

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

ESTUDO NUMÉRICO DE MÉTODOS DE ANÁLISE DA ESPESSURA DA CAMADA DE
FUMAÇA EM UM TÚNEL

por

Eduardo Benatti Padula

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, junho de 2018



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

ESTUDO NUMÉRICO DE MÉTODOS DE ANÁLISE DA ESPESSURA DA CAMADA DE
FUMAÇA EM UM TÚNEL

por

Eduardo Benatti Padula

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 Roman Centeno

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Francis Henrique Ramos França

Prof. Dr. Alexandre Vagtinski de Paula

M. Eng. Roberta Collet

Porto Alegre, 26 de junho de 2018.

AGRADECIMENTOS

Agradeço acima de tudo a minha família, meu pai Antônio e minha mãe Rosange, pelo apoio durante os anos de graduação.

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

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.

Pesquisa desenvolvida com o apoio do Centro Nacional de Supercomputação (CESUP), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

BENATTI PADULA, E. **ESTUDO NUMÉRICO DE MÉTODOS DE ANÁLISE DA ESPESSURA DA CAMADA DE FUMAÇA EM UM TÚNEL**. 2018. 26 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

RESUMO

Sabe-se que uma das principais causas de morte em incêndios é a fumaça. Deste modo, a previsão da espessura da camada de fumaça em incêndios em ambientes fechados é de suma importância no projeto de edificações como túneis. No presente trabalho a espessura da camada de fumaça é estudada através de métodos numéricos utilizando-se o *software FDS* para casos de incêndio em um túnel com escala de 1/6 baseado no artigo de Gao et al., 2016. A espessura da camada de fumaça é analisada segundo os métodos regra do N-percentual, relação integral, da frequência de flutuação e o método padrão do *software FDS*. Procurou-se verificar a capacidade do *software* em simular incêndios em túneis; definir, entre os métodos estudados, o mais concordante; e quantificar a influência do refino de malha nos métodos estudados e realizar uma comparação entre o método padrão do *software FDS* e os outros métodos estudados, de modo a recomendar ou não seu uso. Verificou-se a capacidade do *software FDS* em simular fielmente os casos estudados, verificou-se que o método mais concordante foi o da relação integral, porém, recomendou-se a utilização do método da frequência de flutuação devido as suas características em favor da segurança, sendo este método preferível também em relação ao método padrão do *software FDS*. Verificou-se que o refino da malha influencia de maneira semelhante os métodos estudados.

PALAVRAS-CHAVE: regra do N-percentual, Relação integral, Frequência de flutuação, espessura da camada de fumaça

BENATTI PADULA, E. **NUMERICAL STUDY OF SMOKE LAYER THICKNESS ANALYSIS METHODS**. 2018. 26 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

ABSTRACT

One of the main causes of death in fires is the smoke. Thus, the prediction of the smoke layer thickness of fires in closed environments is of the utmost importance in the project of buildings as tunnels. In this work the smoke layer thickness is studied through numerical methods using the software FDS for fire cases in tunnels with a scale of 1/6 based on the paper by Gao et al., 2016. The smoke layer thickness is analyzed using the N-percentage rule, integral ratio method, buoyancy frequency method and the default method used in FDS. In this work the objectives were: verify the capacity of FDS to simulate fire in tunnels; define, between the studied methods, the most concordant; quantify the influence of grid refinement in the studied methods and compare the default method used in FDS with the other methods analyzed, in order to recommend or not its use. The capacity of FDS to simulate the studied cases was verified, it was also verified that the method with more concordance with experimental results was the integral ratio method, however, it was recommended the use of the buoyancy frequency method due to its technical features in favor of security, being this method preferable also in relation to the default method used in FDS. It was found that grid refinement influenced the studied methods in a similar way.

KEYWORDS: N-percentage, Integral ratio, buoyancy frequency, smoke layer thickness

ÍNDICE

| | Pág. |
|--|------|
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 2. OBJETIVOS | 2 |
| 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 2 |
| 3.1 O software Fire Dynamics Simulator (FDS) | 2 |
| 3.2 Método da regra do N-percentual | 3 |
| 3.3 Método da Relação integral | 3 |
| 3.4 Método da Frequência de flutuação | 4 |
| 3.5 Método padrão FDS 6.6.0 | 4 |
| 4. METODOLOGIA | 4 |
| 4.1 Simulação no software FDS 6.6.0 | 4 |
| 4.2 Processamento dos dados | 6 |
| 4.3 Comparação entre a simulação numérica e os experimentos de Gao et al.,2016 | 7 |
| 4.4 Estudo da qualidade de malha | 8 |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 9 |
| 5.1 Estudo da qualidade de malha | 9 |
| 5.2 Método padrão FDS | 10 |
| 5.3 Método da regra do N-percentual..... | 11 |
| 5.4 Método da Relação integral | 12 |
| 5.5 Método da Frequência de flutuação | 13 |
| 6. CONCLUSÕES | 14 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 15 |
| Anexo I | 16 |
| Apêndice A | 17 |
| Apêndice B | 18 |
| Apêndice C | 19 |
| Apêndice D | 20 |

1. INTRODUÇÃO

Em um incêndio, dois aspectos principais são causas determinantes da morte humana: a alta temperatura e a intoxicação por fumaça. Hall e Harwood, 1995, revelam que nos Estados Unidos, no ano de 1990, 76% das mortes em incêndios de prédios foram causadas por inalação de fumaça. No dia 27 de janeiro de 2013, 242 pessoas morreram e mais de 600 ficaram feridas durante o incêndio na boate Kiss, em Santa Maria, Rio Grande do Sul. Segundo o portal Uol notícias, todas as 242 mortes ocorreram por sufocamento devido à fumaça tóxica. Durante a queima do poliuretano, gases tóxicos como o cianureto, o monóxido de carbono e o dióxido de carbono são liberados, intoxicando as vítimas e dificultado sua fuga.

Durante o incêndio em um ambiente fechado, forma-se uma separação entre duas camadas distintas de gases, uma rica em oxigênio, mais fria, e uma rica em gases tóxicos, mais quente, que sobe; É de suma importância para a sobrevivência das pessoas que a camada de gases tóxicos fique acima da altura de sua cabeça, de forma que não se respire estes gases, possibilitando à pessoa fugir do local do incêndio, dado que uma vez aspirada a fumaça tóxica do gás, perde-se, parcialmente ou totalmente, a consciência. Incêndios em túneis são especialmente susceptíveis à acumulação de fumaça, uma vez que sua dispersão no ambiente é dificultada. Segundo Brooke em seu artigo para o New York Times, em 18 de fevereiro de 2003, um incêndio criminoso atingiu o sistema de metrô de Daegu na Coréia do Sul, resultando em 192 mortos e 151 feridos, durante o incêndio em um trem com 12 vagões, a fumaça gerada preencheu a estação Jungangno, impedindo a fuga e aumentando o número de casualidades. Entre os anos de 2008 e 2015, a China aumentou sua linha de transporte urbano sobre trilhos a uma média de 373,5 km ao ano segundo Lu et al., 2016. Com o aumento das linhas de metrô mundialmente, especialmente em países em desenvolvimento, a questão da segurança é fundamental para que se evitem desastres como o de Daegu, para tanto, a determinação da espessura da camada de fumaça com precisão é necessária.

Cooper et al., 1982, analisaram, utilizando o método da regra do N-percentual (*N-percentage rule*), a dinâmica da espessura da camada de fumaça em diversos cenários. Foram utilizados experimentos em escala real para uma configuração física composta de múltiplas salas e um corredor. Foi verificado que o comportamento estratificado da camada de fumaça era substancial em todas as salas e em todos os cenários observados. He et al., 1998, propuseram novos métodos de avaliação da espessura da camada de fumaça, utilizando os métodos da relação integral (*integral ratio*) e *least-squares*, os quais não dependiam de valores subjetivos, ao contrário do método da regra do N-percentual. Através de experimentos em escala real em um cenário com múltiplas salas, os novos métodos foram comparados com o método da regra do N-percentual. Verificou-se que os métodos relação integral e *least-squares* subestimavam a espessura da camada de fumaça, sendo estes métodos, portanto, indevidamente otimistas para a estimativa do risco às pessoas.

Jiang et al., 2018, utilizaram o método da relação integral na análise experimental da espessura da camada de fumaça para um túnel de escala reduzida com diferentes taxas de exaustão. Foi verificado que conforme se aumenta a taxa de exaustão, em um primeiro momento ocorre um rápido aumento da espessura da camada de fumaça, com posterior estabilização da mesma. Considerando as limitações dos métodos da regra do N-percentual e da relação integral, Gao et al., 2016, apresentam o método da frequência de flutuação (*buoyancy frequency*) buscando uma melhor concordância na previsão da espessura da camada de fumaça sem a necessidade de subjetividade como no método da regra do N-percentual e sem o viés otimista na estimativa do risco obtido pelo método da relação integral. Através de experimentos em um túnel em escala reduzida verificou-se que o método da frequência de flutuação era condizente com o resultado visual, atingindo seu objetivo.

O presente trabalho reproduz o experimento realizado por Gao et al. 2016, numericamente através do software *Fire Dynamics Simulator (FDS)*. É analisada a concordância dos métodos da regra do N-percentual, da relação integral e da frequência de flutuação quando simulados numericamente e faz-se uma avaliação do método padrão do *FDS* para previsão da espessura da camada de fumaça.

2. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo geral um estudo numérico dos métodos de análise da espessura da camada de fumaça em um túnel. O presente trabalho tem como objetivos específicos:

- Investigar a capacidade do software *FDS 6.6.0* simular o incêndio num túnel em escala para análise da espessura da camada de fumaça.
- Definir entre os métodos da regra do N-percentual, da relação integral e da frequência de flutuação qual é o mais concordante comparando-se o resultado numérico com o valor experimental (visual) produzido por Gao et al., 2016.
- Quantificar a influência do refinamento da malha para cada um dos métodos analisados, de modo a indicar o método que reduza o tempo computacional necessário para realizar a simulação com o menor prejuízo possível ao resultado.
- Realizar uma comparação entre a espessura da camada de fumaça calculada pelo software *FDS 6.6.0* com o método estudado indicado como mais concordante neste trabalho, de modo a recomendar, ou não, a utilização da espessura calculada pelo software.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 O software *Fire Dynamics Simulator (FDS)*

O software *Fire Dynamics Simulator (FDS)* é desenvolvido e mantido pelo *National Institute of Standards and Technology (NIST)* e está atualmente em sua versão 6.6.0. O *FDS* é um software de fluidodinâmica computacional (*Computational Fluid Dynamics* ou *CFD* em inglês) que resolve uma forma da equação de Navier-Stokes apropriada para baixos números de Mach. São características do modelo utilizado no *FDS*: baixo número de Mach, com a metodologia de Simulação de Grandes Escalas (*Large-Eddy Simulation* ou *LES* em inglês); conservação da energia cinética explícita de segunda ordem; malha estruturada, preferencialmente uniforme e escalonada; método de fronteira simplesmente imerso para tratamento de obstruções ao fluxo; método generalizado de espécies agrupadas; números de Schmidt e Prandtl turbulentos constantes; conceito de dissipação de turbilhões para reação de única etapa entre combustível e comburente; transferência de calor por radiação considerando o modelo de gás cinza com solução da equação de transferência radiativa pelo método de volumes finitos.

O software trata as espécies químicas através do método generalizado de espécies agrupadas (*generalized lumped species method*). Uma simplificação da química do fogo é a reação entre um combustível de hidrocarboneto com o oxigênio produzindo dióxido de carbono e água. Existe ainda a possibilidade de a reação ser incompleta devido à insuficiência de oxigênio. Mesmo com essa simplificação ainda são formadas seis espécies gasosas (combustível, O_2 , CO_2 , H_2O , CO , N_2) e fuligem. Através da utilização do método de *lumped species*, agrupam-se diversas espécies de gás que são transportadas juntas e reagem juntas, permitindo diminuir o número de equações de transporte a serem realizadas para duas: uma para o combustível e outra para o produto da combustão, tratado como uma *lumped species*.

Devido ao baixo número de Mach durante um incêndio, como observado por Rehm e Baum, 1978, a pressão pode ser decomposta em uma pressão de fundo e uma perturbação, com apenas a pressão de fundo sendo conservada na equação de estado para gases ideais. Outra consequência da aproximação para baixo número de Mach é que a energia interna e a entalpia podem ser relacionadas em termos da pressão termodinâmica.

As equações resolvidas pelo software *FDS* para a conservação de massa, conservação de energia e a equação do momentum são apresentadas no Anexo I.

3.2 Método da Regra do N-percentual

O método da regra do N-percentual (*N-percentage rule*) foi proposto por Cooper et al., 1982. É um método simples de estimar a espessura da camada de fumaça com base na temperatura ambiente, na temperatura máxima observada e na temperatura de um dado ponto. O método da regra do N-percentual indica que a interface da camada de fumaça está localizada quando a diferença entre a temperatura em um ponto (o qual determina tal interface) e a temperatura ambiente é igual a uma porcentagem da diferença entre a temperatura máxima observada e a temperatura ambiente, conforme a equação abaixo.

$$T_i - T_{amb} = (T_{max} - T_{amb}) \times N/100 \quad (3.1)$$

onde T_i é a temperatura num dado ponto da coluna de termopares, T_{amb} é a temperatura ambiente, T_{max} é a temperatura máxima obtida na coluna de termopares e N é o fator N-percentual.

Embora o método da regra do N-percentual já tenha sido utilizado amplamente por pesquisadores na previsão da espessura da camada de fumaça para diversos tipos de ambiente, a seleção do fator N pode ser confusa, uma vez que este parâmetro é uma escolha do pesquisador, não estando atrelado diretamente à nenhuma propriedade física ou geométrica do experimento. Pesquisas anteriores indicam valores de N de 10, 20, 30 e 40. Outro aspecto importante do método da regra do N-percentual é a utilização direta das temperaturas obtidas pelos termopares, e não uma função de temperatura, o que acarreta em uma dependência muito forte da concordância do método com o número de termopares posicionados entre as distâncias medidas. A Tabela 3.1 indica trabalhos anteriores e os valores utilizados para o fator N . No presente trabalho foi escolhido $N = 30$, conforme será discutido no capítulo de resultados.

Tabela 3.1 – Valores do fator N-percentual na literatura

| Referência | Fator N-percentual | Cenário | Método de Pesquisa |
|-------------------------|--------------------|------------|--------------------------------|
| Cooper et al. (1982) | 10 | Multi sala | Experimento em escala real |
| He et al. (1998) | 15 | Multi sala | Experimento em escala real |
| Chow (2009) | 10/15/20 | Átrio | Experimento em escala real |
| Tilley et al. (2011) | 30 | Átrio | Simulação Numérica |
| Zhang et al. (2012) | 10 | Túnel | Experimento em escala reduzida |
| Rafinazari et al (2017) | 20 | Átrio | Experimento em escala real |
| Li et al. (2017) | 40 | Multi sala | Experimento em escala real |

3.3 Método da Relação integral

O método da relação integral (*integral ratio*) foi proposto por He et al., 1998. Este método divide o perfil de temperatura em duas regiões distintas, uma região rica em fumaça e outra região rica em ar, tal que a função da relação integral é dada pela equação abaixo.

$$r(H_i') = \frac{1}{(H - H_i')^2} \int_{H_i'}^H T(z) dz \int_{H_i'}^H \frac{1}{T(z)} dz + \frac{1}{H_i'^2} \int_0^{H_i'} T(z) dz \int_0^{H_i'} \frac{1}{T(z)} dz \quad (3.2)$$

onde, H é a altura do teto, H_i' é uma possível altura de interface, $T(z)$ é a função da temperatura (a qual ajusta os valores de temperatura medidos ou calculados numericamente ao longo da posição vertical z), r é a relação integral. Para se encontrar o valor da altura de interface H_i , varia-se o parâmetro H_i' entre $[0, H]$, de tal forma que a altura de interface H_i será o valor que resultar no r de menor valor.

Como visto pela Equação (3.2), ao contrário do método da regra do N-percentual, a determinação da altura de interface pelo método da relação integral não depende de nenhuma constante cujo valor é arbitrariamente definido.

3.4 Método da Frequência de flutuação

O método da frequência de flutuação foi proposto por Gao et al., 2016. A frequência de flutuação (*buoyancy frequency*) é um dos parâmetros básicos de fluxos heterogêneos, tendo sido previamente utilizado em estudos da dinâmica atmosférica, oceanografia e geofísica. A equação da frequência de flutuação, para oscilações harmônicas simples e considerando os gases como gases ideais, Gao et al., 2016, indica a frequência de flutuação pela equação abaixo.

$$N_L = \left(-gT_{amb} \frac{\delta(1/T(z))}{\delta z} \Big|_{z_i} \right)^{1/2} \quad (3.3)$$

onde N_L é a frequência de flutuação na direção vertical, T_{amb} é a temperatura ambiente, $T(z)$ é a função da temperatura, g é a aceleração da gravidade. O parâmetro N_L é maior quanto maior for a diferença de densidade, portanto, para se encontrar o valor da altura de interface H_i , avalia-se o valor de N_L^2 através da variação da z_i entre $[0, H]$, de tal forma que a altura de interface será o valor que resultar no maior valor de N_L^2 .

3.5 Método padrão FDS 6.6.0

Em seu manual de usuário, o software *FDS 6.6.0* indica o modo como calcula a altura de interface da camada de fumaça. As equações abaixo demonstram o procedimento utilizado pelo software.

$$I_1 = \int_0^H T(z) dz \quad (3.4)$$

$$I_2 = \int_0^H \frac{1}{T(z)} dz \quad (3.5)$$

$$H_i = \frac{T_l(I_1 I_2 - H^2)}{I_1 + I_2 T_l^2 - 2T_l H} \quad (3.6)$$

onde T_l é a temperatura no volume de controle mais próximo ao chão, H é a altura do teto, I_1 e I_2 são as integrais da função temperatura realizadas numericamente utilizando-se a regra de Simpson, e H_i é a altura de interface. Deve-se observar que o presente estudo está interessado na análise da espessura da camada de fumaça, a qual é dada por $SLT = H - H_i$.

4. METODOLOGIA

4.1 Simulação no software FDS 6.6.0

O presente trabalho reproduz computacionalmente um modelo de túnel em escala 1/6 construído por Gao et al., 2016, utilizando-se o software *Fire Dynamics Simulator (FDS)* em sua versão 6.6.0. O corpo principal do túnel possui 6 m de comprimento, 2 m de largura e 0,9 m de altura, com suas extremidades desobstruídas (abertas). Também compõe o experimento uma chaminé para escape natural de fumaça, com 0,3 m de comprimento, 0,3 m de largura e 0,8 m de altura, localizada a 3,2 m da face lateral esquerda do túnel.

As faces inferior, superior e posterior do corpo principal são feitas de placas à prova de fogo com espessura de 8 mm. A face anterior do corpo principal e as 4 faces da chaminé são

feitas de vidro resistente ao fogo com espessura de 6 mm. Nas simulações realizadas no software FDS utilizou-se as propriedades físicas da placa à prova de fogo *Knauf Insulation DRS Functional Fire Board*, e do vidro resistente ao fogo *PYRAN S E(G) 30-120*. A Figura 4.1 mostra o modelo desenvolvido por este autor no software FDS para o presente trabalho, onde o vidro resistente ao fogo é apresentado na cor azul e a placa à prova de fogo na cor verde.

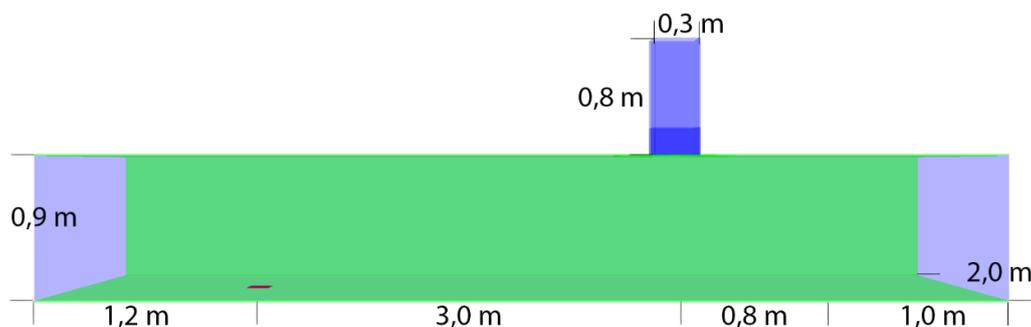


Figura 4.1 – Modelagem física no software FDS.

No experimento realizado por Gao et al., 2016, uma coluna com 32 termopares do tipo K foi posicionada verticalmente na região de 0,56-0,88 m acima do chão, a 5 m da face esquerda do túnel, na linha central, conforme destaque da Figura 4.1. Durante as simulações, o número de termopares posicionados variou entre 5, para malhas mais grosseiras com volumes de controle de 80 mm, e 16, para malhas mais refinadas com volumes de controle de 20 mm.

Uma piscina contendo combustível N-heptano com 1 cm de profundidade e dois tamanhos (10 cm x 15 cm ou 15 cm x 20 cm) foi posicionada a 1,2 m da face esquerda do túnel. A Tabela 4.1 indica os 4 casos estudados.

Tabela 4.1 – Casos estudados

| Caso N° | Temperatura Ambiente (°C) | Tamanho da piscina (cm x cm) | Condições Experimentais |
|---------|---------------------------|------------------------------|----------------------------|
| 1 | 16 | 10 x 15 | Sem exaustão de fumaça |
| 2 | 15 | 15 x 20 | Sem exaustão de fumaça |
| 3 | 15 | 10 x 15 | Exaustão natural de fumaça |
| 4 | 17 | 15 x 20 | Exaustão natural de fumaça |

A rotina no software *FDS* foi configurada para que, em cada um dos casos estudados, a massa de combustível queimada entre dois instantes de tempo na simulação fosse a mesma que a variação da massa residual de combustível fornecida por Gao et al., 2016. Para isso utilizou-se o parâmetro de entrada *mass loss rate per unit area (MLRPUA)* no software *FDS*. A Figura 4.2, extraída da simulação do caso 4 com volumes de controle de 20 mm x 20 mm x 20 mm, mostra que o comportamento da massa de combustível queimada está de acordo com os valores experimentais.

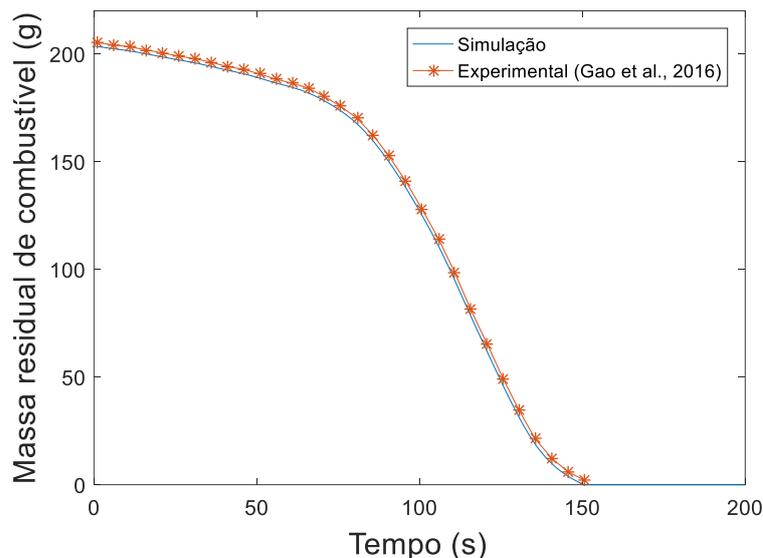


Figura 4.2 - Massa residual de combustível em função do tempo.

4.2 Processamento dos dados

Para cada um dos intervalos de tempo da simulação, eram fornecidos pelo software *FDS* o valor da temperatura em cada um dos termopares posicionados assim como a altura da interface de fumaça através do método padrão discutido na seção 3.4. Utilizando-se uma rotina em *Matlab* para cada intervalo de tempo da simulação, através das temperaturas dos termopares, construiu-se o perfil de temperatura no dado momento, assim como ajustou-se uma curva para posterior utilização nos métodos da relação integral e da frequência de flutuação. Para o ajuste da curva de temperatura, utilizou-se o perfil mostrado pela equação abaixo.

$$T(z) = a + \frac{b}{(1 + 10^{((c-z) \times d))}} \quad (4.1)$$

onde a , b , c e d são constantes, calculadas em cada instante.

A Figura 4.3 mostra um exemplo da distribuição de temperatura para o caso 4, com volumes de controle de 20 mm x 20 mm x 20 mm para o tempo de 125 s, com destaque para o local onde estão localizados os termopares. A Figura 4.4 mostra um exemplo do perfil de temperatura e a curva ajustada segundo a Equação (4.1) para o mesmo caso, para o tempo de 125 s.

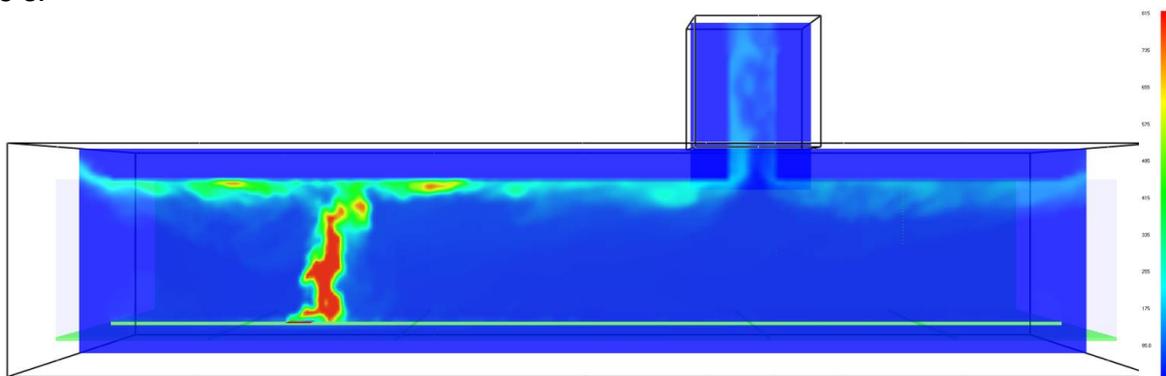


Figura 4.3 – Distribuição de temperatura para o caso 4, no tempo de 125 s.

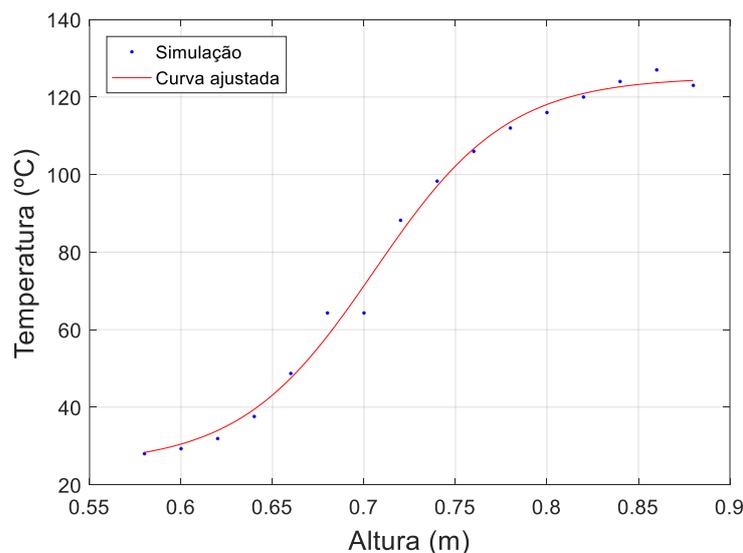


Figura 4.4 – Perfil de temperatura e curva ajustada para o caso 4, no tempo de 125 s.

Para a análise segundo o método da regra do N-percentual utilizou-se o valor da temperatura diretamente dos termopares, enquanto para os métodos da relação integral e da frequência de flutuação utilizou-se a curva ajustada para posterior cálculo da relação integral e do quadrado da frequência de flutuação. Para o mesmo caso, malha e tempo anterior, a Figura 4.5 mostra exemplos dos valores da relação integral, calculado segundo a Equação (3.2), e do quadrado da frequência de flutuação, calculado a partir do quadrado da Equação (3.3).

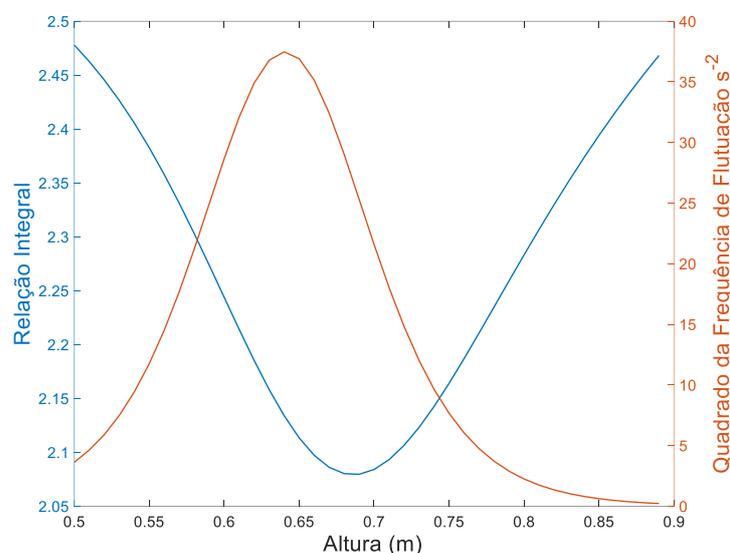


Figura 4.5 – Relação integral e quadrado da frequência de flutuação.

Na Figura 4.5 percebe-se um vale no valor da relação integral e um pico no valor da frequência de flutuação. O valor da altura de interface da camada de fumaça para cada método é encontrado no respectivo pico ou vale, e assim determina-se para cada método a espessura da camada de fumaça.

4.3 Comparação entre a simulação numérica e os experimentos de Gao et al., 2016

Para medir a concordância da simulação numérica utilizando-se o software *FDS 6.6.0* em relação aos resultados obtidos experimentalmente por Gao et al., 2016, utilizou-se a concordância relativa, conforme a equação abaixo.

$$C = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{SLT_{exp,i} - |SLT_{exp,i} - SLT_{sim,i}|}{SLT_{exp,i}} \right) \quad (4.2)$$

onde $SLT_{exp,i}$ e $SLT_{sim,i}$ são a espessura da camada de fumaça no instante i no experimento realizado por Gao et al., 2016, e a simulação, respectivamente, N indica o número de instantes comparados e C a concordância, sendo melhor quanto maior seu valor.

Para cada um dos três métodos de análise (regra do N-percentual, da relação integral e da frequência de flutuação), comparou-se o resultado da simulação em cada método com seu respectivo resultado experimental, e com o resultado visual experimental obtido por Gao et al., 2016, tido como *benchmark*. O método padrão utilizado pelo software *FDS* foi comparado apenas com o resultado visual experimental. Os resultados da simulação foram comparados com os resultados experimentais para todos os instantes de tempo cujos dados obtidos por Gao et al., 2016 estão disponíveis. A Tabela 4.2 indica os períodos de tempo para cada caso. A Tabela 4.2 indica também o período que Gao et al., 2016, considera o comportamento da espessura da camada de fumaça como relativamente estável para cada caso. O estágio relativamente estável é utilizado no estudo da qualidade de malha para a estimativa do erro de discretização, conforme descrito na seção 4.4.

Tabela 4.2 – Períodos de tempo e estágio relativamente estável

| Casos | Período com dados disponíveis (s) | Estágio relativamente estável (s) |
|-------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 1 e 3 | 40 - 180 | 140 - 170 |
| 2 e 4 | 40 - 160 | 110 - 140 |

4.4 Estudo da qualidade de malha

Utilizando-se como parâmetro de comparação entre duas malhas de diferentes tamanhos de volumes de controle a concordância conforme a Equação (4.2), verificou-se a convergência da concordância, conforme o refino da malha. Analisou-se também a dimensão característica do fogo D^* , conforme equação abaixo, apresentada no *User Guide* do software *FDS* como método para verificação da resolução da malha.

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} T_{\infty} c_p \sqrt{g}} \right)^{2/5} \quad (4.3)$$

onde \dot{Q} é a taxa de liberação de calor em kW, ρ_{∞} é a massa específica do fluido ambiente em kg/m³, T_{∞} é a temperatura do fluido ambiente em K, c_p é o calor específico do fluido em kJ/(kg K) e g é a aceleração da gravidade em m/s².

Concomitantemente, comparou-se o custo computacional necessário para cada malha utilizada. Devido a utilização de mais de um computador durante as simulações, para o cálculo do custo computacional, tomou-se como 100 o tempo necessário para simular o caso 4 com volumes de controle de 50 mm × 50 mm × 50 mm, utilizado como referência para os demais casos e malhas. Este caso foi simulado em todas os computadores, e o custo computacional para malhas com diferentes volumes de controle estão sempre relacionados com a referência da mesma máquina.

Para a estimativa do erro de discretização, utilizou-se o método *Grid Convergence Index* (GCI) descrito em Celik et al., 2008. Este é o método recomendado pela *American Society of Mechanical Engineering* (ASME) desde 2008. Este método utiliza três malhas de discretização diferentes para estimar o erro de discretização da malha mais fina.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Estudo da qualidade de malha

A Tabela 5.1 mostra, para malhas com diferentes dimensões dos volumes de controle, a concordância de cada método, comparando o resultado numérico com o resultado utilizando-se o mesmo método (com dados experimentais) obtido por Gao et al. 2016, assim como o resultado visual obtido pelo mesmo. Também é mostrado na Tabela 5.1 a relação D^*/δ em que δ é a dimensão do volume de controle para cada malha, o valor de D^* calculado segundo a Equação (4.3) foi de 0.461 para o caso 4. A Tabela 5.2 mostra o custo computacional para cada malha analisada. O custo computacional em horas foi padronizado para um cluster utilizando 7 instâncias com dois núcleos de 2.3 GHz cada.

Tabela 5.1 – Concordância para o caso 4 para diferentes discretizações espaciais

| Dimensão dos volumes de controle (mm) | D^*/δ | Concordância N-percentual com N=30 | | Concordância Relação integral | | Concordância Frequência de flutuação | | Concordância Padrão FDS |
|---------------------------------------|--------------|------------------------------------|--------|-------------------------------|--------|--------------------------------------|--------|-------------------------|
| | | N-percentual | Visual | Relação integral | Visual | Frequência de flutuação | Visual | Visual |
| 80 | 5,8 | 8% | 7% | 18% | 45% | 28% | 29% | 26% |
| 70 | 6,6 | 16% | 23% | 22% | 48% | 29% | 29% | 30% |
| 60 | 7,7 | 24% | 29% | 21% | 47% | 37% | 38% | 51% |
| 50 | 9,2 | 33% | 37% | 37% | 61% | 41% | 41% | 70% |
| 40 | 11,5 | 51% | 55% | 60% | 80% | 60% | 60% | 77% |
| 30 | 15,4 | 70% | 73% | 80% | 86% | 74% | 74% | 64% |
| 20 | 23,1 | 79% | 82% | 84% | 93% | 83% | 84% | 80% |

Tabela 5.2 – Custo Computacional para diferentes discretizações espaciais

| Número de volumes de controle | Dimensão dos volumes de controle (mm) | Custo computacional relativo | Custo computacional (h) |
|-------------------------------|---------------------------------------|------------------------------|-------------------------|
| 4,36E+04 | 80 | 0,19 | 1,93 |
| 6,32E+04 | 70 | 0,29 | 2,98 |
| 9,95E+04 | 60 | 0,52 | 5,43 |
| 1,69E+05 | 50 | 1 | 10,36 |
| 3,33E+05 | 40 | 2,65 | 27,49 |
| 7,87E+05 | 30 | 7,62 | 78,98 |
| 2,60E+06 | 20 | 18,01 | 186,67 |

A partir da Tabela 5.1 nota-se que para os métodos avaliados há uma melhora na concordância conforme se refina a malha, tanto na comparação com o respectivo método (empregando dados experimentais), quanto na comparação com o resultado visual obtido por Gao et al., 2016. O método de maior concordância, tanto na comparação com o respectivo método quanto na comparação com o resultado visual, para o caso analisado foi o método da relação integral, porém nota-se a maior correlação no método da frequência de flutuação entre a concordância com relação ao próprio método e a concordância com relação ao resultado visual. O método padrão FDS mostra uma concordância muito próxima aos métodos da relação integral e da frequência de flutuação.

No relatório NUREG-1824, 2016, da *Nuclear Regulatory Commission Regulation (NUREG)* para verificação e validação de modelagem de fogo para uso em plantas nucleares, verificou-se que um parâmetro D^*/δ entre 4 e 16 referia-se a malhas com discretização moderada, enquanto para a malha ser considerada refinada deve-se ter $D^*/\delta = 16$ ou maior. No

presente estudo, a única malha utilizada que pode ser considerada refinada, segundo este critério, é a com dimensões dos volumes de controle de 20 mm.

Pode-se notar pelo comportamento dos métodos da relação integral e da frequência de flutuação que um refino de malha ainda maior seria benéfico, em especial para o método da frequência de flutuação. Entretanto devido ao grande custo computacional envolvido, mostrado na Tabela 5.2, torna-se inviável a utilização de malhas mais finas no escopo deste trabalho. Para a análise dos quatro casos estudados neste trabalho, foram utilizadas malhas com volumes de controle uniformes de dimensão de 20 mm.

Para a estimativa do erro de discretização através do método GCI, foram utilizadas as malhas com volumes de controle de dimensão 20 mm, 30 mm, e 40 mm. Como parâmetro de comparação entre as malhas foi utilizado a média da altura de interface da camada de fumaça durante o período entre 110 s e 140 s, dado como estágio relativamente estável para o caso 4 segundo Gao et al., 2016. Estimou-se o erro de discretização para a malha com dimensão de 20 mm em 2,9% para o método da relação integral e em 5,3% para o método da frequência de flutuação.

5.2 Método padrão *FDS*

A partir da altura da interface da camada de fumaça fornecida pelo software *FDS* calculou-se a espessura da camada de fumaça. A Figura 5.1 mostra o comportamento da espessura da camada de fumaça para o caso 4 com malha uniforme de dimensão de 20 mm segundo o método padrão *FDS*. As Figuras para os casos 1, 2 e 3 são apresentadas no apêndice A.

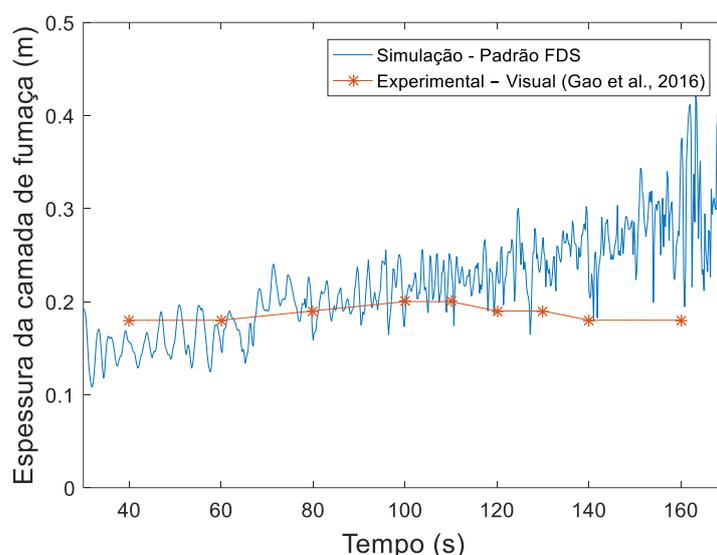


Figura 5.1 – Espessura da camada de fumaça pelo método padrão *FDS* para o caso 4.

Pode-se perceber através da Figura 5.1 que quando se compara o método padrão do *FDS* com o resultado visual obtido por Gao et al., 2016, tido como *benchmark* neste trabalho, o método padrão *FDS* possui grande variação em um período enquanto o *benchmark* está estável, variando pouco. O método padrão *FDS* apresentou comportamento crescente para a espessura camada de fumaça durante o período avaliado, superestimando a espessura da camada de fumaça para tempos mais avançados. A Tabela 5.3 mostra a concordância do método padrão *FDS* para os quatro casos analisados.

Tabela 5.3 – Concordância padrão *FDS*

| Caso | 1 | 2 | 3 | 4 |
|--------|-----|-----|-----|-----|
| Visual | 81% | 56% | 74% | 80% |

A Tabela 5.3 mostra boa concordância do método padrão *FDS*, com menor concordância observada para o caso 2. Porém, assim como analisado na Figura 5.1, em todos os casos, o padrão *FDS* apresentou comportamento da espessura da camada de fumaça em relação ao tempo não condizente com o observado por Gao et al., 2016.

5.3 Método da regra do N-percentual

O método da regra do N-percentual depende diretamente da escolha do parâmetro N, como visto na Equação (3.6). Contudo, esta escolha não provém de propriedades físicas ou geométricas do problema, tendo sido utilizados frequentemente valores de N entre 10 e 40 na literatura. No problema em estudo, Gao et al., 2016, analisou N com os valores de 10, 20 e 30. Nas simulações realizadas no software *FDS*, nos quatro casos analisados encontrou-se que a maior concordância acontecia quando utilizado o valor de 30 para N. A Figura 5.2 mostra o comportamento da espessura da camada de fumaça para o caso 4 com malha uniforme de dimensão 20 mm segundo o método N-percentual para um valor de N igual a 30. As Figuras para os casos 1, 2 e 3 são apresentadas no apêndice B.

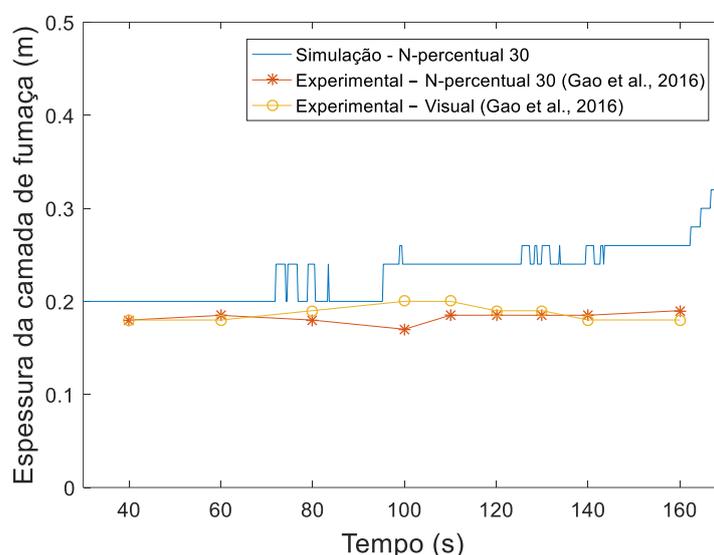


Figura 5.2 - Espessura da camada de fumaça pelo método N-percentual com N=30 para o caso 4.

Percebe-se através da Figura 5.2 que o método N-percentual com N igual a 30 superestima a espessura da camada de fumaça. Isto trabalha a favor da segurança em caso de incêndio, porém deve-se atentar ao fato da utilização de um coeficiente N igual a 30 ser arbitrário, e não há garantias que para outros valores de N este comportamento se mantenha. Observa-se a presença de mudanças abruptas no valor da espessura da camada de fumaça, isso deve-se a utilização dos valores de temperatura lidos diretamente dos termopares, e não utilização de uma função da temperatura, e do grau de discretização da malha utilizada no problema.

A Tabela 5.4 mostra a concordância do método N-percentual com N tendo um valor de 30 para os quatro casos analisados. A linha “N-percentual” compara os valores da simulação com o mesmo método utilizado por Gao et al., 2016, para o tratamento dos dados experimentais, enquanto a linha “visual” compara os resultados da simulação com o *benchmark*. É apresentado no apêndice B a concordância para os valores de N de 10 e 20.

Tabela 5.4 – Concordância do método N-percentual com $N=30$

| Caso | 1 | 2 | 3 | 4 |
|--------------|-----|-----|-----|-----|
| N-percentual | 84% | 51% | 77% | 71% |
| Visual | 83% | 59% | 80% | 74% |

Embora se perceba uma concordância acima de 70% para os casos 1, 3 e 4, deve-se atentar que a escolha do valor N como 30 dá-se comparando a simulação com o caso estudado por Gao et al., 2016. Na realização de uma simulação de um caso em que não se tenha os valores para um experimento, nada garante a escolha do N mais correto, pois o valor N não é determinado através de propriedades físicas ou geométricas do experimento. O método conseguiu captar bem a presença ou não de chaminé para exaustão natural, obtendo boas concordâncias tanto para casos com exaustão natural quanto para casos sem exaustão natural. Novamente observou-se menor concordância para o caso 2.

5.4 Método da Relação integral

A Figura 5.3 mostra o comportamento da espessura da camada de fumaça para o caso 4 com malha uniforme de dimensão 20 mm segundo o método da relação integral. As Figuras para os casos 1, 2 e 3 são apresentadas no apêndice C.

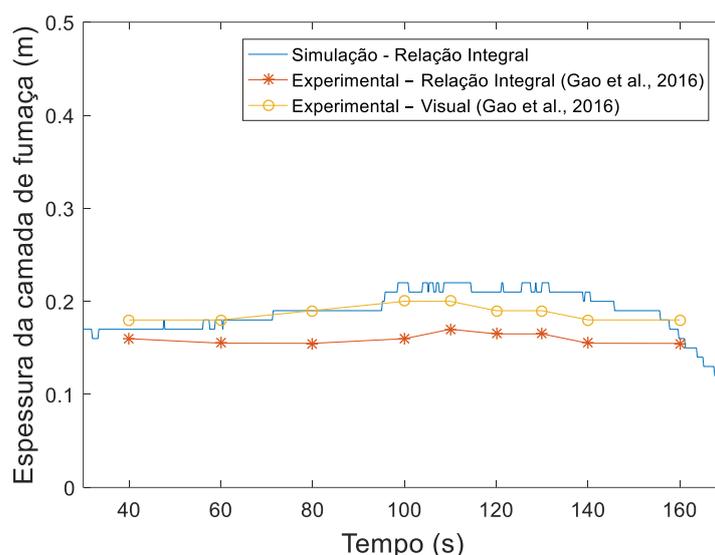


Figura 5.3 - Espessura da camada de fumaça pelo método da relação integral para o caso 4.

Pode-se perceber pela Figura 5.3 que o método da relação integral descreve o comportamento da camada de fumaça de modo muito mais próximo do experimental do que os métodos vistos anteriormente, tanto no comportamento visto pelo formato da curva, quanto pela proximidade entre a simulação e os resultados de Gao et al., 2016. O método da relação integral tem como característica subestimar a espessura da camada de fumaça, enquanto a simulação, devido à sua malha com volumes de controle não infinitesimais, acaba por estimar uma camada de fumaça de espessura maior, quando estas duas características se sobrepõem, o valor obtido pela simulação do método da relação integral é muito próximo do *benchmark*.

A Tabela 5.5 mostra a concordância do método da relação integral para os quatro casos analisados, a linha “relação integral” compara os valores da simulação com o mesmo método utilizado por Gao et al., 2016 enquanto a linha “visual” compara os resultados da simulação com o *benchmark*.

Tabela 5.5 – Concordância do método da relação integral

| Caso | 1 | 2 | 3 | 4 |
|------------------|-----|-----|-----|-----|
| Relação integral | 83% | 49% | 91% | 77% |
| Visual | 96% | 76% | 93% | 91% |

Percebe-se através da Tabela 5.5 que há uma grande concordância ao se utilizar o método da relação integral em uma simulação numérica, exceto para o caso 2 em que a concordância é menor. O método conseguiu captar bem a presença ou não de chaminé para exaustão natural, obtendo boas concordâncias tanto para casos com exaustão natural quanto para casos sem exaustão natural.

5.5 Método da Frequência de flutuação

A Figura 5.4 mostra o comportamento da espessura da camada de fumaça para o caso 4 com malha uniforme de dimensão 20 mm segundo o método da frequência de flutuação. As Figuras para os casos 1, 2 e 3 são apresentadas no apêndice D.

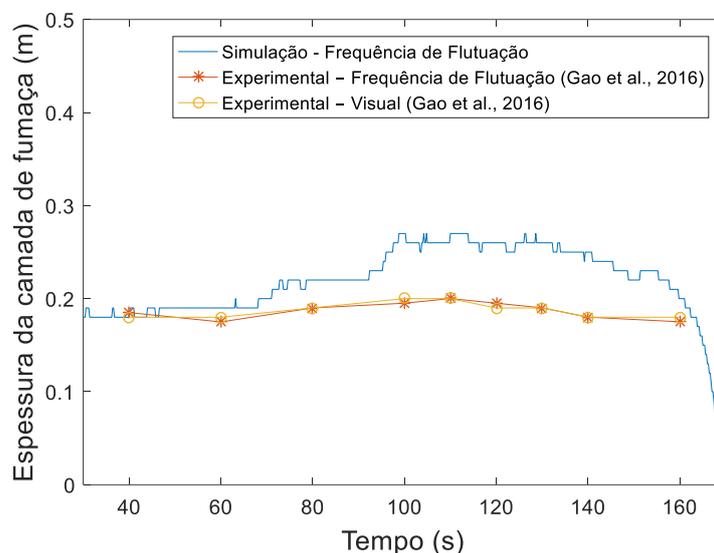


Figura 5.4 - Espessura da camada de fumaça pelo método da frequência de flutuação para o caso 4.

Percebe-se, pela Figura 5.4, que o método da frequência de flutuação no experimento de Gao et al., 2016, conseguiu capturar a espessura da camada de fumaça com altíssima concordância, sendo descrito como o melhor método. Na simulação com o software *FDS* a camada de fumaça através do método da frequência de flutuação tende a superestimar a espessura da camada de fumaça.

A Tabela 5.6 mostra a concordância do método da relação integral para os quatro casos analisados. A linha “frequência de flutuação” compara os valores da simulação com o mesmo método utilizado por Gao et al., 2016, enquanto a linha “visual” compara os resultados da simulação com o *benchmark*.

Tabela 5.6 – Concordância do método da frequência de flutuação

| Caso | 1 | 2 | 3 | 4 |
|-------------------------|-----|-----|-----|-----|
| frequência de flutuação | 85% | 56% | 83% | 76% |
| Visual | 88% | 54% | 84% | 76% |

Percebe-se através da Tabela 5.6 uma boa concordância ao se utilizar o método da frequência de flutuação em uma simulação numérica. Assim como observado em todos os métodos anteriores, o caso 2 apresentou menor concordância entre os casos analisados. Há uma grande proximidade da concordância entre o mesmo método experimental e o *benchmark* visual. Isto se deve ao fato do método da frequência de flutuação ter sido muito concordante em determinar a espessura da camada de fumaça no experimento conduzido por Gao et al., 2016. Assim como o método da relação integral o método da frequência de flutuação captou bem a presença ou não da chaminé para exaustão natural.

6. CONCLUSÕES

Através das simulações realizadas, foi possível averiguar a capacidade do software *FDS* em sua versão 6.6.0 de simular o incêndio em um túnel em escala, tendo como dados de entrada a massa de combustível injetada no sistema através do tempo. Verificou-se que conforme refina-se a malha, diminuindo as dimensões dos volumes de controle, os resultados da simulação se aproximam dos observados por Gao et al., 2016, e que ganhos de refinamento de malha ainda poderiam ser obtidos, mas devido às limitações de poder computacional e de tempo não foram realizados no presente trabalho.

Pôde-se verificar a menor concordância e maior subjetividade do método da regra do N-percentual, devido à utilização de um parâmetro cujo valor varia conforme a literatura e não possui relação com os aspectos físicos e geométricos do problema. Tanto o método da relação integral quanto o método da frequência de flutuação apresentaram uma boa concordância quando comparados com o mesmo método analisado experimentalmente por Gao et al., 2016. Embora o método da relação integral tenha apresentado melhor concordância quando comparado com o *benchmark* visual apresentado por Gao et al., 2016, indica-se a utilização para previsão da espessura da camada de fumaça do método da frequência de flutuação, dado que, para o experimento de Gao et al., 2016, este método produz resultados muito próximos ao *benchmark* visual e nas simulações este método superestimou a espessura da camada de fumaça. Em um projeto, a superestimar a espessura da camada de fumaça levaria a uma maior segurança inerente das pessoas, enquanto o método da relação integral subestimou a espessura da camada de fumaça em algumas situações, levando a uma menor segurança inerente das pessoas.

Através dos casos analisados, pôde-se concluir que o cálculo da espessura da camada de fumaça através do uso do *output* da altura da interface da camada de fumaça fornecido pelo software *FDS* possui concordância da mesma ordem de grandeza que os métodos da relação integral e da frequência de flutuação. Nota-se, entretanto, que o comportamento da espessura da camada de fumaça com o tempo não acompanha o observado pelo *benchmark* visual apresentado por Gao et al., 2016. Sendo assim, não se recomenda a utilização do método padrão *FDS*, mas sim o pós-processamento dos dados de temperatura para análise da espessura da camada de fumaça.

Notou-se que para uma malha com todos os níveis de refinamento, o método N-percentual foi o menos concordante. Comparando-se os métodos da relação integral e da frequência de flutuação, não foi possível indicar qual deles é menos sensível à um refino de malha, com ambos se beneficiando de forma equivalente do refino da malha.

Propõe-se para trabalhos futuros a realização de simulações no software *FDS* de casos com diferentes geometrias como átrios, áreas com multi salas, túneis mais complexos entre outros. Assim, será possível analisar de maneira mais ampla os métodos da relação integral e da frequência de flutuação e verificar se, como visto neste trabalho, eles são mais indicados que o padrão fornecido pelo software *FDS*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Brooke, James. **“Final Calls Add to Anguish Over Korean Subway Fire.”** The New York Times, www.nytimes.com, 20/02/2003. Acessado em 09/04/2018.

Celik, I.B., et al. **“Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications”**, ASME Journal of Fluid Engineering, vol. 130, pp. 078001-1 - 078001-4, 2008.

Chow, W.K., e Gao, Y. **“Oscillating Behaviour of Fire-Induced Air Flow through a Ceiling Vent.”** Applied Thermal Engineering, vol. 29, no. 16, pp. 3289–3298, 2009.

Cooper, L. Y., et al. **“An Experimental Study of Upper Hot Layer Stratification in Full-Scale Multiroom Fire Scenarios.”** Journal of Heat Transfer, vol. 104, no. 4, p. 741, 1982.

Gao, Z.H., et al. **“Determination of Smoke Layer Interface Height of Medium Scale Tunnel Fire Scenarios.”** Tunnelling and Underground Space Technology, vol. 56, pp. 118–124, 2016.

Hall Jr. e Harwood B. **“Smoke or burns: which is deadlier?”**, NFPA J,89:38-44, 1995.

He, Y., et al. **“Determination of Interface Height from Measured Parameter Profile in Enclosure Fire Experiment.”** Fire Safety Journal, vol. 31, no. 1, pp. 19–38, 1998.

Jiang, X., et al. **“An Experimental Study on Plug-Holing in Tunnel Fire with Central Smoke Extraction.”** Applied Thermal Engineering, vol. 138, pp. 840–848., 2018.

Li, S.C., et al. **“Smoke Spread Velocity along a Corridor Induced by an Adjacent Compartment Fire with Outdoor Wind.”** Applied Thermal Engineering, vol. 111, pp. 420–430, 2017.

Lu, K., et al. **“Urban Rail Transit in China: Progress Report and Analysis (2008–2015).”** Urban Rail Transit, vol. 2, no. 3-4, pp. 93–105, 2016.

NUREG/CR-1824 7, **“Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications”**, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, 2016.

Rafinazari, et al. **“A Study of the Effect of Make-Up Air Velocity on the Smoke Layer Height with Symmetric Openings in Atrium Fires.”** Fire Technology, vol. 54, no. 1, pp. 229–253, 2017

Rehm, R.G., and H.R. Baum. **“The Equations of Motion for Thermally Driven, Buoyant Flows.”** Journal of Research of the National Bureau of Standards, vol. 83, no. 3, p. 297, 1978.

Tilley, N., et al. **“Verification of the Accuracy of CFD Simulations in Small-Scale Tunnel and Atrium Fire Configurations.”** Fire Safety Journal, vol. 46, no. 4, pp. 186–193, 2011.

Uol notícias. **“Gás tóxico liberado na queima de espuma é a causa de mortes na boate Kiss”**, <http://noticias.uol.com.br>, 25/09/2015. Acessado em 29/05/2018.

Zhang, J., et al. **“The Inclination Effect on CO Generation and Smoke Movement in an Inclined Tunnel Fire.”** Tunnelling and Underground Space Technology, vol. 29, pp. 78–84, 2012.

ANEXO I

A equação da conservação de massa resolvida pelo *software FDS* é dada pela equação abaixo.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = \dot{m}_b''' \quad (1.1)$$

onde ρ é a massa específica, t é o tempo, \mathbf{u} é a velocidade e o termo fonte \dot{m}_b''' é a taxa de produção da espécie pela evaporação de partículas, gotículas ou partículas de escala sub-malha.

A equação de conservação de energia resolvida pelo *software FDS* é dada conforme a equação abaixo.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h_s) + \nabla \cdot (\rho h_s \mathbf{u}) = \frac{D\bar{p}}{Dt} + \dot{q}''' + \dot{q}_b''' - \nabla \cdot \dot{\mathbf{q}}'' \quad (1.2)$$

onde ρ é a massa específica, h_s a entalpia, \mathbf{u} a velocidade, \bar{p} a pressão de fundo, t o tempo, \dot{q}''' a taxa de liberação de calor de uma reação química, \dot{q}_b''' a energia transferida para partículas e gotículas de escala sub-malha e $\dot{\mathbf{q}}''$ representa o fluxo de calor condutivo, difusivo e radiativo.

A Equação (1.2) não é resolvida explicitamente. Em vez disso o divergente da velocidade é fatorado conforme equação abaixo.

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = \frac{1}{\rho h_s} \left[\frac{D}{Dt} (\bar{p} - \rho h_s) + \dot{q}''' + \dot{q}_r''' + \dot{q}_b''' - \nabla \cdot \dot{\mathbf{q}}'' \right] \quad (1.3)$$

onde \dot{q}_r''' é o termo fonte de calor radiativo.

A equação do momentum é apresentada na equação abaixo.

$$\frac{\partial \overline{\rho u_i}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{\rho u_i u_j}) = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \overline{\tau_{ij}}}{\partial x_j} + \bar{\rho} g_i + \bar{f}_{d,i} + \overline{\dot{m}''' u_{b,i}} \quad (1.4)$$

onde \mathbf{u} é velocidade, ρ a massa específica, p a pressão, $\bar{f}_{d,i}$ a força de arrasto devido às partículas Lagrangeanas não resolvidas, $\overline{\dot{m}''' u_{b,i}}$ o termo fonte, g a gravidade e τ a tensão.

APÊNDICE A

A Figura A.1 mostra o comportamento da espessura da camada de fumaça para os casos 1, 2 e 3, respectivamente, utilizando-se o método padrão *FDS*

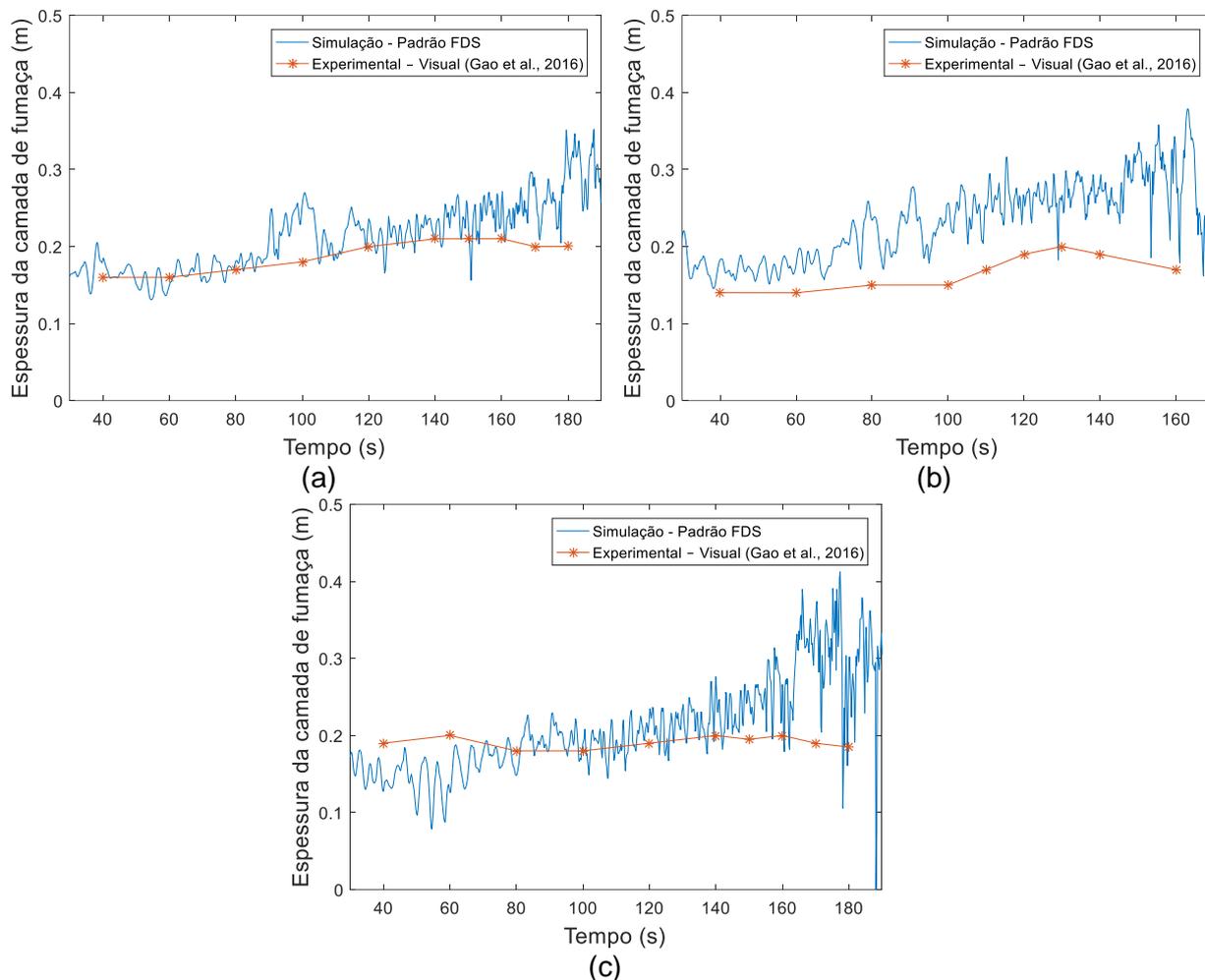


Figura A.1 - Espessura da camada de fumaça pelo método padrão *FDS* para os casos (a) 1, (b) 2 e (c) 3.

APÊNDICE B

A Figura B.1 mostra o comportamento da espessura da camada de fumaça para os casos 1, 2 e 3, respectivamente, utilizando-se o método da regra do N-percentual com $N=30$.

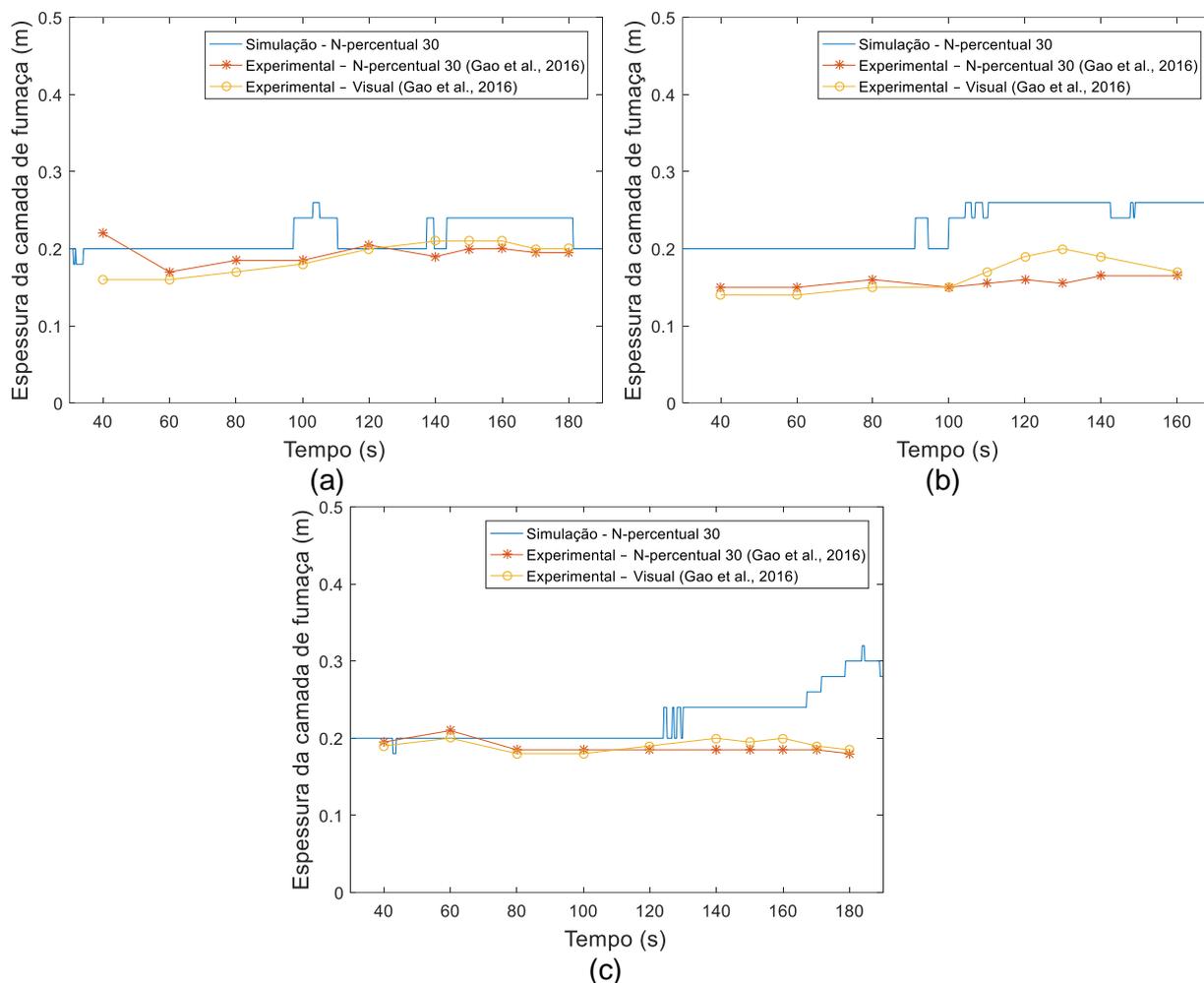


Figura B.1 - Espessura da camada de fumaça pelo N-percentual com $N=30$ para os casos (a) 1, (b) 2 e (c) 3.

A Tabela B.1 mostra a concordância do método da regra do N-percentual para os valores de N de 10 e 20 para os 4 casos.

Tabela B.1 – Concordância método N-percentual com $N=10$ e $N=20$

| Caso | Concordância N-percentual com $N=10$ (%) | | Concordância N-percentual com $N=20$ (%) | |
|------|--|--------|--|--------|
| | N-percentual | Visual | N-percentual | Visual |
| 1 | 74% | 53% | 80% | 72% |
| 2 | 44% | 25% | 50% | 47% |
| 3 | 55% | 50% | 68% | 67% |
| 4 | 50% | 40% | 71% | 69% |

APÊNDICE C

A Figura C.1 mostra o comportamento da espessura da camada de fumaça para os casos 1, 2 e 3, respectivamente, utilizando-se o método da relação integral.

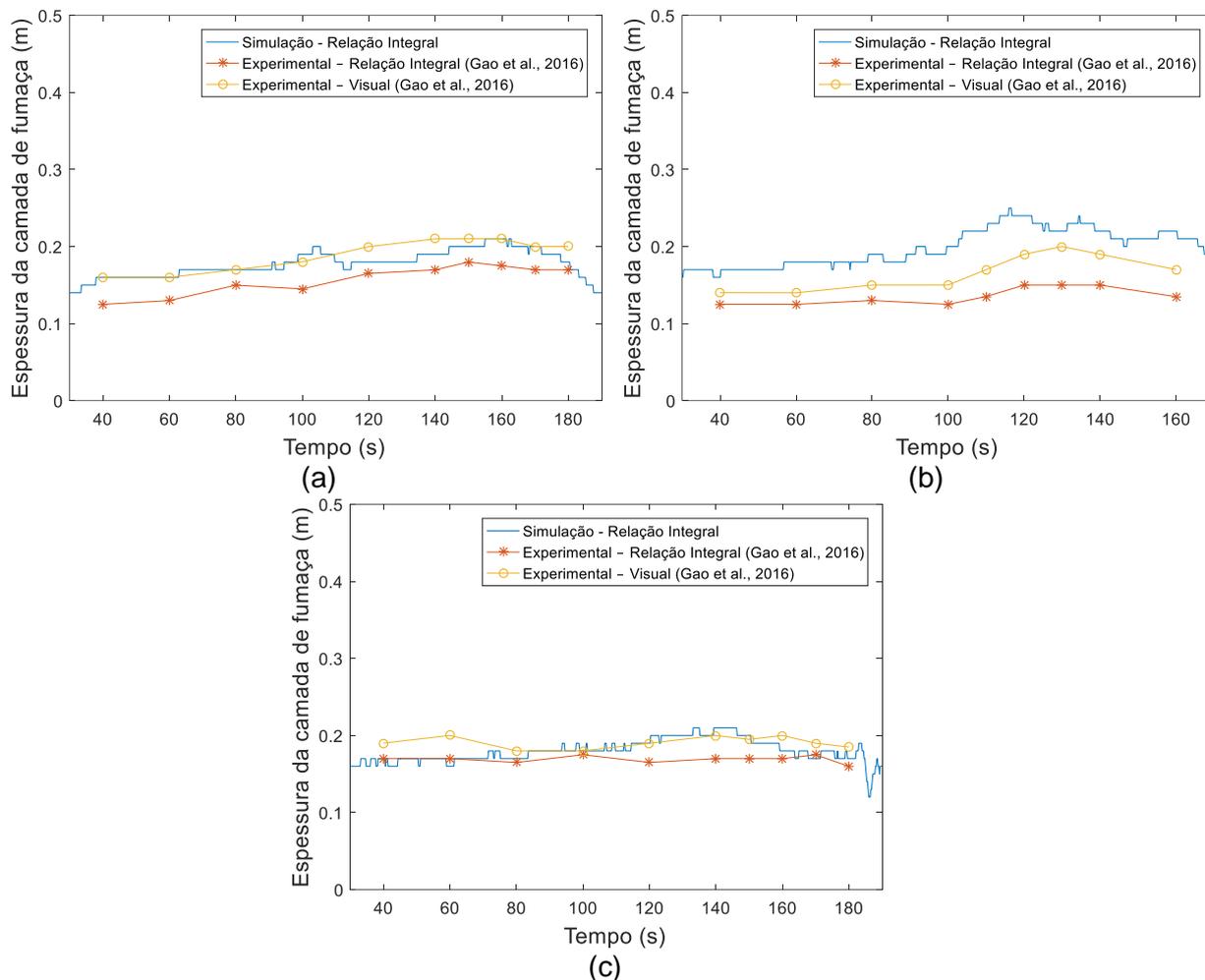


Figura C.1 - Espessura da camada de fumaça pelo método da relação integral para os casos (a) 1, (b) 2 e (c) 3.

APÊNDICE D

A Figura D.1 mostra o comportamento da espessura da camada de fumaça para os casos 1, 2 e 3, respectivamente, utilizando-se o método da frequência de flutuação.

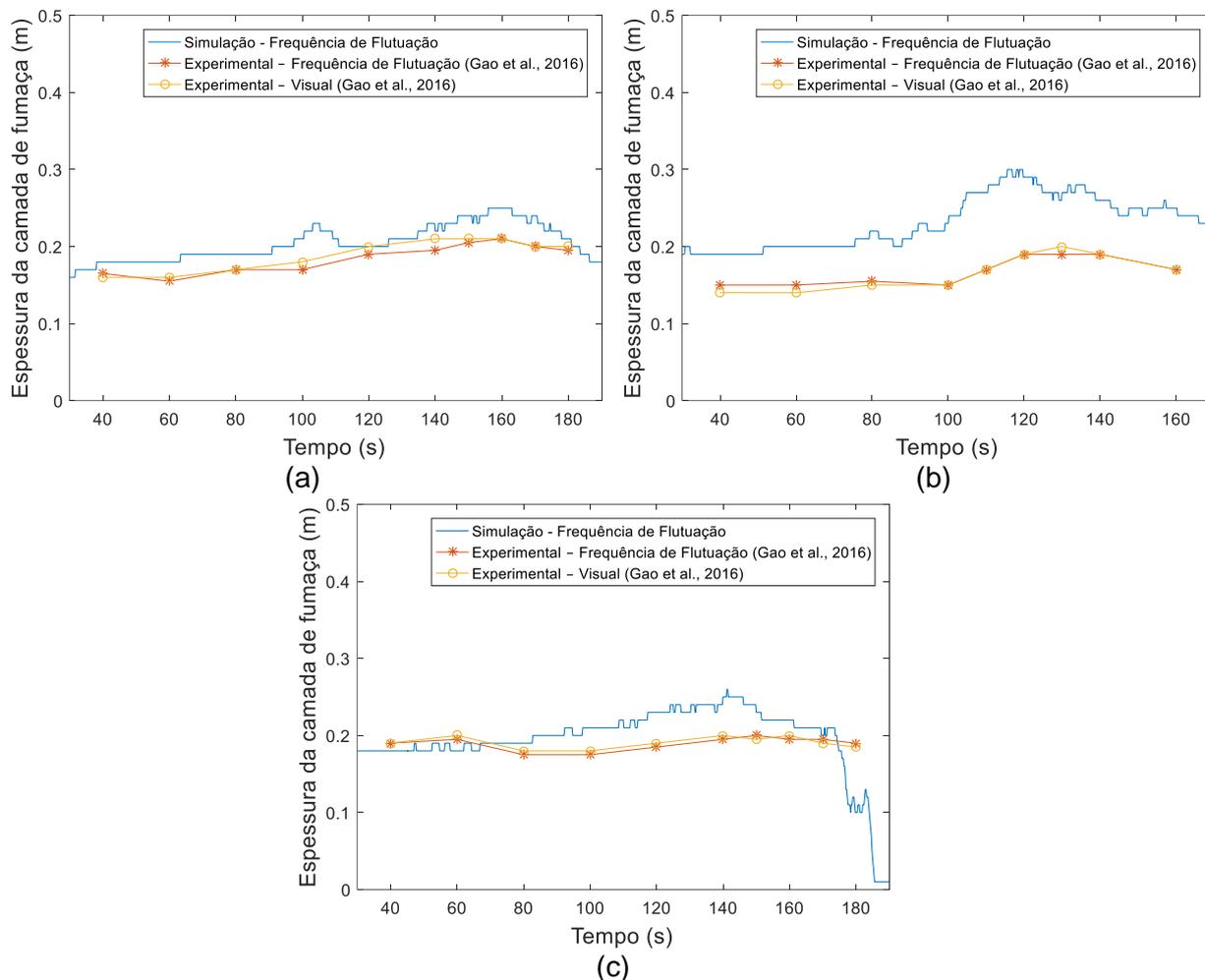


Figura D.1 - Espessura da camada de fumaça pelo método da frequência de flutuação para os casos (a) 1, (b) 2 e (c) 3.