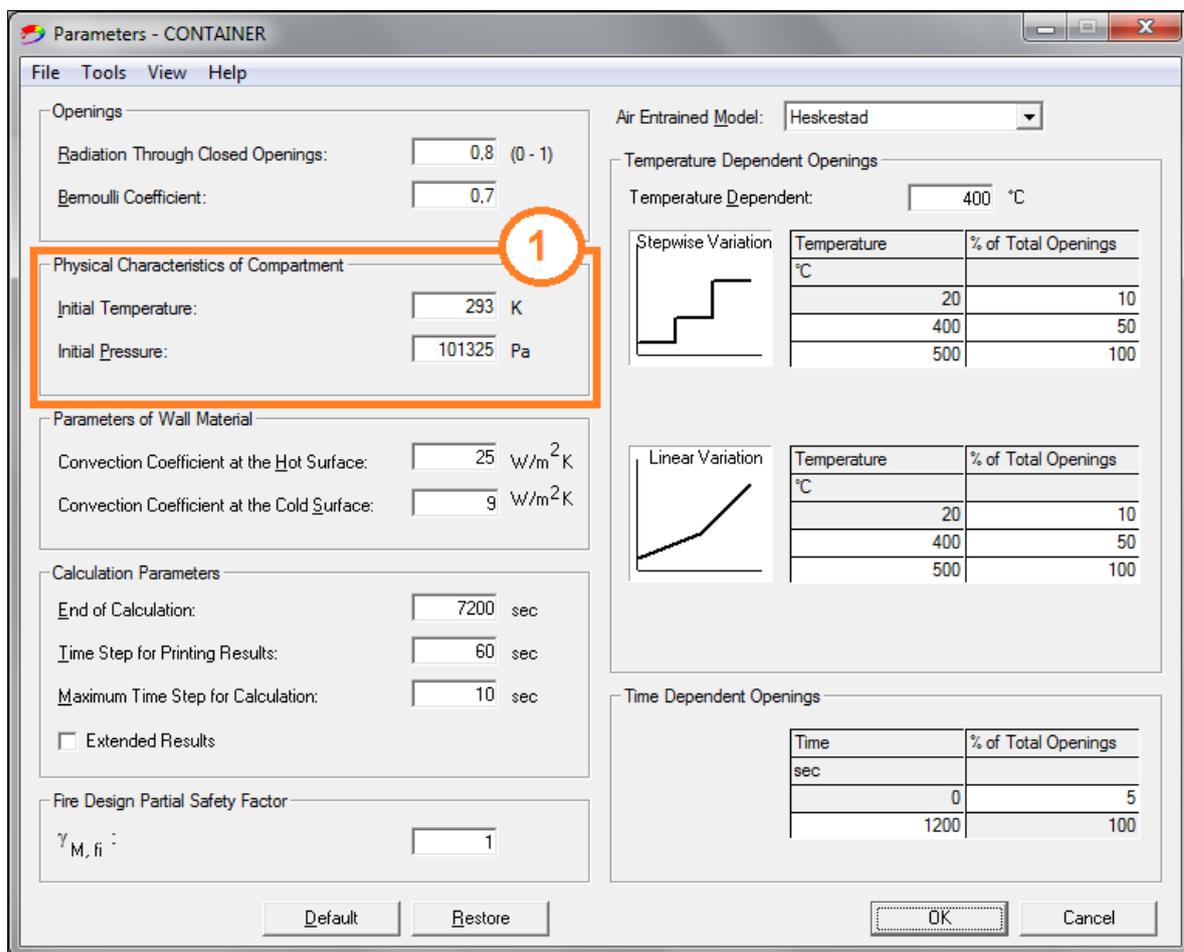
Combustion Efficiency Factor: 1

Combustion Model: Extended fire duration

Stoichiometric Coefficient: 1,27

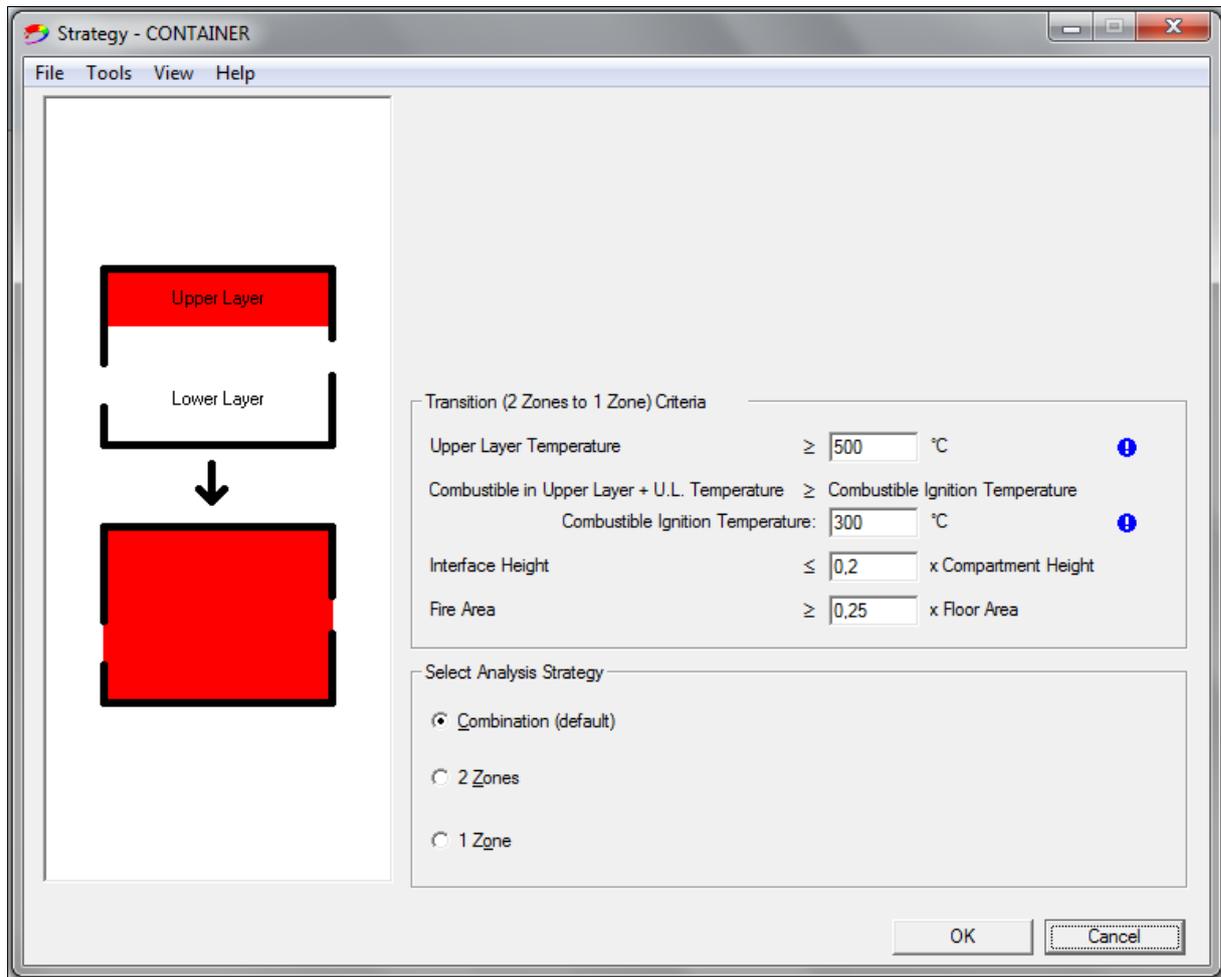
OK      Cancel

- Outros parâmetros definidos:



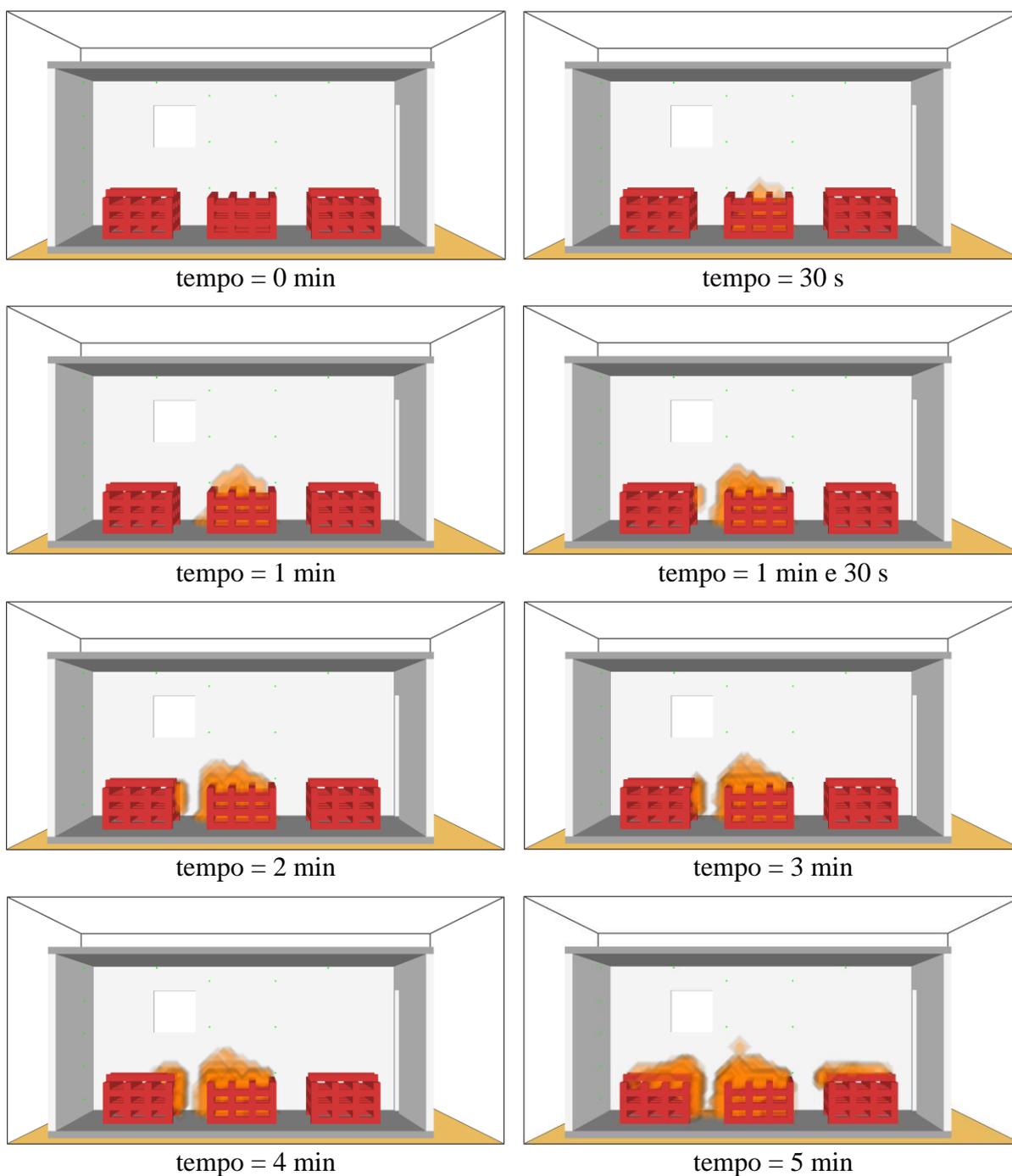
- (1) Definição das condições ambientais iniciais: temperatura ambiente = 293,0 °K (20,0 °C), pressão atmosférica = 101.325,0 Pa;
- (\*) Os demais parâmetros foram mantidos conforme o padrão do *software*.

- Estratégia de simulação utilizada (definição padrão do *software*):



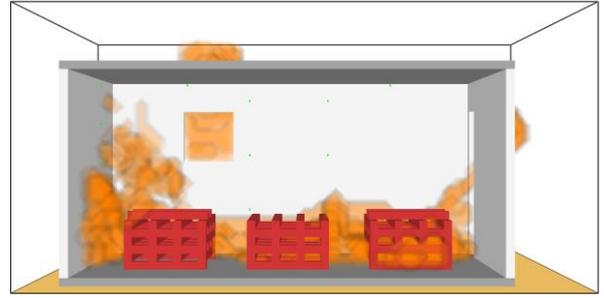
### APÊNDICE C - PROPAGAÇÃO DO FOGO DENTRO DO COMPARTIMENTO: SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL REALIZADA NO FDS REFERENTE AO ESTUDO DE CASO 01

A seguir são apresentadas algumas imagens do cronograma de propagação do fogo dentro do compartimento, referente a simulação computacional do ensaio experimental de Teixeira *et al.* (2012), realizada no *software* FDS (Situação 2). Imagens geradas pelo SMV.

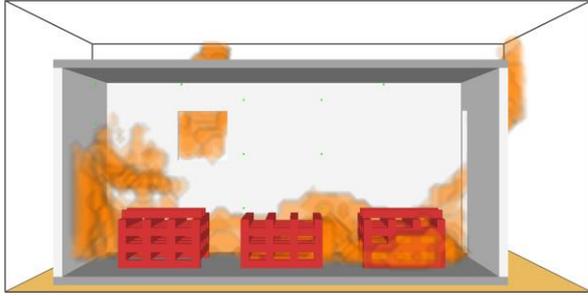




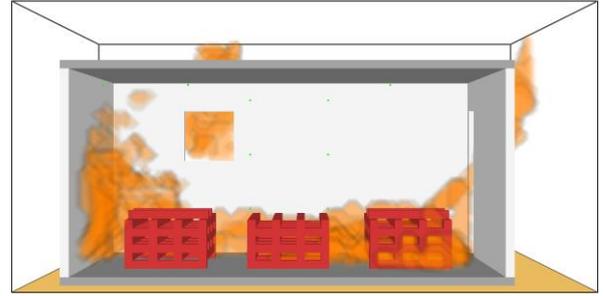
tempo = 6 min



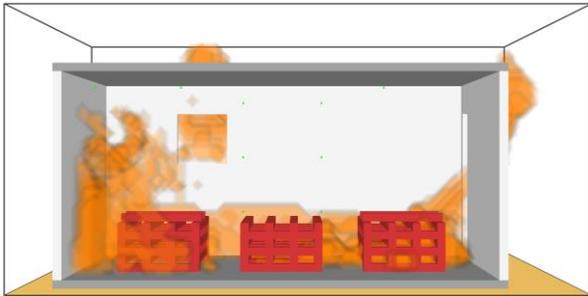
tempo = 7 min



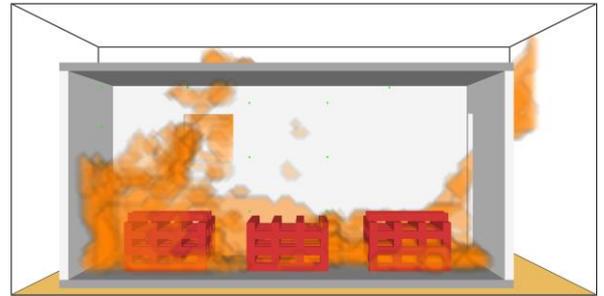
tempo = 8 min



tempo = 9 min



tempo = 10 min



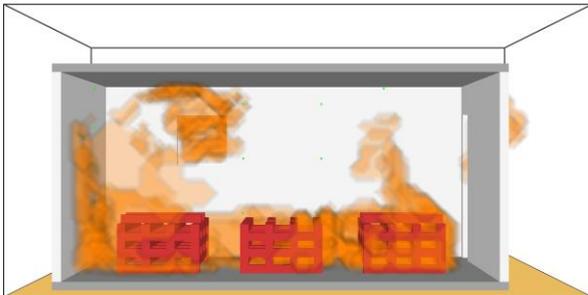
tempo = 15 min



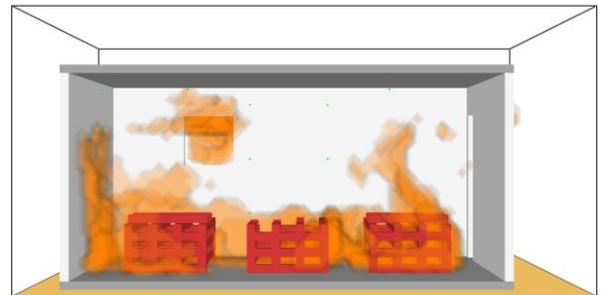
tempo = 20 min



tempo = 25 min



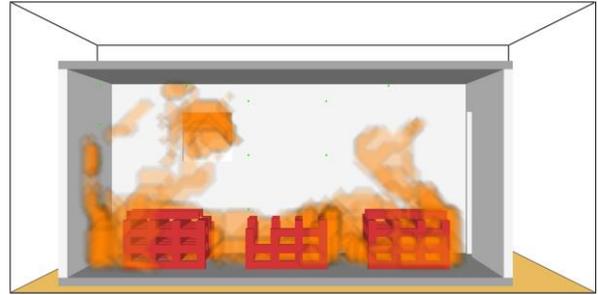
tempo = 30 min



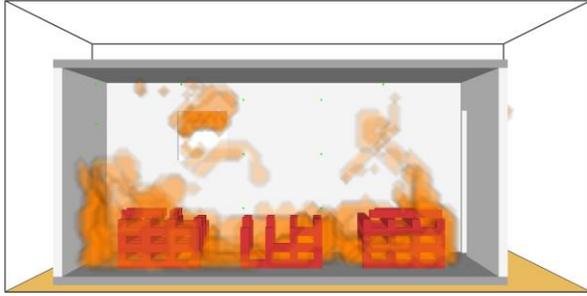
tempo = 31 min



tempo = 32 min



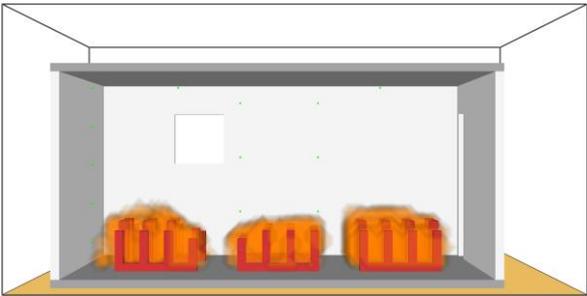
tempo = 33 min



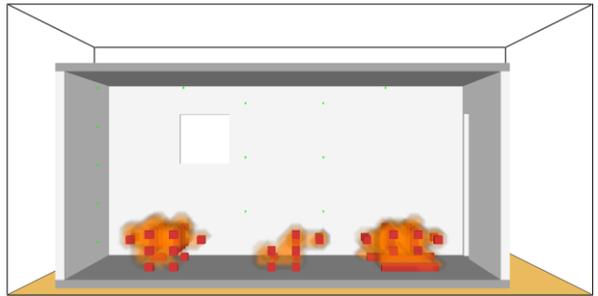
tempo = 34 min



tempo = 35 min



tempo = 40 min



tempo = 45 min



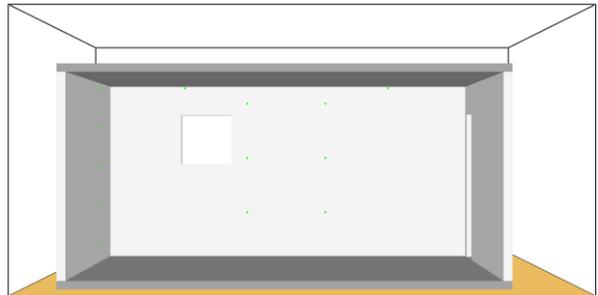
tempo = 50 min



tempo = 53 min



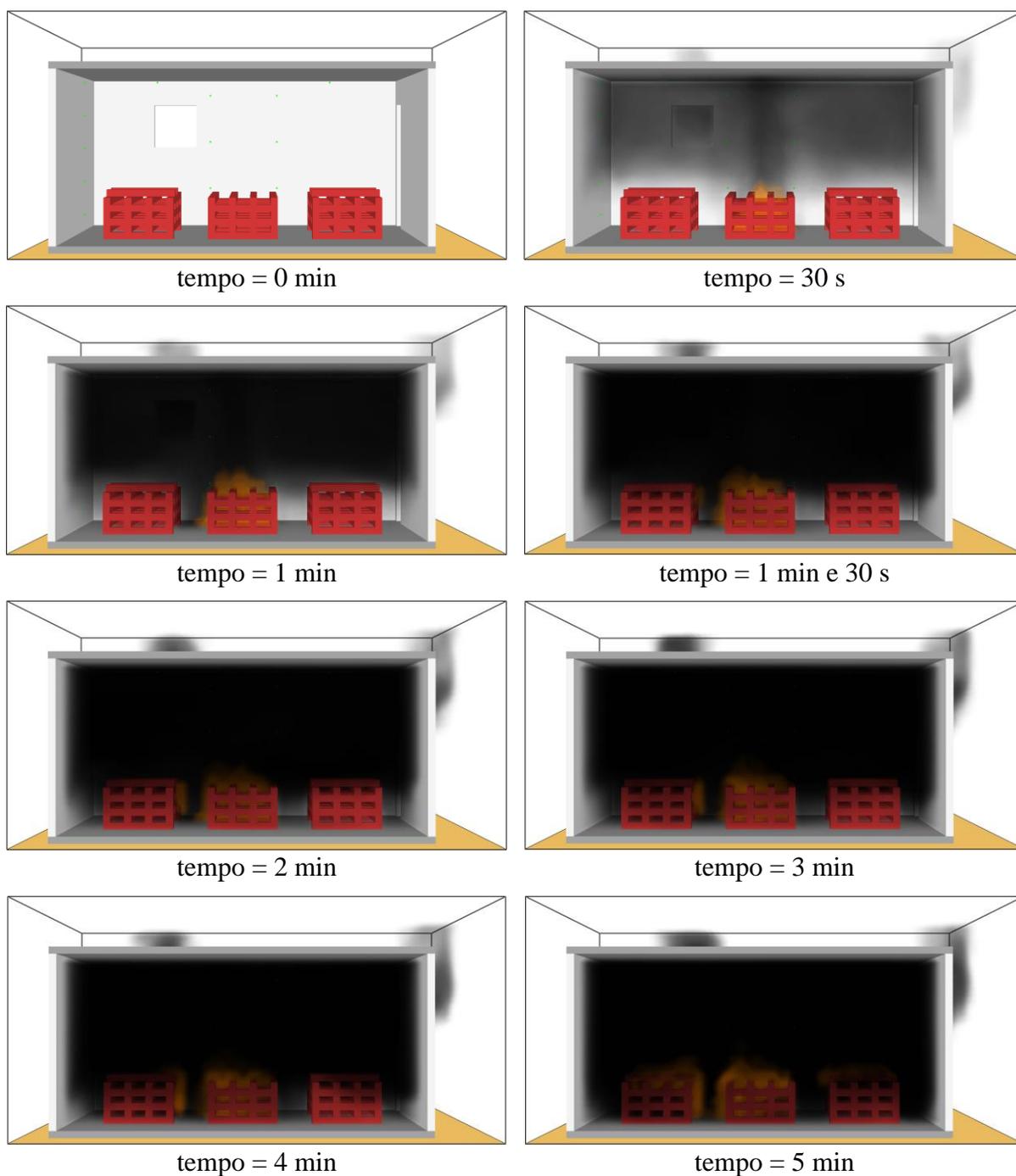
tempo = 54 min



tempo = 120 min

## APÊNDICE D - PROPAGAÇÃO DO FOGO E FUMAÇA DENTRO DO COMPARTIMENTO: SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL REALIZADA NO FDS REFERENTE AO ESTUDO DE CASO 01

A seguir são apresentadas algumas imagens do cronograma de propagação do fogo e fumaça dentro do compartimento, referente a simulação computacional do ensaio experimental de Teixeira *et al.* (2012), realizada no *software* FDS (Situação 2). Imagens geradas pelo SMV.

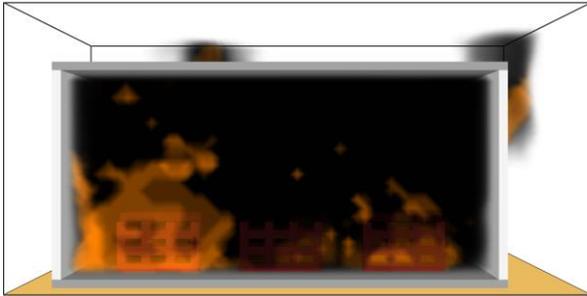




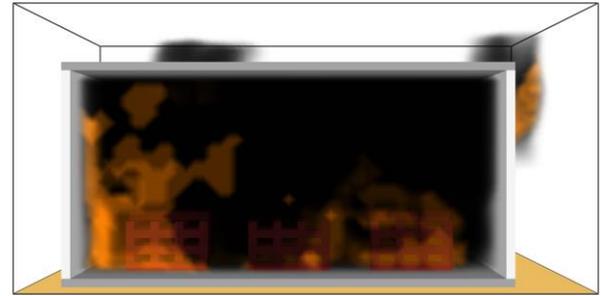
tempo = 10 min



tempo = 15 min



tempo = 20 min



tempo = 25 min



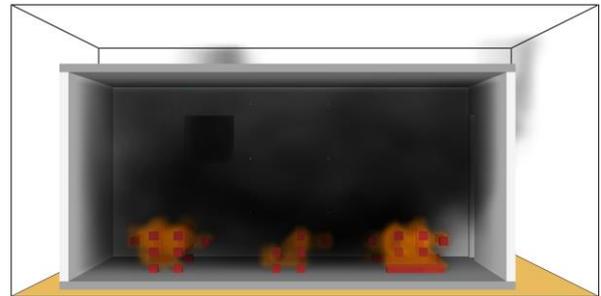
tempo = 30 min



tempo = 35 min



tempo = 40 min



tempo = 45 min



tempo = 46 min



tempo = 47 min



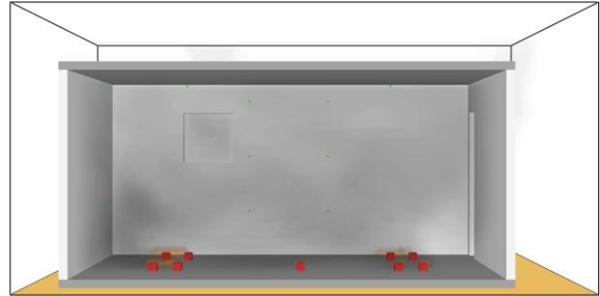
tempo = 48 min



tempo = 49 min



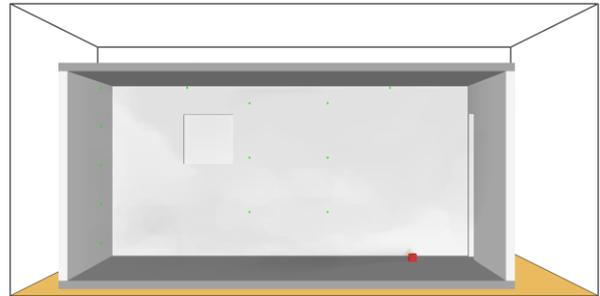
tempo = 50 min



tempo = 51 min



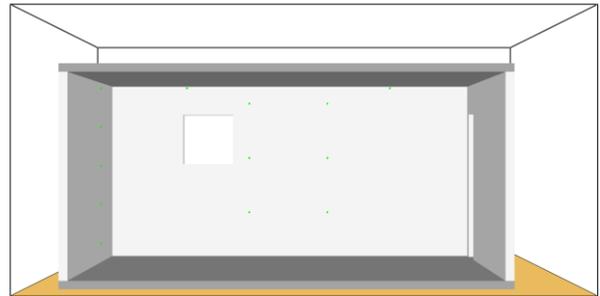
tempo = 52 min



tempo = 53 min



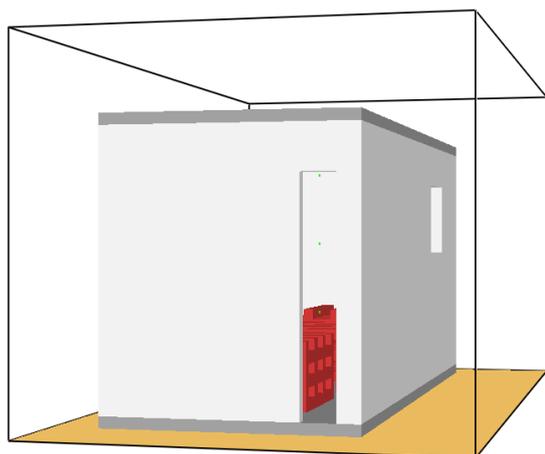
tempo = 54 min



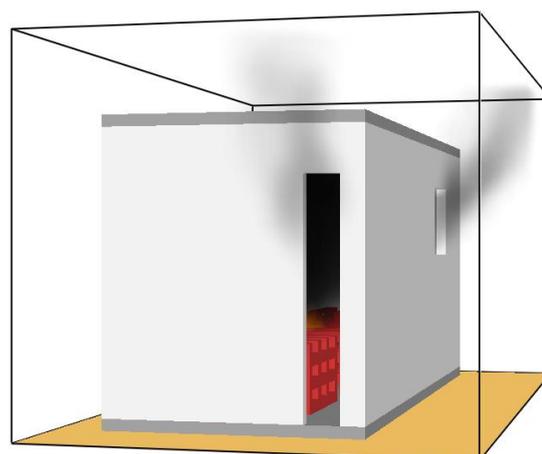
tempo = 120 min

**APÊNDICE E - PROPAGAÇÃO DO FOGO E FUMAÇA FORA DO  
COMPARTIMENTO: SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL REALIZADA NO FDS  
REFERENTE AO ESTUDO DE CASO 01**

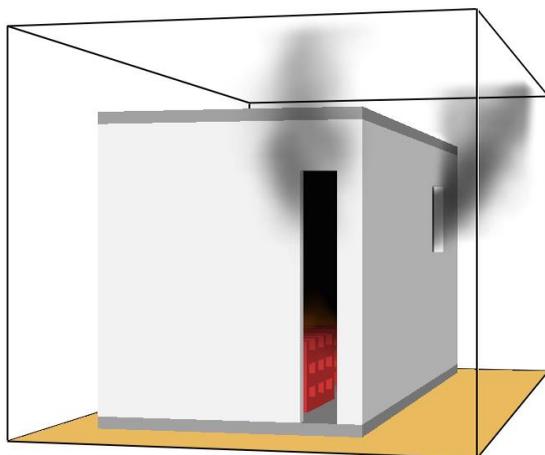
A seguir são apresentadas algumas imagens do cronograma de propagação do fogo e fumaça fora do compartimento, referente a simulação computacional do ensaio experimental de Teixeira *et al.* (2012), realizada no *software* FDS (Situação 2). Imagens geradas pelo SMV.



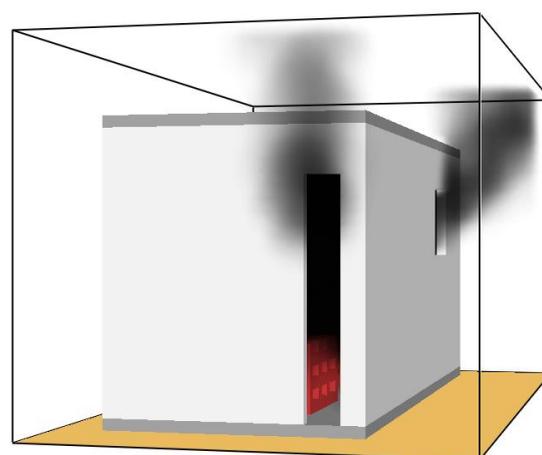
tempo = 0 min



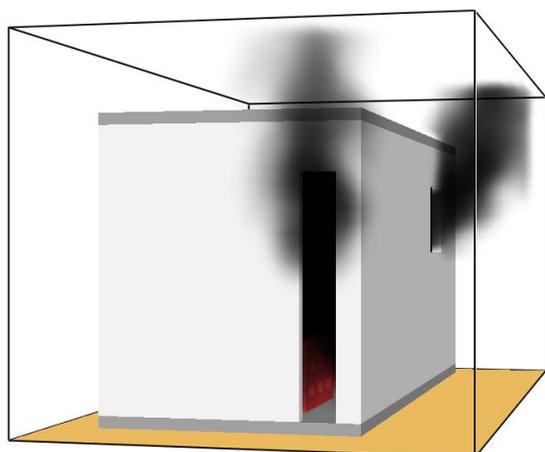
tempo = 30 s



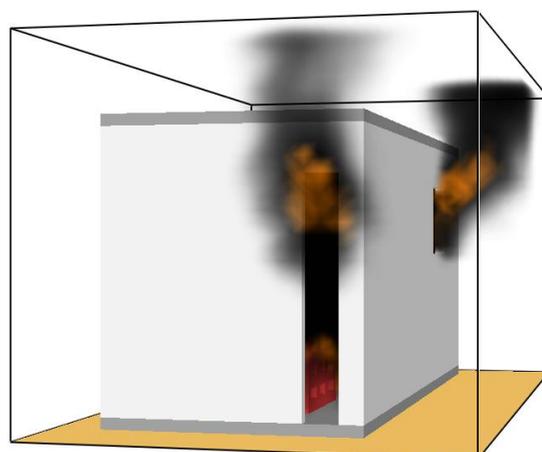
tempo = 1 min



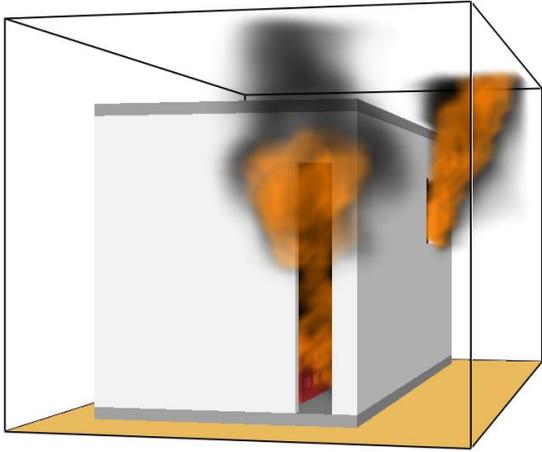
tempo = 2 min



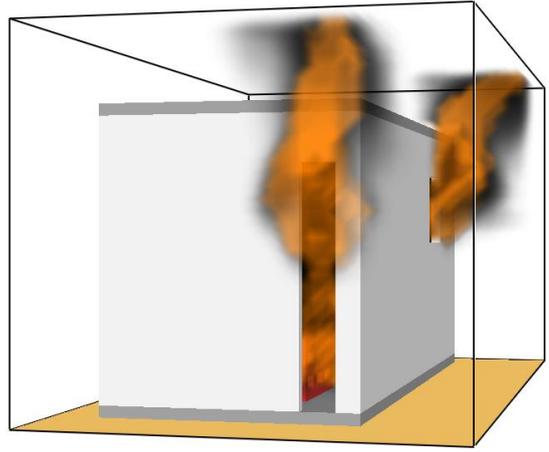
tempo = 5 min



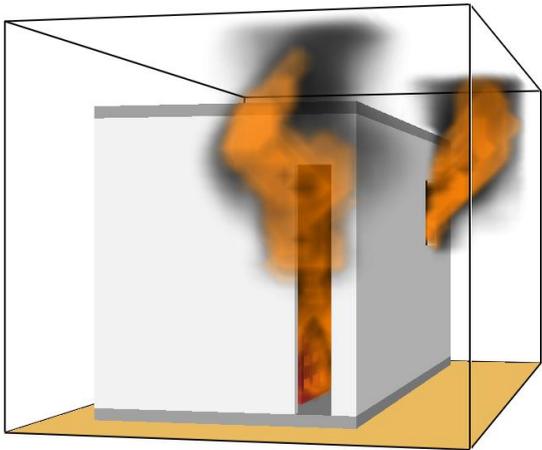
tempo = 6 min



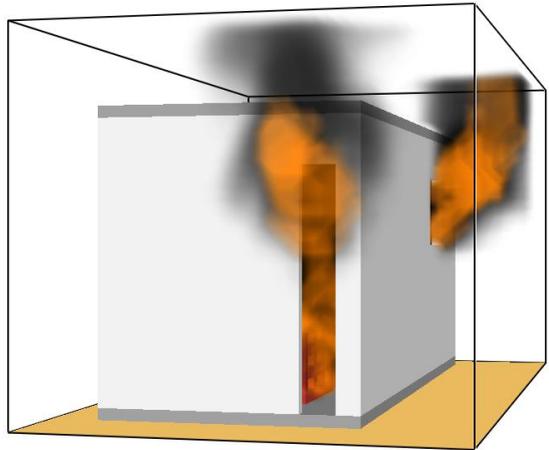
tempo = 7 min



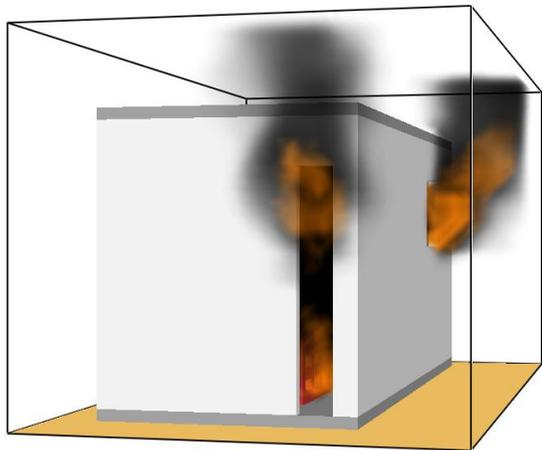
tempo = 8 min



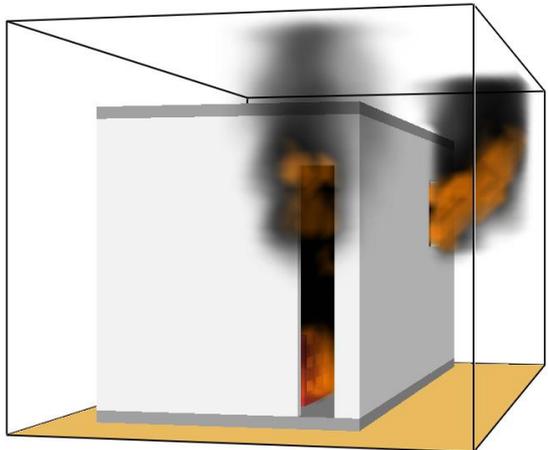
tempo = 10 min



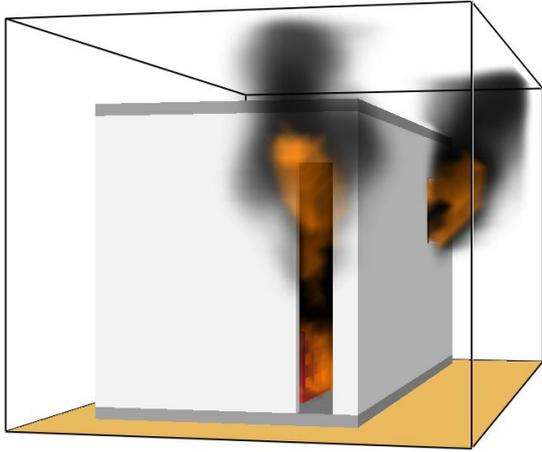
tempo = 20 min



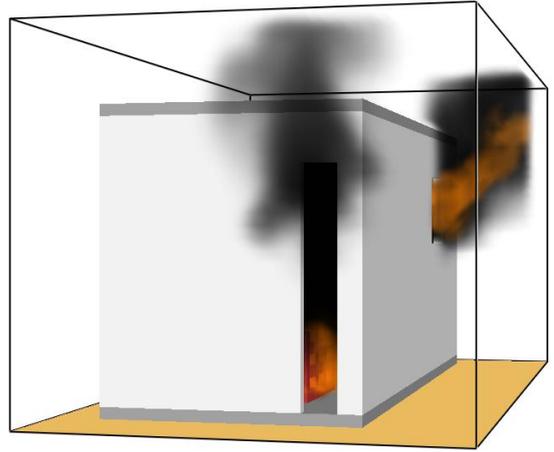
tempo = 30 min



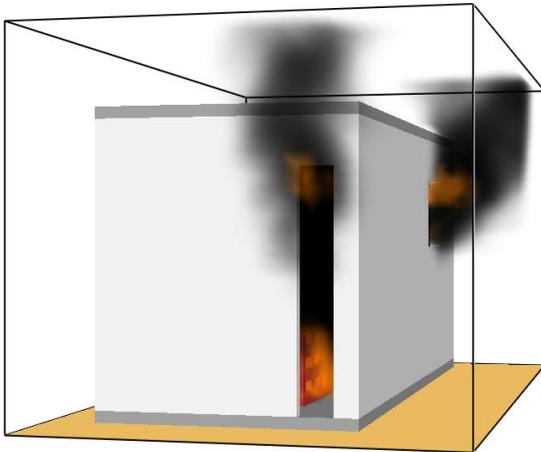
tempo = 31 min



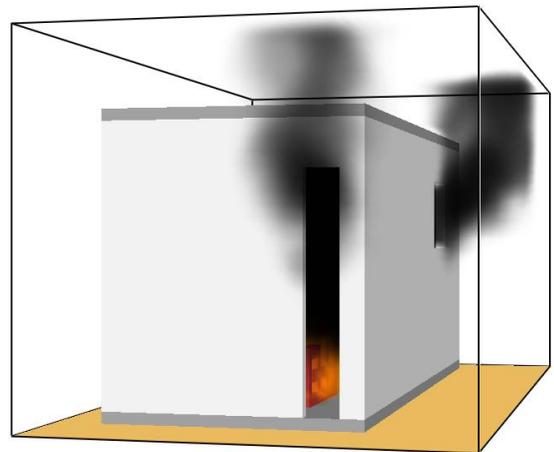
tempo = 32 min



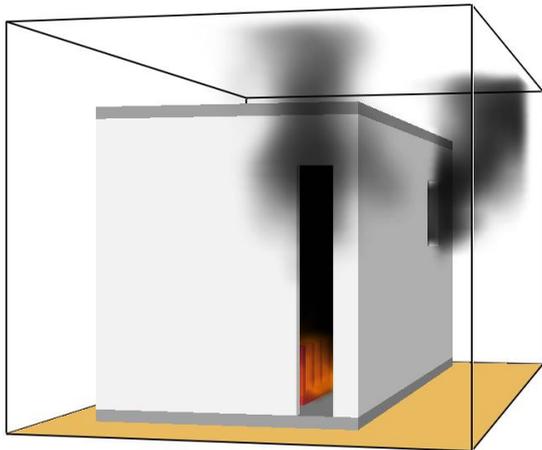
tempo = 33 min



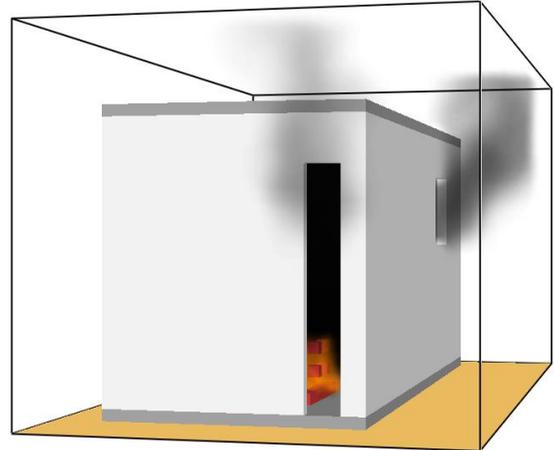
tempo = 34 min



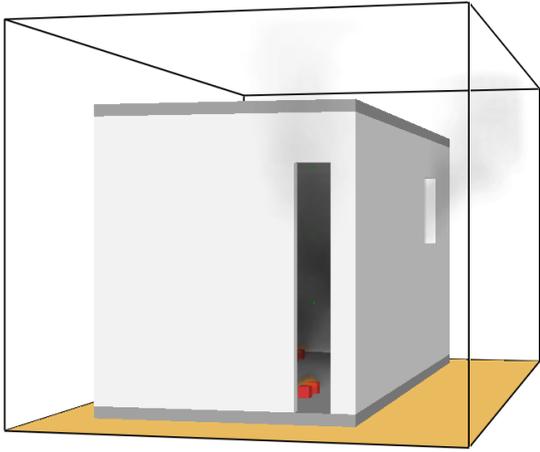
tempo = 35 min



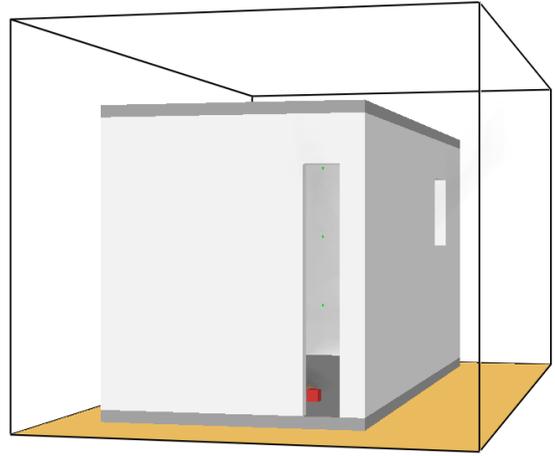
tempo = 40 min



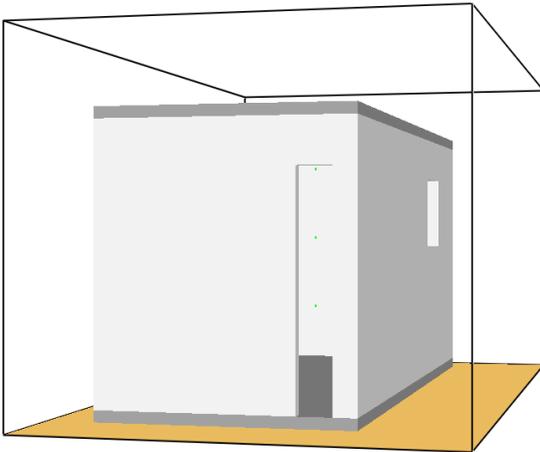
tempo = 45 min



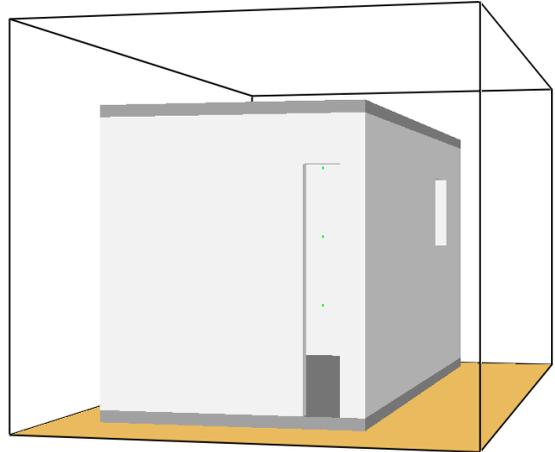
tempo = 50 min



tempo = 53 min



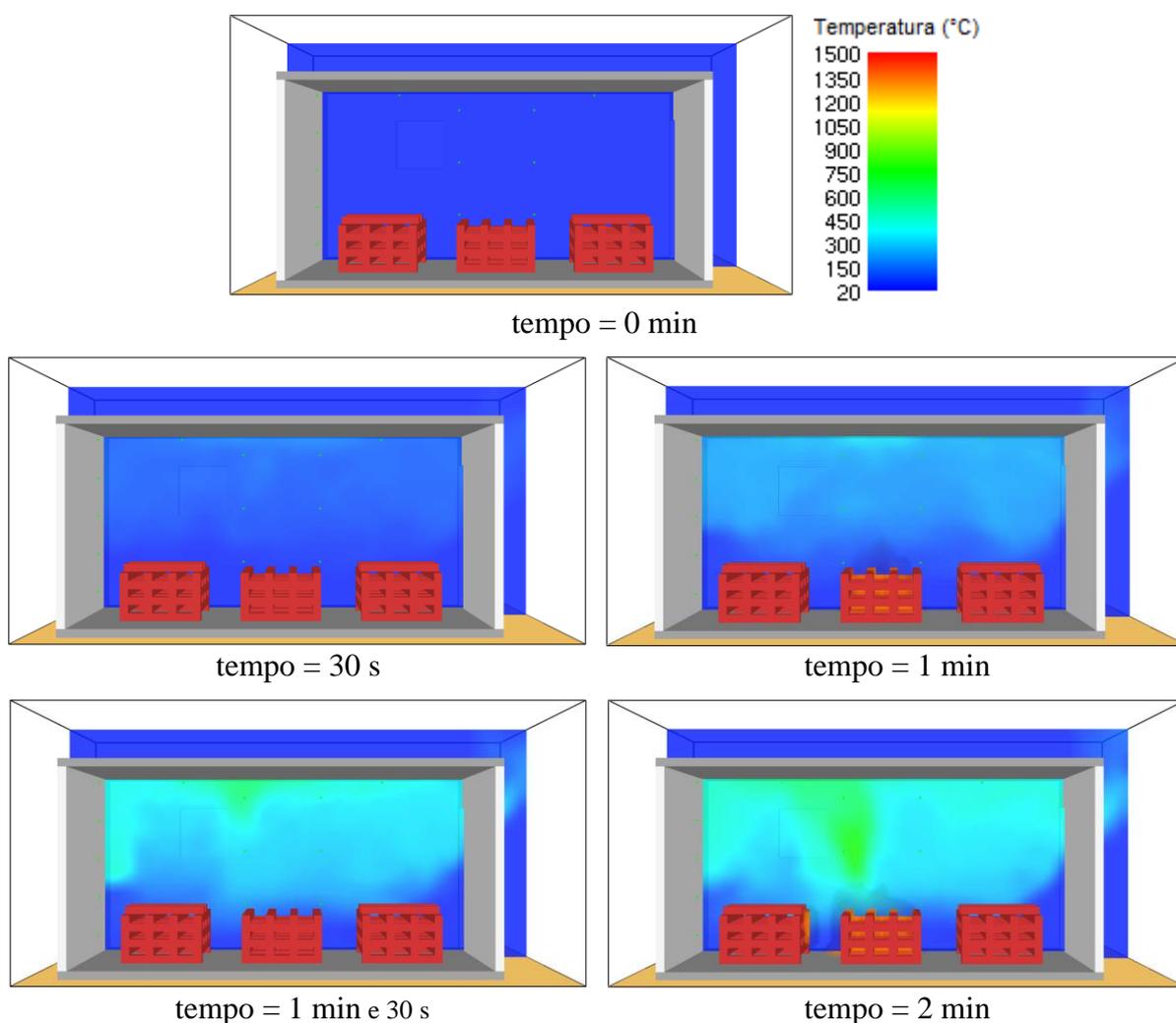
tempo = 54 min

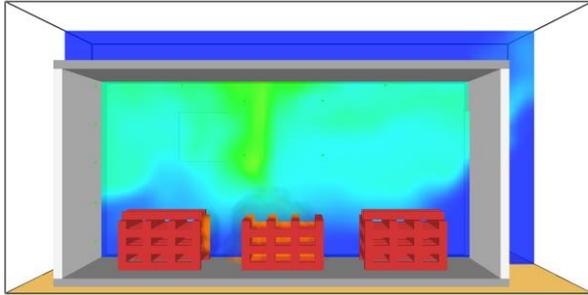


tempo = 120 min

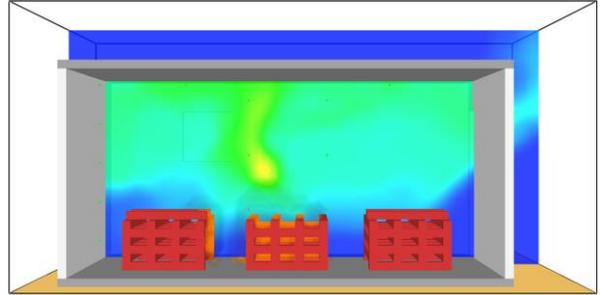
## APÊNDICE F - PLANO DE TEMPERATURAS DOS GASES DENTRO DO COMPARTIMENTO: SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL REALIZADA NO FDS REFERENTE AO ESTUDO DE CASO 01

A seguir são apresentadas algumas imagens do cronograma de desenvolvimento de temperaturas dos gases dentro do compartimento, referente a simulação computacional do ensaio experimental de Teixeira *et al.* (2012), realizada no *software* FDS (Situação 2). Imagens geradas pelo SMV a partir do registro de informações de um plano de medição posicionado longitudinalmente ao compartimento, entre as pilhas de madeira e a parede que contem a janela e passando no meio da porta.

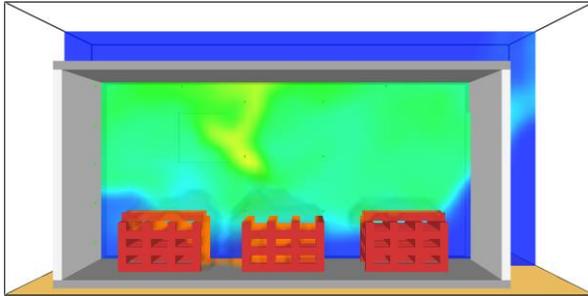




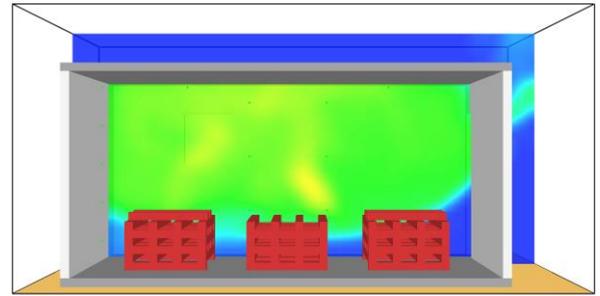
tempo = 3 min



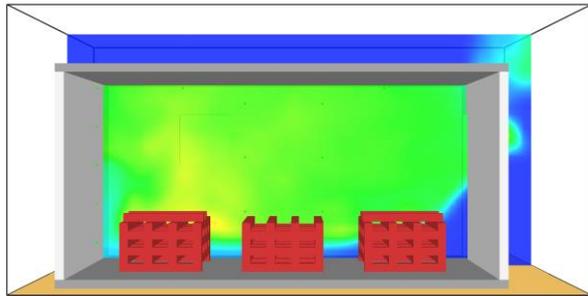
tempo = 4 min



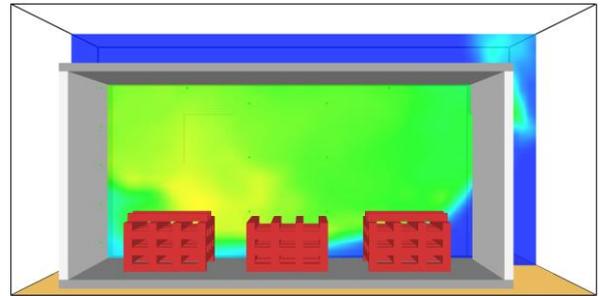
tempo = 5 min



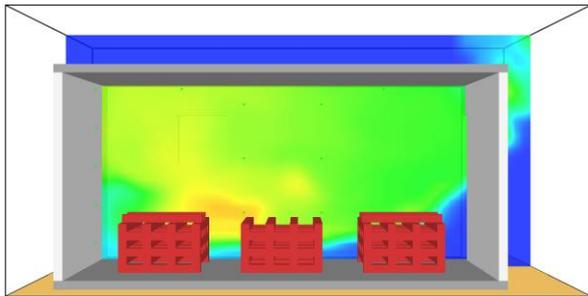
tempo = 6 min



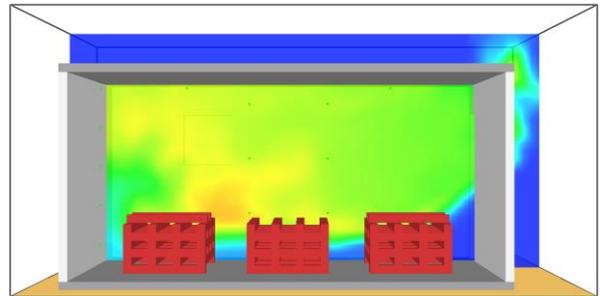
tempo = 7 min



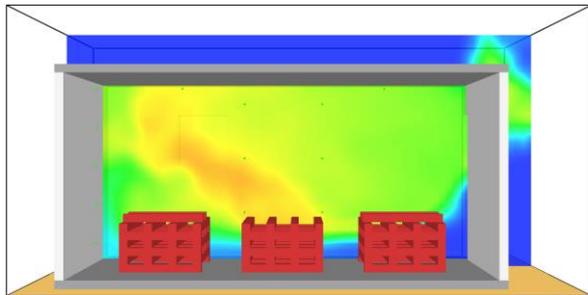
tempo = 8 min



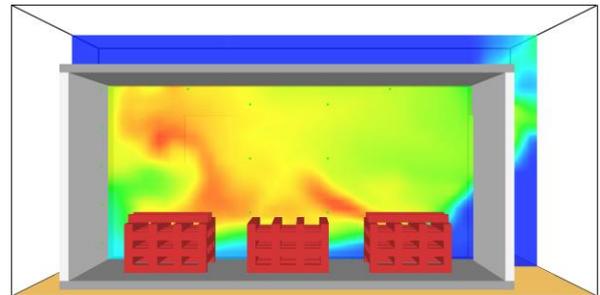
tempo = 9 min



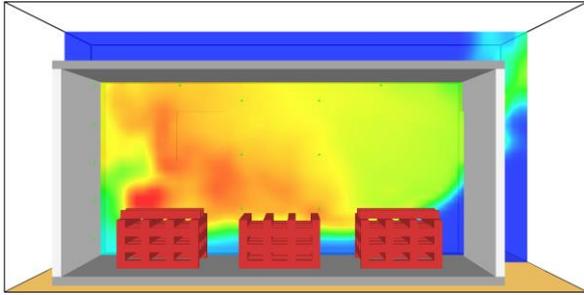
tempo = 10 min



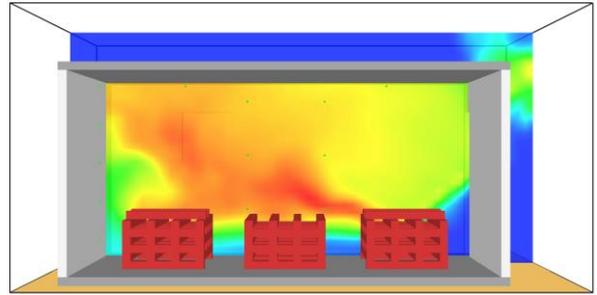
tempo = 11 min



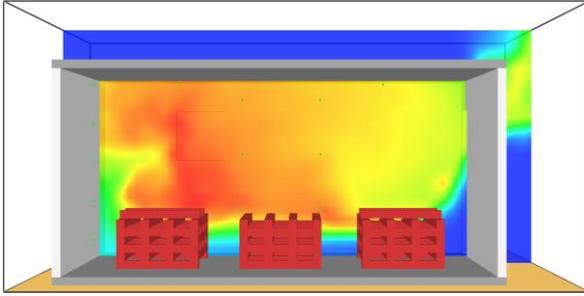
tempo = 12 min



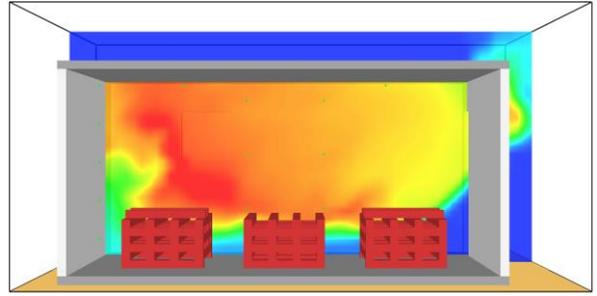
tempo = 13 min



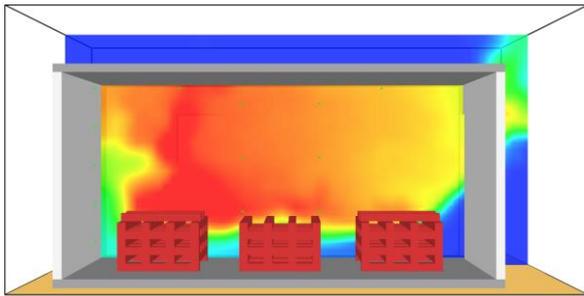
tempo = 14 min



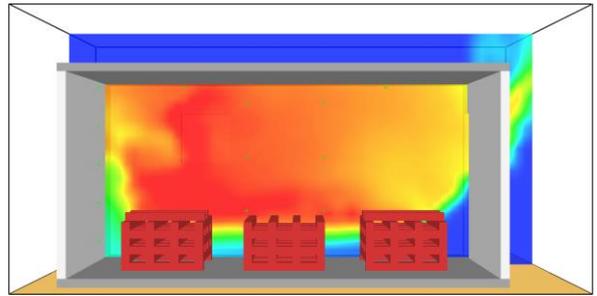
tempo = 15 min



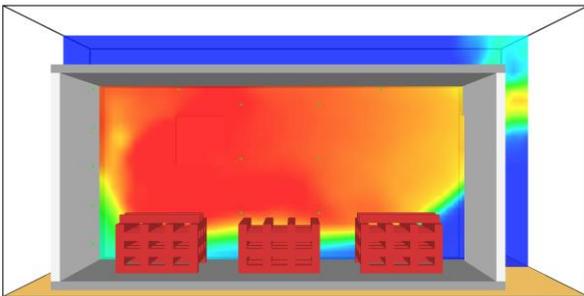
tempo = 16 min



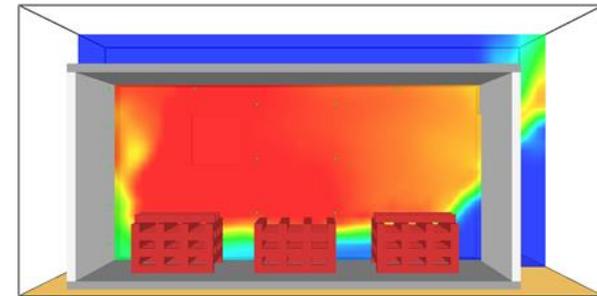
tempo = 17 min



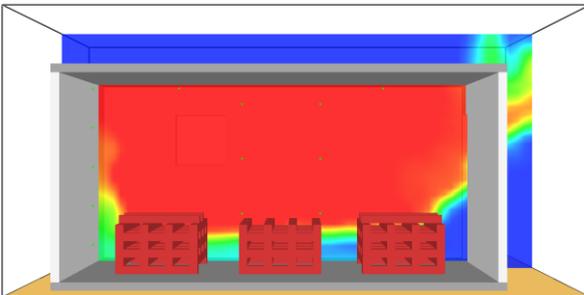
tempo = 18 min



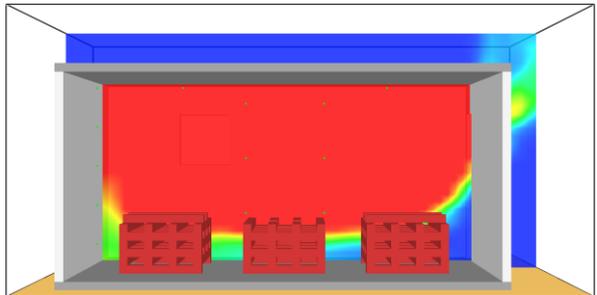
tempo = 19 min



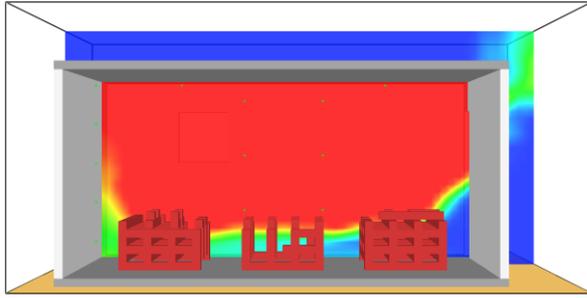
tempo = 20 min



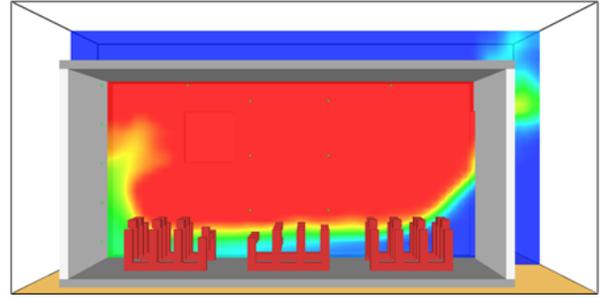
tempo = 25 min



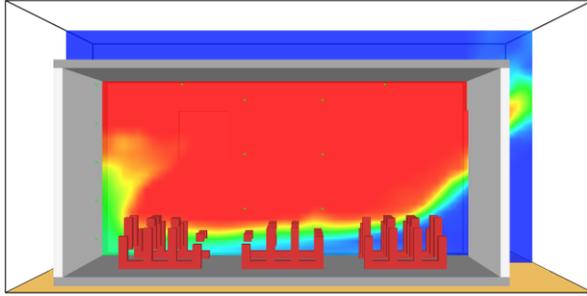
tempo = 30 min



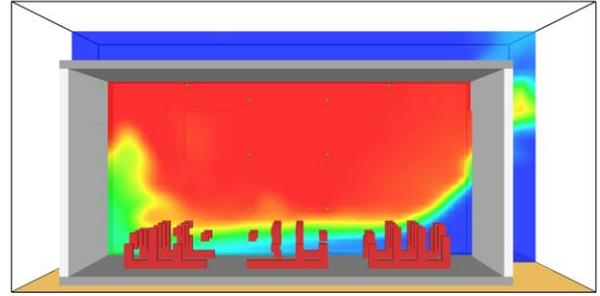
tempo = 35 min



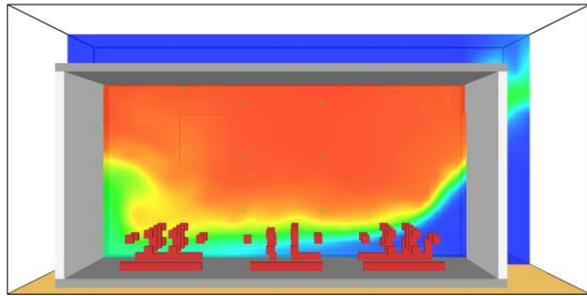
tempo = 40 min



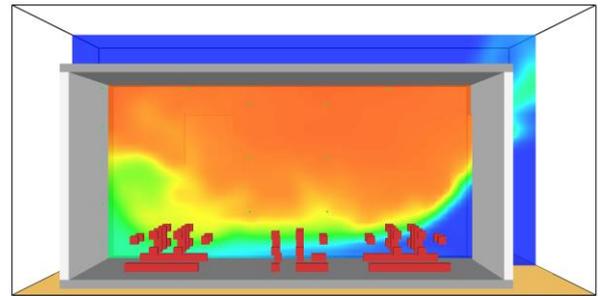
tempo = 41 min



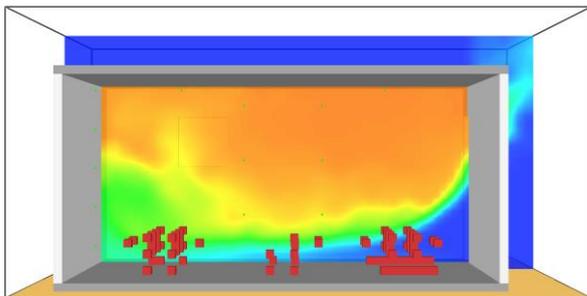
tempo = 42 min



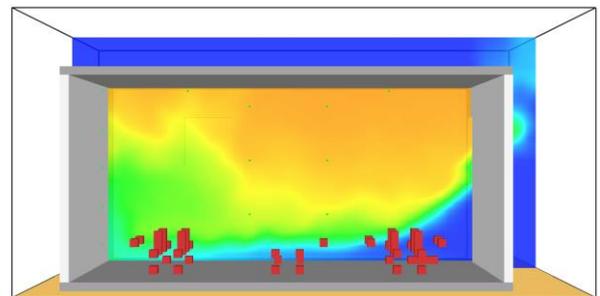
tempo = 43 min



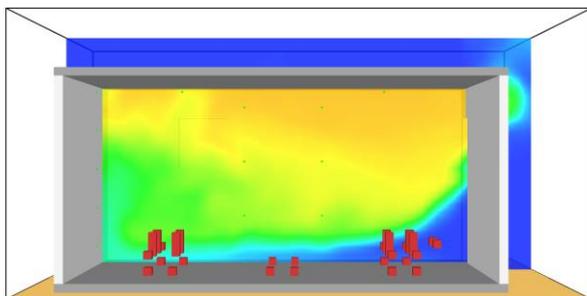
tempo = 44 min



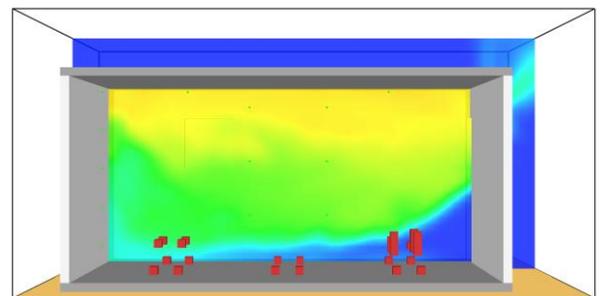
tempo = 45 min



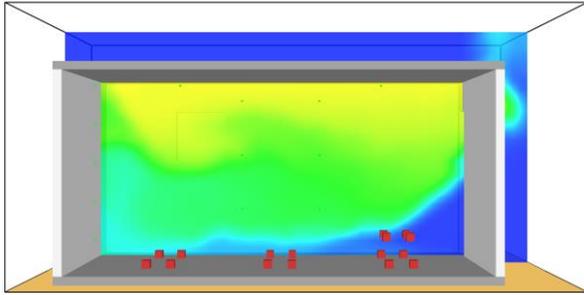
tempo = 46 min



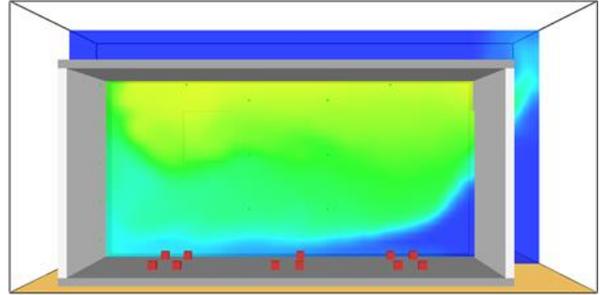
tempo = 47 min



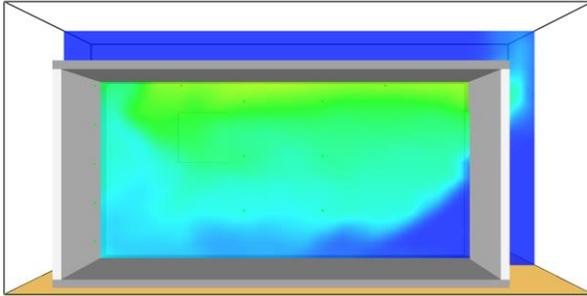
tempo = 48 min



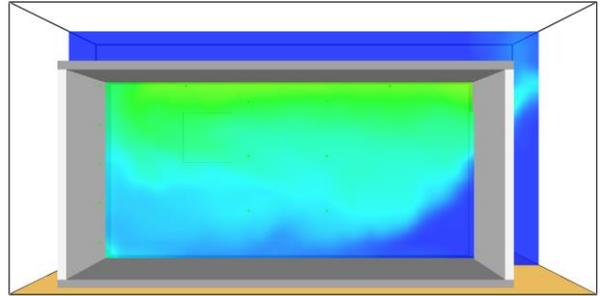
tempo = 49 min



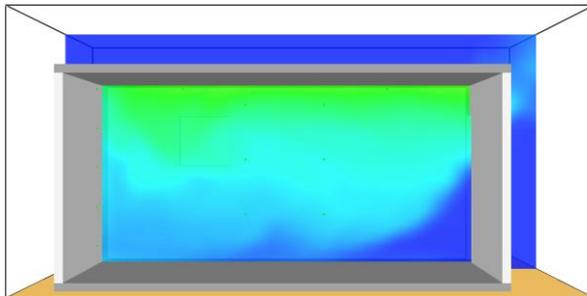
tempo = 50 min



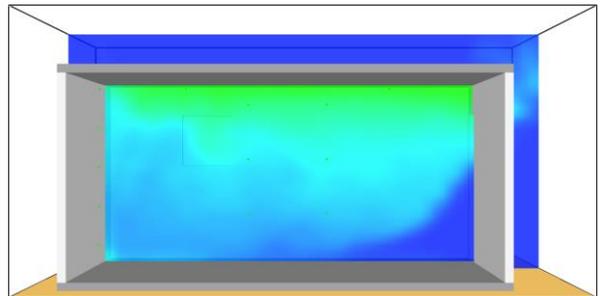
tempo = 55 min



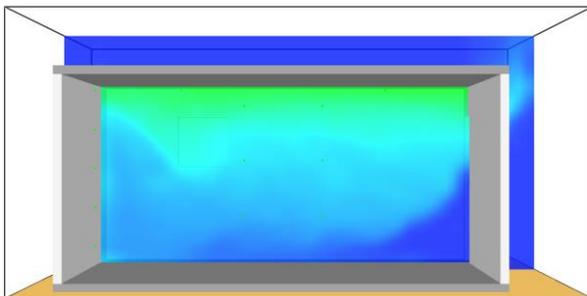
tempo = 60 min



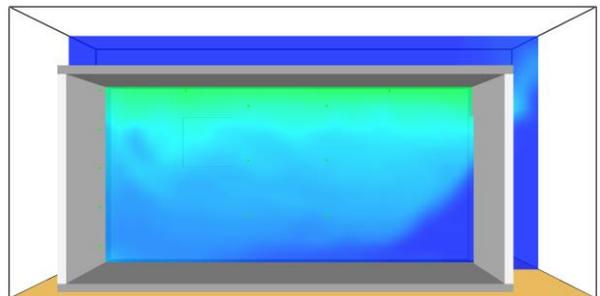
tempo = 65 min



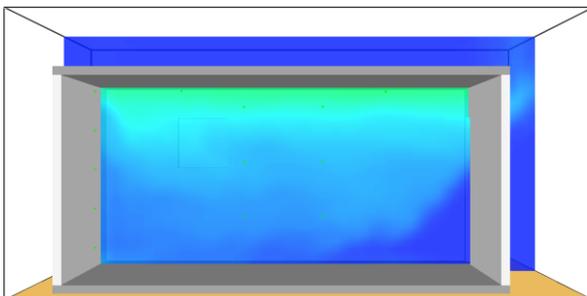
tempo = 70 min



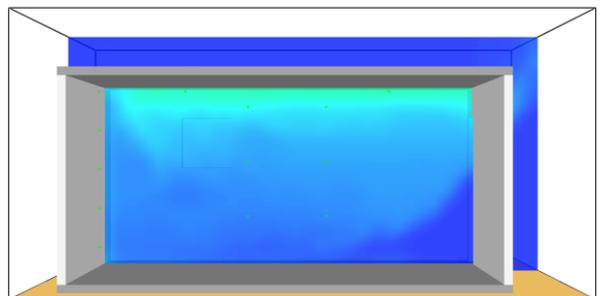
tempo = 75 min



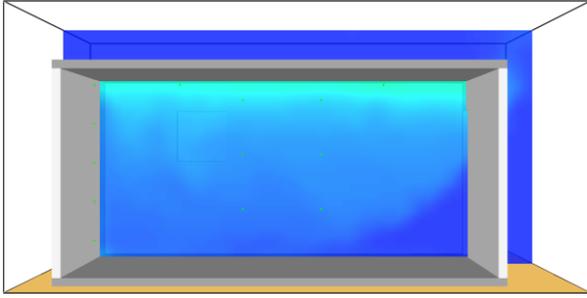
tempo = 80 min



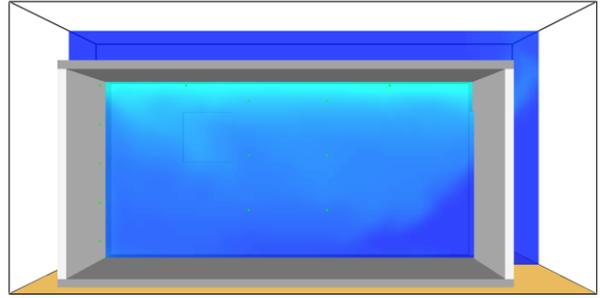
tempo = 90 min



tempo = 100 min



tempo = 110 min



tempo = 120 min

## APÊNDICE G - ARQUIVO DE ENTRADA DE DADOS DO MODELO DESENVOLVIDO NO FDS PARA O ESTUDO DE CASO 02

A seguir é apresentado o arquivo de entrada de dados desenvolvido para a simulação computacional de incêndio no *software* FDS, referente ao ensaio experimental de um dormitório pertencente a edificações residenciais tipicamente incendiadas na cidade de Recife / PE.

```

&HEAD CHID='DORMITORIO_RECIFE', TITLE='DORMITORIO_RECIFE' /
-----
DEFINIÇÃO DA MALHA (10 cm):
-----
&MESH IJK=100,75,40, XB=-1.5,8.5,-3.0,4.5,-0.1,3.9 /
-----
DEFINIÇÃO DO TEMPO DE SIMULAÇÃO (EM SEGUNDOS):
-----
&TIME T_END=3000.0 /

&DUMP DT_RESTART=10.0 / cria arquivos de restart a cada 10 s de
simulação
-----
PARÂMETROS INICIAIS DO AMBIENTE:
-----
TEMPERATURA AMBIENTE = 29.5°C
PRESSÃO ATMOSFÉRICA = 101325 Pa
HUMIDADE DO AR = 80%

VENTO DE 3 m/s À 45°
U0 = 3*cos(45) = 2.12
V0 = 3*sen(45) = 2.12

&MISC TMPA=29.5
      P_INF=101325.0
      HUMIDITY=80.0
      MEAN_FORCING(1:2)=.TRUE.,.TRUE.
      U0=2.12
      V0=2.12
      DT_MEAN_FORCING=10.0 /

RESTART=.TRUE. /
^
>>> caso seja necessário, para iniciar um restart deve-se ativar
este comando na namelist MISC <<<
-----
ABRINDO A MALHA PARA O EXTERIOR (INTERAÇÃO COM O AMBIENTE):
-----
&VENT MB='XMIN', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='XMAX', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='YMIN', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='YMAX', SURF_ID='OPEN' /
&VENT MB='ZMAX', SURF_ID='OPEN' /
-----

```

REAÇÃO GASOSA DO INCÊNDIO:

-----

Em uma simulação de incêndio no FDS, há apenas um combustível gasoso que atua como um substituto para todas as fontes de combustível em potencial.

&SPEC ID='madeira', FORMULA='CH1.700.74N0.002' /

&REAC ID='MADEIRA'  
 FUEL='madeira'  
 HEAT\_OF\_COMBUSTION=17500.0  
 SOOT\_YIELD=0.015  
 CO\_YIELD=0.004 /

-----

MATERIAIS NÃO COMBUSTÍVEIS:

-----

Propriedades obtidas de ABNT NBR 15220 (2003)

-----

TIJOLO CERÂMICO:

DENSIDADE = 1400 kg/m<sup>3</sup>  
 CONDUTIVIDADE TÉRMICA = 0.9 w/m.K  
 CALOR ESPECIFICO = 0.92 kJ/(kg.K)  
 EMISSIVIDADE = 0.9

&MATL ID='TIJOLO'  
 DENSITY=1400.0  
 CONDUCTIVITY=0.9  
 SPECIFIC\_HEAT=0.92  
 EMISSIVITY=0.9 /

-----

ARGAMASSA DE GESSO:

DENSIDADE = 1200 kg/m<sup>3</sup>  
 CONDUTIVIDADE TÉRMICA = 0.7 w/m.K  
 CALOR ESPECIFICO = 0.84 kJ/(kg.K)  
 EMISSIVIDADE = 0.9

&MATL ID='A\_GESSO'  
 DENSITY=1200.0  
 CONDUCTIVITY=0.7  
 SPECIFIC\_HEAT=0.84  
 EMISSIVITY=0.9 /

-----

ARGAMASSA DE CIMENTO:

DENSIDADE = 2000 kg/m<sup>3</sup>  
 CONDUTIVIDADE TÉRMICA = 1.15 w/m.K  
 CALOR ESPECIFICO = 1.0 kJ/(kg.K)  
 EMISSIVIDADE = 0.9

&MATL ID='A\_CIMENTO'  
 DENSITY=2000.0  
 CONDUCTIVITY=1.15  
 SPECIFIC\_HEAT=1.0  
 EMISSIVITY=0.9 /

-----  
 CONCRETO:

DENSIDADE = 2300 kg/m<sup>3</sup>  
 CONDUTIVIDADE TÉRMICA = 1.75 w/m.K  
 CALOR ESPECIFICO = 1.0 kJ/(kg.K)  
 EMISSIVIDADE = 0.9

&MATL ID='CONCRETO'  
 DENSITY=2300.0  
 CONDUCTIVITY=1.75  
 SPECIFIC\_HEAT=1.0  
 EMISSIVITY=0.9 /

-----  
 &SURF ID='PISO'  
 COLOR='GRAY'  
 MATL\_ID='CONCRETO'  
 THICKNESS=0.1  
 BACKING='EXPOSED' /

-----  
 &SURF ID='TETO'  
 COLOR='GRAY'  
 MATL\_ID='TIJOLO', 'CONCRETO'  
 THICKNESS=0.07,0.03  
 BACKING='EXPOSED' /

-----  
 &SURF ID='PAREDE\_CIMENTO'  
 COLOR='SILVER'  
 MATL\_ID='A\_CIMENTO', 'TIJOLO', 'A\_CIMENTO'  
 THICKNESS = 0.025,0.1,0.025  
 BACKING='EXPOSED' /

-----  
 &SURF ID='PAREDE\_CHAPISCADA'  
 COLOR='SILVER'  
 MATL\_ID='A\_CIMENTO', 'TIJOLO', 'A\_CIMENTO'  
 THICKNESS = 0.01,0.1,0.025  
 BACKING='EXPOSED' /

-----  
 &SURF ID='PAREDE\_GESSO'  
 COLOR='SILVER'  
 MATL\_ID='A\_GESSO', 'TIJOLO', 'A\_CIMENTO'  
 THICKNESS = 0.025,0.1,0.025  
 BACKING='EXPOSED' /

-----  
 MATERIAIS COMBUSTÍVEIS:  
 -----

-----  
 MADEIRA:

DENSIDADE = 400 kg/m<sup>3</sup>  
 EMISSIVIDADE = 0.9  
 CONDUTIVIDADE TÉRMICA = 0.12 w/m.K  
 CALOR ESPECIFICO = 1.34 kJ/(kg.K)  
 CALOR DE COMBUSTÃO = 17500 kJ/kg  
 TEMPERATURA DE IGNIÇÃO = 210 °C

TAXA DE LIBERAÇÃO DE CALOR = 100 kw/m<sup>2</sup>

```
&MATL ID='MADEIRA'
      SPECIFIC_HEAT=1.34
      CONDUCTIVITY=0.12
      EMISSIVITY=0.9
      DENSITY=400.0
      HEAT_OF_COMBUSTION=17500.0 /
```

```
-----
&SURF ID='MAD'
      COLOR='BROWN'
      BURN_AWAY=.TRUE.
      BACKING='EXPOSED'
      MATL_ID='MADEIRA'
      THICKNESS=0.1
      IGNITION_TEMPERATURE=210
      HRRPUA=100 /
```

-----

GEOMETRIA DO COMPARTIMENTO:

-----

PISO:

```
&OBST XB=-0.1,7.1,-1.7,3.1,-0.1,0.0, SURF_ID='PISO' /
```

TETO:

```
&OBST XB=-0.1,1.8,-1.7,-0.1,2.4,2.5, SURF_ID='TETO' /
&OBST XB=1.8,3.9,-1.7,-1.6,2.4,2.5, SURF_ID='TETO' /
&OBST XB=3.9,7.1,-1.7,-0.1,2.4,2.5, SURF_ID='TETO' /
&OBST XB=-0.1,7.1,-0.1,3.1,2.4,2.5, SURF_ID='TETO' /
```

PAREDE P7:

```
&OBST XB=-0.1,0.0,-1.7,-0.1,0.0,2.4, SURF_ID='PAREDE_CIMENTO' /
```

PAREDE P1 (considerado a abertura da janela J01):

```
&OBST XB=-0.1,0.0,-0.1,1.0,0.0,2.4, SURF_ID='PAREDE_CHAPISCADA' /
&OBST XB=-0.1,0.0,1.0,2.0,0.0,1.2, SURF_ID='PAREDE_CHAPISCADA' /
&OBST XB=-0.1,0.0,1.0,2.0,2.0,2.4, SURF_ID='PAREDE_CHAPISCADA' /
&OBST XB=-0.1,0.0,2.0,3.1,0.0,2.4, SURF_ID='PAREDE_CHAPISCADA' /
```

PAREDE P3 (considerando a abertura da porta P01):

```
&OBST XB=3.9,4.0,-0.1,2.1,0.0,2.4, SURF_ID='PAREDE_CIMENTO' /
&OBST XB=3.9,4.0,2.1,2.9,2.0,2.4, SURF_ID='PAREDE_CIMENTO' /
&OBST XB=3.9,4.0,2.9,3.1,0.0,2.4, SURF_ID='PAREDE_CIMENTO' /
```

-----

Considerando que a porta foi abertura em 1080 segundos:

```
&OBST XB=3.9,4.0,2.1,2.9,0.0,2.0, SURF_ID='PAREDE_CIMENTO',
      COLOR='BLACK', DEVC_ID='tempo01' /
&DEVC XYZ=3.9,2.5,1.0, ID='tempo01', SETPOINT= 1080.0,
      QUANTITY='TIME', INITIAL_STATE=.true. /
```

-----

PAREDE P6 (considerando a abertura da porta P02):

```
&OBST XB=7.0,7.1,-1.7,2.0,0.0,2.4, SURF_ID='PAREDE_CIMENTO' /
&OBST XB=7.0,7.1,2.0,2.9,2.0,2.4, SURF_ID='PAREDE_CIMENTO' /
&OBST XB=7.0,7.1,2.9,3.1,0.0,2.4, SURF_ID='PAREDE_CIMENTO' /
```

-----

PAREDE P2:

```
&OBST XB=0.0,3.9,3.0,3.1,0.0,2.4, SURF_ID='PAREDE_GESSO',
COLOR='SILVER', TRANSPARENCY=0.5 /
```

-----

PAREDE P5 (considerado a abertura da janela J02):

```
&OBST XB=4.0,5.0,3.0,3.1,0.0,2.4, SURF_ID='PAREDE_CIMENTO',
COLOR='SILVER', TRANSPARENCY=0.5 /
&OBST XB=5.0,6.0,3.0,3.1,0.0,1.1, SURF_ID='PAREDE_CIMENTO',
COLOR='SILVER', TRANSPARENCY=0.5 /
&OBST XB=5.0,6.0,3.0,3.1,1.9,2.4, SURF_ID='PAREDE_CIMENTO',
COLOR='SILVER', TRANSPARENCY=0.5 /
&OBST XB=6.0,7.0,3.0,3.1,0.0,2.4, SURF_ID='PAREDE_CIMENTO',
COLOR='SILVER', TRANSPARENCY=0.5 /
```

-----

PAREDE P4:

```
&OBST XB=0.0,3.9,-0.1,0.0,0.0,2.4, SURF_ID='PAREDE_CHAPISCADA' /
```

-----

PAREDE P8 (considerando a abertura da porta P03):

```
&OBST XB=0.0,5.0,-1.7,-1.6,0.0,2.4, SURF_ID='PAREDE_CIMENTO' /
&OBST XB=5.0,5.9,-1.7,-1.6,2.0,2.4, SURF_ID='PAREDE_CIMENTO' /
&OBST XB=5.9,7.0,-1.7,-1.6,0.0,2.4, SURF_ID='PAREDE_CIMENTO' /
```

-----

ESCADA:

```
&MULT ID='escada', DXB=-0.2,-0.2,0.0,0.0,0.2,0.2, N_LOWER=0,
N_UPPER=11 /
&OBST XB=3.8,4.0,-1.6,-0.1,0.0,0.2, MULT_ID='escada',
SURF_ID='PISO' /
```

-----

CARGA DE INCÊNDIO:

-----

-----

CAMA + COLCHÃO:

```
&MULT ID='C1', DY=0.7, DX0=0.0, DY0=0.0, DZ0=0.0, J_LOWER=0,
J_UPPER=1 /
&OBST XB=0.0,2.0,0.0,0.1,0.0,0.1, MULT_ID='C1', SURF_ID='MAD' /

&MULT ID='C2', DX=0.2, DX0=0.0, DY0=0.0, DZ0=0.1, I_LOWER=0,
I_UPPER=9 /
&OBST XB=0.0,0.1,0.0,0.8,0.0,0.1, MULT_ID='C2', SURF_ID='MAD' /
```

-----  
 BELICHE + COLCHÃO:

```
&MULT ID='B1', DY=0.7, DX0=0.0, DY0=2.2, DZ0=0.0, J_LOWER=0,
J_UPPER=1 /
&OBST XB=0.0,2.0,0.0,0.1,0.0,0.1, MULT_ID='B1', SURF_ID='MAD' /

&MULT ID='B2', DX=0.2, DX0=0.0, DY0=2.2, DZ0=0.1, I_LOWER=0,
I_UPPER=9 /
&OBST XB=0.0,0.1,0.0,0.8,0.0,0.1, MULT_ID='B2', SURF_ID='MAD' /

&MULT ID='B3', DY=0.7, DX0=0.0, DY0=2.2, DZ0=0.2, J_LOWER=0,
J_UPPER=1 /
&OBST XB=0.0,2.0,0.0,0.1,0.0,0.1, MULT_ID='B3', SURF_ID='MAD' /

&MULT ID='B4', DX=0.2, DX0=0.5, DY0=2.2, DZ0=0.3, I_LOWER=0,
I_UPPER=3 /
&OBST XB=0.0,0.1,0.0,0.8,0.0,0.1, MULT_ID='B4', SURF_ID='MAD' /
```

-----  
 CRIADO MUDO 1 + VENTILADOR:

```
&MULT ID='CM1', DY=0.4, DX0=0.0, DY0=0.9, DZ0=0.0, J_LOWER=0,
J_UPPER=1 /
&OBST XB=0.0,0.5,0.0,0.1,0.0,0.4, MULT_ID='CM1', SURF_ID='MAD' /

&OBST XB=0.0,0.5,0.9,1.4,0.4,0.5, SURF_ID='MAD' /
```

-----  
 CRIADO MUDO 2 + VENTILADOR:

```
&MULT ID='CM2', DY=0.4, DX0=0.0, DY0=1.6, DZ0=0.0, J_LOWER=0,
J_UPPER=1 /
&OBST XB=0.0,0.5,0.0,0.1,0.0,0.4, MULT_ID='CM2', SURF_ID='MAD' /

&OBST XB=0.0,0.5,1.6,2.1,0.4,0.5, SURF_ID='MAD' /
```

-----  
 CRIADO MUDO 3 + TELEVISOR:

```
&MULT ID='CM3', DX=0.4, DX0=2.2, DY0=0.6, DZ0=0.0, I_LOWER=0,
I_UPPER=1 /
&OBST XB=0.0,0.1,0.0,0.5,0.0,0.4, MULT_ID='CM3', SURF_ID='MAD' /

&OBST XB=2.2,2.7,0.6,1.1,0.4,0.5, SURF_ID='MAD' /
```

-----  
 GUARDA-ROUPAS + ROUPAS + PAPÉIS:

```
&MULT ID='GR1', DY=0.2, DX0=3.5, DY0=0.1, DZ0=0.0, J_LOWER=0,
J_UPPER=5 /
&OBST XB=0.0,0.1,0.0,0.1,0.0,2.1, MULT_ID='GR1', SURF_ID='MAD' /

&MULT ID='GR2', DZ=0.3, DX0=3.6, DY0=0.0, DZ0=0.2, K_LOWER=0,
K_UPPER=6 /
&OBST XB=0.0,0.1,0.0,1.3,0.0,0.1, MULT_ID='GR2', SURF_ID='MAD' /

&MULT ID='GR3', DY=0.2, DX0=3.7, DY0=0.1, DZ0=0.0, J_LOWER=0,
J_UPPER=5 /
&OBST XB=0.0,0.1,0.0,0.1,0.0,2.1, MULT_ID='GR3', SURF_ID='MAD' /
```

-----

-----  
 QUEIMADOR PARA IGNIÇÃO DO INCÊNDIO:  
 -----

```
&SURF ID='QUEIMADOR'
      COLOR='RED'
      HRRPUA=3000.0
      RAMP_Q = 'fire_ramp' /
&RAMP ID='fire_ramp', T=0.0, F=0.0 /
&RAMP ID='fire_ramp', T=30.0, F=1.0 /
&RAMP ID='fire_ramp', T=120.0, F=1.0 /
&RAMP ID='fire_ramp', T=150.0, F=0.0 /

&VENT XB=1.1,1.2,2.3,2.4,0.0,0.0, SURF_ID='QUEIMADOR' /
```

-----  
 MEDIDORES:  
 -----

-----  
 TERMOPARES:  
 -----

NO CENTRO DO COMPARTIMENTO:

```
&DEVC XYZ=1.9,1.5,0.3, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='H30' /
&DEVC XYZ=1.9,1.5,0.6, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='H60' /
&DEVC XYZ=1.9,1.5,0.9, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='H90' /
&DEVC XYZ=1.9,1.5,1.2, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='H120' /
&DEVC XYZ=1.9,1.5,1.5, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='H150' /
&DEVC XYZ=1.9,1.5,1.8, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='H180' /
&DEVC XYZ=1.9,1.5,2.1, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='H210' /
&DEVC XYZ=1.9,1.5,2.3, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='H230' /
```

-----  
 PAREDE P3:

```
&DEVC XYZ=3.9,1.6,2.1, QUANTITY='WALL TEMPERATURE', IOR=-1,
ID='09' / na face, do lado de dentro do dormitório

&DEVC XYZ=3.8,1.6,2.1, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='09G' / no gás,
do lado de dentro do dormitório

&DEVC XYZ=4.0,1.6,2.1, QUANTITY='WALL TEMPERATURE', IOR=1, ID='10'
/ na face, do lado de fora do dormitório

&DEVC XYZ=4.1,1.6,2.1, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='10G' / no gás,
do lado de fora do dormitório
```

-----  
 PAREDE P2:

```
&DEVC XYZ=0.5,3.0,2.1, QUANTITY='WALL TEMPERATURE', IOR=-2,
ID='11' / na face, do lado de dentro do dormitório

&DEVC XYZ=0.5,2.9,2.1, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='11G' / no gás,
do lado de dentro do dormitório

&DEVC XYZ=0.5,3.1,2.1, QUANTITY='WALL TEMPERATURE', IOR=2, ID='12'
/ na face, do lado de fora do dormitório

&DEVC XYZ=0.5,3.2,2.1, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='12G' / no gás,
do lado de fora do dormitório
```

-----  
PAREDE P1:

&DEVC XYZ=0.0,2.5,2.1, QUANTITY='WALL TEMPERATURE', IOR=1, ID='13'  
/ na face, do lado de dentro do dormitório

&DEVC XYZ=0.1,2.5,2.1, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='13G' / no gás,  
do lado de dentro do dormitório

&DEVC XYZ=-0.1,2.5,2.1, QUANTITY='WALL TEMPERATURE', IOR=-1,  
ID='14' / na face, do lado de fora do dormitório

&DEVC XYZ=-0.2,2.5,2.1, QUANTITY='TEMPERATURE', ID='14G' / no gás,  
do lado de fora do dormitório

-----  
ALTURA DA CAMADA LIVRE DE FUMAÇA NO COMPARTIMENTO:

&DEVC XB=1.9,1.9,1.5,1.5,0.0,2.4, QUANTITY='LAYER HEIGHT',  
ID='ACF\_Comp' /

-----  
CONCENTRAÇÃO DE OXIGÊNIO NO COMPARTIMENTO:

&DEVC XB=0.0,3.9,0.0,3.0,0.0,2.4, QUANTITY='MASS FRACTION',  
SPEC\_ID='OXYGEN', ID='COx\_Comp' /

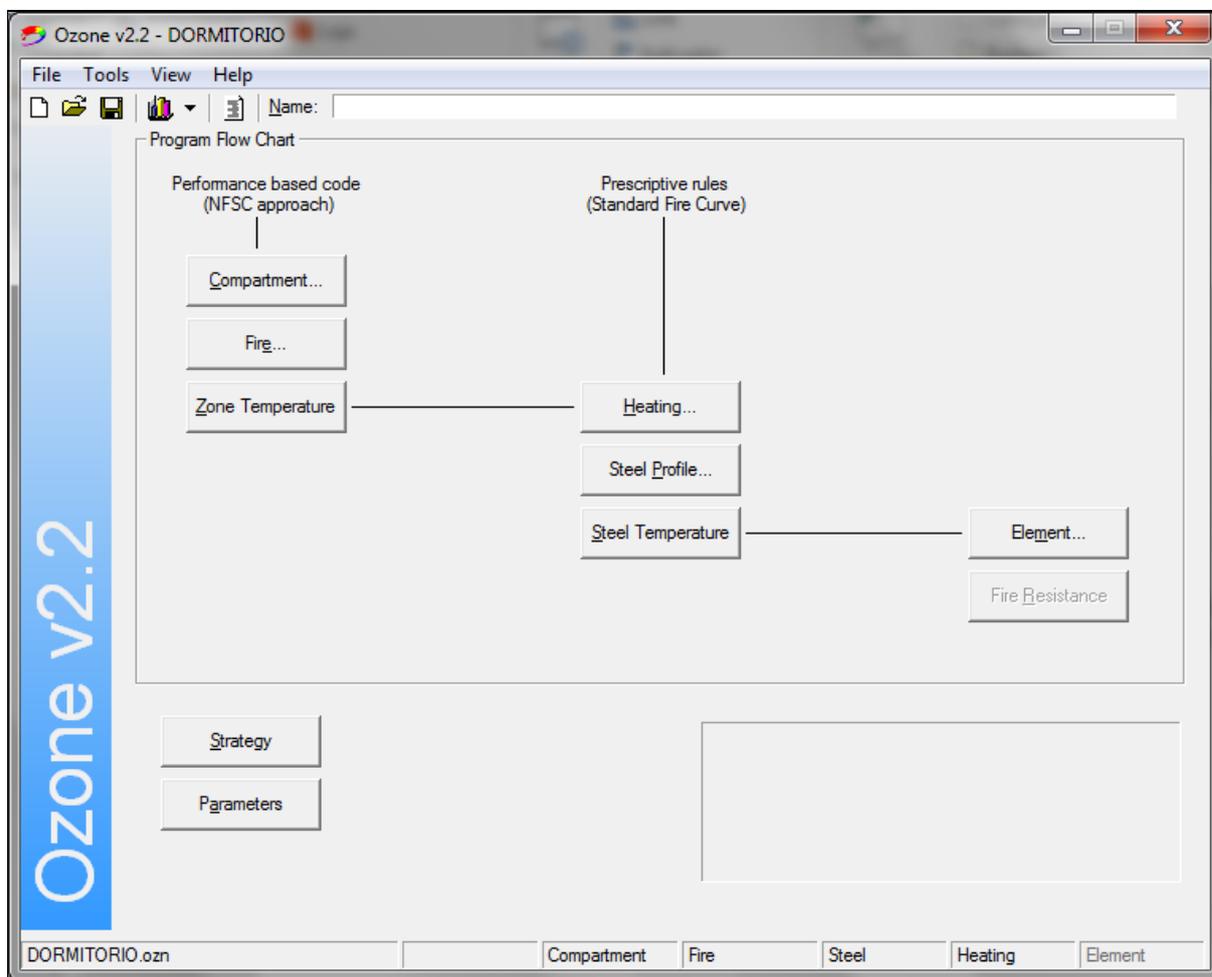
-----  
PLANO DE TEMPERATURAS DOS GASES:

&SLCF PBY=1.5, QUANTITY='TEMPERATURE', VECTOR=.TRUE.,  
ID='PerfilTemp\_Y150' /

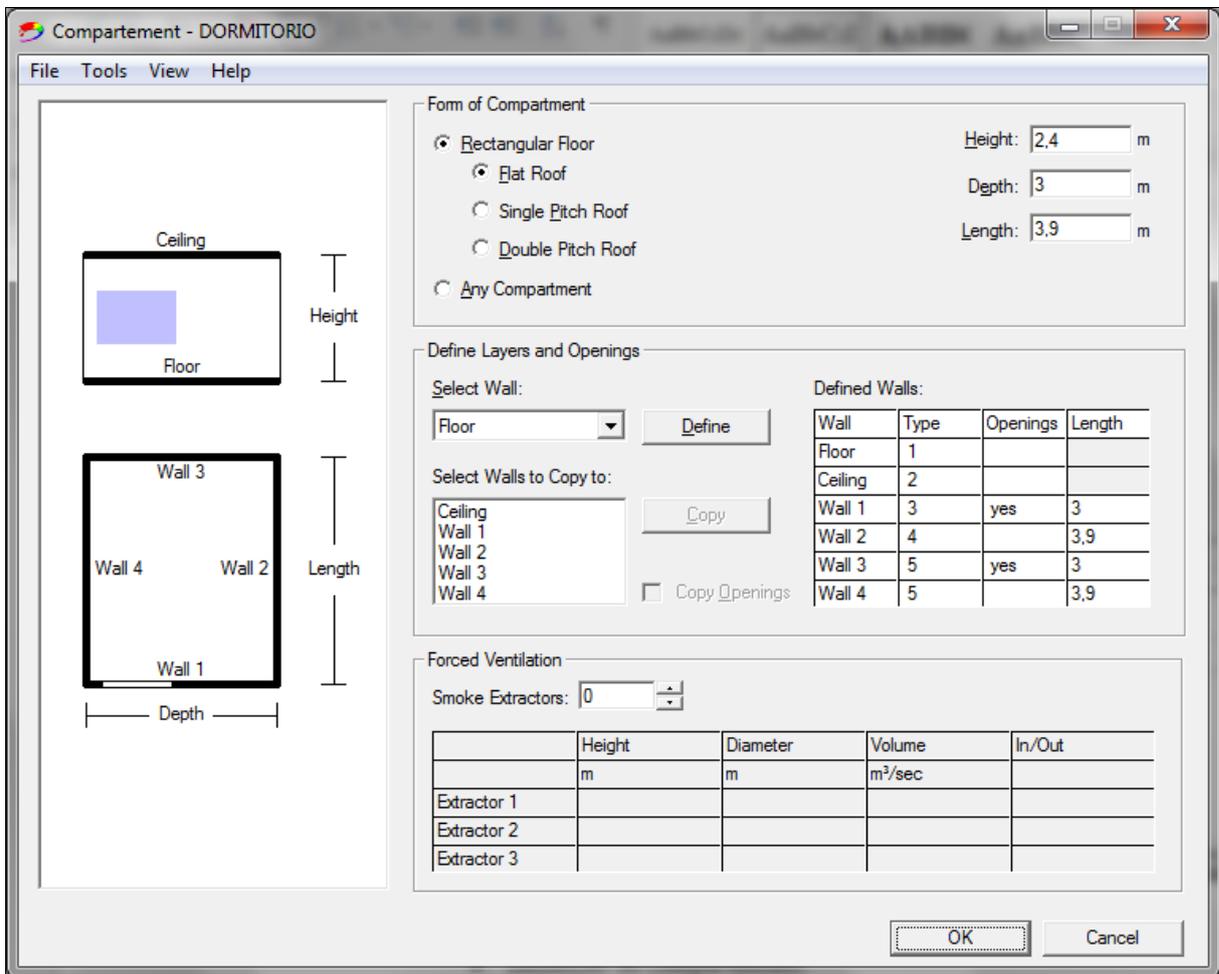
-----  
&TAIL / FIM DO ARQUIVO

## APÊNDICE H - ENTRADA DE DADOS DA SIMULAÇÃO REALIZADA NO OZONE PARA O ESTUDO DE CASO 02

- Interface inicial do *software* OZone:



- Definição do compartimento, acordo com a Figura 51:  
(Wall 1 = P3; Wall 2 = P2; Wall 3 = P1; Wall 4 = P4)



- Definição do compartimento, materiais do piso de acordo com a Tabela 7 e Tabela 8:

Layers Floor - DORMITORIO

File Tools View Help

	Material	Thickness	Unit mass	Conductivity	Specific Heat	Rel Emissivity	Rel Emissivity
		[cm]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[W/mK]	[J/kgK]	Hot Surface	Cold Surface
Layer 1	CONCRETO	10	2300	1,75	1000	0,9	0,9
Layer 2							
Layer 3							
Layer 4							

Enter each layer on a single row in the table above (up to four layers). Just click in a cell and edit it's value. If not found in the list of materials you can define your own material, by filling in the appropriate cells. Define your layers starting from Layer 1 (Inside).

Define your openings if any (up to three openings in a single wall). Click in the desired cell and input your values. Start from Opening 1.

To delete or insert a row, right click on a row header and select the appropriate command from the popup menu.

Inside

Layer 1
Layer 2
Layer 3
Layer 4

Outside

Equal Diameter Groups:

	Diameter	Number of Openings	Variation
	[m]		
Group 1			
Group 2			
Group 3			

OK Cancel

- Definição do compartimento, materiais do teto de acordo com a Tabela 7 e Tabela 8:

Layers Ceiling - DORMITORIO

File Tools View Help

	Material	Thickness	Unit mass	Conductivity	Specific Heat	Rel Emissivity	Rel Emissivity
		[cm]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[W/mK]	[J/kgK]	Hot Surface	Cold Surface
Layer 1	TIJOLO CERAMICO	7	1400	0,9	920	0,9	0,9
Layer 2	CONCRETO	3	2300	1,75	1000	0,9	0,9
Layer 3							
Layer 4							

Enter each layer on a single row in the table above (up to four layers). Just click in a cell and edit it's value. If not found in the list of materials you can define your own material, by filling in the appropriate cells. Define your layers starting from Layer 1 (Inside).

Define your openings if any (up to three openings in a single wall). Click in the desired cell and input your values. Start from Opening 1.

To delete or insert a row, right click on a row header and select the appropriate command from the popup menu.

Inside

Layer 1
Layer 2
Layer 3
Layer 4

Outside

Equal Diameter Groups: 0

	Diameter	Number of Openings	Variation
	[m]		
Group 1			
Group 2			
Group 3			

OK Cancel

- Definição do compartimento, materiais da parede P3 de acordo com a Tabela 7 e Tabela 8:

Layers and Openings Wall 1 - DORMITORIO

File Tools View Help

Wall Length: 3 m

	Material	Thickness [cm]	Unit mass [kg/m <sup>3</sup> ]	Conductivity [W/mK]	Specific Heat [J/kgK]	Rel Emissivity Hot Surface	Rel Emissivity Cold Surface
Layer 1	ARGAMASSA CIMENTO	2.5	2000	1.15	1000	0.9	0.9
Layer 2	TIJOLO CERAMICO	10	1400	0.9	920	0.9	0.9
Layer 3	ARGAMASSA CIMENTO	2.5	2000	1.15	1000	0.9	0.9
Layer 4							

Enter each layer on a single row in the table above (up to four layers). Just click in a cell and edit it's value. If not found in the list of materials you can define your own material, by filling in the appropriate cells. Define your layers starting from Layer 1 (Inside).

Define your openings if any (up to three openings in a single wall). Click in the desired cell and input your values. Start from Opening 1.

To delete or insert a row, right click on a row header and select the appropriate command from the popup menu.

Inside

Layer 1
Layer 2
Layer 3
Layer 4

Outside

	Sill Height Hi [m]	Soffit Height Hs [m]	Width [m]	Variation	Adiabatic
Opening 1	0	2	0.8	Time Dependent	no
Opening 2					
Opening 3					

OK Cancel

- Definição do compartimento, porta da parede P3 de acordo com a Figura 51:

Layers and Openings Wall 1 - DORMITORIO

File Tools View Help

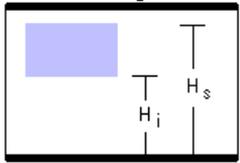
Wall Length: 3 m

	Material	Thickness [cm]	Unit mass [kg/m <sup>2</sup> ]	Conductivity [W/mK]	Specific Heat [J/kgK]	Rel Emissivity Hot Surface	Rel Emissivity Cold Surface
Layer 1	ARGAMASSA CIMENTO	2,5	2000	1,15	1000	0,9	0,9
Layer 2	TIJOLO CERÂMICO	10	1400	0,9	920	0,9	0,9
Layer 3	ARGAMASSA CIMENTO	2,5	2000	1,15	1000	0,9	0,9
Layer 4							

Enter each layer on a single row in the table above (up to four layers). Just click in a cell and edit it's value. If not found in the list of materials you can define your own material, by filling in the appropriate cells. Define your layers starting from Layer 1 (Inside).

Define your openings if any (up to three openings in a single wall). Click in the desired cell and input your values. Start from Opening 1.

To delete or insert a row, right click on a row header and select the appropriate command from the popup menu.



	Sill Height Hi [m]	Soffit Height Hs [m]	Width [m]	Variation	Adiabatic
Opening 1		2	0,8	Time Dependent	no
Opening 2					
Opening 3					

OK Cancel

A definição de variação dependente do tempo na abertura (*Opening 1* > *Variation* > *Time Dependent*) indica ao OZone que a porta será ativada em um tempo pré-determinado.

- Definição do compartimento, materiais da parede P2 de acordo com a Tabela 7 e Tabela 8:

Layers and Openings Wall 2 - DORMITORIO

File Tools View Help

Wall Length: 3,9 m

	Material	Thickness	Unit mass	Conductivity	Specific Heat	Rel Emissivity	Rel Emissivity
		[cm]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[W/mK]	[J/kgK]	Hot Surface	Cold Surface
Layer 1	ARGAMASSA GESSO	2.5	1200	0.7	840	0.9	0.9
Layer 2	TIJOLO CERAMICO	10	1400	0.9	920	0.9	0.9
Layer 3	ARGAMASSA CIMENTO	2.5	2000	1.15	1000	0.9	0.9
Layer 4							

Enter each layer on a single row in the table above (up to four layers). Just click in a cell and edit it's value. If not found in the list of materials you can define your own material, by filling in the appropriate cells. Define your layers starting from Layer 1 (Inside).

Define your openings if any (up to three openings in a single wall). Click in the desired cell and input your values. Start from Opening 1.

To delete or insert a row, right click on a row header and select the appropriate command from the popup menu.

Inside

Layer 1
Layer 2
Layer 3
Layer 4

Outside

	Sill Height Hi	Soffit Height Hs	Width	Variation	Adiabatic
	[m]	[m]	[m]		
Opening 1					
Opening 2					
Opening 3					

OK Cancel

- Definição do compartimento, materiais da parede P1 de acordo com a Tabela 7 e Tabela 8:

Layers and Openings Wall 3 - DORMITORIO

File Tools View Help

Wall Length: 3 m

	Material	Thickness [cm]	Unit mass [kg/m <sup>3</sup> ]	Conductivity [W/mK]	Specific Heat [J/kgK]	Rel Emissivity Hot Surface	Rel Emissivity Cold Surface
Layer 1	ARGAMASSA CIMENTO	1	2000	1,15	1000	0,9	0,9
Layer 2	TIJOLO CERÂMICO	10	1400	0,9	920	0,9	0,9
Layer 3	ARGAMASSA CIMENTO	2,5	2000	1,15	1000	0,9	0,9
Layer 4							

Enter each layer on a single row in the table above (up to four layers). Just click in a cell and edit it's value. If not found in the list of materials you can define your own material, by filling in the appropriate cells. Define your layers starting from Layer 1 (Inside).

Define your openings if any (up to three openings in a single wall). Click in the desired cell and input your values. Start from Opening 1.

To delete or insert a row, right click on a row header and select the appropriate command from the popup menu.

Inside

Layer 1
Layer 2
Layer 3
Layer 4

Outside

	Sill Height Hi [m]	Soffit Height Hs [m]	Width [m]	Variation	Adiabatic
Opening 1	1,2	2	1	Constant	no
Opening 2					
Opening 3					

OK Cancel

- Definição do compartimento, janela da parede P1 de acordo com a Figura 51:

Layers and Openings Wall 3 - DORMITORIO

File Tools View Help

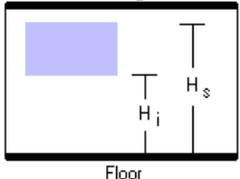
Wall Length: 3 m

	Material	Thickness [cm]	Unit mass [kg/m <sup>3</sup> ]	Conductivity [W/mK]	Specific Heat [J/kgK]	Rel Emissivity Hot Surface	Rel Emissivity Cold Surface
Layer 1	ARGAMASSA CIMENTO	1	2000	1,15	1000	0,9	0,9
Layer 2	TIJOLO CERÂMICO	10	1400	0,9	920	0,9	0,9
Layer 3	ARGAMASSA CIMENTO	2,5	2000	1,15	1000	0,9	0,9
Layer 4							

Enter each layer on a single row in the table above (up to four layers). Just click in a cell and edit it's value. If not found in the list of materials you can define your own material, by filling in the appropriate cells. Define your layers starting from Layer 1 (Inside).

Define your openings if any (up to three openings in a single wall). Click in the desired cell and input your values. Start from Opening 1.

To delete or insert a row, right click on a row header and select the appropriate command from the popup menu.



	Sill Height H <sub>i</sub> [m]	Soffit Height H <sub>s</sub> [m]	Width [m]	Variation	Adiabatic
Opening 1	1,2	2	1	Constant	no
Opening 2					
Opening 3					

OK Cancel

A definição de variação constante na abertura (*Opening 1 > Variation > Constant*) indica ao OZone que a janela ficará aberta durante todo o tempo de simulação.

- Definição do compartimento, materiais da parede P4 de acordo com a Tabela 7 e Tabela 8:

Layers and Openings Wall 4 - DORMITÓRIO

File Tools View Help

Wall Length: 3,9 m

	Material	Thickness [cm]	Unit mass [kg/m <sup>3</sup> ]	Conductivity [W/mK]	Specific Heat [J/kgK]	Rel Emissivity Hot Surface	Rel Emissivity Cold Surface
Layer 1	ARGAMASSA CIMENTO	1	2000	1,15	1000	0,9	0,9
Layer 2	TIJOLO CERÂMICO	10	1400	0,9	920	0,9	0,9
Layer 3	ARGAMASSA CIMENTO	2,5	2000	1,15	1000	0,9	0,9
Layer 4							

Enter each layer on a single row in the table above (up to four layers). Just click in a cell and edit it's value. If not found in the list of materials you can define your own material, by filling in the appropriate cells. Define your layers starting from Layer 1 (Inside).

Define your openings if any (up to three openings in a single wall). Click in the desired cell and input your values. Start from Opening 1.

To delete or insert a row, right click on a row header and select the appropriate command from the popup menu.

Inside

Layer 1
Layer 2
Layer 3
Layer 4

Outside

	Sill Height Hi [m]	Soffit Height Hs [m]	Width [m]	Variation	Adiabatic
Opening 1					
Opening 2					
Opening 3					

OK Cancel

- Definição do incêndio:

Fire - DORMITORIO

File Tools View Help

Fire Curve  
 EN 1991 - 1 - 2  User Defined Fire

Occupancy	Fire Growth Rate	RHRf [kW/m <sup>2</sup> ]	Fire Load q <sub>f,k</sub> 80% Fractile [MJ/m <sup>2</sup> ]	Danger of Fire Activation	
User Defined	300		250	500	1
Description	Medium	Building use is offices		Medium	

Active Fire Fighting Measures

- Automatic Water Extinguishing System  $\delta_{n,1} = 1$
- Independent Water Supplies (1 2)  $\delta_{n,2} = 1$
- Automatic Fire Detection by Heat  $\delta_{n,3} = 1$
- Automatic Fire Detection by Smoke  $\delta_{n,5} = 1$
- Automatic Alarm Transmission to Fire Brigade  $\delta_{n,6} = 1$
- Work Fire Brigade  $\delta_{n,8} = 1$
- Off Site Fire Brigade  $\delta_{n,9} = 1$
- Safe Access Routes  $\delta_{n,10} = 1$
- Staircases Under Overpressure in Fire Alarm
- Fire Fighting Devices  $\delta_{n,9} = 1$
- Smoke Exhaust System  $\delta_{n,10} = 1$

Fire Info

Max Fire Area:  m<sup>2</sup>  
 Fire Elevation:  m Fuel Height:  m

Design Fire Load

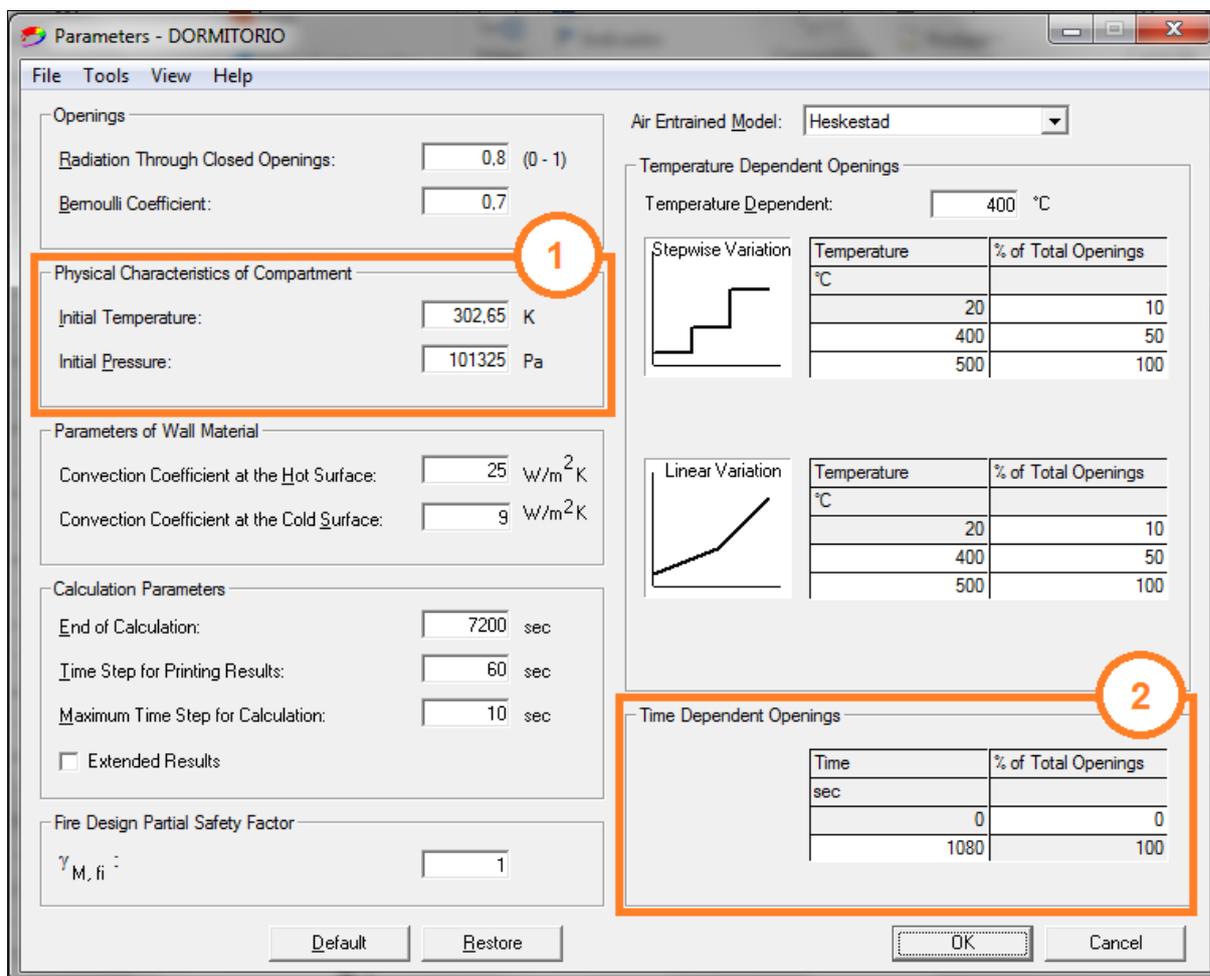
Fire Risk Area:  m<sup>2</sup>  $\delta_{q,1} = 0.99$   
 Danger of Fire Activation:  $\delta_{q,2} = 1$   
 Active Measures:  $\prod \delta_{n,i} = 1$   
 $q_{f,d} = \delta_{q,1} \cdot \delta_{q,2} \cdot \prod \delta_{n,i} \cdot q_{f,k} = 495.0$  MJ/m<sup>2</sup>

Combustion

Combustion Heat of Fuel:  MJ/kg  
 Combustion Efficiency Factor:   
 Combustion Model:   
 Stoichiometric Coefficient:

OK Cancel

- Outros parâmetros definidos:



- (2) Definição das condições ambientais iniciais: temperatura ambiente = 302,35 °K (29,50 °C), pressão atmosférica = 101.325,0 Pa;
- (3) Definição do tempo de ativação da porta: abrir 100 % aos 1080 segundos (18 minutos);
- (\*) Os demais parâmetros foram mantidos conforme o padrão do *software*.

- Estratégia de simulação utilizada (definição padrão do *software*):

