

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

Lucimar de Oliveira Meira

**Simulação Computacional da Altura e Temperatura da
Camada de Fumaça**

2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

“Simulação Computacional da Altura e Temperatura da Camada de Fumaça”

Lucimar de Oliveira Meira

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de “Mestre em Engenharia de Estruturas”.

Comissão examinadora:

Prof. Dr. Francisco Carlos Rodrigues
DEES – EE – UFMG – (Orientador)

Prof. Dr. Ricardo Hallal Fakury
DEES –EE – UFMG

Prof. Dr. Paulo Gustavo Von Kruger
TAU – EA– UFMG

Belo Horizonte, 10 de agosto de 2017

M514s

Meira, Lucimar de Oliveira.

Simulação computacional da altura e temperatura da camada de fumaça [manuscrito] / Lucimar de Oliveira Meira. - 2017.

xiii, 148 f., enc.: il.

Orientador: Francisco Carlos Rodrigues.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 146-148.

1. Engenharia de estruturas - Teses. 2. Controle de fumaça - Teses. 3. Incêndios - Teses. 4. Simulação (Computadores) - Teses. I. Rodrigues, Francisco Carlos. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 624(043)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a *Deus*, porque no *Seu* tempo tudo é perfeito.

Ao meu amado marido Rodrigo, por sua presença, auxílio, companheirismo e paciência, sempre. Ao meu filho Arthur, que ainda pequeno já é um grande colaborador. Ao segundo maior presente e benção de Deus em nossas vidas, Alice, que ainda no ventre me impulsiona e motiva. À minha família amada, benção de Deus, obrigada.

Ao Professor Francisco Carlos Rodrigues, meu orientador, por sua colaboração para que a execução deste trabalho fosse possível e realizado da melhor maneira.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de mestrado, apoio primordial para realização deste trabalho. Apoio importantíssimo para todo aluno de pós-graduação.

“Que darei eu ao Senhor por todos os benefícios que me tem feito?”

Salmo 116:12

RESUMO

MEIRA, L. O. *Simulação Computacional da Altura e Temperatura da Camada de Fumaça*. Belo Horizonte, 2017 – Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais.

O sistema de controle de fumaça ocorre através de sistemas de introdução de ar limpo no ambiente sinistrado, através da circulação de ar e simultaneamente pela extração/remoção da fumaça do ambiente interno para o externo de modo que o sistema evite que a fumaça se generalize pelos espaços não sinistrados.

O principal objetivo deste trabalho é a simulação computacional da altura da interface da camada de fumaça – AICF e a temperatura média da camada de fumaça – TMCF, em ambientes em situação de incêndio com diferentes configurações de sistemas de controle de fumaça. Para o desenvolvimento do trabalho foram utilizados os programas FDS, CFAST e B-RISK. Entre os sistemas estudados foram analisadas situações com entradas de ar e saídas de fumaça naturais ou mecânicas.

Conclui-se que, de maneira geral, os resultados encontrados com os programas FDS, CFAST e B-RISK foram próximos aos resultados experimentais e simulações de outros autores, ora mais conservadores, ora menos. Nos casos em que se tem aberturas de entrada de ar localizadas na camada de fumaça, os programas de zonas, CFAST e B-RISK, apresentam resultado divergente do observado experimentalmente e, portanto, não devem ser utilizados para analisar essas situações. A partir das comparações dos resultados das simulações com procedimentos encontrados nas Instruções Técnicas, conclui-se que os procedimentos são conservadores sendo necessárias alterações para que se tornem mais econômicos.

As simulações desenvolvidas neste trabalho podem auxiliar na realização de análises, projetos e experimentos, avaliando com maior precisão o efeito da fumaça no tempo de evacuação dos usuários e da temperatura na estrutura da edificação.

Palavras-Chave: Simulação Computacional, Controle de Fumaça, Altura da Camada de Fumaça, Temperatura da Camada de Fumaça, Incêndio, Evacuação.

ABSTRACT

MEIRA, L. M. *Computational Simulation of Smoke Layer Height and Temperature*. Belo Horizonte, 2017 – Master's Thesis. Structural Engineering Department Program, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais.

The smoke control system occurs through clean air introduction systems in the environment through the air circulation and simultaneously by extracting/removing the smoke from the indoor to the outdoor environment so that the system prevents the smoke spreading.

The main objective of this work is the computational simulation of the height of the interface of the smoke layer - AICF and the average temperature of the smoke layer - TMCF, in environments in fire situation with different configurations of smoke control systems. For the development of the work, the FDS, CFAST and B-RISK programs were used. Among the studied systems were analyzed situations with air inlets and natural or mechanical smoke exits.

It is concluded that, in general, the results found with the FDS, CFAST and B-RISK programs were close to the experimental results and simulations of other authors, sometimes more conservative, at least. In cases where there are air inlets located in the smoke layer, the zone programs, CFAST and B-RISK, present a divergent result from that observed experimentally and therefore should not be used to analyze these situations. From the comparisons of the results of the simulations with the procedures found in the Technical Instructions, it is concluded that the procedures are very safe and changes are necessary to become more economical.

The simulations developed in this work can help to carry out analyzes, projects and experiments, evaluating more accurately the effect of the smoke in the evacuation time of the users and the temperature in the structure of the building.

Keywords: *Computational Simulation, Smoke Control, Smoke Layer Height, Smoke Layer Temperature, Fire, Evacuation.*

SUMÁRIO

| | | |
|--------|---|----|
| 1. | Introdução..... | 1 |
| 1.1 | Considerações Gerais | 1 |
| 1.2 | Objetivos..... | 3 |
| 1.3 | Justificativa..... | 4 |
| 1.4 | Organização..... | 4 |
| 2. | Revisão Bibliográfica..... | 6 |
| 2.1 | CBPMSP IT 15:2015 – Controle de Fumaça | 6 |
| 2.2 | Klote <i>et al.</i> (2012)..... | 13 |
| 2.3 | Bong (2011)..... | 20 |
| 2.4 | Zhou <i>et al.</i> (2010)..... | 22 |
| 2.5 | Kerber <i>et al.</i> (2007) | 23 |
| 2.6 | Yi <i>et al.</i> (2005)..... | 25 |
| 2.7 | Hou <i>et al.</i> (2001)..... | 26 |
| 2.8 | Beyler <i>et al.</i> (2001)..... | 27 |
| 2.9 | McGrattan <i>et al.</i> (1998) | 28 |
| 2.10 | Hinkley <i>et al.</i> (1992)..... | 30 |
| 2.11 | Programa FDS..... | 31 |
| 2.11.1 | Tamanho das células no FDS | 33 |
| 2.12 | Programa CFAST..... | 34 |
| 2.13 | Programa B-RISK..... | 35 |
| 2.14 | Calor de Combustão..... | 37 |
| 2.15 | Taxa de Calor Liberado (TCL) | 38 |
| 3. | Simulação da Altura e Temperatura da Camada de Fumaça | 40 |
| 3.1 | Simulação dos Experimentos realizados por Yi <i>et al.</i> (2005) | 40 |
| 3.1.1 | Modelagem e simulação dos experimentos..... | 41 |
| 3.1.2 | Resultados | 44 |
| 3.2 | Experimento <i>K-Office</i> (Bong, 2011) | 71 |
| 3.2.1 | Modelagem e simulação dos experimentos..... | 72 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 3.3 | Experimento Hagglund <i>et al.</i> (1985) por Bong (2011) | 80 |
| 3.3.1 | Modelagem e simulação dos experimentos..... | 81 |
| 3.4 | Simulações realizadas por Kerber <i>et al.</i> (2007)..... | 101 |
| 3.4.1 | Modelagem e simulação dos experimentos..... | 102 |
| 4. | Conclusões | 140 |
| 4.1 | Trabalhos Futuros | 145 |
| 5. | Referências Bibliográficas | 146 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 2-1: Acantonamento (CBPMSP IT 15-1:2015) | 7 |
| Figura 2-2: Zonas Mortas (CBPMSP IT 15-1:2015) | 7 |
| Figura 2-3: Diferencial de pressão (CBPMSP IT 15-1:2015)..... | 8 |
| Figura 2-4: Altura de referência H, altura livre de fumaça H^l e altura da zona enfumaçada H_f | 9 |
| Figura 2-5: Detalhe de barreira de fumaça - corte (CBPMSP IT 15-2:2015)..... | 9 |
| Figura 2-6: Interface da camada de fumaça (CBPMSP IT 15-2:2015)..... | 10 |
| Figura 2-7: Tolerância ao calor pelo corpo humano em repouso com baixa movimentação de ar. | 14 |
| Figura 2-8: Primeira indicação de fumaça. | 16 |
| Figura 2-9: Exaustão do ar fresco – Plugholing (Klote, 2014) | 19 |
| Figura 2-10: Calorímetro de cone | 39 |
| Figura 2-11: TCL de móveis estofados testados no NIST | 39 |
| Figura 3-1: Vista de fora USTC/PolyU Atrium – Edifício à direita. (Hou <i>et al.</i> , 2001) | 40 |
| Figura 3-2: Modelos: (a) Teste 1; (b) Teste 2; e (c) Teste 3, respectivamente | 41 |
| Figura 3-3: Altura da interface da camada de fumaça | 45 |
| Figura 3-4: Elevação da temperatura média da camada de fumaça | 45 |
| Figura 3-5: Altura da interface da camada de fumaça – TCL constante, medida das respectivas árvores de termopares, M1, M2, M3, M4, M5 e M6. | 46 |
| Figura 3-6: Elevação da temperatura média da camada de fumaça – TCL constante, medida das respectivas árvores de termopares, M1, M2, M3, M4, M5 e M6 | 46 |
| Figura 3-7: Altura da interface da camada de fumaça – TCL t^2 , medida das árvores de termopares, M1, M2, M3, M4, M5 e M6..... | 47 |

| | |
|---|----|
| Figura 3-8: Elevação da temperatura média da camada de fumaça – TCL t^2 , medida das árvores de termopares, M1, M2, M3, M4, M5 e M6 | 47 |
| Figura 3-9: A fumaça atinge o piso no medidor 6 aos 150 s. | 49 |
| Figura 3-10: Resultados obtidos por Yi <i>et al.</i> (2005) com o programa FDS | 51 |
| Figura 3-11: Resultados da AICF para o Teste 1 nos tempos de 50 s e 560 s, para este trabalho | 52 |
| Figura 3-12: Altura da interface da camada de fumaça | 53 |
| Figura 3-13: Elevação da temperatura média da camada de fumaça | 53 |
| Figura 3-14: Altura da interface da camada de fumaça – TCL constante, medida das árvores de termopares, M1, M2, M3, M4, M5 e M6 | 54 |
| Figura 3-15: Elevação da temperatura média da camada de fumaça – TCL constante, medida das árvores de termopares, M1, M2, M3, M4, M5 e M6 | 54 |
| Figura 3-16: Altura da interface da camada de fumaça – TCL t^2 , medida das árvores de termopares, M1, M2, M3, M4, M5 e M6..... | 55 |
| Figura 3-17: Elevação da temperatura média da camada de fumaça – TCL t^2 , medida das árvores de termopares, M1, M2, M3, M4, M5 e M6 | 55 |
| Figura 3-18: Velocidade da entrada de ar | 59 |
| Figura 3-19: FDS de Yi <i>et al.</i> (2005) | 60 |
| Figura 3-20: FDS deste trabalho para o Teste 2 – AICF nos tempos de 50 s e 620 s...61 | |
| Figura 3-21: Altura da interface da camada de fumaça | 62 |
| Figura 3-22: Elevação da temperatura média da camada de fumaça | 62 |
| Figura 3-23: Altura da interface da camada de fumaça – TCL constante..... | 63 |
| Figura 3-24: Elevação da temperatura média da camada de fumaça – TCL constante | 63 |
| Figura 3-25: Altura da interface da camada de fumaça – TCL t^2 | 64 |
| Figura 3-26: Elevação da temperatura média da camada de fumaça – TCL t^2 | 64 |
| Figura 3-27: Altura da interface da camada de fumaça | 67 |
| Figura 3-28: Elevação da temperatura média da camada de fumaça | 67 |

| | |
|---|----|
| Figura 3-29: Teste 3 –AICF nos tempos 50 s e 590 s. | 68 |
| Figura 3-30: Ambiente K-Office..... | 72 |
| Figura 3-31: Altura da interface da camada de fumaça | 74 |
| Figura 3-32: Elevação da temperatura média da camada de fumaça | 74 |
| Figura 3-33: Elevação da temperatura média da camada de fumaça nos medidores.... | 75 |
| Figura 3-34: Temperatura interna aos 60 s. | 76 |
| Figura 3-35: AICF de 2,5 m aos 90 s. | 77 |
| Figura 3-36: Densidade da fumaça aos a) 15 s, b) 60 s e c) 185 s. | 77 |
| Figura 3-37: Altura da interface da camada de fumaça | 78 |
| Figura 3-38: Elevação da temperatura média da camada de fumaça | 79 |
| Figura 3-39: Compartimento Hagglund. | 81 |
| Figura 3-40: T2, à esquerda imagens extraídas de Bong (2011) e, à direita imagens deste trabalho, extraídas do Smokeview, para os tempos: a) 40 s; b) 150 s. | 83 |
| Figura 3-41: Altura da interface da camada de fumaça | 84 |
| Figura 3-42: Elevação da temperatura média da camada de fumaça | 85 |
| Figura 3-43: Elevação da temperatura média da camada de fumaça nos medidores.... | 85 |
| Figura 3-44: Altura da interface da camada de fumaça | 87 |
| Figura 3-45: Elevação da temperatura média da camada de fumaça | 87 |
| Figura 3-46: T5, à esquerda imagem extraída de Bong (2011) e, à direita imagem deste trabalho extraída do Smokeview, para os tempos: a) 40 s; b) 300 s. | 88 |
| Figura 3-47: Altura da interface da camada de fumaça | 89 |
| Figura 3-48: Elevação da temperatura média da camada de fumaça | 89 |
| Figura 3-49: Elevação da temperatura média da camada de fumaça nos medidores.... | 90 |
| Figura 3-50: Altura da interface da camada de fumaça | 92 |
| Figura 3-51: Elevação da temperatura média da camada de fumaça. | 92 |

| | |
|---|-----|
| Figura 3-52: T5, à esquerda imagem extraída de Bong (2011) e, à direita imagem deste trabalho extraída do Smokeview, para os tempos: a) 40 s; b) 80 s..... | 93 |
| Figura 3-53: Altura da interface da camada de fumaça | 94 |
| Figura 3-54: Elevação da temperatura média da camada de fumaça | 94 |
| Figura 3-55: Elevação da temperatura média da camada de fumaça nos medidores.... | 95 |
| Figura 3-56: Altura da interface da camada de fumaça | 97 |
| Figura 3-57: Elevação da temperatura média da camada de fumaça | 98 |
| Figura 3-58: T2, velocidade da saída de fumaça aos 70 s..... | 99 |
| Figura 3-59: T5, maior velocidade da entrada de ar, no tempo de 70 s..... | 100 |
| Figura 3-60: T7, maior velocidade da entrada de ar, no tempo de 80 s..... | 100 |
| Figura 3-61: Imagens do Cenário 1 (sem aberturas) e Cenário 2 (com entradas de ar mecânicas simétricas junto ao piso e aberturas no teto) | 101 |
| Figura 3-62: Imagens dos cenários: (a) Cenário 3; (b) Cenário 4; e (c) Cenário 5..... | 102 |
| Figura 3-63: Taxa de Calor Liberado para os Cenários de 1 a 5, simétricos. | 104 |
| Figura 3-64: Cenário 1, à esquerda imagem extraída do Smokeview, e à direita, imagem do trabalho de Kerber <i>et al.</i> (2007) para os tempos: a) 150s; b) 300s; c) 600 s. | 106 |
| Figura 3-65: TCL máximo. | 108 |
| Figura 3-66: Altura da interface da camada de fumaça | 108 |
| Figura 3-67: Elevação da temperatura média da camada de fumaça | 109 |
| Figura 3-68: Medidores, Cenário 1 | 109 |
| Figura 3-69: Altura da interface da camada de fumaça | 111 |
| Figura 3-70: Elevação da temperatura média da camada de fumaça | 112 |
| Figura 3-71: Cenário 2, imagem de comparação, à esquerda imagem extraída do Smokeview, e a direita imagem do trabalho de Kerber <i>et al.</i> (2007) para os tempos: a) 150s; b) 300s; c) 600s..... | 113 |
| Figura 3-72: TCL máximo. | 115 |
| Figura 3-73: Altura da interface da camada de fumaça | 116 |

| | |
|---|-----|
| Figura 3-74: Elevação da temperatura média da camada de fumaça | 116 |
| Figura 3-75: Medidores, Cenário 2 | 117 |
| Figura 3-76: Cenário 3, à esquerda imagem extraída do Smokeview, e a direita imagem do trabalho de Kerber <i>et al.</i> (2007) para os tempos: a) 150s; b) 300s; c) 600s. | 118 |
| Figura 3-77: TCL máximo. | 120 |
| Figura 3-78: Altura da interface da camada de fumaça | 121 |
| Figura 3-79: Elevação da temperatura média da camada de fumaça | 121 |
| Figura 3-80: Medidores, Cenário 3. | 122 |
| Figura 3-81: Cenário 4, à esquerda imagem extraída do Smokeview, e a direita imagem do trabalho de Kerber <i>et al.</i> (2007) para os tempos: a) 150s; b) 300s; c) 600s. | 123 |
| Figura 3-82: TCL máximo. | 125 |
| Figura 3-83: Altura da interface da camada de fumaça | 126 |
| Figura 3-84: Elevação da temperatura média da camada de fumaça | 126 |
| Figura 3-85: Medidores, Cenário 4. | 127 |
| Figura 3-86: Cenário 5, imagem de comparação, à esquerda imagem extraída do Smokeview, e a direita imagem do trabalho de Kerber <i>et al.</i> (2007) para os tempos: a) 150 s; b) 300 s; c) 600 s. | 128 |
| Figura 3-87: TCL máximo, Cenário 5..... | 130 |
| Figura 3-88: Altura da interface da camada de fumaça | 131 |
| Figura 3-89: Elevação da temperatura média da camada de fumaça | 131 |
| Figura 3-90: Medidores, Cenário 5. | 132 |
| Figura 3-91: Tabela 1 – sistemas de introdução e extração de fumaça. IT 15:2015... | 136 |
| Figura 3-92: Velocidade da entrada de ar e saída de fumaça dos Cenários de 2 a 5. . | 137 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-----|
| Tabela 2-1: Resumo das programações do modo de usuário | 36 |
| Tabela 2-2: Calor de combustão de alguns materiais..... | 37 |
| Tabela 3-1: Dados de cada teste..... | 42 |
| Tabela 3-2: Tamanho das células em cada teste | 42 |
| Tabela 3-3: Cálculo de tamanho de célula | 44 |
| Tabela 3-4: Cálculo de tamanho de célula | 73 |
| Tabela 3-5: Cálculo de tamanho de célula | 82 |
| Tabela 3-6: Configuração geométrica dos dutos de ventilação e aberturas | 102 |
| Tabela 3-7: Tamanho das células..... | 103 |
| Tabela 3-8: Cálculo de tamanho de célula | 105 |
| Tabela 3-9: AICF mínima para os cenários de 2 a 5..... | 135 |

1

INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Gerais

Conforme o *Handbook of Smoke Control Engineering* a fumaça geralmente é conhecida como a maior causadora de mortes em incêndios. O controle de fumaça em espaços de grande volume é baseado em uma longa história de experiências e pesquisas iniciadas em 1881 no incêndio ocorrido no *Ring Theater* em Viena, Áustria, que matou 449 pessoas. Já haviam ocorrido grandes incêndios em teatros, porém, desta vez a Sociedade de Engenheiros Austríacos realizou ensaios em escala reduzida que mostraram como as aberturas no telhado acima do palco poderiam proteger o público da fumaça. Como resultado, muitos teatros instalaram tais aberturas. Somente em 1911, no *Palace Theater* em Edimburgo, Escócia, que estas aberturas no telhado funcionaram como pretendido.

Na década de 1950 ocorreram alguns incêndios de grandes proporções que devastaram renomadas fábricas de automóveis, como por exemplo, a fábrica da General Motors em Michigan nos EUA, em 1953, e a Automóveis Jaguar em Coventry, Inglaterra, em 1957. Em ambos os casos, constatou-se a importância de sistemas de controle de fumaça em construções industriais. A partir de então pesquisas foram publicadas e serviram de base tanto para projetos de sistemas de controle de fumaça quanto para estudos e pesquisas posteriores. Inicialmente, a principal motivação para instalação de sistemas de controle de fumaça em edificações industriais foi a de proteger a edificação e evitar assim seu colapso. Essa proteção assegurava o acesso dos bombeiros ao foco do fogo de modo a extingui-lo. A segurança da edificação permitia ainda a posterior manutenção da produção e a continuidade dos serviços e produção. Também devido a tais benefícios causados pelo sistema de controle de fumaça surgiram leis que exigiam um nível mínimo de segurança e controle de fumaça, definindo uma determinada área de abertura proporcional à área de piso.

O sistema de controle de fumaça é composto por meios de introdução de ar puro no ambiente sinistrado e simultaneamente pela extração da fumaça para o exterior, de modo que se evite que a fumaça preencha todo o ambiente e que se espalhe para os espaços não sinistrados.

Atualmente, as normas e instruções técnicas que tratam do controle de fumaça não estão voltadas à proteção das estruturas das edificações; visam principalmente a manutenção de um ambiente seguro durante o tempo necessário para desocupação do ambiente onde ocorre o incêndio, para evitar os perigos de intoxicação e a falta de visibilidade causada pela fumaça.

No Brasil, lamentavelmente, o tema em questão passou a ser mais relevante após a grande tragédia ocorrida em 2013 na Boate Kiss em Santa Maria, RS, que estava com superlotação. Os materiais de revestimento não eram apropriados. Havia uma única porta de acesso e mal sinalizada, o que levou ao tumulto no interior da boate. A fumaça ao se propagar rapidamente impossibilitou a visibilidade, causou pânico e asfixiou os usuários, levando-os a óbito.

Segundo Vale (2015) a ABRAVA (Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento) em parceria com a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) criaram uma comissão de estudos para o desenvolvimento de uma norma brasileira para o Controle de Fumaça em Edificações, que será embasada nas normas NFPA 92, BS EN 12101, BS 7346 e na Instrução Técnica 15 de 2015 do Corpo de Bombeiros do Estado de São Paulo (CBPMSP IT 15:2015). Até o momento alguns conceitos e pontos relevantes foram definidos como padronização de procedimentos técnicos, capacitação de profissionais, certificação de produtos, processos e empresas, testes do sistema instalado e outros.

Recentemente foi publicada a Instrução Técnica 41 de 2017 - Controle de Fumaça, do Corpo de Bombeiros Militar de Minas Gerais (CBMMG IT 41:2017). Tal IT foi baseada na CBPMSP IT 15:2015. Devido ao andamento deste trabalho não foi possível adequar ou comparar os resultados obtidos nas simulações realizadas, neste trabalho, com os parâmetros da IT 41.

Uma informação importante, e que demonstra a preocupação cada vez maior da sociedade brasileira em relação à segurança contra incêndio, é a entrada em vigência, em março de 2017, da Lei 13.425 que estabelece diretrizes gerais e ações complementares de prevenção de incêndios em estabelecimentos, edificações e áreas voltadas ao público. A nova lei também altera a Lei 8.078 de 11 de setembro de 1990 que determina sobre a proteção do consumidor e altera também a Lei 10.406 de janeiro de 2002 – Código Civil.

O artigo 8º da Lei 13.425 determina que cursos de graduação em Engenharia, Arquitetura, cursos de tecnologia e de ensino médio relacionados, de instituições de ensino privadas ou públicas deverão incluir, nas disciplinas ministradas, conteúdo relativo à prevenção e combate a incêndios. Determina também um curso específico e obrigatório para os oficiais e praças integrantes dos setores de fiscalização e técnicos dos Corpos de Bombeiros Militares, de acordo com seus postos e cargos. O artigo 10º da lei estabelece que o poder público municipal e o Corpo de Bombeiros Militar devem manter disponíveis, na rede mundial de computadores, informações na íntegra sobre alvarás, licenças, autorizações ou outro documento equivalente, concessão de laudos e similares a estabelecimentos, edificações e áreas de público, sejam de atividades permanentes ou temporárias.

1.2 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é a simulação computacional da altura da interface da camada de fumaça – AICF e a temperatura média da camada de fumaça – TMCF, em ambientes em situação de incêndio com diferentes configurações de sistemas de controle de fumaça.

Para alcançar o objetivo deste trabalho, as seguintes etapas foram desenvolvidas:

- revisão bibliográfica sobre a CBPMSP IT 15:2015 e seus principais parâmetros de projeto de controle de fumaça; estudo dos experimentos e simulações realizadas na área de controle de fumaça encontrados na literatura;
- estudo dos programas FDS (McGrattan *et al.*, 2015), CFAST (Peacock *et al.*, 2015) e B-RISK (Wade *et al.*, 2013) e comparação com resultados de experimentos e simulações encontrados na literatura;

- desenvolvimento das simulações para determinar a AICF e a TMCF. Entre os sistemas estudados foram analisadas situações com entradas de ar natural ou mecânica e saídas de fumaça natural ou mecânica dispostas de acordo com os trabalhos disponíveis na literatura;
- comparação dos resultados dos programas FDS, CFAST e B-RISK, identificando as suas características, vantagens e desvantagens, além das suas capacidades em analisar as situações tratadas neste trabalho;
- comparação dos resultados das simulações com os procedimentos da CBPMSP IT 15:2015 e os resultados das equações de Klote *et al.* (2012);
- análise dos resultados para apresentação das conclusões identificando também os trabalhos que poderão ser desenvolvidos futuramente.

1.3 Justificativa

No Brasil ainda não há pesquisas sobre o controle de fumaça e, até o momento, não há uma norma que defina os parâmetros a serem adotados em projetos de controle de fumaça e uma padronização dos procedimentos e materiais. Existe apenas a Instrução Técnica N° 15/2015 do Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo (CBPMSP IT 15:2015), citada anteriormente, que fornece procedimentos para a implantação do sistema de controle de fumaça de forma a atender a um decreto estadual. Somente recentemente foi publicada a Instrução Técnica 41 de 2017 - Controle de Fumaça, do Corpo de Bombeiros Militar de Minas Gerais (CBMMG IT 41:2017).

Atualmente as normas visam a manutenção de um ambiente seguro durante um tempo mínimo necessário à desocupação durante um incêndio. O uso dos programas citados anteriormente (FDS, CFAST e B-RISK), poderá auxiliar na realização de experimentos e assim, avaliar com maior precisão o efeito da temperatura nas estruturas das edificações e da fumaça no tempo de evacuação dos usuários.

1.4 Organização

O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre a CBPMSP IT 15:2015 e seus principais parâmetros de projeto de controle de fumaça; estudo dos experimentos e simulações realizadas na área de controle de fumaça encontrados na literatura; descrição

dos programas utilizados FDS, CFAST e B-RISK para análise de controle de fumaça e apresenta as principais equações determinadas pela IT e por Klote *et al.* (2012).

O Capítulo 3 apresenta o desenvolvimento do trabalho com os resultados apresentados por vários autores, junto com os resultados das simulações realizadas neste trabalho com o uso dos programas FDS, CFAST e B-RISK, para os diferentes cenários, destacando sempre as AICF e TMCF encontradas e conclusões gerais para cada simulação realizada.

O Capítulo 4 resume de forma breve os resultados relativos ao principal objetivo deste trabalho, concluindo que o mesmo foi alcançado. Apresenta também as principais conclusões sobre as comparações entre os resultados dos autores e os resultados obtidos neste trabalho apresentados detalhadamente no Capítulo 3. Por fim, conclui-se com a necessidade de mais estudos e ensaios sobre o tema “Controle de Fumaça” no Brasil.

Na sequência tem-se as referências bibliográficas.

2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CBPMSP IT 15:2015 – Controle de Fumaça

A Instrução Técnica N° 15:2015 do Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo (CBPMSP IT 15:2015) tem como objetivo fornecer procedimentos adequados para a implementação de sistemas de controle de fumaça. Tal IT aborda o controle de fumaça em átrios, malls, subsolos, espaços amplos e rotas horizontais, com o objetivo de manter seguro o ambiente sinistrado durante o tempo necessário para sua desocupação, e evitar a intoxicação dos usuários e perda de visibilidade das rotas de fuga causada pela fumaça. Também prevê o controle e até mesmo a redução dos gases quentes tanto na área sinistrada quanto em áreas adjacentes, a fim de diminuir a temperatura interna e limitar o incêndio. E ainda, antecipar as condições da área sinistrada e seu entorno, que auxiliarão as operações de resgate de pessoas e o controle do incêndio.

A extração da fumaça de dentro da edificação deve ser feita de forma mecânica ou natural, desde que promova a retirada dos gases e da fumaça do local de origem do incêndio e que permita o acesso dos bombeiros para realizar o controle das chamas, e ainda, que impeça a migração da fumaça para os demais ambientes não sinistrados. Algumas importantes condições devem ser respeitadas, tais como a compartimentação ou acantonamento da área, o que resulta em divisão do volume de fumaça (Figura 2-1); a extração correta da fumaça de forma que não se crie zonas onde a fumaça possa ficar acumulada quando o sistema de extração da fumaça já estiver em funcionamento (Figura 2-2); e a criação de um diferencial de pressão através de controle de aberturas para extração da fumaça nas áreas sinistradas, simultaneamente ao fechamento de aberturas das áreas adjacentes (Figura 2-3). O funcionamento do sistema deve ocorrer de forma que a área sinistrada seja colocada em pressão menor em relação às demais áreas.

Deve-se prever no projeto de execução do sistema de controle de fumaça o funcionamento do sistema a partir do início do incêndio ou, segundo a projeção da camada de fumaça em determinada altura de forma a se evitar situações de perigo e até mesmo a explosão ambiental “backdraft” (é quando ocorre uma explosão repentina decorrente da entrada de ar em um ambiente pouco ventilado e com grande concentração de gases aquecidos) ou, a propagação do incêndio decorrente do aumento da temperatura do local incendiado.

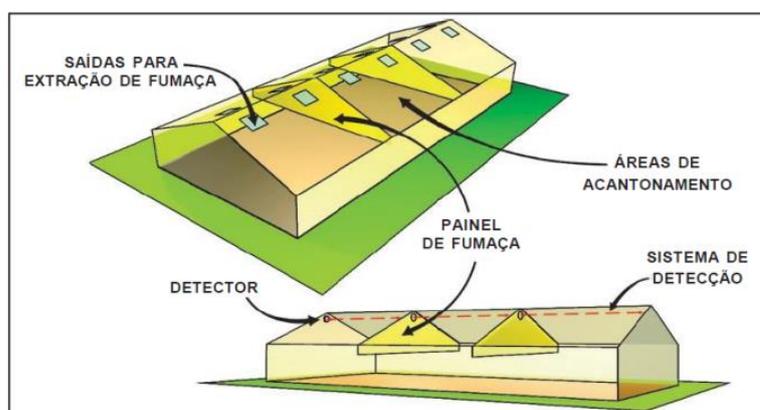


Figura 2-1: Acantonamento (CBPMSP IT 15-1:2015)



Figura 2-2: Zonas Mortas (CBPMSP IT 15-1:2015)

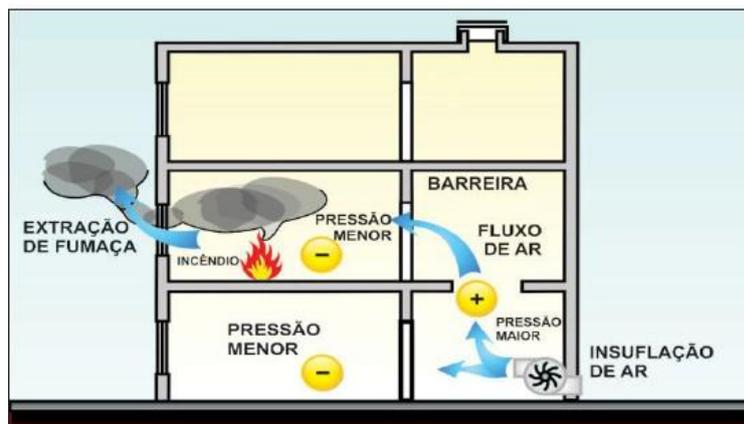


Figura 2-3: Diferencial de pressão (CBPMSP IT 15-1:2015)

Consta na IT a “Tabela 2” que indica por ocupação quais as partes de uma edificação devem dispor de controle de fumaça. De forma geral, em edificações com altura superior a 60 metros é exigida a instalação de sistemas de controle de fumaça para resguardar os acessos às rotas de fuga. Também, de maneira geral, deve haver controle de fumaça no subsolo das edificações com ocupação distinta de estacionamento, nos átrios e em edificações sem janelas. Os parâmetros a serem seguidos para o controle de fumaça de cada local da edificação a proteger, de acordo com o uso, são definidos nas partes 1 a 8 da CBPMSP IT 15:2015.

A CBPMSP IT 15-2:2015 aborda conceitos, definições e componentes do sistema tais como: **Acantonamento** (volume livre entre o chão e o teto, definido por painéis de fumaça); **Altura da zona enfumaçada – H_f** (altura entre o nível inferior da camada de fumaça e o ponto mais elevado do teto – Figura 2-4); **Altura de referência – H** (é a média aritmética das alturas da região mais alta e da região mais baixa do teto ou do forro, e é medida a partir da face superior do piso – Figura 2-4); **Altura da zona livre de fumaça – H^l** (medida entre o piso e a face inferior da camada de fumaça – Figura 2-4); **Átrio** (extenso espaço criado entre um pavimento aberto e os demais pavimentos cobertos, com ou sem fechamento de cobertura); **Barreiras de fumaça** (componente vertical de separação criado no teto, com altura mínima e com características de resistência ao fogo e de prevenção da propagação horizontal da fumaça – Figura 2-5); **Camada de fumaça “*smoke layer*”** (espessura condensada de fumaça por uma barreira); **Fumaça** (fragmentos de ar resultante de material que tenha sido submetido à pirólise ou combustão e transportados na forma líquida, gasosa e sólida); **Interface da camada de fumaça “*smoke layer interface*”** (é o

limite conceitual entre a camada de fumaça e a zona de transição onde a fumaça se desenvolve, Figura 2-6); **Jato de fumaça sob o teto “Ceiling Jet”** (chamada apenas de jato neste trabalho), (fluxo de fumaça horizontal que se estende radialmente do local de choque da coluna de fumaça contra o teto; normalmente a temperatura da fumaça é maior sob o teto do que a da camada de fumaça nas adjacências); **Sistema de corta-controla de fumaça** (conjunto de equipamentos capazes de restringir e limitar a fumaça e os gases quentes).

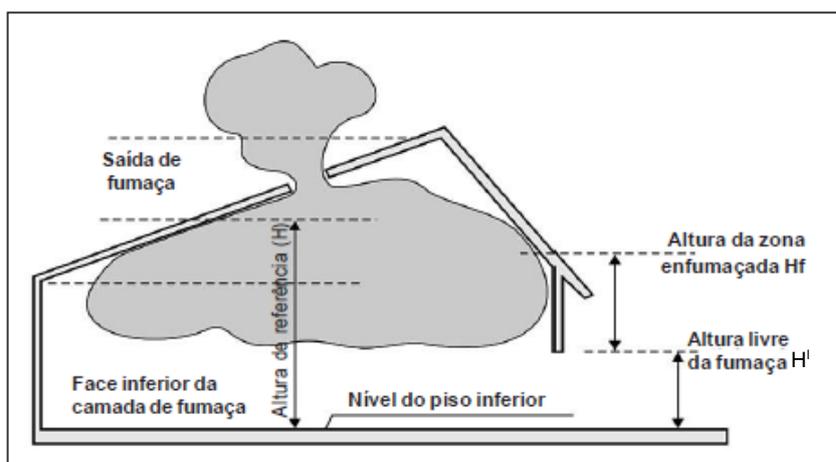


Figura 2-4: Altura de referência H , altura livre de fumaça H^1 e altura da zona enfumaçada H_f (CBPMSP IT 15-2:2015).

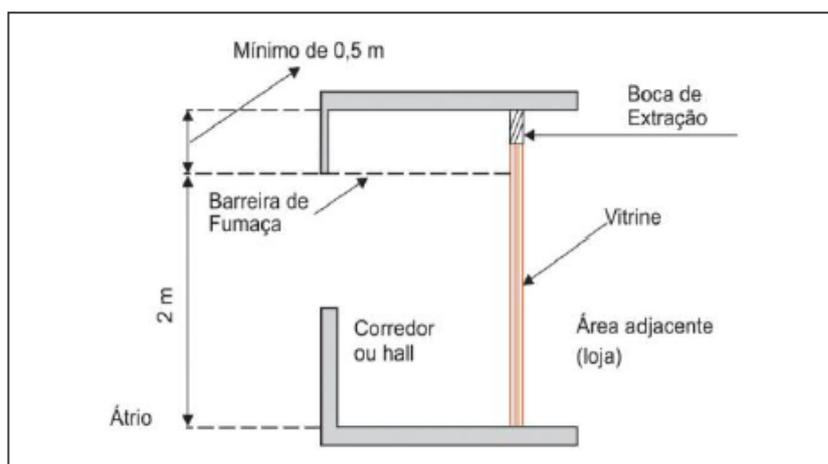


Figura 2-5: Detalhe de barreira de fumaça - corte (CBPMSP IT 15-2:2015).

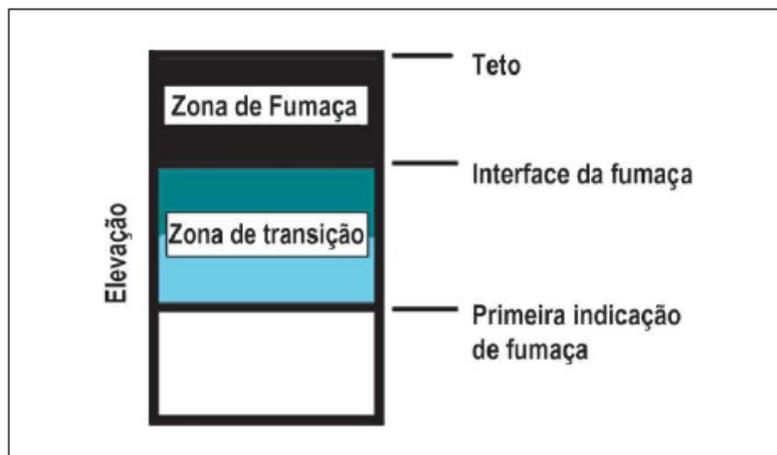


Figura 2-6: Interface da camada de fumaça (CBPMSP IT 15-2:2015).

Dentre os componentes do sistema de controle de fumaça a IT aborda itens como: **sistema de extração natural** (entradas de ar que podem ser feitas através de aberturas nas fachadas, portas, acantonamentos, vãos de escadas abertas e aberturas de ar por insuflação mecânica; grelhas ou venezianas, e também de extração de fumaça através de exaustores naturais; aberturas ou vãos de extração, janelas e venezianas, grelhas ligadas a dutos, claraboia ou alçapão, dutos, registros corta fogo e fumaça e mecanismos elétricos, mecânicos e pneumáticos); **sistema de extração mecânica** (entradas de ar que podem ocorrer através de aberturas ou vão de entrada, portas, vãos de escadas abertas, abertura de ar por insuflação mecânica através de grelhas, escadas pressurizadas e extração de fumaça por intermédio de grelhas de extração, dutos e peças especiais, registro corta fogo e fumaça, ventiladores de extração mecânica, mecanismos pneumáticos, elétricos e mecânicos de acionamentos dos dispositivos).

Outros sistemas de extração natural e mecânica podem ser incorporados ao sistema de controle de fumaça como o sistema de detecção automática de fumaça e calor, fonte de alimentação, quadros e comandos elétricos, acionadores automáticos e mecânicos dos dispositivos de extração de fumaça e sistema de supervisão e acionamento.

A CBPMSP IT 15-5:2015 apresenta e exemplifica o uso de cinco equações (mostradas a seguir) para cálculo de altura da camada de fumaça (Equação 2-1), altura das chamas (Equação 2-2), massa de fumaça gerada (equações 2-3 e 2-4) e volume de fumaça produzida (Equação 2-5).

A CBPMSP IT 15-8:2015, discute os aspectos de segurança do projeto de sistema de controle de fumaça. Todo o sistema deve ser submetido a testes para simulação de falhas e

investigações para se determinar os impactos dos erros de projeto, de operações indevidas, ou parciais do sistema ou de seus componentes. Devem-se prever as consequências da falha de operação de um determinado componente, e o grau de probabilidade de que elas ocorram durante a operação do sistema, pois a falha de um componente pode causar a reversão do fluxo de fumaça e a queda da camada de fumaça, por exemplo. Assim sendo, é necessária uma análise da confiabilidade do sistema de controle de fumaça, bem como manutenção constante e testes periódicos de todos os equipamentos do sistema como acionamento, ventiladores e obturadores. Os testes periódicos devem verificar e assegurar que o sistema de controle de fumaça continue a operar de acordo com o projeto aprovado.

A altura da camada de fumaça é dada por:

$$\frac{z}{H} = 1,11 - 0,28 \ln \left[\left(\frac{tQ^{1/3}}{H^{4/3}} \right) / \left(\frac{A}{H^2} \right) \right] \quad (2-1)$$

onde:

z = altura da interface da camada de fumaça acima do piso - AICF (m);

H = altura do teto acima da base do fogo (normalmente igual a altura do compartimento) (m);

t = tempo (segundos);

Q = taxa de liberação de calor de fogo estável (kW);

A = área do acantonamento (m²).

A Equação (2-1) é apropriada para A/H com valores de 0,9 a 14 e para valores de z maiores ou iguais a 20% de H , ou seja, $z/H \geq 0,2$.

A altura das chamas (limite de elevação das chamas) é dada por:

$$z_l = 0,166 Q_C^{2/5} \quad (2-2)$$

onde:

z_l = limite de elevação das chamas (m);

Q_C = porção convectiva da taxa de liberação de calor (kW).

A massa de fumaça gerada, para $z > z_l$, é dada por:

$$m = 0,071Q_C^{1/3}z^{5/3} + 0,0018Q_C \quad (2-3)$$

onde:

m = vazão mássica da coluna de fumaça para a altura z (kg/s);

z = altura da interface da camada de fumaça acima do piso;

Q_C = porção convectiva da taxa de liberação de calor, estimada em 70% da taxa de liberação de calor Q (kW).

Para $z \leq z_l$, a massa de fumaça gerada é dada por:

$$m = 0,032Q_C^{3/5}z \quad (2-4)$$

onde:

m = vazão mássica da coluna de fumaça para a altura z (kg/s);

z = altura da interface da camada de fumaça acima do piso;

Q_C = porção convectiva da taxa de liberação de calor estimada em 70% da taxa de calor liberado Q (kW).

Observa-se que Equação 2-4 difere da equação apresentada pela IT que tem o coeficiente 0,032 tomado igual a 0,0208, que foi considerado um erro de digitação, corrigido neste trabalho. O valor de 0,032 é observado no manual de Klote *et al.* (2012).

O volume de fumaça produzido é dado por:

$$V = \frac{m}{\rho} \quad (2-5)$$

onde:

V = volume produzido pela fumaça (m^3/s);

m = vazão mássica da coluna de fumaça para a altura z (kg/s);

ρ = densidade da fumaça em kg/m^3 , de acordo com a temperatura adotada.

A IT considera a temperatura da camada de fumaça igual a $70\text{ }^\circ\text{C}$ e a densidade da camada de fumaça igual a $0,92\text{ kg}/\text{m}^3$ para casos em que a edificação for protegida por chuveiros automáticos e, uma temperatura de $300\text{ }^\circ\text{C}$ e densidade de $0,55\text{ kg}/\text{m}^3$ para os casos onde a edificação não tiver proteção por chuveiros automáticos.

2.2 Klote *et al.* (2012)

O *Handbook of Smoke Control Engineering* (Klote *et al.*, 2012) é um manual de engenharia de controle de fumaça da sociedade ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*), voltada para o bem-estar humano no ambiente construído.

Segundo o capítulo 6 do *Handbook*, o efeito da exposição a um gás está diretamente relacionado com a concentração do gás e ao tempo de exposição a ele. Esta relação, concentração *versus* tempo, é conhecida como regra de *Haber*. Apesar de esta regra não ser válida para todos os tipos de gases, a concentração de gás e o tempo de exposição são fatores importantes. O efeito da exposição ao calor também depende do tempo de duração da exposição.

Klote *et al.* (2012) apresentam um gráfico de tolerância ao calor pelo corpo humano nu, em repouso, com baixa movimentação de ar. A Figura 2-7, extraída do trabalho desses autores apresenta de modo geral as temperaturas que causam queimaduras na pele e insolação (hipertermia). Um indivíduo exposto a temperaturas acima de $121\text{ }^\circ\text{C}$, pode sofrer queimaduras na pele e, em temperaturas inferiores a $121\text{ }^\circ\text{C}$ pode sofrer insolação. No entanto, se o indivíduo estiver usando roupas, as mesmas podem inibir o processo de resfriamento natural por transpiração, o que por outro lado, proporciona isolamento podendo proteger a pele de queimaduras. As curvas apresentadas na Figura 2-7 indicam que quanto maior o tempo de exposição ao calor, mais o corpo perde água para o ambiente e, com o aumento da temperatura o indivíduo fica suscetível a sofrer insolação ou

queimaduras na pele. Klote *et al.* (2012) sugerem o uso da curva de ar úmido para aplicações em sistemas de controle de fumaça com duração de funcionamento de 20 minutos. Para controle de fumaça a curva indica que a temperatura máxima que o corpo humano suporta é de 70 °C dentro dos 20 minutos sugeridos.

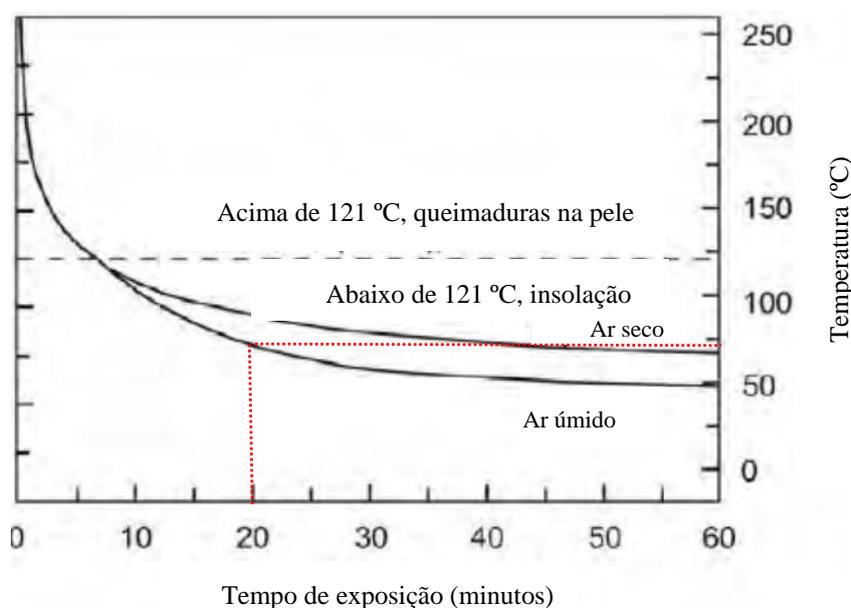


Figura 2-7: Tolerância ao calor pelo corpo humano em repouso com baixa movimentação de ar.

Além da ventilação natural da fumaça, atualmente existem uma série de abordagens de projeto para lidar com a fumaça em espaços de grande volume: espaço de pelo menos dois andares de altura, como um átrio, uma arena de esportes ou um hangar de avião. O termo átrio é usado num sentido genérico para designar qualquer espaço de grande volume. De modo geral, é indispensável uma análise da edificação de forma a incluir nos projetos de segurança contra incêndio tanto as áreas onde possam ocorrer os incêndios, como também dos espaços de comunicação e vias por onde possa haver a propagação da fumaça e do fogo.

O preenchimento natural de fumaça consiste em permitir que a fumaça preencha o átrio sem qualquer exaustão ou outro tipo de remoção de fumaça. Para alguns espaços, o tempo de preenchimento de fumaça é mais do que suficiente para a evacuação. O tempo de preenchimento de fumaça é o tempo desde a ignição até o instante em que a fumaça diminui a uma altura predeterminada. É importante que os cálculos do tempo de evacuação incluam

os tempos necessários para o reconhecimento, validação e procedimentos de pré-deslocamentos.

Os procedimentos de pré-deslocamentos são definidos como uma quantidade de tempo necessária antes do início da evacuação da edificação, ou, devido a práticas que vão desde a validação e definição do incêndio, tentativas para suprimir o fogo, até a preparação para reunir os familiares, pertences e outros objetos para a evacuação do edifício. Este tempo de pré-deslocamento pode ser de minutos a uma hora ou mais, se necessário.

Klote *et al.* (2012) citam algumas abordagens de projeto utilizadas para o controle de fumaça em um átrio:

- **Exaustão de fumaça constante (estacionário, ou estável):** é mais comumente utilizada na América do Norte. Este sistema é constituído por saídas de fumaça dimensionadas para manter, constantemente, a parte inferior da camada de fumaça na altura predeterminada pelo projeto de incêndio.
- **Exaustão de fumaça instável (transiente):** neste sistema a taxa de exaustão de fumaça é inferior à sua geração, de tal modo que ocorre a redução da velocidade de descida da interface permitindo um tempo adequado à evacuação. Para o uso deste sistema é necessário manter, durante o tempo de evacuação, pelo menos a altura da camada de fumaça predeterminada pelo projeto.
- **Ventilação natural constante (estacionário ou estável):** na Austrália, Nova Zelândia e Japão, ao invés de usarem exaustores, utilizam-se aberturas naturais. A taxa de saída de fumaça, através das aberturas, deve manter a altura predeterminada por um tempo indefinido, ou seja, de maneira constante. Recomenda-se que os sistemas de ventilação natural estáveis devam ser analisados com o auxílio de um modelo de dinâmica de fluidos computacional (CFD).
- **Ventilação natural instável (transiente):** é a taxa de ventilação de fumaça, de forma que só diminui a taxa de descida da camada de fumaça durante um tempo, o que permite que ocupantes saiam com segurança do local. Este sistema precisa manter pelo menos a altura predeterminada para o tempo necessário de saída dos ocupantes de forma segura.

O sistema de controle de fumaça precisa ser ativado automaticamente para ser capaz de fornecer proteção aos ocupantes contra a fumaça de forma rápida; também precisa ter pleno funcionamento antes que se alcance as condições de projeto. É necessário considerar o tempo de detecção do incêndio e o tempo de ativação do sistema de controle de fumaça.

Um meio de iniciar e parar o sistema de controle de fumaça manualmente deve ser fornecido em um local acessível para o corpo de bombeiros. Estes controles manuais precisam ser capazes de substituir os controles automáticos.

Uma camada de ar quente pode se formar sob o teto de um átrio devido à radiação solar no teto. A temperatura de tal camada pode chegar a 50 °C, ou mais. Quando a temperatura média da camada de fumaça é menor do que a da camada de ar quente, uma camada estratificada de fumaça pode se formar sob a camada de ar quente, o que impede a fumaça de atingir os detectores de fumaça montados no teto. Tal fenômeno é conhecido por estratificação.

Além das equações, o preenchimento de fumaça pode ser analisado por meio de modelagem por zonas ou CFD. As equações são baseadas em plumas (coluna vertical de fumaça que se inicia na base do incêndio) de fumaça que não tocam as paredes, porque o contato com a parede reduz a entrada de ar, tornando as equações conservadoras. As equações a seguir são consideradas conservadoras porque estimam a altura da primeira indicação de fumaça, como mostra a Figura 2-8.

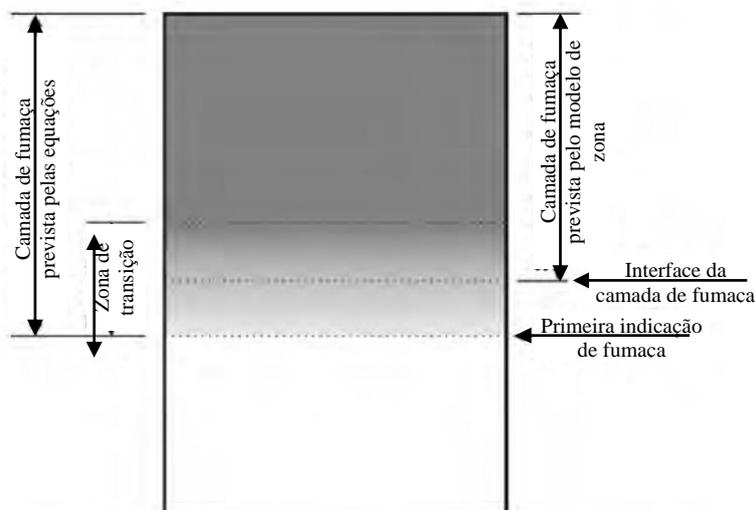


Figura 2-8: Primeira indicação de fumaça.

Para o **estado constante (estacionário) de preenchimento** de fumaça, a seguinte equação pode ser usada:

$$\frac{z}{H} = 1,11 - 0,28 \ln \left(\frac{t Q^{1/3} H^{-4/3}}{A/H^2} \right) \quad (2-6)$$

e, resolvendo-se para o tempo t , tem-se:

$$t = \left(\frac{A}{H^2} \right) \left(\frac{H^{4/3}}{Q^{1/3}} \right) e \left[\frac{1}{0,28} \left(1,11 - \frac{z}{H} \right) \right] \quad (2-7)$$

onde:

z = altura da interface da camada de fumaça acima da base do fogo (na maioria das vezes a base do fogo coincide com o piso) (m);

H = altura do teto acima da base do fogo (na maioria das vezes a base do fogo coincide com o piso) (m);

t = tempo (s);

Q = taxa de calor liberado estável (kW);

A = área do compartimento (m²);

t_g = tempo de crescimento, (s).

Observa-se que a Equação 2-6 é a mesma apresentada pelo CBPMSP IT 15 (Equação 2-1). As equações são apropriadas para A/H com valores de 0,9 a 14 e para valores de z maiores ou iguais a 20% de H . ($z/H \geq 0,2$).

Para $z \geq z_l$ a equação para determinar o fluxo de massa da pluma (ou coluna de fumaça) é:

$$m = 0,071 Q_C^{1/3} z^{5/3} + 0,0018 Q_C \quad (2-8)$$

Para $z < z_l$ a equação para determinar o fluxo de massa da pluma é:

$$m = 0,032 Q_C^{3/5} z \quad (2-9)$$

onde:

m = fluxo de massa na pluma (kg / s);

Q_C = taxa convectiva de liberação de calor (kW);

z = altura da interface da camada de fumaça acima da base do fogo (m);

z_l = altura das chamas, ou limite de elevação das chamas (m), dada também pela Equação 2-2.

A temperatura da camada de fumaça é calculada a partir de:

$$T_s = T_o + \frac{K_s Q_C}{m C_p} \quad (2-10)$$

onde:

T_s = temperatura da camada de fumaça -TMCF (°C);

T_o = temperatura ambiente (°C);

K_s = fração convectiva de TCL (taxa de calor liberado) contida na camada de fumaça, adimensional;

Q_C = taxa convectiva de liberação de calor (kW);

C_p = calor específico da pluma (1,0 kJ / kg °.C);

m = taxa de fluxo de massa da pluma, que entra na camada de fumaça, (kg / s).

Para o cálculo da vazão volumétrica de exaustão de fumaça, um valor de $K_s = 1,0$ deve ser usado, exceto quando outro valor de K_s é indicado por ensaios ou uma análise apropriada. Para os cálculos do efeito *plugholing*, um valor de $K_s = 0,5$ deve ser usado, exceto quando outro valor de K_s é indicado por ensaios ou uma análise apropriada.

Plugholing é a condição em que o ar debaixo da camada de fumaça é puxado através da camada de fumaça devido a uma taxa alta de escape, ou seja, o ar do interior da edificação é sugado junto com a fumaça para fora da edificação, como mostra a Figura 2-9. Quando o ar é sugado para fora da edificação, a quantidade de fumaça extraída diminui, com isso a

camada de fumaça desce mais do que o devido, tornando o ambiente interno perigoso para os usuários devido à exposição à fumaça. O número de aberturas de saída de fumaça deve ser escolhido de modo que a taxa de fluxo de saída não resulte em *plugholing*. Segundo Klote *et al.* (2012) a NFPA 92B tem equações que auxiliam a evitar tais falhas.

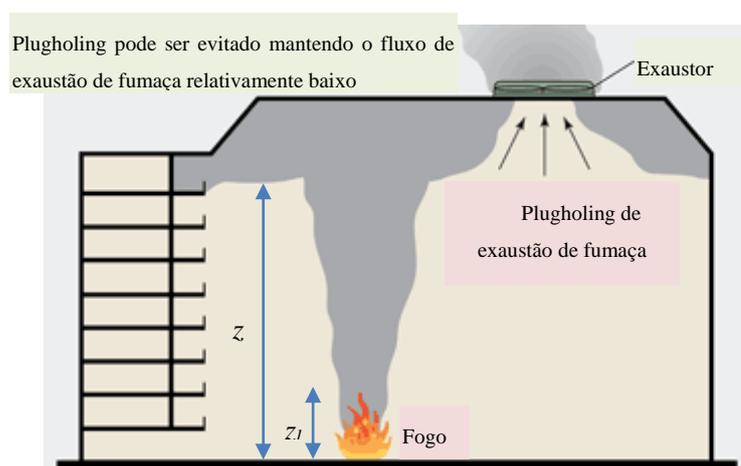


Figura 2-9: Exaustão do ar fresco – Plugholing (Klote, 2014)

Fonte: <http://hpac.com/fire-smoke/state-art-atrium-smoke-control>

A **densidade** da fumaça pode ser calculada a partir de:

$$\rho = \frac{\rho_{atm}}{R(T_s + 273)} \quad (2-11)$$

onde:

ρ = densidade da fumaça (kg/m^3);

ρ_{atm} = pressão atmosférica (Pa), normalmente tomada igual a 101300 Pa;

R = constante do gás igual a 287;

T_s = temperatura da fumaça ($^{\circ}\text{C}$).

A **taxa volumétrica de exaustão** de fumaça é determinada utilizando a densidade da fumaça para a temperatura da camada de fumaça, calculada por:

$$V = \frac{m}{\rho} \quad (2-12)$$

onde:

V = vazão volumétrica de exaustão de fumaça, (m^3/s);

m = taxa de massa fluxo de exaustão de fumaça, (kg/s);

ρ = densidade da fumaça, (kg/m^3).

2.3 Bong (2011)

Bong (2011) analisa o uso de um modelo de zonas (programa BRANZFIRE, antecessor do atual programa B-RISK) e um modelo CFD (programa FDS) para determinar quando a aproximação do modelo de zonas é válida e quando o modelo CFD pode ser necessário, tendo como objetivo fornecer orientação para os engenheiros de segurança contra incêndio, determinando qual dos métodos computacionais pode ser usado com segurança e de forma adequada como uma ferramenta de projeto.

Uma série de simulações computacionais com compartimentos de vários tamanhos e incêndios de várias proporções foi desenvolvida para comparar as capacidades e limitações dos dois métodos computacionais. A relação entre o tamanho do espaço enclausurado e a proporção do incêndio foi demonstrada de forma adimensional.

Bong (2011) utilizou o BRANZFIRE e o FDS para simular o desenvolvimento da fumaça. As simulações incluíram vários dados experimentais em escala real em espaços pequenos e grandes encontrados na literatura. Foram realizadas outras simulações em grandes espaços com uma série de proporções de incêndio para investigar diferentes variáveis que não foram examinadas em experimentos de grande escala. Os resultados das simulações foram comparados com base na altura da camada de fumaça, AICF, e na temperatura média da camada, TMCF.

Para compartimentos com incêndios instantâneos no estado estacionário, as previsões entre BRANZFIRE e FDS concordaram bem, quando a proporção do incêndio e o tamanho do compartimento estavam dentro de um intervalo. A partir da modelagem dos experimentos em grande escala, o FDS mostrou comparações de altura da interface da

camada de fumaça próximas dos testes experimentais em larga escala. No entanto, os resultados de saída do BRANZFIRE foram menos compatíveis com aqueles do FDS para as experiências onde há a propagação do fogo.

Segundo Bong (2011) os modelos de zona (B-RISK e CFAST) preveem a altura da camada de fumaça junto com a temperatura média da camada de fumaça (camada superior) e da camada livre de fumaça (camada inferior). No entanto, para realizar uma comparação compatível entre os dados de saída do modelo e os dados experimentais, é necessário que haja uma redução e uma conversão dos dados experimentais para um formato compatível com o dos dados de saída do modelo. Várias técnicas de redução de dados foram desenvolvidas, em outros trabalhos, para determinar a altura da camada de fumaça e a temperatura média a partir dos dados experimentais. Weaver *apud* Bong (2011) realizou um estudo de validação de várias técnicas de redução de dados e determinou que o método de Quintiere foi o mais bem-sucedido em prever com precisão a temperatura da camada superior de fumaça para um determinado ambiente.

Conforme o autor, em geral, os métodos de redução de dados e modelos de zona não devem ser utilizados se o incêndio for muito pequeno em relação ao tamanho do compartimento. Um aumento de temperatura relativamente baixo, no interior do espaço delimitado, apresentaria previsões inválidas da altura e da temperatura média da camada. Isso ocorre porque não há nenhuma indicação clara de uma separação entre as camadas de fumaça superior e inferior. Dados de um único ponto de concentrações de fumaça e temperaturas de modelos CFD devem ser considerados para todo o espaço ou no local especificado de interesse.

Dentre as principais conclusões o autor cita que:

- diferentes métodos de redução de dados apresentaram diferentes aproximações da altura da camada;
- o BRANZFIRE levou a estimativas conservadoras da altura da interface da camada de fumaça;
- a alteração da taxa de calor liberado (TCL) influenciou de maneira mais significativa na temperatura média da camada de fumaça do que na altura da camada de fumaça;
- um aumento pouco significativo na temperatura dentro de um espaço causaria dificuldades nos cálculos da camada de fumaça, devido à falta de indicação clara de uma separação entre as camadas superior e inferior ou temperaturas;

- a visualização da concentração de fumaça no programa Smokeview (Forney, 2013), programa que produz a animação da geometria criada, mostrou que a fumaça variou significativamente ao longo do espaço durante as fases iniciais de incêndio. A fumaça continuou a desenvolver e tornou-se praticamente distribuída em todo o espaço nas fases posteriores.

2.4 Zhou *et al.* (2010)

Zhou *et al.* (2010) abordam a influência de muitos parâmetros sobre a eficiência do controle de fumaça em átrios. Através de quatro simulações numéricas os autores obtiveram informações detalhadas de tais fatores. Apenas um caso envolveu sistema de extração mecânica de fumaça.

Os parâmetros da investigação incluíram o tempo de ativação do sistema de exaustão da fumaça, a capacidade do exaustor mecânico, a elevação das entradas de ar e a localização destas entradas. Os autores concluíram que todos esses parâmetros influenciam no sistema de controle de fumaça e que uma configuração mal planejada e mau utilizada pode levar a uma redução da eficiência do sistema. Foram feitas análises sobre a velocidade e a temperatura para mostrar as interações entre as chamas e o fluxo de ar. As eficiências dos controles de fumaça de vários projetos foram quantificadas e comparadas. Os autores concluíram também que, o tempo de ativação do exaustor tem pouco efeito na eficiência do sistema durante a fase permanente do controle da fumaça. No entanto, a ativação demorada resulta em uma descida da camada de fumaça, o que irá ocasionar condições inadequadas de visibilidade no átrio.

Zhou *et al.* (2010) concluem, também, que tanto a ventilação natural quanto o sistema de exaustão mecânica podem ser eficazes no controle de fumaça em um átrio. Um aumento da taxa de exaustão mecânica é o desejável, porém, ao mesmo tempo, a eficiência da exaustão mecânica cai devido à proporção de ar na fumaça, que também aumenta.

A eficiência da exaustão de fumaça é afetada pela elevação das alturas das entradas de ar. Deve-se evitar a aproximação da localização das entradas de ar dos focos de incêndio, o fluxo de ar pode causar uma perturbação na pluma e dispersar o jato pelo ambiente, e impedindo o bom funcionamento do sistema de exaustão. Entradas de ar em apenas um dos

lados (assimétricas) resultam em uma menor eficiência do sistema de exaustão. Geralmente a eficiência é maior com o aumento das áreas de entrada de ar e uma distribuição mais simétrica. As interações entre as chamas e as entradas de ar podem causar uma mudança na orientação das chamas e instabilidade na camada de fumaça. Deve-se fazer uma investigação mais aprofundada sobre o mecanismo de tais interações para auxiliar em um controle de fumaça mais eficiente.

Os autores concluem que tal pesquisa limitou-se a investigar os impactos do sistema de ativação, a taxa de fluxo de exaustão e os locais de entrada de ar sobre a eficiência do sistema de exaustão de fumaça e recomendam que os impactos de outros fatores sejam pesquisados e que mais comparações com resultados experimentais são necessárias para validar a eficiência do sistema de exaustão de fumaça, previsto pelo programa Fire Dynamics Simulator-FDS.

2.5 Kerber *et al.* (2007)

O trabalho de Kerber *et al.* (2007) apresenta os possíveis efeitos de vários arranjos de entradas e velocidades de ar em um sistema de controle de fumaça em um átrio. As variações incluem velocidades entre de 0,5 a 3,0 m/s. A disposição dos pontos de fornecimento de ar incluem entradas simétricas, localizadas no espaçamento inferior e uma série de entradas de ar distribuídas do chão até o teto de forma assimétrica. O programa FDS, versão 4.06, foi utilizado para simular dez cenários em um átrio cúbico de 30,5 m de lado.

A fonte do fogo adotada para a análise dos dez cenários consistiu-se de pedaços de madeira com dimensões $10 \times 10 \times 90$ cm, empilhadas umas sobre as outras, simulando uma pilha de 12 paletes. O fogo foi aceso usando 4 blocos quentes colocados perto do meio de cada lado da pilha de madeira. A taxa máxima de liberação de calor obtida variou entre 5 e 7 MW. Devido às flutuações na taxa de liberação de calor, nos cálculos, foi considerado uma taxa de calor liberado igual a 5 MW alcançada aos 150 s.

Um sistema de controle de fumaça foi simulado com entradas mecânicas de ar nas paredes do átrio com áreas diferentes em cada cenário e exaustão natural de fumaça quadradas de $1,8 \times 1,8$ m posicionadas no topo da edificação. O centro de cada saída de

fumaça estava localizado a 7,6 m das paredes adjacentes. Com base nos cálculos, utilizando equações a exemplo das equações 2-6 a 2-12, a capacidade total de exaustão necessária para as quatro aberturas, para fornecer uma altura de camada de projeto de 6,2 m, seria de 182,4 m³/s. A velocidade média do fluxo de exaustão através de cada ventilação foi de 13,2 m/s, de modo a proporcionar uma vazão volumétrica de 45,6 m³/s em cada uma das quatro aberturas.

As dimensões das entradas de ar variaram em dimensões, localização e velocidade para análise dos múltiplos cenários. A vazão de entrada de ar permaneceu constante em cada simulação.

Os resultados da simulação de Kerber *et al.* (2007) permitiram fazer observações e comparações entre as configurações de velocidade de ar e de ventilação. Duas velocidades de entrada de ar (0,5 e 1,0 m/s) fornecidas simetricamente, limitaram a camada de fumaça aos 6,2 m do teto, que foi utilizado como critério de projeto. A altura da camada de fumaça foi duas vezes maior (a fumaça desceu mais) para as simulações assimétricas em comparação com as simulações simétricas com as mesmas velocidades.

Embora nas simulações assimétricas com velocidades de entrada de ar de 1,0 e 2,0 m/s tivessem entradas de ar na camada de fumaça, observou-se ainda a mesma altura de camada que as simulações simétricas com todas as aberturas abaixo da camada de fumaça. Aumentar a velocidade de ar acima de 1,0 m/s resultou na queda da camada de fumaça significativamente abaixo daquela do critério de projeto.

Segundo Kerber *et al.* (2007) a definição da entrada de ar conforme NFPA 92B está relacionada com a velocidade do ar junto à pluma de fumaça. Nas simulações, a maioria das velocidades, quando o ar atingiu a pluma de fumaça, foi muito menor do que a velocidade prescrita pela NFPA 92B. Dado que estas simulações foram conduzidas com a fonte do fogo no centro do compartimento, as velocidades de entrada de ar, nas aberturas, foram as maiores possíveis. Se o fogo fosse colocado em qualquer outro lugar no átrio, a entrada de ar teria atingido o combustível de forma assimétrica e com uma velocidade maior, pelo menos em um dos lados. Com as observações de arranjos assimétricos de entrada de ar, seria esperado que a combinação de velocidades aumentadas e padrões de fluxo assimétrico produzissem camadas de fumaça ainda maiores do que as observadas nestas simulações.

O trabalho de Kerber *et al.* (2007) focou no efeito dos arranjos de entrada de ar sobre o desempenho de um sistema de controle de fumaça. As simulações ilustram que mesmo velocidades inferiores a 1,0 m/s podem fazer com que a camada de fumaça desça abaixo do critério de projeto. As simulações com aberturas simétricas nas quatro paredes, junto ao piso, com velocidades de entrada de ar de 0,5 e 1,0 m/s, e a simulação com aberturas simétricas distribuídas ao longo da altura das paredes em uma faixa central, com uma velocidade de 1,0 m/s, foram as únicas simulações capazes de manter a altura de interface da camada de fumaça de projeto.

O NFPA 92B fornece pouca orientação quanto à localização das posições de entrada de ar. Estas simulações mostraram que a melhor maneira de fornecer ar é de forma simétrica, mas isso pressupõe o fogo no centro do compartimento. As simulações também mostraram que as aberturas não devem ser configuradas para fazer com que a pluma gire, caso da simulação com aberturas nos cantos. Isso resulta em um aumento na turbulência da pluma e foi o resultado menos desejável para os cenários simulados. O NFPA 92B também afirma que as aberturas de ventilação não devem ser posicionadas na camada de fumaça pois irá adicionar ar à camada de fumaça superior e forçar a camada a descer.

2.6 Yi *et al.* (2005)

Segundo Yi *et al.* (2005), a disponibilidade das entradas de ar é essencial para a concepção do projeto de sistema de extração mecânica de um compartimento. Sempre há problemas em determinar as posições de entradas que irão fornecer o ar. Os autores desenvolveram um modelo de zonas para estudar os efeitos de diferentes posições das entradas de ar sobre o desempenho do sistema de extração mecânica em um átrio. Três situações de distintas posições de entradas de ar foram simuladas. As variações da temperatura da camada de fumaça e altura dessa camada foram consideradas para diferentes proporções das chamas, taxas de extração e ar disponibilizado.

Yi *et al.* (2005) realizaram testes com chamas intensas em um átrio. Os resultados foram comparados com os previstos pelo FDS e o CFAST. Os autores concluíram que os resultados previstos pelo modelo de zonas corresponderam aos resultados do FDS, no entanto os resultados previstos pelo CFAST não foram próximos dos observados experimentalmente.

Dentre as conclusões, os autores citam que quando a entrada de ar é superior à interface da camada de fumaça, o ar irá se misturar com a fumaça. Em sistemas de exaustão de fumaça bem projetados deve-se evitar essa mistura de ar e fumaça, por exemplo, através do controle de materiais combustíveis no ambiente; dessa forma é possível reduzir a taxa de descida da interface de fumaça consideravelmente.

No caso de ocorrer um grande incêndio em um ambiente com um sistema de controle de fumaça ineficiente, este sistema se torna incapaz de garantir a altura segura da camada de fumaça. Neste caso, as posições das aberturas das entradas de ar deixam de ser importantes, porque a camada de fumaça descera rapidamente. Por outro lado, a extração com entradas de ar em posições superiores, fará reduzir a temperatura da camada de fumaça o que ajudará na proteção da edificação contra o calor. Além da posição das entradas de ar, outros fatores importantes como a distribuição dessas entradas, a distância delas até as chamas e a velocidade do fluxo de ar, também devem ser consideradas no processo de extração mecânica de fumaça.

2.7 Hou *et al.* (2001)

Hou *et al.* (2001) apresentam uma análise de requisitos de controle de fumaça em amplos espaços de edificações através de testes em átrios. Os estudos foram realizados no USTC/PolyU Atrium, instalação construída em Hefei, Anhui, China. Os autores concluíram que a temperatura da fumaça em amplos espaços é geralmente baixa, o que deixa a fumaça propensa a descer e se misturar com o ar. Normalmente, é difícil controlar efetivamente a fumaça nesses casos, quando existe uma fonte de fogo.

Segundo os autores, a extração mecânica de fumaça é um processo de troca de fumaça e ar. E essa é uma forma eficaz de controle de fumaça em grandes edifícios, que diminui a velocidade da fumaça descendente e sua concentração. A influência dos ventiladores para desorientar o fluxo de fumaça e a localização das aberturas de ventilação também devem ser consideradas. Os testes indicaram que a inicialização do sistema de extração de fumaça perturba os campos de fluxos de fumaça e facilita a mistura da fumaça com o ar, o que pode influenciar no efeito dos exaustores; com isso, foi impossível extrair completamente a fumaça dentro do tempo limite dos experimentos.

Os resultados de Hou *et al.* (2001) demonstraram ainda que os mecanismos de extração de fumaça, as aberturas de ventilação e as regras para a movimentação da fumaça durante o período de escape, são temas que necessitam de mais estudo.

2.8 Beyler *et al.* (2001)

O trabalho de Beyler *et al.* (2001) trata da controvérsia sobre o uso de chuveiros automáticos (sprinklers) e aberturas de extração de fumaça e calor atuando juntos. Segundo os autores, ao longo de décadas foram publicados dezenas de documentos sobre o assunto.

Essa pesquisa traz a revisão de 13 estudos experimentais mais relevantes em relação às observações favoráveis e desfavoráveis sobre a combinação do uso de chuveiros automáticos e aberturas de extração de fumaça e calor. Estes estudos foram organizados em grupos onde: (1) Três dos estudos foram de investigação da abertura de extração da fumaça sozinha; (2) Quatro investigações incluíram chuveiros automáticos, mas não incluíram aberturas nos telhados para extração da fumaça; (3) Três estudos são uma série de testes em que foram utilizadas aberturas de saída de fumaça em formato circular; (4) Quatro das séries de testes incluíram chuveiros automáticos, painéis de fumaça, mas não colocaram aberturas de extração de fumaça e calor; (5) Quatro desses mesmos testes incluíram chuveiros automáticos, aberturas de extração da fumaça e calor, e painéis de fumaça, porém, utilizaram focos de incêndio que não poderiam ser extintos pela ação dos chuveiros; (6) Quatro testes também incluíram chuveiros automáticos, aberturas de extração da fumaça e calor, painéis de fumaça e focos de incêndio que pudessem ser extintos pelos chuveiros.

Os autores concluíram que o controle de fumaça e calor em conjunto com os chuveiros automáticos deixou evidente que a ventilação não tem efeito negativo no desempenho dos chuveiros. Os estudos experimentais demonstraram que a ventilação se limita à propagação de produtos de combustão liberados no edifício dentro do compartimento de origem do fogo. Isto melhora a visibilidade para os ocupantes da edificação e para os bombeiros que precisam localizar o foco do incêndio para extingui-lo. Ao se limitar a propagação da fumaça e do calor também se reduz os danos causados à edificação. Para o caso de os chuveiros automáticos não funcionarem, a ventilação contínua é muito valiosa no auxílio manual de controle do incêndio.

A pesquisa de Beyler *et al.* (2001) demonstrou também que uma ativação antecipada das aberturas de ventilação não acarreta diminuição dos efeitos dos chuveiros e, que os projetos devem considerar os painéis de fumaça (acantonamentos) como obstrução à propagação da fumaça.

2.9 McGrattan *et al.* (1998)

O estudo de MacGrattan *et al.* (1998) originou-se de uma pesquisa pública-privada coordenada para obter informações sobre a interação de chuveiros automáticos, aberturas de ventilação e painéis de fumaça, através de simulações numéricas de incêndio. Esse estudo foi conduzido durante dois anos. O projeto *The International Fire Sprinkler, Smoke and Heat Vent, Draft Curtain Fire Test Project*, organizado pelo *National Fire Protection Research Foundation* (NFPRF) reuniu um grupo de patrocinadores industriais que apoiaram e planejaram uma série de testes com intuito de estudar a interação citada acima em grandes armazéns, fábricas e lojas de varejo do tipo armazém.

O *Technical Advisory Committee* composto por representantes das organizações patrocinadoras, o *National Institute of Standards and Technology* (NIST), e outras partes interessadas, programaram 39 testes com fogo em grande escala que foram conduzidos no *Large Scale Fire Test Facility at Underwriters Laboratories (UL) in Northbrook, Illinois*. Os testes foram projetados para representar grandes edificações, grandes áreas abertas, sistemas de chuveiros automáticos e aberturas de ventilação no telhado, com e sem acantonamentos (também chamados de painéis de fumaça ou cortinas). A simulação foi realizada em um espaço de 37 m × 37 m × 15 m de altura (dimensões do principal compartimento). A ventilação, os painéis de fumaça e os chuveiros automáticos foram instalados a 7,6 metros de altura do piso, em uma plataforma de altura ajustável com dimensões de 30 m × 30 m. Durante os testes a fumaça e os gases quentes preencheram a área enclausurada pelo acantonamento, e o excesso da fumaça espalhou-se em torno das arestas da cortina para o espaço acima. Esta fumaça esgotou-se lentamente através do sistema de exaustão.

O financiamento para testes em larga escala, apesar de relevante, permitiu conduzir apenas 5 testes com incêndio em ambiente com armazenamento de mercadorias. Trinta e quatro (34) testes foram realizados por aspersão de gás heptano. Como os recursos

financeiros e o tempo eram limitados, o NFPRF *Technical Advisory Committee* reduziu o número de parâmetros nessa pesquisa, selecionando uma mercadoria, uma configuração de estante e fonte de ignição, um único sistema de aspersão e uma densidade de descarga do chuveiro automático, um projeto de ventilação comercial e uma ventilação em disposição com os painéis de fumaça.

Simultaneamente aos testes citados acima outro programa foi conduzido no NIST, para desenvolver um modelo numérico, o *Industrial Fire Simulator* (IFS), que incorporou os fenômenos físicos do experimento e demonstrou estar de acordo com os testes do queimador de heptano em relação ao tempo de ativação dos chuveiros automáticos e da elevação da temperatura do gás próximo ao teto. Uma série de experimentos foi realizada para fornecer informações iniciais necessárias ao modelo, gerando dados que descrevem o comportamento e a taxa de propagação das chamas nas mercadorias, parâmetros de resposta térmica e densidade de descarga do chuveiro e o efeito do jato de água sobre a mercadoria.

Os autores relataram a intenção de continuar o desenvolvimento e evolução do modelo IFS, além da publicação dos resultados. O objetivo dos testes e do programa foi o de investigar os efeitos das aberturas de ventilação no telhado e a taxa de descarga do fluxo de fumaça nessas aberturas, os efeitos dos painéis de fumaça, assim como o número, a localização, o efeito e o tempo de ativação dos chuveiros automáticos. Um modelo de dinâmica de fluidos computacional foi usado como uma ferramenta de planejamento e análise. Os estudos simularam edifícios com amplas áreas abertas e sem obstruções, exceto pelos painéis de fumaça, sistemas adequados de chuveiros, controlados de forma independente e aberturas de ventilação automáticas.

McGrattan *et al.* (1998) concluíram que os testes e modelos de simulação demonstraram que quando o fogo não ocorre diretamente sob uma das aberturas de ventilação, esta não tem efeito significativo no tempo de ativação dos chuveiros, no número de chuveiros ativados, na temperatura dos gases perto do teto e na quantidade de combustíveis consumidos. Os testes e modelos de simulação mostraram que, quando o fogo foi iniciado diretamente abaixo das aberturas de ventilação, a ativação das aberturas ocorreu quase que simultaneamente à ativação dos primeiros chuveiros, mas o tempo médio de ativação dos primeiros circuitos de chuveiros foi adiado. O tempo de atraso variou devido à diferença nos tempos de ativação entre a abertura de ventilação e os primeiros chuveiros.

Os testes e simulações demonstraram também que, quando o fogo foi iniciado diretamente abaixo de uma abertura de ventilação que é ativada aproximadamente simultaneamente ao primeiro chuveiro, o número de chuveiros ativados diminuiu cerca de 50% em comparação com os testes realizados com as aberturas de ventilação fechadas. E que quando os acantonamentos foram instalados, dobrou o número de chuveiros automáticos ativados quando comparado aos testes sem os painéis.

Em teste com estantes de armazenamento, a ignição do fogo se deu próximo a um painel de fumaça e a fonte combustível estendeu-se por baixo do painel, o que provocou um atraso na ativação dos chuveiros, o que levou a uma queima muito grande da mercadoria estocada em comparação com outros testes onde o incêndio provocado ocorreu longe dos painéis de fumaça.

O efeito significativo de resfriamento dos gases próximos ao teto devido à ativação dos chuveiros muitas vezes impossibilita o funcionamento das aberturas de ventilação. Esta conclusão foi baseada em medições realizadas através de termopares dentro da abertura de ventilação.

2.10 Hinkley *et al.* (1992)

Hinkley *et al.* (1992) desenvolveram pesquisas e modelos matemáticos para investigar o efeito das aberturas de ventilação nos telhados com a ativação dos chuveiros automáticos. Os resultados indicaram que não há interações desfavoráveis entre as aberturas e o funcionamento dos chuveiros.

Para validar o modelo e as conclusões resultantes, os autores realizaram experiências a respeito das aberturas de ventilação no telhado, sobre a operação dos chuveiros em edificações com aproximadamente 50 m × 20 m × por 10 m de altura. As conclusões obtidas experimentalmente foram concordantes com o modelo que previa que o acionamento das aberturas de ventilação teria pouco efeito sobre a operação dos primeiros chuveiros, com incêndio de crescimento rápido das chamas.

Hinkley *et al.* (1992) utilizaram dois cenários para o período de operação dos primeiros chuveiros. No cenário A o fogo foi mantido constante durante o tempo de ensaio e todos os chuveiros foram utilizados. No cenário B, semelhante ao cenário A, aos 30 segundos os

primeiros chuveiros entraram em operação, caso em que a produção de calor foi reduzida em 20%. Aos 7 minutos o número de chuveiros operantes variou de 37 para 14. A redução do número total de chuveiros operantes não foi prevista pelo modelo que, segundo os autores, precisa ser melhorado. Ainda segundo os autores, o modelo pode ser usado para calcular a altura da camada de gases quentes (H_f) em um compartimento com sistema de chuveiros automáticos e ventilação.

2.11 Programa FDS

O Fire Dynamics Simulator - FDS (McGrattan *et al.*, 2015) é um programa computacional de dinâmica dos fluidos (CFD), que resolve numericamente as equações de *Navier-Stokes* para baixa velocidade e fluxo termicamente orientado, com ênfase na fumaça e transporte de calor que ocorre em incêndios.

A primeira versão do programa FDS foi lançada publicamente em fevereiro de 2000. Desde então o programa passou a ser muito utilizado para o projeto de sistemas de controle de fumaça, estudos de chuveiros automáticos e para simulação de incêndio residencial e industrial. Ao longo de seu desenvolvimento, o FDS foi destinado a resolver problemas práticos de proteção contra incêndios e, ao mesmo tempo, é uma importante ferramenta para estudo da dinâmica do incêndio.

O FDS lê os parâmetros de entrada a partir de um arquivo de texto, calcula uma solução numérica para as equações que descrevem o problema e escreve os dados de saída especificados pelo usuário. O Smokeview (Forney, 2013) é um programa que lê os arquivos de saída do FDS e produz as animações na tela do computador. Ele possui uma interface baseada em menus simples. O FDS não apresenta interface simplificada, mas existem outros programas que foram desenvolvidos para gerar o arquivo de texto que contém os parâmetros de entrada necessários, como o software PyroSim.

O *software* PyroSim (Thunderhead Engineering Consultants, 2016), possui uma interface gráfica simples e intuitiva, para modelagem e simulação de complexos ambientes em situação de incêndio. O programa é associado ao FDS e ao Smokeview. Um modelo criado no FDS também pode ser importado para o PyroSim e todas as informações do modelo serão incluídas na importação e disponíveis para edição e visualização.

O arquivo de entrada de dados do FDS contém os parâmetros organizados em grupos de listas nomeadas e fornece todas as informações necessárias para descrever o cenário.

Uma quantidade considerável de trabalho em uma simulação está na especificação da geometria do espaço a ser modelado e na aplicação das condições de contorno para as superfícies sólidas. A geometria é descrita em termos de obstruções retangulares que pode aquecer, queimar, conduzir calor, etc., e nas aberturas, a partir da qual o ar ou o combustível pode ser injetado ou extraído. A condição de contorno deve ser atribuída a cada obstrução; o incêndio é apenas um tipo de condição de contorno.

Sólidos e combustíveis líquidos também podem ser modelados, desde que se especifique suas propriedades relevantes através do parâmetro MATL. No entanto, se simplesmente deseja-se especificar uma taxa de calor liberado, não é necessário especificar quaisquer propriedades do material. Um incêndio especificado é basicamente modelado como a injeção de combustível gasoso a partir de uma superfície sólida ou ventilação. Este é essencialmente um queimador, com uma taxa de liberação de calor por unidade de área especificada, HRRPUA, em unidades de kW/m^2 .

Uma alternativa para o parâmetro HRRPUA com a mesma funcionalidade é o MALPUA, que especifica a Taxa de Perda de Massa do gás combustível por unidade de área em $\text{kg} / (\text{m}^2\text{s})$. O sistema de ventilação dos compartimentos individuais dentro de um edifício é descrito ao se especificar uma velocidade para as condições de contorno. Por exemplo, o ar fresco pode ser soprado para dentro, e a fumaça pode ser retirada de um compartimento, determinando uma velocidade na direção normal a uma superfície sólida.

Há ocasiões em que a definição de um fluxo fixo e condições fixas de contorno não são suficientes para modelar o comportamento de um sistema HVAC (Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado). Se a capacidade de transporte de produtos de calor e de combustão ou a despressurização através de uma rede de canais é importante, pode-se fazer uso de um solucionador de rede HVAC acoplado. O solucionador calcula os fluxos através de uma rede de canais descritos como segmentos de canais e nós, que se liga ao domínio computacional FDS.

Chuveiros automáticos, detectores de fumaça, medidores de fluxo de calor e os termopares podem parecer completamente distintos, mas do ponto de vista do FDS, são simplesmente dispositivos que operam de maneiras específicas, e dependem das propriedades atribuídas a eles. Eles podem ser usados para registrar o ambiente simulado,

como um termopar ou um detector de fumaça, ou podem registrar o tempo dos eventos que acontecem, como um temporizador.

O FDS possui vários tipos de arquivos de saída que armazenam dados computados. Alguns dos arquivos estão em formato binário e destinam-se a serem lidos e renderizados pelo Smokeview, e outros são arquivos de texto apenas delimitados por vírgulas. É importante observar que a maioria dos dados de saída do FDS deve ser declarada explicitamente no arquivo de entrada.

2.11.1 Tamanho das células no FDS

Overholt (2017), através de um site, criou uma ferramenta de cálculo do tamanho das células para o FDS, gerando automaticamente uma divisão de malhas ideais a partir dos dados de entrada especificados pelo usuário. Os tamanhos de células são determinados usando um diâmetro característico do fogo que está relacionado à taxa de calor liberado (TCL).

O tamanho da malha (dx) para determinada simulação pode ser relacionado ao diâmetro do fogo (D^*) que é dado pela planilha após o fornecimento das dimensões do compartimento e a taxa de calor liberado. Quanto menor o diâmetro do fogo menor o tamanho da célula. O diâmetro do fogo é dado pela seguinte relação:

$$D^* = \left(\frac{Q}{\rho_{\infty} c_p T_{\infty} \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (2-13)$$

onde:

Q = taxa de calor liberado -TCL (kW);

ρ_{∞} = densidade do ar (kg/m^3), normalmente igual a 1,204;

c_p = calor específico (kJ/kg.K), normalmente igual a 1,005;

T_{∞} = temperatura ambiente (K), normalmente igual a 293; e

g = gravidade (m/s^2), normalmente igual a 9,81

Considerando os valores normalmente utilizados, a Equação 2-13 fica:

$$D^* = \left(\frac{Q}{1110,44} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (2-14)$$

Segundo o autor, os tamanhos das malhas devem estar entre $D^*/4$ (malha grossa) e $D^*/16$ (malha fina), sendo o valor $D^*/10$ considerado moderado para que os resultados do FDS sejam adequados.

2.12 Programa CFAST

O CFAST é um modelo de duas zonas capaz de simular um compartimento sujeito a um incêndio. Ele calcula a distribuição da fumaça, bem como os gases, produtos da combustão e a temperatura no edifício durante um incêndio prescrito pelo usuário.

Um incêndio no CFAST é especificado através de uma taxa de liberação de calor dependente do tempo. O calor de combustão é usado para calcular a taxa de perda de massa de combustível, a partir da qual a taxa de combustão pode ser calculada. A liberação de calor e as taxas de geração de produtos correspondentes vão a zero quando o limite inferior de oxigênio é atingido, e são substituídos pela taxa de produção adequada de gás combustível não queimado que é transportado de zona para zona, até que haja oxigênio suficiente e a uma temperatura suficientemente elevada para promover a combustão.

A saída de dados do CFAST inclui as temperaturas das camadas superior e inferior, as temperaturas do teto, parede e piso dentro de cada compartimento, as concentrações dos gases da fumaça e de espécies dentro de cada camada, temperaturas e tempo de ativação de aspersão. A quantidade de informação pode ser muito grande, especialmente para geometrias complexas e simulações longas.

2.13 Programa B-RISK

O programa B-RISK (Wade, 2013) é um modelo de zonas desenvolvido pela BRANZ (Organização de pesquisa e consultoria da Nova Zelândia) da Universidade de Canterbury. O programa destina-se a avaliar o desempenho e os riscos associados com incêndios. A saída do modelo inclui temperaturas da camada de fumaça, pressão, temperaturas da superfície do ambiente, altura da camada, visibilidade, estimativas e estatísticas.

O B-RISK é um modelo de programa de simulação de incêndio que inclui um simulador de risco para gerar distribuições de probabilidade para as saídas pertinentes do modelo, desde que as distribuições estatísticas para os principais parâmetros de entrada sejam atribuídas. O programa estendeu o núcleo do modelo BRANZFIRE incluindo a descrição de incertezas e riscos associados a incêndios.

O modelo B-RISK pode ser usado para uma única execução ou para várias repetições de um cenário com a finalidade de análise de sensibilidade ou para a produção probabilísticas que descreve o risco de incêndio sob condições definidas.

Existem dois modos de uso disponíveis no programa (Tabela 2-1):

- **Modo NZBC VM2:** modo que utiliza os parâmetros conforme a Norma *New Zealand Building Code*;
- **Modo Risk Simulator:** fornece acesso a todos os recursos disponíveis no software, podendo ser totalmente configurado.

Tabela 2-1: Resumo das programações do modo de usuário

| | Modo NZBC VM2 | Modo Risk Simulator |
|---|--|--|
| Parâmetros de combustão – tipos de combustíveis | Usa o tipo de combustível VM2 com: Coeficiente de emissão de chama = 1,0 (1/m) Fórmula do combustível = $\text{CH}_2\text{O}_{0,5}$ Nenhuma geração de HCN Fração de massa de combustível convertido em CO_2 = 1,5 g/g Fração de massa de combustível convertido em H_2O = 0,82 g/g Fração de massa de combustível convertido em CO, na fase pré- <i>flashover</i> = 0,04 g/g Fração de massa de combustível convertido em CO, na fase pós- <i>flashover</i> = 0,4 g/g Fração de massa de combustível convertido em fumaça, na fase pré- <i>flashover</i> = 0,07 g/g Fração de massa de combustível convertido em fumaça, na fase pós- <i>flashover</i> = 0,14 g/g | Escolha dos combustíveis disponíveis ou definidos pelo usuário |

O B-RISK permite ao usuário realizar uma análise determinística de execução única para um edifício específico com valores de entrada fixos (caso utilizado neste trabalho). Ele também permite ao usuário realizar várias execuções em que os parâmetros de entrada selecionados podem ser descritos com uma distribuição estatística. Um dos parâmetros do programa é a possibilidade de o usuário definir o número máximo de iterações, ou seja, o número de simulações utilizadas para executar o modelo, com amostragem de parâmetros de entrada específicos.

O programa considera o fornecimento de ar disponível e seu efeito sobre a taxa de liberação de calor. A abordagem adotada consiste em determinar o fluxo de massa de oxigênio na pluma e compará-lo ao montante necessário para a combustão completa do combustível. Se o fluxo for considerado insuficiente, a combustão pode ainda ser

completada pelo oxigênio presente na camada superior, mas apenas se a concentração de oxigênio for superior a um valor crítico. A concentração mínima de oxigênio necessária para que a combustão ocorra varia entre 2% e 10%, dependendo da temperatura do gás.

2.14 Calor de Combustão

Calor de Combustão é a quantidade de calor liberado para uma certa quantidade de massa de material queimado. Hurley (2016) apresenta na página 143, “Tabela 5.3”, valores do calor de combustão para um determinado número de gases, líquidos e combustíveis sólidos, medidos à temperatura ambiente de 25 °C. A Tabela 2-2 mostra alguns exemplos de combustíveis utilizados em simulações realizadas neste trabalho e extraídos da tabela de Hurley (2016).

Tabela 2-2: Calor de combustão de alguns materiais

| Calor de Combustão | |
|---|---------------------|
| Combustível | ΔH_c (kJ/g) |
| Metanol (CH ₃ OH) | 19,83 |
| Etanol (C ₂ H ₅ OH) | 26,78 |
| Madeira pinus | 19,4 |

Para os combustíveis não definidos por Hurley (2016) foi utilizada a fórmula 2-15, retirada do trabalho de Rohr (2015), como, por exemplo, no caso do trabalho de Bong (2011) para as simulações do compartimento Hagglund, realizadas neste trabalho, no Capítulo 3, Item 3-3, onde o combustível definido pelo autor foi o querosene. Sendo a fórmula do combustível C_cH_hO_oN_n o calor de combustão em kJ/mol é dado por:

$$418(c + 0,3h - 0,5o) \quad (2-15)$$

onde:

c = quantidade de átomos de Carbono;

h = quantidade de átomos de Hidrogênio;

o = quantidade de átomos de Oxigênio.

Após obter o peso molecular e lembrando que 1 mol tem o peso em gramas com valor numérico igual ao peso molecular, é possível chegar ao calor de combustão em kJ/g ou kJ/kg.

2.15 Taxa de Calor Liberado (TCL)

A principal característica que descreve o fogo quantitativamente é a taxa de liberação de calor - TCL, descrita por Babrauskas *apud* Hurley (2016) como a variável mais importante no incêndio.

A taxa de calor liberado de um objeto em queima é medida em quilowatts (kW), e é a taxa na qual as reações de combustão produzem calor. A partir da taxa de calor liberado e do calor de combustão pode-se obter a taxa de combustão em kg/s.

O calorímetro de cone, ensaio padronizado desenvolvido por Babrauskas (1984) no *National Institute of Standards and Technology* - NIST é usado para medir a taxa de calor liberado, como mostra a Figura 2-10. Os procedimentos para conduzir os testes estão descritos na ASTM E 1354 e ISO 5660.

Segundo Hurley (2016), a taxa de calor liberado não está disponível para muitos objetos e materiais sendo necessários os testes. Para outros materiais há tabelas de TCL disponíveis, no entanto, quando é necessária uma análise específica de um produto deve-se realizar o teste com o calorímetro de cone para se obter resultados mais precisos.

A Figura 2-11 apresenta exemplos de TCL: F21 é o resultado encontrado para uma cadeira de espuma de poliuretano e tecido sintético tipo polietileno; F32 é um sofá feito dos mesmos materiais da cadeira anterior; e F24 é uma cadeira com espuma, também de poliuretano e tecido de algodão. Observa-se que a TCL do objeto F24 apresenta uma menor taxa de calor liberado devido à troca do tipo de tecido.

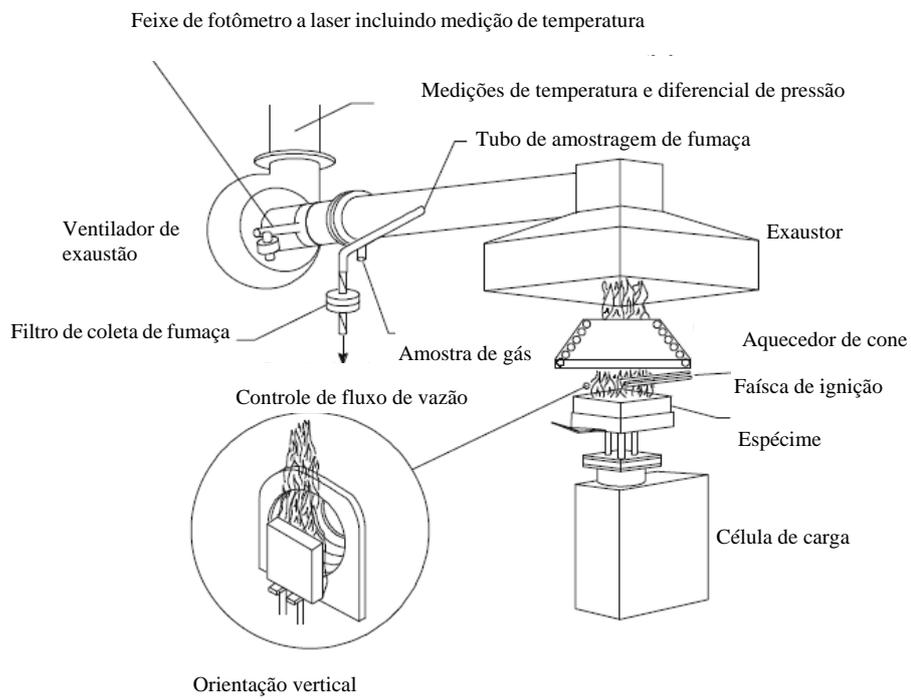


Figura 2-10: Calorímetro de cone

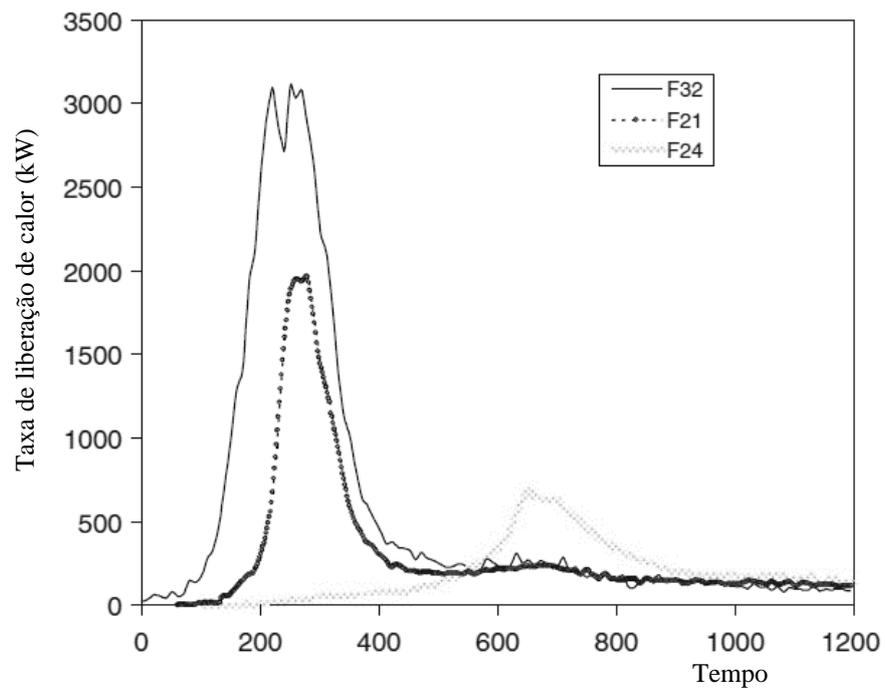


Figura 2-11: TCL de móveis estofados testados no NIST

3

SIMULAÇÃO DA ALTURA E TEMPERATURA DA CAMADA DE FUMAÇA

3.1 Simulação dos Experimentos realizados por Yi *et al.* (2005)

Yi *et al.* (2005) realizaram experimentos em um laboratório construído na China pela *The Hong Kong Polytechnic University* (PolyU) e pela *University of Science and Technology of China* (USTC). O átrio do laboratório possuía 22,4 m (comprimento) × 12 m (largura) × 27 m (altura).



Figura 3-1: Vista de fora do USTC/PolyU Atrium – Edifício à direita. (Hou *et al.*, 2001)

Três experimentos foram realizados com uma taxa de calor liberado de 3.000 kW e nomeados como Testes 1, 2 e 3. O combustível utilizado foi o Etanol (C_2H_6O), disposto conforme a norma AS 4391:1999. O foco do fogo foi centralizado no piso do átrio. O átrio (edificação à direita na Figura 3-1) possuía 6 árvores de termopares, localizadas simetricamente próximas às paredes laterais e nomeados de M1, M2, M3, M4, M5 e M6 conforme a Figura 3-2.

No Teste 1 havia uma abertura (janela) com largura de 1,4 m e altura de 1,1 m, centralizada em uma das paredes de comprimento igual a 22,4 m, com um peitoril de 10,5 m. A temperatura ambiente era de 10 °C e o tempo de duração do fogo foi de 560 s. No teto do átrio havia um sistema de extração mecânica de fumaça com taxa de extração de 15m³/s.

No Teste 2 havia uma abertura (porta) com largura de 1,6 m e altura de 2,5 m, centralizada em uma das paredes de comprimento igual a 12 m. A temperatura ambiente era de 10 °C e o tempo de duração do fogo foi de 620 s. Assim como no Teste 1, havia, no teto, um sistema de extração mecânica de fumaça com taxa de extração de 15m³/s.

No Teste 3 não havia nenhuma abertura e nenhum sistema de extração de fumaça. A temperatura ambiente era de 11 °C e o tempo de duração do fogo foi de 590 s.

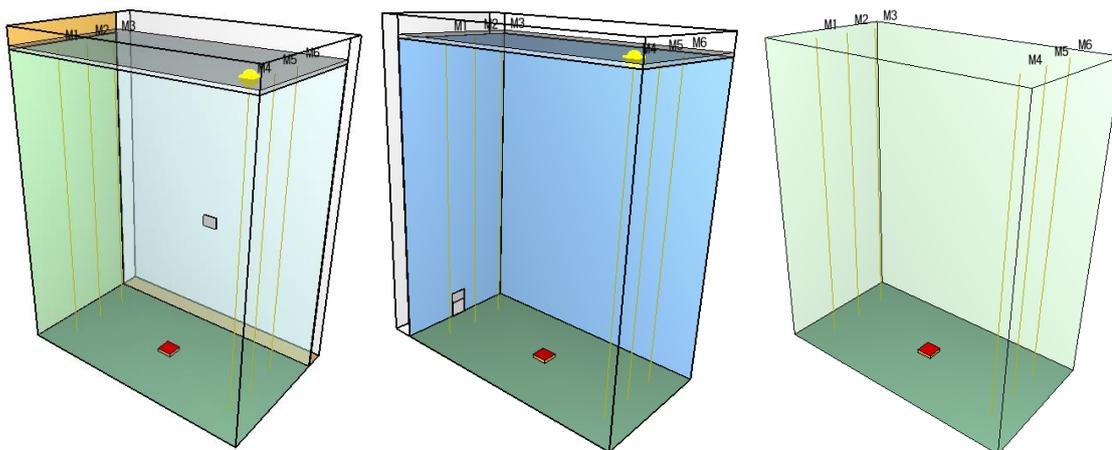


Figura 3-2: Modelos: (a) Teste 1; (b) Teste 2; e (c) Teste 3, respectivamente

3.1.1 Modelagem e simulação dos experimentos

Os modelos desenvolvidos com base nos Testes 1, 2 e 3 realizados por Yi *et al.* (2005) possuem: a mesma geometria; presença ou não de aberturas ou sistema de extração de fumaça; temperatura ambiente e tempo de duração do fogo, ou seja, tempo de simulação.

Tabela 3-1: Dados de cada teste

| | TESTE 1 | TESTE 2 | TESTE 3 |
|---------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------|
| Aberturas | 1 janela | 1 porta | — |
| °C Inicial | 10 °C | 10 °C | 11 °C |
| Tempo de simulação | 560 s | 620 s | 590 s |
| Sistema de Extração | Vazão 15m ³ /s | Vazão 15m ³ /s | — |
| Área do Queimador | 2m ² | 2m ² | 2m ² |

Nas simulações realizadas neste trabalho com o FDS, o volume utilizado nas simulações foi dividido em $72 \times 45 \times 96$ células para o Teste 1, $80 \times 40 \times 96$ para o Teste 2 resultando em células com dimensões de $0,31 \times 0,31 \times 0,30$ m e $0,30 \times 0,30 \times 0,30$ m, respectivamente. Para o Teste 3 o volume foi dividido em $72 \times 40 \times 90$ resultando em células com dimensões de $0,31 \times 0,30 \times 0,30$ m.

Tabela 3-2: Tamanho das células em cada teste

| | | |
|---------|--------|---|
| TESTE 1 | X = 72 | Cels.: $0,31 \times 0,31 \times 0,30$ m |
| | Y = 45 | |
| | Z = 96 | |
| TESTE 2 | X = 80 | Cels.: $0,30 \times 0,30 \times 0,30$ m |
| | Y = 40 | |
| | Z = 96 | |
| TESTE 3 | X = 72 | Cels.: $0,31 \times 0,30 \times 0,30$ m |
| | Y = 40 | |
| | Z = 90 | |

O tamanho das células foi tomado com valor próximo ao utilizado por Yi *et al.* (2005) em suas simulações com o FDS. Para os testes 1 e 2 a malha foi prolongada por aproximadamente 2 m além da parede com as aberturas e acima do teto com o sistema de extração de fumaça. A área do sistema de extração foi tomada igual a 1,0 m². Nos testes 1 e 2 o teto, com sistema de extração de fumaça, e as paredes, com as aberturas, foram modelados como *Obstructions*. As demais paredes e o piso, localizados nos limites da

malha, foram modelados como *Vents*. Paredes, teto e piso foram modeladas com 0,10 m de espessura de concreto, conforme Bong (2011), e as propriedades fornecidas pela biblioteca do PyroSim: densidade de 2280 kg/m³; calor específico de 1,04 kJ / (kg°K); condutividade de 1,8 W / (m°K); emissividade de 0,9.

A composição química do Etanol (C₂H₆O) e a quantidade de átomos foram informadas ao programa e observou-se no arquivo *nome_arquivo.out* que o calor de combustão utilizado pelo programa foi de 24.510 a 26.780 kJ/kg. A área do fogo foi de 2,0 m², localizada a 0,3 m acima do piso. Para cada teste, duas simulações foram realizadas, uma com taxa de calor liberado constante (TCL constante) e outra com um incêndio quadrático ultra rápido (TCL t²). A fração de massa de combustível convertida em partículas de fumaça foi tomada igual a 0,07, indicada para a fase pré-*flashover*, conforme Item 2.14, Tabela 2-1. A fração de massa de combustível convertida em monóxido de carbono foi tomada igual a 0,04, indicada para a fase pré-*flashover*, conforme Item 2.14, Tabela 2-1. A fração de radiação média obtida do arquivo *nome_arquivo_hrr.csv* foi de 0,32; 0,33 e 0,38 para as simulações dos testes 1, 2 e 3, respectivamente, com taxa de calor liberado constante. Para a simulação TCL t² as frações de radiação médias foram de 0,31; 0,33 e 0,37 para os testes 1, 2 e 3, respectivamente. Seis medidores da camada de fumaça (*Layer Zoning Device*) foram definidos, quatro deles próximos aos cantos do átrio, coincidindo com as linhas verticais de termopares, do teto ao piso, usados nos experimentos (Figura 3-2).

Nas simulações realizadas neste trabalho com o CFAST, foram utilizados os mesmos dados de entrada das simulações com o FDS. Para o combustível Etanol, foi adotado o calor de combustão igual a 26.780 kJ/kg (conforme sugestão do CFAST) e a fração emitida por radiação foi tomada com o valor padrão do programa igual a 0,35. O fogo foi localizado ao nível do piso.

No programa B-RISK, foram utilizados os mesmos dados de entrada das simulações com o CFAST.

Usando a planilha de Overholt (2017) (item 2.12) com D^* (diâmetro do fogo) igual a 1,5, as maiores dimensões das células adotadas neste trabalho (0,31 e 0,30) ficaram próximas da malha grossa que é $D^*/4$, como mostra a Tabela 3-3.

Tabela 3-3: Cálculo de tamanho de célula

| Yi <i>et al.</i> , (2005) | Tamanho da célula segundo Overholt (2017) | | |
|---|---|----------------------|------------------------|
| $D^* = 1,5$ | Teste 1 | Teste 2 | Teste 3 |
| $D^*/4$ (malha grossa) | 0,37 | 0,37 | 0,37 |
| $D^*/10$ (malha moderada) | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| $D^*/16$ (malha fina) | 0,09 | 0,09 | 0,09 |
| Maior dimensão da célula adotada neste trabalho | 0,31 ($D^*/4,65$) | 0,3 ($D^*/4,5$) | 0,31 ($D^*/4,65$) |

3.1.2 Resultados

Os resultados da altura da interface da camada de fumaça – AICF (ou z , ou H^l); temperatura média da camada de fumaça – TMCF e temperatura média da camada livre de fumaça – TMLF obtidas neste trabalho, utilizando os programas FDS (Versão 6.4.0), CFAST (Versão 7.1.2) e B-RISK (Versão 2015.07) estão apresentados nas figuras 3-3 a 3-29, nestas mesmas figuras tem-se também, os resultados de Yi *et al.*, 2005). Convém observar que a CBPMSP IT 15:2015 utiliza o termo “zona livre de fumaça” e neste trabalho optou-se por utilizar o termo “camada livre de fumaça”.

Para cada teste foram realizadas comparações da altura da camada de fumaça baseada em imagens visuais extraídas do trabalho de Yi *et al.* (2005) e de imagens retiradas dos resultados gerados pelo FDS neste trabalho.

3.1.2.1 Análise dos resultados do Teste 1

Nas figuras de 3-3 a 3-11 tem-se os resultados, obtidos neste trabalho e os obtidos por Yi *et al.* (2005) para o Teste 1.

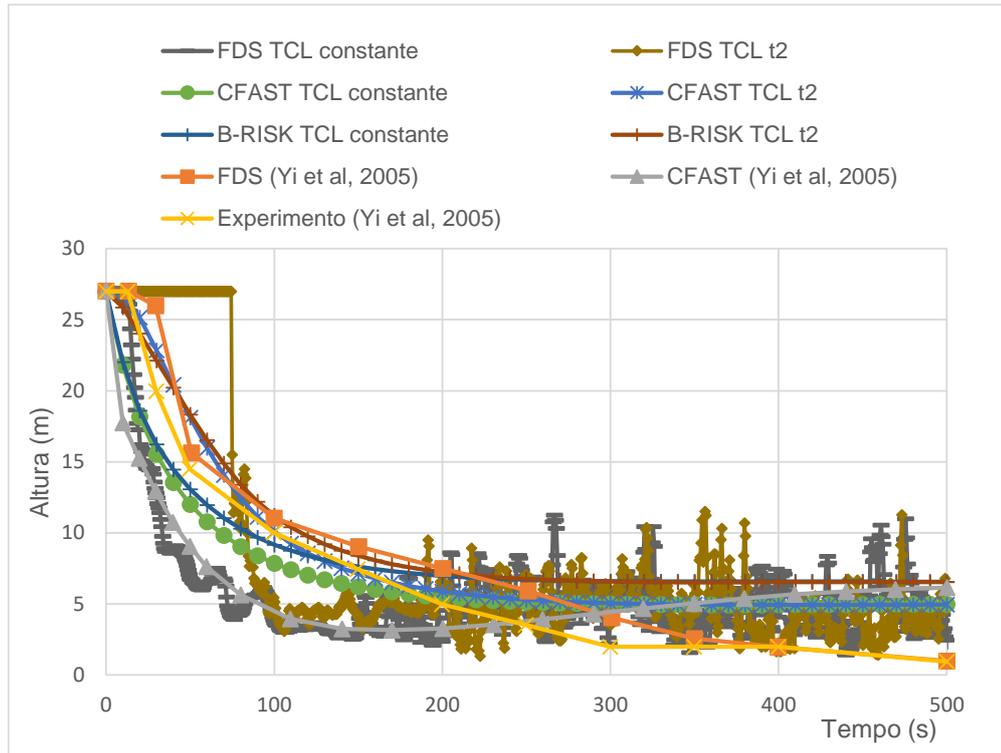


Figura 3-3: Altura da interface da camada de fumaça

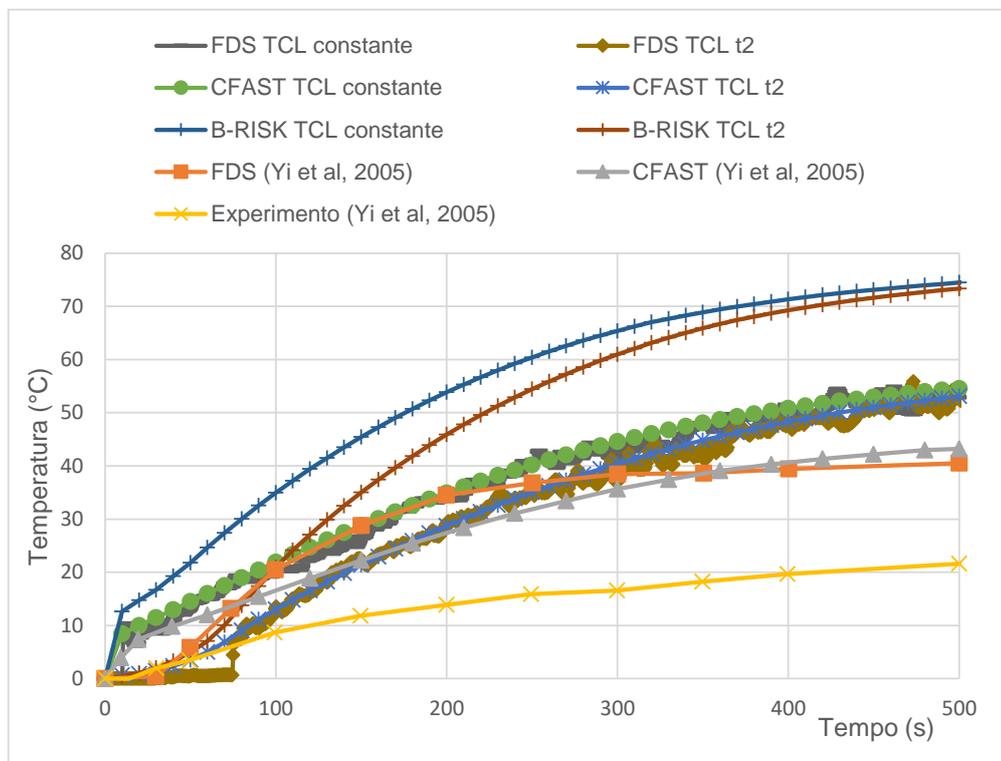


Figura 3-4: Elevação da temperatura média da camada de fumaça

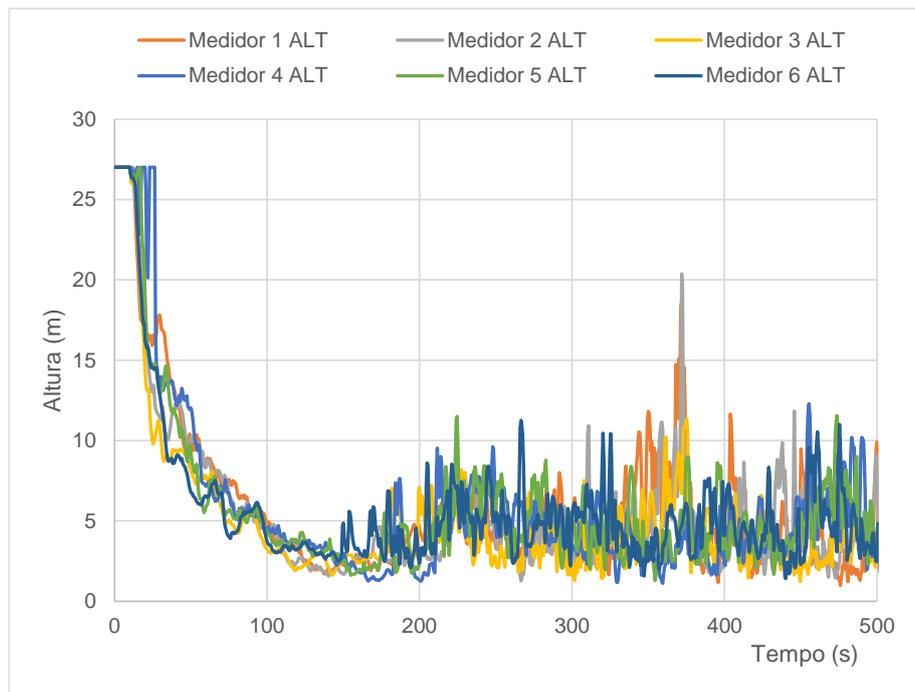


Figura 3-5: Altura da interface da camada de fumaça – TCL constante, medida das respectivas árvores de termopares, M1, M2, M3, M4, M5 e M6.

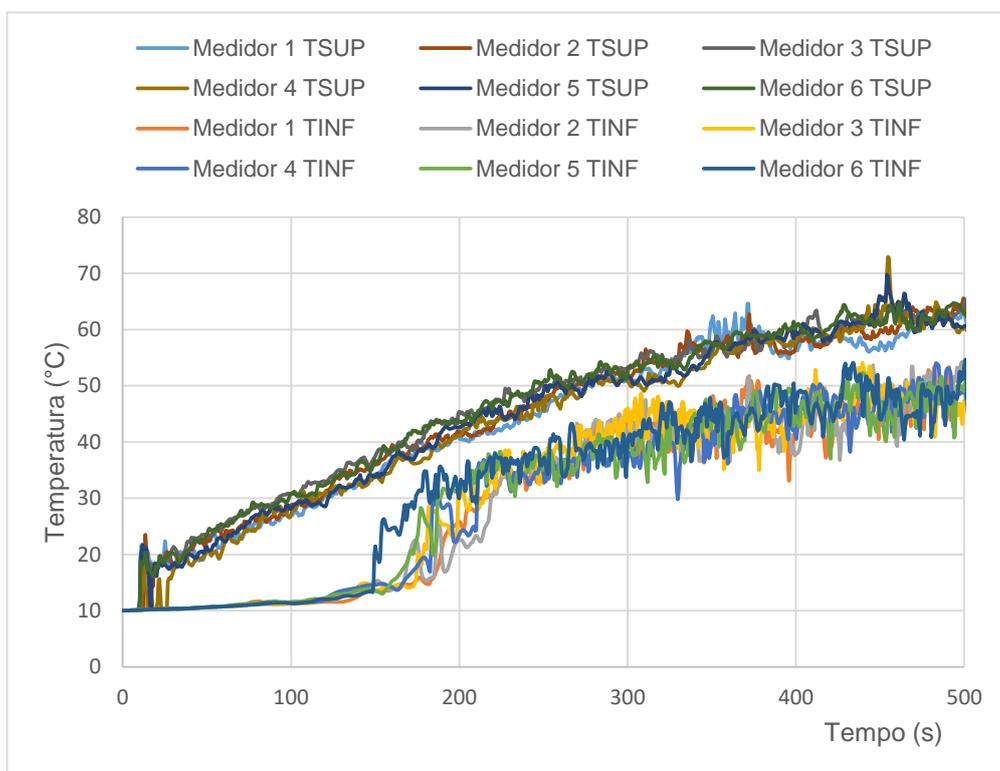


Figura 3-6: Elevação da temperatura média da camada de fumaça – TCL constante, medida das respectivas árvores de termopares, M1, M2, M3, M4, M5 e M6

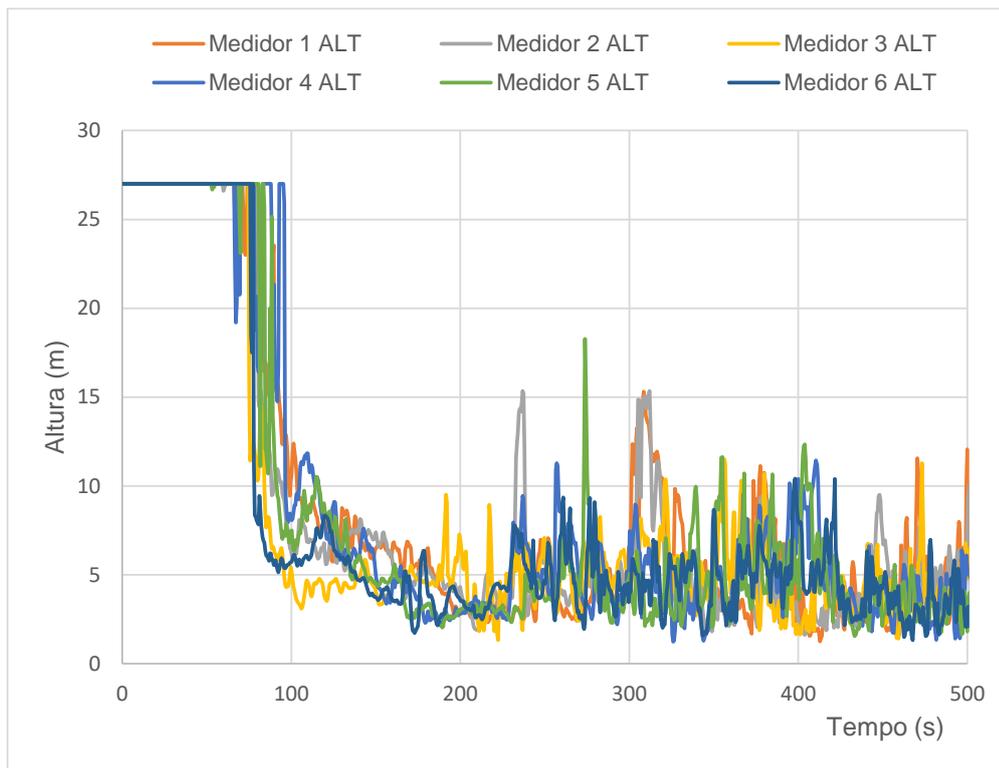


Figura 3-7: Altura da interface da camada de fumaça – TCL t^2 , medida das árvores de termopares, M1, M2, M3, M4, M5 e M6

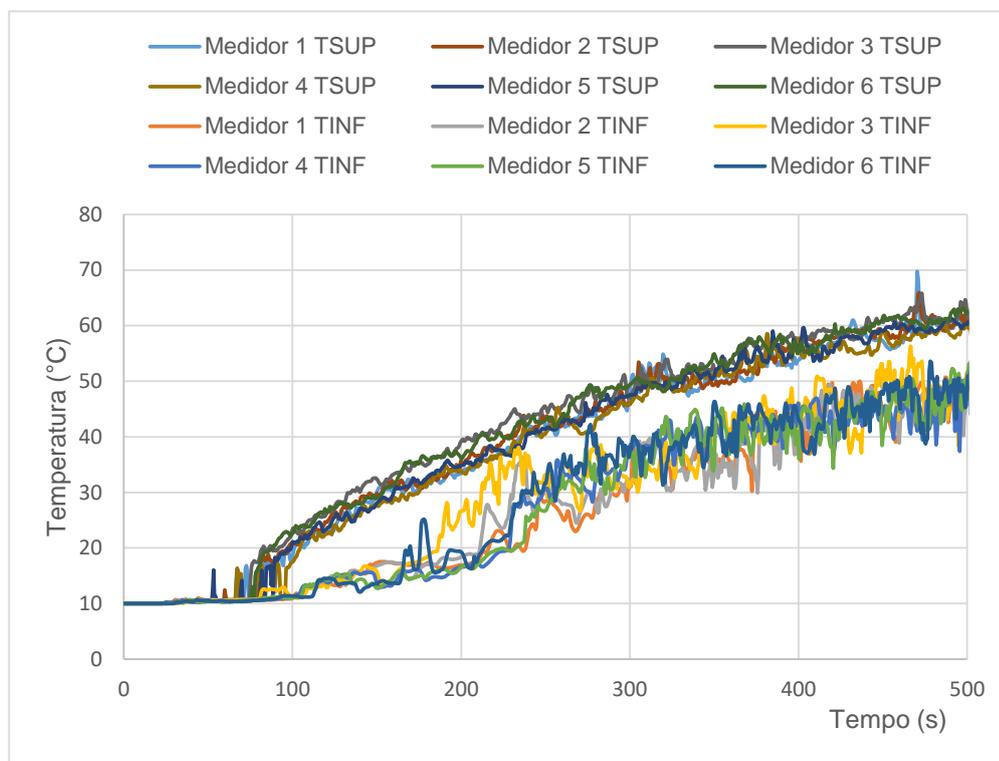


Figura 3-8: Elevação da temperatura média da camada de fumaça – TCL t^2 , medida das árvores de termopares, M1, M2, M3, M4, M5 e M6

No Teste 1, com uma abertura (janela) localizada a 10,5 m acima do piso, e extração mecânica no teto, o experimento e o resultado calculado por Yi *et al.* (2005) com o FDS demonstraram que a interface da camada de fumaça desceu praticamente até o piso aos 500s após o início do fogo. Os resultados obtidos por Yi *et al.* (2005) com o CFAST levaram a uma menor AICF, em comparação com os demais resultados apresentados pelo autor, para o tempo de até 250 s, chegando a uma altura de 6 m aos 500 s, diferenciando muito dos demais resultados apresentados pelo autor.

Em relação aos resultados obtidos neste trabalho, nota-se que o FDS apresenta uma variação significativa (valores com saltos) nos resultados do Medidor 6 (Figura 3-5), a partir dos 150 s para a análise que considerou a TCL constante. No gráfico da Figura 3-5 tem-se a AICF obtida nos seis medidores. No gráfico da Figura 3-6 tem-se as TMCF nos seis medidores (grupo de dados localizado na parte superior do gráfico) e também as TMLF (grupo de dados localizado na parte inferior do gráfico).

Observando a Figura 3-5, nota-se um salto na leitura do Medidor 6 aos 150 s (também apresentado na Figura 3-3. Esse salto na AICF coincide com o salto na TMLF obtido com o mesmo medidor e apresentado na Figura 3-6. Supõe-se que neste instante a camada de fumaça atinge o piso (conforme os critérios de cálculo do FDS) onde o medidor está localizado. Por esse motivo, tem-se a instabilidade da leitura da AICF (saltos no gráfico) e, assim, a TMLF apresenta uma elevação súbita, aproximando da TMCF, colaborando para a verificação de que a fumaça atingiu o piso neste local. Essa observação será utilizada nas análises seguintes feitas neste trabalho, ou seja, ao se observar a instabilidade na leitura da AICF, será considerado que a interface alcançou o piso. Sendo assim, nas figuras de comparação dos resultados obtidos pelos diferentes programas, será apresentado apenas o resultado do medidor, calculado com o FDS, que demonstrou o menor tempo para que a interface atinja o piso. Caso a interface não atinja o piso, a leitura apresentada será a que demonstre menor AICF.

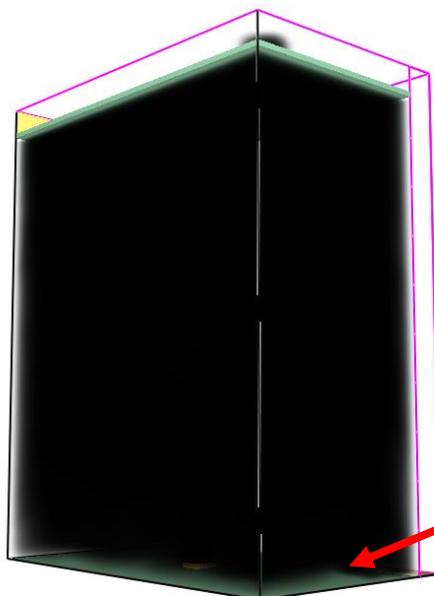


Figura 3-9: A fumaça atinge o piso no medidor 6 aos 150 s.

Analisando os resultados obtidos com o FDS para a TCL constante, conforme já comentado, a fumaça atinge o piso aos 150 s no local do Medidor 6, e a partir dos 220 s todos os demais medidores demonstram que a fumaça atingiu o piso. Observa-se que o tempo de 220 s, quando a fumaça atinge o piso em todos os medidores, é bem inferior ao tempo de 500 s obtido experimentalmente e também calculado com o FDS por Yi *et al.* (2005).

Yi *et al.* (2005) apesar de mencionarem que a TCL no experimento foi de 3.000 kW, reportam, em outra parte do trabalho, que o incêndio foi modelado no CFAST, primeiramente, como quadrático ultra rápido (TCL t^2) e posteriormente com uma redução na TCL constante deduzida a partir de cada experimento. A redução na TCL não é especificada pelos autores e, portanto, em todas as simulações deste trabalho, o patamar da TCL foi tomado igual a 3.000 kW, tanto nas simulações TCL constante quanto nas simulações com TCL t^2 .

Obviamente, as diferenças entre as TCLs utilizadas nas simulações deste trabalho e as utilizadas por Yi *et al.* (2005) devem explicar a diferença no tempo para a fumaça atingir o piso, de 220 s calculado pelo FDS neste trabalho contra 500 s calculado por Yi *et al.* (2005) com o mesmo programa.

Além das diferenças entre a TCL utilizada neste trabalho e as que de fato foram utilizadas por Yi *et al.* (2005), as diferenças nas versões dos programas também podem

justificar parte das diferenças entre os resultados obtidos neste trabalho e os obtidos pelos autores. Assim, os resultados obtidos neste trabalho devem ser analisados de maneira mais qualitativa. As análises com a TCL t^2 foram realizadas neste trabalho com o objetivo de simular o tempo que leva para o desenvolvimento pleno do incêndio (patamar da TCL) e também porque Yi *et al.* (2005) comentam que fizeram o mesmo nas suas simulações.

Observando os resultados obtidos neste trabalho com o FDS para a AICF (Figura 3-3), nota-se que, para a simulação com TCL t^2 a AICF se mantém superior à obtida na análise com TCL constante, porém, após 100 s, os resultados se aproximam, com o Medidor 3 da análise com TCL t^2 indicando que a fumaça chega ao piso aos 190 s (Figura 3-7).

As mesmas observações podem ser feitas para a AICF obtida neste trabalho com o CFAST e com o B-RISK, que apresentam uma aproximação dos resultados com TCL constante e t^2 para o tempo de 200s. Aos 500 s, o B-RISK prevê uma AICF de 6,54 m e o CFAST de 4,96 m independente da TCL ser constante ou t^2 . Os resultados do CFAST obtidos por Yi *et al.* (2005) levam a AICF igual a 6 m aos 500 s, valor intermediário aos obtidos com o CFAST e B-RISK neste trabalho.

De maneira geral, as análises realizadas neste trabalho com TCL t^2 apresentam, inicialmente, uma maior AICF em comparação com as mesmas análises com TCL constante. Ao final, acima dos 200 s não há influência da TCL ter sido considerada constante ou t^2 (Figura 3-3).

Observa-se que, de maneira geral, os resultados obtidos com o CFAST e o B-RISK indicam para uma estabilização da AICF próxima aos 5 ou 6 m aos 500 s, não indicando que a fumaça chega ao piso como foi observado experimentalmente e calculado com o FDS (Figura 3-3).

Os resultados da AICF obtidos com o FDS por Yi *et al.* (2005) se aproximam dos resultados experimentais ao longo de toda a simulação. Os resultados obtidos neste trabalho com os programas de zonas (CFAST e B-RISK) se aproximam do experimental até os 200 s. A partir deste tempo todos estes apresentam valores da AICF superior ao experimental (Figura 3-3).

Nos resultados obtidos neste trabalho com o FDS (Figura 3-3), nota-se que para a TCL t^2 os valores da AICF ficam acima do experimento até 75 s (exatamente o tempo para se chegar ao patamar da TCL). Durante o restante da simulação com TCL t^2 e durante toda a

simulação com TCL constante, os valores obtidos neste trabalho com o FDS ficam abaixo dos experimentais, indicando uma previsão menos segura da AICF. O termo seguro ou segura, utilizado neste trabalho, se refere à condição de que quanto maior a AICF e quanto menor a TMCF mais segura será as condições do ambiente para os usuários.

Em relação à temperatura média da camada de fumaça (TMCF) observa-se que todos os resultados obtidos neste trabalho e, também, os obtidos por Yi *et al.* (2005) com os programas FDS e CFAST, estão acima dos experimentais em praticamente todo o tempo do incêndio (Figura 3-4).

Aos 500 s os resultados da TMCF (Figura 3-4) obtidos por Yi *et al.* (2005) com o FDS e CFAST, indicam uma elevação da temperatura de aproximadamente 40°C, superior à obtida experimentalmente de aproximadamente 22°C, e inferior aos valores obtidos neste trabalho com o FDS e o CFAST, que ficam próximos dos 50°C e mais ainda do que os valores obtidos com o B-RISK que ficam próximos aos 73°C. A menor TMCF calculada por Yi *et al.* (2005) deve estar relacionada à redução no patamar da TCL feita pelos autores. Entre os resultados calculados neste trabalho, convém destacar que o B-RISK previu a maior AICF, ou seja condições mais seguras em relação aos outros programas e previu a maior TMCF, nesse caso, condição mais insegura do que o previsto pelos outros programas.

Em todos os casos analisados neste trabalho, comparando a TCL constante com a TCL t^2 , nota-se que ao considerar a TCL t^2 há um retardo na elevação das TMCF, no início do incêndio, aproximando do resultado experimental (Figura 3-4).

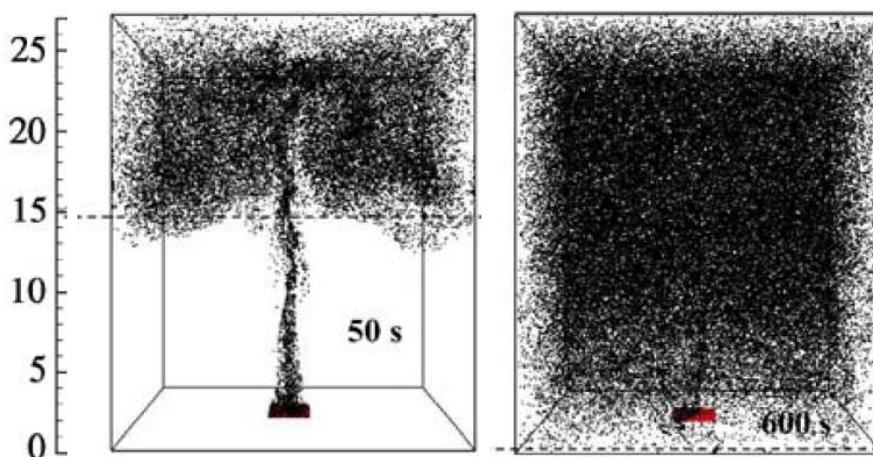


Figura 3-10: Resultados obtidos por Yi *et al.* (2005) com o programa FDS

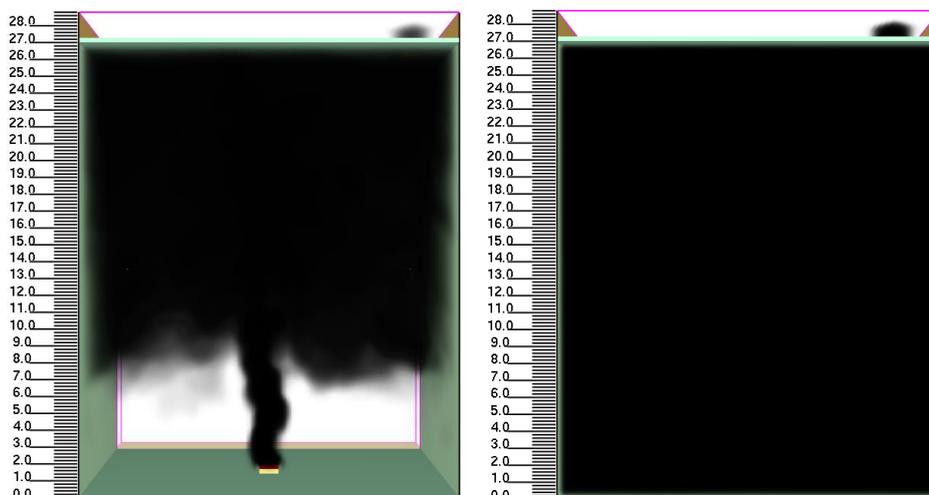


Figura 3-11: Resultados da AICF para o Teste 1 nos tempos de 50 s e 560 s, para este trabalho

Yi *et al.* (2005) apresentam a figura 3-10 e na Figura 3-11, obtida deste trabalho, para a AICF nos tempos de 50 s e 560 s (o tempo correto de simulação foi de 560 s). As alturas das camadas de fumaça foram baseadas visualmente nas figuras do trabalho dos autores e, nas imagens geradas neste trabalho a partir do programa Smokeview. Na Figura 3-10 a camada da fumaça atinge aproximadamente 15 m nos primeiros 50 s de simulação, para este mesmo tempo a AICF deste trabalho atinge aproximadamente 8 m (esse valor é próximo ao observado no gráfico da Figura 3-5 para a simulação FDS TCL constante). Aos 560 s da simulação, Figura 3-11 (apesar de Yi *et al.* (2005) informarem em 600 s), os autores indicam uma AICF tocando o piso. Para este mesmo tempo a camada de fumaça deste trabalho também ocupa todo o átrio. Os resultados visuais demonstram que a AICF encontrada neste trabalho atinge o piso mais rapidamente que no trabalho de Yi *et al.* (2005).

3.1.2.2 *Análise dos resultados do Teste 2*

Nas figuras de 3-12 a 3-20 tem-se os resultados obtidos neste trabalho e os obtidos por Yi *et al.* (2005) para o teste 2.

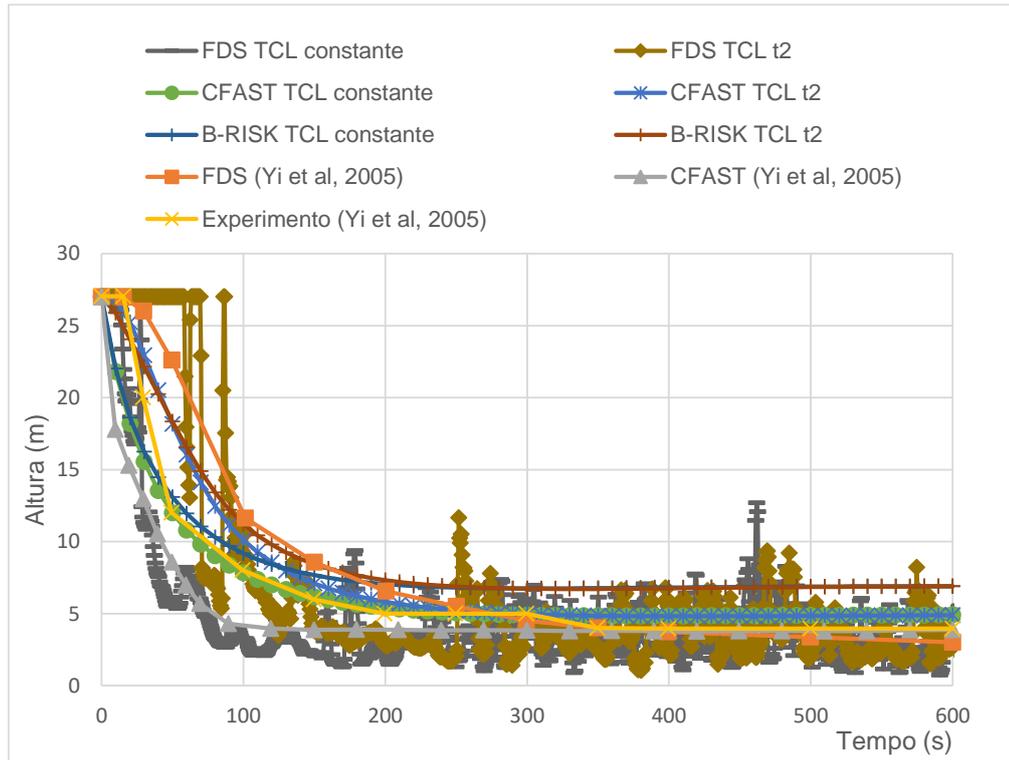


Figura 3-12: Altura da interface da camada de fumaça

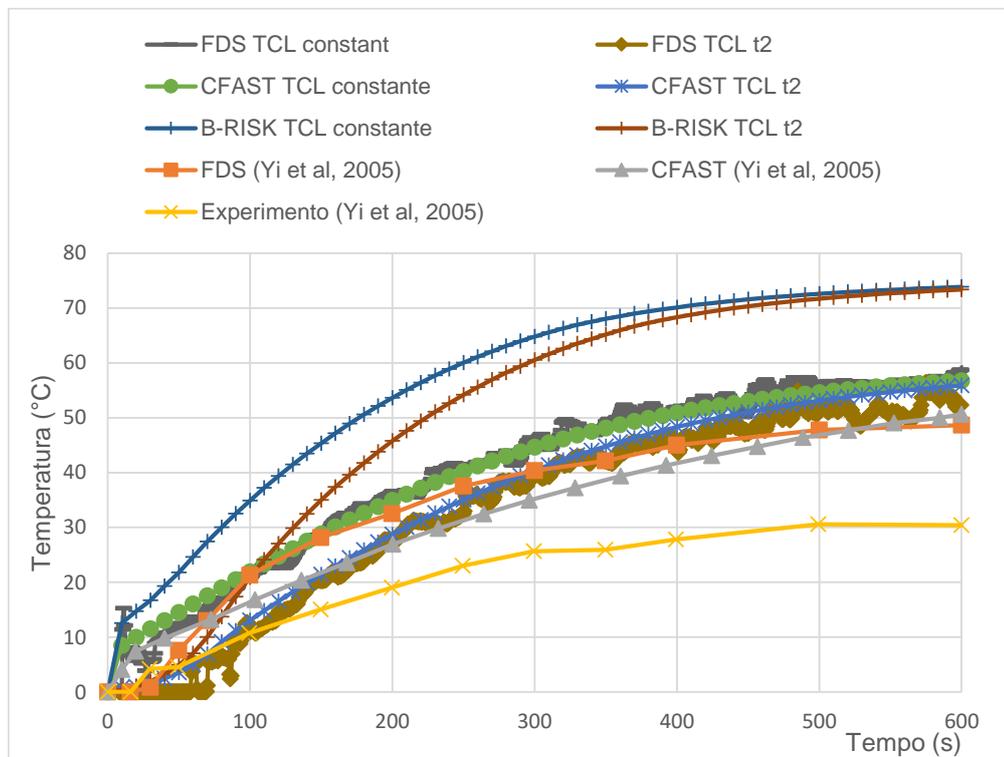


Figura 3-13: Elevação da temperatura média da camada de fumaça

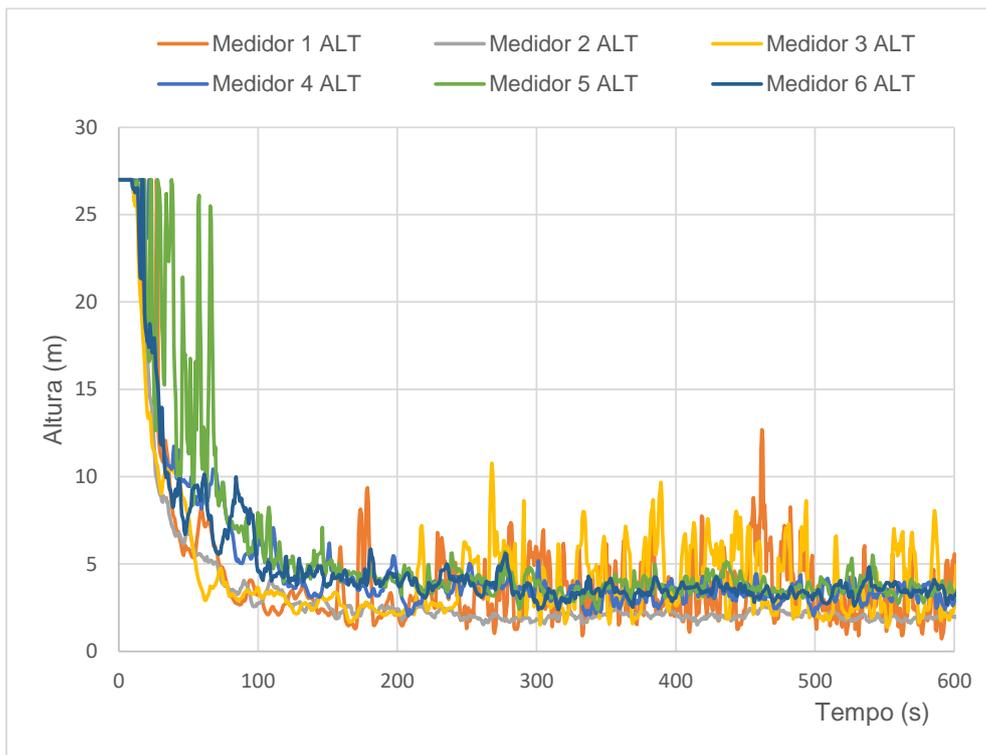


Figura 3-14: Altura da interface da camada de fumaça – TCL constante, medida das árvores de termopares, M1, M2, M3, M4, M5 e M6

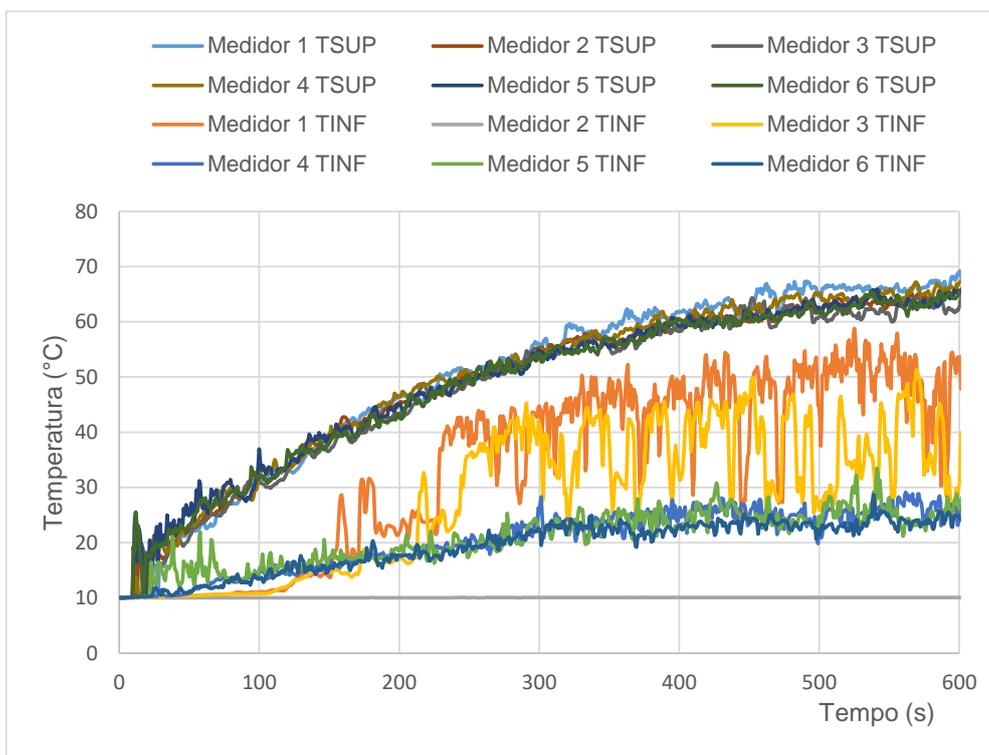


Figura 3-15: Elevação da temperatura média da camada de fumaça – TCL constante, medida das árvores de termopares, M1, M2, M3, M4, M5 e M6

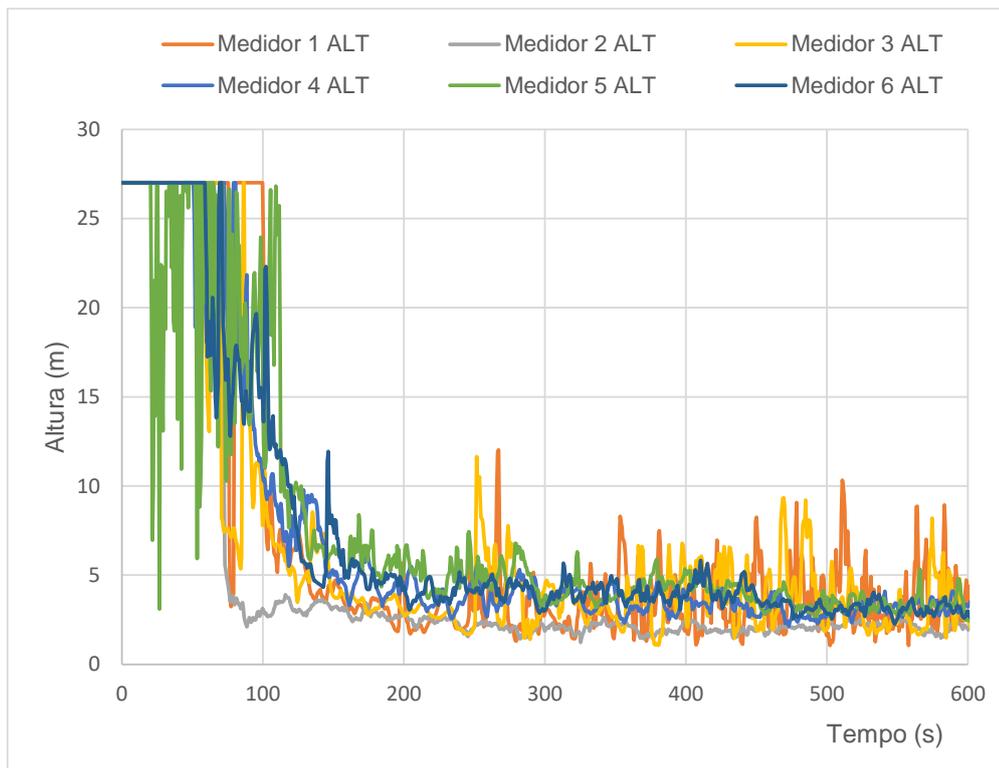


Figura 3-16: Altura da interface da camada de fumaça – TCL t^2 , medida das árvores de termopares, M1, M2, M3, M4, M5 e M6

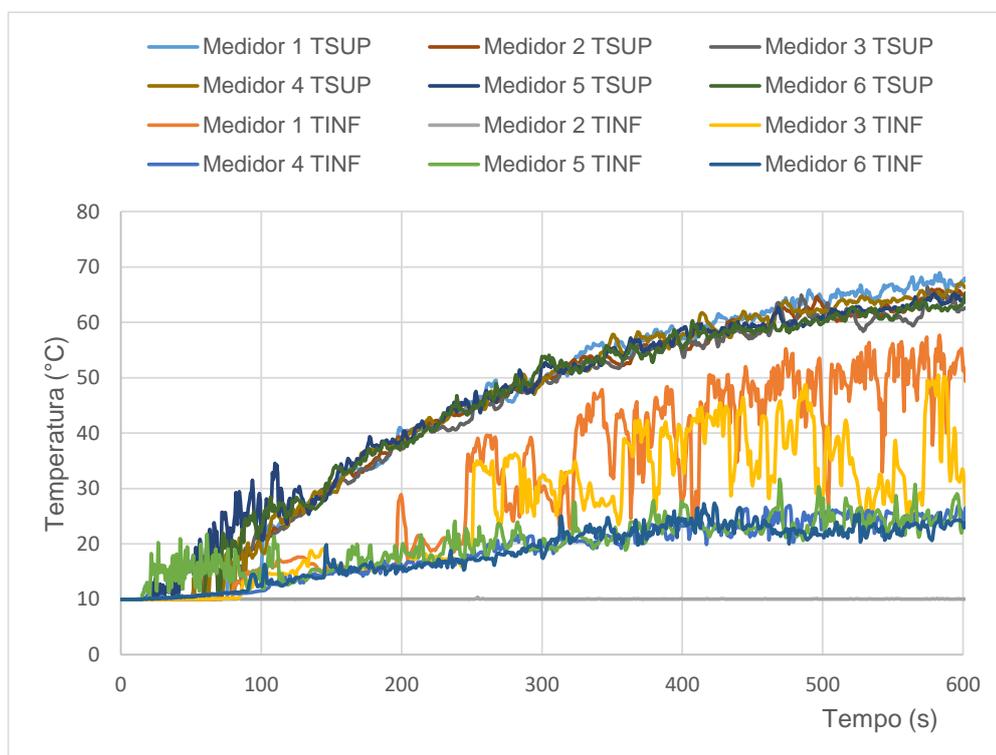


Figura 3-17: Elevação da temperatura média da camada de fumaça – TCL t^2 , medida das árvores de termopares, M1, M2, M3, M4, M5 e M6

No Teste 2, com uma abertura (porta) e extração mecânica no teto, o experimento e os resultados calculados por Yi *et al.* (2005) demonstraram que a altura da interface da camada de fumaça diminuiu até os 4 m aos 600 s. Os resultados obtidos por Yi *et al.* (2005) com o CFAST levaram a uma menor AICF, em comparação com os demais resultados apresentados pelo autor, para o tempo de até 350 s, e nota-se uma boa aproximação de todos os resultados obtidos pelo autor (CFAST, FDS e experimento) após os 350 s. Os resultados da AICF obtidos por Yi *et al.* (2005) com o CFAST são inferiores aos obtidos com o FDS durante todo o incêndio.

Em relação aos resultados obtidos neste trabalho, nota-se que o FDS apresenta uma variação significativa (valores com saltos) nos resultados do Medidor 1 (Figura 3-14), a partir dos 170 s para a análise que considerou a TCL constante, indicando que a fumaça atinge o piso neste local. Aos 220 s o Medidor 3 indica (valores com salto) que a fumaça também atinge o piso. No local dos demais medidores não há indício de que a fumaça atingiu o solo com a AICF variando entre aproximadamente 2 m (Medidor 2) e 4 m (medidores 4, 5 e 6, localizados em um dos lados do átrio do laboratório) Figura 3-14. Convém lembrar que o Medidor 2 está localizado próximo à abertura (porta) e que os medidores 4, 5 e 6 estão no lado oposto a esta abertura. Assim, na maior parte do átrio, a fumaça não atinge o piso. Nos resultados calculados e experimentalmente (Figura 3-12), apresentados por Yi *et al.* (2005), a fumaça não atinge o piso chegando aos 4 m aos 600 s. Nos resultados apresentados por Yi *et al.* (2005) não fica claro em que local foi medida a AICF e a TMCF, motivo pelo qual foram utilizados os 6 medidores nas simulações com o FDS. Mais uma vez, a diferença na TCL utilizada neste trabalho e a que de fato foi utilizada por Yi *et al.* (2005) e as diferenças nas versões dos programas, podem justificar parte das diferenças entre os resultados obtidos neste trabalho e os obtidos pelos autores.

Observando os resultados obtidos neste trabalho com o FDS (Figura 3-12), nota-se que, para a simulação com TCL t^2 a AICF se mantém superior à obtida na análise com TCL constante, porém, após 120s, os resultados se aproximam com o Medidor 3 da análise com TCL t^2 indicando que a fumaça chega ao piso aos 250 s (Figura 3-16). As mesmas observações podem ser feitas para os resultados obtidos neste trabalho com o CFAST e o B-RISK, que apresentam uma aproximação dos resultados com TCL constante e t^2 para o tempo de 200s.

Os resultados da AICF obtidos neste trabalho com o CFAST com TCL constante se aproximam muito dos resultados experimentais.

Aos 600 s, o B-RISK prevê uma AICF de 6,9 m e o CFAST o valor de 4,9 m independente da TCL ser constante ou t^2 . Os resultados do CFAST obtidos por Yi *et al.* (2005) indicam uma AICF de 4 m aos 600 s, valor inferior aos obtidos com o CFAST e B-RISK neste trabalho (Figura 3-12).

De maneira geral, as análises realizadas neste trabalho com TCL t^2 apresentam, inicialmente, uma maior AICF em comparação com as mesmas análises com TCL constante. Ao final, a partir dos 200 s não há influência da TCL ter sido considerada constante ou t^2 (Figura 3-12).

Os resultados da AICF obtidos com o FDS por Yi *et al.* (2005) se aproximam dos resultados experimentais a partir dos 250 s. Todos os resultados obtidos com os programas de zonas (CFAST e B-RISK) neste trabalho apresentam valores da AICF superior ao experimental (Figura 3-12).

Nos resultados obtidos neste trabalho com o FDS, nota-se que para a TCL t^2 os valores da AICF ficam acima dos resultados do experimento até 70 s. Durante o restante da simulação com TCL t^2 e durante toda a simulação com TCL constante, os valores obtidos neste trabalho com o FDS ficam abaixo dos experimentais, indicando uma previsão segura da AICF (Figura 3-12).

Em relação à temperatura média da camada de fumaça (TMCF), Figura 3-13, observa-se que todos os resultados, obtidos neste trabalho e também os obtidos por Yi *et al.* (2005) com os programas FDS e CFAST, estão acima dos valores experimentais em praticamente todo o tempo do incêndio.

Aos 600 s os resultados da TMCF (Figura 3-13) obtidos por Yi *et al.* (2005) com o FDS e CFAST, indicam uma elevação da temperatura de aproximadamente 50°C, superior à obtida experimentalmente de aproximadamente 30°C, e inferior aos valores obtidos neste trabalho com o FDS e CFAST, que ficam entre 50°C e 60°C e mais ainda do que o valor obtido com o B-RISK, que fica próximo aos 73°C. A menor TMCF calculada por Yi *et al.* (2005) deve estar relacionada à redução no patamar da TCL feita pelos autores. Entre os resultados calculados neste trabalho, convém destacar que o B-RISK previu a maior AICF,

ou seja condições mais seguras em relação aos outros programas e previu a maior TMCF, nesse caso, condição mais insegura do que o previsto pelos outros programas.

Em todos os casos analisados neste trabalho, comparando a TCL constante com a TCL t^2 , nota-se que ao considerar a TCL t^2 há um retardo na elevação das TMCF, no início do incêndio, aproximando do resultado experimental (Figura 3-13).

Segundo Klote *et al.* (2012), nos capítulos 15 e 16 do livro “*Handbook of Smoke Control Engineering*”, bem como Klote (2014) em “*Atrium Calc*”, o cálculo de vazão do sistema de extração de fumaça atinge o valor de $16,36\text{m}^3/\text{s}$ (valor próximo ao do experimento de Yi *et al.* 2005, de 15 m^3), para $z = 4\text{ m}$ (lembrando que z é a AICF). A CBPMSP IT 15:2015 calcula a vazão do sistema de extração de fumaça utilizando as equações 3, 4 e 5 Parte 5 da IT, sendo que a Equação 2-3 (de cálculo da vazão mássica da coluna de fumaça), varia de acordo com o valor de z (altura de projeto da camada de fumaça acima do piso, determinada segundo parâmetros da IT). Para a condição de $z \leq z_l$ a massa da fumaça é determinada pela Equação 2-4. E a Equação 2-5 é utilizada para o cálculo de volume de fumaça produzido. Com o uso das equações da CBPMSP IT 15:2015 citadas anteriormente, o valor calculado da vazão do sistema de extração de fumaça foi de $23,54\text{m}^3$, para $z = 4\text{ m}$, sem considerar os possíveis vazamentos que segundo o item 11.16.2 da Parte 5 da CBPMSP IT 15:2015 deve ser acrescido de 25% sobre o resultado da Equação 2-5, pois admite-se que as condições dos experimentos sejam bem controladas.

Essa diferença de resultados de vazão do sistema de extração de fumaça, entre o valor obtido com o resultado extraído de Klote *et al.* (2012) e o resultado obtido com a Instrução Técnica, está associado à temperatura e densidade da fumaça. Klote *et al.* (2012) obtém tais valores com as equações 16.24 e 16.29, de temperatura e densidade, respectivamente. Enquanto a Instrução Técnica determina a temperatura da camada de fumaça de $70\text{ }^\circ\text{C}$ e densidade da camada de fumaça de $0,92\text{ kg}/\text{m}^3$ para casos em que a edificação for protegida por chuveiros automáticos e, temperatura de $300\text{ }^\circ\text{C}$ e a densidade de $0,55\text{ kg}/\text{m}^3$ para os casos onde a edificação não tiver proteção de chuveiros automáticos. Portanto neste caso, considerando a AICF igual a 4 m , como observado experimentalmente, tem-se pelas equações de Klote *et al.* (2012) a TMCF igual a $173,23\text{ }^\circ\text{C}$ (contrário dos $300\text{ }^\circ\text{C}$ da Instrução Técnica) e densidade de $0,79\text{ kg}/\text{m}^3$ (contrário do valor de $0,55$ da Instrução Técnica), resultando na vazão do sistema de extração de $16,23\text{ m}^3$ (distinto dos $23,54\text{ m}^3$ da Instrução Técnica).

Observa-se que a consideração de temperaturas fixas pela CBPMSP IT 15:2015, de 70 °C e 300 °C, levou a resultados bem conservadores, com razão entre as vazões de $23,54/16,23 = 1,44$. Comparando com a vazão de 15 m³/s do sistema de extração utilizado no experimento, observa-se que o valor da vazão de 16,23 m³/s obtido com Klote *et al.* (2012) tem uma razão de $16,36/15 = 1,09$, bem próximo do valor do experimento.

A parte 5 da CBPMSP IT 15:2015 determina que o controle de fumaça quando feito de forma natural, ou seja, através de portas, janelas e outros, sendo a velocidade da introdução de ar superior a 1 m/s, a camada de fumaça deve ser projetada 1,5 m acima da abertura considerada. Neste caso a AICF foi de 4m, tendo a abertura 2,5 m de altura, estando assim de acordo com o parâmetro da Instrução Técnica.

No Teste 2, a vazão do sistema de extração de fumaça foi de 15 m³/s, considerando esta mesma vazão na abertura. Neste caso uma porta (abertura de 1,6 m de largura por 2,5 m de altura totalizando 4 m²) localizada junto ao piso e, sendo a velocidade igual a vazão dividida pela área da abertura, tem-se $15 \text{ m}^3/\text{s}/4\text{m}^2 = 3,75 \text{ m/s}$, valor este próximo do valor obtido com o FDS, conforme mostra a Figura 3-18. Observa-se que o valor de 3,75 m/s é maior que o valor definido pela Instrução Técnica no item 15.2.2.5, onde cita que a velocidade de introdução de ar deve ser menor ou igual a 2 m/s para aberturas naturais.

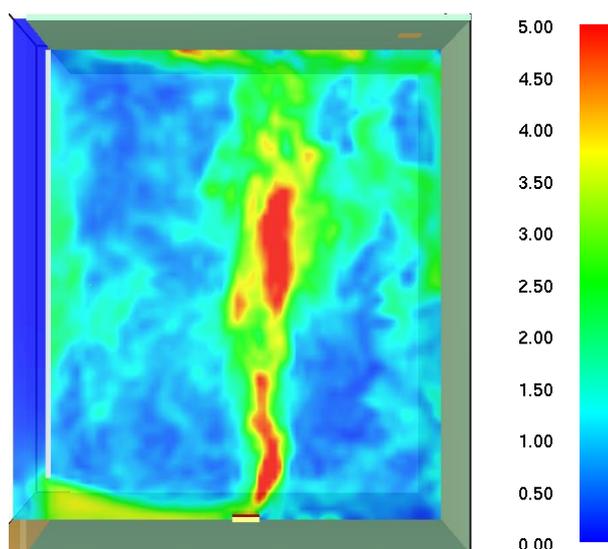


Figura 3-18: Velocidade da entrada de ar

Como citado anteriormente, a vazão do sistema de extração de fumaça, segundo parâmetros da Instrução Técnica, é de $23,54 \text{ m}^3/\text{s}$. Considerando o fator de 0,6 (item 11.22.2) e uma abertura de 4 m^2 , verifica-se que a velocidade de entrada de ar é igual a $0,6 \times 23,54 / 4 = 3,53 \text{ m/s}$, que é um valor próximo ao observado na simulação com o FDS, de aproximadamente $3,75 \text{ m/s}$, como mostra a Figura 3-18.

Limitando a velocidade a 2 m/s conforme parâmetros da Instrução Técnica, item citado anteriormente, é necessária uma área de abertura igual a $0,6 \times 23,54 / 2 = 7,06 \text{ m}^2$, bastante superior ao adotado no experimento, que foi de 4 m^2 .

Segundo a IT, o sistema de extração de fumaça mecânica pode-se constituir por diferentes dispositivos como grelhas, dutos, ventiladores de extração, entre outros. Quando a extração de fumaça ocorrer através de dutos, os mesmos devem ser dimensionados para uma velocidade máxima de 10 m/s quando construído em gesso acartonado ou alvenaria e uma velocidade máxima de 15 m/s , quando fabricado em chapa metálica. Quando o sistema ocorrer através de ventiladores de extração de fumaça, para áreas superiores a 1600 m^2 deve-se prever ventiladores em duplicatas tanto para sistema de extração de fumaça quanto para introdução de ar.

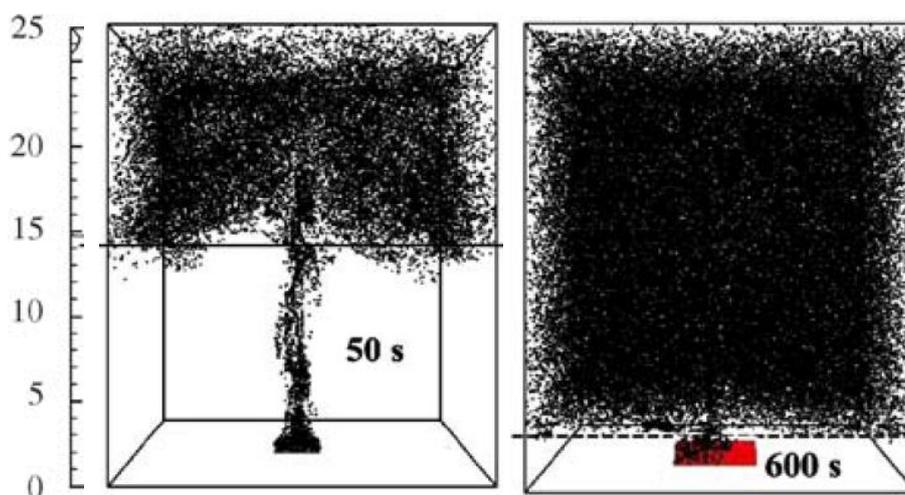


Figura 3-19: FDS de Yi *et al.* (2005)

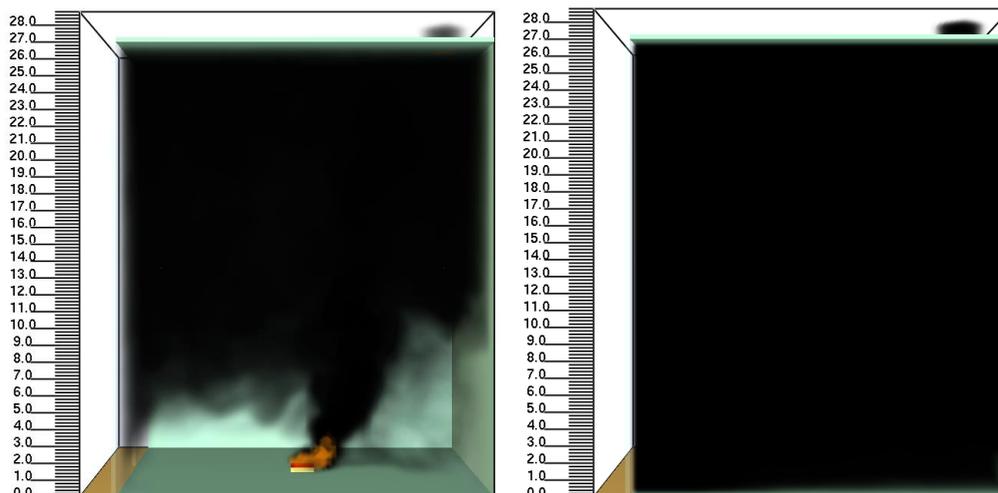


Figura 3-20: FDS deste trabalho para o Teste 2 – AICF nos tempos de 50 s e 620 s.

Yi *et al.* (2005) apresentam as imagens da Figura 3-19 para as AICF nos tempos de 50 s e 600 s, no entanto no Teste 2 o tempo de simulação foi de 620 s, assim como no Teste 1, as alturas das camadas de fumaça foram baseadas visualmente nas figuras do trabalho dos autores e nas imagens geradas neste trabalho a partir do Smokeview para os tempos de simulação apresentados. Na Figura 3-19 a camada de fumaça atinge 14 m nos primeiros 50 s de simulação. Para este mesmo tempo, 50 s, a AICF neste trabalho (Figura 3-20) sofre uma grande variação devido à entrada de ar pela abertura (porta) na lateral esquerda do átrio, fazendo com que a AICF atingisse alturas distintas, de 9 m do lado direito e 5 m do lado esquerdo (esse valor é próximo ao observado no gráfico da Figura 3-14 para a simulação FDS TCL constante, nos medidores M1, M2 e M3). Aos 620 s de simulação, Yi *et al.* (2005) indicam uma AICF aos 3 m (Figura 3-19); para este mesmo tempo a AICF neste trabalho (Figura 3-20) ocupa todo o átrio. Os resultados demonstram que a AICF encontrada neste trabalho diminui mais rápido nos primeiros segundos de simulação, atingindo o piso mais rapidamente que no trabalho de Yi *et al.* (2005), bem como no Teste 1, quando o resultado encontrado neste trabalho apresenta-se mais conservador.

3.1.2.3 *Análise dos resultados do Teste 3*

Nas figuras de 3-21 a 3-29 tem-se os resultados obtidos neste trabalho e os obtidos por Yi *et al.* (2005) para o teste 3.

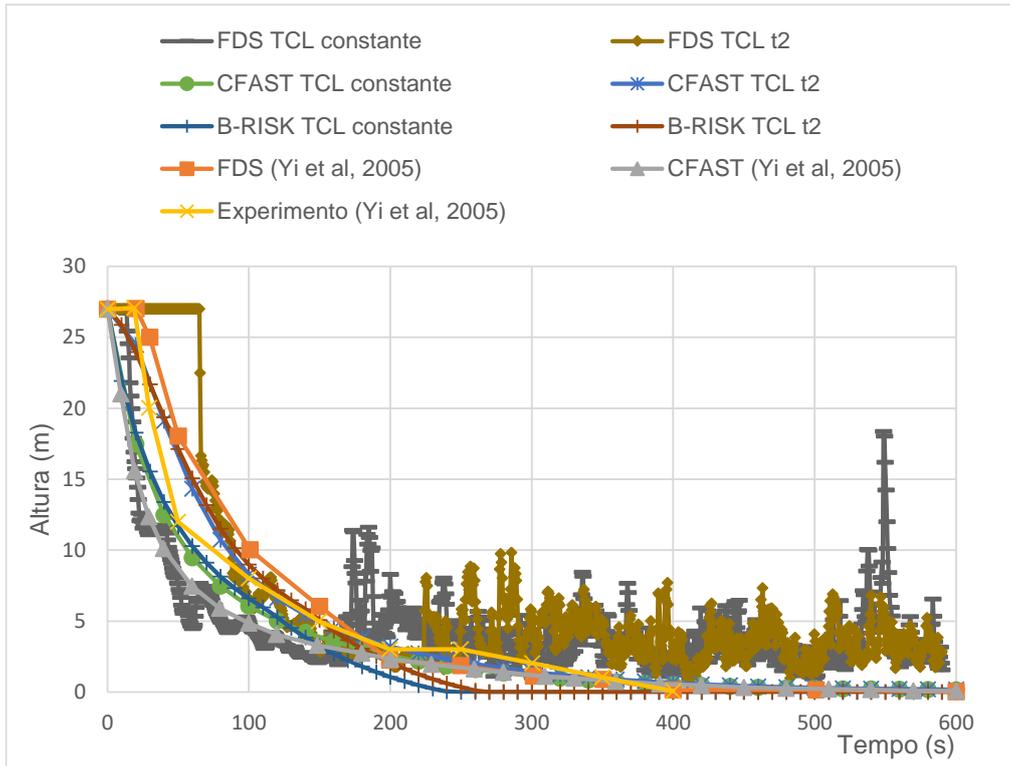


Figura 3-21: Altura da interface da camada de fumaça

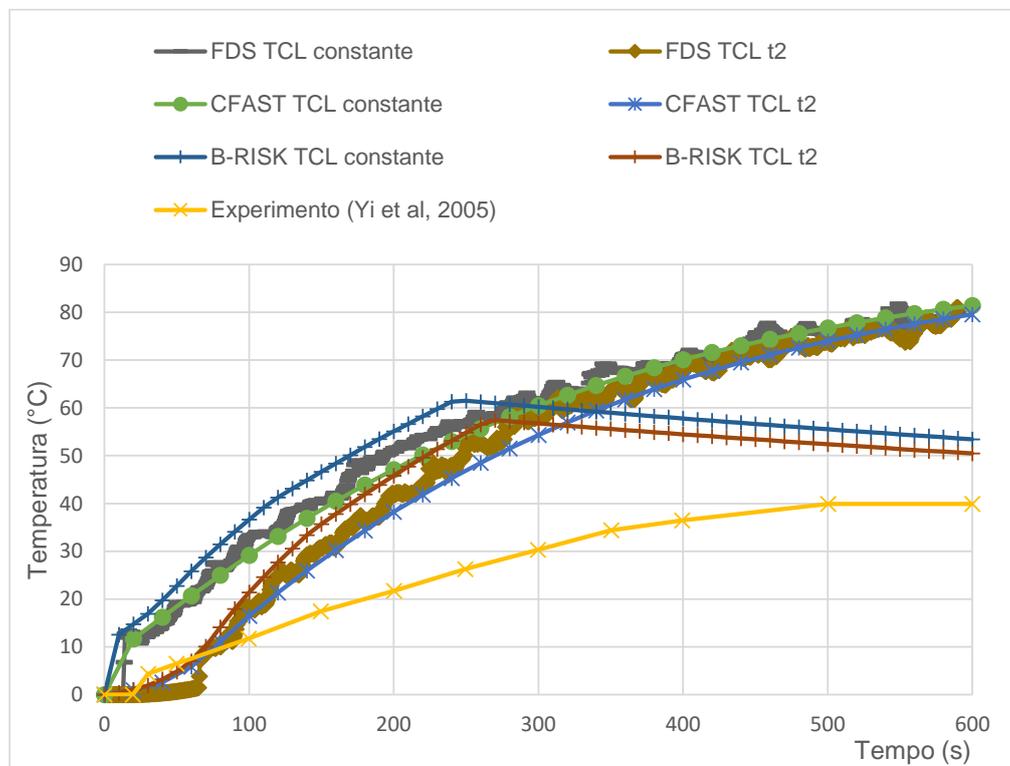


Figura 3-22: Elevação da temperatura média da camada de fumaça

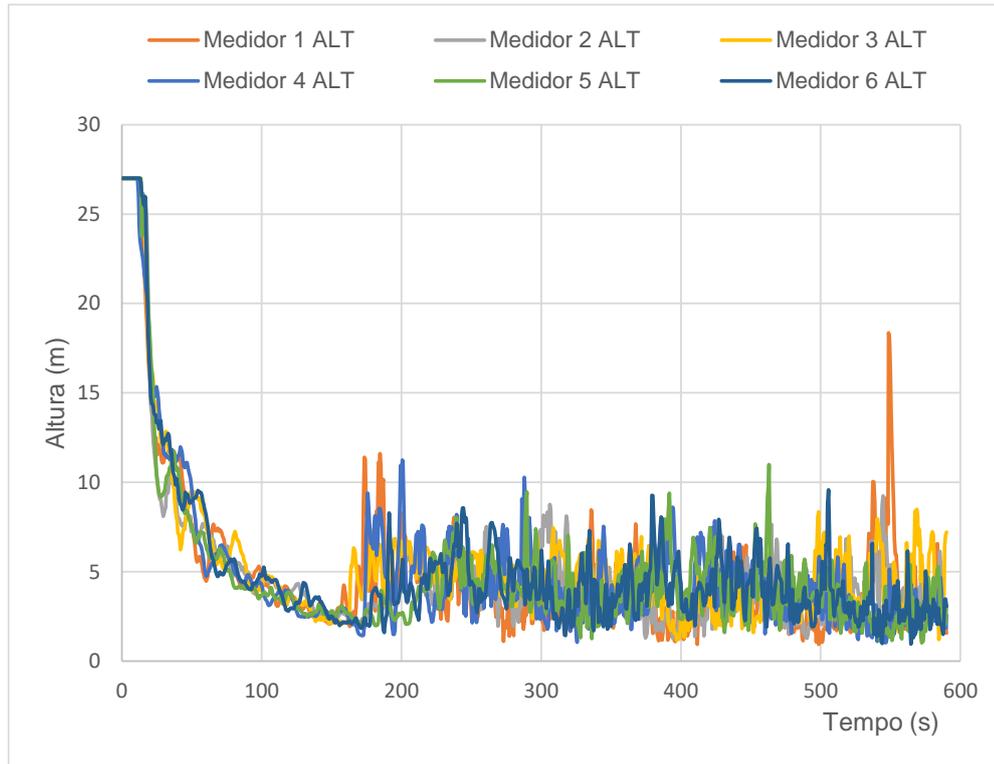


Figura 3-23: Altura da interface da camada de fumaça – TCL constante

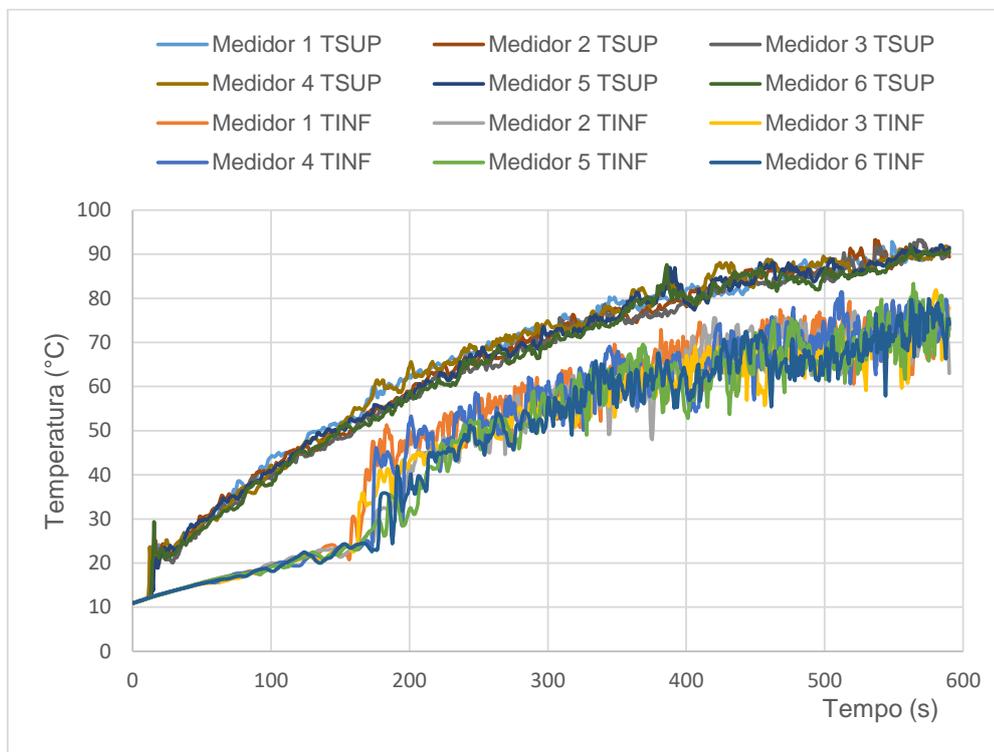


Figura 3-24: Elevação da temperatura média da camada de fumaça – TCL constante

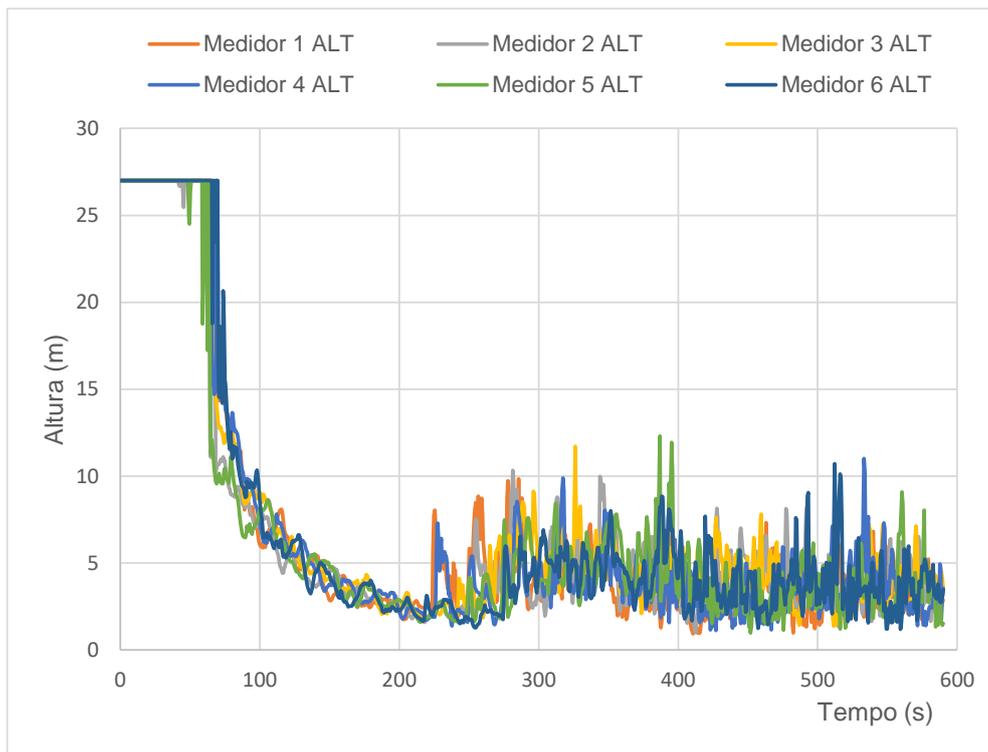


Figura 3-25: Altura da interface da camada de fumaça – TCL t^2

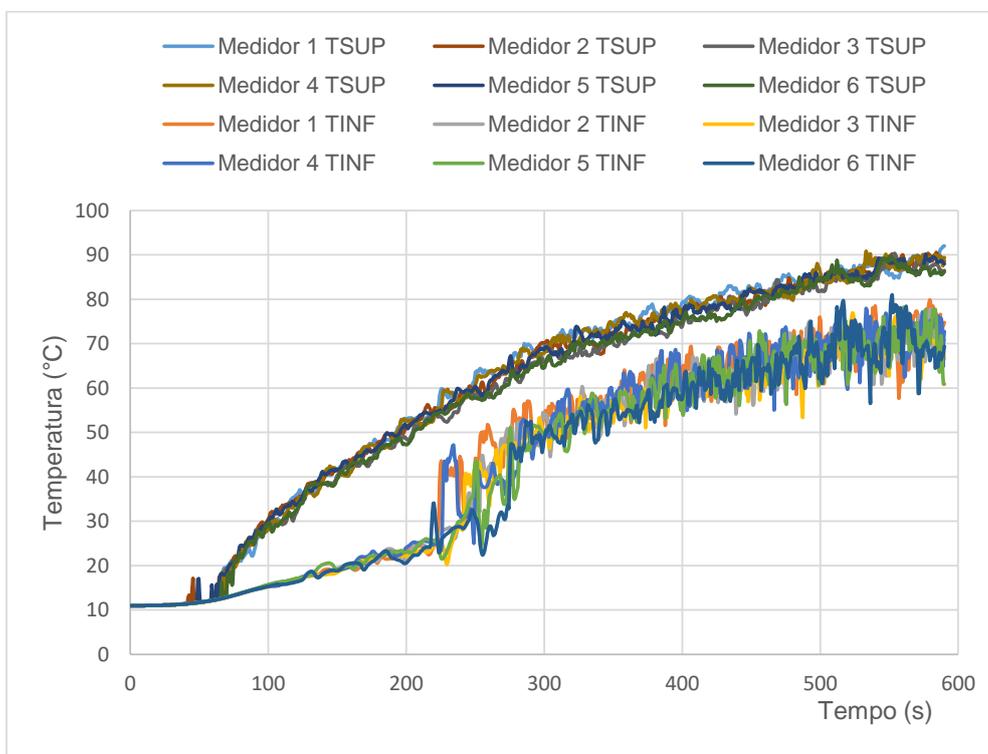


Figura 3-26: Elevação da temperatura média da camada de fumaça – TCL t^2

No Teste 3, sem nenhuma abertura e nenhum sistema de extração de fumaça, o experimento e os resultados calculados por Yi *et al.* (2005) demonstraram que a interface da camada de fumaça atingiu o piso aos 400s. Os resultados da AICF obtidos por Yi *et al.* (2005) com o CFAST são inferiores aos obtidos com o FDS até o tempo de 200 s, e se aproximam muito a partir deste tempo, conforme a Figura 3-21.

Em relação aos resultados obtidos neste trabalho, nota-se que o FDS apresenta uma variação significativa (valores com saltos) nos resultados do Medidor 1, a partir dos 170 s para a análise que considerou a TCL constante (Figura 3-23), e a partir dos 200 s todos os demais medidores demonstram que a fumaça atingiu o piso. Observa-se que o tempo de 200 s, quando a fumaça atinge o piso em todos os medidores, é inferior ao tempo de 400 s no qual a fumaça atinge o piso conforme observado por Yi *et al.* (2005).

Observando os resultados obtidos neste trabalho com o FDS, nota-se que, para a simulação com TCL t^2 a AICF se mantém superior à obtida na análise com TCL constante, porém, após 100s, os resultados se aproximam, com os resultados da análise com TCL t^2 indicando que a fumaça chega ao piso aos 230 s (Figura 3-21). As mesmas observações podem ser feitas para os resultados obtidos neste trabalho com o CFAST e o B-RISK, que apresentam uma aproximação dos resultados com TCL constante e t^2 para o tempo de 250s.

Os resultados da AICF (Figura 3-21) obtidos neste trabalho com o CFAST com TCL constante e TCL t^2 , se aproximam dos resultados experimentais.

De maneira geral, as análises realizadas neste trabalho com TCL t^2 apresentam, inicialmente, uma maior AICF em comparação com as mesmas análises com TCL constante. Ao final, a partir dos 250 s não há influência da TCL ter sido considerada constante ou t^2 (Figura 3-21).

Nos resultados obtidos neste trabalho com o FDS, nota-se que para a TCL t^2 os valores da AICF ficam acima do experimento até 90 s. Durante o restante da simulação com TCL t^2 e durante toda a simulação com TCL constante, os valores obtidos neste trabalho com o FDS ficam abaixo dos experimentais, indicando uma previsão segura da AICF (Figura 3-21).

Em relação à TCMF, (Figura 3-22) observa-se que todos os resultados, obtidos neste trabalho e, também, os obtidos por Yi *et al.* (2005) com os programas FDS e CFAST, estão acima dos experimentais em praticamente todo o tempo do incêndio.

Aos 600 s os resultados da TMCF (Figura 3-22) obtidos por Yi *et al.* (2005) com o FDS, indicam uma elevação da temperatura de aproximadamente 67°C, superior à obtida experimentalmente de aproximadamente 40°C, e inferior aos valores obtidos neste trabalho com o FDS e CFAST, e também com o CFAST obtido pelo Yi *et al.* (2005) que ficam entre 80°C e 85°C.

Em relação ao B-RISK (Figura 3-22), nota-se uma mudança na tendência da curva com os resultados da TMCF que passa a apresentar decréscimo a partir de aproximadamente 250 s, tempo para o qual a fumaça atinge o piso, ou seja, a AICF se torna nula. Assim, a TMCF prevista pelo B-RISK fica próxima aos 50°C, valor entre o experimental e o calculado por Yi *et al.* (2005) com o FDS. Entre os resultados calculados neste trabalho (Figura 3-22), convém destacar que o B-RISK previu uma AICF bem próxima da observada experimentalmente e também foi o que levou à TMCF mais próxima da experimental, aos 600 s. O programa B-RISK considera que a concentração mínima de oxigênio necessária para que a combustão ocorra varia entre 2% e 10%, dependendo da temperatura do gás.

Em todos os casos analisados neste trabalho comparando a TCL constante com a TCL t^2 , nota-se que ao considerar a TCL t^2 há um retardo na elevação das TMCF, no início do incêndio, aproximando do resultado experimental (Figura 3-22).

As figuras 3-27 e 3-28 mostram as comparações do experimento de Yi *et al.* 2005 com os resultados obtidos neste trabalho utilizando o FDS e, adotando as equações de Klote *et al.* (2012), tanto para análise da AICF quanto para análise da TMCF, equações 2-1 e 2-10 respectivamente.

Na Figura 3-27, no modelo experimental de Yi *et al.*, 2005, a AICF atinge o piso aos 400 s, já neste trabalho, com o uso do FDS, a AICF atinge o piso em aproximadamente 170 s com o medidor 1 (Figura 3-23) e, adotando as equações de Klote *et al.* (2012), a AICF atinge o piso aos 93 s. Conclui-se que os resultados do FDS se aproximam das equações de Klote *et al.* (2012).

Em relação à TMCF, a Figura 3-28, observa-se que os resultados obtidos neste trabalho e os obtidos experimentalmente por Yi *et al.* (2005) estão bastante coincidentes; no entanto, o resultado com o FDS apresenta uma temperatura de aproximadamente 80 °C aos 600 s, enquanto o experimento apresenta temperatura de 40 °C no mesmo tempo, diferentemente do resultado obtido através das equações de Klote *et al.* (2012) que sofre um desvio significativo praticamente desde o início do incêndio. Observa-se que ao aplicar as

equações de Klote *et al.* (2012) para um incêndio transiente leva a uma condição menos segura, ou seja, prevê uma menor AICF e uma maior TMCF em relação ao experimento e também à simulação com o FDS.

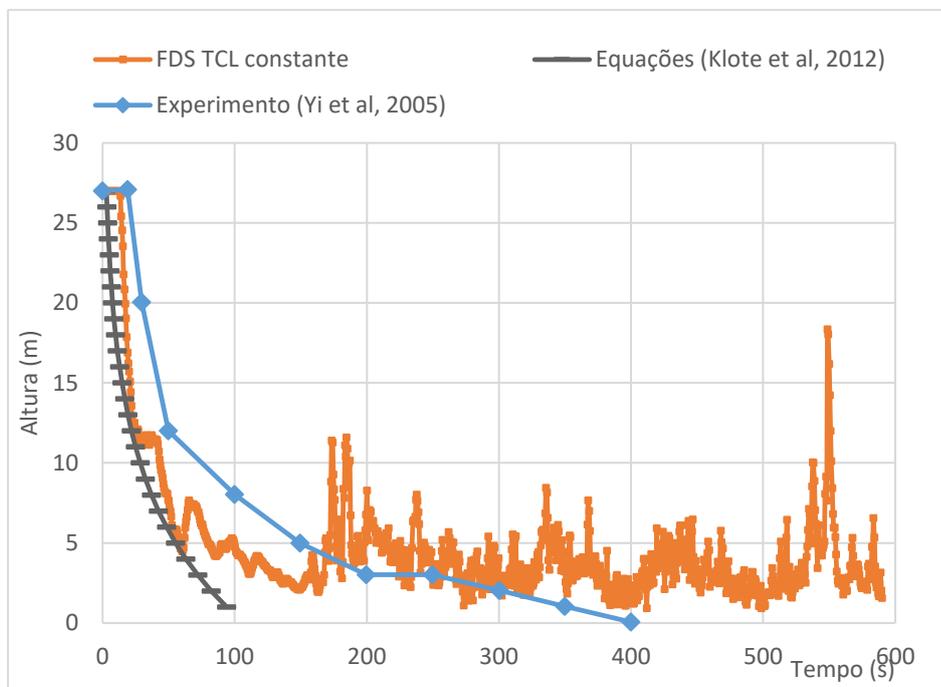


Figura 3-27: Altura da interface da camada de fumaça

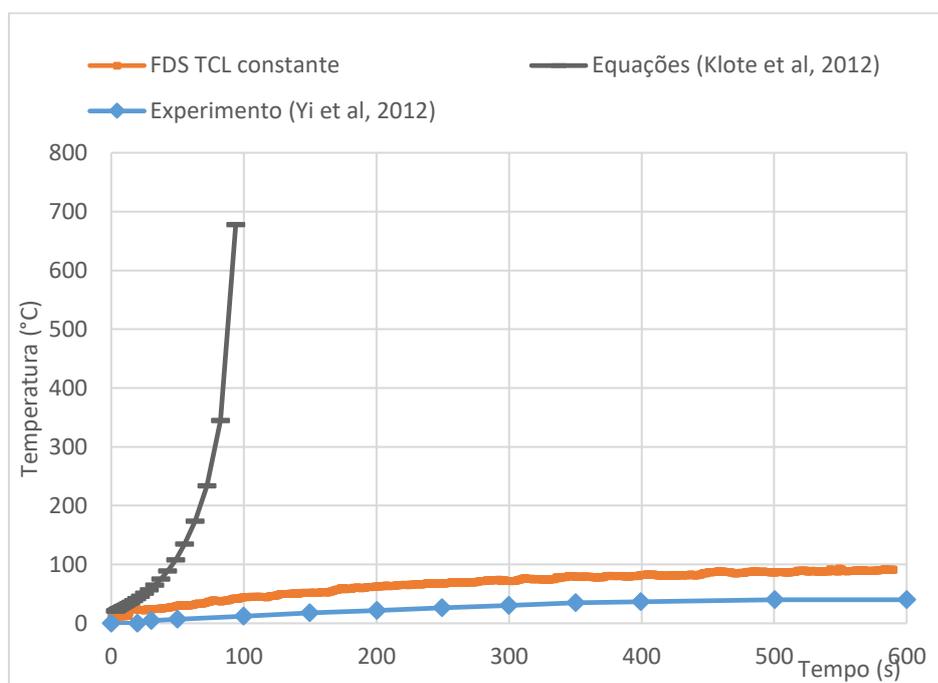
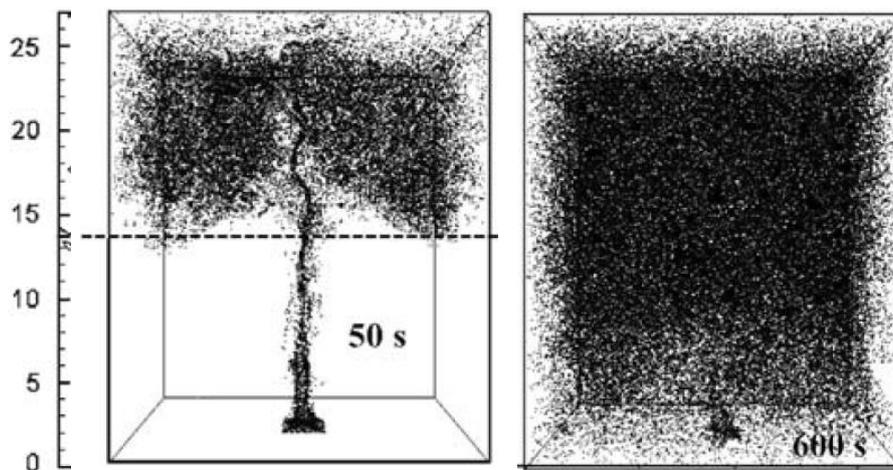
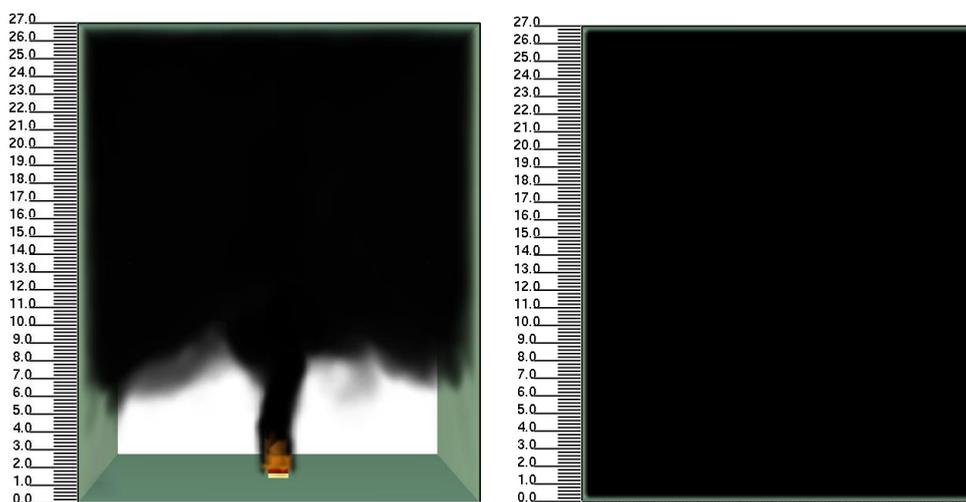


Figura 3-28: Elevação da temperatura média da camada de fumaça



a) FDS de Yi *et al.* (2005)



b) FDS deste trabalho

Figura 3-29: Teste 3 –AICF nos tempos 50 s e 590 s.

Yi *et al.* (2005) apresentam as imagens na Figura 3-29-a para as AICF nos tempos de 50 s e 600 s (No entanto, no Teste 3, o tempo de simulação foi de 590 s). Bem como nas análises anteriores, as alturas das camadas de fumaça foram baseadas visualmente nas figuras do trabalho de Yi *et al.* (2005) e, nas imagens geradas neste trabalho a partir do Smokeview para os tempos de simulação apresentados. Na Figura 3-29-a a camada da fumaça atinge 14 m nos primeiros 50 s de simulação. Para este mesmo tempo a AICF deste trabalho sofre uma grande variação atingindo uma altura aproximada de 7 m (esse valor é próximo ao observado no gráfico da Figura 3-21 para a simulação FDS TCL constante). Aos 620 s de simulação, Yi *et al.* (2005) indicam uma AICF tocando o piso (Figura 3-29-

a) e para este mesmo tempo a AICF no presente trabalho também ocupa todo o átrio (Figura 3-29-b). Os resultados demonstram que a AICF encontrada nesta pesquisa diminui mais rápido nos primeiros segundos de simulação, porém, em ambos os casos a AICF toca o piso ao final da simulação.

3.1.2.4 Observações gerais sobre os testes 1, 2 e 3

Nas simulações observou-se que as análises com o programa FDS têm duração de horas (valores entre 8 e 12 h) enquanto as simulações com os programas de zonas, CFAST e B-RISK, tem duração de segundos.

Comparando as simulações realizadas neste trabalho com os resultados experimentais, nota-se, assim como observado por Yi *et al.* (2005), que, de maneira geral, os resultados obtidos com o FDS se aproximam mais dos resultados experimentais e se mostram mais seguros, ou seja, preveem uma AICF inferior à observada experimentalmente e uma TMCF superior à observada experimentalmente. Yi *et al.* (2005) analisando os resultados obtidos por eles com o FDS, comentam que as AICF previstas concordaram bem com os experimentos, enquanto a TMCF foi muito superestimada uma vez que as malhas atribuídas não eram boas o suficiente para considerar a transferência de calor por condução e convecção nos contornos, devido à limitação dos computadores. Simulações com malhas mais refinadas e condições de contorno detalhadas podem dar resultados que concordam melhor com os experimentos. Os autores ainda acrescentam que o FDS previu a altura da camada de fumaça, mas o desvio, em relação ao experimento, da temperatura da camada de fumaça foi considerável. A perda de calor para os fechamentos do compartimento teve pouco efeito sobre a interface da camada de fumaça, mas é essencial para a predição da temperatura da mesma.

Os programas de zonas, CFAST e o B-RISK, para o Teste 1, previram uma AICF entre 5 e 6 m, aos 500 s, comportamento bem diferente do observado experimentalmente, no qual a fumaça atinge o piso, demonstrando que estes modelos podem conduzir a resultados inadequados. Neste caso, há extração mecânica, e a abertura (janela) está localizada na camada de fumaça, diferentemente do Teste 2 onde a abertura está na parte inferior do átrio e do Teste 3 sem qualquer ventilação. Essa observação pode indicar que estes modelos não

são apropriados para analisar situações nas quais a abertura fique localizada na camada de fumaça.

Em relação à TMCF e em comparação com o FDS e o CFAST, o programa B-RISK prevê maiores elevações de temperatura, exceto para o Teste 3, em que o programa prevê que a fumaça atinge o piso e interrompe a sequência de elevação da temperatura se aproximando mais do valor experimental ao fim da simulação.

Comparando as análises com TCL constante e t^2 pode-se constatar que a diferença da previsão da AICF e na TMCF ocorre apenas no início das simulações, alterando de maneira pouco significativa o tempo em que a camada de fumaça atinge o piso. Ao final das simulações, a influência da TCL constante ou t^2 é irrelevante. Analisando os resultados experimentais, com as condições de abertura (porta) e extração do Teste 2, a AICF pode ser mantida a 4 m acima do piso, indicando uma condição segura.

Embora o fornecimento de ar na camada de fumaça, localizada a 0,5 m acima do chão no Teste 1, possa reduzir a TMCF observada experimentalmente, a camada de fumaça desceu a um nível muito baixo, de 4,2 m ($1,5 + H / 10$) acima do chão em cerca de 174 s, adiada por apenas cerca de 50 s em comparação com o enchimento natural de fumaça observado no Teste 3. Portanto, aberturas nas posições baixas devem ser fornecidas para oferecer uma condição segura para a evacuação do átrio. Segundo CBPMSP IT 15:2015, uma altura livre de fumaça é aquela capaz de garantir a fuga das pessoas do ambiente com fogo, e devido à presença do jato de fumaça poderá alcançar no máximo 85% da altura da edificação, alcançando um mínimo de 2,5 m acima do piso. Ainda segundo à CBPMSP IT 15:2015, a altura mínima livre da camada de fumaça a ser considerada para os cálculos de extração é de 2,20 m (valor contraditório aos 2,5 m), e a velocidade do ar por ponto de extração deve ser no máximo de 5m/s, considerando ainda um mínimo de 2 pontos de extração por pavimento.

Yi *et al.* (2005) concluem que a altura mínima da interface da camada de fumaça pode ser mantida com fornecimento de ar sob uma determinada TCL e de extração mecânica de fumaça. Para garantir uma AICF maior do que a altura segura da camada de fumaça (por exemplo, uma altura igual a 4,2 m acima do chão), as aberturas devem estar posicionadas abaixo da altura segura.

Quando a entrada de ar está acima da interface da camada de fumaça, o ar irá se misturar com a fumaça. Em sistemas de extração de fumaça mais bem concebidos, esta situação deve ser evitada, como por exemplo, limitando a quantidade de materiais combustíveis no compartimento, pois irá desacelerar a descida da camada de fumaça. A temperatura da fumaça será reduzida nesta situação. Se ocorrer um grande fogo num compartimento com uma taxa de extração relativamente pequena, incapaz de atingir a altura segura da camada de fumaça, a posição da entrada de ar não é mais importante porque a camada de fumaça irá descer rapidamente. Pelo contrário, a extração com entrada de ar mais elevada, reduz a temperatura da fumaça e até mesmo atrasa a descida da camada de fumaça um pouco mais do que com o fornecimento de ar ideal, o que pode ajudar a proteger as estruturas contra o incêndio.

Além da posição das entradas de ar, outros fatores importantes, tais como a distribuição de entradas de ar, a distância da entrada de ar a partir do fogo e a velocidade do fluxo de ar através da entrada de ar devem também ser considerados cuidadosamente durante a operação de escape mecânico.

3.2 Experimento *K-Office* (Bong, 2011)

O Corpo de Bombeiros de Tokyo (1985), *apud* Bong (2011), conduziu um experimento em um compartimento de escritórios denominado *K-Office*. O experimento foi conduzido sem aberturas de ventilação ou sistema de extração de fumaça e com taxa de calor liberado (TCL) de 2.800 kW. O compartimento possuía dimensões de 20 m (comprimento) \times 15 m (largura) \times 7,8 m (altura). A fonte do fogo foi centralizada no compartimento. Bong (2011) considerou em suas simulações as paredes, piso e o teto construídos em concreto com 0,1m de espessura. O experimento do Corpo de Bombeiros de Tokyo (1895) não forneceu informações de localização e quantidade de medidores de altura e temperatura da camada de fumaça.

Para modelagem dos experimentos Bong (2011) utilizou os programas BRANZFIRE (versão 2009.1) e o FDS (versão 5.3).

3.2.1 Modelagem e simulação dos experimentos

Para o experimento a taxa de calor liberado (TCL) foi determinada em 2.800 kW. O foco do fogo possuía dimensões de 2 m × 2 m, totalizando uma área de 4 m², localizado no centro do compartimento, e o combustível utilizado foi o metanol (CH₃OH). A temperatura ambiente inicial foi de 20 °C. O tempo de duração do fogo foi determinado através da visualização dos resultados gráficos do trabalho de Bong (2011) que indicaram 250 segundos. Bong (2011) não informou a localização e a quantidade de medidores de altura e temperatura da camada de fumaça. No entanto, com base em dados fornecidos no trabalho do autor foi possível determinar a localização dos medidores usados. No presente trabalho, o Medidor 1 foi inserido na posição x igual a 0,5 m e y igual a 0,5 m. O Medidor 2 foi posicionado em x igual a 4 m e y igual a 7,5 m. A origem do sistema foi localizada na face interna do compartimento, em um dos cantos (Figura 3-30).

Nas simulações com o FDS, o volume do compartimento foi dividido em 80 × 60 × 32 células, resultando nas dimensões de 0,25 m × 0,25 m × 0,24 m. Foi considerado uma TCL t² com tempo de 20 s para atingir o valor constante de 2.800 kW, assim como considerado por Bong (2011).

Segundo Bong (2011) ao usar malhas de alta resolução compostas de um grande número de células finas geralmente aumenta o tempo computacional. É essencial especificar tamanhos de células que proporcionem uma precisão razoável dos resultados, além de considerar as limitações computacionais. Devido a tal observação usou-se tamanhos de células entre malha moderada e grossa.

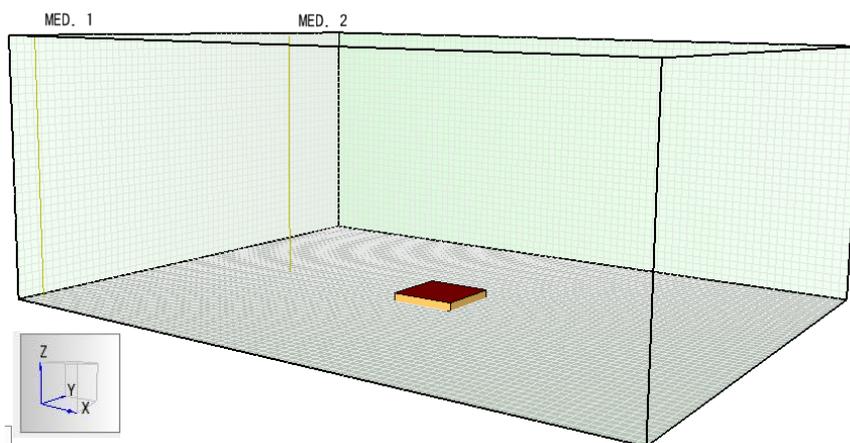


Figura 3-30: Ambiente K-Office

Usando a planilha de Overholt (2017), ver item 2-12 deste trabalho, com D^* (diâmetro do fogo) igual a 1,488 m, a maior dimensão da célula adotada neste trabalho (0,25 m) ficou entre malha grossa e moderada, que está entre $D^*/4$ e $D^*/10$, como mostra a Tabela 3-4.

Tabela 3-4: Cálculo de tamanho de célula

| Bong (2011) K-Office | Tamanho da célula segundo Overholt (2017) |
|--|--|
| $D^* = 1,448$ | Teste 1 |
| $D^*/4$ (malha grossa) | 0,36 |
| $D^*/10$ (malha moderada) | 0,14 |
| $D^*/16$ (malha fina) | 0,09 |
| Maior dimensão da célula adotada neste trabalho | 0,25 ($D^*/5,79$) |

3.2.1.1 Resultados

Os resultados: altura da interface da camada de fumaça - AICF; temperatura média da camada de fumaça - TMCF; e, temperatura média da camada livre de fumaça – TMLF; calculados neste trabalho, utilizando os programas FDS (Versão 6.4.0), CFAST (7.1.2) e B-RISK (Versão 2015.07) estão apresentados nas figuras 3-31 a 3-33. Nessas mesmas figuras tem-se os resultados experimentais e os obtidos com os programas FDS (Versão 5.3) e BRANZFIRE (Versão 2009.1), por Bong (2011).

Nas figuras de 3-31 a 3-33 tem-se os resultados obtidos neste trabalho e os obtidos por Bong (2011). Vale lembrar que o tempo de simulação foi de 280 s.

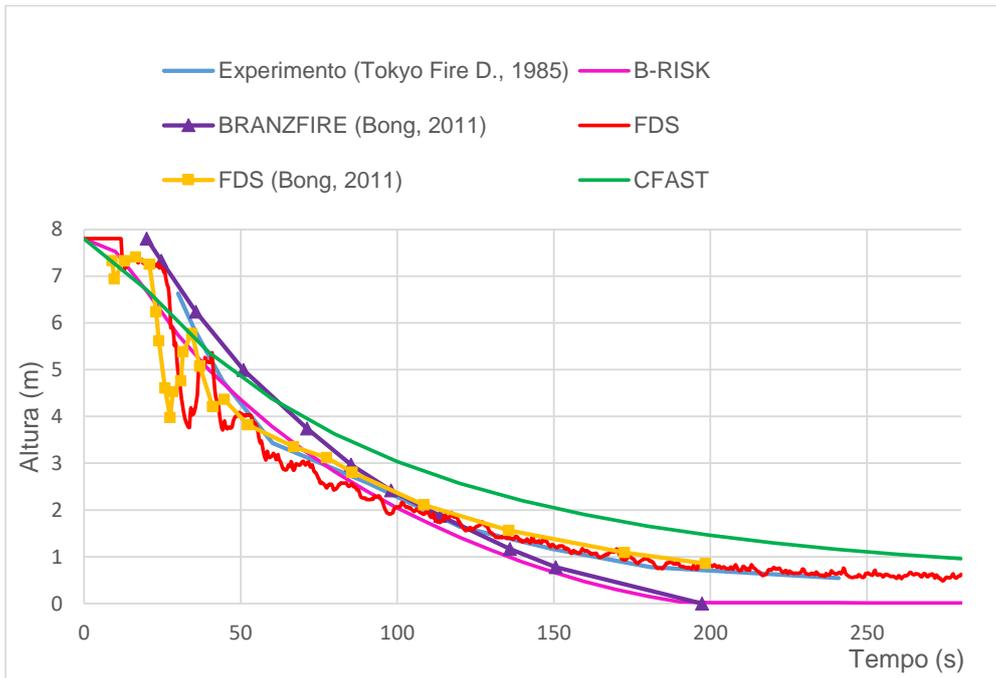


Figura 3-31: Altura da interface da camada de fumaça

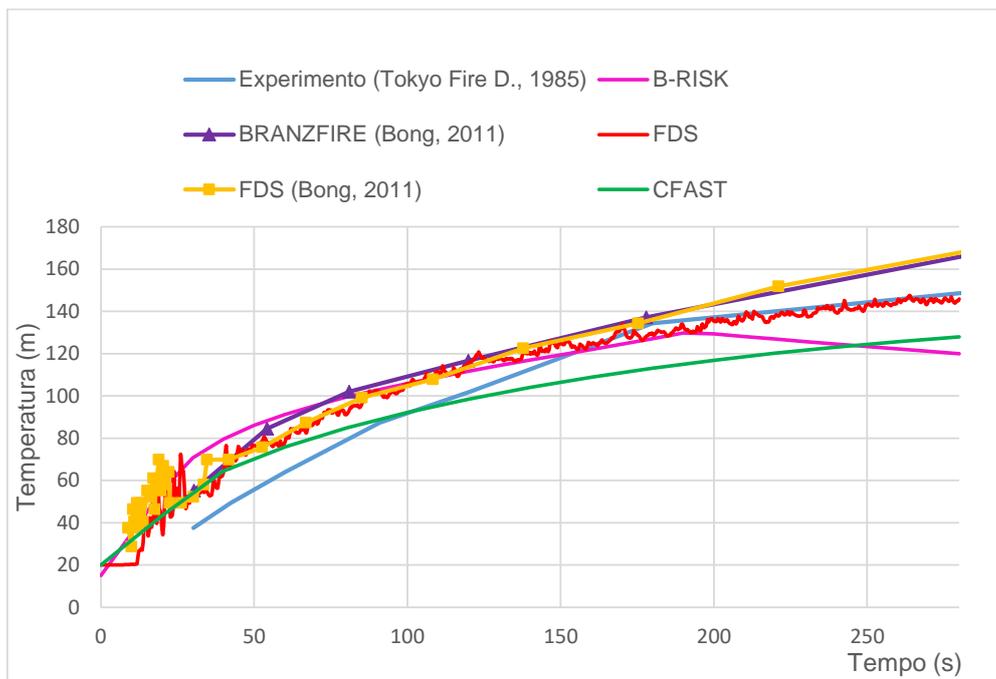


Figura 3-32: Elevação da temperatura média da camada de fumaça

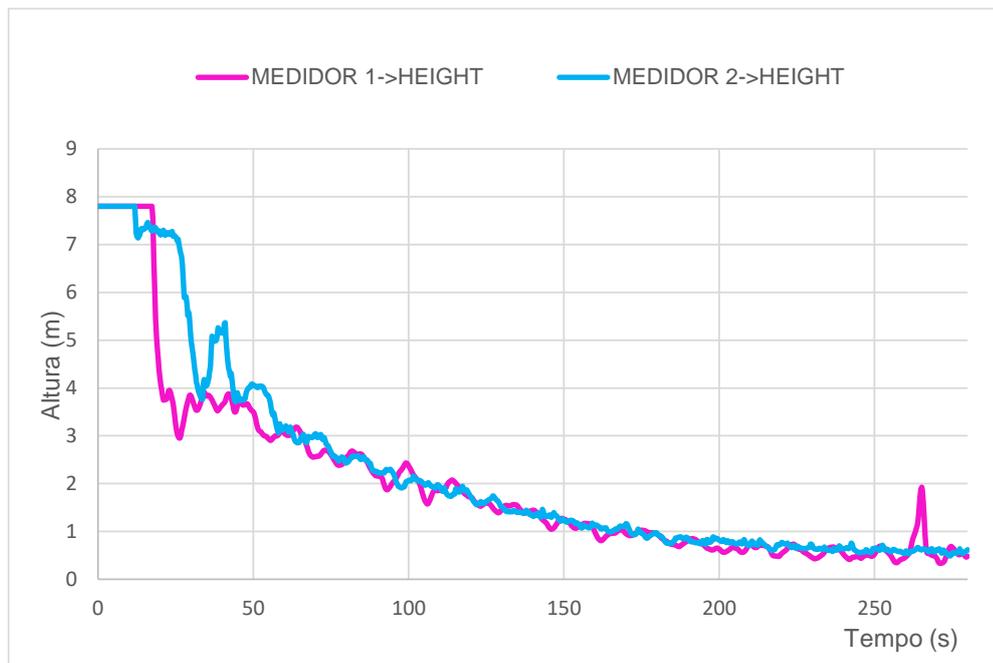


Figura 3-33: Elevação da temperatura média da camada de fumaça nos medidores

O experimento realizado pelo Corpo de Bombeiros de Tokyo (1985), inicialmente, apresenta uma menor AICF em relação ao BRANZFIRE e maior AICF em relação ao FDS obtido por Bong (2011). A AICF calculada por Bong (2011) com o FDS, apresenta uma oscilação inicial até o tempo de aproximadamente 50 s. A partir desse tempo, tanto o FDS quanto o experimento seguem com resultados bastante próximos até o tempo de 198 s (tempo máximo calculado por Bong), onde a AICF atinge uma altura de 0,85 m e, o experimento segue até o tempo de 240 s aonde atinge altura de 0,54 m. Com o BRANZFIRE a AICF toca o piso no tempo de 197 s, como mostra a Figura 3-31.

Nos resultados obtidos neste trabalho observa-se que a AICF com o FDS atinge a altura de 0,65 m, com o CFAST atinge 0,95m, ao final da simulação e, o B-RISK toca o piso aos 190 s.

Comparando o resultado do experimento do Corpo de Bombeiros de Tokyo (1985) e os resultados de Bong (2011) com os resultados deste trabalho, visíveis na Figura 3-31 conclui-se que a AICF que mais se aproxima do experimento são as obtidas com o FDS. O CFAST prevê uma maior AICF (situação menor conservadora) comparado aos demais programas, bem como o B-RISK e BRANZFIRE são os únicos onde a AICF toca o piso (em tempos próximos, o que era de se esperar, pois o BRANZFIRE é o antecessor do B-RISK).

Em relação à TCMF os resultados de Bong (2011) apresentaram uma maior elevação da temperatura quando comparados ao resultado do experimento, como mostra a Figura 3-32. Apenas no tempo de 175 s ocorre uma aproximação da TCMF entre os três resultados do autor, porém, ao final da simulação o experimento apresenta uma TCMF de 151 °C, e os resultados de Bong (2011) com o FDS e BRANZFIRE se aproximam de 172 °C.

Observa-se na Figura 3-32 que os resultados obtidos neste trabalho sofrem divergências ao longo da simulação. No intervalo de tempo entre 100 s e 190 s, a TCMF com o FDS e B-RISK se sobrepõem, a partir deste tempo a TCMF com o B-RISK sofre uma queda atingindo os 119 °C no final da simulação, já a TCMF com o FDS atinge os 145 °C. Já o CFAST é o que apresenta menor TCMF ao longo de toda a simulação, atingindo o valor de 128 °C ao fim da simulação.

Ao comparar os resultados do experimento com os de Bong (2011) e os resultados alcançados neste trabalho conclui-se que a TCMF obtida com o FDS neste trabalho é o que mais se aproxima do experimento, e o resultado do CFAST é o que mais se afasta, mantendo valores inferiores ao longo de toda a simulação.

Os medidores no FDS apresentam proximidade dos valores da TCMF ao longo de toda a simulação, como mostra a Figura 3-33.

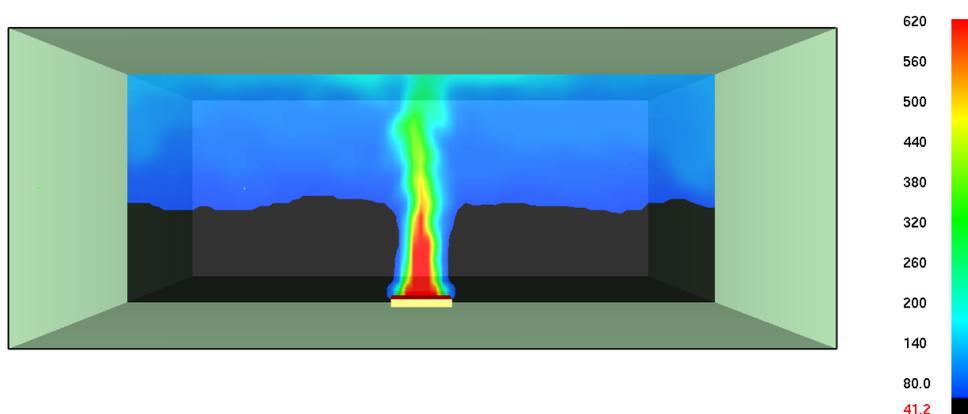


Figura 3-34: Temperatura interna aos 60 s.

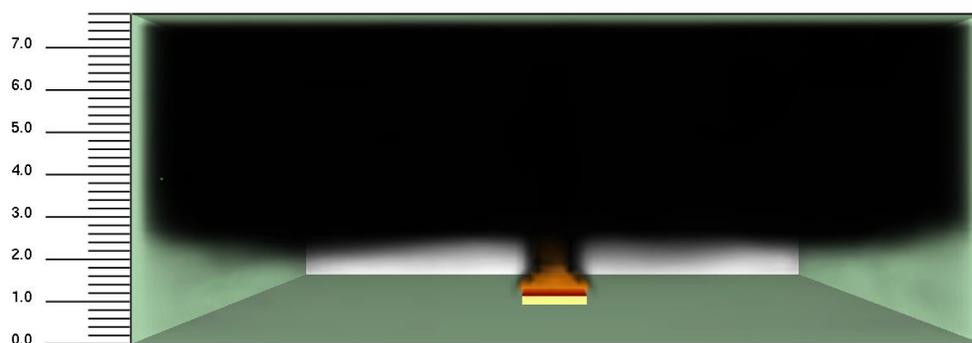
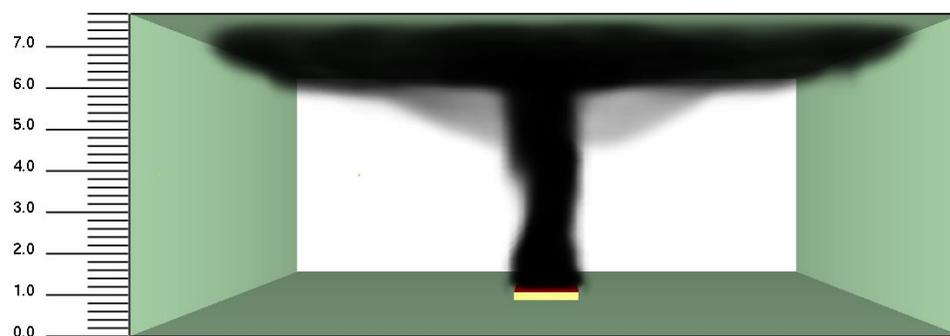
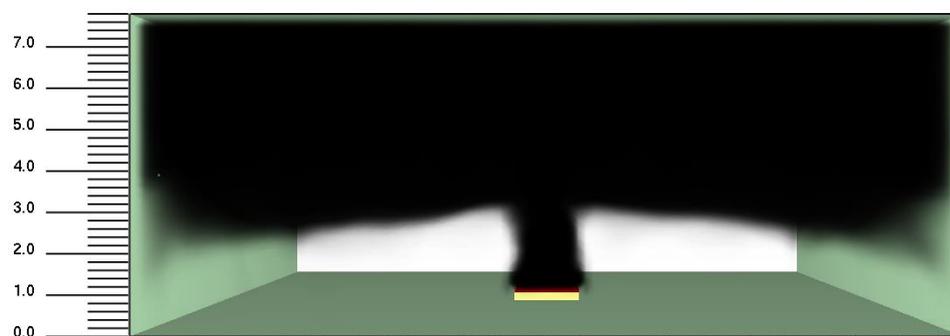


Figura 3-35: AICF de 2,5 m aos 90 s.



a) 15 s.



b) 60 s.



c) 185 s.

Figura 3-36: Densidade da fumaça aos a) 15 s, b) 60 s e c) 185 s.

Na Figura 3-34 acima, no tempo de 60 s a temperatura atinge 41,2 °C (graficamente). Um indivíduo exposto a temperaturas superiores a 41°C por um período elevado de tempo pode sofrer alterações enzimáticas irreversíveis, segundo Magalhães *et al.* (2001). Na Figura 3-35, no tempo de 90 s a AICF atinge os 2,5 m acima do piso, limite mínimo de camada livre de fumaça determinada pela IT para uma edificação, no entanto a AICF continua a diminuir até tocar o piso, como mostra o resultado com o FDS e a Figura 3-36.

As figuras 3-37 e 3-38 abaixo mostram as comparações da simulação realizada neste trabalho com o FDS, com as equações de Klote *et al.* (2012), tanto para análise da AICF quanto para análise da TMCF.

Na Figura 3-37 com o FDS, a AICF sofre oscilação inicialmente até o tempo aproximado de 50 s, quando atinge uma altura de 3,8 m, a partir deste tempo ela cai gradualmente atingindo uma altura de 0,6 m ao final da simulação. Observando os resultados das equações de Klote *et al.* (2012), a AICF se aproxima do resultado do FDS tocando o piso aos 260 s.

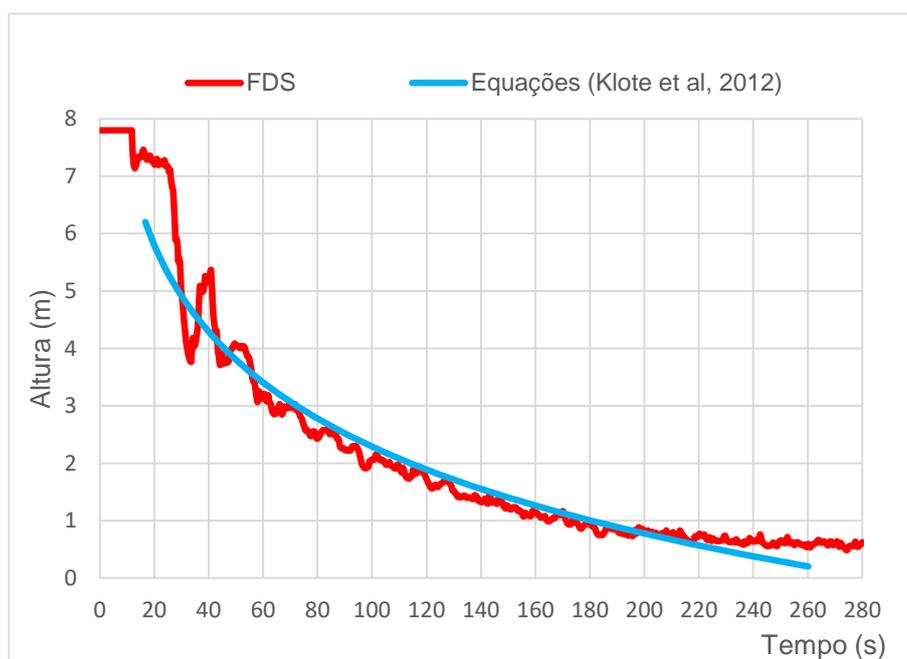


Figura 3-37: Altura da interface da camada de fumaça

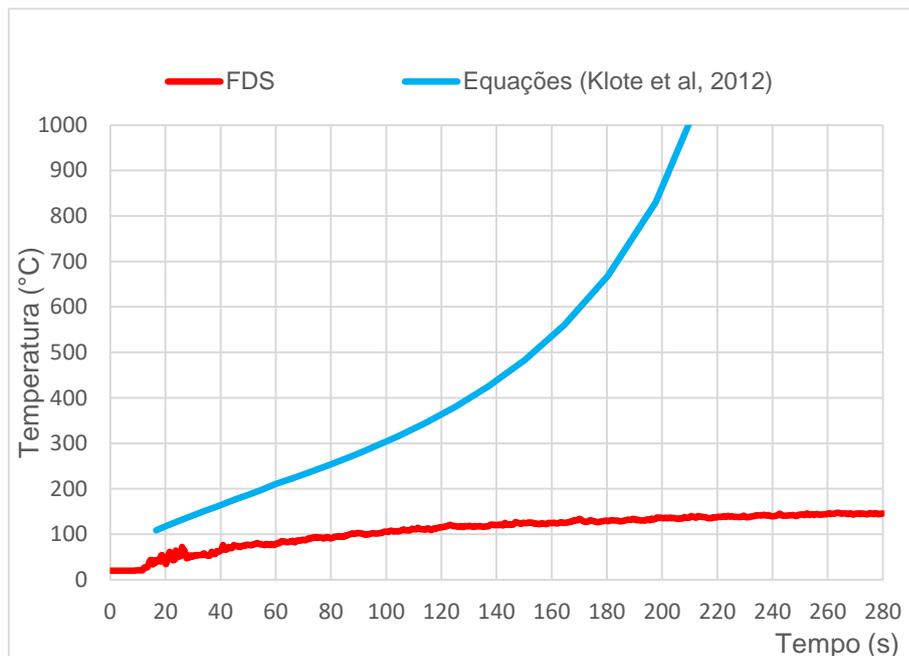


Figura 3-38: Elevação da temperatura média da camada de fumaça

Em relação à TMCF, Figura 3-38, observa-se que o resultado, obtido neste trabalho com o FDS atinge uma temperatura máxima de 145 °C no tempo de 280 s, enquanto, o resultado obtido através das equações de Klote *et al.* (2012) sofre um desvio significativo praticamente desde o início do incêndio ultrapassando os 1000 °C aos 215 s. Admite-se o uso das equações de Klote *et al.* (2012) são para cálculo da AICF pela aproximação dos resultados, no entanto, para o cálculo da TMCF os resultados obtidos com as equações foram bastante conservadores, tendendo a temperaturas muito altas muito antes da fumaça tocar o piso.

3.2.1.2 Observações gerais

Em comparação com os demais experimentos analisados neste trabalho, o K-Office foi o que apresentou melhor aproximação entre dos resultados dos autores citados com os resultados calculados neste trabalho, destacando-se a aproximação entre o resultado do experimento com o FDS, tanto para a AICF quanto para a TMCF e, os resultados mais conservadores encontrados para a AICF com o B-RISK e BRANSFIRE (ao final da simulação) e menos conservador para a TMCF com o CFAST.

Concluindo, como o K-Office, não apresenta nenhum tipo de abertura, seja de introdução de ar ou de extração de fumaça, ele mais que os demais experimentos realizados neste trabalho, não se encaixa nos parâmetros determinados pela IT 15:2015, por outro lado, ao comparar o resultado do FDS com as equações de Klote *et al.* (2012) notou-se uma semelhança na curva da AICF, porém, para cálculo da TMCF as equações apresentaram resultados bastante divergentes do FDS.

3.3 Experimento Hagglund *et al.* (1985) por Bong (2011)

Bong (2011) cita que Hagglund *et al.* (1985) realizaram 15 conjuntos de experimentos em um compartimento. O compartimento possuía 5,6 m de comprimento, 5,6 m de largura e 6,2 m de altura, e uma abertura ao nível do piso de 0,35 m de largura e 0,25 m de altura, sem sistema de extração de fumaça, figura 3-39. Foram colocadas 5 linhas verticais de termopares, sendo 4 igualmente espaçadas nos cantos e 1 centralizada no compartimento. Bong (2011) destaca três destes experimentos, denominando-os de T2, T5 e T7. Os experimentos foram realizados com diferentes características, no mesmo compartimento. O combustível utilizado foi o Querosene ($C_{20}H_{42}$) e o foco do fogo foi centralizado no compartimento. Bong (2011) considerou em suas simulações computacionais as paredes e o piso de concreto com espessura de 0,1 m e medidores de temperatura nos níveis 1m, 4 m, e 5,5 m. Os 3 experimentos que se destacam são:

- T2, realizado a uma temperatura inicial de 15 °C, com tempo de duração do fogo de 180 s. A taxa de calor liberado foi de 195 kW. O foco do fogo possuía dimensões de 0,25 m²;

- T5, realizado a uma temperatura inicial de 17 °C, com tempo de duração do fogo de 300 s. A taxa de calor liberado foi de 33 kW. O foco do fogo possuía dimensões de 0,625 m²;

- T7, realizado a uma temperatura inicial de 20 °C, com tempo de duração do fogo de 120 s. A taxa de calor liberado foi de 414 kW. O foco do fogo possuía dimensões de 0,5625 m².

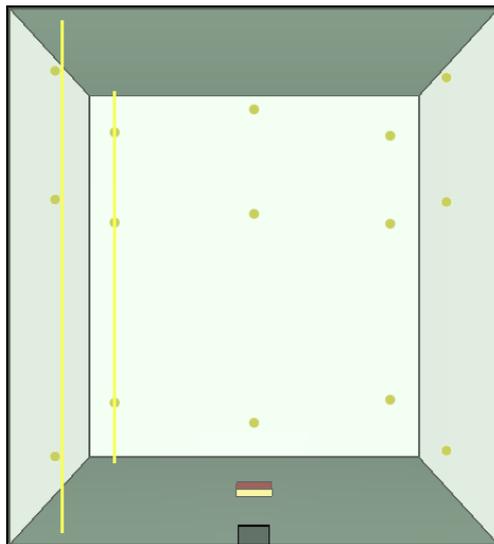


Figura 3-39: Compartimento Hagglund.

3.3.1 Modelagem e simulação dos experimentos

Os modelos computacionais desenvolvidos neste trabalho com base nos testes T2, T5 e T7 realizados por Hagglund *et al.* (1985) possuem: a mesma geometria, abertura no nível do piso, temperatura ambiente e tempo de duração do fogo, ou seja, mesmo tempo de simulação.

Nas simulações com o FDS, o volume do compartimento nas simulações, $5,6 \text{ m} \times 5,6 \text{ m} \times 6,2 \text{ m}$ foi dividido em $40 \times 40 \times 44$, resultando em células com $0,14 \text{ m} \times 0,165 \text{ m} \times 0,1409 \text{ m}$, e um total de 70.400 células, tanto para T2 quanto para T5 e T7. Sendo uma única geometria para os 3 testes, a malha foi prolongada por 1,0 m além da parede com a abertura, tanto nas paredes laterais quanto no teto e piso. A parede com abertura foi modelada como *Obstructions* e as demais paredes, piso e teto como *Vents*. Paredes, piso e teto foram modelados com 0,10 m de espessura de concreto, conforme Bong (2011) e as propriedades fornecidas pela biblioteca do PyroSim: densidade de $2280 \text{ kg} / \text{m}^3$; calor específico de $1,04 \text{ kJ} / (\text{kg}^\circ\text{K})$; condutividade de $1,8 \text{ W} / (\text{m}^\circ\text{K})$; emissividade de 0,9. A composição química do querosene ($\text{C}_{20}\text{H}_{42}$), quantidade de átomos, foi informada no programa e observou-se no arquivo *nome_arquivo.out* que o calor de combustão utilizado pelo programa foi de 30.000 kJ/kg , valor este determinado também por Bong (2011). Nos testes foram considerados incêndio quadrático (TCL t^2) com tempo de 45 s, 30 s e, 60 s para atingir as taxas de calor liberado de 195 kW, 33 kW e 414 kW, respectivamente. A fração de massa

de combustível convertida em partículas de fumaça foi tomada igual a 0,07. A fração de massa de combustível convertida em monóxido de carbono foi tomada igual a 0,04. A fração de radiação utilizada foi de 0,3. Dois medidores de camada de fumaça (*Layer Zoning Device*) foram colocados próximos a uma das paredes laterais (linhas verticais na Figura 3-39).

Nas simulações com os programas CFAST e B-RISK foram utilizados os mesmos dados de entrada das simulações com o FDS.

Usando a planilha de Overholt (2017) com D^* (diâmetro do fogo) variando, segundo valores disponíveis na Tabela 3-5 abaixo, a maior dimensão da célula adotada neste trabalho (0,165 m) ficou próxima da malha grossa que é $D^*/4$ para o teste T7. Porém para o teste T2 e principalmente T5, que possui menor TCL e conseqüentemente menor D^* , a malha ficou bem acima da definição de malha grossa, como mostra a Tabela 3-5. Nesses casos seria recomendado um melhor refinamento da malha.

Tabela 3-5: Cálculo de tamanho de célula

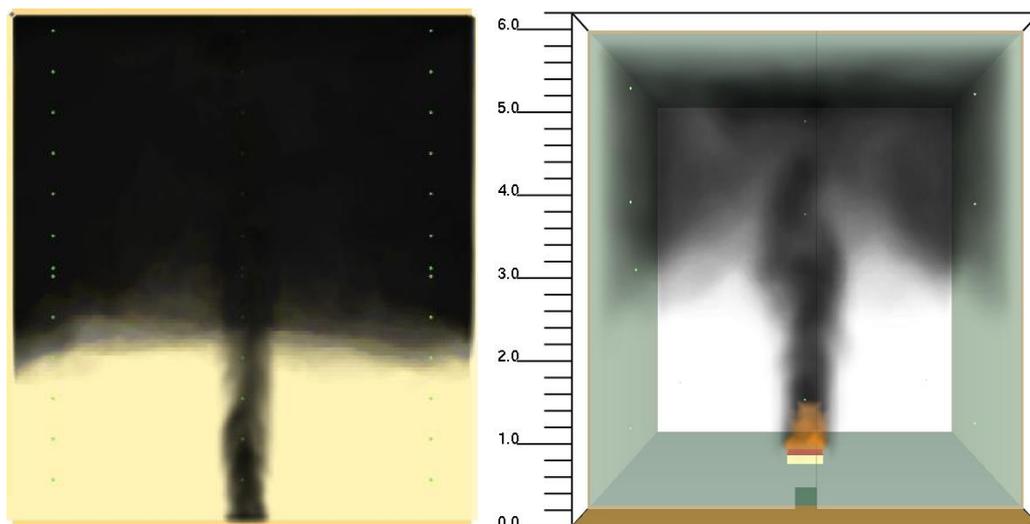
| Bong (2011) Haggulnd | Tamanho da célula segundo Overholt (2017) | | |
|--|--|-------------------------|-------------------------|
| $D^* = \text{variável}$ | T2 ($D^*=0,502$) | T5 ($D^*=0,246$) | T7 ($D^*=0,674$) |
| $D^*/4$ (malha grossa) | 0,12 | 0,06 | 0,17 |
| $D^*/10$ (malha moderada) | 0,05 | 0,024 | 0,15 |
| $D^*/16$ (malha fina) | 0,03 | 0,015 | 0,09 |
| Maior dimensão da célula adotada neste trabalho | 0,165 ($D^*/3,04$) | 0,165 ($D^*/1,49$) | 0,165 ($D^*/4,08$) |

3.3.1.1 Resultados

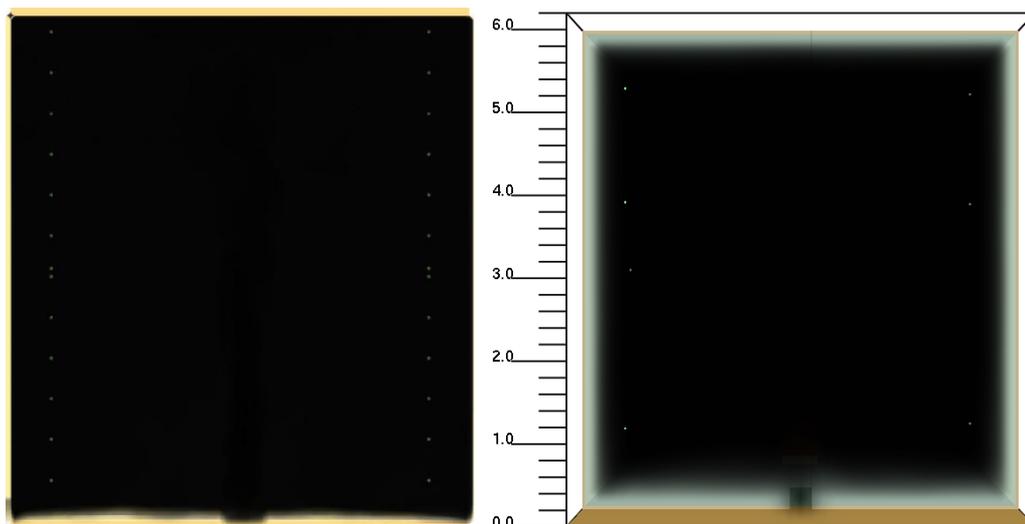
Os resultados: altura da interface da camada de fumaça - AICF; temperatura média da camada de fumaça - TMCF; e, temperatura média da camada livre de fumaça – TMLF; calculados neste trabalho, utilizando os programas FDS (Versão 6.4.0), CFAST (7.1.2) e B-RISK (Versão 2015.07) estão apresentados nas figuras 3-40 a 3-60. Nessas mesmas

figuras tem-se os resultados experimentais e os obtidos por Bong (2011) com os programas FDS (Versão 5.3) e BRANZFIRE (Versão 2009.1).

3.3.1.2 *Análise dos resultados de T2*



a) AICF para o tempo de 40 s.



b) AICF para o tempo de 150 s.

Figura 3-40: T2, à esquerda imagens extraídas de Bong (2011) e, à direita imagens deste trabalho, extraídas do Smokeview, para os tempos: a) 40 s; b) 150 s.

Baseado em imagens do trabalho de Bong (2011) para a AICF e em imagens deste trabalho, extraídas do Smokeview para T2, nota-se que a AICF diminui mais rapidamente no trabalho de Bong (2011) para os primeiros 40 s, no entanto aos 150 s considera-se que em ambos os trabalhos a fumaça tocou o piso. Neste caso os resultados encontrados com o FDS, tanto a versão utilizada por Bong (2011) quanto a versão utilizada neste trabalho, apresentam-se bastante próximos, como mostra a Figura 3-40.

Nas figuras de 3-41 a 3-42 tem-se os resultados, em forma de gráficos, obtidos neste trabalho e os obtidos por Bong (2011) para T2. Vale lembrar que o tempo de simulação foi de 180 s. Na Figura 3-43 tem-se os resultados dos medidores.

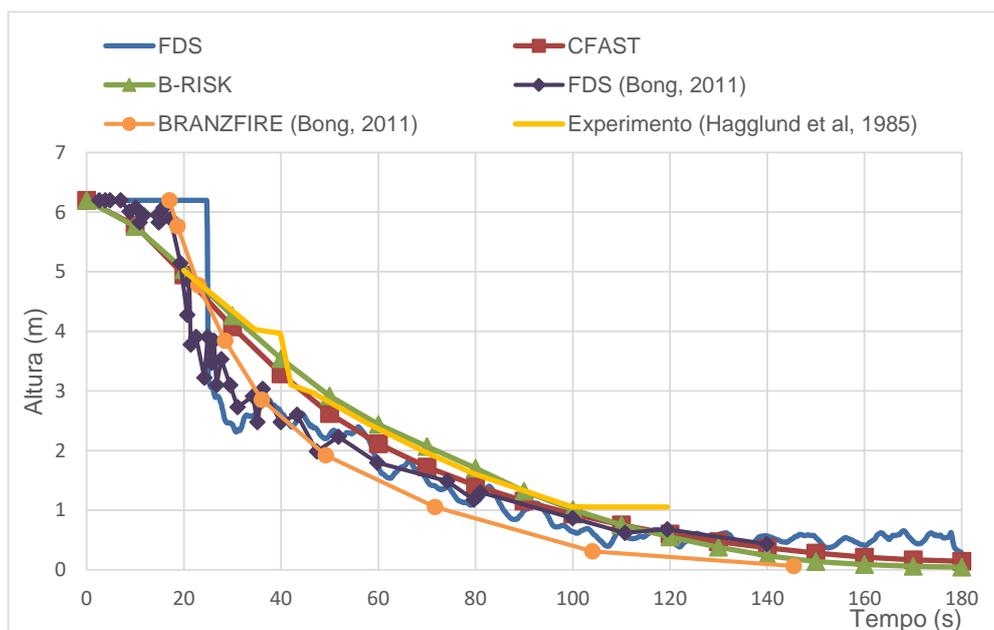


Figura 3-41: Altura da interface da camada de fumaça

Em T2, o experimento de Hagglund *et al.* (1985) e o resultado calculado por Bong (2011) com o FDS demonstraram que a AICF não chega a tocar o piso nos tempos simulados de 120 s e 140s, respectivamente. O resultado obtido com o BRANZFIRE indica que a AICF toca o piso aos 145 s após o início do fogo.

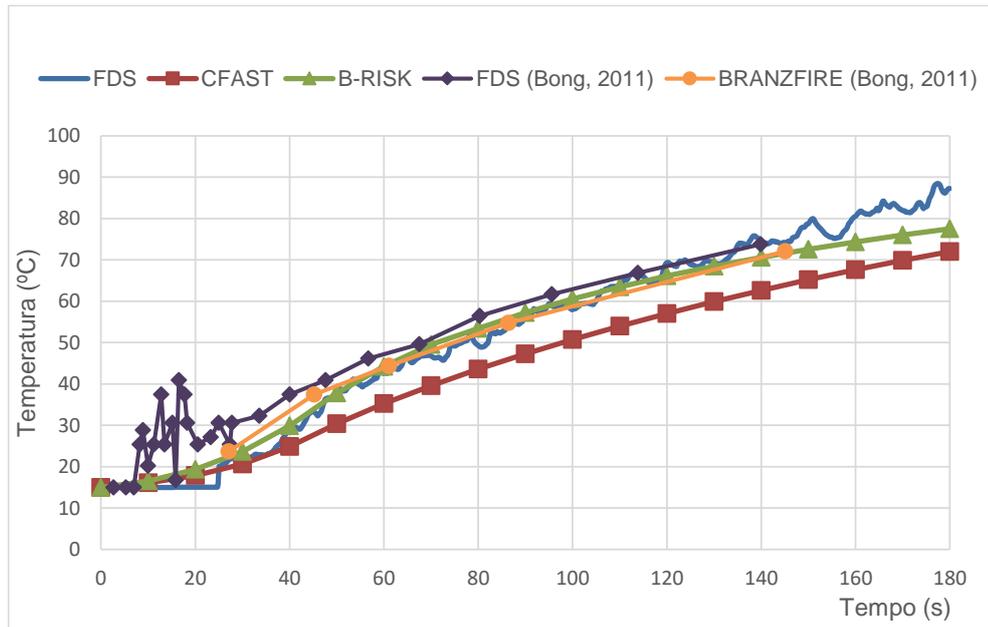


Figura 3-42: Elevação da temperatura média da camada de fumaça

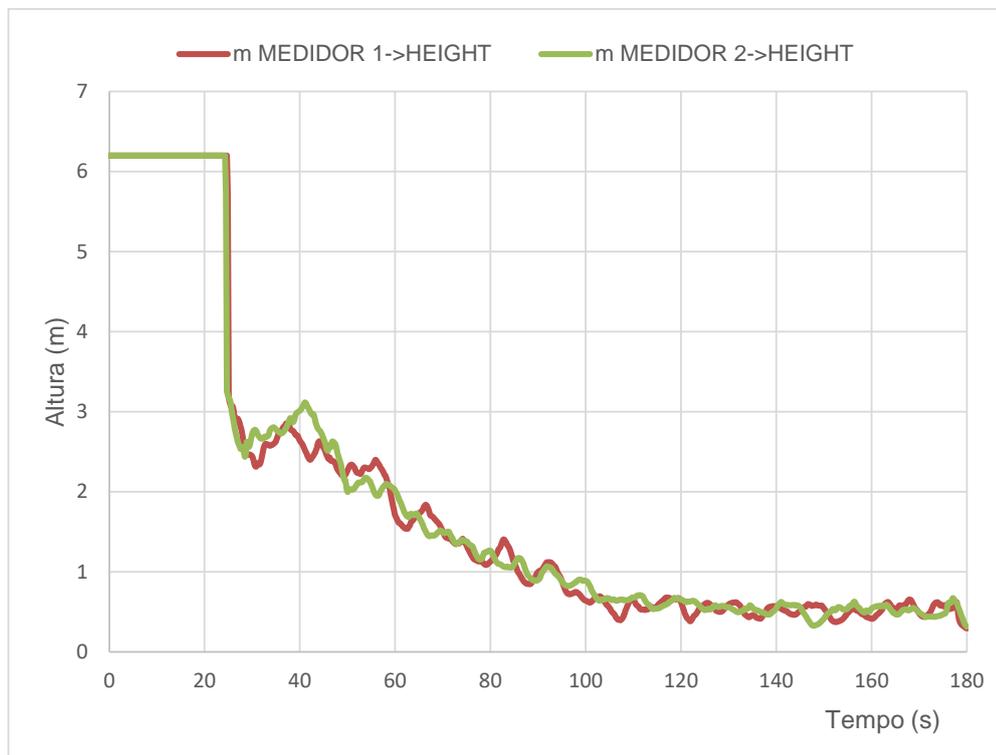


Figura 3-43: Elevação da temperatura média da camada de fumaça nos medidores

Em relação aos resultados obtidos neste trabalho nota-se que o FDS apresenta uma AICF média de 0,5 m entre os tempos de 160 s e 180 s. Os resultados obtidos com o CFAST e B-RISK são bastante próximos ao longo de toda a simulação atingindo o piso no tempo aproximado de 170 s. Observa-se que os resultados encontrados neste trabalho com o B-RISK e o CFAST se aproximam do resultado experimental encontrado por Hagglund *et al.* (1985), e o resultado encontrado neste trabalho com o FDS também se aproxima do resultado encontrado por Bong (2011) com o FDS. Os resultados obtidos com os medidores 1 e 2 posicionados na face esquerda da Figura 3-39, mostram que a temperatura não variou de um medidor para o outro, possivelmente devido à simetria do compartimento e à distância do fogo (figuras 3-39 e 3-43).

Os resultados da TMCF, de Bong (2011), com o FDS e BRANZFIRE, são bastante próximos a partir do tempo aproximado de 27 s, como mostra a Figura 3-42.

Os resultados obtidos neste trabalho para a TMCF, com o FDS e B-RISK são bastante próximos a partir do tempo de 23 s. O resultado da TMCF obtido com o CFAST indica uma temperatura um pouco abaixo da encontrada com os programas FDS e B-RISK, como mostra a figura 3-42. Os resultados encontrados neste trabalho com o FDS e B-RISK se aproximam muito dos resultados obtidos por Bong (2011) com o FDS e BRANZFIRE.

As figuras 3-44 e 3-45 abaixo mostram as comparações da simulação realizada neste trabalho com o FDS para T2 com as equações de Klote *et al.* (2012), tanto para análise da AICF quanto para análise da TMCF.

Na Figura 3-44 com o FDS, a AICF leva um tempo de 25 s para atingir a taxa de calor liberado constante, neste tempo a AICF cai de 6,2 para 3 m, a partir de então a descida da camada de fumaça torna-se mais gradual atingindo 0,65 m aos 100 s de simulação e mantendo uma média de 0,5 m de altura até o término da simulação. Observando os resultados das equações de Klote *et al.* (2012), a AICF se aproxima do piso aos 75 s.

Desconsiderando o tempo de descida da AICF com o FDS para atingir a taxa de calor liberado, que são os 25 s iniciais, conclui-se que o resultado encontrado com as equações de Klote *et al.* (2012) coincidem com o resultado do FDS, conclui-se que em ambos os resultados, a AICF atinge o piso, aproximadamente entre os tempos de 75 s e 100 s.

Em relação à TMCF, Figura 3-45, observa-se que os resultados, obtidos neste trabalho com o FDS atinge uma temperatura máxima de 90 °C no tempo de 180 s, enquanto, o

resultado obtido através das equações de Klote *et al.* (2012) sofre um desvio significativo praticamente desde o início do incêndio chegando a 600 °C aos 67 s. A partir deste tempo a TMCF sofre uma elevação ainda mais brusca atingindo uma temperatura de 1130 °C no mesmo tempo em que a AICF atinge o piso, 75 s. As equações de Klote *et al.* (2012) são conservadores para cálculo da AICF e bastante conservadores para o cálculo da TMCF que tende a valores muito altos, principalmente, quando a AICF se aproxima do piso, ou seja, se aproxima de zero.

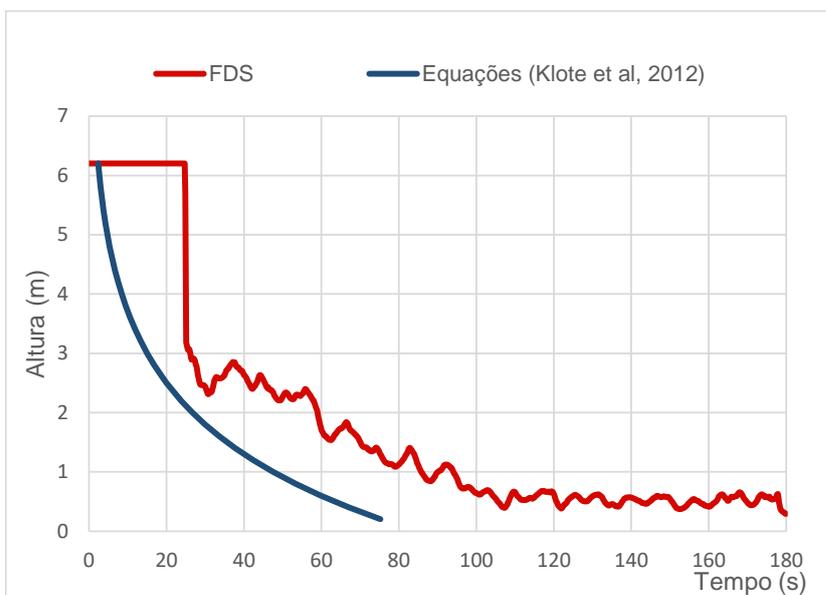


Figura 3-44: Altura da interface da camada de fumaça

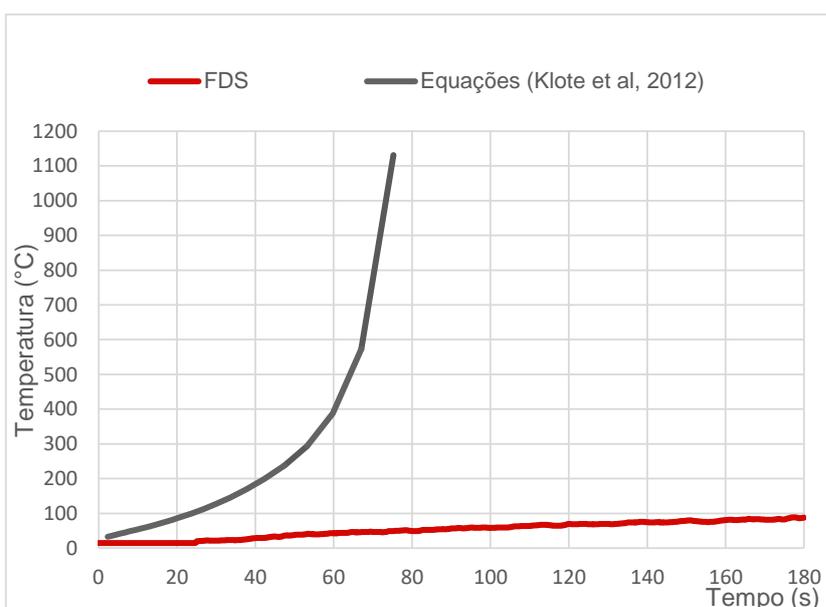
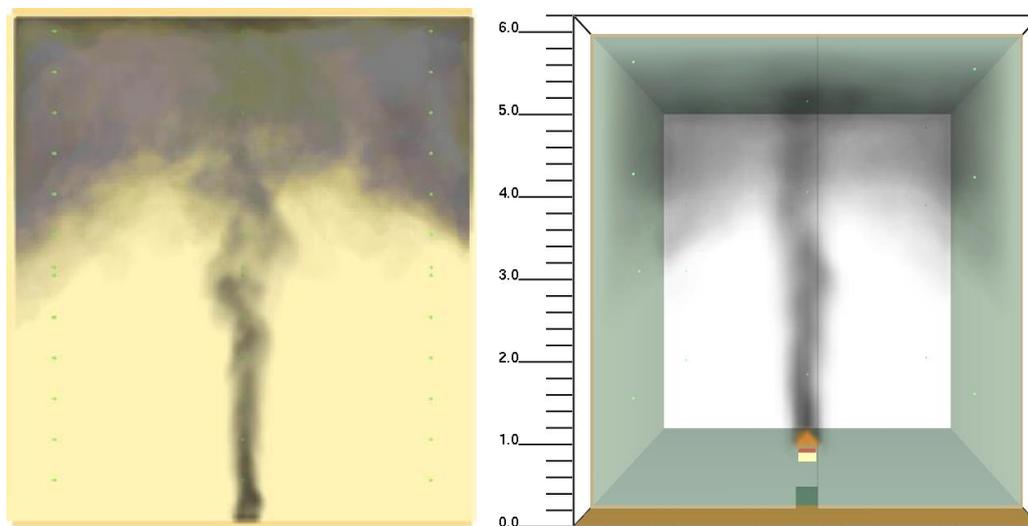
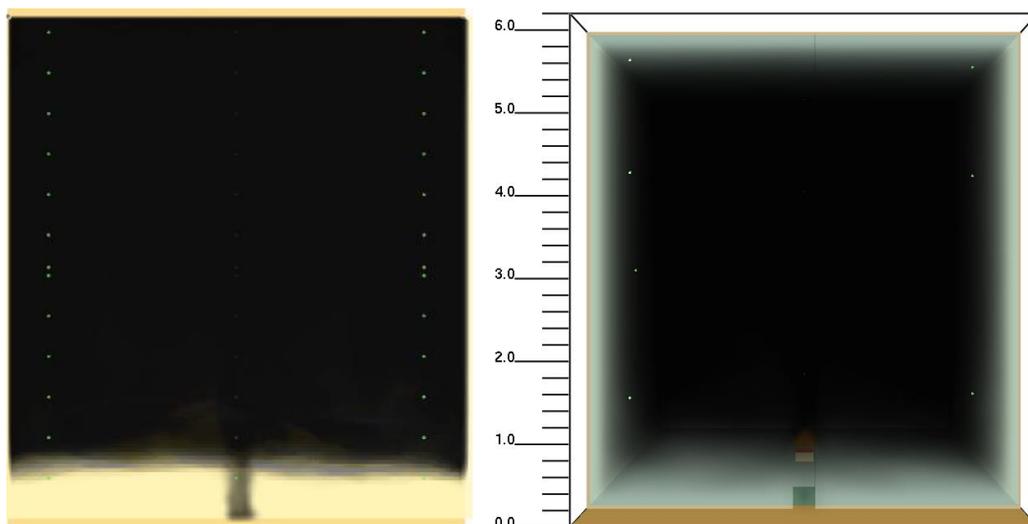


Figura 3-45: Elevação da temperatura média da camada de fumaça

3.3.1.3 *Análise dos resultados de T5*



a) AICF no tempo de 40 s.



b) AICF no tempo de 300 s.

Figura 3-46: T5, à esquerda imagem extraída de Bong (2011) e, à direita imagem deste trabalho extraída do Smokeview, para os tempos: a) 40 s; b) 300 s.

Assim como para T2, em T5 foram realizadas análises visuais da AICF baseadas em imagens do trabalho de Bong (2011) e em imagens deste trabalho, extraídas do Smokeview para T5. No tempo de 40 s a AICF em ambos os trabalhos apresentam alturas semelhantes, próxima dos 3,0 m. Ao término da simulação, 300 s, a AICF continua próxima tanto no

trabalho de Bong (2011) quanto neste trabalho, indicando mais uma vez que os resultados encontrados com o FDS continuam coincidentes, bem como em T2, como mostra a Figura 3-46.

Nas figuras de 3-47 a 3-49 têm-se os resultados, em forma de gráficos, obtidos neste trabalho e os obtidos por Bong (2011) para T5. Lembrando que o tempo de simulação foi de 300 s.

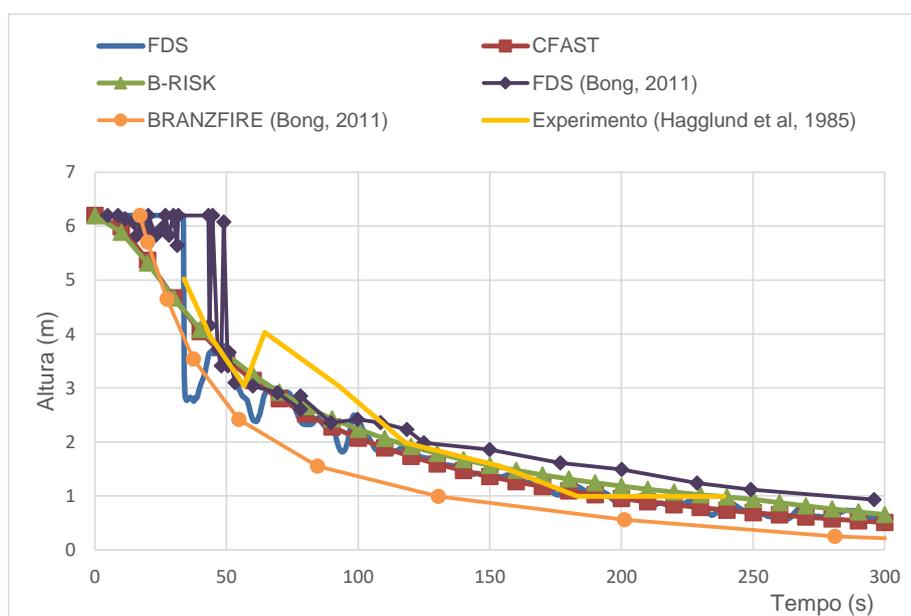


Figura 3-47: Altura da interface da camada de fumaça

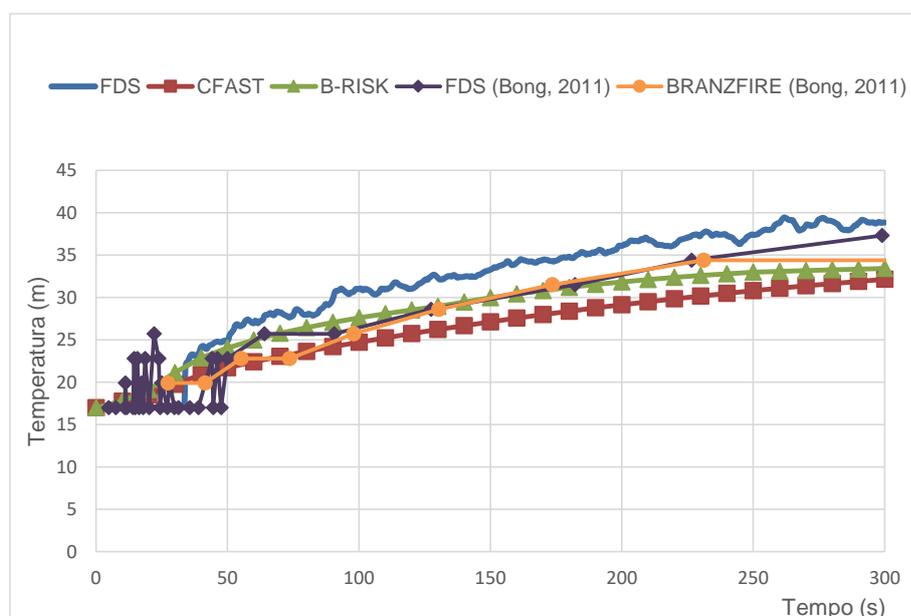


Figura 3-48: Elevação da temperatura média da camada de fumaça



Figura 3-49: Elevação da temperatura média da camada de fumaça nos medidores

Em T5, o resultado calculado por Bong (2011) com o FDS e o resultado encontrado com o BRANZFIRE mantiveram uma curva para a AICF bastante semelhante a partir do tempo de 54 s, no entanto o resultado com o BRANZFIRE apresentou uma AICF inferior ao longo de todo o tempo quando comparado com o resultado do FDS, tocando o piso aos 280 s. O resultado experimental calculado por Hagglund *et al.* (1985) apresentou um salto da AICF aos 64 s com posterior queda até aproximadamente 183 s, a partir deste tempo manteve a AICF constante até os 240 s, a uma altura de 1,0 m.

Em relação aos resultados obtidos neste trabalho nota-se que o FDS apresenta uma pequena variação (valores com saltos) da AICF até o tempo de 70 s. Os resultados obtidos com o CFAST e B-RISK se sobrepõem ao longo de toda a simulação, a AICF atinge os 0,65 m no tempo de 300s. Observa-se que a partir do tempo aproximado de 117 s de simulação os resultados obtidos neste trabalho se aproximam muito do resultado do experimento de Hagglund *et al.* (1985), como mostra a Figura 3-47. Os resultados dados pelos medidores 1 e 2 posicionados na face esquerda da Figura 3-39, mostram que no tempo de 35 s houve uma queda brusca na AICF, com suaves variações até o tempo de 100 s, atingindo uma AICF de 0,65 m no tempo final de simulação.

Os resultados da TMCF calculados por Bong (2011) com o FDS e com o BRANZFIRE apresentam uma pequena divergência do tempo de 50 s ao tempo de 90 s, atingindo neste tempo a temperatura de 26 °C, a partir deste tempo as curvas da TMCF são coincidentes

até o tempo de 230 s, onde atingem a temperatura de 35 °C, a partir deste tempo, o resultado da TMCF com o FDS aumentou, atingindo os 37 °C e a TMCF com o BRANZFIRE se mantém constante até o tempo final de simulação de 300 s, como mostra a Figura 3-48.

O resultado obtido neste trabalho como o FDS apresentou uma TMCF mais elevada, atingindo uma temperatura de 37 °C. Os resultados encontrados com o B-RISK e CFAST apresentaram semelhanças na TMCF do início ao fim da simulação, atingindo temperatura de 33 °C, como mostra a Figura 3-48. O resultado da TMCF encontrado neste trabalho com o B-RISK, foi o que mais se aproximou dos resultados encontrados por Bong (2011) com o FDS e BRANZFIRE.

As figuras 3-50 e 3-51 abaixo mostram as comparações da simulação realizada neste trabalho com o FDS para T5 com as equações de Klote *et al.* (2012), tanto para análise da AICF quanto para análise da TMCF.

Na Figura 3-50 com o FDS, a AICF leva um tempo de 33 s para atingir a taxa de calor liberado constante, neste tempo a AICF cai de 6,2 para 2,6 m, a partir de então a descida da camada de fumaça sofre uma pequena oscilação até o tempo de 120 s quando torna-se mais gradual atingindo 0,60 m aos 300 s de simulação. Adotando as equações de Klote *et al.* (2012), a AICF se aproxima do piso ao s136 s.

Desconsiderando o tempo de descida da AICF com o FDS para atingir a taxa de calor liberado, que são os 33 s iniciais, conclui-se que o resultado encontrado com as equações de Klote *et al.* (2012) coincidem com o resultado do FDS, no entanto os resultados das equações demonstram que a AICF toca o piso e o resultado do FDS a AICF se aproxima, mas não toca o piso.

Em relação à TMCF, Figura 3-51 observa-se que os resultados obtidos com o FDS levam os mesmos 33 s para começar a subir, atingindo uma temperatura máxima de 39 °C no tempo de 300 s, enquanto, o resultado obtido através das equações de Klote *et al.* (2012) sofrem um desvio significativo praticamente desde o início do incêndio chegando a 565 °C aos 136 s. Observa-se mais uma vez que as equações de Klote *et al.* (2012) são conservadoras para cálculo da AICF e bastante conservadoras no cálculo da TMCF, este mesmo resultado já foi observado em T2 e se repete em T7, a seguir.

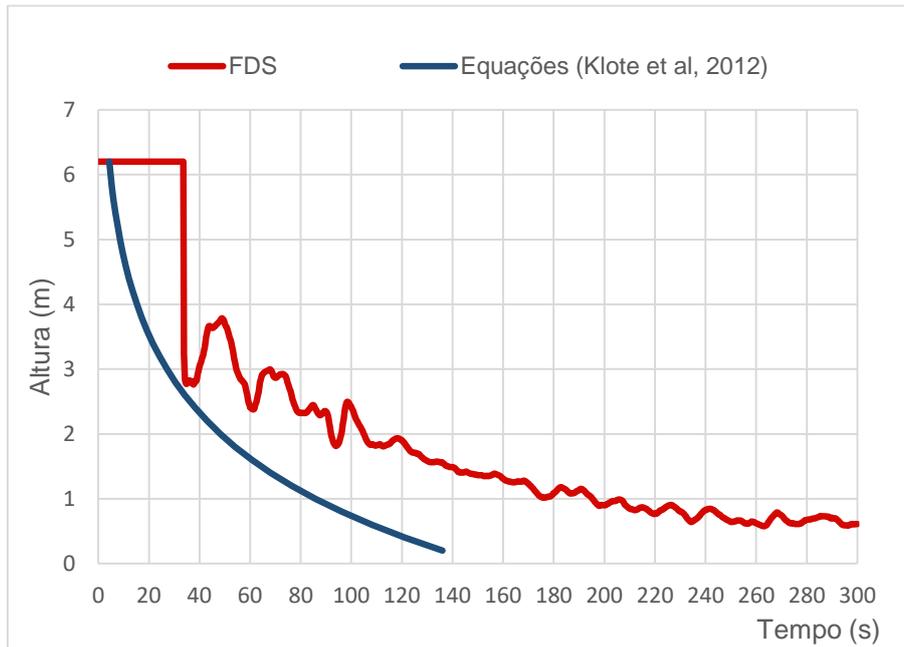


Figura 3-50: Altura da interface da camada de fumaça

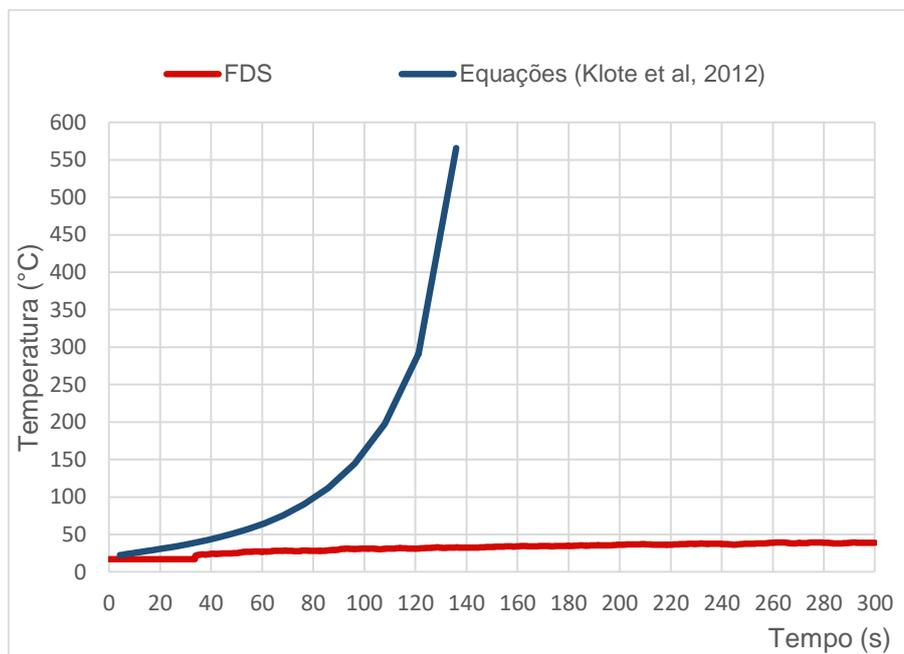
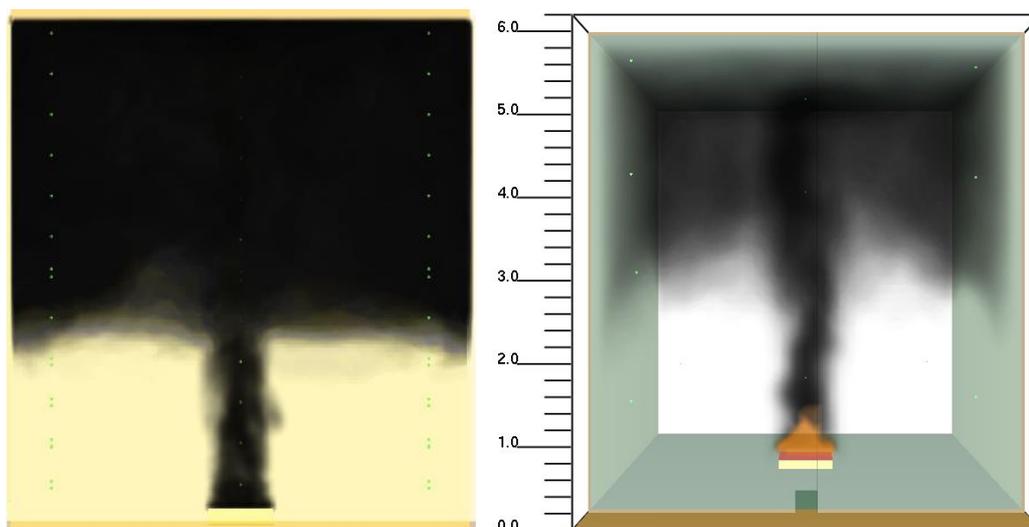
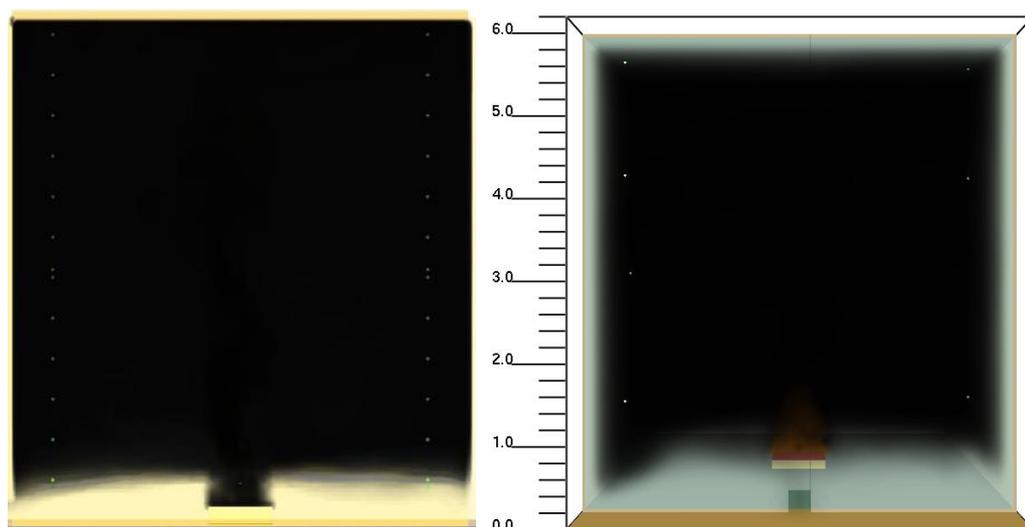


Figura 3-51: Elevação da temperatura média da camada de fumaça.

3.3.1.4 Análise dos resultados de T7



a) AICF no tempo de 40 s.



b) AICF no tempo de 80 s.

Figura 3-52: T5, à esquerda imagem extraída de Bong (2011) e, à direita imagem deste trabalho extraída do Smokeview, para os tempos: a) 40 s; b) 80 s.

Assim como nos testes anteriores, as figuras acima apresentam análises visuais da AICF baseadas em imagens do trabalho de Bong (2011) e em imagens deste trabalho para T7. Nota-se que a AICF diminui mais rapidamente no trabalho de Bong (2011) para os primeiros 40 s, no entanto aos 80 s a AICF está bem próxima ao piso, e ao termino da simulação realizada neste trabalho. Conclui-se que, mais uma vez os resultados encontrados com o FDS, tanto com a versão utilizada por Bong (2011) quanto com a versão utilizada neste trabalho, apresentam-se bastante próximos, como mostra a Figura 3-52.

Nas figuras de 3-53 a 3-55 têm-se os resultados, em forma de gráficos, obtidos neste trabalho e os obtidos por Bong (2011) para T7. Lembrando que o tempo de simulação foi de 120 s.

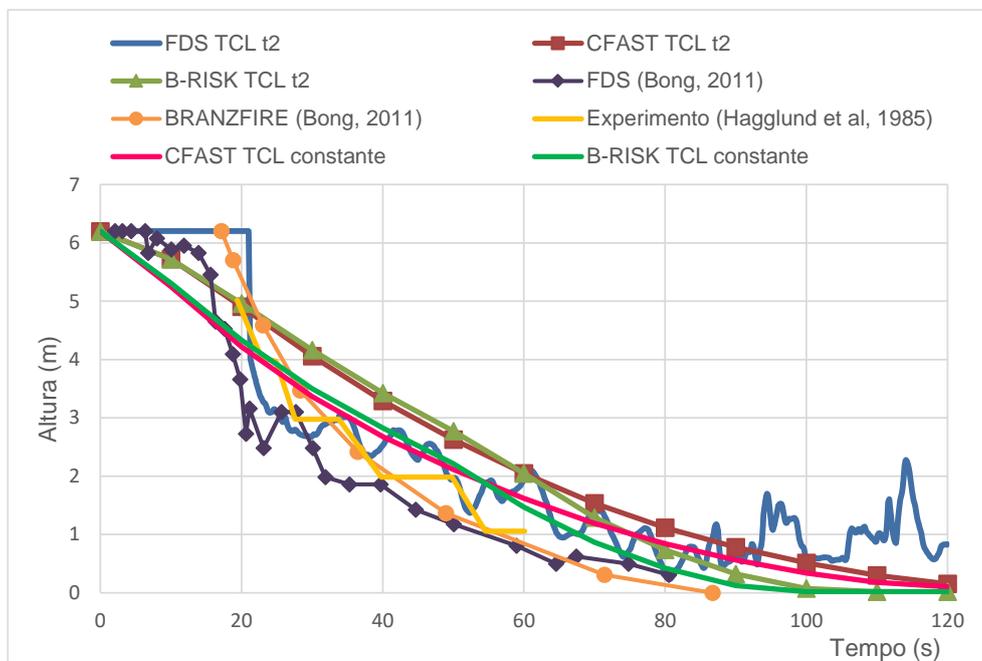


Figura 3-53: Altura da interface da camada de fumaça

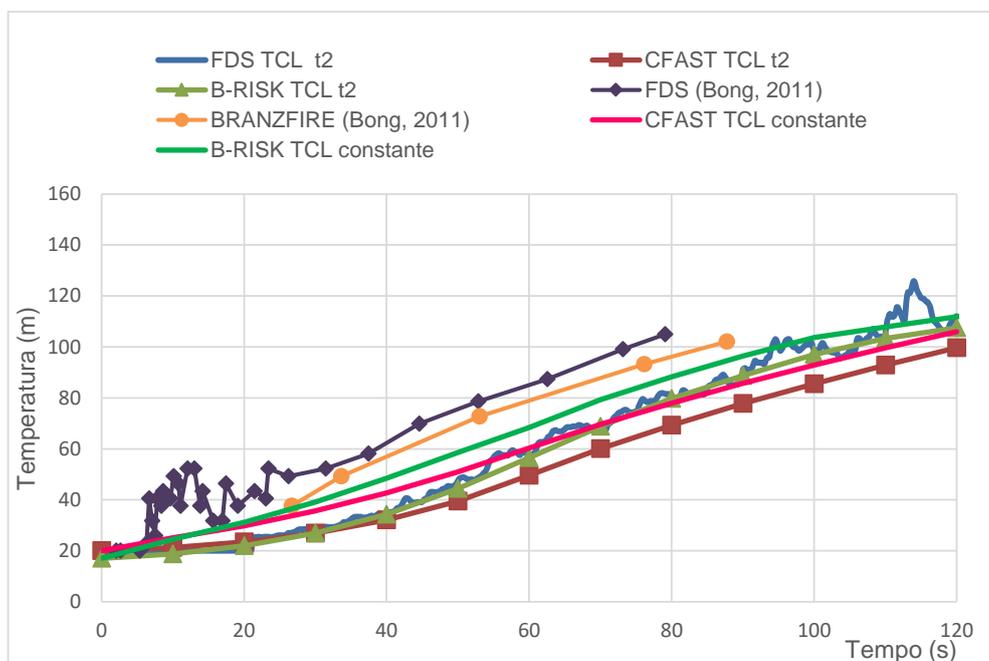


Figura 3-54: Elevação da temperatura média da camada de fumaça

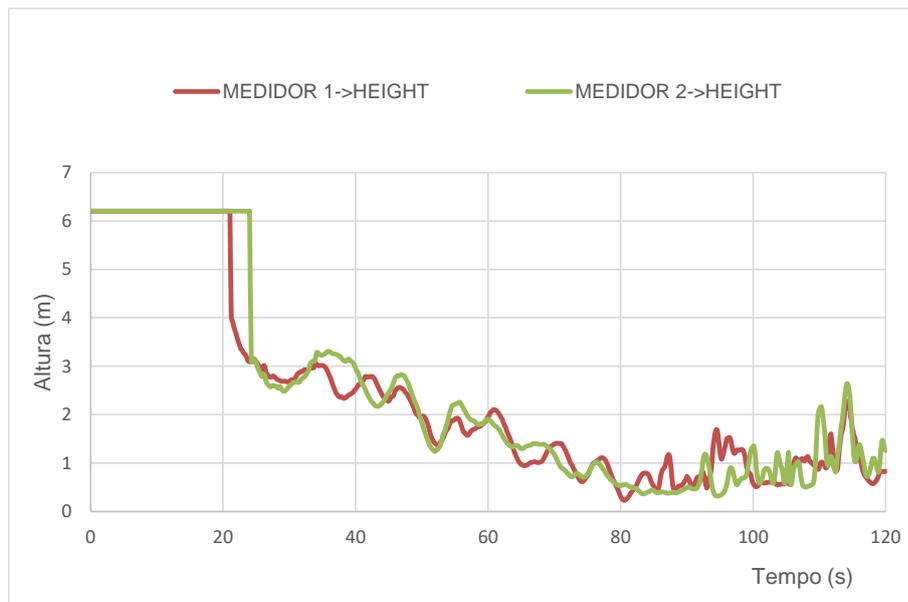


Figura 3-55: Elevação da temperatura média da camada de fumaça nos medidores

Em T7, o resultado calculado por Bong (2011) com o FDS e o resultado encontrado com o BRANZFIRE mantiveram uma curva para a AICF próximos, no entanto o FDS mostrou-se mais conservador em relação ao BRANZFIRE com uma AICF mais baixa entre os tempos de 20 s e 40 s, ambos atingem o piso aos 80 s. O resultado experimental calculado por Hagglund *et al.* (1985) da AICF inicia-se aos 20 s e finaliza-se aos 60 s a uma altura de 1,0 m, não sendo possível determinar se a AICF toca ou não o piso a partir deste tempo, como mostra a Figura 3-53.

Os resultados encontrados neste trabalho com o FDS TCL t^2 mostraram uma variação pouco significativa (valores com saltos) na AICF a partir do tempo de 30 s, atingindo o piso no tempo de 80 s. Os valores obtidos com o B-RISK TCL t^2 e CFAST TCL t^2 se aproximam ao longo de toda a simulação, com uma pequena diferença entre os tempos de 60 s voltando a se aproximar no tempo final de simulação de 120 s, atingindo o piso neste tempo. Os resultados encontrados com os medidores 1 e 2, como mostra a Figura 3-53, indicam uma variação pouco significativa (valores com saltos), bem como o resultado com o FDS TCL t^2 , com a AICF atingindo o piso aos 80 s.

Observa-se que os resultados com B-RISK e CFAST utilizando TCL t^2 são distantes dos resultados de Bong (2011) e do experimento realizado por Hagglund *et al.* (1985). Para tentar aproximar mais os resultados, realizou-se análises com a TCL constante. Analisando os resultados obtidos com o B-RISK TCL constante e C-FAST constante, apresentados na

Figura 3-53, a AICF obtida de forma linear se aproxima mais dos resultados de Bong (2011) com o programa BRANZFIRE e do experimento de Hagglund *et al.* (1985). O resultado da AICF com o programa B-RISK TCL constante toca o piso aos 100 s. De maneira geral, as análises realizadas neste trabalho com TCL t^2 apresentam uma maior AICF em comparação com as mesmas análises com TCL constantes.

Os resultados de Bong (2011) para a TMCF utilizando o FDS mostrou uma pequena variação até o tempo de 26 s, onde atinge a temperatura de 49 °C, a partir do tempo de 26 s a elevação da temperatura ocorre de forma mais linear atingindo 105 °C no tempo de 79 s. O resultado apresentado com o BRANZFIRE inicia-se aos 20 s de simulação mostrando-se bastante linear até os 87 s, onde atinge 102 °C, Figura 3-54.

Os resultados obtidos neste trabalho como o FDS TCL t^2 , B-RISK TCL t^2 e CFAST TCL t^2 apresentaram uma TMCF bastante próximas até o tempo de 50 s, no entanto no restante da simulação as diferenças não foram significativas, atingindo uma TMCF de aproximadamente 107 °C, como mostra a Figura 3-54. Os resultados de Bong (2011) destacam-se por serem mais conservadores, por outro lado, os resultados apresentados neste trabalho, tanto com o FDS TCL t^2 , como com o B-RISK TCL t^2 e CFAST TCL t^2 demonstram grande similaridade no fator tempo x TMCF, podendo assim considerá-los satisfatórios.

As análises realizadas com o B-RISK TCL t^2 e C-FAST t^2 , como mostra a Figura 3-54, demonstram que a TMCF, obtida de forma linear, bem como as análises da AICF, também se aproximam do resultado de Bong (2011) com o BRANZFIRE e do experimento de Hagglund *et al.* (1985), atingindo uma temperatura aproximada de 110 °C no tempo final da simulação. De maneira geral, as análises realizadas neste trabalho com TCL t apresentam uma maior TMCF em comparação com as mesmas análises com TCL t^2 .

As figuras 3-56 e 3-57 abaixo mostram as comparações da simulação realizada neste trabalho com o FDS para T7 com as equações de Klote *et al.* (2012), tanto para análise da AICF quanto para análise da TMCF.

Na Figura 3-56 com o FDS, a AICF leva um tempo de 21 s para atingir a taxa de calor liberado constante, neste tempo a AICF cai de 6,2 para 3 m, a partir de então a descida da camada de fumaça sofre grandes oscilações chegando a tocar o piso aos 80 s e voltando a oscilar para 0,8 m de altura. Adotando as equações de Klote *et al.* (2012), a AICF se aproxima do piso aos 58 s.

Desconsiderando o tempo de descida da AICF com o FDS para atingir a taxa de calor liberado, que são os 21 s iniciais, conclui-se que o resultado encontrado com as equações de Klote *et al.* (2012) coincidem com o resultado do FDS, ambos tocando o piso com uma diferença de tempo de 10 s.

Em relação à TMCF, na Figura 3-57 observa-se que os resultados obtidos com o FDS levam os mesmos 21 s para começar a subir, atingindo uma temperatura máxima de 112 °C no tempo de 120 s, enquanto, o resultado obtido através das equações de Klote *et al.* (2012) sofrem um desvio significativo praticamente desde o início do incêndio chegando a 1530 °C no tempo de 58 s.

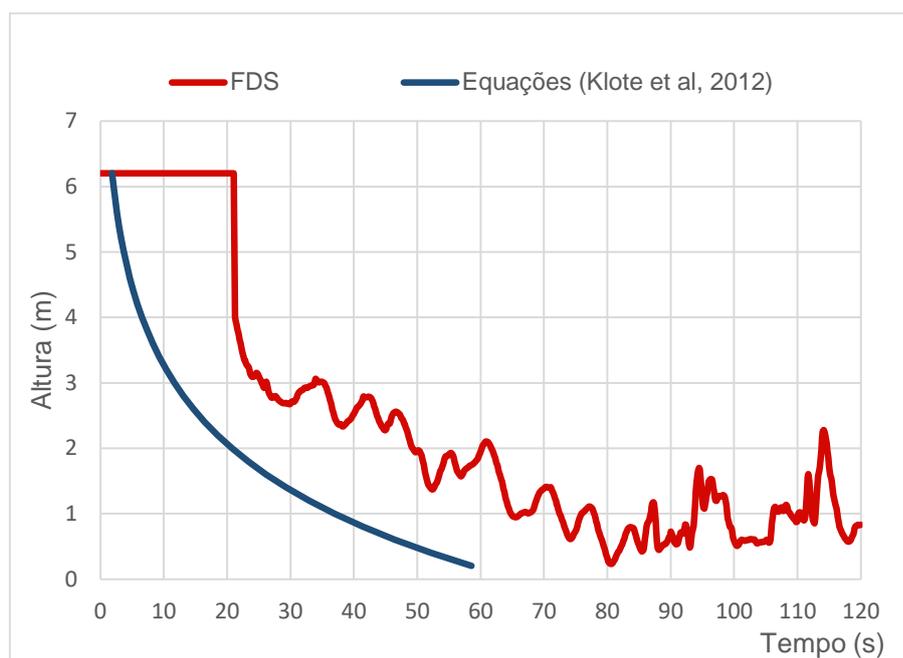


Figura 3-56: Altura da interface da camada de fumaça

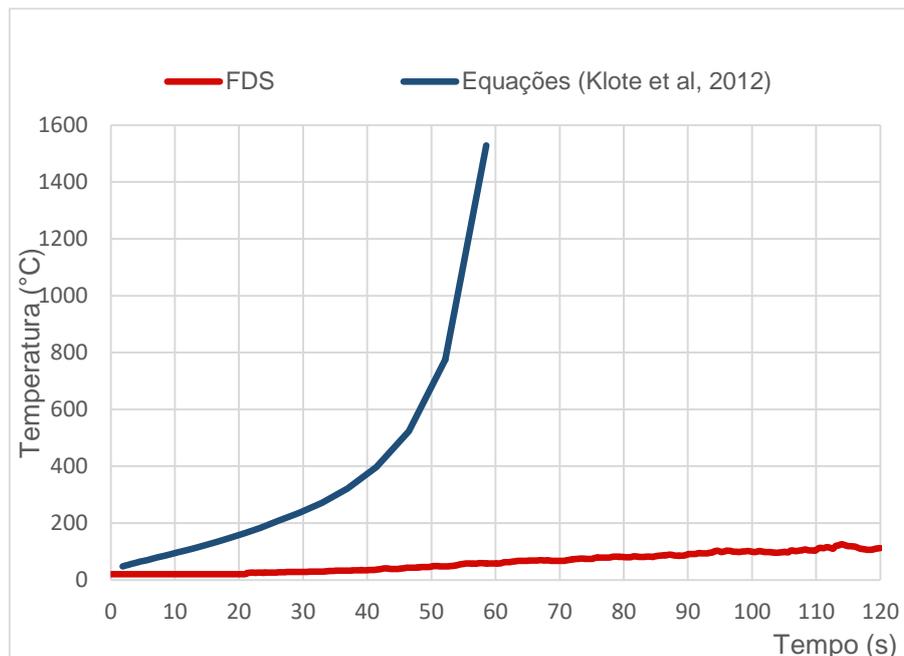


Figura 3-57: Elevação da temperatura média da camada de fumaça

3.3.1.5 Observações gerais sobre os testes T2, T5 e T7

Os resultados obtidos neste trabalho para o T2, nas simulações FDS TCL t^2 , B-RISK TCL t^2 e CFAST TCL t^2 , para a AICF se aproximaram bastante dos resultados de Bong (2011) com os programas FDS e BRANZFIRE, bem como com dos resultados experimentais de Hagglund *et al.* (1985). Para a TMCF apenas o resultado encontrado pelo CFAST sofreu um pequeno deslocamento em relação aos demais resultados.

Para T5 os resultados obtidos neste trabalho com o FDS TCL t^2 , B-RISK TCL t^2 e CFAST TCL t^2 , para a AICF, se aproximaram do resultado encontrado por Bong (2011) com o programa FDS e com o resultado experimental de Hagglund *et al.* (1985). O resultado de Bong (2011) com o programa BRANZFIRE se distancia um pouco tanto do resultado do próprio autor com o FDS, quanto do resultado de Hagglund *et al.* (1985) e dos resultados obtidos neste trabalho. Para análise da TMCF os resultados obtidos com o B-RISK TCL t^2 e CFAST TCL t^2 se aproximam dos resultados de Bong (2011), apenas o resultado encontrado neste trabalho com o programa FDS TCL t^2 se distancia um pouco dos demais resultados.

Em T7 os resultados, para a AICF, obtidas com TCL t^2 foram bastante divergentes dos resultados de Bong (2011) e Hagglund *et al.* (1985), apresentando uma maior AICF. O resultado com o programa FDS TCL t^2 sofreu variações (valores com saltos) ao longo de

toda a simulação (o que não ocorreu tão significativamente em T2 e T5), também divergindo dos resultados de Bong (2011), no entanto, em relação aos demais resultados apresentados neste trabalho para a AICF, o FDS TCI t^2 foi o que mais se aproximou do resultado experimental de Hagglund *et al.* (1985). Os resultados para a TMCF, com TCL t^2 apresentaram uma altura inferior, menos conservadora, que os resultados de Bong (2011).

As análises realizadas em T7 para a AICF, obtidas com TCL constante, demonstraram uma relação mais próxima com o resultado de Bong (2011) e o resultado experimental de Hagglund *et al.* (1985), e uma AICF inferior à encontrada com TCL t^2 . Os resultados encontrados com TCL constante, para a TMCF, também se aproximaram mais do resultado de Bong (2011) com o BRANZFIRE, apresentando uma TMCF superior à encontrada com TCL t^2 , sendo assim, valores de TMCF mais conservadores.

Considera-se controle de fumaça quando há um sistema de introdução de ar (natural ou mecânico) e um sistema de extração de fumaça (natural ou mecânico), no caso dos testes realizados por Bong (2011), baseados no experimento de Hagglund *et al.* (1985), aqui denominados de T2, T5 e T7, o compartimento possui abertura que funciona como saída natural de fumaça mas não possui sistema de entrada de ar, logo ele não se encaixa dentro dos parâmetros para implementação de sistema de controle de fumaça determinados pela Tabela 1 da CBPMSP IT 15:2015. No entanto algumas observações podem ser feitas para análise de comparação com parâmetros caso o compartimento atendesse aos requisitos determinados pela IT.

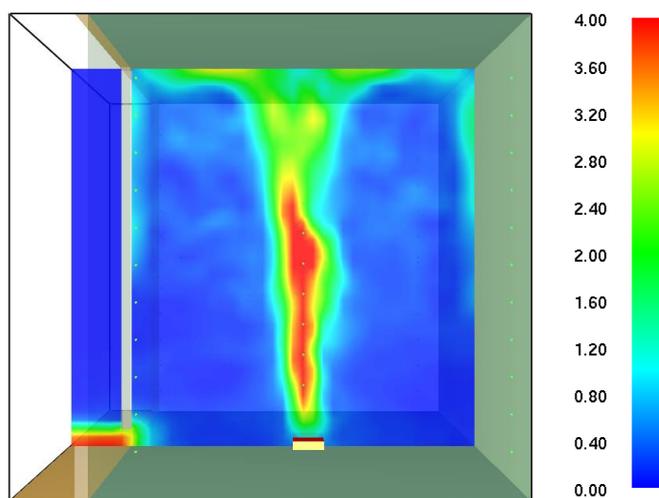


Figura 3-58: T2, velocidade da saída de fumaça aos 70 s.

A Figura 3-58 apresenta a maior velocidade de saída de fumaça no tempo de 70 s, para T2, que é de 4,0 m/s, a partir deste tempo a velocidade cai gradualmente, ficando próxima dos 2m/s até o final da simulação, 180 s.

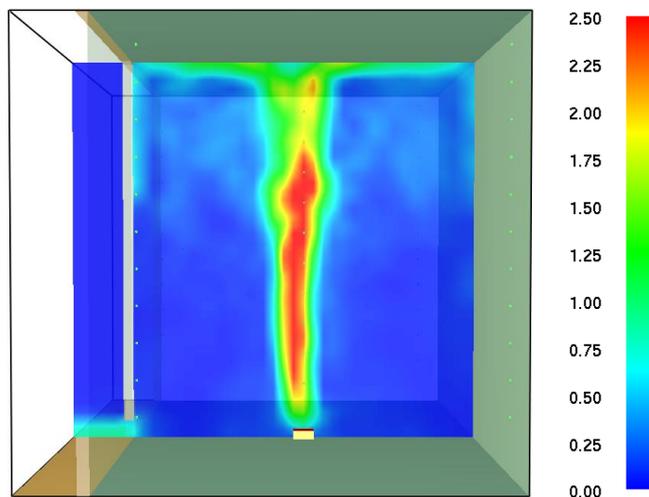


Figura 3-59: T5, maior velocidade da entrada de ar, no tempo de 70 s.

Na Figura 3-59 foi registrada a maior velocidade de entrada de ar no tempo de 70 s, em torno de 0,75 m/s, a partir deste tempo a velocidade cai tendendo a zero.

Na Figura 3-60 foi registrada a maior velocidade de entrada de ar, de 4,5 m/s, no tempo de 70 s, a partir deste tempo a velocidade mantém-se constante até o término da simulação. Ao contrário de T2 onde a velocidade se estabiliza e, de T5 onde a velocidade de saída de fumaça diminui até parar.

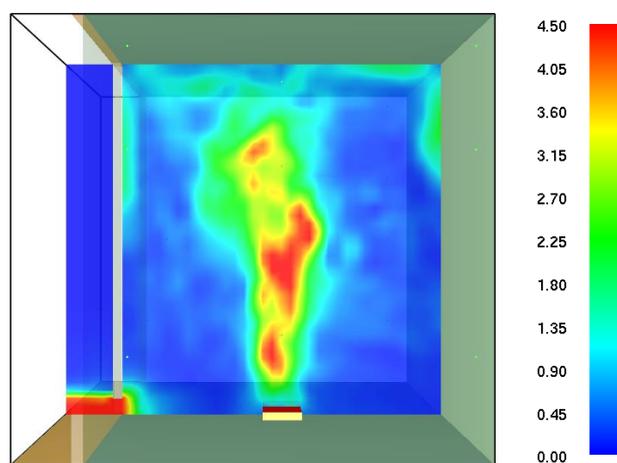


Figura 3-60: T7, maior velocidade da entrada de ar, no tempo de 80 s.

3.4 Simulações realizadas por Kerber *et al.* (2007)

Kerber *et al.* (2007) pesquisaram os possíveis efeitos de vários arranjos de fornecimento de ar e, de velocidades de entrada de ar em um sistema de controle de fumaça em um átrio. As velocidades de entrada de ar variaram de 0,5 a 3,0 m/s. As entradas de ar mecânicas, em cada cenário, foram distribuídas de forma simétrica ou assimétrica, junto ao piso e também ao longo da altura das paredes, e, em um dos casos, provocando o giro da pluma de fumaça. Os autores usaram o programa FDS, Versão 4.06, para simular os cenários em um átrio cúbico de 30,5 m de lado.

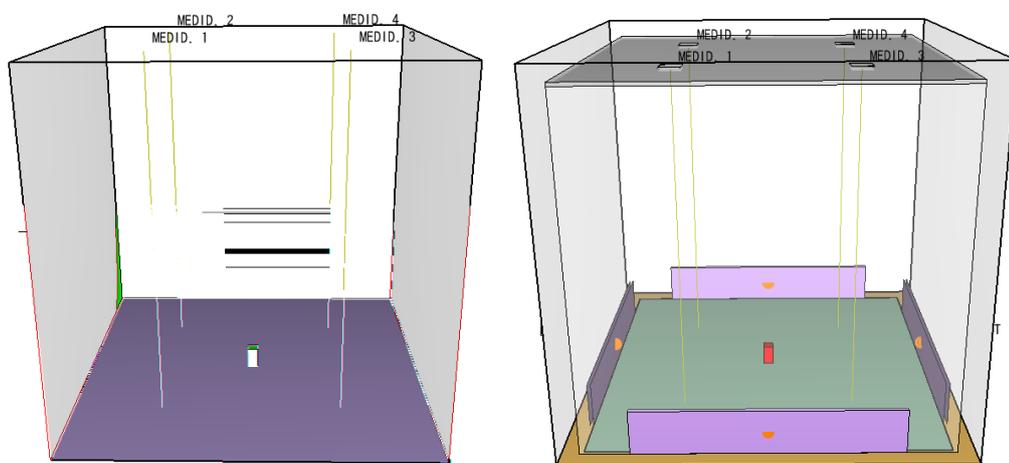


Figura 3-61: Imagens do Cenário 1 (sem aberturas) e Cenário 2 (com entradas de ar mecânicas simétricas junto ao piso e aberturas no teto)

Dez cenários com a mesma configuração geométrica foram analisados pelos autores no FDS, com uma fonte de incêndio dada por uma pilha de paletes de madeira Pinus com área da base igual a 0,81 m² e altura de 1,8 m, com uma TCL variando de 5 a 7 MW. O foco do fogo foi centralizado no piso do átrio. A temperatura ambiente foi tomada igual a 20 °C e o tempo de duração do fogo de 1.000 s. Apenas no Cenário 1 não havia aberturas ou saídas de ventilação (Figura 3-61). Nos Cenários 2 a 10 foram colocados dutos de ventilação (entradas de ar mecânicas) e aberturas de saída natural de fumaça no teto do átrio.

Nos Cenários 2 a 5 (figuras 3-61 e 3-62) foram colocadas aberturas de saída de fumaça no teto e um duto de ventilação por parede, de forma simétrica, ao nível do piso. Para cada cenário os dutos de entrada de ar foram definidos com áreas diferentes resultando em velocidades diferentes, para manter a mesma vazão.

Nos Cenários 6 e 7 foi colocado um duto de ventilação por parede de forma assimétrica. Nos Cenários 8 e 9 foram colocados pequenos dutos de ventilação centralizados, de forma simétrica. No último, Cenário 10, pequenos dutos foram colocados nos cantos das paredes, de forma a provocar o giro da pluma de fumaça. No entanto, para elaboração deste trabalho, foram simulados apenas os Cenários de 1 a 5, que apresentavam simetria.

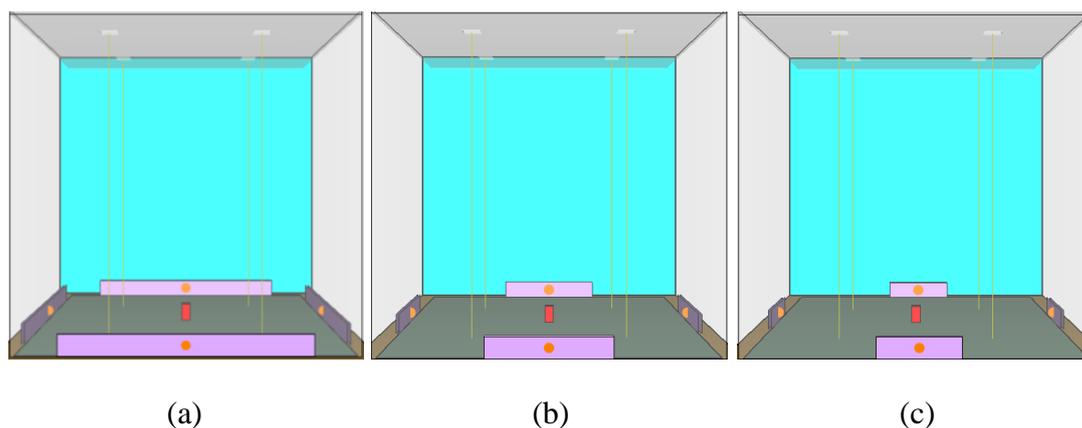


Figura 3-62: Imagens dos cenários: (a) Cenário 3; (b) Cenário 4; e (c) Cenário 5

3.4.1 Modelagem e simulação dos experimentos

A Tabela 3-6 apresenta a configuração geométrica dos dutos de ventilação e aberturas de extração de fumaça dos Cenários 1 a 5 realizados por Kerber *et al.* (2007).

Tabela 3-6: Configuração geométrica dos dutos de ventilação e aberturas (figuras 3-61 e 3-62)

| SIMULAÇÃO | Duto largura (m) | Duto Alt.(m) | Configuração | Velocidade (m/s) | Volume de entrada de ar, vazão (m ³ /s) |
|-----------|------------------|--------------|--------------|------------------|--|
| Cenário 1 | 0,0 | 0,0 | sem abertura | 0,0 | 0,0 |
| Cenário 2 | 22,8 | 4,0 | simétrica | 0,5 | 182,4 |
| Cenário 3 | 22,8 | 2,0 | simétrica | 1,0 | 182,4 |
| Cenário 4 | 11,4 | 2,0 | Simétrica | 2,0 | 182,4 |
| Cenário 5 | 7,6 | 2,0 | simétrica | 3,0 | 182,4 |

Tabela 3-7: Tamanho das células

| | | |
|----------------------|---------|----------------------------------|
| Cenário 1 | X = 100 | Cels.:0,305 x 0,305 x 0,305m |
| | Y = 100 | |
| | Z = 100 | |
| Cenário 2,3,4 e 5 | X = 112 | Cels.: 0,305 x 0,305 x 0,305m |
| | Y = 112 | |
| | Z = 106 | |

Kerber *et al.* (2007) utilizaram tamanhos diferentes de células ao dividir o átrio em 8 malhas, a fim de facilitar o processamento das simulações em 8 CPUs, talvez, devido à versão do software ou à capacidade de seus equipamentos. A divisão do átrio em 8 malhas, também foi necessária ao modelar a pilha de madeira em combustão. Neste trabalho as células foram tomadas como descritas na Tabela 3-7, próximas ao tamanho de células adotadas pelo autor, e todo o átrio foi simulado sem divisão de malhas. A pilha de madeira não foi modelada e para simulação do incêndio, a TCL fornecida por Kerber *et al.* (2007) foi utilizada como dado de entrada. Para os Cenários de 2 a 5 a malha foi prolongada por aproximadamente 2 m além das paredes e acima do teto com o sistema de extração de fumaça.

Em todos os cenários as aberturas naturais de ventilação no teto tinham área de 3,24 m² cada e, simetricamente 6,7 m de distância das paredes. Nos Cenários 2 a 5 o teto, com aberturas de extração de fumaça, e as paredes, com os dutos de ventilação, foram modeladas como *Obstructions*. As demais paredes e o piso, localizadas nos limites da malha, foram modeladas como *Vents*. Paredes, teto e piso foram modeladas com 0,10 m de espessura de concreto, conforme Kerber *et al.* (2007), e as propriedades também segundo Kerber *et al.* (2007): densidade de 2.100 kg / m³; calor específico de 0,88 kJ / (kg°K); condutividade de 1,0 W / (m°K); emissividade de 0,1. O calor de combustão utilizado foi de 19.400 kJ/kg. Neste trabalho, foi realizada uma simulação para cada cenário, com a taxa de calor liberado de acordo com dados do trabalho de Kerber *et al.* (2007), mostradas na Figura 3-63 para os cenários analisados. A fração de massa de combustível convertida em partículas de fumaça

foi tomada igual a 0,015 para geração de pouca fumaça tal como no trabalho de Kerber *et al.* (2007). A fração de massa de combustível convertida em monóxido de carbono foi tomada igual a 0,005, valor fornecido pela biblioteca do FDS. Quatro medidores da camada de fumaça (*Layer Zoning Device*) foram definidos abaixo das aberturas no teto.

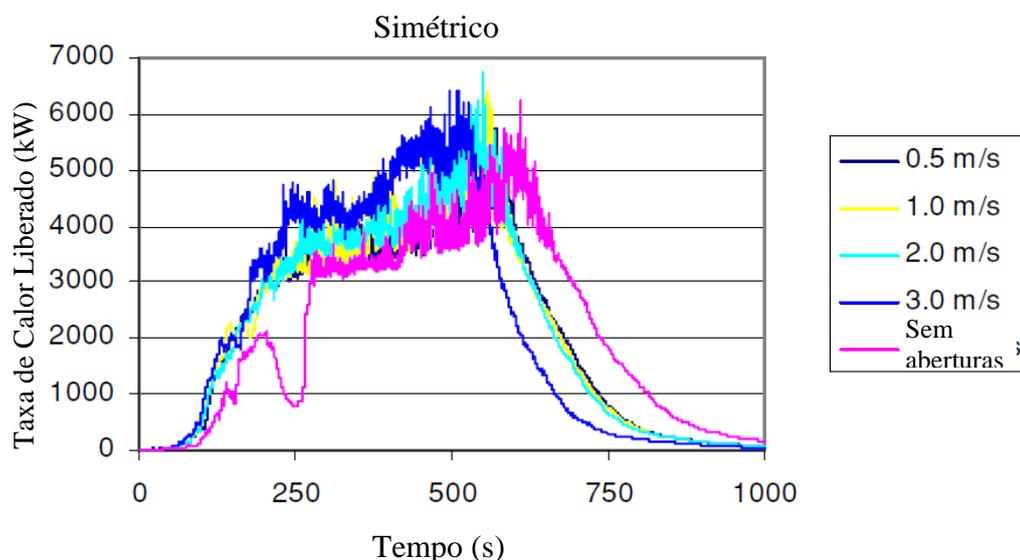


Figura 3-63: Taxa de Calor Liberado para os Cenários de 1 a 5, simétricos.

Nas simulações com o CFAST, foram utilizados os mesmos dados de entrada das simulações com o FDS. Para o combustível, madeira Pinus, foi adotado o calor de combustão igual a 19.400 kJ/kg, segundo Hurley (2016) na página 143, Tabela 5.3. E, a fração emitida por radiação foi tomada com o valor padrão do programa igual a 0,35. O fogo foi localizado ao nível do piso.

No programa B-RISK, foram utilizados os mesmos dados de entrada das simulações com o CFAST.

Usando a planilha de Overholt (2017) com D^* (diâmetro do fogo) variando segundo dados disponíveis na Tabela 3-8 a maior dimensão da célula adotada neste trabalho (0,165 m) ficou próxima da malha grossa que é $D^*/4$ para todos os cenários simulados, como mostra a Tabela 3-8.

Tabela 3-8: Cálculo de tamanho de célula

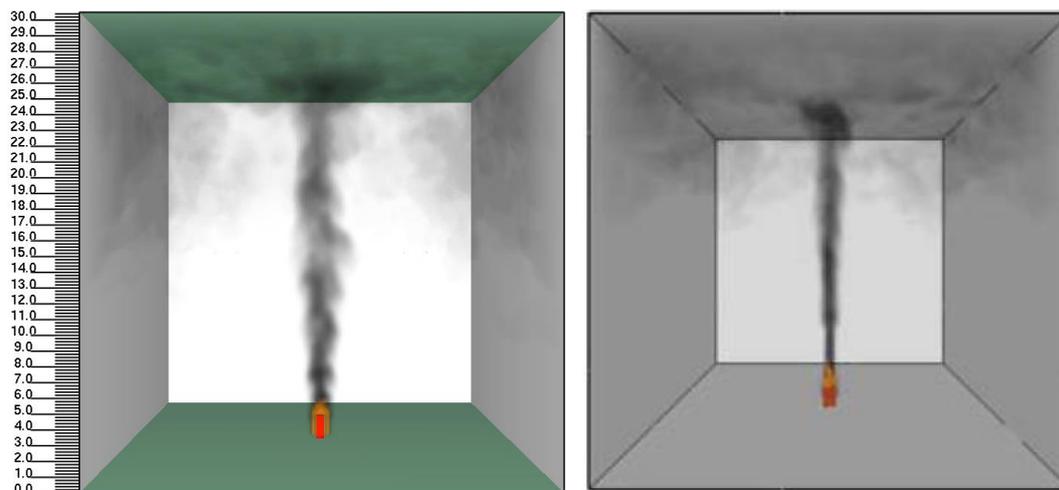
| Kerber <i>et al.</i> (2007) Átrio | Tamanho da célula segundo Overholt (2017) | | | | |
|---|---|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| | C1 $D^*=1,826$ | C2 $D^*=1,826$ | C3 $D^*=1,93$ | C4 $D^*=1,926$ | C5 $D^*=1,933$ |
| $D^*/4$ (malha grossa) | 0,456 | 0,456 | 0,482 | 0,481 | 0,483 |
| $D^*/10$ (malha moderada) | 0,182 | 0,182 | 0,193 | 0,192 | 0,193 |
| $D^*/16$ (malha fina) | 0,114 | 0,114 | 0,120 | 0,120 | 0,121 |
| Maior dimensão da célula adotada neste trabalho | 0,305 ($D^*/5,98$) | 0,305 ($D^*/5,98$) | 0,305 ($D^*/6,32$) | 0,305 ($D^*/6,31$) | 0,305 ($D^*/6,33$) |

3.4.1.1 RESULTADOS

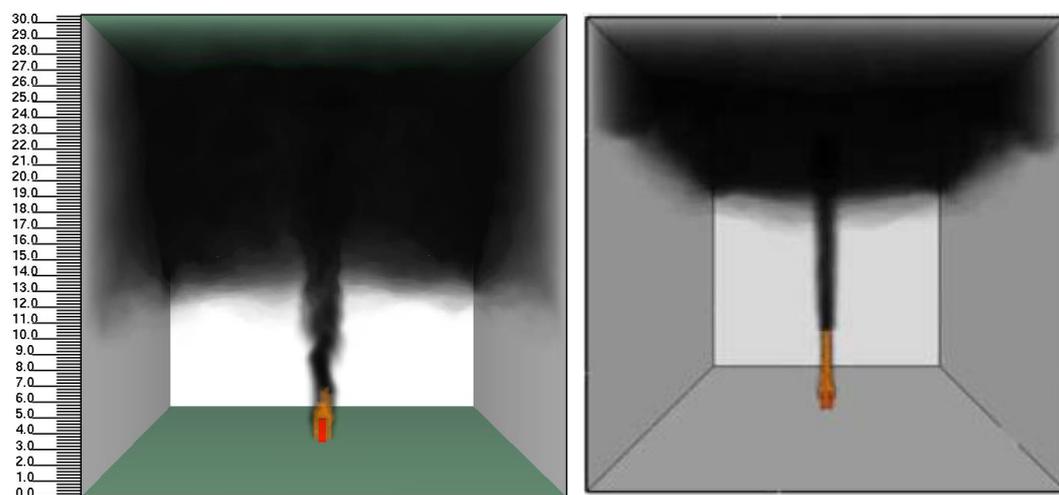
Os resultados: altura da interface da camada de fumaça – AICF; temperatura média da camada de fumaça – TMCF; e, temperatura média da camada livre de fumaça – TMLF; calculados neste trabalho, utilizando os programas FDS (Versão 6.5.1), CFAST (Versão 7.1.2) e B-RISK (Versão 2015.07) estão apresentados nas figuras 3-64 a 3-92, nestas mesmas figuras tem-se também, os resultados experimentais e os obtidos com o programa FDS (Versão 4.06) por Kerber *et al.* (2007).

3.4.1.2 Análise dos resultados do Cenário 1

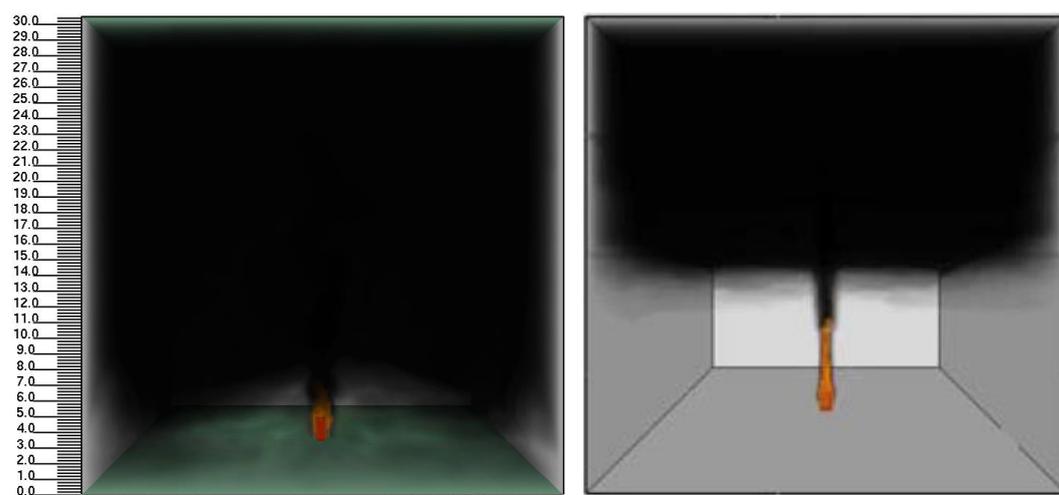
Conforme Kerber *et al.* (2007) a simulação do Cenário 1 foi executada para definir o pico da taxa de liberação de calor e o momento em que se observa a formação da camada de fumaça. Como não há aberturas nesse cenário, o fogo é alimentado pelo oxigênio disponível no ambiente.



a) 150 s.



b) 300 s.



c) 600 s.

Figura 3-64: Cenário 1, à esquerda imagem extraída do Smokeview, e à direita, imagem do trabalho de Kerber *et al.* (2007) para os tempos: a) 150s; b) 300s; c) 600 s.

No FDS é possível designar um incêndio de duas formas distintas, a primeira é especificar uma taxa de liberação de calor em uma superfície específica, prescrevendo um queimador definido (como tem sido feito neste trabalho), a segunda é entrar com as propriedades dos materiais combustíveis e simular a sua queima. Kerber *et al.* (2007) adotaram a segunda forma de estabelecer um incêndio, usando como fonte do incêndio 12 paletes de madeira (0,1m x 0,1m x 0,9 m) empilhados um sobre o outro e, conforme já comentado, para o princípio do fogo usaram 4 blocos quentes centralizados nas extremidades de cada face.

Os resultados visuais para o Cenário 1 são apresentados na Figura 3-64 para os tempos de 150 s, 300 s e 600 s.

Kerber *et al.* (2007) não apresentam graficamente as AICF e as TMCF, logo, as alturas das camadas de fumaça foram obtidas visualmente nas figuras do trabalho dos autores para cada cenário gerado e, nas imagens geradas neste trabalho a partir do Smokeview para os tempos de simulação apresentados a seguir.

Na Figura 3-64(a) à esquerda, aos 150 s, a pluma da fumaça e a camada de fumaça formam-se mais espalhadas e menos densas e o jato de fumaça (fluxo de fumaça horizontal, IT 15 – Parte 2) é direcionado para baixo, fazendo com que a camada de fumaça atinja uma altura de aproximadamente 17 m. No trabalho de Kerber *et al.* (2007), à direita, a pluma apresenta-se mais densa e mais retilínea e o jato de fumaça forma-se mais homogêneo, atingindo uma altura aproximada de 20 m.

Na Figura 3-64(b) à esquerda, aos 300 s, a pluma de fumaça apresenta-se mais densa e a interface da camada de fumaça atinge uma altura de 13 m. Na figura à direita, as chamas se apresentam mais altas com uma pluma densa, porém, a camada de fumaça desce mais com a interface localizada a aproximadamente 19 m.

Na Figura 3-64(c) à esquerda, aos 600 s, a interface da camada de fumaça atinge a altura aproximada de 4 m, na figura à direita, a camada de fumaça atinge altura aproximada de 15 m. Os resultados comparativos do Cenário 1, realizados entre os dois trabalhos aqui apresentados, demonstraram uma grande diferença na projeção da pluma e na descida da camada de fumaça, para todos os tempos apresentados.

De modo geral, para os tempos apresentados, os resultados obtidos neste trabalho apresentam-se mais conservadores, levando a uma menor AICF comparado aos resultados do trabalho de Kerber *et al.* (2012). Ao final da simulação a AICF atinge o piso, enquanto no trabalho do autor a AICF se mantém a uma altura aproximada de 11 m, concluindo que os resultados encontrados neste trabalho foram bastantes conservadores.

Neste trabalho, no tempo de 600 s, a taxa de liberação de calor atinge o pico de 5 MW, demonstrado na Figura 3-65 (este mesmo gráfico é mostrado na Figura 3-63 juntamente com a TCL de outros cenários).

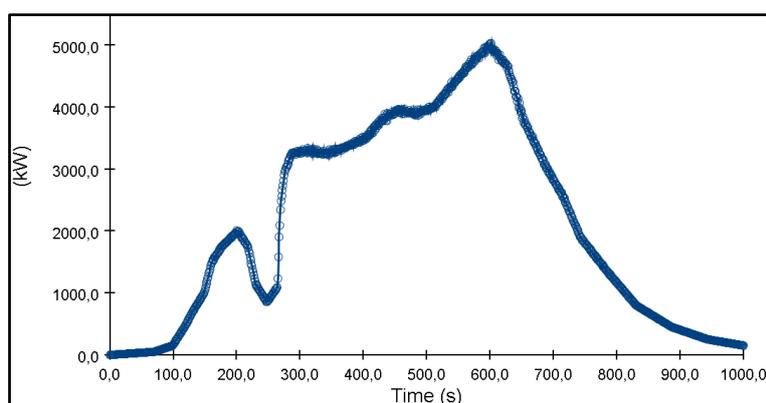


Figura 3-65: TCL máximo.

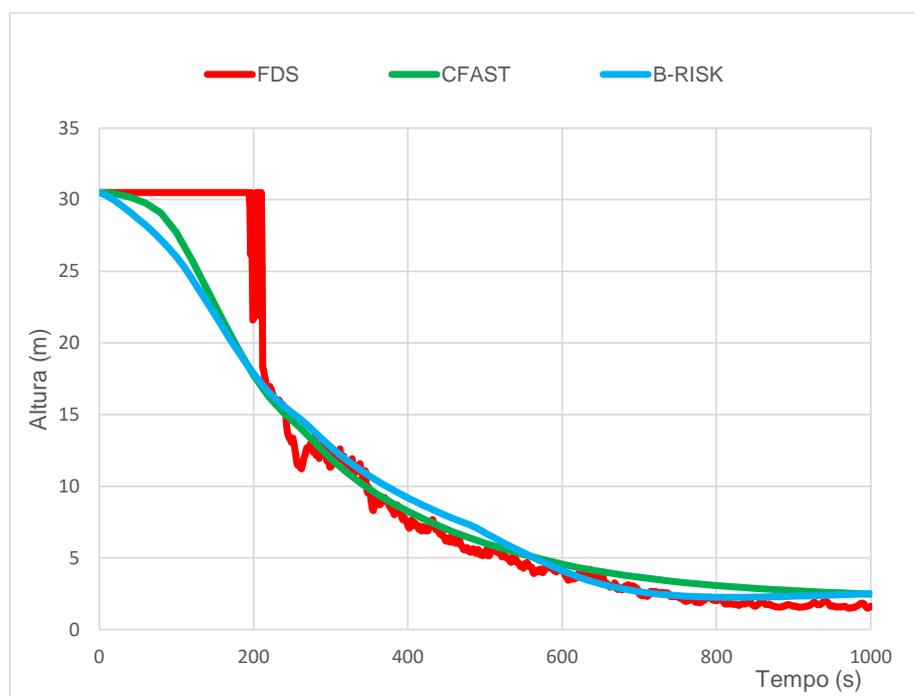


Figura 3-66: Altura da interface da camada de fumaça

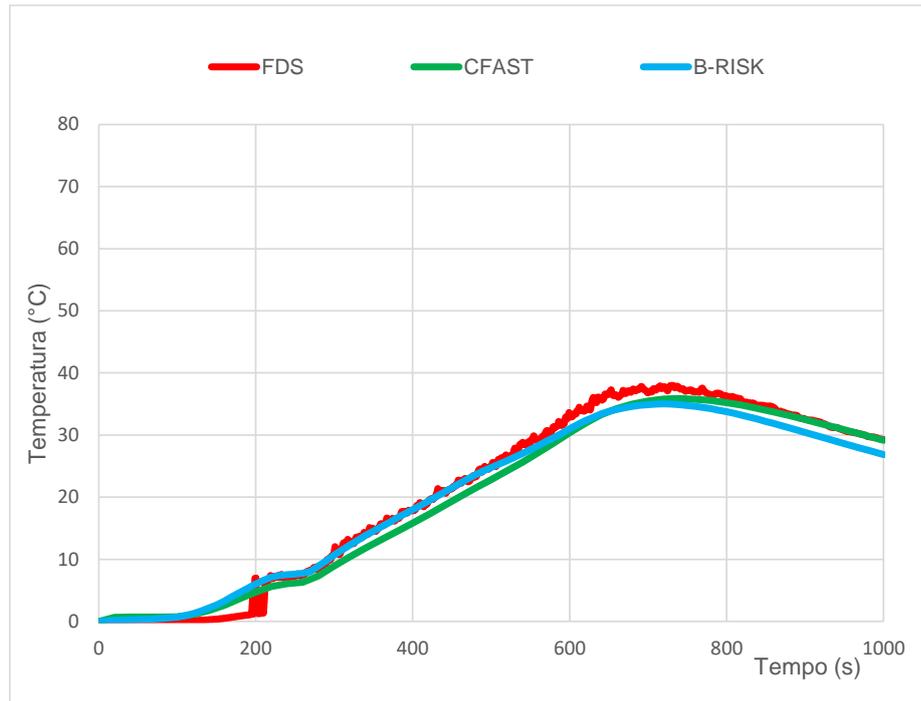


Figura 3-67: Elevação da temperatura média da camada de fumaça

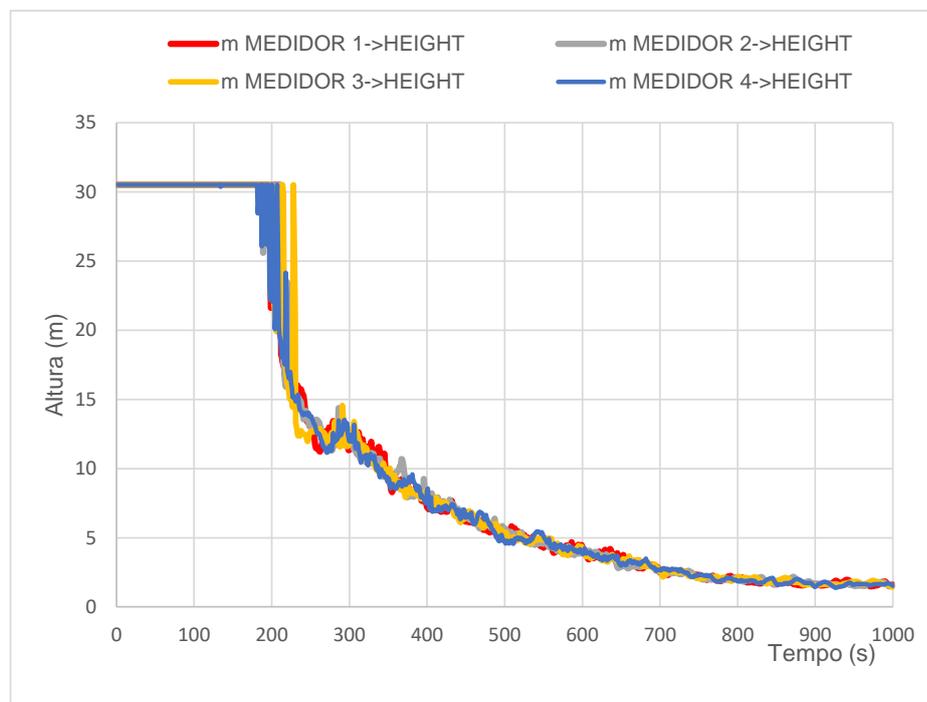


Figura 3-68: Medidores, Cenário 1

No Cenário 1, sem aberturas ou sistema de extração de fumaça, Kerber *et al.* (2007), utilizando o FDS demonstraram que a AICF diminuiu a uma altura aproximada de 8,0 m ao final da simulação.

Em relação aos resultados obtidos neste trabalho, nota-se a partir da Figura 3-67 que, devido à baixa temperatura da camada de fumaça até o tempo de 200 s, o FDS não consegue calcular a AICF, a partir de então a AICF sofre uma queda brusca atingindo uma altura de 7 m no tempo de 400 s, no tempo de 800 s atinge a altura de 2 m, chegando a 1,5 m do piso aos 1000 s. Por outro lado os programas CFAST e B-RISK conseguem prever a AICF desde o início da simulação, mantendo resultados bem próximos ao longo de todo o tempo. Aos 200 s ambos os programas apresentam AICF próximo ao FDS, que é de 17 m, atingindo uma altura de 2,5 m ao final da simulação. Os três programas, FDS, CFAST e B-RISK apresentam resultados bastante próximos quanto à AICF do cenário 1. A Figura 3-68 que mostra que não houve variação entre as medições da AICF pelos medidores adotados no cenário 1.

Em relação ao trabalho de Kerber *et al.* (2007), os autores não apresentam dados quanto à temperatura média da camada de fumaça (TMCF).

Os resultados obtidos neste trabalho com o FDS mostram que somente a partir do tempo de 200 s o programa consegue medir a TMCF, como mostra a Figura 3-67 atingindo em torno de 6 °C. A partir dos 200 s a temperatura se eleva continuamente atingindo 38 °C aos 700 s, a partir deste tempo a temperatura cai ligeiramente para os 30 °C no final da simulação. O CFAST e o B-RISK apresentaram uma TMCF bastante próximos ao longo de toda a simulação, se aproximando também do resultado encontrado com o FDS. No tempo de 700 s, CFAST e B-RISK apresentaram uma temperatura de 35 °C e ao final da simulação atingiram temperaturas de 30 °C e 26 °C, respectivamente. Ao final do tempo de 1000 s os programas CFAST e FDS apresentaram temperaturas semelhantes. Com temperaturas tão próximas não é possível concluir qual dos programas foi mais conservador que o outro.

As figuras 3-69 e 3-70 mostram as comparações da simulação realizada neste trabalho com o FDS para o Cenário 1 com as equações de Klote *et al.* (2012), tanto para análise da AICF quanto para análise da TMCF.

Na Figura 3-69, com o FDS, a AICF atinge a altura de 1,5 m no final da simulação e, adotando as equações de Klote *et al.* (2012), a AICF atinge o piso aos 260 s. Observa-se que, o ramo descendente das curvas, são semelhantes, porém, o FDS inicia o ramo descendente no tempo aproximado de 250 s enquanto as equações iniciam em zero segundos. A diferença é que a taxa de calor liberado utilizado no FDS atinge valores significativos a partir de aproximadamente 200 s, como pode ser visto nas figuras 3-65 e 3-63 que apresenta as taxas de calor liberado dos vários cenários analisados por Kerber *et al.* (2007).

Em relação à TMCF, Figura 3-70, observa-se que o resultado obtido neste trabalho com o FDS atinge uma temperatura máxima de 36 °C no tempo de 700 s, enquanto, o resultado obtido através das equações de Klote *et al.* (2012) sofre um desvio significativo praticamente desde o início do incêndio chegando a aproximadamente 840 °C no tempo de 260 s. As equações de Klote *et al.* (2012) valem para situações de incêndio permanente (ou estacionário) e o experimento de Kerber *et al.* (2007) está em situação instável (ou transiente). Observa-se que ao aplicar as equações de Klote *et al.* (2012) para um incêndio transiente levam a uma condição conservadora, ou seja, prevê uma menor AICF e uma maior TMCF em relação ao FDS.

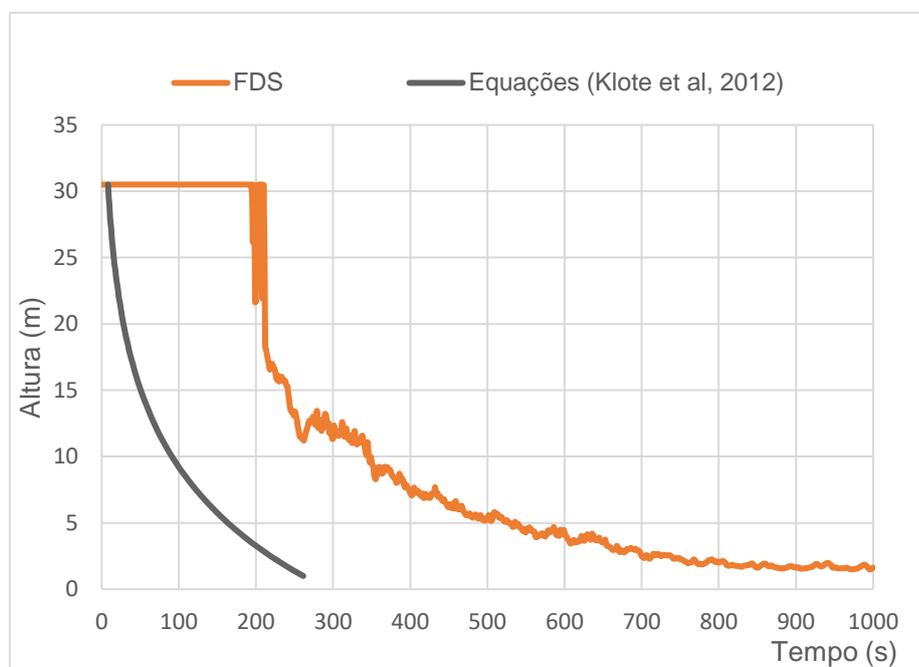


Figura 3-69: Altura da interface da camada de fumaça

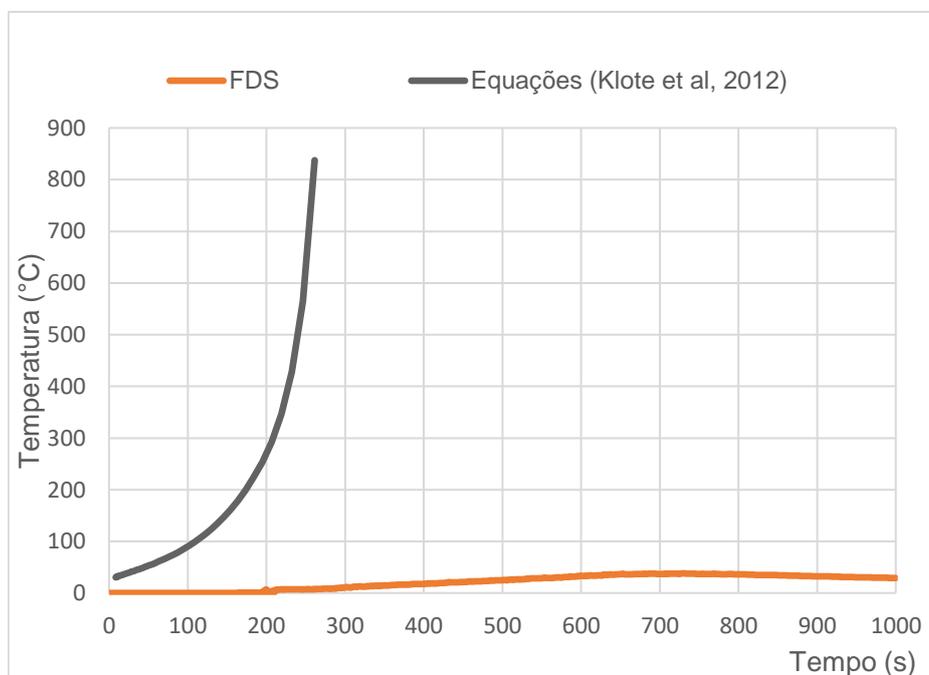
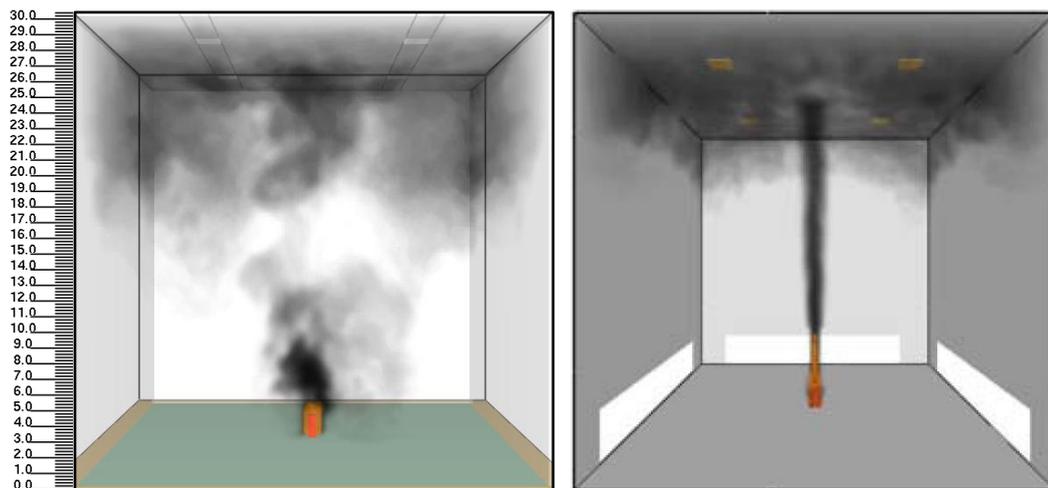


Figura 3-70: Elevação da temperatura média da camada de fumaça

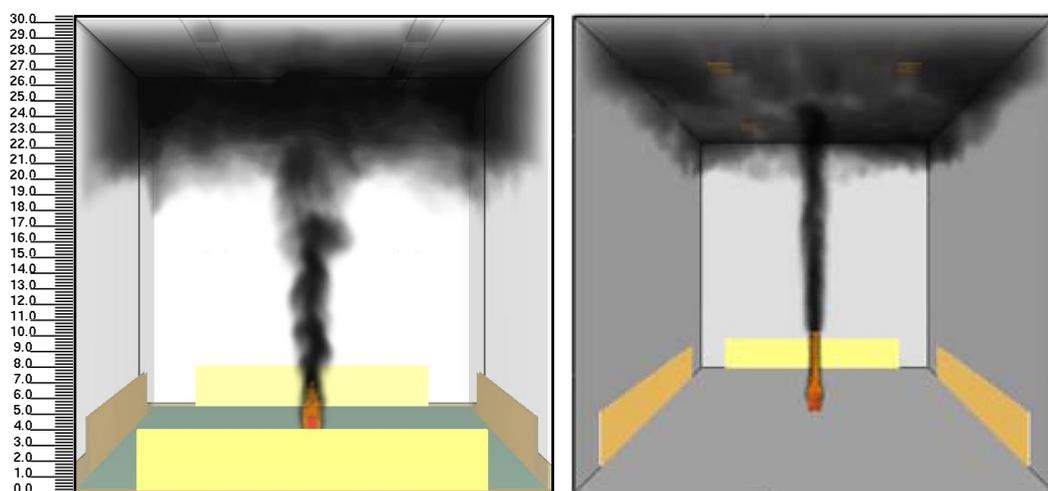
3.4.1.3 *Análise dos resultados do Cenário 2*

No Cenário 2, havia quatro dutos de ventilação mecânica, simétricos, um em cada uma das quatro paredes junto ao piso, com área de 91,2 m² cada, e, quatro aberturas de ventilação no teto, com área de 3,24 m² cada, todos simétricos.

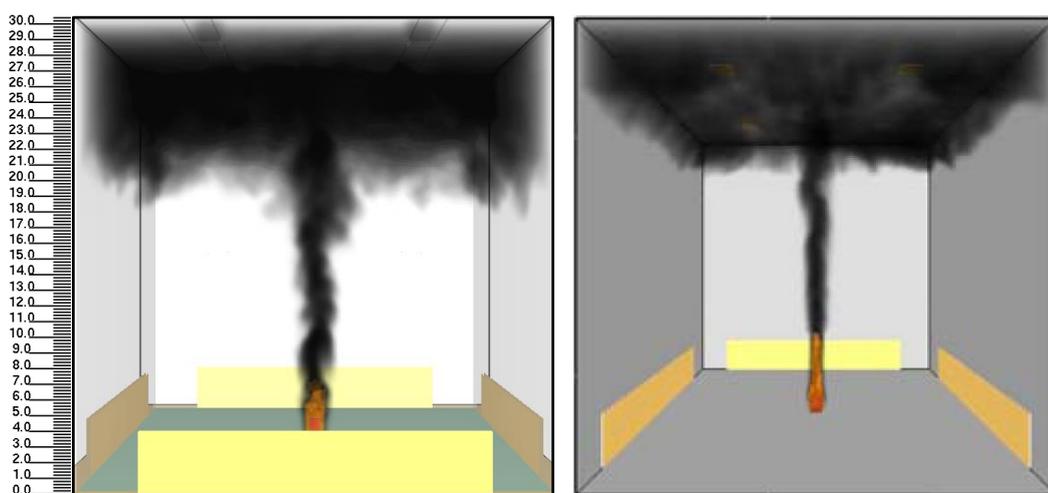
Os resultados visuais para o Cenário 2 são apresentados na Figura 3-71 para os tempos de 150 s, 300 s e 600 s.



a) 150 s



b) 300 s



c) 600 s

Figura 3-71: Cenário 2, imagem de comparação, à esquerda imagem extraída do Smokeview, e a direita imagem do trabalho de Kerber et al. (2007) para os tempos: a) 150s; b) 300s; c) 600s.

As alturas das camadas de fumaça foram baseadas visualmente nas figuras geradas do Smokeview para os tempos de simulação analisados. Na Figura 3-71(a) à esquerda, aos 150 s, tempo de abertura dos dutos de ventilação, a pluma da fumaça forma-se bastante dispersa, produzindo uma interface da camada de fumaça igualmente dispersa e menos densa que atinge a altura aproximada de 20 m. No trabalho de Kerber *et al.* (2007), à direita, a pluma apresenta-se mais densa e mais retilínea e a camada de fumaça forma-se mais homogênea, atingindo uma altura aproximada de 23 m.

Na Figura 3-71(b) à esquerda, aos 300 s, a pluma da fumaça forma-se menos dispersa que a anterior e a interface da camada de fumaça atinge a altura aproximada de 22 m. No trabalho de Kerber *et al.* (2007), à direita, a pluma apresenta-se mais densa e mais retilínea e o jato de fumaça forma-se mais homogêneo próximo ao teto, atingindo uma altura aproximada de 27 m.

Na Figura 3-71(c) à esquerda, aos 600 s, a pluma da fumaça forma-se mais densa e a interface da camada de fumaça se mantém na altura aproximada de 22 m do piso. No trabalho de Kerber *et al.* (2007), à direita, a pluma é densa e retilínea e o jato de fumaça mantém-se próximo ao teto, mantendo uma altura aproximada de 27 m.

A partir do tempo de 700 s a camada de fumaça calculada neste trabalho diminui consideravelmente no ambiente como mostra a Figura 3-73.

De modo geral, para os tempos apresentados, os resultados obtidos neste trabalho apresentam-se mais conservadores, levando a uma menor AICF comparado aos resultados do trabalho de Kerber *et al.* (2012). Ao final da simulação a fumaça é totalmente extraída do interior do ambiente, o que leva a concluir que o resultado obtido é positivo para o sistema de extração de fumaça adotado.

Observa-se que no tempo de 580 s, a taxa de liberação de calor atinge o pico de 5 MW, indicado pela Figura 3-72, abaixo.

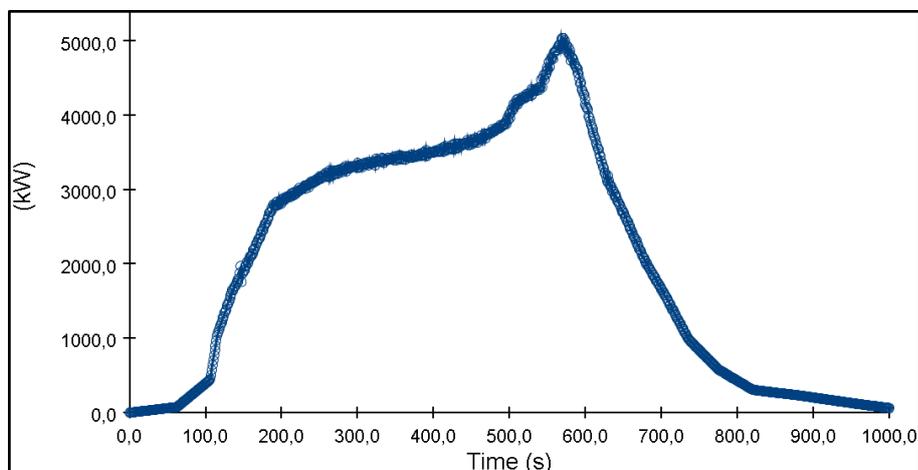


Figura 3-72: TCL máximo.

Kerber *et al.* (2007) com o FDS demonstraram que a AICF atingiu os 24 m aos 600 s, a partir deste tempo a fumaça começou a dissipar-se do interior do átrio.

Em relação aos resultados obtidos neste trabalho, nota-se que o FDS (Figura 3-73) apresenta uma variação significativa (valores com saltos) entre os tempos de 270 s e 530 s, apresentando uma AICF mínima de 20,3 m durante o intervalo de tempo aproximado de 530 s e 650 s, quando a camada de fumaça volta a diminuir.

Os resultados da AICF obtidos neste trabalho com o CFAST e B-RISK se aproximam entre os tempos de 280 s e 640 s, sendo o resultado do CFAST, ao longo do tempo, mais conservador comparado ao FDS e B-RISK.

Em relação à temperatura média da camada de fumaça (TMCF) observa-se que o resultado do FDS apresenta uma variação significativa (valores com saltos) entre os tempos de 270 s e 530 s, apresentando assim uma TMCF máxima de 8,5 °C, entre os tempos de 530 s e 650 s, a partir deste tempo a temperatura volta a cair no ambiente.

Os resultados da TMCF obtidos com o CFAST e B-RISK embora apresentem temperaturas diferentes tem uma forma similar ao longo da simulação. A TMCF máxima atingida com o CFAST foi de 12,5 °C no tempo de 580 s, e a TMCF máxima atingida com o B-RISK foi de 19,8 °C no tempo de 590 s, sendo o resultado encontrado com o B-RISK o mais conservador.

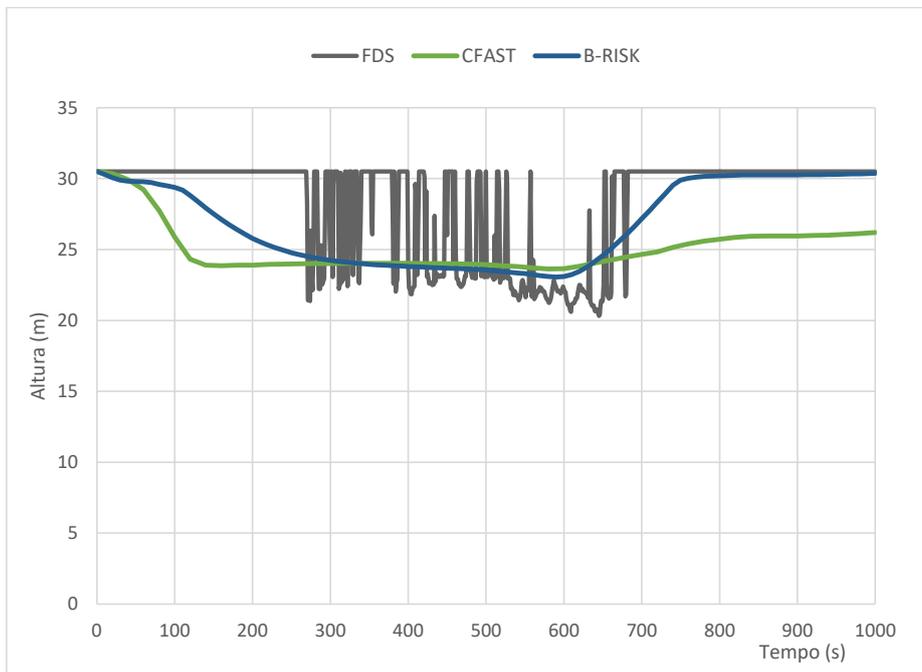


Figura 3-73: Altura da interface da camada de fumaça

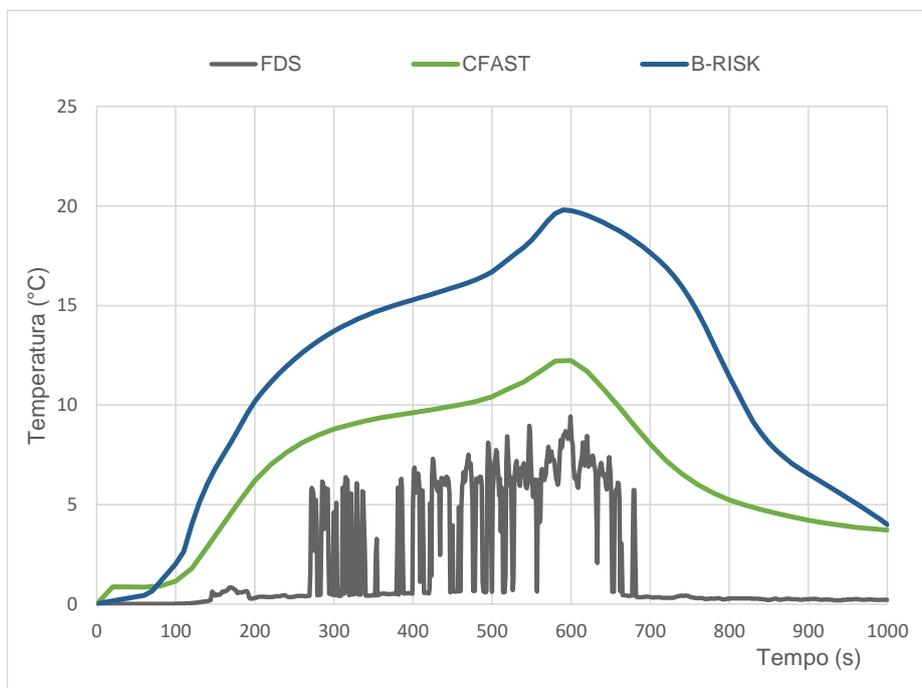


Figura 3-74: Elevação da temperatura média da camada de fumaça

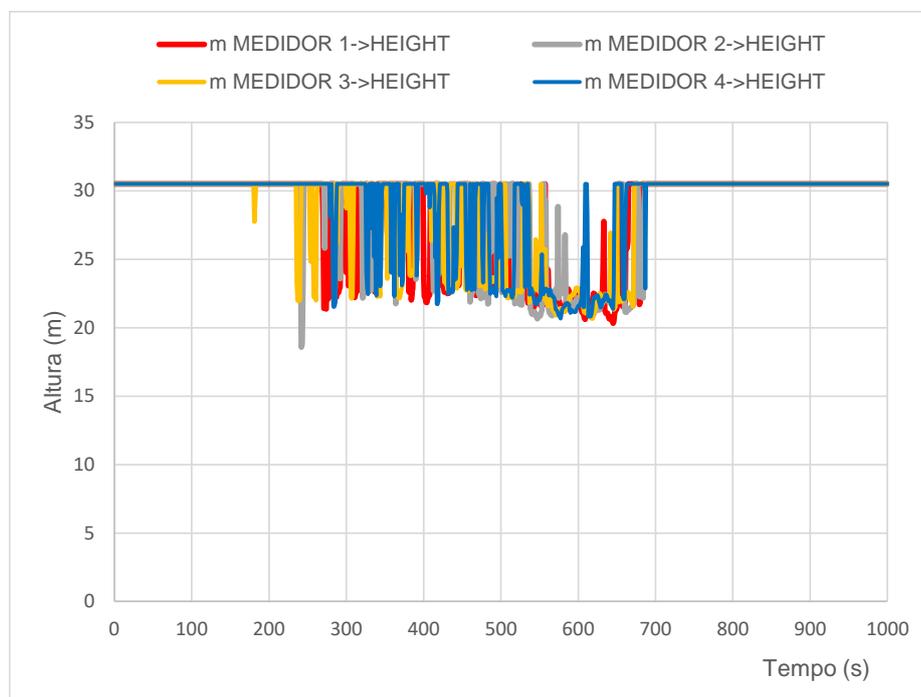
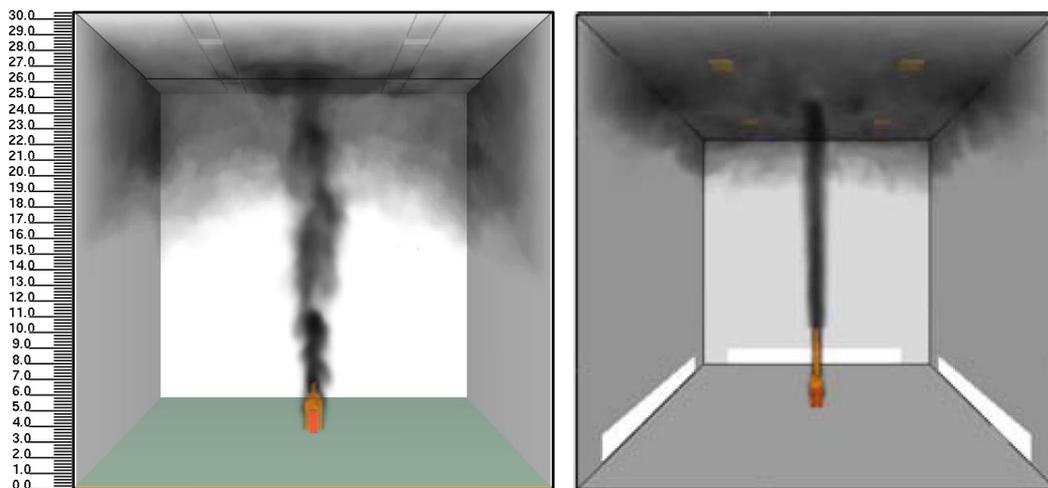


Figura 3-75: Medidores, Cenário 2

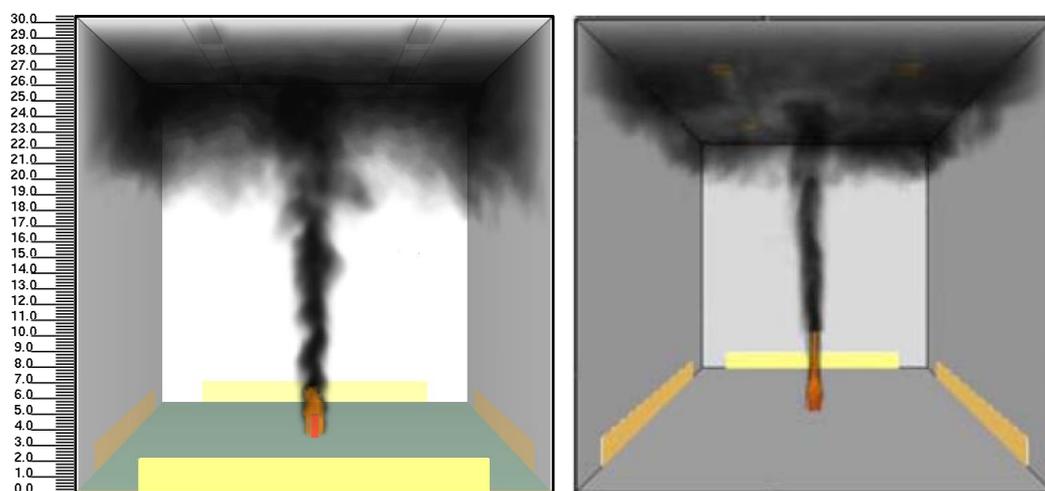
3.4.1.4 *Análise dos resultados do Cenário 3*

No Cenário 3, tem-se quatro dutos de ventilação mecânica, simétricos, com área de 45,6 m² cada, localizados nas quatro paredes, junto ao piso, e quatro aberturas de ventilação no teto, com área de 3,24 m² cada.

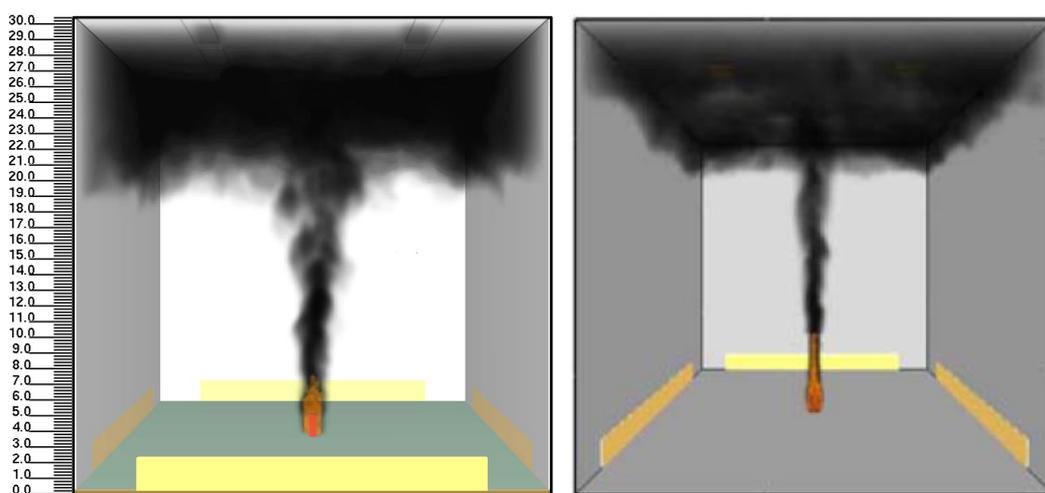
Os resultados visuais para o Cenário 3 são apresentados na Figura 3-76 para os tempos de 150 s, 300 s e 600 s.



a) 150 s.



b)) 300 s.



c) 600 s.

Figura 3-76: Cenário 3, à esquerda imagem extraída do Smokeview, e a direita imagem do trabalho de Kerber *et al.* (2007) para os tempos: a) 150s; b) 300s; c) 600s.

As alturas das camadas de fumaça foram obtidas visualmente das figuras geradas do Smokeview para os tempos de simulação comentados a seguir.

Na Figura 3-76(a) à esquerda, aos 150 s, a pluma da fumaça forma-se um pouco dispersa, produzindo uma camada de fumaça pouco densa que atinge a altura aproximada de 17,5 m acima do piso. No trabalho de Kerber *et al.* (2007), à direita, a pluma apresenta-se mais densa e mais retilínea e a camada de fumaça forma-se mais homogênea, atingindo uma altura aproximada de 23,5 m.

Na Figura 3-76(b) à esquerda, aos 300 s, a pluma da fumaça forma-se um pouco mais densa que a anterior e a interface da camada de fumaça atinge a altura aproximada de 22 m. No trabalho de Kerber *et al.* (2007), à direita, a pluma apresenta-se mais homogênea próxima ao teto, atingindo uma altura aproximada de 26,5 m.

Na Figura 3-76(c) à esquerda, aos 600 s, a pluma da fumaça forma-se bastante densa e, a interface da camada de fumaça se mantém na altura aproximada de 23 m do piso. No trabalho de Kerber *et al.* (2007), à direita, a pluma é densa e retilínea e a camada de fumaça mantém-se estável próxima ao teto, mantendo uma altura aproximada de 26,5 m.

A partir do tempo de 650 s, na simulação realizada neste trabalho, a camada de fumaça começa a se dissipar, diminuindo consideravelmente após os o tempo de 700 s, como mostra a Figura 3-80 que apresenta os resultados nos medidores.

De modo geral, para os tempos apresentados, os resultados obtidos neste trabalho apresentam-se mais conservadores, comparando-os aos resultados de Kerber *et al.* (2012), onde a AICF permanece praticamente na mesma altura durante todo o tempo até começar a dissipar-se.

Notou-se neste trabalho que no tempo de 560 s, a taxa de liberação de calor atinge o pico de 5,74 MW, conforme a Figura 3-77.

Kerber *et al.* (2007) com o FDS demonstraram que a camada de fumaça desceu aos 24 m aos 600 s, a partir deste tempo a fumaça começou a dissipar-se.

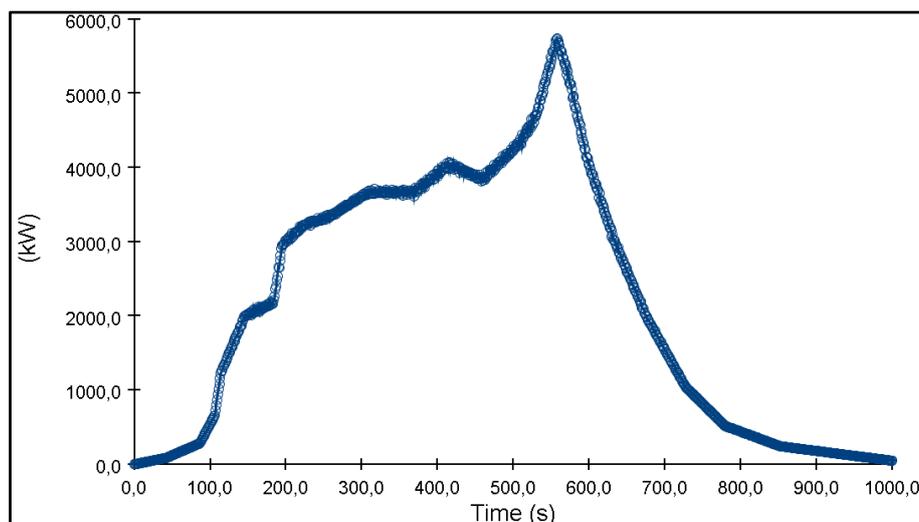


Figura 3-77: TCL máximo.

Em relação aos resultados obtidos neste trabalho, nota-se que o FDS apresenta uma variação significativa (valores com saltos) entre os tempos de 310 s e 510 s, apresentando uma AICF mínima de 18,1 m durante o intervalo de tempo aproximado entre 510 e 640 s, quando começa a se dissipar.

Os resultados da AICF obtidos neste trabalho com o CFAST e B-RISK se aproximam entre os tempos de 270 S e 640 s, mantendo uma altura de 23 m neste intervalo. A partir do tempo de 640 s a AICF do B-RISK sobe e a do CFAST mantém-se mais conservadora aos 26 m.

Em relação à temperatura média da camada de fumaça (TMCF) observa-se que o FDS apresenta uma variação significativa (valores com saltos) entre os tempos de 310 s e 520 s, com uma TMCF aproximada de 8,0 °C entre os tempos de 520 s e 650 s, a partir deste tempo a temperatura volta a cair no ambiente.

Os resultados da TMCF obtidos neste trabalho com o CFAST e B-RISK embora apresentem temperaturas diferentes, apresentam uma curva similar ao longo de todo o tempo de simulação. A TMCF máxima atingida com o CFAST foi de 13 °C no tempo de 580 s, e a TMCF máxima atingida com o B-RISK foi de 21 °C também no tempo de 580 s, o resultado encontrado com o B-RISK foi o mais conservador entre os três programas usados para análise.

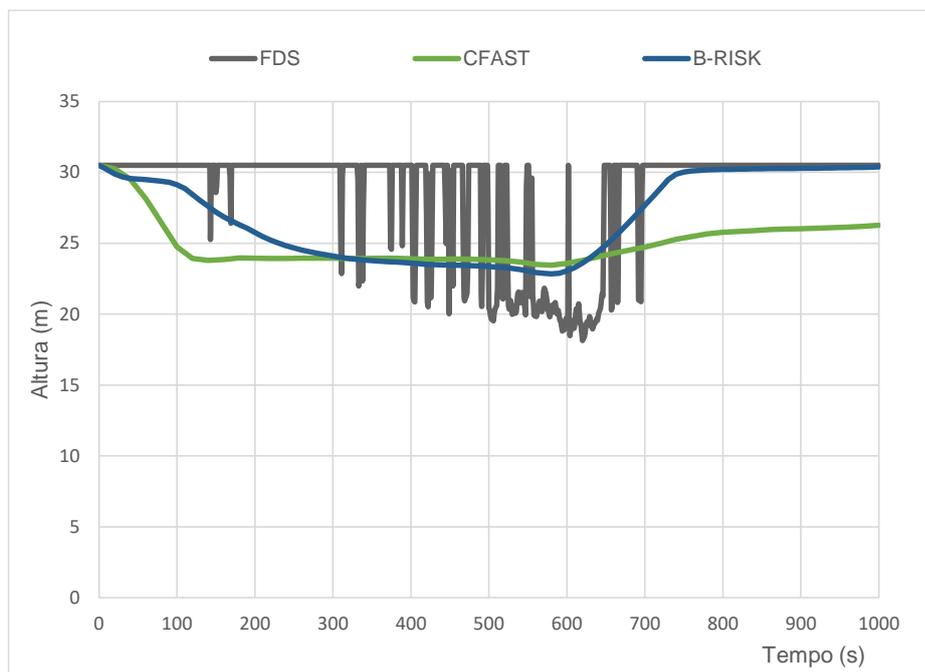


Figura 3-78: Altura da interface da camada de fumaça

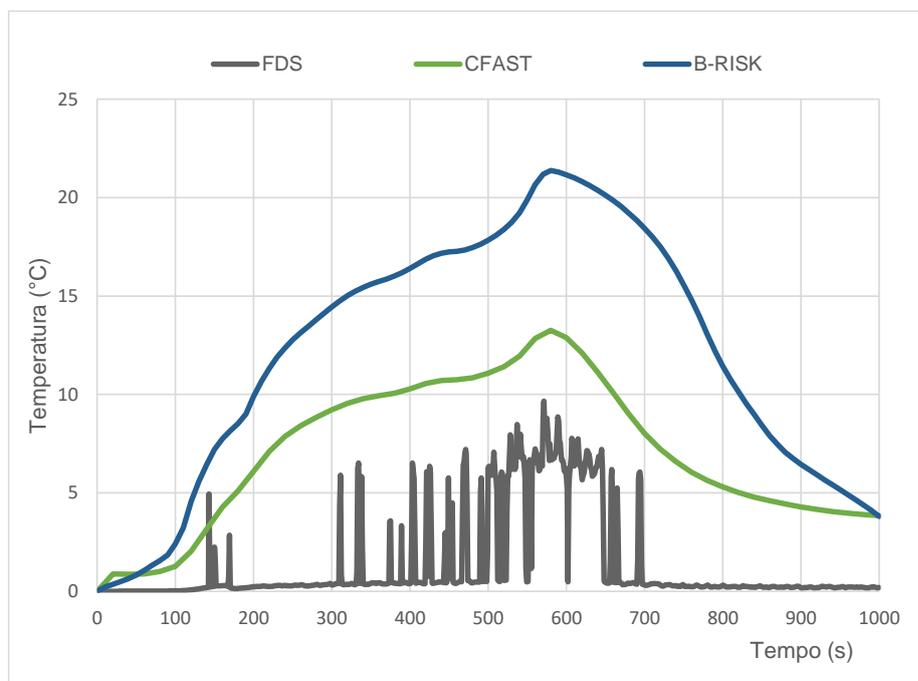


Figura 3-79: Elevação da temperatura média da camada de fumaça

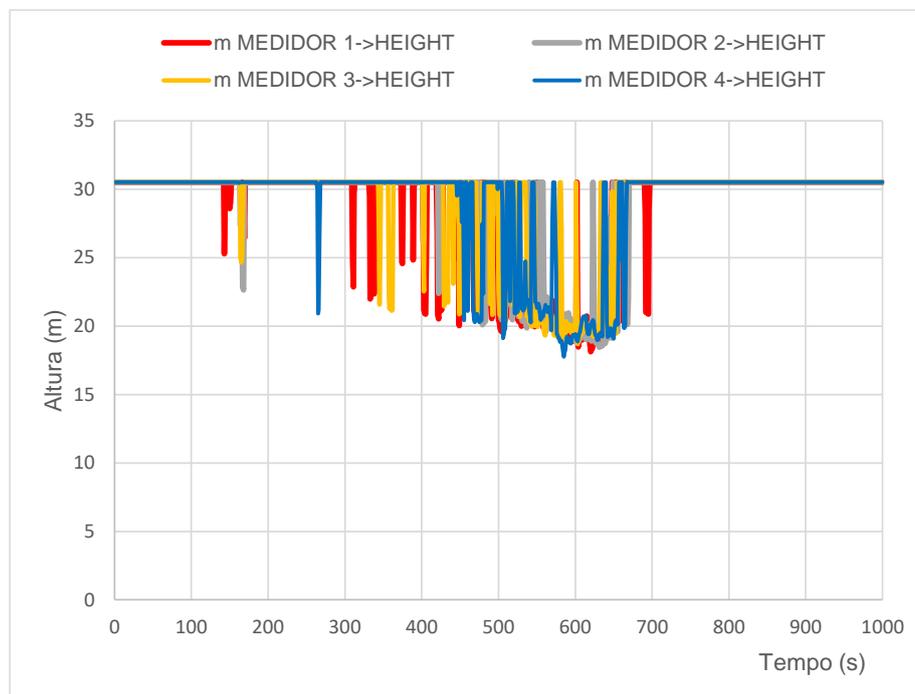
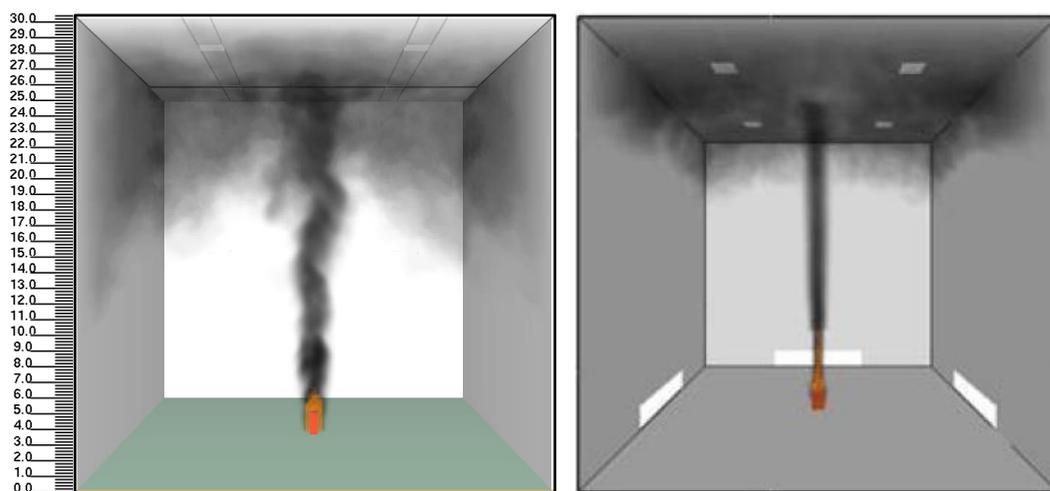


Figura 3-80: Medidores, Cenário 3.

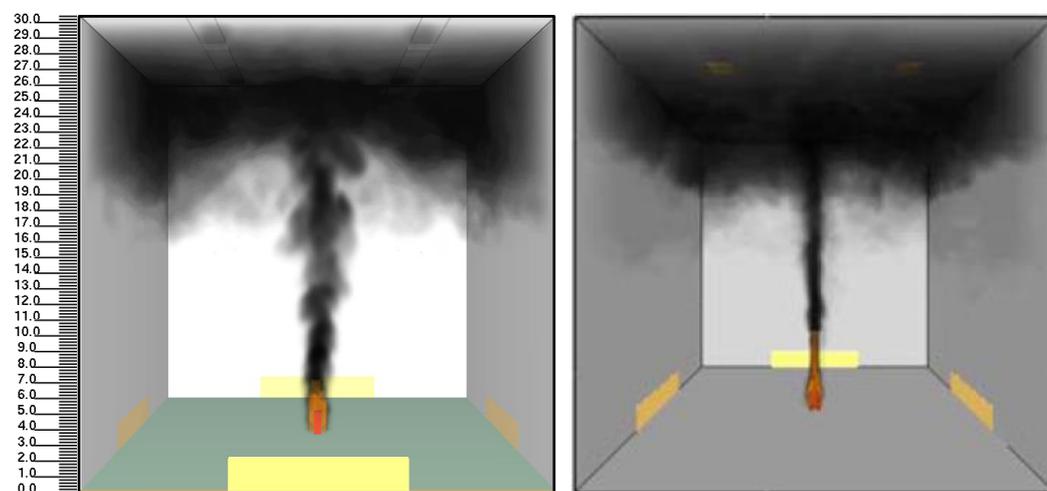
3.4.1.5 *Análise dos resultados do Cenário 4*

No Cenário 4, tem-se quatro dutos de ventilação mecânica, simétricos, localizados nas quatro paredes, junto ao piso, com área de $22,8 \text{ m}^2$ cada e, quatro aberturas de ventilação no teto, com área de $3,24 \text{ m}^2$ cada.

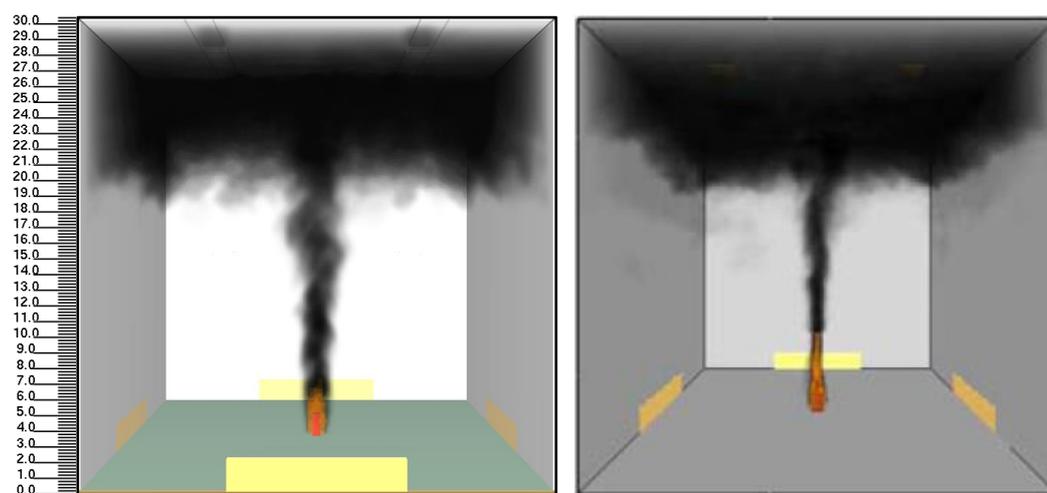
Os resultados visuais para o Cenário 4 são apresentados na Figura 3-81 para os tempos de 150 s, 300 s e 600 s.



a) 150 s.



b) 300 s.



c) 600 s.

Figura 3-81: Cenário 4, à esquerda imagem extraída do Smokeview, e a direita imagem do trabalho de Kerber *et al.* (2007) para os tempos: a) 150s; b) 300s; c) 600s.

As alturas das camadas de fumaça foram baseadas visualmente nas figuras geradas com o Smokeview para os tempos de simulação apresentados a seguir.

Na Figura 3-81(a) à esquerda, aos 150 s, a pluma da fumaça forma-se dispersa, produzindo uma interface da camada de fumaça pouco densa que atinge a altura aproximada de 21 m. No trabalho de Kerber *et al.* (2007), à direita, a pluma apresenta-se mais densa e retilínea e a camada de fumaça forma-se mais homogêneo, atingindo uma altura aproximada de 25 m.

Na Figura 3-81(b) à esquerda, aos 300 s, a pluma da fumaça apresenta-se um pouco mais densa que a anterior e a interface da camada de fumaça mantém uma altura aproximada de 21 m. No trabalho de Kerber *et al.* (2007), à direita, a pluma apresenta-se mais densa, e a camada atinge uma altura aproximada de 22 m.

Na Figura 3-81(c) à esquerda, aos 600 s, a interface da camada de fumaça se mantém na altura aproximada de 22 m. No trabalho de Kerber *et al.* (2007), à direita, a camada de fumaça está a uma altura aproximada de 24 m.

Aos 600 s da simulação, realizada neste trabalho, a interface da camada de fumaça começa a se dissipar diminuindo consideravelmente após os o tempo de 750 s, como mostra a Figura 3-85 com a AICF obtida com os medidores.

De modo geral, para os tempos apresentados, os resultados obtidos neste trabalho apresentam-se um pouco mais conservadores, levando a uma pequena diferença entre a AICF, quando comparado aos resultados do trabalho de Kerber *et al.* (2012).

Nota-se que no tempo de 525 s, a taxa de liberação de calor atinge o pico de 5,73 MW, conforme a Figura 3-82.

Kerber *et al.* (2007) com o FDS demonstraram que a interface da camada de fumaça atingiu 22 m aos 300 s, contrapondo os 18 m de altura estabelecido na Figura 30, página 73, do trabalho (portanto, tem-se uma incoerência no trabalho dos autores).

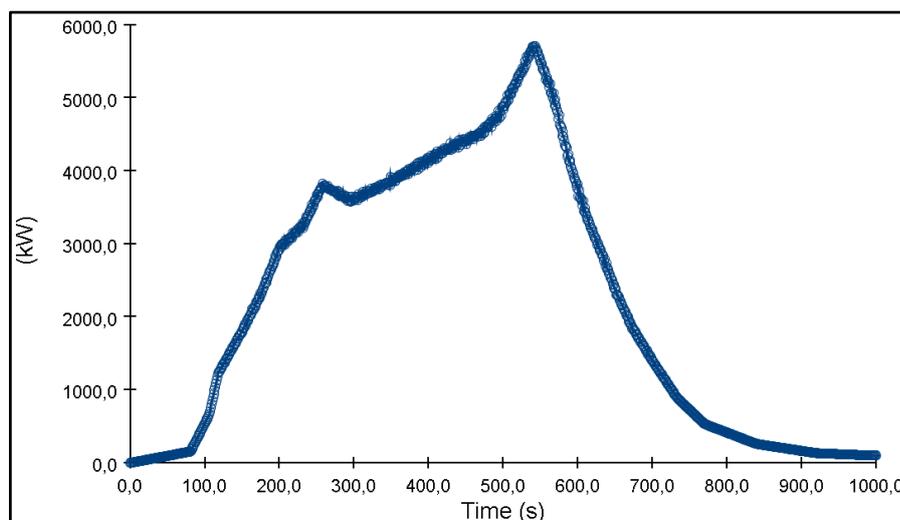


Figura 3-82: TCL máximo.

Em relação aos resultados obtidos neste trabalho, nota-se que o FDS apresenta uma variação significativa (valores com saltos) entre os tempos de 280 s e 580 s, apresentando uma AICF mínima de 14,7 m durante o intervalo de tempo aproximado de 580 e 625 s, quando a fumaça começa a se dissipar do ambiente (Figura 3-83).

Os resultados da AICF obtidos neste trabalho com o CFAST e B-RISK se aproximam entre os tempos de 280 s e 630 s, mantendo uma altura de aproximadamente 23 m neste intervalo. A partir de 630 s a AICF do B-RISK sobe, indicando uma diminuição da fumaça próxima à do FDS. A AICF do CFAST mantém-se mais conservadora chegando aos 26 m.

Em relação à TMCF, observa-se que o resultado com o FDS apresenta uma variação significativa (valores com saltos) entre os tempos de 280 s e 580 s, apresentando uma TMCF aproximada de 6,5 °C entre os tempos de 580 s e 625 s, a partir deste tempo a temperatura volta diminuir.

Os resultados da TMCF obtidos neste trabalho com o CFAST e B-RISK embora apresentem temperaturas bastante diferentes apresentam uma forma similar ao longo de todo o tempo de simulação. A TMCF máxima atingida com o CFAST foi de 13,5 °C no tempo de 560 s, e a TMCF máxima atingida com o B-RISK foi de 22 °C também no tempo de 570 s, o resultado encontrado com o B-RISK foi o mais conservador entre os três programas usados para análise, como mostra a Figura 3-84.

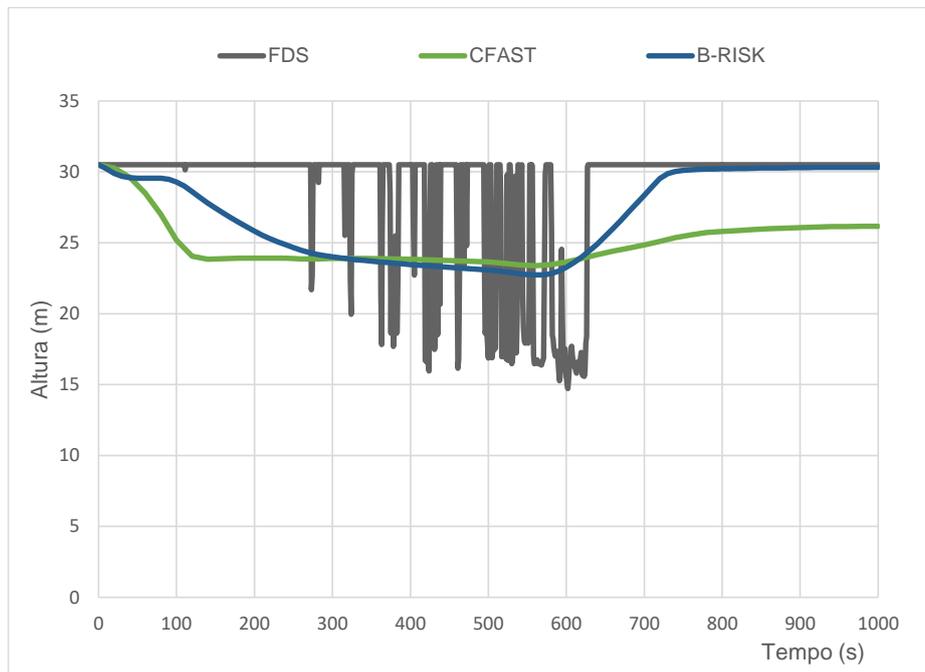


Figura 3-83: Altura da interface da camada de fumaça

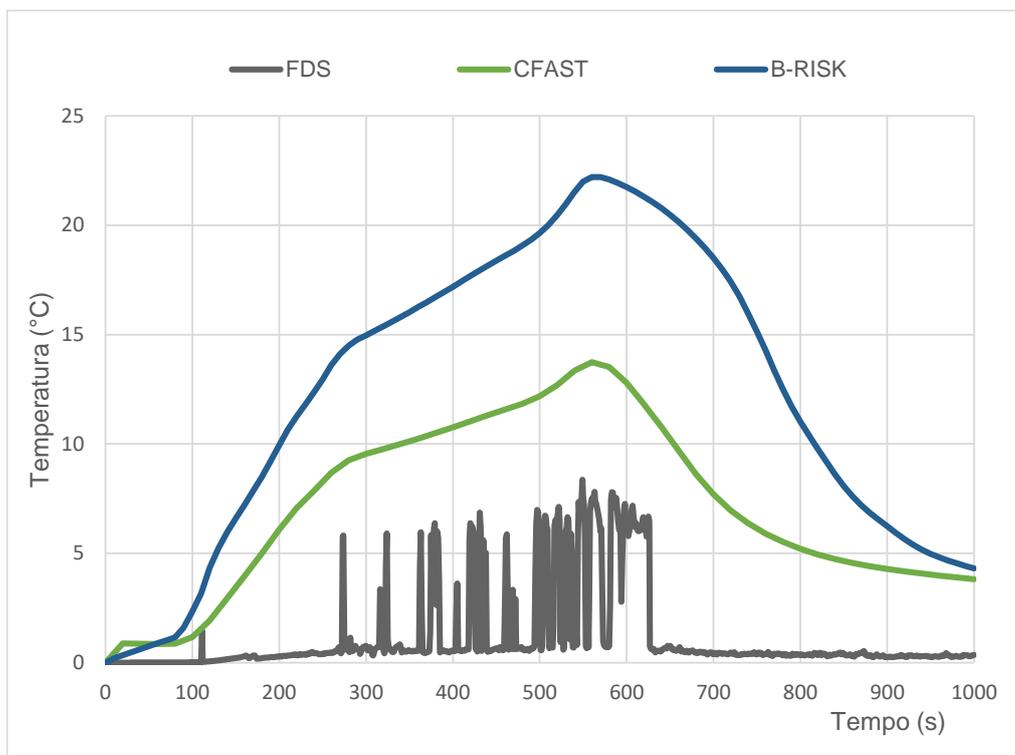


Figura 3-84: Elevação da temperatura média da camada de fumaça

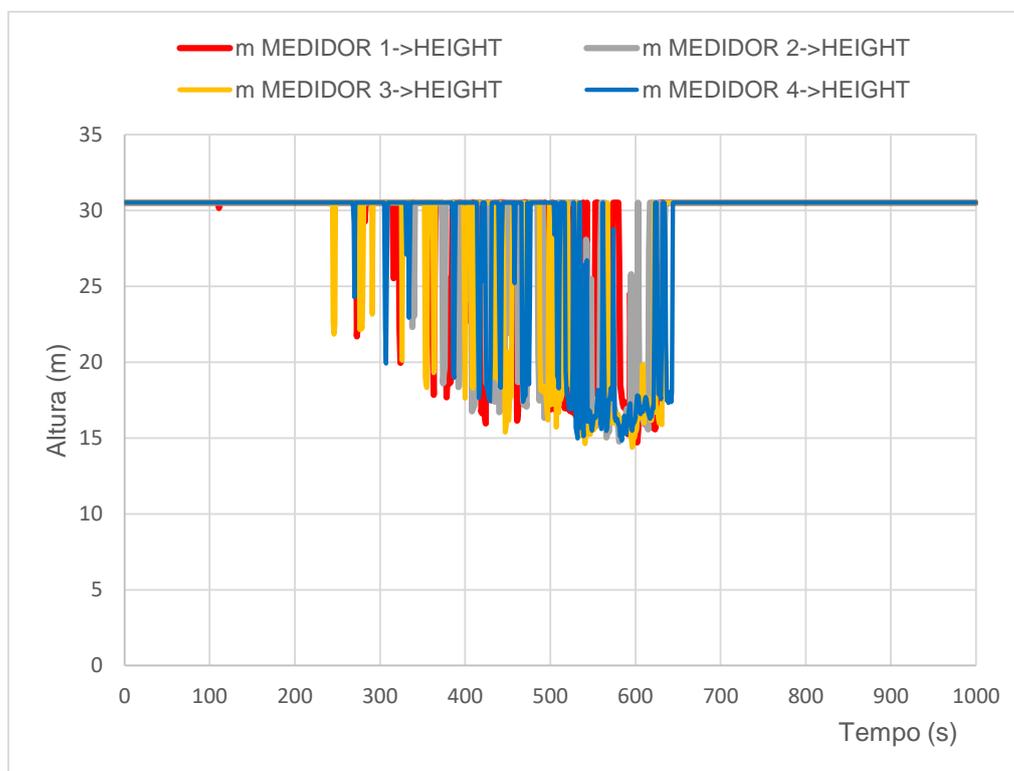
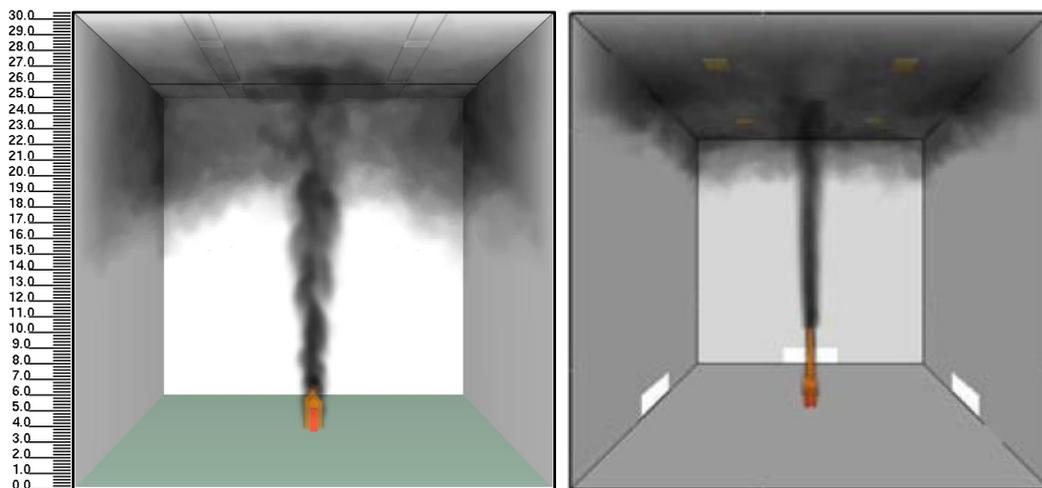


Figura 3-85: Medidores, Cenário 4.

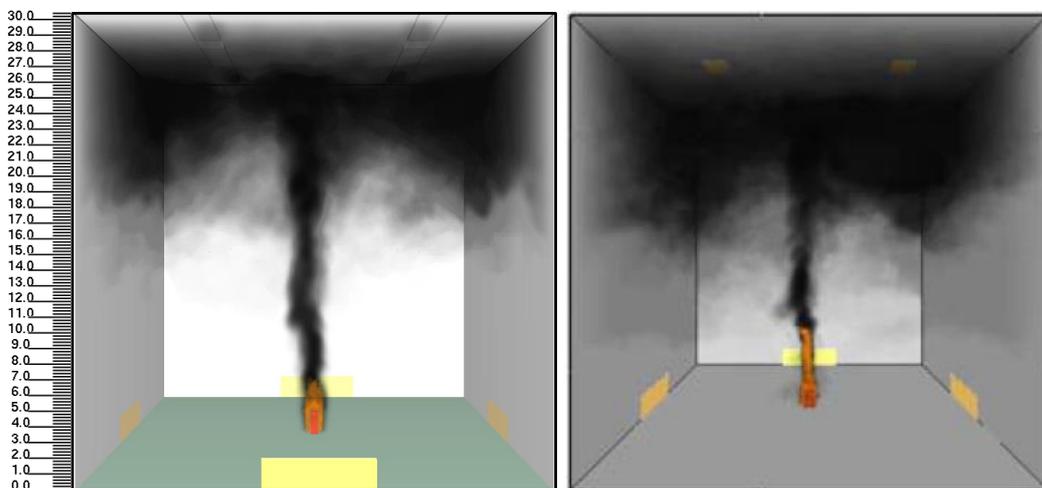
3.4.1.6 *Análise dos resultados do Cenário 5*

No Cenário 5, tem-se quatro dutos de ventilação mecânica, simétricos, com área de 15,2 m², localizados nas quatro paredes, junto ao piso, e quatro aberturas de ventilação no teto, com área de 3,24 m² cada.

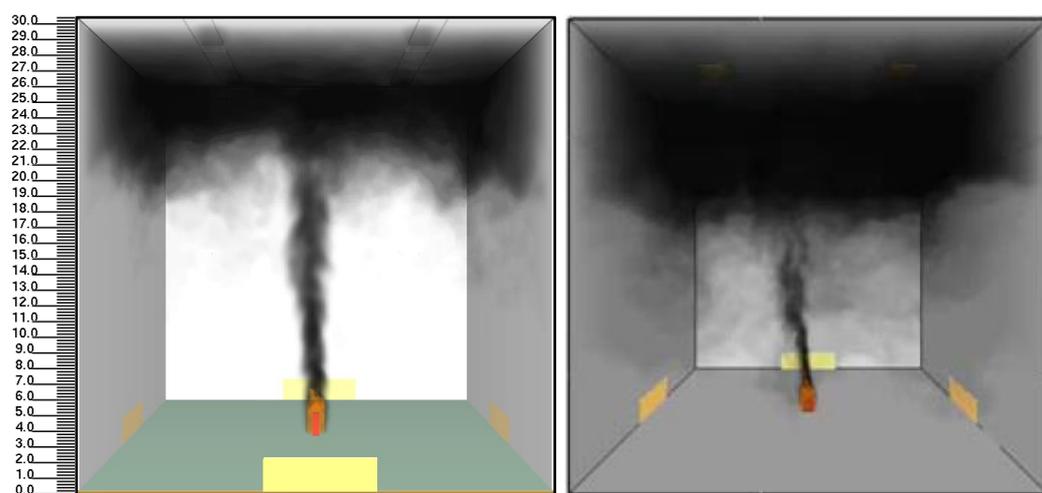
Os resultados visuais para o Cenário 5 são apresentados na Figura 3-86 para os tempos de 150 s, 300 s e 600 s.



a) 150 s.



b) 300 s.



c) 600 s.

Figura 3-86: Cenário 5, imagem de comparação, à esquerda imagem extraída do Smokeview, e a direita imagem do trabalho de Kerber *et al.* (2007) para os tempos: a) 150 s; b) 300 s; c) 600 s.

As alturas das camadas de fumaça foram baseadas visualmente nas figuras geradas com o Smokeview para os tempos de simulação apresentados a seguir.

Na Figura 3-86(a), à esquerda, aos 150 s, a interface da camada de fumaça atinge a altura aproximada de 18 m. No trabalho de Kerber *et al.* (2007), à direita, a AICF atinge uma altura aproximada de 24,5 m.

Na Figura 3-86(b), à esquerda, aos 300 s, a interface da camada de fumaça chega a uma altura aproximada de 20 m. Em Kerber *et al.* (2007), à direita, a AICF atinge uma altura aproximada de 18 m.

Na Figura 3-86(c), à esquerda, aos 600 s, a camada da fumaça já em dispersão do ambiente, apresenta uma altura aproximada de 22 m. Em Kerber *et al.* (2007), à direita, a interface da camada de fumaça atinge uma altura aproximada de 20 m, com bastante fumaça dispersa na abaixo da interface da camada de fumaça.

A partir do tempo de 150 s, com a abertura dos dutos de ventilação, inicia-se o controle e diminuição da fumaça no ambiente. No tempo de 700 s a fumaça diminui consideravelmente, como mostra a Figura 3-86 com os resultados dos medidores. No trabalho de Kerber *et al.* (2007) nota-se que a fumaça sofre uma instabilidade, provavelmente devido à velocidade de entrada de ar ambiente, que é de 3,0 m/s.

De modo geral, para os tempos apresentados, os resultados obtidos neste trabalho apresentam uma AICF próximas ao trabalho de Kerber *et al.* (2012). E, diferentemente dos demais cenários, o cenário 5 de Kerber *et al.* (2012) apresenta uma oscilação na camada de fumaça durante todo o tempo de simulação, no entanto, em ambos os casos, a fumaça é extinta ao termino do tempo.

Nota-se em todos os casos simulados neste trabalho, uma oscilação da camada de fumaça no tempo de 150 s, que é o tempo onde ocorre as aberturas dos dutos de ventilação mecânica, causando tal oscilação na camada de fumaça.

Nota-se que no tempo de 510 s, a taxa de liberação de calor atinge o pico de 5,77 MW, conforme a Figura 3-87.

Kerber *et al.* (2007) com o FDS demonstraram que a interface da camada de fumaça atingiu 15 m aos 450 s.

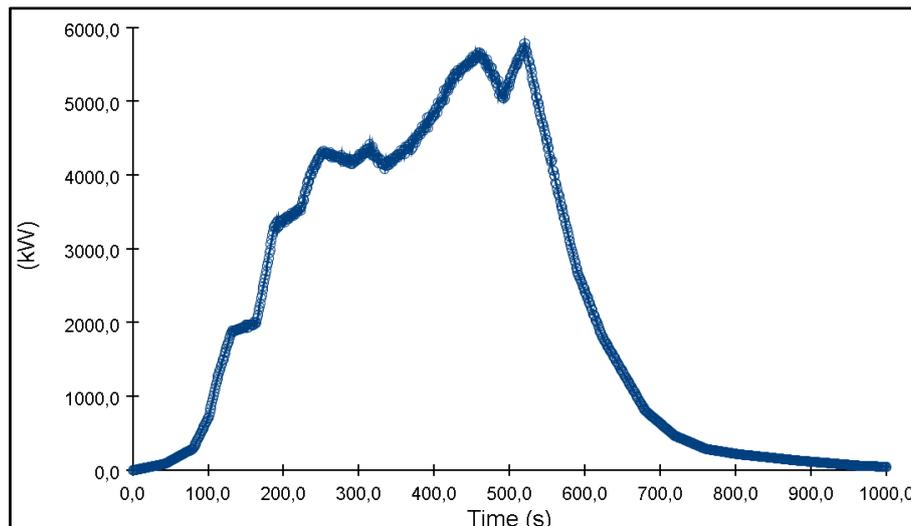


Figura 3-87: TCL máximo, Cenário 5.

Em relação aos resultados obtidos neste trabalho, nota-se que o FDS apresenta dois momentos de variações significativas (valores com saltos), sendo mais evidente no intervalo de tempo de 450 s a 570 s, apresentando uma AICF mínima de 15 m (Figura 3-88), a partir do tempo aproximado de 600 s a AICF começa a se dissipar.

Embora apresentem resultados bastante distintos em alguns intervalos de tempo, os resultados da AICF obtidos neste trabalho com o CFAST e B-RISK se aproximam entre os tempos de 250 S e 600 s, mantendo uma altura de 23 m neste intervalo, a partir do tempo de 600 s a AICF do B-RISK sobe, indicando uma diminuição da fumaça próxima à do FDS. A AICF do CFAST mantém-se mais conservadora chegando aos 26 m.

Comparando a TCMF observa-se que o resultado com o FDS apresenta grande variação ao longo do tempo (valores com saltos), destacando um intervalo de tempo entre 280 s e 580 s, com uma TCMF aproximada de 12 °C. A partir do tempo de 600 s a temperatura diminui consideravelmente.

Os resultados da TCMF (Figura 3-89) obtidos com o CFAST e B-RISK apresentam temperaturas bastante diferentes ao longo do tempo de simulação, porém, apresentam uma curva similar ao longo de todo o tempo, com pequena variação no início e fim da simulação. A TCMF máxima atingida com o CFAST foi de 14 °C no tempo de 540 s, e a TCMF máxima atingida com o B-RISK foi de 23 °C, também no tempo de 540 s, o resultado encontrado com o B-RISK foi o mais conservador entre os três programas usados para análise.

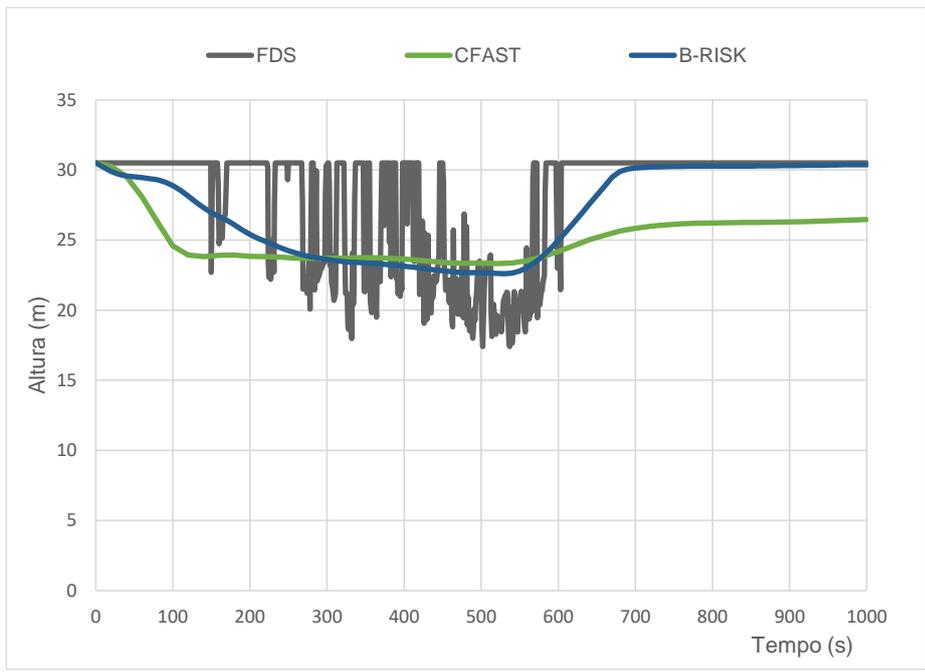


Figura 3-88: Altura da interface da camada de fumaça

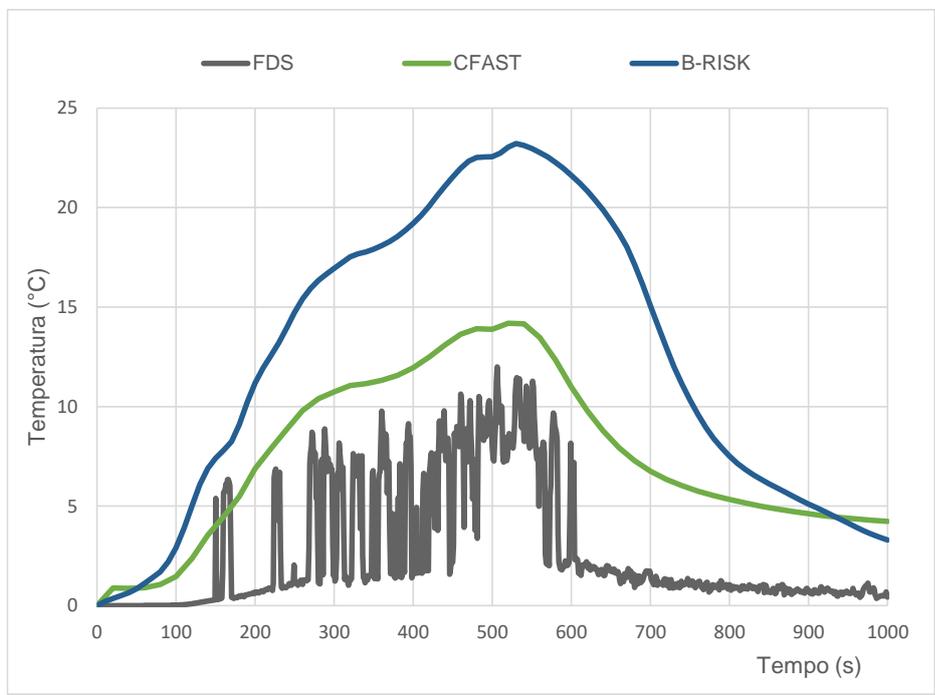


Figura 3-89: Elevação da temperatura média da camada de fumaça

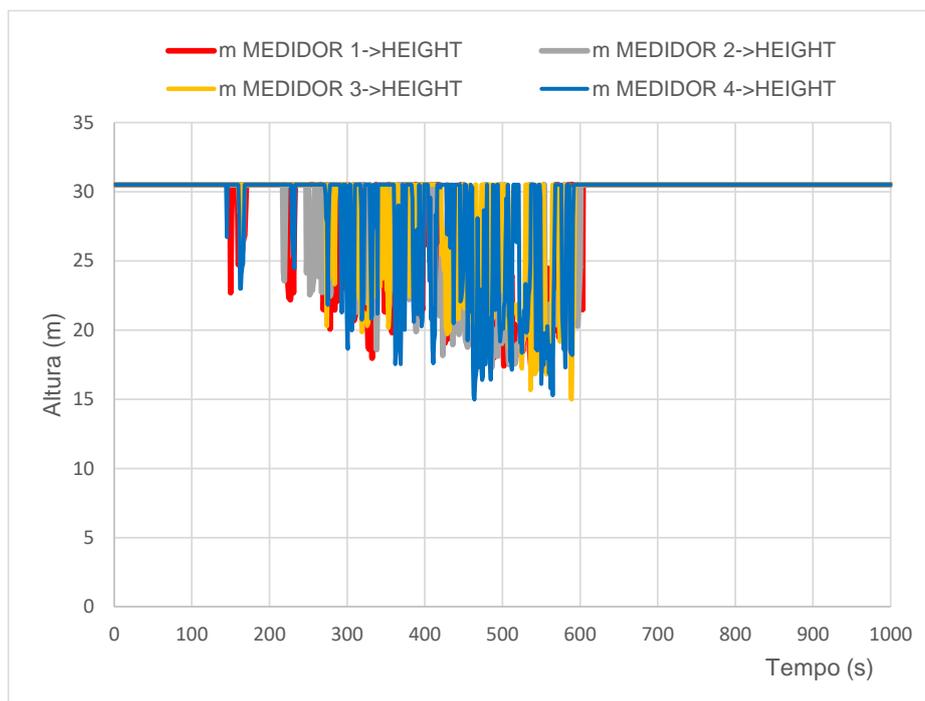


Figura 3-90: Medidores, Cenário 5.

3.4.1.7 Observações gerais sobre os Cenários de 1 a 5

Observou-se que as análises com o programa FDS têm duração de horas (valores entre 30 e 60 h) enquanto as simulações com os programas de zonas, CFAST e B-RISK, tem duração de segundos. Essa mesma observação foi feita ao analisar as demais simulações realizadas neste trabalho.

Comparando as simulações realizadas neste trabalho com os resultados do FDS apresentados por Kerber *et al.* (2007), nota-se que, nas imagens geradas pelo FDS para ambos trabalhos, os resultados visuais foram próximos nos Cenários 2, 3, 4 e 5. Contrapondo-se aos resultados do FDS, o CFAST e B-RISK apresentaram AICF e TMCF bastante distintas em determinados intervalos de tempo nos Cenários 2, 3, 4 e 5, em outros determinados momentos, os valores encontrados com ambos os programas se aproximavam. Ao final de todas as simulações o CFAST apresentava resultados conservadores para a AICF, e o B-RISK se aproximava do resultado do FDS. Para a TMCF

o B-RISK apresentava resultados conservadores, em relação ao FDS, no entanto, ambos, CFAST e B-RISK aproximavam seus resultados ao final da simulação.

Apenas no Cenário 1 os resultados encontrados, neste trabalho, com os três programas são coincidentes, tanto para análise da AICF quanto para TMCF, no entanto, Kerber *et al.* (2007), como já citado anteriormente, não apresenta dados gráficos para melhor comparação dos resultados.

Nota-se que a área das aberturas de entrada de ar mecânica diminui a partir do Cenário 2 para o Cenário 5, em contrapartida, a velocidade de entrada de ar através dos dutos aumenta de um cenário para outro, de modo que o volume de ar que entra seja mantido constante (vazão constante em m³/s).

Kerber *et al.* (2007) apresentam as seguintes equações para cálculo de vazão de fumaça e de entrada de ar:

$$\begin{aligned}
 m &= 0,071Q_c^{1/3} z^{5/3} + 0,0018Q_c \\
 m &= 0,071(3500)^{1/3}(22,6)^{5/3} + 0,0018(3500) \\
 m &= 201,0 \text{ kg / s}
 \end{aligned}
 \tag{3-16}$$

$$\begin{aligned}
 T_p &= T_a + \frac{Q_c}{mc_p} \\
 T_p &= 20 + \frac{3500}{201,0(1,0)} \\
 T_p &= 37,4^\circ \text{ C} = 310,6 \text{ K}
 \end{aligned}
 \tag{3-17}$$

$$\begin{aligned}
 \rho_p &= \frac{352,8}{T_p} \\
 \rho_p &= \frac{352,8}{310,6} \\
 \rho_p &= 1,14 \text{ kg / m}^3
 \end{aligned}
 \tag{3-18}$$

$$\begin{aligned}
 V &= \frac{m}{\rho_P} \\
 V &= \frac{201,0}{1,14} \\
 V &= 176,3 \text{ m}^3 / \text{s}
 \end{aligned}
 \tag{3-19}$$

$$\begin{aligned}
 V_i &= \frac{m}{\rho_{amb}} \\
 V_i &= \frac{201,0}{1,1} \\
 V_i &= 182,4 \text{ m}^3 / \text{s}
 \end{aligned}
 \tag{3-20}$$

$$\begin{aligned}
 v &= \frac{V_i}{A_v} \\
 A_v &= \frac{182,4}{1,0} \\
 A_v &= 182,4 \text{ m}^2
 \end{aligned}
 \tag{3-21}$$

Observa-se que as equações acima (onde, V é a vazão volumétrica de fumaça e, V_i é a vazão volumétrica de entrada de ar) são as mesmas utilizadas por Klote *et al.* (2012), citadas no Capítulo 2, Item 2.2. Observa-se que a AICF, que z (altura de projeto da camada de fumaça acima do piso) é considerada igual a 22,6 m. Conforme mencionado, as equações de Klote *et al.* (2012) diferem das equações da IT15:2015 devido à TMCF assumida para a camada de fumaça. A IT considera a temperatura de 300 °C, sendo que a TMCF encontrada com as equações de Klote *et al.* (2012) foi $T_P = 37,4$ °C. Calculando segundo a IT, a vazão volumétrica de fumaça igual a 176,3 m³/s corresponde a uma AICF de 14,3 m, o que é bastante conservador ao comparar com a AICF de 22,6 m.

Os valores mínimos da AICF calculados com o FDS, CFAST e B-RISK para os casos 2, 3, 4 e 5 neste trabalho, são mostrados na Tabela 3-9.

Tabela 3-9: AICF mínima para os cenários de 2 a 5

| Cenário | Velocidade (m/s) | FDS (AICF mínimo) | CFAST (AICF mínimo) | B-RISK (AICF mínimo) |
|---------|---------------------|----------------------|------------------------|-------------------------|
| 2 | 0,5 | 20,3 | 23,6 | 23,1 |
| 3 | 1,0 | 18,1 | 22,8 | 23,5 |
| 4 | 2,0 | 14,7 | 23,4 | 22,7 |
| 5 | 3,0 | 17,4 | 23,3 | 22,6 |
| Média | - | 17,6 | 23,3 | 23,0 |

Todas as leituras extraídas dos programas usados foram para AICF mínima, no entanto o resultado encontrado com o FDS foi o mais conservador (devido a consideração de valor mínimo adotado, pois na média o valor é superior, como pode ser observado nos gráficos das figuras 3-64, 3-71, 3-76, 3-81 e 3-86), quando comparado à AICF segundo as equações de Klote *et al.* (2012), igual a 22,6 m, porém, a AICF considerada pela equação da IT foi ainda mais conservadora, igual a 14,3 m.

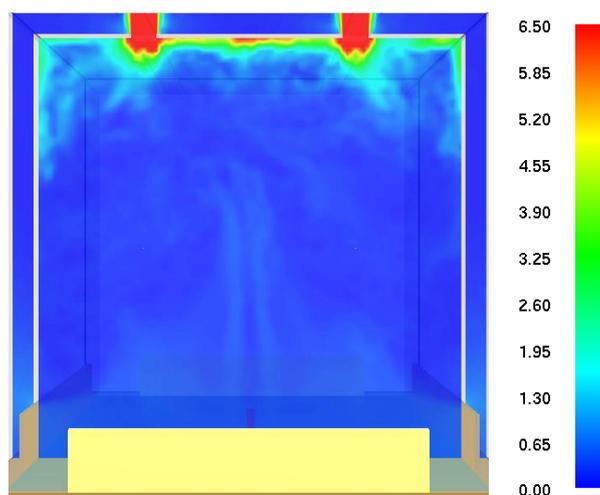
Para o CFAST e B-RISK o valor médio da AICF para os cenários 2 a 5, de 23,3 m e 23,0 m, respectivamente, foram bem próximos do valor de 22,6 m segundo as equações de Klote *et al.* (2012).

O controle de fumaça definido pelo CBPMSP IT 15:2015 consiste na introdução de ar limpo e pela extração de fumaça através de tipos de sistemas determinados pela Tabela 1 parte 1 da IT, logo, ainda que o átrio aqui modelado e simulado contenha os sistemas de extração natural através de aberturas no teto e, introdução de ar mecânico através de dutos de ventilação, que juntos promovem o controle da fumaça e dos gases, a IT não prevê um sistema de introdução de ar mecânico com um sistema de extração de fumaça natural, portanto o átrio simulado não se encaixa nos parâmetros definidos pela IT, Figura 3-91.

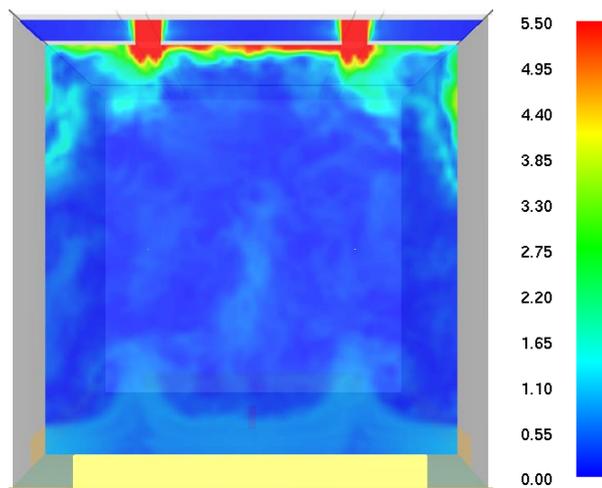
| Introdução de ar limpo | Extração de fumaça |
|------------------------|--------------------|
| <i>Natural</i> | <i>Natural</i> |
| <i>Natural</i> | <i>Mecânica</i> |
| <i>Mecânica</i> | <i>Mecânica</i> |

Figura 3-91: Tabela 1 – sistemas de introdução e extração de fumaça. IT 15:2015

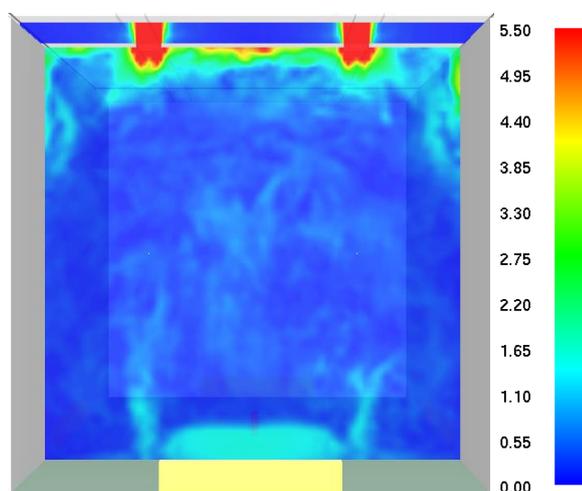
Segundo o item 8.2.5 da IT, que trata do dimensionamento dutos em sistemas de controle de fumaça mecânico, os dutos devem ser dimensionados com velocidade máxima de 10 m/s quando construídos em alvenaria ou gesso acartonado e velocidade máxima de 15 m/s quando construído em chapas metálicas. Nas Figura 3-92 tem-se as velocidades no tempo em que se tem a maior taxa de calor liberado para cada cenário. Supondo que a entrada de ar e saída de fumaça ocorra através de dutos, a maior velocidade de saída de fumaça atingida, de 6,5 m/s no Cenário 2, não ultrapassa o valor de 10 m/s especificado pela IT. A velocidade máxima de entrada de ar foi de 3,0 m/s no Cenário 5. Por determinação da IT, no controle de fumaça por extração mecânica, a velocidade de entrada de ar mecânica deve ser menor ou igual a 5,0 m/s.



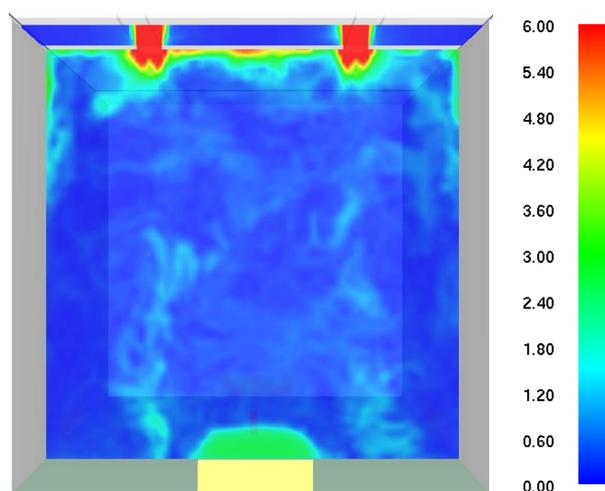
a) Cenário 2 – TCL máximo de 5000 kW no tempo de 570 s, velocidade de 6,5 m/s.



b) Cenário 3 – TCL máximo de 5747 kW no tempo de 557 s, velocidade de 5,5 m/s.



c) Cenário 4 – TCL máximo de 5730 kW no tempo de 541 s, velocidade de 5,5 m/s.



d) Cenário 5 – TCL máximo de 5771 kW no tempo de 520 s, velocidade de 6,0 m/s.

Figura 3-92: Velocidade da entrada de ar e saída de fumaça dos Cenários de 2 a 5.

No item 9.8 que determina os parâmetros de projeto, tem-se o subitem 9.8.1.6 que define que, as aberturas destinadas a introdução de ar devem se situar na zona livre de fumaça, no ponto mais baixo possível. Em outro subitem da IT, 11.22.1 determina que, a introdução de ar para o controle de fumaça pode ser realizada por meios naturais ou mecânicos. Quando ocorrer de forma natural e, para o caso onde a velocidade de entrada de ar seja superior a 1,0 m/s, a camada de fumaça deve ser projetada a 1,5 m acima das aberturas consideradas, para outros casos, onde a velocidade de entrada de ar for menor que 1,0 m/s, a camada de fumaça poderá ser projetada a 0,5 m acima das aberturas, e por último, a velocidade máxima de entrada de ar não deverá ultrapassar 5 m/s.

Observa-se na Figura 3-92 que, as velocidades de saídas de fumaça variam de 6,5 m/s, 5,5 m/s, 5,5 m/s e 6,0 m/s para os cenários 2, 3, 4 e 5 respectivamente, o que leva a uma média de 5,9 m/s, abaixo dos 10 m/s prescrito pela IT para os casos de dutos em alvenaria ou gesso acartonado. Nas aberturas de entrada de ar, as velocidades são 0,5 m/s, 1,0 m/s, 2,0 m/s e 3,0 m/s, para os cenários 2, 3, 4 e 5 respectivamente, e também estão abaixo dos 10 m/s. Observa-se que, apesar da variação de velocidade de entrada de ar, a vazão foi mantida constante e conseqüentemente não houve variação significativa na velocidade de saída de fumaça que teve um mínimo de 5,5 m/s e máximo de 6,5 m/s e, uma média de 5,9 m/s para os quatro cenários. Sendo a abertura de saída de fumaça total igual a 12,96 m² em todos os cenários, a vazão de extração de fumaça foi de no mínimo 71,28 m³/s para os cenários 3 e 4 e máxima de 84,24 m³/s para o cenário 2, e média de 76,14 m³/s entre os 4 cenários. Ou seja, a variação de velocidade de entrada de ar, de 0,5 a 3,0, não alterou significativamente a vazão de saída de fumaça.

O subitem 15.2.2.5, que também fala de extração mecânica, determina que a velocidade de introdução de ar deve ser igual ou menor que 2,0 m/s para aberturas naturais e de 5,0 m/s para entradas de ar mecânicas.

Para os casos em que a extração de fumaça ocorra de forma natural, independente da área edificada, a área mínima do sistema de extração da fumaça deve ser de 10 m², este parâmetro é especificado no subitem 10.2.1 da IT, neste caso as aberturas de extração de fumaça naturais possuem área de 12,96 m². No subitem 12.1.4.7 que também trata de sistema de extração natural, fica determinado que, a abertura de extração de fumaça deve ter sua parte mais baixa no mínimo a 1,8 m do piso e estar situada no terço superior da

altura de referência, neste caso as aberturas de saída de fumaça estão localizadas no teto do átrio.

Ainda conforme a IT, no item 11.12, que estabelece parâmetros para a altura da camada de fumaça, esta altura pode alcançar no máximo 85% da altura da edificação, devendo estar no mínimo a 2,5 m acima do piso da edificação. Dessa forma, para o compartimento analisado, a AICF pode diminuir até no máximo 4,57 m (ou seja 15% da altura não podendo ser tomado valor inferior a 2,5 m). Além disso deve-se observar as prescrições de projeção da camada de fumaça acima das entradas de ar, caso sejam naturais, comentadas anteriormente. Nos cálculos realizados com os programas, a menor AICF foi obtida com o FDS para o Cenário 4, igual a 14,7 m o que satisfaz o parâmetro da IT.

4

CONCLUSÕES

O objetivo principal deste trabalho é a simulação computacional da altura da interface da camada de fumaça – AICF e a temperatura média da camada de fumaça – TMCF, em ambientes em situação de incêndio com diferentes configurações de sistemas de controle de fumaça. As principais conclusões obtidas com as simulações realizadas são apresentadas a seguir.

O experimento de **Yi *et al.* (2005)** foi realizado em um laboratório construído na China. O átrio do laboratório possuía 22,4 m (comprimento), 12 m (largura) e 27 m (altura). Foram realizados três experimentos, Teste 1 com uma janela de entrada de ar, Teste 2 com uma porta como entrada de ar e, Teste 3 sem aberturas. A taxa de calor adotada foi de 3.000 kW onde o combustível utilizado foi o etanol (C_2H_6O). Para cada teste foram realizadas duas simulações, uma com taxa de calor liberado constante (TCL constante) e outra com um incêndio quadrático ultra rápido (TCL t^2).

Nas simulações do átrio de **Yi *et al.* (2005)**, os resultados obtidos com o FDS, para análise da AICF, foram próximos dos resultados experimentais, prevendo uma AICF inferior e uma TMCF superior à observada no experimento (condições mais conservadoras, ou seja, levariam a um projeto mais seguro). No entanto, como Yi *et al.* (2005) comentam, os resultados com o programa FDS foram bastante elevados quando comparados ao experimento, provavelmente devido as malhas atribuídas não serem apropriadas para considerar as transferências de calor por convecção nos contornos. Malhas mais refinadas poderiam aproximar mais os resultados do programa ao experimento, porém, foram usadas neste trabalho malhas próximas às usadas por Yi et al. (2005) para que se pudesse comparar os resultados.

De maneira geral, os resultados com os programas de zonas CFAST e B-RISK são conservadores em comparação com os experimentos, ou seja, preveem uma maior TMCF

e menor AICF (exceto no Teste 1). No Teste 1 de Yi *et al.* (2005), no qual tem-se a abertura de entrada de ar (janela) localizada na camada de fumaça, os programas de zonas, CFAST e B-RISK, previram uma AICF entre 5 m e 6 m, ao final da simulação, comportamento bem diferente do observado experimentalmente, no qual a fumaça atinge o piso, demonstrando que estes modelos podem conduzir a resultados inadequados nesses casos (inseguros). Essa observação indica que estes modelos não são apropriados para analisar situações nas quais a abertura de entrada de ar fique localizada na camada de fumaça. No Teste 3 (sem qualquer ventilação) o B-RISK interrompeu a sequência de elevação da TMCF e se aproximou mais do experimento ao fim da simulação, diferindo do comportamento apresentado pelo CFAST e FDS.

De modo geral comparando as análises com TCL constante e TCL t^2 conclui-se que as diferenças para as previsões da AICF e TMCF ocorrem apenas no início das simulações, e ao final os resultados são praticamente iguais.

O modelo reproduzido por Bong (2011), denominado K-Office, possuía dimensões de 20 m (comprimento), 15 m (largura) e 7,8 m (altura). No compartimento não havia aberturas de entrada de ar ou de extração de fumaça e a taxa de calor adotada foi de 2.800 kW e, o combustível utilizado foi o metanol (CH_3OH). Foi realizado apenas um experimento deste modelo com TCL t^2 .

Os resultados deste trabalho com o FDS e B-RISK, para o **K-Office de Bong (2011)**, se aproximaram bastante dos resultados obtidos por Bong (2011) com o FDS e BRANZFIRE (precursor do B-RISK), respectivamente, indicando que as simulações deste trabalho estão adequadas. Mais uma vez, destaca-se a aproximação do FDS aos resultados experimentais. Observa-se que a AICF obtida pelo CFAST fica acima do experimento (menos conservador) e TMCF ficou abaixo do experimento, (menos conservador) porém, ao final da simulação os resultados se aproximam. Mais uma vez, o B-RISK interrompeu a sequência de elevação da TMCF, porém, diferentemente da simulação do Teste 3 de Yi *et al.* (2005) os resultados se distanciam um pouco do experimento.

Outro modelo reproduzido por Bong (2011) foi o compartimento Hagglund, com dimensões de 5,6 m (comprimento), 5,6 m (largura) e, 6,2 m (altura). No compartimento havia apenas uma pequena abertura ao nível do piso. Foram realizados três experimentos denominados T2, T5 e T7. Onde cada teste possuía uma taxa de calor liberado específica e uma TCL t^2 também específica. O combustível utilizado foi o Querosene ($\text{C}_{20}\text{H}_{42}$).

Nas simulações realizadas neste trabalho para os testes **T2, T5 e T7** do **compartimento Hagglund de Bong (2011)** os resultados, AICF e TMCF encontrados com os programas FDS, B-RSIK e CFAST tiveram boa concordância com o resultado experimental. Apenas para o teste **T5** a TMCF obtida com o FDS foi ligeiramente superior aos demais resultados (conservador). Para o teste **T7**, os resultados com os programas utilizados neste trabalho apresentaram uma AICF ligeiramente superior ao experimento (não conservador).

Considerando como controle de fumaça a presença de um sistema de introdução de ar (natural ou mecânica) e um sistema de extração de fumaça (natural ou mecânica), o compartimento Hagglund, apesar de possuir uma pequena abertura ao nível do piso que funciona como saída natural de fumaça, não se encaixa dentro dos parâmetros da CBPMSP IT 15:2015, mas, serve de análise para as equações de Klote *et al.* (2012) e da própria IT, que se demonstraram conservadoras.

O modelo utilizado por Kerber *et al.* (2007) foi de um átrio cubico de 30,5 m de lado. Dentre os dez cenários modelados pelo autor, cinco cenários simétricos foram analisados neste trabalho, quatro deles possuíam aberturas de entrada de ar mecânica nas paredes e, extração natural de fumaça no teto, no entanto, cada cenário possuía diferentes áreas e velocidades de entrada de ar e, em todos os casos o mesmo volume de entrada de ar. Apenas um dos cenários não possuía aberturas de entrada de ar ou de extração de fumaça. A taxa de calor liberada variou entre 5 e 7 MW e o combustível utilizado foi a madeira pinus.

Dos 5 cenários do **Átrio de Kerber et al. (2007)** simulados neste trabalho observou-se que os resultados visuais (por imagens) encontrados com os programas FDS, CFAST e B-RISK, para os cenários 2, 3, 4 e 5, foram bastante próximos aos resultados visuais apresentados por Kerber *et al.* (2007). Nestes mesmos cenários os resultados encontrados com o FDS tanto para a AICF quanto para a TMCF apresentaram-se satisfatórios, embora mais conservadores que os resultados de Kerber *et al.* (2007). Os resultados obtidos com o CFAST e B-RISK apresentaram AICF e TMCF próximos entre si e coerentes com os valores obtidos com o FDS.

No cenário 1 os resultados encontrados neste trabalho com o FDS, CFAST e B-RISK foram bastante próximos, tanto para análise da AICF quanto para a TMCF, no entanto não há como compara-los com o trabalho de Kerber *et al.* (2007) devido à falta de dados sobre a simulação deste cenário no trabalho do autor.

Observou-se que a área de abertura dos dutos de ventilação vai diminuindo do cenário 2 para o cenário 5, por outro lado, a velocidade de entrada de ar através destes dutos aumenta de um cenário para o outro, de forma a manter a vazão constante. Notou-se ainda que não houve grande variação nos resultados obtidos com o FDS, CFAST e B-RISK para a AICF e TMCF dos cenários de 2 a 5 (que mantém o mesmo valor de vazão de entrada de ar), sendo que, os resultados encontrados com o FDS foram os mais conservadores entre os três programas.

Comparando os resultados do FDS, para a AICF, com as equações de Klote *et al.* (2012) e com as equações definidas pela CBPMSP IT 15:2015, o resultado mais conservador encontrado foi com as equações da IT, mais uma vez. Ainda que o átrio (pois a geometria permanece a mesma para todos os cenários) de Kerber *et al.* (2007) modelado e simulado neste trabalho contenha sistemas de introdução de ar mecânico e extração natural de fumaça, a IT não prevê parâmetros para tal conjunto de sistema de controle de fumaça, portanto este modelo de átrio também não se encaixa nos critérios definidos pela IT.

Segundo os parâmetros técnicos fornecidos pela CBPMSP IT 15:2015 para implementação de sistema de controle de fumaça em edificações e áreas de riscos, pode-se dizer que, os parâmetros desta IT não se aplicam aos exemplos de simulações realizadas neste trabalho devido ao fato de os modelos de sistemas de introdução de ar e de extração de fumaça apresentados nas simulações não serem compatíveis com os parâmetros adotados pela IT, não atendendo assim as suas especificações.

Conclui-se que, de maneira geral, os resultados encontrados com os programas FDS, CFAST e B-RISK foram bastante próximos aos resultados experimentais (para análise da AICF) e de simulações de outros autores, ora mais conservadores, ora menos, porém, com pequena diferença entre os resultados, lembrando que, as versões dos principais programas (FDS e CFAST) foram diferentes entre as usadas pelos autores e as usadas neste trabalho. Os resultados do programa B-RISK foram adicionados para comparações com os resultados dos demais programas.

Sobre as malhas no programa FDS, para cada simulação, ainda que desenhadas bem próximas aos dos modelos dos outros autores, quando citadas, apresentaram também uma pequena diferença, no entanto, não causaram divergências significativas nos resultados. Observou-se ainda que, em quase todos os casos simulados neste trabalho, o tamanho da malha ficou próxima da malha grossa, que é $D^*/4$.

Observa-se também que as simulações com o programa FDS têm duração de horas (valores de 4 hs a 60 hs) enquanto as simulações com os programas de zonas, CFAST e B-RISK, tem duração de segundos. Porém, de maneira geral, as simulações com o CFAST e B-RISK são mais conservadoras.

Ainda que o tema “Controle de Fumaça” tenha se tornado mais relevante no Brasil recentemente, por falta de trabalhos e ensaios realizados no país sobre o assunto, não há na literatura brasileira exemplos que se apliquem aos critérios da IT para comparações, dificultando assim dados mais precisos e conclusivos que corroborem com a aplicação dos parâmetros da IT. Por outro lado experimentos podem ser realizados em laboratórios de universidades brasileiras a fim de confrontar e comprovar os resultados encontrados com simulações computacionais. A realização dos experimentos torna mais precisa a aplicação dos parâmetros da IT no projeto e execução de sistemas de controle de fumaça. E por fim, os resultados experimentais poderão auxiliar em possíveis alterações em procedimentos e normas futuras.

De maneira geral, as equações de Klote *et al.* (2012) que são base das equações da CBPMSP IT 15:2015, preveem bem a AICF, porém, são conservadoras em relação a TMCF ao comparar com os resultados experimentais ou os obtidos com o FDS. As equações da CBPMSP IT 15:2015 são mais conservadoras que as de Klote *et al.* (2012). As equações de Klote *et al.* (2012) calculam de forma mais adequada a temperatura e densidade da fumaça, enquanto a IT determina a temperatura da camada de fumaça de 70°C e densidade da camada de fumaça de 0,92 kg/m³ para casos em que a edificação for protegida por chuveiros automáticos e, temperatura de 300 °C e a densidade de 0,55 kg/m³ para os casos onde a edificação não tiver proteção de chuveiros automáticos.

De maneira geral, pode-se concluir que:

- o principal objetivo deste trabalho, simulação computacional da AICF e TMCF, foi alcançado;
- as simulações possibilitaram uma comparação entre os programas FDS, CFAST e B-RISK, identificando as suas características, vantagens e desvantagens, além das suas capacidades em analisar ambientes em situação de incêndio com diferentes configurações de sistemas de controle de fumaça;

- a comparação dos resultados das simulações com os procedimentos da CBPMSP IT 15:2015 e das equações de Klote *et al.* (2012) possibilitou identificar o conservadorismo desses procedimentos, indicando a necessidade de alterações, tornando os procedimentos mais econômicos;
- as simulações desenvolvidas neste trabalho podem auxiliar na realização de análises, projetos e experimentos, avaliando com maior precisão o efeito da fumaça no tempo de evacuação dos usuários e da temperatura na estrutura da edificação;
- identificação de trabalhos que poderão ser desenvolvidos futuramente, citados no item seguinte.

4.1 Trabalhos Futuros

Itens como o tempo de ativação do sistema de exaustão da fumaça, elevação e localização das entradas de ar, a distância das entradas de ar até o foco do incêndio e a velocidade do fluxo de ar devem ser melhor estudadas em trabalhos futuros e experimentos, pois, são parte fundamental para o bom funcionamento de um sistema de controle de fumaça.

Outros trabalhos também podem ser realizados de acordo com parâmetros da IT, como: simulação de modelos de entrada de ar assimétricos, como no trabalho de Kerber *et al.* (2007); o incêndio pode ser modelado com diferentes materiais combustíveis como tecido e plástico; criação de um ambiente com diferentes compartimentações e acantonamentos; criação de diferentes sistemas de entrada de ar e extração de fumaça para um mesmo espaço; simulação e análise de casos exemplificados na IT; e principalmente, a realização de experimentos dentro do território brasileiro de forma a contribuir com a adequação dos parâmetros da IT e possíveis ajustes na mesma.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AS 4391:1999. *Smoke management systems Hot smoke test*. The Australian Standard.
- ASTM E: 1354. *Standard Test Method for Heat and Visible Smoke Release Rates for Materials and Products using an Oxygen Consumption Calorimeter*. ASTM, West Conshohocken PA. 2013.
- BABRAUSKAS, V., *Development of the Cone Calorimeter- A Bench Scale Heat Release Rate Apparatus Based on Oxygen Consumption*, Fire and Materials 8, 81-95 (1984).
- BEYLER, C. L., COOPER, L. Y. *Interaction of sprinklers with smoke and heat vent*. *Fire Technology*, v 37, 9-35. 2001.
- BONG, W. J. (2011). *Limitations of Zone Models and CFD Models for Natural Smoke Filling in Large Spaces*. Department of Civil and Natural Resources Engineering University of Canterbury Christchurch, New Zealand, 2011.
- BS EN 12101:2006. *Smoke and heat control Systems*. The European Standard.
- BS 7346:2006. *Components for smoke and heat control systems*. *British Standard*.
- CALDAS, Rodrigo Barreto; *Análise Numérica de Estruturas de Aço, Concreto e Mistas em Situação de Incêndio*. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais. 2008.
- CBPMSP IT 15:2015. *Instrução Técnica N° 15/2015 do Corpo de Bombeiros do Estado de São Paulo. Controle de Fumaça*.
- CBPMMG IT 41:2017. *Instrução Técnica N°41/2017 do Corpo de Bombeiros do Estado de Minas Gerais. Controle de Fumaça*.
- DEPARTMENT OF BUILDING AND HOUSING. *C/VM2 Verification Method for Fire Safety Design for New Zealand Building Code Clauses C1-C6 Protection from Fire*. Wellington, 2012.
- FORNEY, G. P. *Smokeview (Version 6) A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data. User's Guide*. Gaithersburg, Maryland, 2013.
- HINKLEY, P. L., HANSELL, G. O., MARSHALL, N. R., HARRISON, R. *Experiments at the Multifunctioneel Trainingcentrum, Ghent, on the Interaction Between Sprinklers and Smoke Venting*.

Fire Research Station – Report. Building Research Establishment, BRE 224. p 52, Garston, Inglaterra, 1992.

HOU, R., LI, Y., FAN, W., CHOW, W. *Preliminary Studies on Mechanical Smoke Exhausts in Large Space Building Fires*. Proceedings of 5th. , Newcastle, Australia, 2001.

HURLEY, M. J. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Fifth Edition. Society of Fire Protection Engineers 2016.

INTERNATIONAL STANDARD -- *Fire Tests -- Reaction to Fire -- Part 1: Rate of Heat Release from Building Products (Cone Calorimeter method)*. ISO 5660- 1:1993(E). International Organization for Standardization, Geneva (1993).

KERBER S., MILKE J. A. Using FDS *Simulate Smoke Layer Interface Height in a Simple Atrium*. Department of Fire Protection Engineering, University of Maryland, USA. 2007. Fire Technology, p 45 – 75.

KLOTE, J. H., MIKE, J.A., TURNBULL, P.G., KASHEF, A., FERREIRA, M.J. *Handbook of Smoke Control Engineering*. ASHRAE, 2012.

KLOTE, J.H. *Atrium Calc: Atrium Smoke Control Calculator*. Version 1.1. Technical Information and User Guide. ASHRAE, 2014.

MAGALHÃES, S., ALBUQUERQUE, R. R., PINTO, J. C., MOREIRA, A.D. *Termorregulação*. Faculdade de Medicina da Universidade do Porto – Serviço de Fisiologia. Porto, 2001.

MCGRATTAN, K. B., HAMINS, A., STROUP, D. *Sprinkler, Smoke & Heat Vent, Draft Curtain Interaction -- Large Scale Experiments and Model Development*. National Institute of Standards and Technology- NISTIR 6196-1. NIST. 1998.

MCGRATTAN, K., HOSTIKKA, S., MCDERMOTT, R., FLOYD, J., WEINSCHENK, C., OVERHOLT, K. *Fire Dynamics Simulator - FDS. User's Guide*. NIST Special Publication 1019. Sixth Edition, 2015.

NFPA 92:2012. *Standard for Smoke Control Systems*. National Fire Protection Association.

PEACOCK R.D., RENEKE P. A., FORNEY G. P. *Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport - CFAST. User's Guide*. National Institute of Standards and Technology. Version 7. Volume 2. November 2015.

POLING, B. E., PRAUSNITZ, J. M., O'CONNELL, J. P. *The Properties of Gases and Liquids*. Fifth Edition. The McGraw-Hill Companies. 2001

ROHR, K.S. *Why Combustions Are Always Exothermic*, Yielding About 418 kJ per Mole of O₂. Department of Chemistry, Brandeis University, Waltham, Massachusetts, United States, 2015.

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*. Projeto Editora, São Paulo, 2008.

THUNDERHEAD ENGINEERING CONSULTANTS, Inc. *PyroSim User Manual*. 2016.

VALE, A. Abrava e ABNT Desenvolvem Norma de Controle de Fumaça, Revista INCÊNDIO, Ano XV, Nº 114. Janeiro 2015.

WADE, C., BAKER G., FRANK K., ROBBINS A., HARRISON R., SPEARPOINT M., FLEISCHMANN C. *B-RISK User Guide and Technical Manual*. BRANZ study report 282. BRANZ 2013.

WADE, C.A. BRANZFIRE *Technical Reference Guide* (revised). BRANZ Ltd. Porirua New Zealand. 2004.

WADE, C. A., J.R. BARNETT. *A room corner model including fire growth*. *Journal of Fire Protection Engineering*, vol.8, nº4, pp 27-36, 1997.

WADE, C.A. *A Room Fire Model Incorporating Fire Growth on Combustible*. Worcester Polytechnic Institute, 1996.

YI, L., CHOW, W. K., Li, Y. Z., HUO, R. *A Simple Two-Layer Zone Model on Mechanical Exhaust in an Atrium*. *Building and Environment* 40. Elsevier, 2005.

ZHOU, D., WANG, J., HE, Y., *Numerical Simulation Study of Smoke Exhaust Efficiency in an Atrium*. *Journal of Fire Protection Engineering*, vol. 20, Society of Fire Protection Engineers, pg. 117 – 142, Maio 2010.

<http://www.koverholt.com/fds-mesh-size-calc/> (Janeiro,2017)

<http://www.csemag.com/industrynews/codesandstandardsupdates/singlearticle/preentplugholingsmokecontroldoneright/0b027696a155bfc231460457dcc71238.html>.(23/03/2016)

<http://hpac.com/fire-smoke/state-art-atrium-smoke-control> (23/03/2016)