

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

AVALIAÇÃO DA TEMPERATURA MÉDIA DAS CAMADAS DE GASES EM UM
COMPARTIMENTO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO: COMPARAÇÃO DE DADOS
EXPERIMENTAIS, RESULTADOS NUMÉRICOS E DE MODELOS
ANALÍTICOS E EMPÍRICOS

por

Thiago Manabu Kiryu

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, julho de 2017.

AVALIAÇÃO DA TEMPERATURA MÉDIA DAS CAMADAS DE GASES EM UM
COMPARTIMENTO EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO: COMPARAÇÃO DE DADOS
EXPERIMENTAIS, RESULTADOS NUMÉRICOS E DE MODELOS
ANALÍTICOS E EMPÍRICOS

por

Thiago Manabu Kiryu

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof^ª. Dr^ª. Thamy Cristina Hayashi
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Energia e Fenômenos de Transporte**

Orientador: Prof. Dr. Felipe R. Centeno

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Fernando Marcelo Pereira

MEng. Larissa Domingues Lemos

Prof^ª. Dr^ª. Thamy Cristina Hayashi

Porto Alegre, julho de 2017.

AGRADECIMENTOS

Agradeço acima de tudo a minha família, minha mãe Carmem, meu pai Mitsuo e meu irmão Filipe, pelo apoio em todos os infundáveis anos de graduação, suportando minhas indelicadezas nos momentos difíceis.

Agradeço ao meu orientador Dr. Felipe Centeno pelo acompanhamento e os ensinamentos ao longo do período deste projeto.

Agradeço ao Eng. Carlos Michels pelo apoio e por ter disponibilizado um computador para a realização de parte das simulações deste trabalho.

Agradeço a todos os colegas e amigos que fizeram parte desta fase da minha vida e que contribuíram de alguma forma para a minha formação como Engenheiro Mecânico.

Kiryu, T. M. **Avaliação da Temperatura Média das Camadas de Gases em um Compartimento em Situação de Incêndio: Comparação de Dados Experimentais, Resultados Numéricos e de Modelos Analíticos e Empíricos.** 2017. 25 Páginas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

RESUMO

Sabe-se que a temperatura da camada de gases quentes formada em um incêndio em um compartimento tem um papel importante na definição de critérios de segurança na avaliação de riscos à saúde humana decorrentes de incêndios. Desse modo, é pertinente o estudo da capacidade dos diferentes modelos existentes para a predição desse parâmetro. No presente trabalho, foi construído um modelo numérico no programa *Fire Dynamics Simulator* para a determinação da temperatura média na camada de gases quentes para diversos cenários de incêndio no estágio *pré-flashover* dentro de um compartimento com ventilação natural. O mesmo parâmetro foi obtido através de métodos analíticos e empíricos presentes na literatura, e os resultados de todos os modelos foram comparados com os resultados dos experimentos de Steckler. Verificou-se que o modelo numérico obteve melhores resultados na predição de temperaturas em comparação com as estimativas dos modelos analíticos e empíricos, as quais incorreram em desvios médios de grande magnitude em relação aos valores experimentais.

PALAVRAS-CHAVE: Temperatura, Camadas de Gases, Incêndio, FDS.

Kiryu, T. M. **Evaluation of Gas Layers Average Temperature in a Compartment Fire: Comparison of Experimental Data, Numerical Results, Analytical and Empirical Models.** 2017. 25 Pages. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

ABSTRACT

The temperature of the hot upper layer developed in a compartment fire plays an important role in the definition of safety criteria for risk assessment to human health due to fires. In this way, the study of different existing models' ability to predict this parameter is relevant. In the present work, a numerical model was constructed in the Fire Dynamics Simulator software for determination of the hot upper layer average temperature for several scenarios of pre-flashover compartment fire with natural ventilation. The same parameter was calculated through analytical and empirical methods present in the literature, and the results from all models were compared with Steckler's experimental results. It was verified that the numerical model obtained better results in predicting compartment temperatures compared to estimates of the analytical and empirical models which had average deviations of great magnitude compared to experimental values.

KEYWORDS: Temperature, Gas Layers, Fire, FDS.

ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVO	1
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	2
4.1. Modelo teórico de incêndio em um compartimento	2
4.2. Balanço de energia	2
4.3. Correlações empíricas	4
4.4. Método do balanço de massa e energia	5
4.5. Simulação numérico computacional no programa <i>Fire Dynamics Simulator</i>	5
4.5.1. Resolução de malha.....	6
5. METODOLOGIA	6
5.1. Definição do problema	6
5.2. Medição de temperatura	7
5.3. Condições de contorno	8
5.3. Malha	8
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	9
7. CONCLUSÕES	15
8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	15
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	16
APÊNDICE A	18
APÊNDICE B	18
APÊNDICE C	18
APÊNDICE D	19

1. INTRODUÇÃO

Diferentes critérios de segurança para avaliação de riscos decorrentes de incêndios são utilizados no mundo. Os fatores determinantes para o sucesso de fuga dos ocupantes de uma construção são a visibilidade e os níveis de exposição ao calor e à fumaça [Purser e McAllister, 2016]. Calor e gases nocivos à saúde humana se acumulam na camada de gases quentes que se forma na região superior de um compartimento em incêndio e é a composição dessa camada que determina o grau de visibilidade dos ocupantes em construções [Johansson, 2016]. Portanto, a temperatura da camada de gases quentes é um dos critérios mais importantes para a Engenharia de segurança contra incêndios.

Os métodos existentes para cálculo da temperatura média da camada de gases quentes são os métodos analíticos e os modelos computacionais de simulação de incêndio. Os métodos analíticos consistem em equações de balanço de massa e energia para determinado volume de controle dentro do compartimento ou correlações derivadas de dados empíricos experimentais, que permitem uma rápida avaliação dos riscos de incêndio devido a sua simplicidade e relativa exatidão dos resultados. Por outro lado, modelos numéricos capazes de simular incêndios se desenvolveram rapidamente ao longo dos últimos anos. Modelos de duas zonas e modelos de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD – do inglês: *computational fluid dynamics*), permitem não somente calcular a temperatura nas camadas de gases formadas durante um incêndio confinado, mas também diversos outros parâmetros, tais como a altura de interface entre as camadas de gases, a concentração de gases e a vazão dos gases por janelas e portas para geometrias com uma ou múltiplas salas. Vários são os modelos disponíveis, se destacando o *Fire Dynamics Simulator*, um *software* de livre distribuição, com contínuas atualizações. Neste trabalho, foi construído um modelo numérico no programa *Fire Dynamics Simulator* para a determinação da temperatura média na camada de gases quentes para diversos cenários de incêndio dentro de um compartimento com ventilação natural. O mesmo parâmetro foi obtido com métodos analíticos e empíricos, e os resultados de todos os modelos foram comparados com os resultados dos experimentos de Steckler *et al.*, 1982. Estudos como este permitem uma maior compreensão do fenômeno do fogo, colaborando para a prevenção de ocorrência de incêndios e redução de danos a estruturas e à saúde humana.

2. OBJETIVO

No presente trabalho, tem-se o objetivo de determinar numericamente as temperaturas médias das camadas de gases quentes e frios formadas durante o desenvolvimento de um incêndio em um compartimento. Os resultados obtidos serão comparados de forma quantitativa com resultados experimentais e com resultados de modelos analíticos e empíricos. Também serão extraídos os perfis de temperatura no interior e sob a abertura do compartimento.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Johansson, 2016, avaliou a correlação de McCaffrey *et al.* (MQH), 1981, a correlação para estimativa de temperatura em salas adjacentes à sala com o foco de incêndio e o método de balanço de massa e de energia, ambos de sua autoria, para o cálculo da temperatura da camada de gases quentes e da altura de interface entre as camadas de gases para um incêndio em fase de *pré-flashover*, isto é, na fase com crescimento gradual da temperatura, para as condições de fogo em regime estacionário e transiente (taxa de liberação de calor do fogo dependente do tempo), em compartimentos de uma ou múltiplas salas. Nesse trabalho, o programa *Fire Dynamics Simulator* também é utilizado na avaliação da temperatura para os casos de fogo em regime transiente.

Wang e Quintiere, 2009, formularam uma correlação derivada da teoria de modelo de zonas e construíram um modelo numérico no FDS para calcular a temperatura na camada inferior de gases frios e outras propriedades de um incêndio compartimentado. Os modelos foram aplicados aos experimentos de Steckler et al., 1982, e comparados com os resultados experimentais.

Wang et al., 2011, em seguimento ao estudo realizado anteriormente, aperfeiçoaram o modelo numérico no FDS, utilizando malhas computacionais mais refinadas e alterando a radiação térmica no modelo de combustão do programa.

Dusso et al., 2016, compararam duas expressões analíticas com resultados obtidos em simulações numéricas no FDS para uma série de compartimentos com o objetivo de analisar a capacidade dos modelos analíticos em estimar a temperatura na camada de gases quentes e a radiação térmica de uma chama. Os resultados numéricos para estimativa de temperatura concordaram com os resultados analíticos calculados pela correlação MQH, para o caso de um compartimento com chama de crescimento quadrático ao longo do tempo.

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1 Modelo teórico de incêndio em um compartimento

Um dos modelos existentes para descrever o fenômeno de incêndio em um compartimento é o modelo de duas zonas. De acordo com esse modelo, o incêndio tem início em algum ponto dentro do compartimento, liberando energia e produtos de combustão. Forma-se uma pluma de produtos de combustão quentes que se eleva na direção do teto do compartimento, devido ao empuxo. Ao ascender, a pluma carrega os gases com menor temperatura da região inferior do compartimento, diminuindo sua temperatura e aumentando o seu volume. Quando a pluma atinge o teto, se espalha na direção das paredes do compartimento e, ao atingi-las, desce dando origem a uma camada de gases de temperatura mais elevada. Uma região de interface é formada entre duas camadas de gases: uma camada superior com temperaturas altas e uma camada inferior com temperaturas mais baixas. O modelo assume que a única troca entre as camadas ocorre através da pluma e que as propriedades das camadas são uniformes. Se o compartimento possuir alguma abertura, ar quente da camada superior sairá do compartimento e ar frio entrará pela parte inferior da abertura. A Figura 4.1 apresenta um desenho esquemático do modelo de duas zonas.

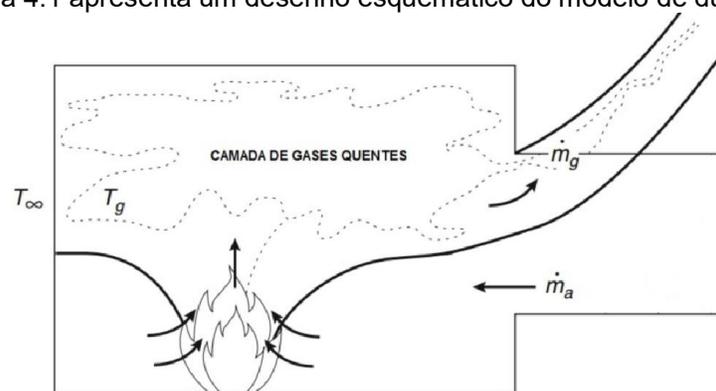


Figura 4.1 – Formação das camadas de gases dentro de um compartimento pelo modelo de zona [adaptado de Walton et al., 2016].

4.2 Balanço de energia

O cálculo da temperatura no interior de um compartimento em incêndio é baseado nas

equações de conservação de energia e massa. Um balanço de energia simplificado para o caso de regime estacionário, tomando como volume de controle a camada de gases quentes [Karlsson e Quintiere, 2000] pode ser definido conforme a Equação 4.1.

$$\left[\begin{array}{l} \text{Taxa de liberação} \\ \text{de calor do fogo} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} \text{Taxa de energia} \\ \text{perdida devido à} \\ \text{saída de gases} \\ \text{pela abertura} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} \text{Taxa de energia perdida} \\ \text{pelos gases quentes} \\ \text{para as superfícies} \\ \text{do compartimento} \end{array} \right] \quad (4.1)$$

O balanço de energia acima leva em conta somente os processos dominantes e pode ser escrito pela Equação 4.2.

$$\dot{Q} = m_g c_p (T_g - T_\infty) + \dot{q}_l \quad (4.2)$$

onde \dot{Q} é a taxa de liberação de calor do fogo, m_g é a vazão mássica de fluido que sai pela abertura, c_p é calor específico dos gases, T_g é a temperatura da camada de gases quentes, T_∞ é a temperatura ambiente externa e \dot{q}_l é a taxa de energia perdida pela camada de gases quentes para as superfícies do compartimento.

A transferência de calor da camada de gases quentes para o compartimento ocorre por meio de vários processos. O calor é transferido para as superfícies por radiação e convecção, seguido pela condução através das superfícies. Há também perda de calor por radiação pelas aberturas do ambiente. O processo dominante é a transferência de calor para as superfícies sólidas que pode ser aproximado pela Equação 4.3.

$$\dot{q}_l = h_k A_T (T_g - T_\infty) \quad (4.3)$$

onde h_k é o coeficiente de transferência de calor efetivo e A_T é a área total da superfície interna do compartimento.

Substituindo a Equação 4.3 na Equação 4.2 resulta na equação de elevação de temperatura (4.4) em termos de dois grupos adimensionais,

$$\frac{\Delta T}{T_\infty} = \frac{\dot{Q}/(\dot{m}_g c_p T_\infty)}{1 + h_k A_T/(\dot{m}_g c_p)} \quad (4.4)$$

onde ΔT é a elevação de temperatura dos gases da camada de gases quentes acima da temperatura ambiente.

A vazão mássica de gases quentes que sai do compartimento pelas aberturas é dada pela Equação de Rockett, 1976, (4.5).

$$\dot{m}_g = \frac{2}{3} C_d W_0 \rho_\infty \sqrt{2g \frac{T_\infty}{T_g} \left(1 - \frac{T_\infty}{T_g}\right)} (H_0 - H_N)^{\frac{3}{2}} \quad (4.5)$$

onde C_d é o coeficiente de descarga do orifício, W_0 é a largura da abertura, ρ_∞ é a densidade do ar ambiente, g é a aceleração da gravidade, H_0 é a altura da abertura e H_N é a altura do plano neutro, isto é, a altura na qual a velocidade dos gases é nula.

4.3 Correlações empíricas

McCaffrey *et al.*, 1981, relacionaram a elevação de temperatura da camada de gases

quentes em um compartimento com os grupos adimensionais da Equação 4.4 através da Equação 4.6.

$$\frac{\Delta T}{T_{\infty}} = C X_1^N X_2^M \quad (4.6)$$

onde X_1 e X_2 são os grupos adimensionais e C , M e N são constantes empíricas determinadas por análise de regressão de dados experimentais. Resultados de mais de cem experimentos foram utilizados para encontrar os valores numéricos das constantes empíricas. Foram considerados incêndios em regime estacionário e transiente, com combustíveis gasosos (hidrocarbonetos) e sólidos (materiais celulósicos e poliméricos). Os compartimentos apresentavam altura variando entre 0,3 e 2,7 m e área de piso de 0,14 a 12,0 m², compostos de paredes de diversos materiais e com aberturas na forma de janelas e portas. A Equação 4.7, conhecida como correlação MQH, apresenta os valores das constantes empíricas encontradas por McCaffrey *et al.*, 1981.

$$\frac{\Delta T}{T_{\infty}} = 1,63 \left(\frac{\dot{Q}}{\sqrt{g} c_p \rho_{\infty} T_{\infty} A_0 \sqrt{H_0}} \right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{h_k A_T}{\sqrt{g} c_p \rho_{\infty} A_0 \sqrt{H_0}} \right)^{-\frac{1}{3}} \quad (4.7)$$

onde A_0 é a área da abertura do compartimento.

De acordo com McCaffrey *et al.*, 1981, o coeficiente de transferência de calor efetivo pode ser aproximado, para uma análise unidimensional, quando o tempo de exposição t é maior que o tempo de penetração térmica t_p , pela Equação 4.8.

$$h_k = \frac{k}{\delta} \quad (4.8)$$

onde k é a condutividade térmica das superfícies do compartimento e δ é a espessura das paredes do compartimento.

O tempo de penetração térmica denota o tempo no qual a condução se aproxima de um estado estacionário, indicando o momento em que aproximadamente 15% da elevação de temperatura do lado interno da parede exposto ao fogo alcança a superfície externa da parede [Karlsson e Quintiere, 2000]. Este tempo pode ser expresso pela Equação 4.9.

$$t_p = \left(\frac{\rho c}{k} \right) \left(\frac{\delta}{2} \right)^2 \quad (4.9)$$

onde ρ é densidade das paredes do compartimento e c é o calor específico do material das paredes.

Para um tempo de exposição menor que o tempo de penetração térmica (fase de crescimento do incêndio), McCaffrey *et al.*, 1981, utilizam uma aproximação dada pela Equação 4.10, baseada na condução térmica em um sólido semi-infinito.

$$h_k = \left(\frac{k \rho c}{t} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4.10)$$

onde t é o tempo de exposição ao fogo.

Mowrer e Williamsson, 1987, discutiram como a correlação MQH poderia ser aplicada para casos de foco de incêndio próximo a uma parede e no canto de um compartimento, sugerindo novos valores para a constante empírica C da Equação 4.6. Azhakesan *et al.*, 2003,

avaliaram a modificação sugerida e propuseram valores alternativos para as configurações de fogo central e no canto do compartimento, como pode ser visto na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Valores da constante empírica C para diferentes localizações do fogo no compartimento.

Localização do fogo	C	Referência
Central	2,32	Azhakesan <i>et al.</i> , 2003
Canto	2,72	Azhakesan <i>et al.</i> , 2003
	2,90	Mowrer e Williamsson, 1987
Perto da parede	2,08	Mowrer e Williamsson, 1987

4.4 Método do balanço de massa e energia

A equação de balanço de energia (4.2) pode ser reescrita como uma expressão para a elevação de temperatura no interior de um compartimento como na Equação 4.11.

$$\frac{\Delta T}{T_{\infty}} = \frac{\dot{Q}}{\dot{m}_g c_p + h_k A_T} \quad (4.11)$$

Johansson e van Hees, 2014, apresentaram e avaliaram equações para o cálculo da vazão mássica de ar através de uma abertura de um compartimento em incêndio na situação de *pré-flashover*. A vazão mássica de ar é calculada com a ajuda de um balanço de massa, no qual a altura de interface térmica entre as camadas de gases quentes e frios pode ser encontrada através das Equações 4.12 e 4.13, e a correlação de pluma de Heskestad, 2008, (4.14).

$$\dot{m}_g = \dot{m}_p \quad (4.12)$$

$$\dot{m}_g = 0,684 A_0 \sqrt{H_0} \left(1 - \frac{H_D}{H_0}\right) \quad (4.13)$$

$$\dot{m}_p = 0,071 \dot{Q}_c^{\frac{1}{3}} H_D^{\frac{5}{3}} + 1,92 \times 10^{-3} \dot{Q}_c \quad (4.14)$$

onde \dot{m}_p é a vazão mássica dos gases da pluma que entram na camada superior, H_D é a altura de interface entre as camadas de gases quentes e frios e \dot{Q}_c é a parcela convectiva da taxa de liberação de calor do fogo.

Após calcular a altura de interface entre as camadas de gases quentes e frios por processo iterativo (Equações 4.12, 4.13 e 4.14), é possível obter a vazão mássica de fluido que sai pela abertura (Equação 4.13). O balanço de energia pode, então, ser resolvido e a elevação de temperatura do compartimento calculada (Equação 4.11).

4.5 Simulação numérica computacional no programa *Fire Dynamics Simulator*

O software *Fire Dynamics Simulator* (FDS), desenvolvido pelo *National Institute of Standards and Technology* dos EUA, é um programa de CFD baseado no método de volumes finitos, que resolve uma forma das equações de Navier-Stokes para baixas velocidades (aproximação para baixos números de Mach), dando ênfase à transferência de calor e ao transporte de fumaça gerada pelo fogo [McGrattan *et al.*, 2017]. O modelo hidrodinâmico se baseia em equações de

conservação de quantidade de movimento, energia e espécies químicas. O algoritmo de solução utiliza um esquema explícito preditor-corretor, com precisão de segunda ordem no tempo e no espaço. A cada passo de tempo, o algoritmo verifica se o critério de estabilidade de CFL (Courant, Friedrichs, Lewy) é satisfeito (caso não seja satisfeito, o passo de tempo é ajustado, retornando ao início do procedimento preditor). A turbulência é tratada pelo modelo matemático de Simulação de Grandes Escalas (LES - do inglês: *Large Eddy Simulation*) [Pope, 2000], com a viscosidade dada pelo modelo de Deardorff [Deardorff, 1980]. O modelo de combustão empregado se baseia em frações de mistura de espécies químicas com reação em uma única etapa global. A combustão é controlada pela mistura turbulenta, e o modelo prevê reações químicas infinitamente rápidas entre combustível e oxigênio, independentemente da temperatura. A transferência de calor por radiação é incorporada ao modelo pela solução da equação de transporte radiativo com o modelo de gás cinza, usando uma técnica de volumes finitos. Mais detalhes sobre o equacionamento empregado no FDS podem ser encontrados em McGrattan *et al.*, 2017.

Os cálculos numéricos gerados no FDS podem ser visualizados no programa *Smokeview*, que cria imagens e animações do desenvolvimento do incêndio em estudo ao longo do tempo.

4.5.1 Resolução de malha

De acordo com McGrattan *et al.*, 2017, para simulações envolvendo plumas de gases, uma medida da resolução do escoamento de fluidos pode ser dada pela expressão não dimensional $\frac{D^*}{\delta x}$, onde D^* é um diâmetro característico do fogo dado pela Equação 4.15.

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} c_p T_{\infty} \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (4.15)$$

onde δx é o tamanho da célula da malha computacional.

5. METODOLOGIA

5.1 Definição do problema

Nos experimentos numéricos deste trabalho foi utilizada uma estrutura semelhante ao compartimento dos experimentos de Steckler *et al.*, 1982, como pode ser visto na Figura 5.1. O compartimento foi construído com 3,0 m de comprimento, largura de 3,0 m e altura de 2,4 m. Aberturas no formato de portas e janelas com dimensões como as apresentadas na Figura 5.2, foram introduzidas na geometria para permitir a entrada e saída de gases do compartimento.

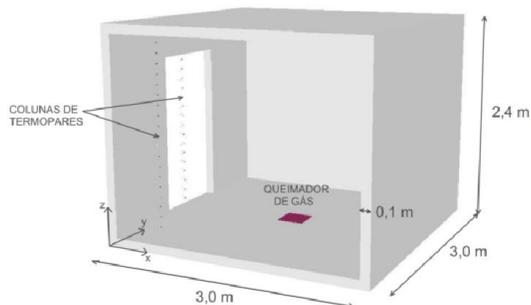


Figura 5.1 – Geometria do problema em estudo.

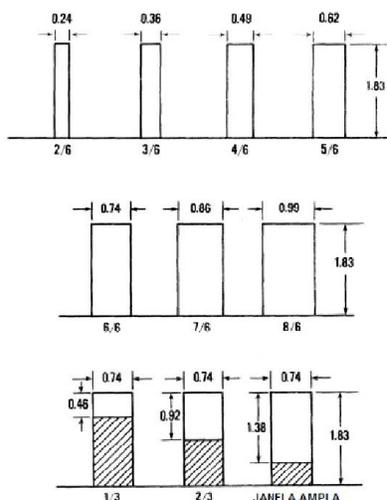


Figura 5.2 – Configurações de abertura com dimensões em metros [adaptado de Steckler *et al.*, 1982].

Foram simulados 28 cenários de incêndio, nos quais um queimador de gás na forma de um quadrado com 30 cm de lado, na altura do piso, foi posicionado em três regiões distintas do compartimento (posições A, B e C), como mostra a Figura 5.3. O queimador de gás foi alimentado com metano e a taxa de liberação de calor ao longo dos experimentos foi mantida constante em 62,9 kW para todos os cenários simulados. Sendo assim, a implementação da fonte de calor foi feita com uma taxa de liberação de calor por unidade de área de 698,88 kW/m².

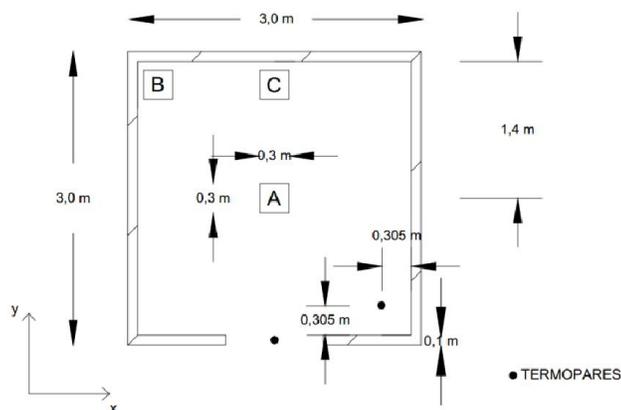


Figura 5.3 – Posições do queimador de gás dentro do compartimento.

As paredes, o piso e o teto da estrutura foram definidos como superfícies com espessura de 10 cm, tal como no modelo numérico de Wang e Quintiere, 2009, e constituídas de fibra cerâmica, um material comumente utilizado para isolamento térmico de ambientes. O material das superfícies do compartimento foi definido através das seguintes propriedades físicas e térmicas: densidade de 260 kg/m³, calor específico de 1,0 kJ/kgK, emissividade de 0,9 e condutividade térmica na forma de uma curva apresentada no APÊNDICE A.

5.2 Medição de temperatura

A temperatura no interior do ambiente foi medida através de uma coluna com 20

termopares de diâmetro de 0,51 mm, espaçados entre si 11,3 cm na vertical. A coluna foi posicionada a 30,5 cm das paredes, no canto direito (vista de frente para a abertura), como mostrado na Figura 5.3. O perfil de temperatura sob a abertura da sala foi determinado por meio de uma coluna com 16 sensores localizada na linha de centro da abertura.

Os cálculos de temperatura do FDS atingiram um regime estacionário para a fase gasosa dentro do compartimento por volta de 200 s, e as simulações foram realizadas até 700 s. Para o cálculo de um valor médio foram tomadas as temperaturas entre 400 s e 700 s. Cada cenário simulado teve um custo computacional aproximado de três dias em um computador com processador de 2,5 GHz e memória RAM de 6,0 GB.

5.3 Condições de contorno

Para cada cenário simulado, a temperatura ambiente inicial foi prescrita de acordo com os experimentos de Steckler *et al.*, 1982, e a pressão atmosférica foi de 101325 Pa. O domínio computacional foi construído no formato de um paralelepípedo com comprimento e largura de 4,5 m e altura de 3,0 m. Como recomendado por McGrattan *et al.*, 2017, o domínio computacional foi estendido para além dos limites da abertura do compartimento, afim de evitar imperfeições na condição de contorno de pressão na abertura. Seguiu-se a recomendação do trabalho de Wang *et al.*, 2011, e estendeu-se o domínio computacional por uma distância de 75 cm, equivalente à metade do diâmetro efetivo da abertura com maior área (porta 8/6). O diâmetro efetivo da abertura é definido como o diâmetro do círculo com a mesma área da abertura. Uma distância de igual valor foi definida entre os limites do domínio computacional e as paredes laterais e traseira externas, bem como uma distância de 30 cm entre as superfícies externa superior e inferior do compartimento e os contornos externos da malha computacional, tendo em vista a facilidade de construção de uma geometria centrada no domínio.

Considerou-se a condição de contorno de “superfícies abertas” nas coordenadas referentes ao x máximo e mínimo, y máximo e mínimo, e z máximo e mínimo, isto é, nas superfícies delimitadoras do domínio computacional. Para essa condição de contorno, as propriedades na fronteira assumem seus respectivos valores dos volumes adjacentes ou da condição externa, se a direção do escoamento estiver saindo ou entrando do domínio, respectivamente, tratando-se então de uma condição de contorno *upwind* [McGrattan *et al.*, 2017]. Além disso, as paredes internas do compartimento foram consideradas como isoladas termicamente, assemelhando-se à condição resultante do uso de materiais isolantes no caso experimental.

5.4 Malha

É possível encontrar na literatura várias formas de avaliar a resolução da malha de um modelo numérico. McGrattan *et al.*, 2017, sugerem que para simulações envolvendo plumas de gases uma medida da resolução do escoamento pode ser dada pela razão entre o diâmetro característico do fogo D^* pelo tamanho da célula da malha computacional δx . Este parâmetro é definido como o número de células computacionais ao longo do diâmetro característico (não necessariamente físico) do fogo. Quanto maior a razão $\frac{D^*}{\delta x}$, melhor a resolução da malha computacional e maior a acuracidade da simulação. Em um estudo de validação e verificação de vários modelos de incêndio patrocinado pela *US Nuclear Regulatory Commission* (NRC) [Hill *et al.*, 2007], o valor do índice de resolução do fogo variou de 4 a 16. Se esses valores forem tomados como referência, para um determinado cenário de incêndio, como por exemplo, com o fogo localizado no centro do compartimento e configuração de abertura 5/6, o tamanho escolhido para a célula da malha computacional deve ser de aproximadamente 2,0 a 7,0 cm. Entretanto, para garantir a independência dos resultados em relação à qualidade da malha, faz-se necessário estudar a sensibilidade de malha. Desse modo, foram realizadas seis

simulações com tamanhos de célula decrescentes: 6,25 cm, 6,0 cm, 5,0 cm, 4,17 cm, 3,33 cm e 2,5 cm. Nesses testes, o queimador de gás foi alocado no centro do compartimento e a abertura para o escoamento de ar apresentava a configuração de porta 5/6, com 0,74 m de largura e 1,83 m de altura. A Figura 5.4 mostra o comportamento da temperatura média na camada de gases quentes em função da variação do tamanho do elemento da malha computacional.

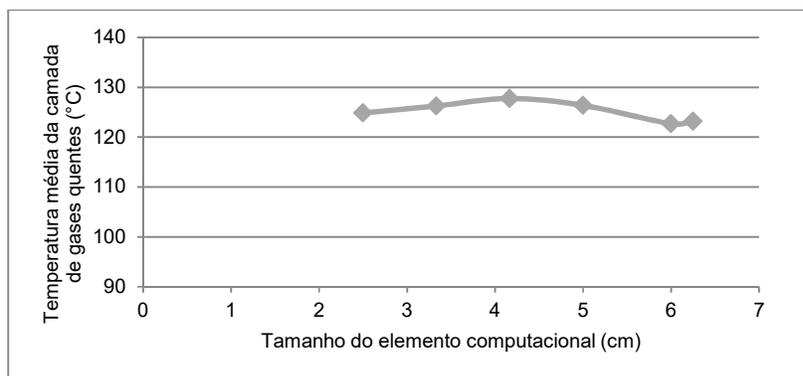


Figura 5.4 – Análise de sensibilidade de malha.

Como pode ser observado na Figura 5.5, a diferença entre os resultados de temperatura média dos gases quentes para malhas computacionais com tamanho de célula inferior a 5,0 cm é negligenciável. Uma malha com tal tamanho de célula pode ser considerada como suficientemente refinada para a discretização do domínio computacional e, portanto, todas as simulações foram realizadas com a definição desse valor de dimensão.

O volume da malha em todas as simulações foi dividido, então, em um total de 486.000 elementos cúbicos de 5,0 cm x 5,0 cm x 5,0 cm. A Figura 5.5 apresenta a malha em maior detalhe, com a distribuição de células ao longo dos eixos x, y e z.

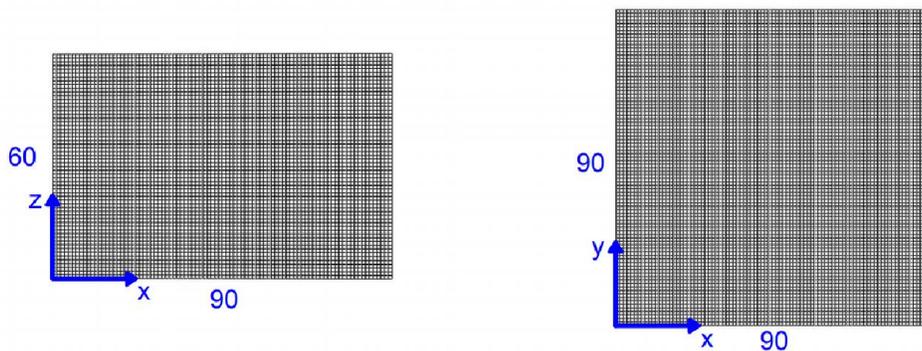


Figura 5.5 – Malha utilizada nos experimentos numéricos.

Em relação à discretização temporal, o passo de tempo inicial em simulações no *Fire Dynamics Simulator* é ajustado automaticamente dividindo o tamanho da menor célula da malha pela velocidade característica do escoamento. Durante os cálculos, o passo de tempo é ajustado de tal forma que a condição CFL (Courant, Friedrichs, Lewy) seja satisfeita [McGrattan *et al.*, 2017]. Desse modo, o passo de tempo nas simulações é variável, com uma ordem entre 10^{-3} e 10^{-4} s.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 6.1 apresenta os valores de temperaturas médias das camadas de gases quentes e frios dos experimentos de Steckler *et al.*, 1982, e dos experimentos numéricos realizados no FDS, bem como uma comparação entre tais resultados através da diferença percentual.

Tabela 6.1 – Resultados experimentais e numéricos de temperaturas médias das camadas de gases quentes e frios.

Configuração de abertura	Taxa de liberação de calor (kW)	Localização do fogo	Temperatura média da camada de gases quentes (°C)			Temperatura média da camada de gases frios (°C)			Temperatura ambiente (°C)
			Experimental	FDS	Diferença (%)	Experimental	FDS	Diferença (%)	
Porta 2/6	62,9	A	190,0	197,5	3,9	72,0	106,7	48,2	26,0
Porta 3/6	62,9	A	164,0	150,4	-8,3	62,0	69,8	12,6	28,0
Porta 4/6	62,9	A	141,0	134	-5	50,0	58,1	16,3	22,0
Porta 5/6	62,9	A	129,0	126,4	-2,1	47,0	55,7	18,4	23,0
Porta 6/6	62,9	A	129,0	127	-1,6	48,0	57,5	19,8	29,0
Porta 7/6	62,9	A	120,0	111,5	-7,1	44,0	45,1	2,4	26,0
Porta 8/6	62,9	A	109,0	102,3	-6,2	36,0	43,1	19,7	22,0
Janela ampla	62,9	A	143,0	149,2	4,4	53,0	66,2	24,8	30,0
Janela 2/3	62,9	A	177,0	180,8	2,2	78,0	98,2	25,9	26,0
Janela 1/3	62,9	A	270,0	240,2	-11,1	157,0	160,2	2,1	13,0
Porta 2/6	62,9	B	248,0	243,8	-1,7	74,0	68,3	-7,6	32,0
Porta 3/6	62,9	B	216,0	207	-4,2	59,0	53,3	-9,7	30,0
Porta 4/6	62,9	B	194,0	190,6	-1,8	48,0	45,3	-5,6	24,0
Porta 5/6	62,9	B	197,0	188,3	-4,4	51,0	48,2	-5,6	29,0
Porta 7/6	62,9	B	179,0	171,9	-4	47,0	44	-6,4	29,0
Porta 8/6	62,9	B	172,0	169,2	-1,6	44,0	46,1	4,8	29,0
Janela ampla	62,9	B	194,0	195,8	0,9	50,0	48,9	-2,1	28,0
Janela 2/3	62,9	B	216,0	212,6	-1,6	65,0	61,9	-4,7	26,0
Porta 2/6	62,9	C	209,0	197,7	-5,4	53,0	60,9	14,9	9,0
Porta 3/6	62,9	C	173,0	156,5	-9,5	36,0	31,7	-12	7,0
Porta 4/6	62,9	C	173,0	166,3	-3,8	46,0	41,4	-10	21,0
Porta 5/6	62,9	C	160,0	156,1	-2,4	41,0	38,7	-5,5	20,0
Porta 6/6	62,9	C	152,0	148,7	-2,2	36,0	36,7	1,9	18,0
Porta 7/6	62,9	C	140,0	128,2	-8,4	29,0	28,5	-1,7	14,0
Porta 8/6	62,9	C	134,0	129	-3,8	29,0	30,8	6,3	15,0
Janela ampla	62,9	C	153,0	152,3	-0,4	32,0	32,5	1,4	10,0
Janela 2/3	62,9	C	178,0	178,9	0,5	48,0	44,8	-6,7	9,0
Janela 1/3	62,9	C	288,0	242	-16,0	153,0	126,1	-17,6	8,0

Na Tabela 6.2 são mostradas as médias das diferenças percentuais entre resultados experimentais e numéricos e o valor da raiz do erro quadrático médio (RMSE, em inglês) das diferenças percentuais para as camadas de gases formadas no interior do compartimento. Essa última medida estatística fornece uma dimensão da dispersão dos resultados, sendo que quanto menor seu valor maior a capacidade de predição do modelo.

Tabela 6.2 – Resultados de erros estatísticos para o modelo numérico.

	Diferença média (%)	Diferença média absoluta (°C)	RMSE (%)
Diferença entre temperatura numérica e experimental da camada de gases quentes	-3,6	-6,9	5,7
Diferença entre temperatura numérica e experimental da camada de gases frios	4,4	2,2	15,1

A predição das temperaturas médias das camadas de gases pelo FDS forneceu resultados que concordam com os valores experimentais, independentemente da posição da chama dentro do compartimento. Em média, o modelo numérico subestima a temperatura média da camada de gases quentes em 3,6% e superestima a temperatura média da camada de gases frios em 4,4% em comparação com resultados experimentais. A exceção de concordância com os experimentos foi a configuração de porta 2/6, para a qual um alto erro médio percentual pode ser atribuído à ausência de uma camada inferior uniforme de gases com menor temperatura.

As médias das diferenças entre temperatura experimental e numérica das camadas de gases se encontram abaixo do erro esperado para os casos nos quais a taxa de liberação de calor do fogo é especificada e a transferência de calor e produtos de exaustão é o principal objetivo da simulação. De acordo com McGrattan *et al.*, 2017, para estes casos, o modelo prediz velocidades de escoamento e temperaturas com uma precisão entre 10% a 20% das medidas experimentais, dependendo da resolução da malha numérica.

O erro médio nos experimentos numéricos é de -6,9 °C e de 2,2 °C para as camadas de gases superior e inferior, respectivamente. Para fins de comparação, os limites de incerteza nas medições de temperaturas dentro do compartimento realizadas por Steckler *et al.*, 1982, com o uso de termopares aspirados foi de +1/-3°C, incluindo erros por radiação.

Os resultados de valor RMSE indicam que os erros percentuais de temperatura média para camada superior de gases se encontram com baixa dispersão em relação aos valores dos testes de referência. Entretanto, na predição das temperaturas médias da camada inferior de gases, oito cenários apresentaram um erro percentual maior que 15%, refletindo, assim, em um valor significativamente maior do RMSE.

Alguns perfis de temperatura obtidos dentro do compartimento com abertura do tipo porta 5/6 são comparados aos perfis dos experimentos em escala real e mostrados nas Figuras 6.1a, Figura 6.1b e Figura 6.1c.

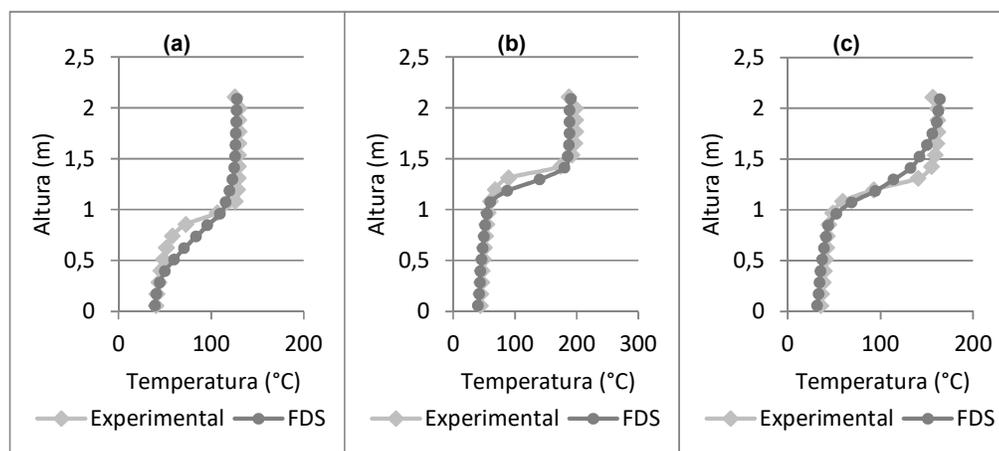


Figura 6.1 – Comparação dos perfis de temperatura numérico e experimental dentro do compartimento com abertura 5/6 e fogo nas posições A (a), B (b) e C (c).

Ao observar os perfis de temperatura na sala, fica evidente a estratificação dos gases em duas camadas uniformes: uma camada superior com gases em temperatura mais elevada e uma camada inferior de temperaturas mais baixas. Entre as duas regiões ocorrem temperaturas intermediárias com maior variação ao longo do tempo. Alguns perfis de temperatura sob a linha de centro da abertura são mostrados no APÊNDICE B.

Para comparação dos resultados numéricos obtidos com métodos analíticos de predição de temperaturas em compartimentos em situação de incêndio, é necessário, primeiramente, definir se o fogo atingiu o *flashover*. *Flashover* pode ser definido como a transição do período de crescimento do fogo para o estágio de fogo totalmente desenvolvido. Durante este fenômeno todas as superfícies no compartimento são aquecidas pela radiação das chamas, dos objetos quentes e da camada superior de gases. As superfícies combustíveis inflamam-se rapidamente e todo o compartimento é rapidamente envolvido pelo fogo [Spearpoint, 2008]. Na área de Engenharia de segurança contra incêndio é comum a utilização dessa palavra para delimitação de dois estágios em incêndios em compartimentos: o pré-*flashover* e o pós-*flashover* [Karlsson e Quintiere, 2000].

Uma das definições encontradas na literatura para *flashover* é o momento em que a temperatura da camada de gases quentes no compartimento atinge de 500 a 600 °C, ou quando a radiação em direção ao chão do compartimento atingir cerca de 20 kW/m² [Waterman, 1968]. Outro critério para definição do *flashover* é a saída das chamas de fogo pela abertura do compartimento [Drysdale, 1998]. Segundo o primeiro critério, o ponto de *flashover* não foi atingido em nenhum dos cenários de incêndio, visto que a temperatura máxima alcançada pelos gases dentro do compartimento foi de 288 °C. Para avaliação do segundo critério fez-se necessário medir o fluxo radiativo na superfície do piso do modelo numérico para todos os cenários de incêndio. Após feitas as simulações, observou-se que em todos os cenários o fluxo de radiação térmica atinge um valor de pico acima de 20 kW/m², porém logo se estabiliza, entrando em estado estacionário com valor abaixo de 20 kW/m², como mostrado no APÊNDICE C. Logo, considerando o critério de radiação térmica, o *flashover* é atingido nos experimentos de incêndio deste trabalho. Já no que diz respeito ao terceiro critério, nas animações do desenvolvimento do incêndio geradas pelo programa *Smokeview* (APÊNDICE D) não foram observadas chamas emergentes da abertura em nenhum cenário de incêndio simulado. Como somente um critério foi atendido, considerou-se que os incêndios do compartimento em estudo se encontram no estágio pré-*flashover*.

Os principais modelos analíticos encontrados na literatura para predição de temperaturas no interior de compartimentos em situação de incêndio no estágio pré-*flashover* são: correlações empíricas, como a correlação MQH e métodos baseados em balanços de massa e energia para um volume de controle dentro do compartimento. Alguns desses métodos foram selecionados e aplicados aos cenários de incêndio dos experimentos de Steckler *et al.*, 1982.

A Figura 6.2 apresenta a comparação entre os resultados de temperatura média da camada de gases quentes do modelo numérico no FDS, das correlações desenvolvidas por McCaffrey *et al.*, 1981, e Azhakesan *et al.*, 2003, e do método de balanço de massa e energia (MBME) de Johansson e van Hees, 2014, com os resultados experimentais para os cenários de incêndio com fogo localizado no centro do compartimento (posição A). A Tabela 6.3 mostra a média das diferenças percentuais entre os resultados dos modelos e experimentais (δ) e o valor da raiz do erro quadrático médio (RMSE, em inglês) das diferenças percentuais.

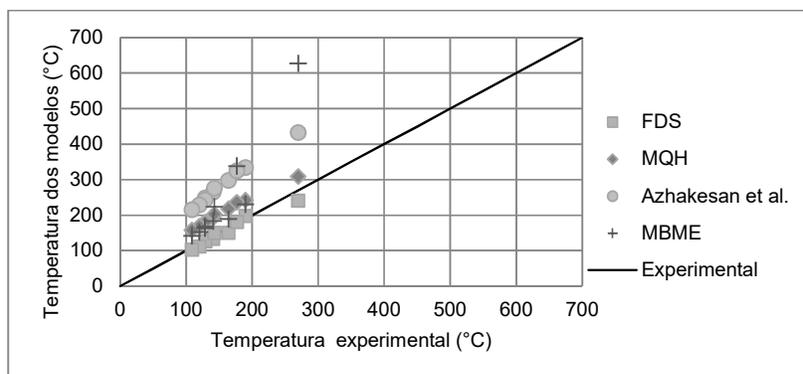


Figura 6.2 – Comparação de resultados experimentais, numéricos e analíticos para os cenários de incêndio com fogo localizado no centro do compartimento (posição A). Camada superior (quente).

Tabela 6.3 – Resultados de erros estatísticos dos modelos numérico e analíticos para os cenários de incêndio com fogo localizado no centro do compartimento.

Modelo	Localização do fogo	δ (%)	RMSE (%)
FDS	A	-3,1	5,9
MQH	A	35,1	36,1
Azhakesan	A	48,1	48,3
MBME	A	29,5	58,1

Observa-se na Figura 6.2 que as correlações empíricas tiveram uma tendência em superestimar as temperaturas médias resultantes do incêndio no compartimento. A média do erro percentual para a correlação MQH foi de aproximadamente 35%. Esse valor é mais que o dobro do erro (17%) encontrado por Overholt, 2014, ao aplicar o método MQH para avaliação de temperaturas em vários experimentos. Uma diferença ainda maior em relação ao experimental foi obtida para o método de Azhakesan, com um erro médio em torno de 48%. O método de balanço de massa e energia forneceu melhores resultados para os cenários com portas, porém para os cenários com aberturas na forma de janela, os erros percentuais chegaram a mais de 50% dos valores experimentais. Os erros para a correlação MQH e modelo MBME superaram os valores presentes no estudo de Johansson, 2016. Nesse estudo, os resultados indicaram que os métodos fornecem valores com diferenças de 5 a 20% dos valores experimentais. De forma geral, o modelo numérico se mostrou mais capaz de prever a temperatura média dos gases quentes, com uma média do erro percentual cerca de dez vezes menor se comparado aos modelos empíricos e analíticos.

Na Figura 6.3 são comparadas as capacidades de predição de temperatura dos modelos numérico, correlações de Azhakesan, e de Mowrer e Williamsson, 1987, e do modelo MBME para os cenários de fogo localizado em um dos cantos do compartimento (posição B) para a camada superior (gases quentes). A Tabela 6.4 permite compreender melhor as divergências dos resultados numéricos e analíticos em relação aos experimentais através de medidas estatísticas.

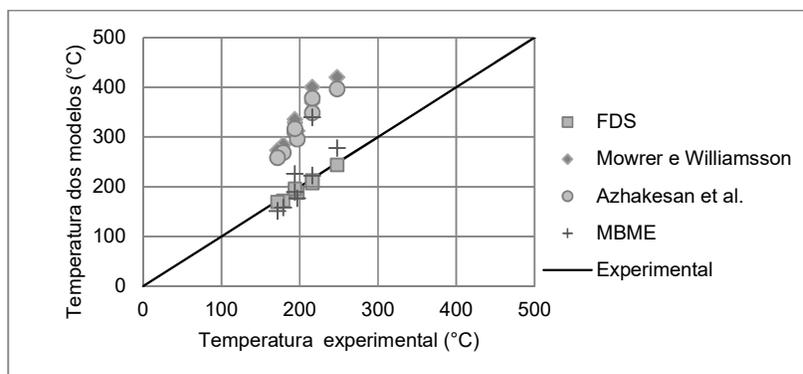


Figura 6.3 – Comparação de resultados experimentais, numéricos e analíticos para os cenários de incêndio com fogo localizado em um canto do compartimento (posição B). Camada superior.

Tabela 6.4 – Resultados de erros estatísticos dos modelos numérico e analíticos para os cenários de incêndio com fogo localizado em um canto do compartimento.

Modelo	Localização do fogo	δ (%)	RMSE (%)
FDS	B	-2,3	2,8
Mowrer	B	68,1	68,6
Azhakesan	B	58,7	59,3
MBME	B	6,5	22,6

Nos cenários avaliados da Figura 6.3 as correlações empíricas mais uma vez forneceram resultados acima dos valores experimentais. A grande divergência dos resultados obtidos é expressa em um alto valor do erro médio percentual: 58,7% para o modelo de Azhakesan e 68,1% para o modelo de Mowrer e Williamsson. O modelo analítico que melhor concorda com as temperaturas médias experimentais é o MBME, que apesar de gerar erros maiores que 16% para os cenários de aberturas na forma de janelas, em média superestimou a temperatura em 6,5%.

A Figura 6.4 e a Tabela 6.5 mostram um comparativo dos resultados da aplicação dos modelos de Mowrer e Williamsson e MBME, e modelo numérico para os cálculos das temperaturas médias da camada de gases quentes para os cenários de incêndio com fogo localizado próximo a uma parede do compartimento (posição C).

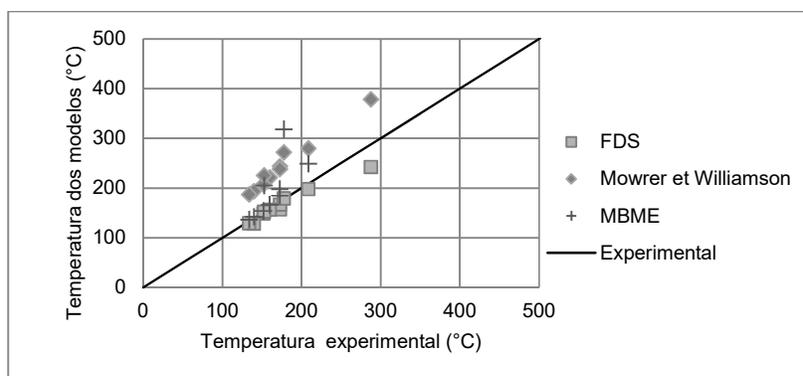


Figura 6.4 – Comparação de resultados experimentais, numéricos e analíticos para os cenários de incêndio com fogo localizado próximo de uma parede do compartimento (posição C). Camada superior.

Tabela 6.5 – Resultados de erros estatísticos dos modelos numérico e analíticos para os cenários de incêndio com fogo localizado em um canto do compartimento.

Modelo	Localização do fogo	$\bar{\delta}$ (%)	RMSE (%)
FDS	C	-5,1	7,0
Mowrer	C	39,6	40,1
MBME	C	27,4	45,5

Pela Figura 6.4 e Tabela 6.5, fica evidente a diferença de precisão encontrada dos modelos numérico, analítico e empírico na predição de temperatura média da camada superior de gases para os casos de incêndio com fogo próximo a uma parede do compartimento. Segundo Johansson, 2016, a transferência de calor tem um grande impacto sobre os resultados, e os métodos para sua determinação (Equações 4.8 e 4.10) incluem simplificações que contribuem para os grandes desvios gerados pelos modelos analíticos para alguns dos casos observados.

7. CONCLUSÕES

Na primeira parte deste trabalho foi realizada a validação de um modelo numérico para predição das temperaturas médias das camadas de gases formadas durante um incêndio em um compartimento de pequenas dimensões. Os experimentos de Steckler *et al.*, 1982, foram utilizados como base para definição de geometria, condições de contorno e comparação de resultados. O *software* FDS (*Fire Dynamics Simulator*) foi empregado para execução dos experimentos numéricos.

O modelo computacional implementado se mostrou válido para simular as condições ambientais resultantes de um incêndio dentro de um compartimento. Analisando-se as temperaturas médias das camadas quente e fria formadas pela convecção de gases, verificou-se que os resultados encontrados foram próximos aos obtidos experimentalmente. Os experimentos numéricos resultaram em perfis de temperatura dentro e sob a abertura do compartimento que concordam com as medições realizadas nos testes em escala real.

Na segunda parte do trabalho, os resultados numéricos e experimentais foram comparados com resultados gerados pela aplicação de modelos analíticos e empíricos para as três diferentes configurações de posição do fogo dentro do compartimento. Verificou-se que o modelo numérico teve maior acuracidade na predição de temperaturas. Na maioria dos casos as estimativas das correlações empíricas e do método de balanço de massa e energia incorreram em desvios médios de grande magnitude em relação aos valores experimentais.

A presente investigação demonstrou que a simulação computacional é uma ferramenta útil para predizer os parâmetros relacionados a incêndios dentro de compartimentos. A maior compreensão do fenômeno do fogo possibilita a prevenção de ocorrência de incêndios e redução de danos a estruturas e à saúde humana.

8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Nesse trabalho foi possível avaliar alguns poucos modelos analíticos e empíricos, porém nos últimos anos vários novos métodos têm sido propostos para o cálculo da temperatura das camadas de gases resultantes de incêndio em compartimentos. Sugere-se que esses métodos sejam avaliados quanto à exatidão e limitações de aplicabilidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Azhakesan, A. M., Shields, T. J., Silcock, G. W. H., Quintiere, J. G. **“An Interrogation Of The MQH Correlation Of Describe Centre And Near Corner Pool Fires”**, Fire Safety Science, vol. 7, pp 371-382, 2003.

Deardorff, J. W., **“Numerical Investigation of Neutral and Unstable Planetary Boundary Layers”**, Journal of Atmospheric Sciences, vol. 29, pp. 91-115, 1972.

Drysdale, D. **“An introduction to Fire Dynamics”**. John Wiley & Sons, 2nd edition, 1998.

Dusso, A., Grimaz, S., Salzano, E. **“Quick Assessment of the Hot Gas Layer Temperature and Potential Fire Spread Between Combustible Items in a Confined Space”**, Chemical Engineering Transactions, vol. 53, pp. 37-42, 2016.

Heskestad, G. **“Fire Plumes, Flame Height and Air Entrainment,”** SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, pp. 201–220, 5th edition, 2008.

Hill, K., Dreisbach, J., Joglar, F., Najafi, B., McGrattan, K., Peacock, R. and Hamins, A. **“Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications,”** United States Nuclear Regulatory Commission, 2007.

Johansson, N. **“The Pre-Flashover Compartment Fire and Fire Safety Engineering – A Review of Handcalculation Methods”**, Proceedings 11th Conference on Performance-based Codes and Fire Safety Design Methods, pp 84-95, 2016.

Johansson N., Van Hees, P., **“A Simplified Relation Between Hot Layer Height and Opening Mass Flow”**, Fire Safety Science, vol. 11, pp 432-443, 2014.

Karlsson, B., Quintiere, J. G., **“Enclosure Fire Dynamics”**, CRC Press LLC, 2000.

Lundberg, S., **“Material Aspects of Fire Design”**, TALAT Lectures 2502, European Aluminium Association, 1994.

McCaffrey, B. J., Quintiere, J. G., Harkleroad, M. F. **“Estimating Room Temperatures and the Likelihood of Flashover Using Fire Test Data Correlations”**, Fire Technology, vol. 17, number 2, pp 98, 1981.

McGrattan K., Hostikka S., McDermott R., Floyd J., Weinschenk C., Overholt K. **“Fire Dynamics Simulator (Version 6) Technical Reference Guide”**. NIST Special Publication 1018-1, 6th edition, 2017.

Mowrer, F.W., Williamsson, R.B., **“Estimating Room Temperatures from Fires along Walls and in Corners”** Fire Technology, vol. 23, number 2, 1987.

Overholt, K.J., **“Verification and Validation of Commonly Used Empirical Correlations for Fire Scenarios”**, NIST Special Publication 1169, National Institute of Standards and Technology, 2014.

Purser, D. A., McAllister, J. L. **“Assessment of Hazards to Occupants from Smoke, Toxic Gases and Heat”**, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, pp 2308-2428, 5th edition, 2016.

Rockett, J. A. "**Fire Induced Gas Flow in an Enclosure**," Combustion Science and Technology, vol. 12, pp 165-175, 1976.

Spearpoint, M. (2008). "**Fire Engineering Design Guide**", New Zealand Centre for Advanced Engineering, 3rd edition. 2008.

Steckler, K. D., Quintiere, J. G., Rinkinen, W. J., "**Flow Induced by Fire in a Compartment**", NBSIR 82-2520 report, National Bureau of Standards, 1982.

Stephen B. Pope, 2000, "**Turbulent Flows**", Cambridge University Press, 1st edition, 2000.

Walton, W. D., Thomas, P. H., Ohmiya, Y., "**Estimating Temperatures in Compartment Fires**", SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, pp 996-1023, 5th edition, 2016.

Wang, L., Lim, J., Quintiere, J. G. "**Validation of FDS Predictions on Fire-Induced Flow: A Follow-Up to Previous Study**", 2011 Fire and Evacuation Modeling Technical Conference, Baltimore, Maryland, USA, Aug. 15-16, 2011.

Wang L., Quintiere, J. G. "**An Analysis of Compartment Fire Doorway Flows**" Fire Safety Journal, vol. 44, issue 5, pp 718-731, 2009.

Waterman, T. E. "**Room Flashover – Criteria and Synthesis**", Fire Technology, vol. 4, pp 25-31, 1968.

APÊNDICE A – Condutividade térmica das superfícies do modelo numérico

A curva apresentada na Figura A.1 com o comportamento da condutividade térmica em função da temperatura para uma fibra cerâmica com densidade de 260 kg/m^3 [Lundberg, 1994], foi inserida no código implementado no FDS.

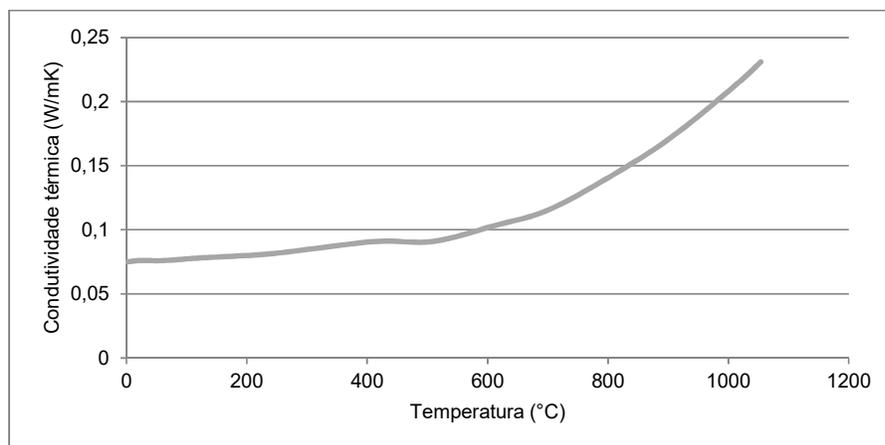


Figura A.1 – Curva da condutividade térmica do material das superfícies do modelo numérico.

APÊNDICE B – Perfis de temperatura sob a abertura do compartimento

A variação da temperatura ao longo da altura da linha de centro da abertura de configuração porta 5/6, nas simulações para as três diferentes posições do queimador de gás é apresentada nas figuras abaixo.

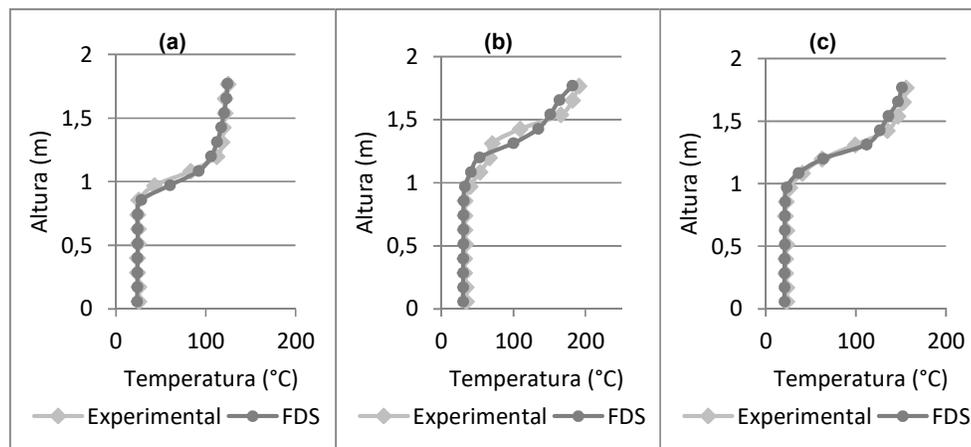


Figura B.1 – Comparação dos perfis de temperatura numérico e experimental sob a abertura de configuração 5/6 e fogo na posição central A (a), na posição B (b) e na posição C (c).

APÊNDICE C – Resultados de fluxo térmico radiativo sobre o piso do compartimento

A Figura C.1 mostra o comportamento típico do fluxo de calor radiativo incidente na superfície do piso do modelo numérico ao longo do tempo para a simulação do cenário com fogo em A e porta 8/6.

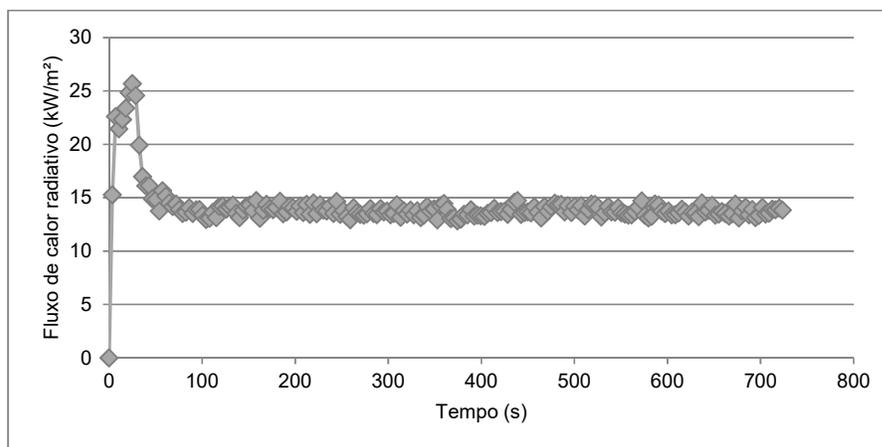


Figura C.1 – Fluxo de radiação térmica incidente no piso do compartimento para o experimento numérico com fogo em A e porta 8/6.

APÊNDICE D – Resultados das simulações no *Smokeview*

A Figura D.1 mostra a evolução do incêndio dentro do compartimento desde aproximadamente 7 s a 350 s de simulação do cenário de fogo central (posição A) com configuração de abertura do tipo porta 4/6.

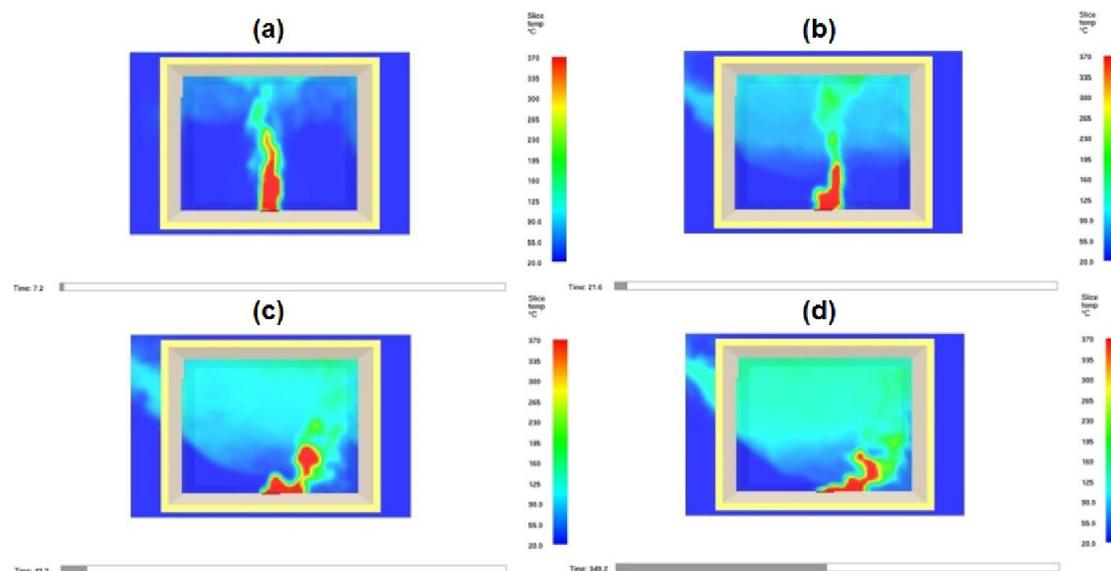


Figura D.1 – Desenvolvimento do incêndio ao longo da simulação de cenário com fogo central (posição A) e porta 4/6. Tempos de simulação: 7,2 s (a), 21,6 s (b), 43,2 s (c) e 349,2 s (d).