

AVALIAÇÃO DOS MODELOS DE DUAS ZONAS PARA COMPARTIMENTOS EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

EVALUATION OF TWO ZONE MODELS FOR COMPARTMENT FIRES

Lucas Ravello Mokwa¹
Calisa Katuscia Lemmert²
Felipe Roman Centeno³

Resumo: A predição das temperaturas encontradas em compartimentos em situação de incêndio é de fundamental importância para o projeto de sistemas de prevenção e controle deste fenômeno. Modelos de zonas permitem a rápida obtenção de estimativas da temperatura dos gases quentes provenientes da combustão, se baseando na hipótese de que há a presença de duas camadas com temperaturas e composições químicas relativamente homogêneas no compartimento. No presente estudo o modelo computacional Fire Dynamics Simulator (FDS) foi utilizado para avaliar a validade destes modelos em compartimentos com razões geométricas variadas, com o objetivo de verificar os resultados nos casos onde a geometria do compartimento se aproxima do limite recomendado. Verificou-se que, mesmo em casos onde a utilização do modelo seria aceitável, é possível encontrar diferenças consideráveis entre a temperatura média da camada de gases quentes e a temperatura efetivamente encontrada no topo do compartimento. Também foi observado que esta diferença de temperatura aumenta juntamente da razão entre comprimento e largura (L/H). A temperatura da camada quente obtida através do modelo computacional também foi comparada à obtida pelo modelo de zonas CFAST e pela correlação de McCaffrey, Quintiere e Harkleroad. Apesar de haver concordância aceitável entre os valores calculados, os modelos de zonas não possuem a capacidade de representar adequadamente a situação de incêndio para os casos estudados.

Palavras-chave: Modelos de zonas, Fire Dynamics Simulator, incêndio em compartimentos.

Abstract: The prediction of temperatures in a compartment fire is extremely important for the design of fire protection and control systems. The Two zone models allow a fast estimative of the hot gas temperatures, based on the hypothesis of the existence of two layers with homogeneous temperatures and chemical compositions. The computational model Fire Dynamics Simulator (FDS) was applied to examine the validity of these models in compartments with different geometrical ratios, with the intent of evaluating the results when the compartment geometry approaches the recommended limits. It was found that, even in cases where the usage of zone models is considered acceptable, it is possible to find considerable differences between the average hot gas layer temperature and the temperature close to the ceiling. It was also observed that this temperature difference increases when the ratio between length and width (L/H) is augmented. The hot gas layer temperature obtained through the computational model was also compared to the two zones model CFAST and the McCaffrey, Quintiere e Harkleroad correlation. Even though, there was a good agreement between the obtained values, the zone models were not able to adequately represent the fire behavior for the studied cases.

Keywords: Two zone models, Fire Dynamics Simulator, Compartment Fire.

¹ Graduando em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, lucasravam@gmail.com.

² Mestranda em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, calisalemmertz@gmail.com.

³ Doutor em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, frcenteno@mecanica.ufrgs.br.

1 INTRODUÇÃO

Compartimentos em situação de incêndio podem ser representados através de modelos de duas zonas. Essa abordagem assume que existem duas camadas bem definidas, uma quente e outra fria, com temperaturas e composições químicas relativamente homogêneas (Quintiere e Wade, 2016, p. 982).

Modelos de duas zonas permitem uma rápida estimativa da temperatura e altura da camada de fumaça, sendo utilizados como um meio de obter estimativas iniciais destes parâmetros. Contudo, segundo Quintiere e Wade (2016, p. 982), qualquer mudança do sistema de incêndio em relação ao conceito básico do modelo de duas zonas pode afetar de forma acentuada a acurácia e a validade deste tipo de modelagem. Por outro lado, a abordagem via mecânica dos fluidos computacional (*Computational Fluid Mechanics*, ou CFD) apresenta elevado custo computacional e complexidade na modelagem, além da necessidade de utilização de uma redução de dados para a obtenção de parâmetros comparáveis aos dados experimentais e os de interesse na avaliação de risco e design de sistemas de combate a incêndio, como a altura de interface entre as camadas e a temperatura da camada quente.

Johansson e Van Hees (2014, p. 192) utilizaram o modelo computacional Fire Dynamics Simulator (FDS) para a obtenção de dados e desenvolvimento de uma correlação que permite estimar a temperatura da camada de gases quentes em compartimentos adjacentes a outros em situação de incêndio. Foi demonstrada a capacidade de substituição de dados experimentais por modelos CFD, possibilitando que 130 casos fossem considerados.

Jain *et al.* (2008, p. 169) realizaram um estudo comparativo entre os resultados obtidos através do modelo de zonas, *Consolidated Fire and Smoke Transport* (CFAST) e um modelo CFD. Uma situação de incêndio em um túnel foi modelada, e concluiu-se que a acurácia da modelagem via CFAST dependia significativamente da localização da fonte de calor, e que ele não era adequado ao caso estudado devido ao fato de variações locais do perfil de temperatura não serem capturadas pelos modelos de zonas.

Johansson (2016, p. 94) também realizou uma revisão dos métodos manuais para a obtenção de estimativas de temperatura. A correlação obtida por McCaffrey, Quintiere e Harkleroad (1981) (Correlação MQH) estava entre os métodos considerados, e se conclui que ela possui a capacidade de estimar a temperatura da camada de gases quentes de forma satisfatória, com erros entre 5% e 20%, quando o fogo ocorre no centro do compartimento (longe das paredes).

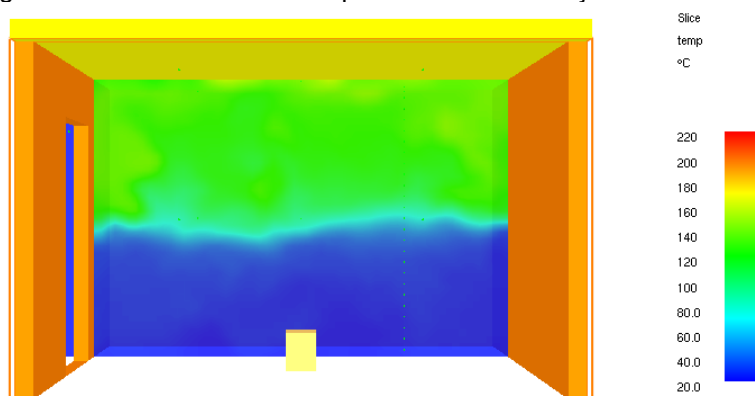
O objetivo deste trabalho é analisar a validade dos modelos de zonas, principalmente em compartimentos com razões geométricas que se aproximam dos valores máximos recomendados para estes modelos. Serão realizadas simulações em CFD com o auxílio do modelo FDS, que serão utilizadas para verificar se existe a formação de duas camadas com temperaturas homogêneas. A temperatura média da camada de gases quentes, obtida através da redução dos dados adquiridos a partir do modelo CFD será comparada com os resultados da correlação MQH e com o modelo de zonas CFAST, buscando identificar as situações em que há boa concordância entre as metodologias, permitindo a utilização dos modelos de zonas.

2. Modelagem Matemática

2.1 Modelo de Duas Zonas

Compartimentos podem ser divididos em duas regiões sem significativa interação, e com uma interface bem definida. Este comportamento pode ser observado na Figura 1.

Figura 1 - Duas zonas em compartimento em situação de incêndio



Os modelos de duas zonas são de grande interesse para os profissionais responsáveis, por permitir uma rápida estimativa da temperatura e altura da camada de gases quentes que serão encontradas no compartimento. De acordo com Johansson (2016, p. 90), são de interesse para o projeto de sistemas de segurança em caso de incêndio: a altura da camada de gases quentes, temperatura, visibilidade e toxicidade dos gases liberados.

A estimativa da temperatura da camada quente é baseada na aplicação de equações de conservação de massa e energia. Segundo a metodologia desenvolvida por McCaffrey *et al.* (1981), o balanço energético é apresentado na Eq. (1).

$$Q = m_g c_p (T_g - T_\infty) + q_{Loss} \quad (1)$$

onde Q é a taxa de liberação de calor (kW), m_g é a vazão mássica dos gases deixando o compartimento (kg/s), c_p é calor específico do ar (kJ/(kgK)), T_g é a temperatura da camada de gases quentes (K), T_∞ é a temperatura ambiente (K) e q_{Loss} é a taxa de energia conduzida através das superfícies do compartimento (kW).

A taxa de energia conduzida através das superfícies do compartimento para o ambiente externo pode ser aproximada pela Eq. (2).

$$q_{Loss} = h_k A_t (T_g - T_\infty) \quad (2)$$

onde h_k é o coeficiente de transferência de calor efetivo (kW/(m²K)), A_t é a área total das superfícies do compartimento (m²).

Substituindo a Eq. (2) na Eq. (1), chegamos a Eq. (3), que fornece a elevação de temperatura adimensional no compartimento.

$$\frac{\Delta T_g}{T_\infty} = \frac{Q / c_p T_\infty m_g}{1 + h_k A_t / (c_p m_g)} \quad (3)$$

onde ΔT_g é a diferença de temperatura entre a camada de gases quentes e a temperatura ambiente (K).

A norma ISO/WD 13390, conforme citado por Johansson (2016, p. 90), apresenta os limites geométricos que devem ser respeitados para a utilização dos modelos de zonas. Esses limites são baseados nas razões geométricas

entre comprimento (*Length*, ou L), largura (*Width*, ou W) e altura (*Height*, ou H). Eles são apresentados na Tab. 1.

Tabela 1 - Limites geométricos para a utilização do modelo de zonas

| Grupo | Aceitável | Considerações especiais são requeridas |
|-------|----------------|--|
| L/W | $L/W \leq 3$ | $3 < L/W < 5$ |
| L/H | $L/H \leq 3$ | $3 < L/H < 6$ |
| W/H | $W/H \geq 0,4$ | $0,2 < W/H < 0,4$ |

Fonte: ISO/WD 13390

2.2 Correlação MQH

McCaffrey *et al.* (1981) desenvolveram uma correlação para a determinação da temperatura da camada quente em compartimentos com ventilação natural. A correlação MQH é baseada na Eq. (3), assim como em dados de 112 experimentos, e é apresentada na Eq. (4). A principal limitação desta correlação é a não validade para temperaturas acima de 600°C.

$$\Delta T = 480 \left(\frac{Q}{\sqrt{g} m_g c_p \rho_o T_o A_o \sqrt{H_o}} \right)^{2/3} \left(\frac{h_k A_w}{\sqrt{g} c_p \rho_o A_o \sqrt{H_o}} \right)^{-1/3} \quad (4)$$

onde ΔT é a diferença entre a temperatura da camada de gases quentes e a temperatura inicial do compartimento (K), Q é a taxa de liberação de calor (kW), g é a aceleração gravitacional (m/s^2), m_g é a massa de gás quente deixando o compartimento (kg/s), c_p é o calor específico do ar (kJ/(kgK)), ρ_o é a massa específica do ar ambiente (kg/m^3), T_o é a temperatura ambiente (K), A_o é a área da abertura ao ambiente externo (m^2), H_o é a altura da abertura ao ambiente externo (m), h_k é o coeficiente de transferência de calor efetivo (kW/(m^2K)) e A_w é a área superficial do compartimento (m^2).

O coeficiente de transferência de calor efetivo pode ser aproximado pela Eq. (5), considerando somente a fase transiente (McCaffrey *et al.*, 1981).

$$h_k = \sqrt{\frac{c p k}{t}} \quad (5)$$

onde c é o calor específico do material que compõem as paredes (kJ/(kgK)), ρ é a massa específica do material das paredes (kg/m^3), k é a condutividade térmica do material das paredes (kW/(mK)) e t é o tempo decorrido (s).

2.3 Modelo de zonas - Consolidated Fire and Smoke Transport (CFAST)

O CFAST é um modelo de duas zonas utilizado para calcular a evolução da distribuição de fumaça, gases e temperatura em compartimentos em situação de incêndio. Desenvolvido pelo National Institute of Standards and Technology (NIST, agência governamental dos Estados Unidos), e com sua primeira versão publicada em 1990, ele utiliza equações derivadas da conservação de massa, conservação de energia e relações de gás ideal para densidade e energia interna, juntamente com correlações de dados experimentais de modo a prever as condições térmicas em compartimentos em situação de incêndio (Peacock *et al.*, 2017, p. 1). O seu manual de usuário também recomenda que os limites geométricos apresentados na Tabela 1 sejam respeitados. Maiores detalhes em relação ao funcionamento deste modelo estão disponíveis em seu manual de referência técnica (Peacock *et al.*, 2017).

3. Modelo Numérico - Fire Dynamic Simulator (FDS)

O FDS é um modelo computacional baseado no método dos volumes finitos. Ele é otimizado para a simulação de escoamentos provenientes de efeitos térmicos (*thermally-driven flow*), com equacionamento adequado a vazões com baixo número de Mach. O fenômeno de radiação é descrito por um modelo de gases cinzas, com discretização em 100 ângulos. O modelo de turbulência Large-Eddy Simulation (LES), com modelo submalha de Deardorff foi utilizado. A combustão é representada por um modelo baseado na fração de mistura com reação química em uma única etapa global. O algoritmo de solução utiliza um esquema explícito predictor-corretor, em que se verifica em cada passo de tempo se o critério de estabilidade de Courant, Friedrichs e Lewy é satisfeito. Mais detalhes sobre o modelo podem ser encontrados em McGrattan *et al.* (2018).

4. Metodologia

4.1 Modelagem do Compartimento base

Para representar um compartimento em situação de incêndio, uma sala de testes padrão ASTM E2257-17 foi modelada utilizando FDS, CFAST e a correlação MQH.

O compartimento padrão possui uma abertura ao ambiente externo, e apresenta uma chama com localização central. As características do compartimento são mostradas na Tabela 2.

| | |
|----------------------------------|------------------|
| Comprimento (<i>Lenght</i> , L) | 3,63 metros |
| Largura (<i>Width</i> , W) | 2,42 metros |
| Altura (Height, H) | 2,42 metros |
| Largura da abertura | 0,78 metros |
| Altura da abertura | 2,015 metros |
| Material revestimento | Gesso Acartonado |
| Espessura das paredes e teto | 13 cm |

Fonte: ASTM E2257-17

As propriedades do material de revestimento do compartimento foram retiradas da norma ASTM E603-17, e são apresentadas na Tabela 3.

| | |
|--------------------------------|------|
| Condutividade Térmica [W/(mK)] | 0,16 |
| Calor Específico [J/(kgK)] | 900 |
| Densidade [kg/m ³] | 725 |
| Emissividade | 0,9 |

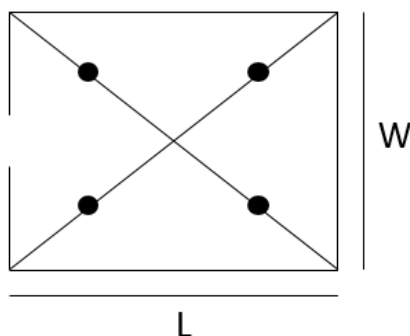
Fonte: ASTM E603-17

O modelo de combustão utilizado no FDS foi o modelo simplificado, com uma taxa de liberação de calor fixa para as situações em que há disponibilidade de oxigênio. O combustível considerado foi o gás propano.

A redução de dados para a obtenção da temperatura da camada quente foi realizada em quatro pontos, sendo eles localizados na metade de cada semi-diagonal, como mostrado na Figura 2. Nestes locais também foram adicionados pontos de medição a cada 10% da altura do compartimento, de

modo a ser possível observar o perfil vertical de temperatura. O valor médio dos quatro locais será o considerado na análise. O modelo de redução de dados utilizado foi o de Janssens e Tran (1992), sendo este o método padrão utilizado no FDS.

Figura 2 - Localização dos pontos de medição



4.2 Casos estudados

Com base no compartimento padrão previamente descrito, 8 casos de interesse foram definidos, e são apresentados na Tabela 4. O comprimento (L) e altura (H) do compartimento foram variados com o objetivo de permitir a análise do comportamento através dos modelos de zonas, em situações em que a razão de aspecto fica próxima ao limite aceitável. Também é observado que os pares de casos 1 e 2, 3 e 4, 5 e 6 compartilham da mesma geometria, sendo a única diferença entre eles a taxa de liberação de calor (*Heat Release Rate*, ou HRR). A taxa de liberação de calor e a razão entre a HRR e o volume do compartimento também são apresentados.

Tabela 4 - Geometria e características caloríficas da chama dos casos de interesse

| | Comprimento [m] | Largura [m] | Altura [m] | HRR [kW] | HRR/Volume [kW/m ³] |
|---------------|-----------------|-------------|------------|----------|---------------------------------|
| Caso 1 | 4,84 | 2,42 | 2,42 | 400 | 14,11 |
| Caso 2 | 4,84 | 2,42 | 2,42 | 200 | 7,06 |
| Caso 3 | 7,26 | 2,42 | 2,42 | 600 | 14,11 |
| Caso 4 | 7,26 | 2,42 | 2,42 | 300 | 7,06 |
| Caso 5 | 12,1 | 2,42 | 2,42 | 1000 | 14,11 |
| Caso 6 | 12,1 | 2,42 | 2,42 | 500 | 7,06 |
| Caso 7 | 3,63 | 2,42 | 6,05 | 375 | 7,06 |
| Caso 8 | 3,63 | 2,42 | 9,68 | 600 | 7,06 |

As razões geométricas dos compartimentos são apresentadas na Tabela 5, sendo destacados em amarelo os valores que estão no limite da faixa recomendada para a aplicação do modelo de zonas e em laranja os valores fora deste limite, os demais valores estão dentro da faixa recomendada.

Tabela 5 - Razões geométricas dos casos analisados

| | L/W | L/H | W/H |
|--------|-----|-------|------|
| Caso 1 | 2 | 2 | 1 |
| Caso 2 | 2 | 2 | 1 |
| Caso 3 | 3 | 3 | 1 |
| Caso 4 | 3 | 3 | 1 |
| Caso 5 | 5 | 5 | 1 |
| Caso 6 | 5 | 5 | 1 |
| Caso 7 | 1,5 | 0,6 | 0,4 |
| Caso 8 | 1,5 | 0,375 | 0,25 |

4.3 Estudo de Malha

McGrattan *et al.*, (2018, p. 41) recomendam a utilização da razão entre o diâmetro característico da chama (D^*) e o tamanho da célula computacional (dx) como parâmetro da resolução do escoamento. É recomendado que este parâmetro tenha valor entre 4 e 16. A forma de cálculo de D^* é apresentada na Eq. (6).

$$D^* = \left(\frac{Q}{\sqrt{g} c_p \rho_a T_a} \right)^{2/5} \quad (6)$$

onde Q é a taxa de liberação de calor (W), g é a aceleração gravitacional (m/s^2), c_p é o calor específico do ar ambiente ($J/(kgK)$), ρ_a é a massa específica do ar ambiente (kg/m^3) e T_a é a temperatura ambiente (K).

Os valores calculados de D^* , o tamanho de célula utilizado nos modelos e sua razão são apresentados na Tabela 6. Para todos os casos a razão D^*/dx ficou dentro do limite recomendado.

Tabela 6 - Diâmetro característico, tamanho da célula computacional e sua razão

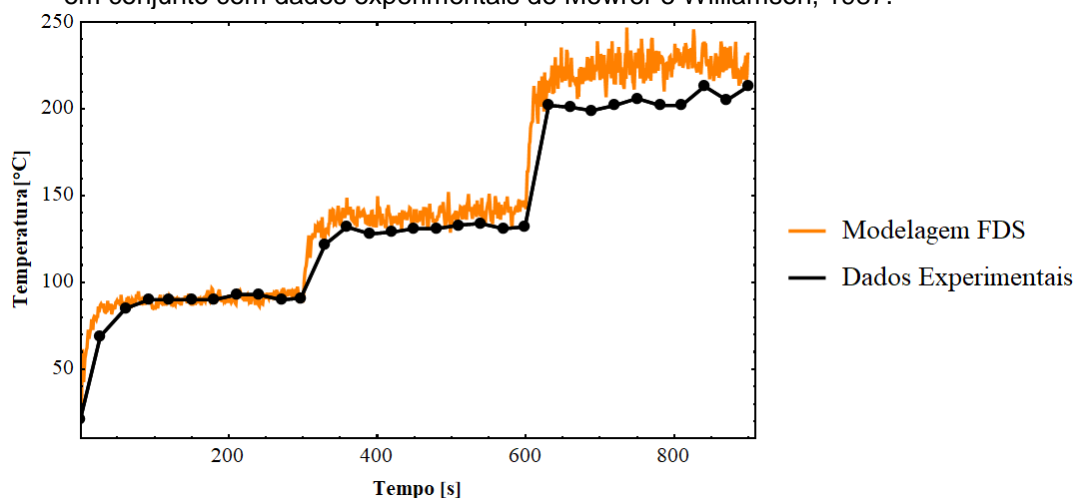
| | D* [m] | dx [m] | D*/dx |
|------------------|--------|--------|-------|
| Caso 1 | 0,67 | 0,064 | 10,5 |
| Caso 2 | 0,51 | 0,048 | 10,5 |
| Caso 3 | 0,78 | 0,050 | 15,7 |
| Caso 4 | 0,59 | 0,038 | 15,7 |
| Caso 5 | 0,96 | 0,061 | 15,7 |
| Caso 6 | 0,73 | 0,046 | 15,7 |
| Caso 7 | 0,65 | 0,062 | 10,5 |
| Caso 8 | 0,78 | 0,075 | 10,5 |
| Validação | 0,27 | 0,060 | 4,4 |

4.4 Validação do Modelo Computacional

Para validar o modelo CFD, um dos experimentos de Mowrer e Williamson (1987, p. 141) foi reproduzido. O experimento considerado foi realizado em uma sala padrão ASTM E2257-17, com localização central de chama. A taxa de liberação de calor foi de 40 kW de 0 a 300s, 80 kW entre 301 e 600s e 160 kW de 601 até 900s. Os dados experimentais são referentes à média de temperatura observada através de cinco termopares localizados a 10 cm do teto do compartimento, que foram replicados no modelo gerado via FDS.

A evolução da temperatura média obtida através do modelo FDS é mostrada na Figura 3, em conjunto com os dados experimentais.

Figura 3 - Evolução da temperatura de termopares localizados na camada quente, em conjunto com dados experimentais de Mowrer e Williamson, 1987.



A diferença relativa entre os dados experimentais e o modelo computacional foi de 0,13% para $Q = 40\text{kW}$; 6,13% para $Q = 80\text{ kW}$ e de 10,04% para $Q = 160\text{ kW}$. É possível observar que o modelo numérico apresentou boa concordância com os dados experimentais de Mowrer e Williamson (1987), indicando que a modelagem computacional adotada representa adequadamente o tipo de problema estudado.

5. Resultados e Discussão

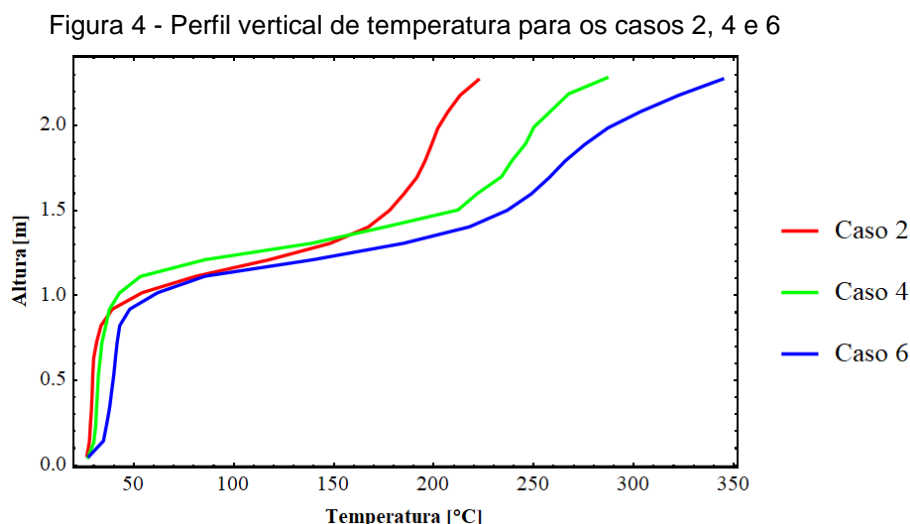
A temperatura média da camada de gases quentes para os oito casos de interesse foi calculada utilizando os três métodos propostos. O valor médio da temperatura da camada quente entre 100 e 150 s, e as diferenças em relação ao modelo CFD são apresentados na Tabela 7. Todos os casos já se encontravam em regime permanente neste período.

Tabela 7: Temperatura da camada quente segundo os diferentes métodos e diferença em relação ao modelo CFD

| | FDS [°C] | CFAST [°C] | MQH [°C] | Diferença CFAST [%] | Diferença MQH [%] |
|---------------|----------|------------|----------|---------------------|-------------------|
| Caso 1 | 268,6 | 266,9 | 290,2 | 0,6 | -8,0 |
| Caso 2 | 173,6 | 175,5 | 190,2 | -1,1 | -9,6 |
| Caso 3 | 311,4 | 299,1 | 337,4 | 3,9 | -8,3 |
| Caso 4 | 214,8 | 195,4 | 219,9 | 9,0 | -2,4 |
| Caso 5 | 351,7 | 328,1 | 404,7 | 6,7 | -15,1 |
| Caso 6 | 244,9 | 212,1 | 262,4 | 13,4 | -7,1 |
| Caso 7 | 246,1 | 221,8 | 233,7 | 9,9 | 5,0 |
| Caso 8 | 278,0 | 251,9 | 272,8 | 9,4 | 1,9 |

Houve concordância aceitável entre os valores de temperatura da camada quente estimados com o CFAST e com a correlação MQH, quando comparados com o modelo CFD, com diferenças relativas dentro da faixa esperada pela literatura (até 20%). A correlação MQH superestimou a temperatura da camada quente, exceto nos casos em que a altura do compartimento foi modificada. Já o modelo CFAST subestimou os resultados nos casos onde a razão de aspecto estava fora da faixa recomendada.

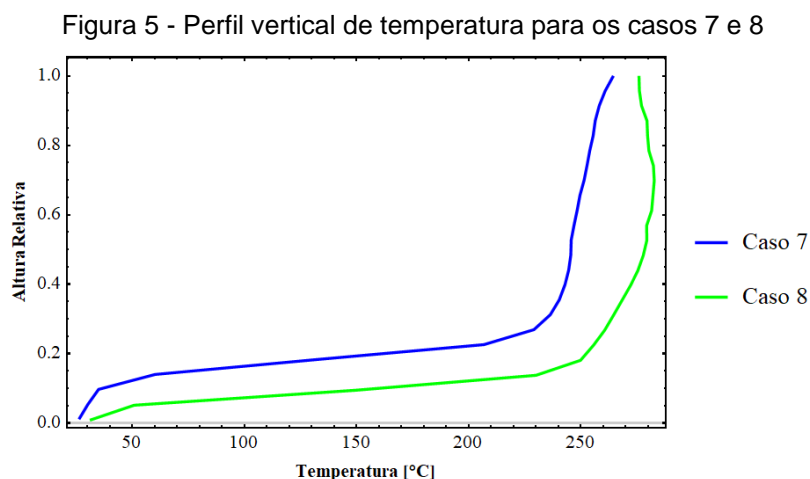
O perfil vertical de temperatura médio entre 100 e 150s foi analisado. Na Figura 4 este perfil é apresentado para os casos 2, 4 e 6, os quais possuem a mesma taxa de liberação de calor por volume.



É possível verificar a formação de duas zonas de temperatura relativamente bem definidas, contudo variações consideráveis de temperatura na região quente do compartimento são observadas. Para o caso 6, por exemplo, uma diferença de mais de 100°C foi encontrada entre a temperatura média da camada de gases quentes e a efetivamente encontrada próxima ao topo do compartimento. Também se observa que a inclinação do perfil de temperatura na região quente aumenta junto da razão de aspecto, o que indica que à medida que a razão de aspecto é aumentada, a temperatura da camada quente torna-se menos uniforme e a utilização do modelo de zonas tornasse menos confiável.

Apesar de estarem dentro da faixa de limites geométricos recomendados para o modelo de zonas, os casos de 1 a 4 apresentaram temperaturas no topo do compartimento consideravelmente mais altas que aquelas obtidas pela redução de dados obtidos pelo FDS e pelos modelos de zonas, indicando que o respeito a faixa geométrica recomendada não é uma condição suficiente à validade da hipótese de camadas com temperatura homogênea.

O perfil de temperatura para os casos 7 e 8 é apresentado na Figura 5. Estes casos apresentaram uma temperatura de camada relativamente uniforme, não sendo verificada a influência da razão entre altura e a largura. Também é destacado que estes casos apresentaram boa concordância entre os modelos simplificados e o modelo CFD.



A razão entre a temperatura média de camada quente (T_h) e a temperatura média observada por termopares localizados a 10 centímetros do topo do compartimento (T_t) no intervalo entre 100 e 150s, bem como as razões de aspecto são apresentadas na Tabela 8.

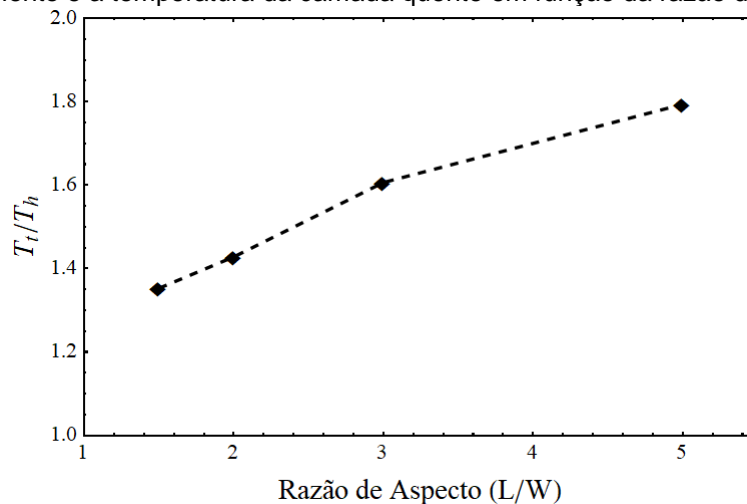
Tabela 8 - Razão entre a temperatura próxima ao topo do compartimento e a temperatura da camada quente

| | T_t/T_h | L/W | W/H |
|---------------|-----------|-----|------|
| Caso 1 | 1,46 | 2 | 1 |
| Caso 2 | 1,36 | 2 | 1 |
| Caso 3 | 1,71 | 3 | 1 |
| Caso 4 | 1,53 | 3 | 1 |
| Caso 5 | 1,87 | 5 | 1 |
| Caso 6 | 1,70 | 5 | 1 |
| Caso 7 | 1,09 | 1,5 | 0,4 |
| Caso 8 | 1,00 | 1,5 | 0,25 |

Estes resultados reforçam a constatação de que há variações significativas de temperatura dentro da camada quente para os casos de 1 a 6. Para os casos 7 e 8 esta razão fica próxima a 1, conforme o esperado segundo o modelo de zonas. É observado que, de forma geral, um aumento da razão de

aspecto L/W leva a um aumento da razão T_t/T_h . A razão de temperaturas em função da razão de aspecto do compartimento é apresentada na Figura 6, considerando-se o valor médio para os casos com mesma razão de aspecto. Uma tendência de aumento da razão das temperaturas com o aumento da razão de aspecto foi observada. Os dados referentes ao compartimento padrão também foram incluídos.

Figura 6 - Razão entre a temperatura observada por termopares localizados próximo ao topo do compartimento e a temperatura da camada quente em função da razão de aspecto L/W



Apesar da temperatura de camada estimada pelos modelos de zona estarem dentro da faixa de erro esperada, estes modelos não são capazes de prever com precisão o comportamento do compartimento na ocorrência de um incêndio. Estes modelos não possuem a capacidade de contabilizar as variações do perfil de temperatura encontradas dentro do compartimento. No caso 5, por exemplo, temperaturas máximas superiores a 600 °C foram observadas, sendo este um possível indicador do risco de ocorrência de *flashover*. Esse comportamento não pode ser previsto pelos modelos de zonas ou pelo modelo computacional se somente a temperatura média de camada de gases quentes for considerada. Caso essa particularidade não seja observada, a utilização de qualquer destes modelos pode levar a graves erros de projeto e comprometimento da segurança do compartimento e seus possíveis ocupantes.

5. Conclusões

O modelo numérico FDS foi utilizado para simular o desenvolvimento de incêndios em compartimentos com diferentes razões de aspecto e taxas de liberação de calor, com o objetivo de observar a validade dos modelos de zonas, que supõem a formação de duas camadas com temperaturas e composições químicas homogêneas. A temperatura de camada obtida através do modelo numérico foi comparada à obtida através do modelo de zonas CFAST e a correlação MQH.

A temperatura da camada quente obtida pelos modelos de zonas apresentou boa concordância com o modelo CFD, com diferenças dentro da faixa esperada. Contudo se verificou que, mesmo nos casos em que os limites geométricos recomendados para a utilização do modelo de zonas foram respeitados, o perfil de temperatura pode apresentar características não homogêneas. Também foi observado que o aumento da razão de aspecto (razão entre o comprimento e a largura do compartimento) levou a maiores diferenças entre a temperatura média de camada quente e a temperatura observada próximo ao topo do compartimento. Estes fatores indicam que o respeito aos limites geométricos recomendados não é condição suficiente à validade dos modelos de zonas. Deste modo, basear-se somente neste parâmetro geométrico ao utilizar estes modelos pode levar a erros graves durante o projeto de sistemas de segurança contra incêndio.

A utilização dos modelos de zonas é recomendada somente se a utilização de modelos computacionais não for possível, ou para a obtenção de estimativas rápidas de parâmetros como a altura de interface e temperaturas médias das camadas dentro do compartimento.

Referências

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM **E603-17**: Standard Guide for Room Fire Experiments, West Conshohocken: ASTM International, 2017. 20 p. <http://dx.doi.org/10.1520/E0603-17>.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM **E2257-17**: Standard Test Method for Room Fire Test of Wall and Ceiling Materials and Assemblies, West Conshohocken: ASTM International, 2017. 19 p. <http://dx.doi.org/10.1520/E2257-17>.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO **13390**: Fire Safety Engineering - Subsystem 1: Initiation and Development of Fire and Fire Effluents, Geneva: International Organization for Standardization, 1995.

JANSSENS, Marc; TRAN, Hao C. Data Reduction of Room Tests for Zone Model Validation. **Journal of Fire Sciences**, v. 10, n. 6, p.528-555, 1992. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/073490419201000604>.

JOHANSSON, Nils; VAN HEES, Patrick. A correlation for predicting smoke layer temperature in a room adjacent to a room involved in a pre-flashover fire. **Fire and Materials**, v. 38, n. 2, p.182-193, 2012. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/fam.2172>.

JOHANSSON, Nils. The pre-flashover compartment fire and fire safety engineering—a review of hand-calculation methods. *In: Proceedings of 11th Conference on Performance-based Codes and Fire Safety Design Methods*, p. 84-95, 2016. Society of Fire Protection Engineers. <http://lup.lub.lu.se/record/74d660c1-96e0-4bb5-b633-4af1a9614131>.

JAIN, Shorab et al. Numerical simulation of fire in a tunnel: Comparative study of CFAST and CFX predictions. **Tunnelling And Underground Space Technology**, v. 23, n. 2, p.160-170, 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2007.04.004>.

MCCAFFREY, B. J.; QUINTIERE, J. G.; HARKLEROAD, M. F. Estimating room temperatures and the likelihood of flashover using fire test data correlations. **Fire Technology**, v. 17, n. 2, p.98-119, 1981. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/bf02479583>.

MCGRATTAN, Kevin et al. **Fire Dynamics Simulator User's Guide**. 6. ed: National Institute of Standards and Technology, 2018. 337 p.

MOWRER, Frederick W.; WILLIAMSON, Robert Brady. Estimating room temperatures from fires along walls and in corners. **Fire Technology**, v. 23, n. 2, p.133-145, 1987. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/bf01040428>.

PEACOCK, Richard *et al.* **CFAST – Consolidated Fire and Smoke Transport (Version 7) Volume 1: Technical Reference Guide**, 40 p, 2015. National Institute of Standards and Technology. <http://doi.org/10.6028/NIST.TN.1889v1>

QUINTIERE, James G.; WADE, Colleen A. Compartment Fire Modeling. In: MORGAN, J. Hurley. **SFPE Handbook of Fire Protection Engineering**, New York: Springer, 2016. p.981-995 http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4939-2565-0_29.

Edição especial - 8º MCSul - Conferência Sul em Modelagem Computacional e VIII SEMENGO - Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica.

Enviado em: 05 fev. 2019

Aceito em: 05 fev. 2019

Editores responsáveis: João Paulo Silva Lima / Liércio André Isoldi / Mateus das Neves Gomes