

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

AVALIAÇÃO DE MÉTODOS MATEMÁTICOS PARA OBTENÇÃO DA ALTURA DA
CAMADA DE FUMAÇA A PARTIR DE PERFIS VERTICAIS DE TEMPERATURA EM
DIFERENTES CENÁRIOS DE INCÊNDIO

por

Diego Alex Henz

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, julho de 2020

AVALIAÇÃO DE MÉTODOS MATEMÁTICOS PARA OBTENÇÃO DA ALTURA DA
CAMADA DE FUMAÇA A PARTIR DE PERFIS VERTICAIS DE TEMPERATURA EM
DIFERENTES CENÁRIOS DE INCÊNDIO

por

Diego Alex Henz
Mestre em Engenharia

Dissertação submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de:

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Fenômenos de Transporte

Orientador: Prof. Dr. Felipe Roman Centeno

Aprovada por:

Prof. Dra. Ângela Graeff, PPGCI / UFRGS

Prof. Dra. Thamy Cristina Hayashi, DEMEC/UFRGS

Prof. Dr. Paulo Smith Schneider, PROMEC/UFRGS

Prof. Dr. Fernando Marcelo Pereira
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, julho de 2020.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer o meu orientador Felipe Roman Centeno, por todo apoio ao longo dos 3 anos de duração do mestrado.

Gostaria de agradecer a minha família, minha noiva Cíntia e as pessoas do meu trabalho, por toda compressão no decorrer do mestrado.

Agradeço também aos meus colegas Rodolfo e Calisa por toda ajuda no decorrer do mestrado e da dissertação.

Por fim agradeço a UFRGS e o PROMEC pela oportunidade de estudar numa instituição de ensino federal e realizar este trabalho.

RESUMO

O presente trabalho consiste na simulação computacional, por meio do *software Fire Dynamics Simulator*, para avaliar diferentes métodos usados para determinar a altura da camada de fumaça a partir de perfis verticais de temperatura em diferentes cenários de incêndio. Nove cenários de incêndio reportados na literatura foram simulados, todos com altura da camada de fumaça obtida experimentalmente (tornando possível a avaliação dos métodos matemáticos para prever a altura da camada de fumaça), incluindo casos relacionados a um átrio, edificação residencial, corredor subterrâneo e túnel, onde a validação das simulações foi realizada através de características fornecidas na literatura para cada um dos casos estudados. Foram utilizados 4 diferentes métodos para determinar a altura da camada de fumaça: método frequência de flutuação, método N -percentual (com a constante N variando de 10% a 50%), método padrão do FDS e método relação integral. A avaliação dos métodos baseou-se nas diferentes características dos cenários de incêndio estudados, como o tipo de exaustão (natural ou forçada), volume do compartimento, razão de aspecto do compartimento, e taxa de liberação de calor. A metodologia para emprego dos métodos frequência de flutuação e relação integral se mostrou mais propensa a desvios, visto que depende de um ajuste de curva para o perfil vertical de temperaturas para determinar a altura da camada de fumaça, sendo que os seus resultados foram, no geral, os menos precisos. Os métodos padrão do FDS e N -percentual foram os que forneceram os melhores resultados.

Palavras-chave: Frequência de flutuação; Relação integral; N -percentual; FDS; Fumaça; Incêndio.

ABSTRACT

The present work consisted on a computational simulation, using the software Fire Dynamics Simulator, to assess different methods used to determine the smoke layer height from vertical temperature profiles in fire scenarios with different characteristics. Nine fire scenarios from the literature were considered, all of them with smoke layer heights obtained experimentally (making it possible to assess the mathematical methods to predict the smoke layer height for each scenario), including cases related to an atrium, residential building, underground corridor and tunnel, where the validation of the simulations was performed using characteristics provided in the literature for each of these cases. Four different methods were used to determine the smoke layer height: buoyancy frequency method, N -percentage method (with the constant N ranging from 10% to 50%), standard method of FDS, and integral ratio method. The assessment of the methods was based on the different characteristics of the studied fire scenarios, such as the type of exhaust (natural or forced), volume of the compartment, aspect ratio of the compartment, and rate of heat release. The methodology for using the buoyancy frequency method and integral ratio method was more prone to deviations, since it depends on a curve fitting of the vertical temperature profile to determine the height of the smoke layer, and their results were, in general, the least accurate. The standard method of FDS and N -percentage were those that provided the best results.

Keywords: Buoyancy frequency; Integral ratio; N -percentage; FDS; Smoke; Fire.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Revisão Bibliográfica.....	2
1.2	Objetivos principal e secundário.....	5
1.3	Organização do trabalho.....	6
2	MODELOS NUMÉRICO: FIRE DYNAMICAS SIMULATOR (FDS).....	8
2.1	Equações fundamentais.....	9
2.2	Malha numérica.....	9
2.3	O formalismo LES.....	9
2.4	Aproximação de espécies aglomeradas.....	10
2.5	Aproximação de baixo número de Mach.....	11
2.6	Modelagem da combustão.....	12
2.7	Modelagem da radiação.....	12
2.8	Modelagem da turbulência.....	14
2.8.1	Viscosidade turbulenta.....	15
2.9	Taxa de liberação de calor.....	15
2.10	Passo de tempo e procedimento de solução.....	16
3	MÉTODOS MATEMÁTICOS PARA DETERMINAÇÃO DA ALTURA DA CAMADA DE FUMAÇA.....	17
3.1	Método N-percentual.....	17
3.2	Método da relação integral.....	18
3.3	Método da frequência de flutuação.....	19
3.4	Método padrão do FDS.....	20
3.5	Ajuste da curva $T(z)$	20
4	CENÁRIOS DE INCÊNDIO EMPREGADOS NA ANÁLISE DOS MÉTODOS MATEMÁTICOS.....	21
4.1	Túnel em escala reduzida.....	21
4.2	Edificação residencial.....	25
4.3	Átrio.....	29
4.4	Corredor subterrâneo.....	31

5	VALIDAÇÃO DOS MODELOS OBTIDOS NO <i>SOFTWARE</i> FDS PARA OS CENÁRIOS ESTUDADOS.....	35
5.1	Estudo da qualidade da malha.....	35
5.2	Comparação de perfis de temperatura experimentais e numéricos.....	38
5.2.1	Túnel em escala reduzida.....	38
5.2.2	Edificação residencial.....	39
5.2.3	Corredor subterrâneo.....	40
5.2.4	Átrio.....	41
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	43
6.1	Resultados: túnel em escala reduzida.....	43
6.1.1	Cenário: Túnel 1.....	43
6.1.2	Cenário: Túnel 2.....	45
6.1.3	Cenário: Túnel 3.....	46
6.1.4	Cenário: Túnel 4.....	48
6.2	Resultados: Edificação residencial.....	49
6.2.1	Cenário: Edificação residencial 1.....	49
6.2.2	Cenário: Edificação residencial 2	56
6.3	Resultados: Corredor subterrâneo.....	64
6.4	Resultados: Átrio.....	67
6.5	Análise e discussão de resultados.....	68
6.5.1	Análise geral de todos os resultados.....	69
6.5.2	Análise de cada cenário de incêndio estudado.....	73
6.5.3	Análise dos diferentes tipos de exaustão (natural ou forçada) em cenários com geometria alongada longitudinalmente.....	75
6.5.4	Análise de cenários conforme o volume do compartimento.....	76
6.5.5	Análise da razão de aspecto dos compartimentos.....	77
6.5.6	Análise em função da taxa de liberação de calor.....	78
6.5.7	Análise de cenários com sala adjacente à sala do fogo.....	79
7	CONCLUSÃO.....	82
7.1	Sugestões para Trabalhos Futuros.....	83
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	84
	APRÊNCICE A.....	87

A.1	EDIFICAÇÃO RESIDENCIAL.....	87
A.2	TÚNEL EM ESCALA REDUZIDA.....	89
A.3	ÁTRIO.....	91

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Ilustração da altura da camada de fumaça.....	2
Figura 4.1	Túnel em escala reduzida utilizado por Gao et al.; 2016.....	21
Figura 4.2	Domínio de cálculo do túnel de Gao et al.,2016, no <i>software</i> FDS...	22
Figura 4.3	Massa residual de combustível em função do tempo pelo tempo [adaptada de Gao et al.,2016]	23
Figura 4.4	Campo de temperaturas no túnel obtido com o <i>software</i> FDS, para o caso do <i>Túnel 4</i> no tempo 80s.....	24
Figura 4.5	Campo de distribuição de fumaça após 100 segundos de simulação, para o caso do <i>Túnel 2</i>	24
Figura 4.6	<i>Edificação residencial</i> [Fonte: Lai et al.; 2013]	25
Figura 4.7	Representação geométrica da <i>Edificação residencial</i> [adaptada de Lai et al., 2013]	26
Figura 4.8	Posições dos termopares para o cenário de <i>Edificação residencial</i> [adaptado de Lai et al.;2013].....	27
Figura 4.9	<i>Edificação residencial 1</i> (fogo na sala 1): exemplo ilustrativo do enchimento de fumaça nos compartimentos obtido no FDS no tempo 395 s.....	28
Figura 4.10	<i>Edificação residencial 1</i> (fogo na sala 1): exemplo ilustrativo do campo de temperaturas nos compartimentos obtidos no FDS no tempo 395s.....	29
Figura 4.11	Modelo do <i>Átrio</i> [adaptada de Qin et al., 2009].....	30
Figura 4.12	Posições dos termopares para o cenário do <i>Átrio</i>	30
Figura 4.13	Exemplo ilustrativo do campo de temperatura no <i>Átrio</i> , em 90 s obtido com o FDS.....	31
Figura 4.14	<i>Corredor subterrâneo</i> [Fonte: Hu et al.,2005].....	32
Figura 4.15	Representação esquemática do <i>Corredor subterrâneo</i> [adaptado de Hu et al.,2005].....	32

Figura 4.16	<i>Corredor subterrâneo</i> : exemplo ilustrativo do campo de temperatura obtido no FDS.....	33
Figura 4.17	<i>Corredor subterrâneo</i> : exemplo ilustrativo da distribuição da fumaça obtida no FDS.....	34
Figura 5.1	Perfil de temperatura em função da posição vertical dos termopares para o cenário <i>Túnel 2</i> (poça de 15 cm × 20 cm, sem chaminê), no tempo 40 s após a ignição: resultados numéricos do FDS (malhas de $\delta = 80$ mm e $\delta = 20$ mm) e dados experimentais de Gao et al., 2016.....	39
Figura 5.2	Histórico de temperaturas para a árvore de termopares TC1 para o cenário <i>Edificação 1</i> (fogo na sala 1): comparação entre resultados numéricos do FDS (malha $\delta = 80$ mm) e dados experimentais de Lai et al., 2013.....	40
Figura 5.3	Histórico de temperaturas para a árvore de termopares TC4 para o cenário <i>Edificação 2</i> (fogo na sala 2): comparação entre resultados numéricos do FDS (malha $\delta = 80$ mm) e dados experimentais de Lai et al., 2013.....	40
Figura 5.4	Temperaturas próximas ao teto do corredor em função da distância a partir do fogo para o cenário <i>Corredor 1</i> : comparação entre resultados numéricos do FDS (malhas $\delta = 200$ mm e $\delta = 100$ mm) e dados experimentais de Hu et al., 2005.....	41
Figura 5.5	Perfil de temperatura em função da posição vertical dos termopares para o cenário <i>Átrio</i> , no tempo 120 s após a ignição: resultados numéricos do FDS (malha com $\delta = 240$ mm × 200 mm × 220 mm e malha com $\delta = 100$ m) e dados experimentais de Li et al., 1999.....	42
Figura 5.6	Perfil de temperatura em função da posição vertical dos termopares para o cenário <i>Átrio</i> , no tempo 180 s após a ignição: resultados numéricos do FDS (malha com $\delta = 240$ mm × 200 mm × 220 mm e malha com $\delta = 100$ m) e dados experimentais de Li et al., 1999....	42

Figura 6.1	Altura da camada de fumaça para o cenário <i>Túnel 1</i> : dados experimentais e modelos testados neste trabalho (frequência de flutuação, relação integral, padrão FDS e <i>N</i> -percentual com $N = 10, 20, 30, 40$ e 50%).....	44
Figura 6.2	Altura da camada de fumaça para o cenário <i>Túnel 1</i> : dados experimentais e modelos testados neste trabalho (frequência de flutuação, relação integral e padrão FDS)	44
Figura 6.3	Altura da camada de fumaça para o cenário <i>Túnel 1</i> : dados experimentais e modelo testado neste trabalho <i>N</i> -percentual com $N=10,20$ e 30%	45
Figura 6.4	Altura da camada de fumaça para o cenário <i>Túnel 2</i> : dados experimentais e modelos testados neste trabalho (frequência de flutuação, relação integral, padrão FDS e <i>N</i> -percentual com $N = 10, 20, 30, 40$ e 50%).....	45
Figura 6.5	Altura da camada de fumaça para o cenário <i>Túnel 2</i> : dados experimentais e modelos testados neste trabalho (frequência de flutuação, relação integral e padrão FDS)	46
Figura 6.6	Altura da camada de fumaça para o cenário <i>Túnel 2</i> : dados experimentais e modelo testado neste trabalho <i>N</i> -percentual com $N=10,40$ e 50%	46
Figura 6.7	Altura da camada de fumaça para o cenário <i>Túnel 3</i> : dados experimentais e modelos testados neste trabalho (frequência de flutuação, relação integral, padrão FDS e <i>N</i> -percentual com $N = 10, 20, 30, 40$ e 50%).....	47
Figura 6.8	Altura da camada de fumaça para o cenário <i>Túnel 3</i> : dados experimentais e modelos testados neste trabalho (frequência de flutuação, relação integral e padrão FDS)	47
Figura 6.9	Altura da camada de fumaça para o cenário <i>Túnel 3</i> : dados experimentais e modelo testado neste trabalho <i>N</i> -percentual com $N=10,20$ e 30%	48

Figura 6.10	Altura da camada de fumaça para o cenário <i>Túnel 4</i> : dados experimentais e modelos testados neste trabalho (frequência de flutuação, relação integral, padrão FDS e N -percentual com $N = 10, 20, 30, 40$ e 50%).....	48
Figura 6.11	Altura da camada de fumaça para o cenário <i>Túnel 4</i> : dados experimentais e modelos testados neste trabalho (frequência de flutuação, relação integral e padrão FDS)	49
Figura 6.12	Altura da camada de fumaça para o cenário <i>Túnel 4</i> : dados experimentais e modelo testado neste trabalho N -percentual com $N=10,20$ e 30%	49
Figura 6.13	Altura da camada de fumaça para o cenário <i>Edificação residencial I</i> usando perfis de temperatura obtidos com a árvore de termopares TC1: dados experimentais e modelos testados neste trabalho (frequência de flutuação, relação integral, padrão-FDS e N -percentual com $N = 10, 20, 30, 40$ e 50%).....	50
Figura 6.14	Altura da camada de fumaça para o cenário <i>Edificação residencial I</i> usando perfis de temperatura obtidos com a árvore de termopares TC1: dados experimentais e modelos testados neste trabalho (frequência de flutuação, relação integral e padrão-FDS)	51
Figura 6.15	Altura da camada de fumaça para o cenário <i>Edificação residencial I</i> usando perfis de temperatura obtidos com a árvore de termopares TC1: dados experimentais e modelo testado neste trabalho N -percentual com ($N = 10, 40$ e 50%)	51
Figura 6.16	Altura da camada de fumaça para o cenário <i>Edificação residencial I</i> usando perfis de temperatura obtidos com a árvore de termopares TC3: dados experimentais e modelos testados neste trabalho (frequência de flutuação, relação integral, padrão-FDS e N -percentual com $N = 10, 20, 30, 40$ e 50%).....	52
Figura 6.17	Altura da camada de fumaça para o cenário <i>Edificação residencial I</i> usando perfis de temperatura obtidos com a árvore de termopares	

	TC3: dados experimentais e modelo testados neste trabalho (frequência de flutuação, relação integral e padrão-FDS)	52
Figura 6.18	Altura da camada de fumaça para o cenário <i>Edificação residencial</i> <i>I</i> usando perfis de temperatura obtidos com a árvore de termopares TC3: dados experimentais e modelo testado neste trabalho (<i>N</i> - percentual com <i>N</i> = 30, 40 e 50%)	53
Figura 6.19	Altura da camada de fumaça para o cenário <i>Edificação residencial</i> <i>I</i> usando perfis de temperatura obtidos com a árvore de termopares TC5: dados experimentais e modelos testados neste trabalho (frequência de flutuação, relação integral, padrão-FDS e <i>N</i> - percentual com <i>N</i> = 10, 20, 30, 40 e 50%).....	53
Figura 6.20	Altura da camada de fumaça para o cenário <i>Edificação residencial</i> <i>I</i> usando perfis de temperatura obtidos com a árvore de termopares TC5: dados experimentais e modelos testados neste trabalho (frequência de flutuação, relação integral e padrão-FDS)	54
Figura 6.21	Altura da camada de fumaça para o cenário <i>Edificação residencial</i> <i>I</i> usando perfis de temperatura obtidos com a árvore de termopares TC5: dados experimentais e modelo testado neste trabalho <i>N</i> - percentual (<i>N</i> = 30, 40 e 50%)	54
Figura 6.22	Altura da camada de fumaça para o cenário <i>Edificação residencial</i> <i>I</i> usando perfis de temperatura obtidos com a árvore de termopares TC6: dados experimentais e modelos testados neste trabalho (frequência de flutuação, relação integral, padrão-FDS e <i>N</i> - percentual com <i>N</i> = 10, 20, 30, 40 e 50%).....	55
Figura 6.23	Altura da camada de fumaça para o cenário <i>Edificação residencial</i> <i>I</i> usando perfis de temperatura obtidos com a árvore de termopares TC6: dados experimentais e modelos testados neste trabalho (frequência de flutuação, relação integral e padrão-FDS)	55
Figura 6.24	Altura da camada de fumaça para o cenário <i>Edificação residencial</i> <i>I</i> usando perfis de temperatura obtidos com a árvore de termopares	

	TC6: dados experimentais e modelo testado neste trabalho <i>N</i> - percentual ($N = 30, 40$ e 50%).....	56
Figura 6.25	Altura da camada de fumaça para o cenário <i>Edificação residencial</i> 2 usando perfis de temperatura obtidos com a árvore de termopares TC1: dados experimentais e modelos testados neste trabalho (frequência de flutuação, relação integral, padrão-FDS e <i>N</i> - percentual com $N = 10, 20, 30, 40$ e 50%).....	57
Figura 6.26	Altura da camada de fumaça para o cenário <i>Edificação residencial</i> 2 usando perfis de temperatura obtidos com a árvore de termopares TC1: dados experimentais e modelos testados neste trabalho (frequência de flutuação, relação integral e padrão-FDS)	57
Figura 6.27	Altura da camada de fumaça para o cenário <i>Edificação residencial</i> 2 usando perfis de temperatura obtidos com a árvore de termopares TC1: dados experimentais e modelo testado neste trabalho <i>N</i> - percentual ($N = 20, 30$ e 40%)	58
Figura 6.28	Altura da camada de fumaça para o cenário <i>Edificação residencial</i> 2 usando perfis de temperatura obtidos com a árvore de termopares TC2: dados experimentais e modelos testados neste trabalho (frequência de flutuação, relação integral, padrão-FDS e <i>N</i> - percentual com $N = 10, 20, 30, 40$ e 50%).....	58
Figura 6.29	Altura da camada de fumaça para o cenário <i>Edificação residencial</i> 2 usando perfis de temperatura obtidos com a árvore de termopares TC2: dados experimentais e modelos testados neste trabalho (frequência de flutuação, relação integral e padrão-FDS).....	59
Figura 6.30	Altura da camada de fumaça para o cenário <i>Edificação residencial</i> 2 usando perfis de temperatura obtidos com a árvore de termopares TC2: dados experimentais e modelo testado neste trabalho <i>N</i> - percentual ($N = 10, 20$ e 30%).....	59
Figura 6.31	Altura da camada de fumaça para o cenário <i>Edificação residencial</i> 2 usando perfis de temperatura obtidos com a árvore de termopares TC3: dados experimentais e modelos testados neste trabalho	

	(frequência de flutuação, relação integral, padrão-FDS e N -percentual com $N = 10, 20, 30, 40$ e 50%).....	60
Figura 6.32	Altura da camada de fumaça para o cenário <i>Edificação residencial</i> 2 usando perfis de temperatura obtidos com a árvore de termopares TC3: dados experimentais e modelos testados neste trabalho (frequência de flutuação, relação integral e padrão-FDS)	60
Figura 6.33	Altura da camada de fumaça para o cenário <i>Edificação residencial</i> 2 usando perfis de temperatura obtidos com a árvore de termopares TC3: dados experimentais e modelo testado neste trabalho N -percentual ($N = 10, 20$ e 30%)	61
Figura 6.34	Altura da camada de fumaça para o cenário <i>Edificação residencial</i> 2 usando perfis de temperatura obtidos com a árvore de termopares TC4: dados experimentais e modelos testados neste trabalho (frequência de flutuação, relação integral, padrão-FDS e N -percentual com $N = 10, 20, 30, 40$ e 50%).....	61
Figura 6.35	Altura da camada de fumaça para o cenário <i>Edificação residencial</i> 2 usando perfis de temperatura obtidos com a árvore de termopares TC4: dados experimentais e modelos testados neste trabalho (frequência de flutuação, relação integral e padrão-FDS)	62
Figura 6.36	Altura da camada de fumaça para o cenário <i>Edificação residencial</i> 2 usando perfis de temperatura obtidos com a árvore de termopares TC4: dados experimentais e modelo testado neste trabalho (N -percentual com $N = 10, 20$ e 30%)	62
Figura 6.37	Altura da camada de fumaça para o cenário <i>Edificação residencial</i> 2 usando perfis de temperatura obtidos com a árvore de termopares TC6: dados experimentais e modelos testados neste trabalho (frequência de flutuação, relação integral, padrão-FDS e N -percentual com $N = 10, 20, 30, 40$ e 50%).....	63
Figura 6.38	Altura da camada de fumaça para o cenário <i>Edificação residencial</i> 2 usando perfis de temperatura obtidos com a árvore de termopares	

	TC6: dados experimentais e modelos testados neste trabalho (frequência de flutuação, relação integral e padrão-FDS)	63
Figura 6.39	Altura da camada de fumaça para o cenário <i>Edificação residencial 2</i> usando perfis de temperatura obtidos com a árvore de termopares TC6: dados experimentais e modelo testado neste trabalho <i>N</i> -percentual ($N = 10, 20$ e 30%)	64
Figura 6.40	Altura da camada de fumaça para o cenário <i>Corredor subterrâneo 1</i> : dados experimentais e modelos testados neste trabalho (frequência de flutuação, relação integral, padrão-FDS e <i>N</i> -percentual com $N = 10, 20, 30, 40$ e 50%)	64
Figura 6.41	Altura da camada de fumaça para o cenário <i>Corredor subterrâneo 1</i> : dados experimentais e modelos testados neste trabalho (frequência de flutuação, relação integral e padrão-FDS).....	65
Figura 6.42	Altura da camada de fumaça para o cenário <i>Corredor subterrâneo 1</i> : dados experimentais e modelo testado neste trabalho <i>N</i> -percentual ($N = 10, 20$ e 30%)	65
Figura 6.43	Altura da camada de fumaça para o cenário <i>Corredor subterrâneo 2</i> : dados experimentais e modelos testados neste trabalho (frequência de flutuação, relação integral, padrão-FDS e <i>N</i> -percentual com $N = 10, 20, 30, 40$ e 50%)	66
Figura 6.44	Altura da camada de fumaça para o cenário <i>Corredor subterrâneo 2</i> : dados experimentais e modelos testados neste trabalho (frequência de flutuação, relação integral e padrão-FDS)	66
Figura 6.45	Altura da camada de fumaça para o cenário <i>Corredor subterrâneo 2</i> : dados experimentais e modelo testado neste trabalho <i>N</i> -percentual ($N = 10, 20$ e 30%)	67
Figura 6.46	Altura da camada de fumaça para o cenário <i>Átrio</i> : dados experimentais e modelos testados neste trabalho (frequência de flutuação, relação integral, padrão-FDS e <i>N</i> -percentual com $N = 10, 20, 30, 40$ e 50%).....	67

Figura 6.47	Altura da camada de fumaça para o cenário <i>Átrio</i> : dados experimentais e modelos testados neste trabalho (frequência de flutuação, relação integral e padrão-FDS)	68
Figura 6.48	Altura da camada de fumaça para o cenário <i>Átrio</i> : dados experimentais e modelo testado neste trabalho <i>N</i> -percentual (<i>N</i> = 10, 20 e 30%)	88
Figura A1	Altura da camada de fumaça para o cenário <i>Edificação residencial 1</i> usando perfil de temperaturas experimental obtido com a árvore de termopares TC1: dados experimentais e modelos testados neste trabalho (frequência de flutuação, relação integral e <i>N</i> -percentual com <i>N</i> = 10, 20, 30, 40 e 50%).....	87
Figura A2	Altura da camada de fumaça para o cenário <i>Edificação residencial 2</i> usando perfil de temperaturas experimental obtido com a árvore de termopares TC4: dados experimentais e modelos testados neste trabalho(frequência de flutuação, relação integral e <i>N</i> -percentual com <i>N</i> = 10, 20, 30, 40 e 50%).	88
Figura A3	Altura da camada de fumaça para o cenário <i>Túnel 2</i> no tempo 40 s, usando perfil de temperaturas experimentais obtido com a árvore de termopares: dados experimentais e modelos testados neste trabalho (frequência de flutuação, relação integral e <i>N</i> -percentual com <i>N</i> = 10,20,30,40 e 50%).....	90
Figura A4	Altura da camada de fumaça para o caso do <i>Átrio</i> nos tempos 120 s e 180s, usando perfil de temperaturas experimental obtido com a árvore de termopares: dados experimentais e modelos testados neste trabalho (frequência de flutuação, relação integral e <i>N</i> -percentual com <i>N</i> = 10,20,30,40 e 50%).....	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Valores do fator N -percentual empregados na literatura.....	18
Tabela 4.1	Propriedades termofísicas dos materiais de construção do túnel	22
Tabela 4.2	Casos propostos.....	23
Tabela 4.3	Períodos de tempo usados na análise da altura da fumaça no experimento de Gao et al.,2016.....	25
Tabela 4.4	Casos analisados para os cenários de <i>Edificação residencial</i>	28
Tabela 4.5	Dados utilizados na simulação do <i>corredor subterrâneo</i>	33
Tabela 5.1	Valores de δ e D^*/δ empregados no estudo de malha para cada cenário de incêndio	37
Tabela 5.2	Desvios relativos médios entre os resultados numéricos e os experimentais da altura da fumaça para cada cenário de incêndio para as duas malhas testadas.....	38
Tabela 6.1	Desvios relativos médios para todos os cenários de incêndio estudados	71
Tabela 6.2	Frequência relativa de ocorrência de valores da altura da camada de fumaça obtida com os modelos menores que os valores experimentais	72
Tabela 6.3	Desvio padrão para todos os cenários de incêndio estudados após análise gráfica	73
Tabela 6.4	Desvios relativos médios segmentado para cada cenário de incêndio estudado	74
Tabela 6.5	Média dos desvios relativos para cenários com exaustão natural (com e sem chaminé) e exaustão forçada.....	75
Tabela 6.6	Média dos desvios relativos em função do volume do compartimento	77
Tabela 6.7	Média dos erros percentuais em função do formato do compartimento	78

Tabela 6.8	Média dos desvios relativos em função da taxa de liberação de calor	79
Tabela 6.9	Desvios relativos médios em função da posição de medição do perfil de temperaturas para o cenário <i>Edificação residencial</i>	81
Tabela A1	Desvios relativos médios para os cenários <i>Edificação 1</i> (TC1) e <i>Edificação 2</i> (TC4), usando perfil de temperaturas experimental obtidos numericamente com o FDS.....	89
Tabela A2	Desvios relativos médios para o cenário do <i>Túnel 2</i> no tempo 40s, usando perfil de temperatura experimental e obtido numericamente com o FDS.....	90
Tabela A3	Desvios relativos médios para o cenário do <i>Átrio</i> no tempo 40s, usando perfil de temperatura experimental e obtidos numericamente com o FDS.....	91

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
FDS	<i>Fire Dynamics Simulator</i>
NIST	<i>National Institute of Standards and Technology</i>
PROMEC	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

A	Área, m ²
c_p	Calor específico, J/(kg·K)
D^*	Diâmetro característico do fogo, m
D_α	Coefficiente de difusão, m ² /s
e	Energia interna, J/kg
F_n	Fator de visualização
f_b	Força de arrasto, N
g	Aceleração gravitacional, m/s ²
h	Entalpia, J/kg
H	Altura do compartimento, m
H_i	Altura da camada de fumaça, m
I	Intensidade total da radiação, W/(m ² .sr)
I_b	Intensidade de radiação do corpo negro, W/(m ² .sr)
$I_{b,n}$	Fração da radiação do corpo negro, W/(m ² .sr)
I_1	Primeira integral da função temperatura
I_2	Segunda integral da função temperatura
Ma	Número de Mach
\dot{m}_b'''	Termo fonte de massa, (kg/s)/m ³
$\dot{m}_{b,\alpha}'''$	Taxa de produção de massa por unidade de volume de espécie α por evaporação de gotículas/partículas, (kg/s)/m ³
\dot{m}_α'''	Taxa de produção de massa por unidade de volume da espécie α por reação química, (kg/s)/m ³
\dot{m}_F'''	Termo de consumo de combustível, (kg/s)/m ³
N	Constante do método N-Percentual
N_L	Frequência de Flutuação
p	Pressão, Pa
\bar{p}	Pressão de fundo, Pa

\tilde{p}	Perturbação de pressão, Pa
p_∞	Pressão ambiente, Pa
\dot{q}'''	Taxa de liberação de calor de uma reação química, W/m ³
\dot{q}''	Fluxo de calor condutivo, W/m ²
\dot{q}_b'''	Energia transferida para partículas da sub-malha, W/m ³
R	Constante universal dos gases, J/(mol·K)
r	Relação integral
r_l	Relação integral, parte inferior
r_u	Relação integral, parte superior
S	Coefficiente estequiométrico de massa para o ar
T	Temperatura, °C
T_∞	Temperatura ambiente, °C
T_i	Temperatura em um dado ponto da coluna de termopares, °C
T_{max}	Temperatura máxima, °C
$T(z)$	Equação ajustada da temperatura em função da posição vertical z
t	Tempo, s
\mathbf{u}	Vetor velocidade $u = (u, v, w)$
$\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$	Componentes de velocidade filtrados em escala de comprimento Δ
$\tilde{u}, \tilde{v}, \tilde{w}$	Componentes de velocidade resolvido por LES
\bar{W}	Peso molecular da mistura de gás, g/mol
x, y, z	Coordenadas cartesianas
Z_A	Fração de massa de ar
Z_F	Fração de massa do combustível
Z_α	Fração de mistura α da espécie
Re	Número de Reynolds

Símbolos Gregos

α	Difusividade térmica, m ² /s
κ	Coefficiente de absorção, m ⁻¹
κ_n	Coefficiente de absorção médio para banda n , m ⁻¹

ρ	Massa específica, kg/m ³
ρ_∞	Massa específica do ar ambiente, Kg/m ³
σ	Constante de Stefan-Boltzmann
$\bar{\tau}$	Tensor de tensões viscosas
τ_{min}	Escala de tempo para mistura modelada, s
τ_{ij}^{sgs}	Tensões submalha
δ_x	Tamanho da malha na direção x, m
δ_y	Tamanho da malha na direção y, m
δ_z	Tamanho da malha na direção z, m

1 INTRODUÇÃO

Durante um incêndio, as principais causas de mortes são as altas temperaturas e a intoxicação por fumaça. Hall e Harwood, 1995, revelam que nos Estados Unidos, no ano de 1990, 76% das mortes em incêndios em prédios foram causadas por inalação de fumaça. Segundo Xu et al., 2013, dados estatísticos de mortes causadas por incêndio em átrios mostram que a fumaça é um dos principais fatores de risco. Além da inalação de fumaça, a visibilidade também é um dos fatores de risco que levam a mortes devido a fumaça. Segundo Li et al., 2013, a visibilidade em um cenário de incêndio diminui devido ao aumento da concentração de fumaça. Como resultado as pessoas não podem ver a saída e os socorristas não conseguem encontrar as vítimas.

Segundo Hwang Sun-yoon, 2003, aproximadamente 200 pessoas morreram e várias outras ficaram feridas após um homem com problemas mentais ter incendiado um vagão no metrô de Daegu na Coreia do Sul, quando a maioria das mortes foi devida ao sufocamento por gases tóxicos dentro dos trens. Especialistas relataram que incêndios são um risco para os trens do metrô coreano, porque materiais com bom comportamento frente a reação ao fogo não são usados, e os materiais nos trens, quando inflamados liberam facilmente gases venenosos fatais.

Em 2019, dez adolescentes morreram em um incêndio causado no centro de treinamento do clube de futebol Flamengo no Rio de Janeiro. Segundo o médico-legista entrevistado pela revista Veja, a inalação da fumaça provavelmente foi a causa das dez mortes, devido ao monóxido de carbono impedir a chegada de oxigênio ao cérebro, tendo o gás efeito embriagante, o que dificulta a reação de quem o aspira, principalmente de quem estiver dormindo (Molica, 2019). No ano de 2013, 242 pessoas morreram, e mais de 600 ficaram feridas, durante um incêndio na boate Kiss, na cidade de Santa Maria. Segundo o site UOL, todas as 242 mortes ocorreram por sufocamento devido à fumaça tóxica (UOL,2013).

Em uma situação de incêndio em um compartimento, existe a formação de duas camadas de gases distintas, uma rica em oxigênio, com temperatura menor, posicionada na parte inferior do compartimento, e outra rica em gases tóxicos, com alta temperatura e posicionada na parte superior do compartimento. É vital para a sobrevivência que a camada de gases tóxicos fique acima da cabeça dos ocupantes, possibilitando a evacuação do local do incêndio, uma vez que a inalação da fumaça tóxica causa perda parcial ou total da consciência.

A Figura 1.1 apresenta uma caracterização da altura da camada de fumaça, onde \dot{Q} é a taxa de liberação de calor, H_i é a altura da camada de fumaça, e H é a altura do compartimento, sendo vital para sobrevivência dos ocupantes que suas cabeças fiquem abaixo de H_i .

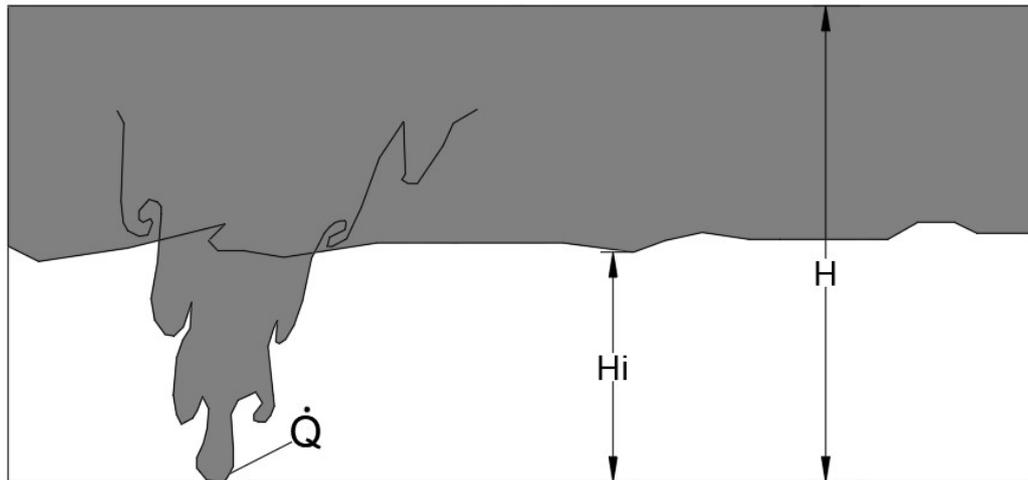


Figura 1.1 – Ilustração da altura da camada de fumaça.

Por estas razões, o conhecimento da altura da camada de fumaça é um assunto de grande importância nas pesquisas em engenharia de segurança contra incêndios, conhecendo a altura da camada de fumaça é possível analisar incêndios ocorridos, detectar rotas de fuga e projetar sistemas de prevenção contra incêndio. Os métodos matemáticos para determinar a altura da camada de fumaça através de medições de temperatura conforme cada característica dos cenários de incêndio (tais como área e altura do compartimento, tipo de exaustão, taxa de liberação de calor, etc.), podem ser uma ferramenta útil em tais análises e projeções de sistemas de segurança contra incêndio. Dessa forma, é possível prever o comportamento da fumaça em cenários de incêndio, como o comportamento da fumaça em um incêndio em um corredor de hotel com ou sem exaustão, bem como análise de rotas de fuga em grandes compartimentos como shopping centers, metrô, etc.

1.1 Revisão Bibliográfica

Gross et al., 1967, definem a fumaça como sendo o produto gerado da queima de matéria orgânica nas quais pequenas partículas sólidas e líquidas também são dispersas. Para Drysdale, 2011, a definição de fumaça é mais ampla que as definições mais comuns, entre elas, define-se

a fumaça como sendo “produtos voláteis visíveis a partir de materiais queimados”, em especial por não levar em consideração um percentual de ar que foi arrastado para a coluna de fogo. Drysdale, 2011, também aborda que é a combinação de toxicidade e obscuridade que representa a maior ameaça para os ocupantes de um edifício envolvido em incêndio. Tais definições reforçam a importância de se definir um método para se determinar a altura da camada de fumaça em uma situação de incêndio, que historicamente foram desenvolvidos por vários autores, tais como os citados a seguir.

Zukoski, 1978, propôs um método para determinação da altura da camada de fumaça em uma sala, levando em consideração aberturas no teto ou nas paredes, com o objetivo de calcular o tempo necessário para encher a sala de fumaça, entretanto o método se limitou a uma pequena sala, na qual o autor conclui que o tipo de geometria pode afetar significativamente a densidade da fumaça e o tempo necessário para encher a sala de fumaça.

Cooper et al., 1982, analisaram o método da regra *N*-percentual (*N*-percentage rule) em incêndios, com base na análise das temperaturas no interior do compartimento. Para isso foram utilizados experimentos físicos em escala real, considerando diversas salas e um corredor formando uma configuração geométrica composta por múltiplas salas. O método consiste em modificar uma constante (*N*) e verificar a proximidade dos resultados daquele método em relação à altura da camada de fumaça observada no experimento. A maior dificuldade encontrada neste estudo foi padronizar uma constante *N* aplicável para determinada característica ou caso.

Bengston e Hägglund, 1986, mostraram que o programa computacional DSLAY1, pode ser útil para obtenção do fluxo de calor e da espessura da camada de fumaça. Eles utilizaram um modelo que calcula a redução de intensidade de um feixe de luz que passa por uma atmosfera de incêndio, entretanto não utilizaram como base perfis verticais de temperatura.

He et al., 1998, propuseram um método denominado de relação integral (*integral ratio*), o qual utiliza o perfil vertical de temperaturas na sala para determinar a espessura da camada de fumaça, em um cenário com múltiplas salas, entretanto o método da relação integral pode obter alturas da camada de fumaça sobre-estimada, não sendo ideal em projetos de segurança contra incêndio.

Chow et al., 2000, realizaram um estudo experimental sobre o preenchimento natural de fumaça em um átrio. Para determinar a altura da camada de fumaça, foi desenvolvido um método de duas zonas com a taxa de entrada de ar calculada por uma equação de pluma, sendo comparados os resultados gerados com o experimento e outros métodos, o autor relata que a

interface de temperatura depende muito da posição onde a coluna de termopares está localizada, bem como a necessidade de simular outros cenários para validar os métodos.

Hurley, 2003, utilizou o modelo computacional de incêndio ASET-B para previsões de temperatura e altura da camada de fumaça, tendo comparado os resultados obtidos com duas séries de testes em escala real. O modelo de incêndio utilizou como base o método *N*-percentual para determinar a altura da camada de fumaça.

Bennard e Inzaghi, 2010, descreveram um método matemático para calcular a evolução da temperatura e espessura da camada de fumaça no tempo, assumindo algumas condições iniciais, tais como: existência de uma camada de ar contaminado por fumaça, caracterizada por uma distribuição homogênea de temperatura, acima de uma camada de ar puro; transporte de massa desprezível entre duas camadas; força motriz pode ser a diferença de densidade entre a fumaça e o ar ambiente, ou um fluxo de ar constante sendo gerado pelo ventilador. O método matemático se mostrou promissor, entretanto não foi realizado uma validação completa do modelo devido a falta de dados experimentais.

Gao et al., 2016, apresentaram o método da frequência de flutuação (*buoyancy frequency*) para determinar a altura da camada de fumaça em função do perfil vertical de temperaturas; naquele artigo, o método proposto foi testado para incêndios em um túnel em escala reduzida, em 4 casos distintos (diferentes ventilações e taxas de liberação de calor), tendo como limitação a utilização em apenas um cenário de incêndio de dimensões reduzidas, não sendo reproduzido em grandes escalas.

McGrattan et al., 2017a, apresentam o método padrão utilizado pelo *software* FDS para determinar a altura da camada de fumaça, o qual também é função da distribuição vertical de temperaturas na sala.

Para Meira, 2017, as normas e instruções técnicas que tratam do controle de fumaça no Brasil, tem como objetivo principal a manutenção de um ambiente seguro no tempo necessário para evacuar o local onde ocorre o incêndio, evitando assim perigos de intoxicação e a falta de visibilidade causada pela fumaça. Entretanto, o autor também cita a inexistência no Brasil de pesquisas sobre o controle de fumaça e normas que definam os parâmetros a serem adotados em projetos de controle de fumaça e padronização de procedimentos e materiais, existindo somente instruções técnicas.

Visando isto e somando a existência de limitações nos estudos encontrados na literatura, tais como único formato de sala, análise de um só método, análise sem exaustão forçada, sem variação da taxa de liberação de calor, etc., a presente dissertação apresenta a avaliação de quatro métodos de determinação da altura da camada de fumaça (*N*-percentual, relação integral,

frequência de flutuação e método padrão do FDS) aplicados a diferentes cenários de incêndio, cujos dados de temperatura no interior do compartimento foram obtidos por meio de simulação computacional através do *software* FDS, sendo eles: (i) túnel em escala reduzida, (ii) edificação residencial, (iii) átrio, e (iv) corredor subterrâneo, todos eles com diferentes características. O motivo desta análise é encontrar métodos que forneçam valores adequados para a altura da camada de fumaça, que sejam de fácil utilização e que possam ser utilizados em projetos de sistemas de segurança contra incêndio.

1.2 Objetivos principal e secundário

O objetivo principal deste estudo é avaliar diferentes métodos para determinação da altura da camada de fumaça a partir da distribuição vertical de temperaturas dos compartimentos obtida através da simulação numérica, levando em consideração as características de cada cenário de incêndio. São avaliados quatro diferentes métodos:

- a) *N*-percentual,
- b) Relação integral,
- c) Frequência de flutuação,
- d) Padrão FDS.

Os quatro diferentes métodos serão comparados em nove diferentes cenários de incêndio que possuem dados experimentais para a altura da camada de fumaça, com diferentes quantidades de árvores de termopares cada uma e diferentes tipos de exaustão. Sendo eles:

- a) Túnel em escala reduzida proposto por Gao et al., 2016, com 4 casos diferentes,
- b) Edificação residencial proposta por Lai et al., 2013, analisando 2 casos diferentes,
- c) Átrio proposto por Li et al., 1999, analisando 1 caso,
- d) Corredor subterrâneo proposto por Hu et al., 2005, contemplando 2 casos.

Como objetivo secundário, o presente trabalho irá analisar a eficiência das simulações computacionais através do *software* FDS, comparando dados experimentais com os resultados obtidos pelo *software*.

1.3 Organização do trabalho

O presente trabalho está dividido em sete partes:

- a) Capítulo 1 - Introdução
- b) Capítulo 2 - Modelo numérico: *Fire Dynamics Simulator* (FDS)
- c) Capítulo 3 - Métodos matemáticos para determinação da altura da camada de fumaça
- d) Capítulo 4 - Cenários de incêndio empregados na avaliação dos métodos matemáticos
- e) Capítulo 5 - Validação do *software* FDS para os cenários estudados
- f) Capítulo 6 - Resultados e discussões
- g) Capítulo 7 - Conclusões

Primeiramente é feita uma revisão histórica de métodos matemáticos para determinar a altura da camada de fumaça e são explicadas a organização e objetivos do presente trabalho.

O Capítulo 2 descreve o *software* FDS, um programa de fluidodinâmica computacional, que resolve equações de Navier-Stokes adaptadas para simulações de incêndios.

No Capítulo 3 são explicados os 4 métodos utilizados para determinação da altura da camada de fumaça a partir do perfil de temperatura, sendo eles os métodos *N*-percentual, relação integral, frequência de flutuação e o método padrão do FDS. Também é explicado o processamento de dados utilizado para determinar a função que fornece o perfil de temperaturas a partir dos valores discretos obtidos de termopares (que podem ser experimentais ou numéricos) e a metodologia aplicada para as simulações.

Em seguida, no Capítulo 4, são descritos os cenários de incêndio com dados experimentais disponíveis, incluindo informações a respeito de suas dimensões, taxa de liberação de calor, combustível empregado e outros aspectos relacionados. No mesmo é apresentada também a metodologia e parâmetros utilizados para realizar cada simulação com o *software* FDS em cada um dos cenários.

Para validar as simulações dos cenários apresentados no Capítulo 4, no Capítulo 5 são apresentados os estudos de qualidade da malha e de comparação dos resultados numéricos com os dados experimentais (perfis de temperatura).

O Capítulo 6 apresenta os resultados obtidos da comparação dos diferentes métodos matemáticos para os diferentes cenários de incêndio, comparando dados experimentais com os resultados de cada método.

O Capítulo final fornece as conclusões obtidas através das simulações feitas, destacando os melhores métodos para determinação da altura da camada de fumaça conforme as características de cada cenário estudado, bem como sugestões para trabalhos futuros envolvendo a altura da camada de fumaça.

2 MODELO NUMÉRICO: FIRE DYNAMICS SIMULATOR (FDS)

O *software Fire Dynamics Simulator* (FDS) é desenvolvido e mantido pelo *National Institute of Standards and Technology* (NIST) e pelo *VTT Technical Research Centre of Finland*. O FDS é um *software* de fluidodinâmica computacional (CFD), com código aberto em Fortran, que resolve computacionalmente uma forma das equações de Navier-Stokes para baixas velocidades ($Ma < 0,3$) adaptadas para escoamentos dirigidos termicamente, com ênfase no transporte de fumaça e calor em casos de incêndios.

Algumas das principais características do *software*, de acordo com McGrattan et al., 2017a, são:

- Metodologia de simulação de grandes escalas (*Large-Eddy Simulation* ou LES);
- Aplicação do modelo de viscosidade turbulenta de Deardorff para fechamento do modelo de energia cinética sub-malha.
- Uso de malha estruturada, uniforme e escalonada;
- Solução explícita, de segunda ordem, da equação de conservação da energia cinética;
- Aplicação do método generalizado de “espécies aglomeradas” (cinética química simplificada usando uma variável de progresso da reação);
- Uso do modelo de combustão *Eddy Dissipation Concept – Fast Chemistry* (Conceito de dissipação de vórtices – Cinética química rápida), com reação de única etapa entre combustível e comburente;
- Método de contorno imerso para tratamento de obstruções ao escoamento;
- Aplicação de números de Schmidt e Prandtl turbulentos constantes;
- Modelagem da 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* FDS é denominado como um modelo de incêndio porque incorpora termos fontes e condições de contorno típicas de incêndios, tais como (McGrattan et al., 2017a):

- Combustão turbulenta de combustível gasoso e oxigênio;
- Transferência de calor por radiação térmica em gases quentes com fuligem;
- Decomposição térmica de materiais reais;

- Ativação de aspersores de água e detectores de fumaça;
- Transporte de gotículas de água e combustível líquido;
- Uma variedade de outros recursos que simulam um incêndio dentro e fora de edificações.

Este Capítulo apresenta as equações governantes resolvidas pelo FDS, assim como modelos, hipóteses e procedimentos de solução empregados, conforme descrito em McGrattan et al., 2017a. Informações adicionais sobre o FDS podem ser encontradas na mesma referência.

2.1. Equações fundamentais

As equações fundamentais que descrevem os fenômenos e um incêndios são:

- a) Equação da conservação de massa;
- b) Equação da conservação de energia;
- c) Equação do balanço da quantidade de momento linear;
- d) Equação de estado.

2.2. Malha numérica

O *software* FDS foi desenvolvido para simular escoamentos conduzidos pelo empuxo em prédios (incêndios em compartimentos, incluindo casas, edifícios, túneis, etc.), sendo a sua malha numérica retilínea. Além disso, malhas uniformes são preferíveis para modelos LES, enquanto o procedimento de malha escalonada (*staggered-grid*) é empregado para facilitar o acoplamento pressão-velocidade.

As equações fundamentais são discretizadas no domínio de cálculo usando o método de diferenças finitas com precisão de segunda ordem para os elementos que compõem a malha tridimensional uniformemente espaçada.

2.3. O formalismo LES

As equações de simulações de grandes escalas são derivadas de um filtro espacial de largura Δ , aplicada nas equações de conservação de massa, energia e quantidade de movimento.

De uma maneira simplificada, a operação pode ser definida entre uma variável a ser filtrada (ϕ), e a função filtro (G), expressa da seguinte forma:

$$\bar{\phi}(x, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} G(x - \xi, \Delta) \phi(x, t) d^3\xi \quad (2.1)$$

sendo Δ o tamanho característico do filtro, x o vetor posição, ξ é um vetor arbitrário de interligação. No FDS, a largura do filtro especial é considerada a raiz cúbica das dimensões da célula, $\Delta = (\delta_x \delta_y \delta_z)^{1/3}$.

2.4. Aproximação de espécies aglomeradas

Segundo McGrattan et al., 2017a, para viabilizar as simulações, o FDS limita o número de combustível a um, e o número de reações na maioria das vezes a uma ou duas, mas ainda incluindo o cálculo de concentrações de combustível, O_2 , CO_2 , H_2O , CO , N_2 e fuligem. Presumindo uma reação explícita de etapa única, apenas duas equações de transporte devem ser resolvidas (uma para o combustível e outra para os produtos), essa aproximação reduz a demanda computacional do sistema químico como um todo, combinando espécies que transportam e reagem em conjunto. Em problemas envolvendo incêndio, as espécies primitivas são reunidas em grupos de reações, sendo uma reação simples expressa por:



A equação de transporte para cada espécie aglomerada é expressa por:

$$\frac{\partial(\rho Z_\alpha)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho Z_\alpha \vec{u}) = \vec{\nabla} \cdot (\rho D_\alpha \vec{\nabla} Z_\alpha) + \dot{m}''''_\alpha + \dot{m}''''_{b,\alpha} \quad (2.3)$$

onde D_α é o coeficiente de difusão da espécie aglomerada α , Z_α é a fração mássica da espécie aglomerada α , \dot{m}''''_α é a taxa de produção (por reações químicas) em massa por unidade de volume da espécie aglomerada α e $\dot{m}''''_{b,\alpha}$ representa a adição de massa devido às gotículas de evaporação ou outras partículas da escala sub-malha.

O coeficiente de difusão (D_α) é obtido através da soma das viscosidades molecular e turbulenta dividida pelo número de Schmidt turbulento ($(\mu + \mu_t)S_{ct}$), sendo o número de

Schmidt turbulento constante com valor de 0,5 (McGrattan et al., 2017a). A massa específica é obtida por $\rho = \sum(\rho Z)_\alpha$.

2.5. Aproximação de baixo número de Mach

Outra importante hipótese do FDS é a aproximação de baixo número de Mach. Segundo Rehm e Baum (1978, *apud* McGrattan et al., 2017a), para escoamentos de baixa velocidade, a pressão pode ser decomposta em uma pressão de fundo $\bar{p}(z, t)$ e uma perturbação $\tilde{p}(x, y, z, t)$. A pressão de fundo é função da coordenada espacial na direção da gravidade (z), de modo que a estratificação da atmosfera é incluída na pressão de fundo, enquanto que a perturbação \tilde{p} coordena o movimento do fluido.

O propósito de decompor a pressão é que, de acordo com McGrattan et al., 2017a, para escoamentos com baixos números de Mach ($Ma < 0,3$), pode-se assumir que a temperatura e a massa específica são inversamente proporcionais. Assim, a equação de estado pode ser escrita como:

$$\bar{p} = \rho T R \sum_\alpha \frac{Z_\alpha}{W_\alpha} = \frac{pRT}{\bar{W}} \quad (2.7)$$

onde \bar{W} é o peso molecular da mistura, T é a temperatura, R é a constante universal de gases ideais e ρ é a massa específica.

Para McGrattan et al., 2017a, a segunda consequência da aproximação para baixos números de Mach é que a energia interna e a entalpia podem ser relacionadas em termos da pressão de fundo:

$$h = e + \frac{\bar{p}}{\rho} \quad (2.8)$$

onde e é a energia interna e h é a entalpia. Sendo assim, a equação da conservação de energia pode ser escrita em termos da entalpia sensível h_s , da seguinte forma:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h_s) + \vec{\nabla} \cdot (\rho h_s \vec{u}) = \frac{D\bar{p}}{Dt} + \dot{q}''' + \dot{q}_b''' - \vec{\nabla} \cdot \dot{q}'' \quad (2.9)$$

Na Equação (2.9), ρ é a massa específica, t é o tempo, \vec{u} é o vetor velocidade, h_s é a entalpia sensível, \bar{p} é a pressão de fundo, \dot{q}''' é a taxa de liberação de calor de uma reação

química, \dot{q}_b''' é a energia transferida para partículas e gotículas de escala sub-malha, $\dot{\mathbf{q}}''$ representa o fluxo de calor condutivo, difusivo e radiativo. Deve-se observar que o *software* FDS não resolve explicitamente a Equação 2.9, mas a resolve através do divergente de velocidade, conforme a seguinte equação:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = \frac{1}{\rho h_s} \left[\frac{D}{Dt} (\bar{p} - \rho h_s) + \dot{q}''' + \dot{q}_r''' + \dot{q}_b''' - \vec{\nabla} \cdot \dot{\mathbf{q}}'' \right] \quad (2.10)$$

De acordo com McGrattan et al., 2017a, uma vez assumido baixo número de Mach, o divergente da velocidade desempenha um importante papel no esquema geral da solução, tendo dois propósitos: filtrar ondas acústicas, de modo que o passo de tempo no algoritmo numérico seja limitado apenas pela velocidade do escoamento, e não pela velocidade do som, e o outro é a redução no número de variáveis dependentes no sistema de equações.

2.6 Modelagem da combustão

O *software* FDS resolve as reações de combustão usando a premissa “misturado = queimado”, a qual considera a reação infinitamente rápida, limitada pela mistura turbulenta, das espécies aglomeradas. Assim, o termo fonte médio das reações químicas do combustível (\dot{m}_F''') é modelado usando o *Eddy Dissipation Concept* (EDC), de Magnussen e Hjertager, 1977 (*apud* McGrattan et al., 2017a):

$$\dot{m}_F''' = -\rho \frac{\min(Z_F, Z_A/S)}{\tau_{min}} \quad (2.11)$$

onde Z_F e Z_A são as frações mássicas das espécies aglomeradas de combustível (subscrito F) e ar (subscrito A), S é o coeficiente estequiométrico mássico para o ar e τ_{min} é uma escala de tempo para a mistura.

2.7 Modelagem da radiação

O fluxo de calor radiativo é calculado através da Equação de Transferência Radiativa (RTE - *Radiative Transfer Equation*) para gases que não espalham. Para McGrattan et al., 2017a em simulações práticas, a dependência espectral da RTE não pode ser resolvida com precisão, em vez disso, o espectro da radiação é dividido em um número relativamente pequeno de bandas e

uma RTE separada é derivada para cada banda. Sendo a RTE específica para cada banda para um gás que não espalha radiação térmica dada por:

$$S \cdot \nabla I_n = B_n(x) - \kappa_n(x) I_n(x, s), \quad n = 1 \dots N \quad (2.12)$$

na qual I_n é a intensidade integrada sobre a banda n , s é o vetor de direção da intensidade, κ_n é o coeficiente de absorção médio apropriado para a banda e $B_n(x)$ é o termo fonte de emissão para a banda n . Quando as intensidades correspondentes às bandas são conhecidas, a intensidade total é calculada da seguinte forma:

$$I(x, s) = \sum_{n=1}^N I_n(x, s) \quad (2.13)$$

O termo da fonte de emissão de radiação para a banda n é dado por:

$$B_n(x) = \kappa_n(x) I_{b,n}(x) \quad (2.14)$$

onde $I_{b,n}$ é a fração da radiação do corpo negro na temperatura $T(x)$, dada por:

$$I_{b,n}(x) = F_n(\lambda_{min}, \lambda_{max}) \sigma [T(x)]^4 / \pi \quad (2.15)$$

sendo F_n o fator de forma e σ é a constante de Stefan-Boltzmann. Mesmo quando um pequeno número de bandas é considerado, a solução de várias RTEs consome muito tempo, portanto, para simplificação, pode-se fazer a suposição de gás cinza, a qual foi empregada neste trabalho.

McGrattan et al., 2017a, afirmam que na maioria dos cenários de incêndio em grande escala, a fuligem é o produto de combustão mais importante, controlando o processo de transferência de calor por radiação; como o espectro de radiação da fuligem é contínuo, é possível supor que a mistura gasosa se comporta como um meio cinza. A dependência espectral é então agrupada em um coeficiente de absorção ($N = 1$) e o termo fonte é fornecido pela intensidade de radiação do corpo negro (Ludwig et al., 1973, *apud* McGrattan et al., 2017a):

$$I_b(x) = \frac{\sigma [T(x)]}{4\pi} \quad (2.16)$$

O termo de perda de calor por radiação da equação da energia fica (para $N = 1$, gás cinza):

$$\dot{q}_r''' \equiv -\vec{\nabla} \cdot \dot{q}_r''(x) = \kappa(x)[U(x) - 4\pi I_b(x)]; U(x) = \int_{4\pi} I(x, s') ds' \quad (2.17)$$

ou para N bandas:

$$-\vec{\nabla} \cdot q_r'' = \sum_{n=1}^N \kappa(x) U_n(x) - 4\pi B_n(x); U_n(x) = \int_{4\pi} I(x, s') ds' \quad (2.18)$$

O coeficiente de absorção médio, κ , é obtido a partir de um modelo de banda estreita, denominado RadCal, e a RTE é resolvida usando um método de volumes finitos (MVF), considerando aproximadamente 100 ângulos discretos.

2.8 Modelagem da turbulência

A modelagem da turbulência é realizada com a metodologia de Simulação de Grandes Escalas (LES – *Large Eddy Simulation*). O equacionamento desta metodologia é derivado pela aplicação de um filtro espacial, parametrizado pela largura (Δ), nas equações de conservação de massa, momento e energia (McGrattan et al., 2017a), conforme visto na seção 2.3.

O principal objetivo da metodologia LES é avaliar os valores médios nas células de massa, momento e energia, enquanto também considera os efeitos químicos e de transporte na escala sub-malha. A equação do momento filtrada na metodologia LES fica:

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} + \bar{\rho} g_i + \bar{f}_{d,i} + \overline{m_b'''} \tilde{u}_{b,i} \quad (2.19)$$

Para calcular a correlação $\tilde{u}_i \tilde{u}_j$, é definida a tensão sub-malha:

$$\tau_{ij}^{sgs} = \bar{\rho} (\tilde{u}_i \tilde{u}_j - \tilde{u}_i \tilde{u}_j) \quad (2.20)$$

A equação de momento na metodologia LES fica:

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}^{sgs}}{\partial x_j} + \bar{\rho} g_i + \bar{f}_{a,i} + \overline{m_b'''} \tilde{u}_{b_i} \quad (2.21)$$

2.8.1 Viscosidade Turbulenta

No presente trabalho foi empregado o modelo padrão do FDS para obtenção da viscosidade turbulenta μ_t , denominado modelo de Deardorff (Deardorff, 1980, *apud* McGrattan et al., 2017a). Segundo McGrattan et al., 2017a, o modelo de Deardorff para viscosidade turbulenta foi escolhido como padrão do FDS, via comparação com uma grande variedade de experimentos em grande escala e é dada por:

$$\mu_t = \rho C_V \Delta \sqrt{k_{sgs}}; k_{sgs} = \frac{1}{2} ((\bar{u} - \hat{u})^2 + (\bar{v} - \hat{v})^2 + (\bar{w} - \hat{w})^2) \quad (2.22)$$

onde \bar{u} é o valor médio de u no centro da célula da malha e \hat{u} é uma média ponderada de u em relação as células adjacentes:

$$\bar{u}_{ijk} = \frac{\bar{u}_{ijk} + \bar{u}_{i-1,jk}}{2}; \hat{u}_{ijk} = \frac{\bar{u}_{ijk}}{2} + \frac{\bar{u}_{i-1,jk} + \bar{u}_{i+1,jk}}{4} \quad (2.23)$$

nos quais, os termos \hat{v} e \hat{w} são definidos de maneira semelhante e a constante do modelo é definida com o valor de $C_V = 0,1$, usual na literatura (Pope, 2000, *apud* McGrattan et al., 2017a).

2.9 Taxa de liberação de calor

Segundo McGrattan et al., 2017a, em situações de incêndio, onde deseja-se prever o transporte de fumaça e calor (como é o caso do presente trabalho), a taxa de liberação de calor é um parâmetro de entrada no FDS, e a mesma é implementada como um fluxo de massa de combustível em uma determinada superfície sólida, descrita na equação abaixo:

$$\dot{m}_f = \frac{f(t)q''}{\Delta H_c} \quad (2.24)$$

na qual q'' é a taxa de liberação de calor, $f(t)$ é a rampa de tempo e ΔH_c é o calor de combustão na fase gasosa.

2.10 Passo de tempo e procedimento de solução

Uma vez que o FDS emprega um esquema temporal explícito, o critério de estabilidade de solução numérica pode ser frequentemente entendido em termos da utilização de um passo de tempo (δt) para manter condições fisicamente realísticas (McGrattan et al., 2017a).

Para McGrattan et al., 2017b, o passo de tempo é usualmente definido automaticamente no FDS pela divisão do tamanho de uma célula da malha pela velocidade característica do escoamento. Ao longo da simulação, δt é constantemente ajustado para atender à condição CFL (Courant-Friedrichs-Lewy). O valor padrão de δt é dado por:

$$\delta t = 5 \frac{(\delta x \cdot \delta y \cdot \delta z)^{1/3}}{\sqrt{gH}} \quad (2.25)$$

onde δx , δy e δz são a menor dimensão da malha nas direções coordenadas (x,y,z) , H é a altura do domínio computacional e g é a aceleração gravitacional. A condição CFL é dada por:

$$CFL = \delta t \frac{\|u\|}{\delta x} \approx 1 \quad (2.26)$$

As condições de CFL estabelecidas por McGrattan et al., 2017b, estabelecem que um elemento de fluido não pode atravessar mais do que uma célula dentro do espaço de tempo. Se fosse empregar um esquema implícito, por exemplo, com a intenção de usar passos de tempo 10 vezes superior que o limite CFL, os menores vórtices turbulento resolvíveis seriam aproximadamente 10 vezes o espaçamento da célula, o que limitaria a vantagem de usar LES.

Segundo McGrattan et al., 2017b, no final da primeira parte da atualização de tempo do preditor-corretor explícito, o intervalo de tempo é verificado, para garantir que está dentro dos limites de estabilidade apropriados. Se não estiver, ele é ajustado em 10% (para mais ou para menos), até que esteja dentro dos limites adequados, e então o passo preditor é reexecutado. O procedimento de solução avança as variáveis no tempo utilizando um esquema explícito preditor-corretor com precisão de segunda ordem.

3 MÉTODOS MATEMÁTICOS PARA DETERMINAÇÃO DA ALTURA DA CAMADA DE FUMAÇA

Neste Capítulo são apresentados os quatro diferentes métodos matemáticos utilizados neste trabalho para determinar a altura da camada de fumaça, sendo eles:

- N -percentual
- Frequência de flutuação
- Relação integral
- Método padrão do FDS

O Capítulo também aborda sobre o processamento de dados referentes ao perfil de temperaturas nos compartimentos, necessário para o emprego nos métodos matemáticos descritos.

3.1 Método N -percentual

O método N -percentual (*N -percentage rule*), proposto por Cooper et al., 1982, é um método de características simples amplamente utilizado (por exemplo: He et al., 1998; Chow, 2009; Tilley et al., 2011; Zhang et al., 2012; Lai et al., 2013; Rafinazari et al., 2017; Li et al., 2017; Gutiérrez-Montes et al., 2008). Este método define que a interface da camada de fumaça está localizada em certa altura em que a diferença entre a temperatura em um ponto (o que determina tal interface, T_i) e a temperatura ambiente (T_∞) é igual a um percentual da diferença entre a temperatura máxima observada (T_{max}) e a temperatura ambiente (T_∞):

$$T_i - T_\infty = (T_{max} - T_\infty) \cdot \frac{N}{100} \quad (3.1)$$

onde T_i é a temperatura num dado ponto da coluna de termopares, T_∞ é a temperatura ambiente, T_{max} é a temperatura máxima obtida na coluna de termopares, e N é uma constante.

Embora seja um método amplamente utilizado, a seleção da constante N pode gerar dúvidas, uma vez que este parâmetro é uma escolha do pesquisador/engenheiro, não estando diretamente vinculada a propriedades físicas e geométricas dos experimentos.

A Tabela 3.1 indica trabalhos anteriores e os valores utilizados para a constante N . No presente trabalho, são utilizados valores de $N = 10, 20, 30, 40$ e 50% para todos os cenários de

incêndios estudados, para fins de comparação de resultados e determinação do valor de N mais adequado.

Tabela 3.1 – Valores do fator N -percentual empregados na literatura.

Referência	Fator N	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
Lai et al. (2013)	30	Edificação	Experimento em escala real
Rafinazari <i>et al</i> (2017)	20	Átrio	Experimento em escala real
Li et al. (2017)	40	Multi sala	Experimento em escala real
Gutiérrez-Montes et al. (2008)	10/20/30	Átrio	Simulação Numérica
Huang et al. (2018)	80/90	Túnel	Experimento

3.2 Método da relação integral

Proposto por He et al., 1998, o método da relação integral foi desenvolvido para eliminar a subjetividade e o empirismo de outros métodos existentes até aquele momento, baseando-se na minimização de certas características e parâmetros. O método da relação integral divide o perfil de temperatura em duas regiões distintas, uma região rica em ar, posicionada na parte inferior do compartimento, e outra rica em fumaça, posicionada na parte superior do compartimento. As Equações 3.2-3.5 são empregadas neste método:

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

$$r_l = \frac{1}{H_i'^2} \int_0^{H_i'} T(z) dz \int_0^{H_i'} \frac{1}{T(z)} dz \quad (3.3)$$

$$r(H_i') = r_l + r_u \quad (3.4)$$

$$r(H_i') = \frac{1}{(H - H_i')^2} \int_{H_i'}^H T(z) dz \int_{H_i'}^H \frac{1}{T(z)} dz + \frac{1}{H_i'^2} \int_0^{H_i'} T(z) dz \int_0^{H_i'} \frac{1}{T(z)} dz \quad (3.5)$$

onde H_i é uma possível altura de interface, $T(z)$ é a função temperatura (sendo os valores de temperatura medidos ou calculados numericamente ao longo da posição vertical do experimento e então são ajustados em uma equação), r é a relação integral, r_u e r_l correspondem à relação integral da zona de baixo e da zona de cima do compartimento.

Para determinar a altura da camada de fumaça (altura de interface), deve-se encontrar o menor valor de r , variando a possível altura de interface H_i entre $[0,H]$, até encontrar o menor resultado, correspondente à altura da camada de fumaça. No presente trabalho, os valores da altura da camada de fumaça foram encontrados através de uma rotina de cálculos no *software* Matlab, entrando com a função temperatura $T(z)$ e as possíveis alturas de interface $[0,H]$, resolvendo então as Equações 3.2-3.5 até encontrar o menor valor r .

Diferente do método N -percentual, este método é mais robusto por não depender da seleção de constantes.

3.3 Método da frequência de flutuação

Gao et al., 2016, propôs o método da frequência de flutuação (*buoyancy frequency*), tendo sido previamente utilizado em estudos de dinâmica atmosférica, oceanografia e geofísica. A Equação 3.6 é utilizada neste método:

$$N_L = \left(-gT_\infty \frac{\delta(1/T(z))}{\delta z} \Big|_{z_i} \right)^{1/2} \quad (3.6)$$

Na Equação (3.6), N_L é a frequência de flutuação na direção vertical, g é a aceleração gravitacional e T_∞ é a temperatura ambiente. Sendo N_L maior quanto maior for a diferença de densidade, para encontrar o valor da altura de interface H_i , avalia-se o valor de N_L^2 através da variação da altura z_i entre $[0,H]$, de tal forma que a altura da interface será o valor de z_i que resultar no maior valor de N_L^2 . Para encontrar o valor da altura da camada de fumaça foi implementada uma rotina de cálculos no *Excel*, com diferentes alturas de interface, permitindo encontrar o valor de H_i .

3.4 Método padrão do FDS

O método padrão empregado pelo *software* FDS, apresentado em McGrattan et al., 2001, considera duas integrais da função ajustada da temperatura ao longo da altura do compartimento, Equações 3.7 e 3.8, sendo então a altura da camada de fumaça obtida através da Equação 3.9:

$$I_1 = \int_0^H T(z) dz \quad (3.7)$$

$$I_2 = \int_0^H \frac{1}{T(z)} dz \quad (3.8)$$

$$H_i = \frac{T_l(I_1 I_2 - H^2)}{I_1 + I_2 T_l^2 - 2I_2 H} \quad (3.9)$$

onde I_1 e I_2 são integrais da função temperatura, e T_l é a temperatura do volume de controle mais próximo do chão.

3.5 Ajuste de curva $T(z)$

Após realizar as simulações em regime transiente de cada cenário de incêndio, os perfis de temperatura obtidos através do *software* FDS são pós-processados com diferentes métodos para obter a altura da camada de fumaça. Os “termopares numéricos” estão posicionados no *software* FDS nas mesmas posições que os termopares reais nos experimentos, para efeito de comparação de resultados. Os perfis de temperaturas, $T(z)$, necessários nos métodos da relação integral e da frequência de flutuação, são obtidos a partir de ajuste de curva usando os valores de temperaturas obtidos com estes “termopares numéricos”, sendo a forma da curva dada pela seguinte equação:

$$T(z) = \left(\frac{ab + cz^d}{b + z^d} \right) \quad (3.10)$$

onde a , b , c e d são constantes calculadas em cada instante de tempo em que a altura da camada de fumaça estiver sendo analisada e z é a coordenada vertical. Os perfis de temperaturas $T(z)$ foram obtidos no presente trabalho com o auxílio do *software Matlab*.

4 CENÁRIOS DE INCÊNDIO EMPREGADOS NA AVALIAÇÃO DOS MÉTODOS MATEMÁTICOS

Este Capítulo apresenta os quatro cenários de incêndio utilizados neste trabalho para avaliar os métodos de cálculo da altura da camada de fumaça, abordando detalhes sobre diferentes subcasos que cada cenário possa conter, bem como explicando as aproximações feitas no setup experimental para possibilitar a sua simulação no FDS.

4.1 Túnel em escala reduzida

Neste trabalho foi reproduzido numericamente o túnel em escala 1/6 construído por Gao et al., 2016, com a utilização do *software* FDS. O túnel possui 6 m de comprimento, 2 m de largura e 0,9 m de altura, sendo composto por uma chaminé vertical medindo 0,3 m × 0,3 m de seção transversal e 0,8 m de altura, localizada no teto do túnel, a 3,2 m da sua face lateral esquerda, sendo as faces direita e esquerda do túnel abertas. A Figura 4.1 mostra o túnel utilizado no experimento (Gao et al., 2016).



Figura 4.1 – Túnel em escala reduzida utilizado por Gao et al., 2016.

O material de construção do túnel são placas a prova de fogo com espessura de 8 mm nas faces inferior, superior e posterior do corpo principal; para visualização do escoamento no interior do túnel, as 4 faces da chaminé e a face anterior do túnel são feitas de vidro de 6 mm de espessura. No experimento, o vidro resistente ao fogo foi utilizado Pyran S E(G) 30-120 além de placas a prova de fogo *Knauf Insulation DRS Functional Fire Board*. A implementação

destes materiais no FDS foi feita através de suas propriedades termofísicas, descritas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Propriedades termofísicas dos materiais de construção do túnel.

Material	Condutividade térmica (W/m.K)	Calor específico (kJ/kg.K)	Massa específica (kg/m ³)
Vidro	1	0,835	1600
Placa	0,04	0,840	200

A fonte de incêndio era uma piscina de n-heptano de 1 cm de profundidade com 2 tamanhos diferentes (ou seja, duas taxas de liberação de calor), sempre posicionadas a 1,2 m da face esquerda do túnel, centralizadas transversalmente. Para análise da temperatura uma coluna com 32 termopares foi posicionada a 5 m da face esquerda do túnel, posicionadas entre as alturas de 0,56-0,88 m acima do chão. Durante a simulação no FDS, devido ao grau de refinamento da malha, não foi possível usar 32 termopares numéricos, assim variou-se o número de termopares entre 8, para malhas menos refinadas ($\delta x = 0,08$ m), e 16, para malhas mais refinadas. A Figura 4.2 demonstra o layout do experimento numérico no FDS.

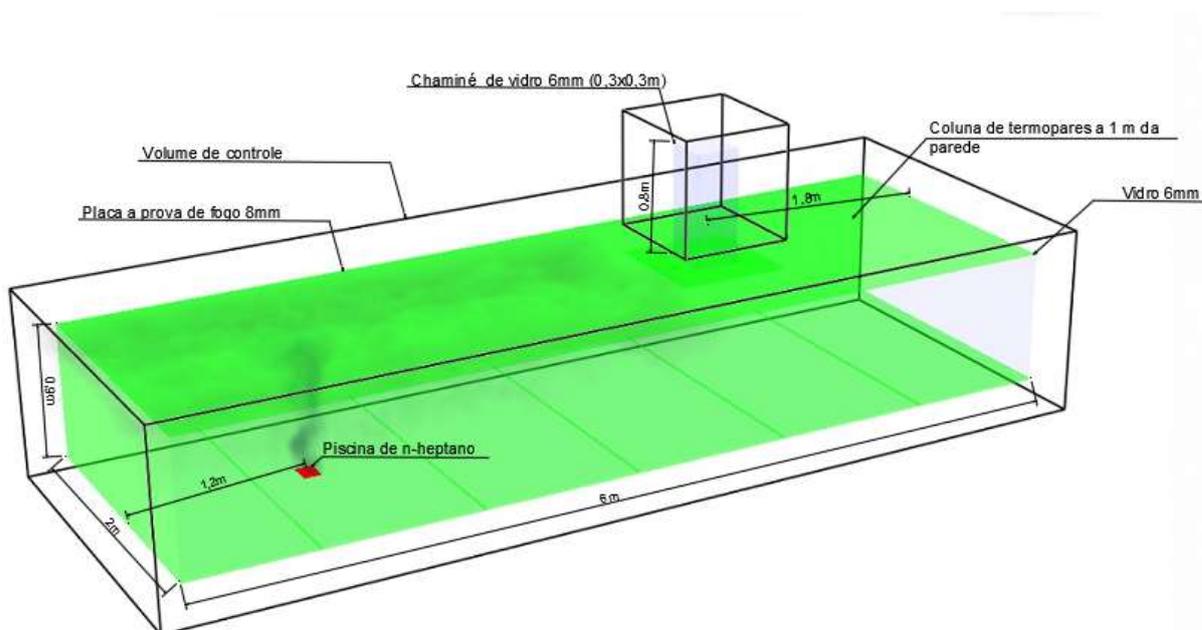


Figura 4.2 – Domínio de cálculo do túnel de Gao et al.,2016, no *software* FDS.

Assim como nos experimentos em laboratório, quatro casos distintos foram utilizados na simulação do túnel de Gao et al., 2016, sendo a temperatura ambiente, tamanho da piscina e condições do experimento/simulação descritos na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Casos propostos

Caso	Temperatura Ambiente (°C)	Tamanho da piscina (cm × cm)	Condições Experimentais
Túnel 1	16	10 × 15	Sem exaustão de fumaça (sem chaminé)
Túnel 2	15	15 × 20	Sem exaustão de fumaça (sem chaminé)
Túnel 3	15	10 × 15	Exaustão natural de fumaça (com chaminé)
Túnel 4	17	15 × 20	Exaustão natural de fumaça (com chaminé)

Para a presente simulação utilizou-se como parâmetro de entrada, além dos dados fornecidos na Tabela 4.2, a função do FDS chamada *mass loss rate per unit area*, sendo a massa de combustível queimada entre dois instantes de tempo na simulação é a mesma que a variação da massa residual reportada por Gao et al., 2016. A Figura 4.3 apresenta a massa residual de combustível em função do tempo.

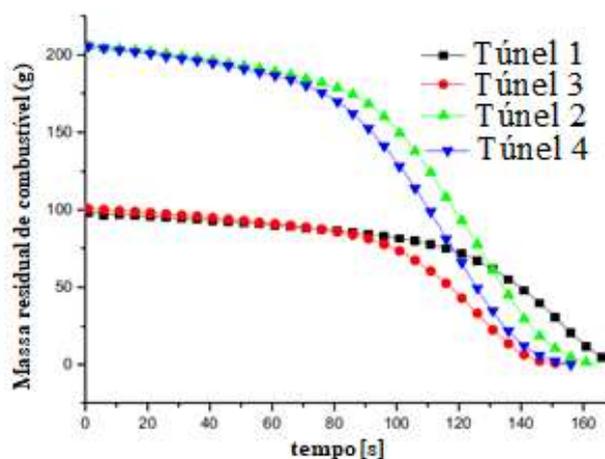


Figura 4.3– Massa residual de combustível em função do tempo [adaptada de Gao et al.,2016].

A Figura 4.4 mostra um exemplo ilustrativo de resultado obtido com o *software* FDS para a temperatura no plano central longitudinal do túnel, para o caso do *Túnel 4* no tempo de

80 s, enquanto a Figura 4.5 mostra a camada de fumaça após 100 s da ignição da poça de n-heptano, para o caso do *Túnel 2*.

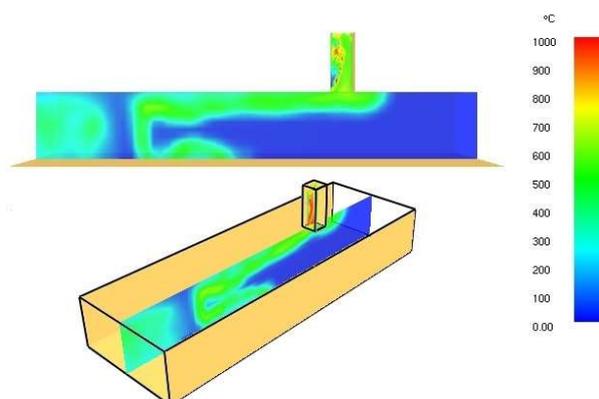


Figura 4.4 – Campo de temperatura no túnel obtido com o *software* FDS, para o caso do *Túnel 4* no tempo 80 s.

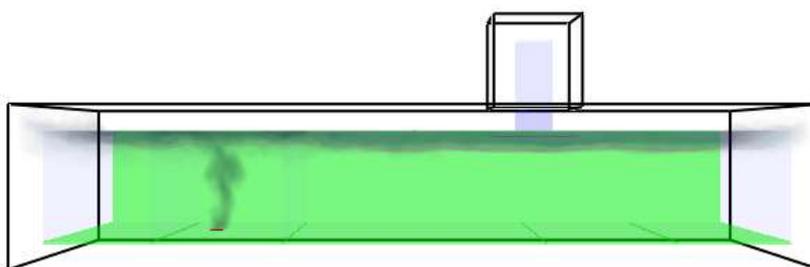


Figura 4.5 – Campo de distribuição de fumaça após 100 segundos de simulação, para o caso do *Túnel 2*.

Com a simulação, são obtidos valores de temperaturas nos pontos referentes aos termopares, os quais são usados no ajuste de curva para obter o perfil de temperatura $T(z)$, o qual é utilizado para determinar a altura da camada de fumaça pelos métodos de frequência de flutuação e relação integral, enquanto para o método N -percentual são utilizadas as temperaturas diretamente obtidas pelos termopares. A altura da camada de fumaça do método padrão do FDS é obtida diretamente pelo *software*, não sendo necessário qualquer pós-processamento.

A Tabela 4.3 mostra os períodos de tempo em que Gao et al., 2016, analisam a altura da camada de fumaça para cada caso, utilizados neste trabalho para comparação com os resultados obtidos no *software* FDS.

Tabela 4.3 – Períodos de tempo usados na análise da altura da fumaça no experimento de Gao et al., 2016.

Caso Túnel	Período analisado(s)
1 e 3	40 até 180
2 e 4	40 até 160

4.2 Edificação residencial

A edificação residencial estudada experimentalmente por Lai et al., 2013, mostrada na Figura 4.6, possui três salas (duas no piso térreo e uma no piso superior), sendo as salas do piso térreo foco de estudo no presente trabalho. Essa edificação também dispõe de uma chaminé de aço, porém esta chaminé foi considerada fechada nas simulações, assim como nos experimentos. A sala 1 possui 5,4 m de largura, 5,4 m de comprimento e 3,0 m de altura, com uma abertura para o ambiente externo de 2,0 m de altura e 0,8 m de largura, e outra abertura para a sala 2 de mesmas dimensões. A sala 2 tem 5,4 m de largura e 3,6 m de comprimento, possui a mesma altura que a sala 1.



Figura 4.6 – Edificação residencial [Fonte: Lai et al.,2013]

Assim como nos experimentos, as simulações consideraram paredes de tijolo maciço de 0,15 m de espessura, com condutividade térmica de 0,69 W/(m.K), calor específico de 0,84 kJ/(kg.K) e massa específica de 1600 kg/m³. Uma representação geométrica deste cenário, assim como as posições das árvores de termopares, encontra-se na Figura 4.7.

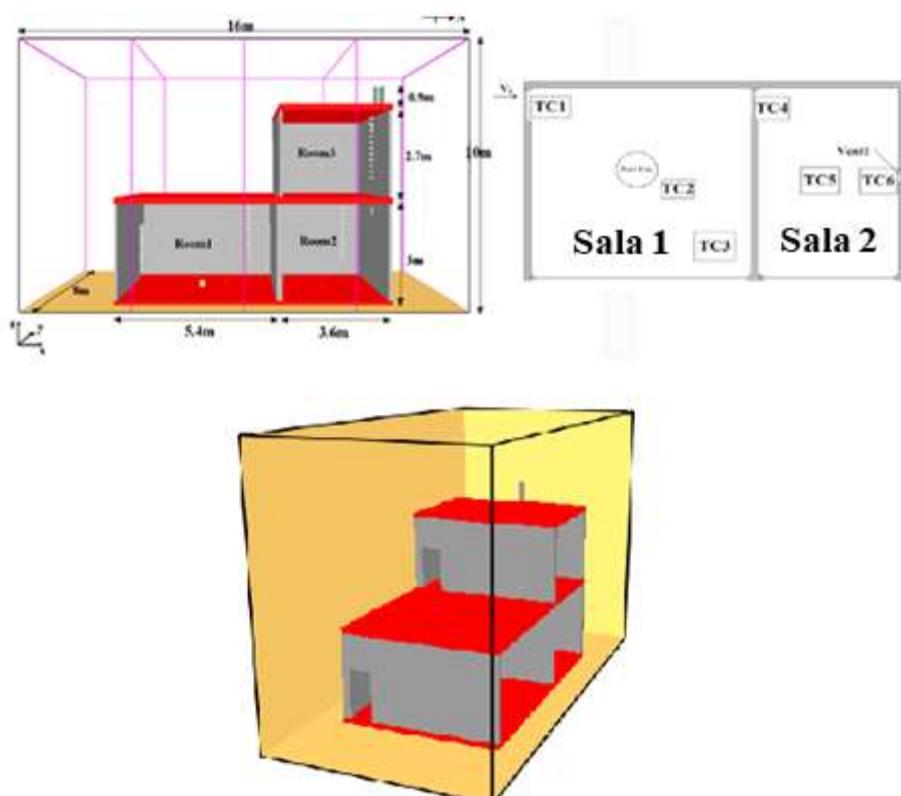


Figura 4.7 – Representação geométrica da *Edificação residencial* [adaptada de Lai et al., 2013]

A árvore de termopares 1 (TC1) está localizada na entrada da sala 1, a árvore de termopares 2 (TC2) está localizada um pouco afastada do centro da sala 1, e a árvore de termopares 3 (TC3) está localizada no canto inferior da sala 1. Na sala 2 (adjacente à sala 1) existem 3 árvores de termopares, uma localizada na entrada da sala (TC4), outra praticamente no meio da sala (TC5) e outra perto da chaminé (TC6). Cada árvore de termopares contém 11 termopares, seja nas simulações numéricas, seja nos experimentos reais, distribuídos em posições verticais do chão até o teto conforme mostrado na Figura 4.8.

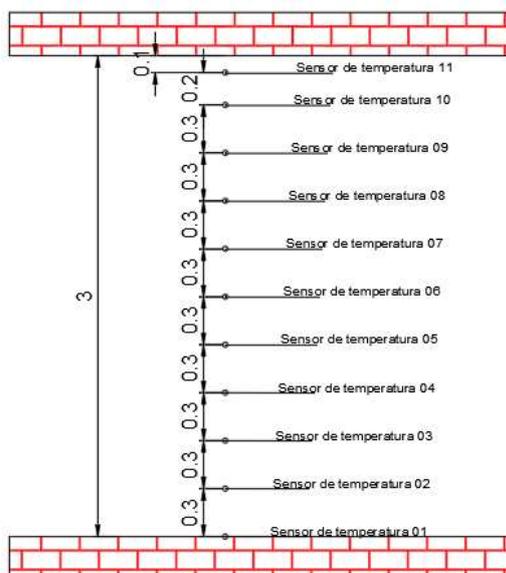


Figura 4.8 – Posições dos termopares para o cenário da *Edificação residencial* [adaptado de Lai et al., 2013].

O combustível usado nos experimentos foi n-octano, assim, seguindo as recomendações de Lai et al., 2013, nas simulações foi considerada gasolina (C_8H_{18}), com poder calorífico de 44400 kJ/kg e carga de fuligem (*soot yield*) de 0,1 g_{soot}/kg_{fuel} , sendo considerada uma piscina de 26 cm de diâmetro, com uma taxa de liberação de calor de 50 kW. A temperatura ambiente inicial considerada nas simulações foi de 27 °C.

As simulações desse cenário foram divididas em dois diferentes casos, *Edificação residencial 1* e *Edificação residencial 2*. No caso da *Edificação residencial 1*, a piscina de fogo encontra-se no meio da sala 1, conforme representado na Figura 4.7, e no caso da *Edificação residencial 2* a piscina de fogo encontra-se no meio da sala 2. A Tabela 4.4 fornece os dados considerados para cada caso da edificação residencial, tais como período de tempo e árvore de termopares analisados. Deve-se observar que no caso *Edificação residencial 1*, a análise das árvores TC1 e TC3 fornecem a altura da camada de fumaça na sala do fogo (sala 1), enquanto a análise das árvores TC5 e TC6 fornecem a altura da camada de fumaça na sala sem fogo (sala 2). Analogamente, no caso *Edificação residencial 2*, a análise das árvores TC4 e TC6 fornecem a altura da camada de fumaça na sala do fogo (sala 2), enquanto a análise das árvores TC1, TC2 e TC3 fornecem a altura da camada de fumaça na sala sem fogo (sala 1).

Tabela 4.4 – Casos analisados para os cenários de *Edificação residencial*.

Caso	Termopar	Tempo (s)	Posição do fogo
<i>Edificação 1</i>	TC1	0-600	Centro Sala 1
	TC3	0-600	
	TC5	0-400	
	TC6	0-400	
<i>Edificação 2</i>	TC1	0-600	Centro Sala 2
	TC2	0-400	
	TC3	0-400	
	TC4	0-300	
	TC6	0-300	

As Figuras 4.9 e 4.10 mostram exemplos ilustrativos de resultados obtidos no FDS para o enchimento de fumaça nos compartimentos e para o campo de temperaturas nos compartimentos, respectivamente, obtidos no tempo 395 s.

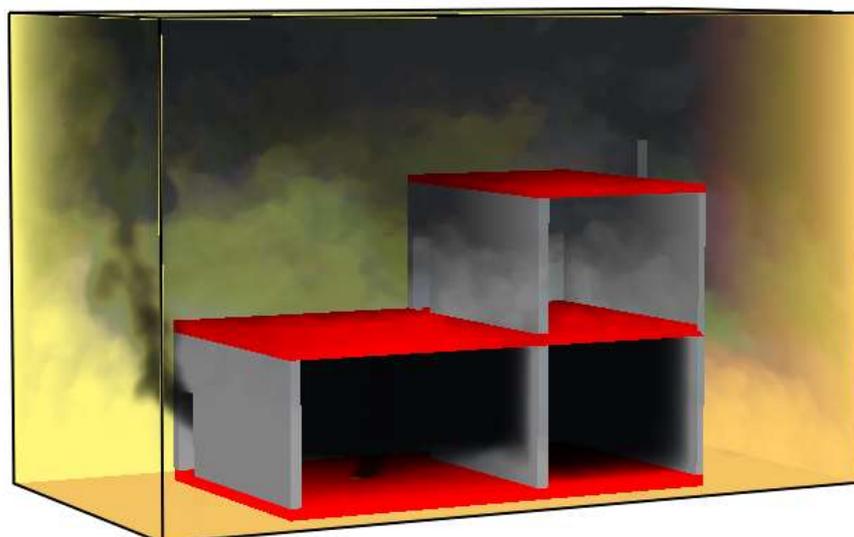


Figura 4.9 – *Edificação residencial 1* (fogo na sala 1): exemplo ilustrativo do enchimento de fumaça nos compartimentos obtido no FDS no tempo 395 s.

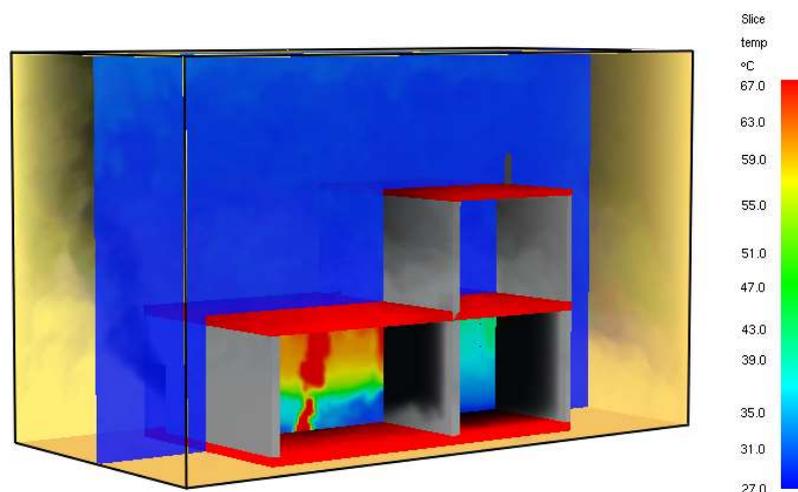


Figura 4.10 – *Edificação residencial 1* (fogo na sala 1): exemplo ilustrativo do campo de temperatura nos compartimentos obtido no FDS no tempo 395 s.

4.3 Átrio

O terceiro cenário de incêndio estudado baseia-se no átrio apresentado nos trabalhos de Li et al., 1999, e Qin et al., 2009. Segundo Qin et al., 2009, átrios são grandes espaços abertos criados para conectar uma ou uma série de aberturas ou pisos em grandes edifícios, sendo usualmente encontrados em shopping centers, hotéis, bancos e edifícios comerciais. Em caso de incêndio dentro de um átrio, a fumaça pode ser levada para todas as partes da edificação.

O átrio estudado possui dimensões externas de 27,6 m de comprimento, 18,1 m de largura e 30,6 m de altura. Suas dimensões internas são de 22,4 m de largura, 11,9 m de comprimento e 27,0 m de altura, sendo o material considerado concreto com condutividade térmica de 0,72 W/(m.K), calor específico 0,754 kJ/(kg.K) e massa específica de 2300 kg/m³. Possui duas portas de 4,0 m de comprimento e 2,0 m de largura no centro das paredes frontal e traseira. O átrio contém 20 sistemas de exaustão diferentes de 1,2 m × 1,2 m, sendo 12 janelas nas paredes e 8 aberturas no teto. Para o presente estudo é utilizado o modelo de validação estudado por Qin et al., 2009, na qual todas as portas e janelas estão fechadas, exceto uma abertura horizontal de 0,2 cm de altura.

Uma piscina de diesel de 2 m × 2 m foi considerada no centro do piso, com uma taxa de liberação de calor de 4 MW. A Figura 4.11 mostra uma representação esquemática do átrio.

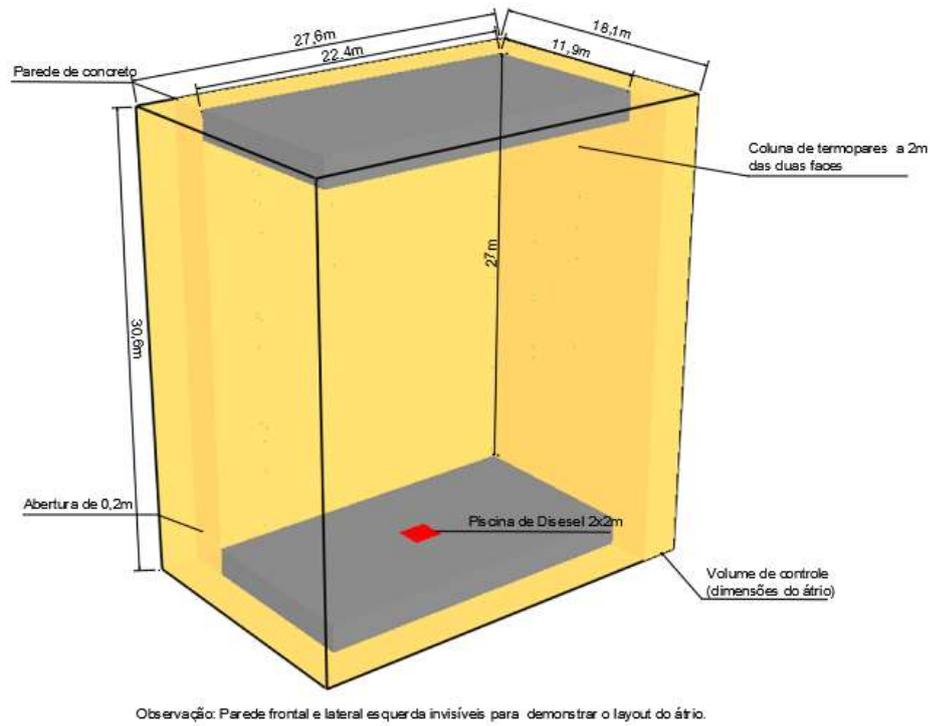


Figura 4.11 Modelo do *Átrio* [adaptada de Qin et al., 2009].

A árvore de termopares foi posicionada a 2 m de distância das paredes posterior e direita, conforme exibe a Figura 4.11, composta por 15 termopares posicionados entre o chão e o teto na direção vertical. A Figura 4.12 mostra a posição vertical dos termopares na árvore, do chão até o teto do átrio.

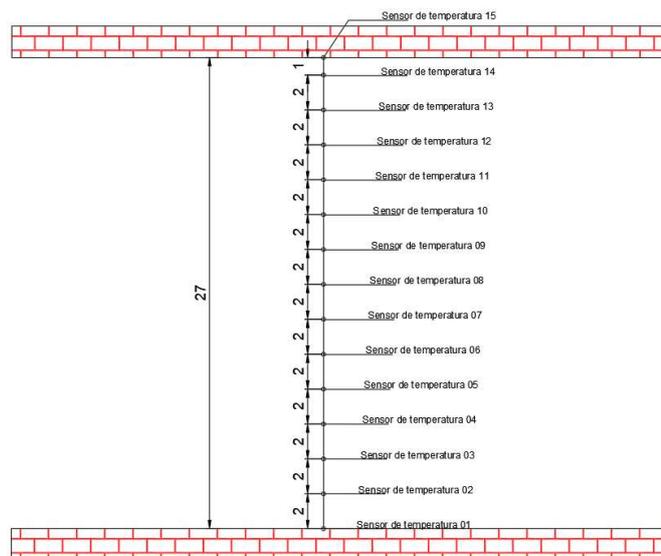


Figure 4.12 Posicionamento dos termopares para o cenário do *Átrio*.

Uma vez que este cenário foi previamente simulado por Qin et al., 2009, a malha utilizada no presente trabalho é a mesma de Qin et al., 2009, sendo posteriormente realizado o seu refinamento.

A Figura 4.13 apresenta um exemplo ilustrativo do campo de temperaturas no átrio obtido com o *software* FDS.

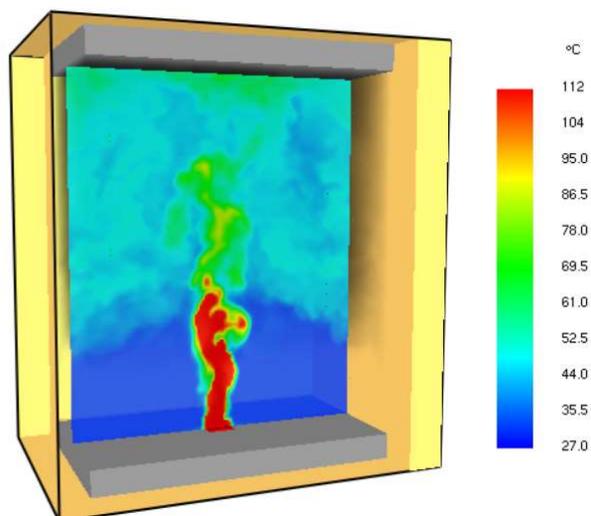


Figura 4.13 Exemplo ilustrativo do campo de temperatura no *Átrio*, em 90 s, obtido com o FDS.

4.4 Corredor subterrâneo

O quarto cenário de incêndio estudado é um *corredor subterrâneo*, similar a um túnel de grandes proporções, apresentado por Hu et al., 2005. A Figura 4.14 mostra uma foto do experimento no corredor (Hu et al., 2005).



Figura 4.14 *Corredor subterrâneo* [Fonte: Hu et al., 2005].

Para a simulação foram considerados 2 casos distintos, denominados nesta dissertação como *Corredor subterrâneo 1* e *Corredor subterrâneo 2*. O corredor possui 96 m de comprimento, 8 m de largura e 2,65 m de altura, sendo as paredes feitas de concreto com espessura de 0,5 m e condutividade térmica de 0,72 W/(m.K), calor específico 0,754 kJ/(kg.K) e massa específica de 2300 kg/m³. A Figura 4.15 mostra uma planta isométrica e a vista superior deste experimento.

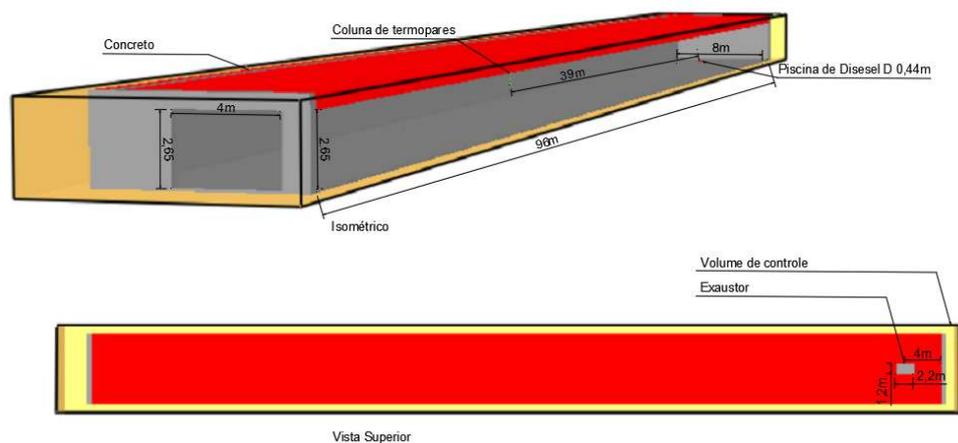


Figura 4.15 Representação esquemática do *Corredor subterrâneo* [adaptado de Hu et al., 2005].

O corredor possui uma abertura na posição sul de 4 m de largura e 2,65 m de altura. Para o combustível foi considerada uma poça de diesel de 0,44 m de diâmetro e taxa de liberação de calor de 0,8 MW, localizada a 9 m de distância da parede norte, centralizada transversalmente. A coluna de termopares está localizada a 39 m da poça, sendo composta por 5 sensores de temperatura nas alturas de 0,55 m, 0,95 m, 1,45 m, 1,95 m e 2,55 m. O corredor subterrâneo possui um sistema de exaustão localizado no teto???, a 4 m da fronteira norte, medindo 1,2 m × 2,2 m, com uma vazão de 43.000 m³/h. Os casos analisados estão descritos na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Dados utilizados na simulação do *corredor subterrâneo*

Cenário	Tempo de simulação (s)	Temperatura inicial (C°)	Tempo de início da operação do exaustor (s)
<i>Corredor subterrâneo 1</i>	450	28	130
<i>Corredor subterrâneo 2</i>	450	27	20

As Figuras 4.16 e 4.17 mostram exemplos ilustrativos obtidos com o FDS para o campo de temperaturas e para a distribuição de fumaça, respectivamente, no tempo 220 s após a ignição.

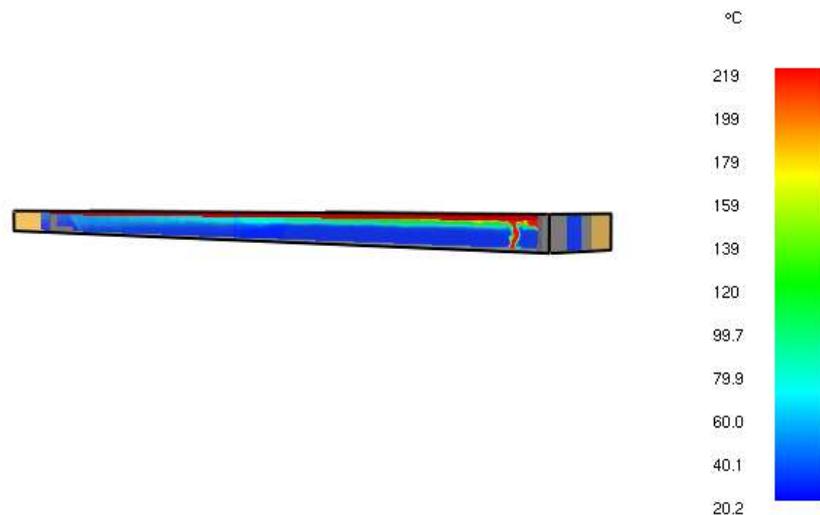


Figura 4.16. *Corredor subterrâneo*: exemplo ilustrativo do campo de temperatura obtido no FDS.

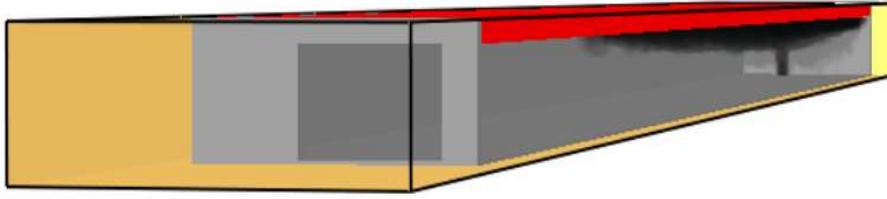


Figura 4.17. *Corredor subterrâneo*: exemplo ilustrativo da distribuição da fumaça obtida no FDS.

5 VALIDAÇÃO DOS MODELOS OBTIDOS NO *SOFTWARE* FDS PARA OS CENÁRIOS ESTUDADOS

Neste Capítulo é abordada a validação dos resultados obtidos com o *software* FDS para simulação dos cenários de incêndio experimentais descritos no Capítulo 4. Assim, este Capítulo apresenta o estudo de qualidade de malha para a simulação de cada um dos cenários e também a comparação de dados experimentais e resultados numéricos para perfis de temperatura.

5.1 Estudo de qualidade de malha

Segundo Dreisbach e McGrattan, 2007, o tamanho da malha é um parâmetro muito importante em simulações numéricas no FDS, sendo o erro de discretização do domínio diretamente proporcional ao tamanho da malha. Entretanto deve-se levar em conta que a redução do tamanho da malha leva a um aumento do tempo computacional devido ao aumento do número de volumes de controle (e conseqüentemente, do número de equações a serem resolvidas) e também à redução do passo de tempo (uma vez que o FDS emprega um esquema temporal explícito, onde a condição CFL deve ser respeitada a cada passo de tempo, sendo este proporcional ao tamanho da malha). Assim, ao realizar o estudo de qualidade de malha que será usada nas simulações, deve-se levar em consideração um equilíbrio entre o tamanho de malha e o custo computacional, não se esquecendo de quais são os parâmetros importantes para o estudo em questão, visto que, por exemplo, temperatura ou altura da camada de gases quentes em geral são parâmetros que não exigem uma malha numérica muito refinada, enquanto parâmetros como o fluxo de calor em alvos próximos ao fogo necessitam de malhas mais refinadas. Ainda, deve-se levar em conta que o tamanho da malha pode ser uniforme nas direções x - y - z (ou seja, $\delta x = \delta y = \delta z$) ou não, sendo recomendado que o formato dos volumes de controle seja o mais próximo possível de um cubo (ou seja, malha uniforme nas três direções), o que contribui para a estabilidade da solução numérica.

No presente trabalho, o estudo de malha é realizado usando a dimensão característica do fogo D^* , definida como (Dreisbach e McGrattan, 2007):

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} T_{\infty} c_p \sqrt{g}} \right)^{2/5} \quad (5.1)$$

em que \dot{Q} é a taxa de liberação de calor (kW), g é a aceleração gravitacional (m/s^2), ρ_∞ é a massa específica inicial do fluido ambiente (kg/m^3), T_∞ é a temperatura inicial do fluido ambiente (K), e c_p é o calor específico do fluido ($kJ/(kg \cdot K)$). Segundo Dreisbach e McGrattan, 2007, a relação $D^*/\delta x$ (ou $D^*/\delta y$, $D^*/\delta z$) entre 5 e 10 na maioria dos casos produz resultados com uma acuracidade adequada a um custo computacional aceitável. Esta mesma faixa de valores para D^*/δ é recomendada por Gutierrez-Montes et al., 2008. McDermott et al., 2010, recomenda que a relação D^*/δ seja de aproximadamente 10. O estudo de validação do FDS conduzido pela *U.S. Nuclear Regulatory Commission* (Stroup e Lindeman, 2013), sugere valores de D^*/δ entre 4 e 16.

Ma e Quintiere, 2003, sugerem um tamanho de malha o mais próximo possível de $\delta = 0,05$ m em seu estudo sobre precisão e limitações do *software* FDS.

Sun et al., 2009, utilizaram uma malha com $\delta = 0,30$ m para a simulação numérica de incêndio em uma escadaria em escala real, justificando a escolha deste tamanho de malha em virtude do tamanho do domínio físico (escala real), porém ainda com precisão aceitável.

Lai et al., 2013, considera que uma malha de $\delta = 0,10$ m fornece precisão suficiente e um tempo computacional aceitável em sua simulação da edificação residencial.

Assim, nas simulações realizadas na presente dissertação procurou-se estabelecer o maior refinamento possível a um custo computacional compatível com a disponibilidade de tempo para a sua realização, conforme cada cenário de incêndio estudado e seguindo as recomendações anteriores. Assim, utilizou-se o critério D^*/δ para selecionar a malha mais adequada para a simulação de cada cenário de incêndio estudado. Com esse critério, percebe-se que quanto maior for a taxa de liberação de calor, menos refinada necessita ser a malha para que D^*/δ fique dentro da faixa de valores recomendada na literatura, enquanto pequenas taxas de liberação de calor exigem malhas mais refinadas. Além disso, outra questão a ser considerada é o tamanho do domínio físico a ser simulado. No caso deste trabalho, a edificação residencial, o átrio, e o corredor subterrâneo possuem grandes dimensões, sendo necessário cuidado ao selecionar a malha, devido ao tempo computacional.

A Tabela 5.1 apresenta os valores de D^*/δ para diferentes tipos de malhas utilizadas nas simulações. Observa-se nesta tabela que, em geral, todas as malhas estão igualmente espaçadas nas direções x - y - z , exceto no caso do átrio em que se tem valores diferentes para a malha menos refinada devido a recomendação de Qin et al., 2009, que apresentam a simulação deste caso utilizando o *software* FDS.

Tabela 5.1 – Valores de δ e D^*/δ empregados no estudo de malha para cada cenário de incêndio.

Cenário	<i>Malha grossa</i>		<i>Malha fina</i>	
	$\delta_x, \delta_y, \delta_z$ (m)	D^*/δ	$\delta_x, \delta_y, \delta_z$ (m)	D^*/δ
<i>Túnel 1</i>	0,08;0,08;0,08	3,59	0,02;0,02;0,02	14,37
<i>Túnel 2</i>	0,08;0,08;0,08	3,59	0,02;0,02;0,02	14,37
<i>Túnel 3</i>	0,08;0,08;0,08	3,59	0,02;0,02;0,02	14,37
<i>Túnel 4</i>	0,08;0,08;0,08	3,59	0,02;0,02;0,02	14,37
<i>Edificação 1</i>	0,10;0,10;0,10	2,87	0,08;0,08;0,08	3,52
<i>Edificação 2</i>	0,10;0,10;0,10	2,87	0,08;0,08;0,08	3,52
<i>Átrio</i>	0,24;0,20;0,22	3,00	0,10;0,10;0,10	8,29
<i>Corredor 1</i>	0,20;0,20;0,20	3,31	0,10;0,10;0,10	6,63
<i>Corredor 2</i>	0,20;0,20;0,20	3,31	0,10;0,10;0,10	6,63

Os cenários de incêndio foram simulados no FDS considerando as malhas descritas na Tabela 5.1 com o objetivo de determinar qual das duas malhas fornece o resultado numérico da altura da camada de fumaça com melhor concordância com os resultados experimentais. Cabe ressaltar que, nesta etapa do trabalho, somente o método padrão do FDS foi utilizado para obtenção da altura da camada de fumaça, enquanto os resultados para os demais métodos (*N*-percentual, relação integral e frequência de flutuação) serão apresentados no próximo Capítulo. A Tabela 5.2 apresenta os desvios relativos médios para a altura da camada de fumaça, obtida com o método padrão do FDS, para as duas malhas de cada cenário de incêndio. Observa-se que os desvios relativos médios entre os resultados numéricos e os dados experimentais são próximos para as duas malhas adotadas em cada cenário, sendo que ambas estão dentro dos limites de D^*/δ recomendados na literatura, conforme mostrado na Tabela 5.1 (com algumas exceções, para as quais mesmo fora da faixa recomendada de D^*/δ , foram obtidos resultados adequados para a altura da fumaça). Ainda, observa-se que alguns desvios relativos médios são elevados (~50%), porém cabe enfatizar que o método de cálculo da altura da camada de fumaça utilizado nesta etapa foi o método padrão do FDS, sendo o objetivo do presente trabalho avaliar outros métodos para este cálculo, conforme será apresentado no Capítulo seguinte, esperando-se assim encontrar métodos que forneçam resultados mais próximos dos valores experimentais.

Tabela 5.2 – Desvios relativos médios entre os resultados numéricos e os experimentais da altura da fumaça para cada cenário de incêndio para as duas malhas testadas.

Cenário	Malha grossa	Malha fina
<i>Átrio</i>	-8%	-1%
<i>Túnel 1</i>	21%	18%
<i>Túnel 2</i>	-3%	-1%
<i>Túnel 3</i>	10%	8%
<i>Túnel 4</i>	24%	20%
<i>Corredor 1</i>	17%	8%
<i>Corredor 2</i>	18%	8%
<i>Edificação 1 TC01</i>	-5%	-5%
<i>Edificação 1 TC03</i>	-36%	-34%
<i>Edificação 1 TC05</i>	-53%	-51%
<i>Edificação 1 TC06</i>	-38%	-36%
<i>Edificação 2 TC01</i>	6%	3%
<i>Edificação 2 TC02</i>	9%	5%
<i>Edificação 2 TC03</i>	10%	4%
<i>Edificação 2 TC04</i>	5%	-7%
<i>Edificação 2 TC05</i>	21%	20%

5.2 Comparação de perfis de temperatura experimentais e numéricos

Uma vez que perfis de temperaturas são utilizados na aplicação dos métodos de cálculo para determinação da altura da camada de fumaça, como forma de validar os resultados numéricos obtidos com o FDS, esta seção apresenta comparações de perfis de temperaturas experimentais e aqueles obtidos com o FDS.

5.2.1 Túnel em escala reduzida

Gao et al., 2016, apresenta o perfil de distribuição de temperatura para o experimento realizado com a poça de 15 cm × 20 cm (sem chaminé – cenário denominado como *Túnel 2* no presente trabalho), no tempo de 40 segundos após a ignição. A Figura 5.1 mostra a comparação entre os resultados numéricos obtidos no presente trabalho, obtidos com as malhas de $\delta = 80$ mm e de $\delta = 20$ mm, e os dados experimentais de Gao et al., 2016, pode-se observar que a malha mais refinada ($\delta = 20$ mm) forneceu resultados dentro da faixa de incerteza de medição, com desvio relativo médio de 6% entre os resultados numéricos e experimentais.

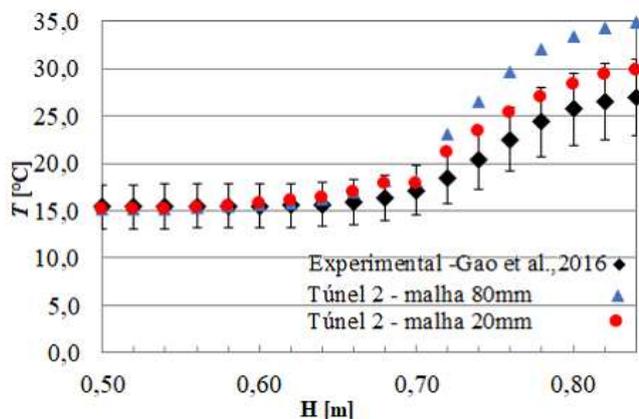


Figura 5.1. Perfil de temperatura em função da posição vertical dos termopares para o cenário *Túnel 2* (poça de 15 cm × 20 cm, sem chaminé), no tempo 40 s após a ignição: resultados numéricos do FDS (malhas de $\delta = 80$ mm e $\delta = 20$ mm) e dados experimentais de Gao et al., 2016.

5.2.2 Edificação residencial

Para o cenário de incêndio da *Edificação residencial*, as Figuras 5.2 e 5.3 mostram os históricos de temperatura para as árvores de termopares TC1 para o cenário *Edificação residencial 1* (fogo na sala 1) e TC4 para o cenário *Edificação residencial 2* (fogo na sala 2), respectivamente. Para tornar as figuras mais claras, nem todos os termopares que compõem cada árvore (Figuras 4.7 e 4.8) estão mostrados nas figuras, sendo apresentados somente os resultados para os termopares nas alturas 0,6 m (sensor 3), 1,8 m (sensor 7), e 2,9 m (sensor 11). Para o cenário *Edificação residencial 1*, a malha mais fina ($\delta = 80$ mm) forneceu desvio relativo médio de 4% e a malha mais grosseira ($\delta = 100$ mm) forneceu desvio relativo médio de 5%. Similarmente, para o cenário *Edificação residencial 2*, os desvios relativos médios foram de 5% e 7% para a malha mais fina ($\delta = 80$ mm) e para a malha mais grosseira ($\delta = 100$ mm), respectivamente. Observa-se ainda que os resultados foram satisfatórios mesmo com D^*/δ fora da faixa de valores recomendada pela literatura (vide Tabela 5.1), demonstrando assim a capacidade do *software* FDS em modelar de maneira adequada este cenário de incêndio no que se refere ao perfil de temperaturas.

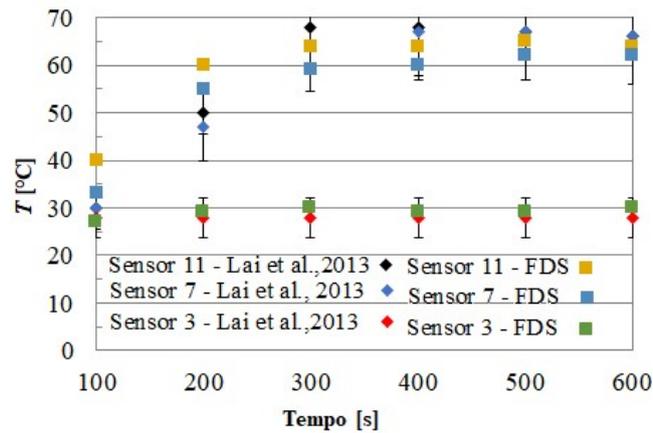


Figura 5.2. Históricos de temperatura para a árvore de termopares TC1 para o cenário *Edificação residencial 1* (fogo na sala 1): comparação entre resultados numéricos do FDS (malha $\delta = 80$ mm) e dados experimentais de Lai et al., 2013.

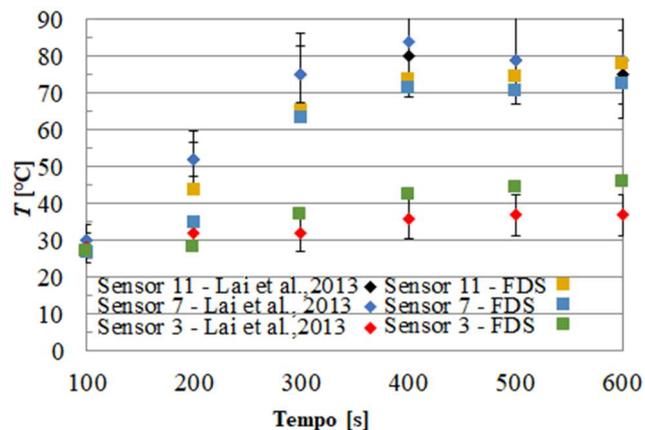


Figura 5.3. Históricos de temperatura para a árvore de termopares TC4 para o cenário *Edificação residencial 2* (fogo na sala 2): comparação entre resultados numéricos do FDS (malha $\delta = 80$ mm) e dados experimentais de Lai et al., 2013.

5.2.3 Corredor subterrâneo

A Figura. 5.4 mostra a comparação entre os resultados obtidos com o FDS e os dados experimentais de Hu et al., 2005, para as temperaturas máximas da fumaça na região adjacente ao teto, em função da distância a partir do fogo, para o cenário *Corredor subterrâneo 1*. Apesar dos valores de temperatura nessas posições não serem utilizados no cálculo da altura da camada de fumaça (uma vez que se necessita do perfil vertical de temperatura), este é o único resultado

experimental de temperaturas disponível em Hu et al., 2005, e por isso foi usado nesta seção do trabalho para efeitos de comparação com os resultados do FDS. O erro relativo médio para a malha de $\delta = 200$ mm foi de 19%. Já para a malha mais refinada, $\delta = 100$ mm, o erro relativo médio foi de 12%, considerado adequado para o presente estudo.

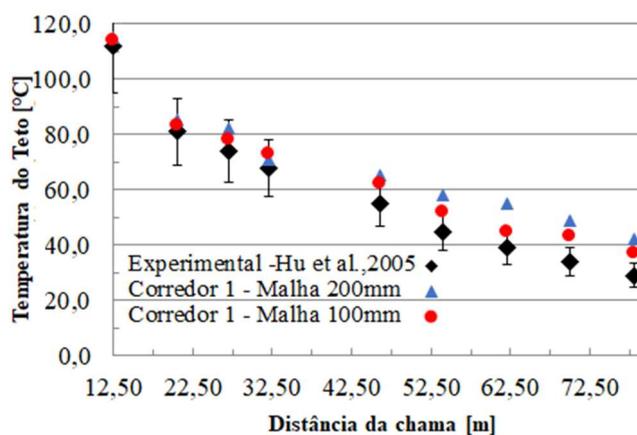


Figura 5.4. Temperaturas próximas ao teto do corredor em função da distância a partir do fogo para o cenário *Corredor subterrâneo 1*: comparação entre resultados numéricos do FDS (malhas $\delta = 200$ mm e $\delta = 100$ mm) e dados experimentais de Hu et al., 2005.

5.2.4 Átrio

As temperaturas na coluna de termopar para o tempo de 120 s e 180 s do experimento de Li et al., 1999, são exibidas nas Figuras 5.5 e 5.6, sendo mostrados os resultados numéricos do presente trabalho, obtidos com as malhas grossa ($\delta = 240$ mm \times 200 mm \times 220 mm) e fina ($\delta = 100$ mm), e os dados experimentais de Li et al., 1999. As figuras mostram que os resultados numéricos obtidos com o FDS são próximos aos dados experimentais. Para o tempo de 120 s após a ignição (Figura 5.5), os desvios relativos médios são de 4% para malha fina e 7% para malha grossa. Já para o tempo de 180 s após a ignição (Figura 5.6), os desvios relativos médios foram um pouco maiores, sendo de 11% para malha grossa e 8% para malha fina.

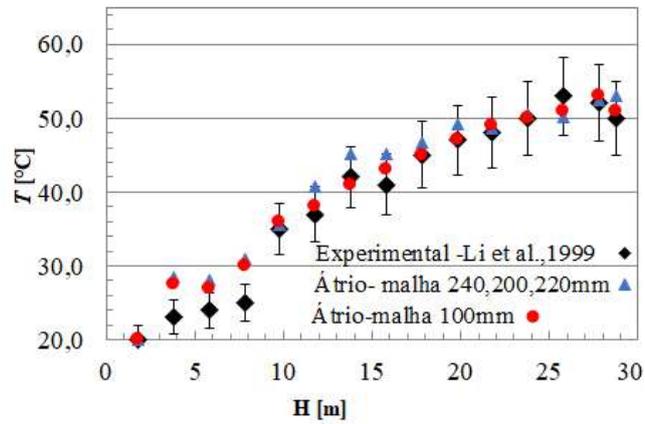


Figura 5.5. Perfil de temperatura em função da posição vertical dos termopares para o cenário *Átrio*, no tempo 120 s após a ignição: resultados numéricos do FDS (malha com $\delta = 240 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 220 \text{ mm}$ e malha com $\delta = 100 \text{ m}$) e dados experimentais de Li et al., 1999.

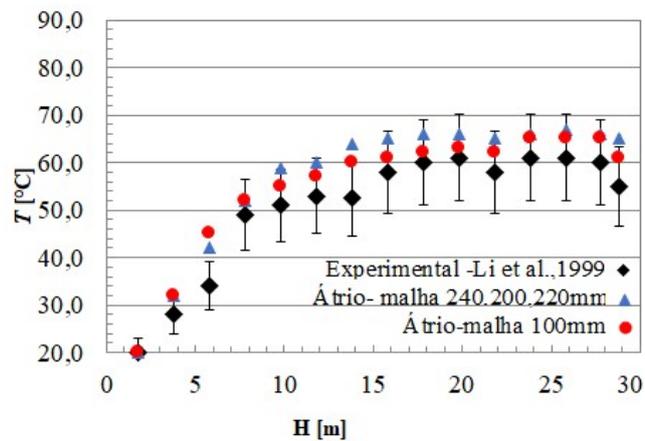


Figura 5.6. Perfil de temperatura em função da posição vertical dos termopares para o cenário *Átrio*, no tempo 180 s após a ignição: resultados numéricos do FDS (malha com $\delta = 240 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 220 \text{ mm}$ e malha com $\delta = 100 \text{ m}$) e dados experimentais de Li et al., 1999.

Apesar de alguns resultados numéricos obtidos com as malhas mais grossas serem próximos dos obtidos com as malhas mais refinadas, optou-se por adotar as malhas mais refinadas para todos os cenários de incêndios estudados, sendo estas as malhas empregadas na avaliação dos métodos de cálculo da altura da camada de fumaça apresentada no próximo Capítulo deste trabalho.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As Seções 6.1 a 6.4 (Túnel em escala reduzida, Edificação residencial, Corredor subterrâneo, e Átrio, respectivamente) do presente Capítulo apresentam os resultados obtidos com os diferentes métodos de cálculo da altura da camada de fumaça para os diferentes cenários de incêndio. Para isso, o FDS foi utilizado para obter os perfis verticais de temperaturas que foram empregados no pós-processamento para cálculo da altura da camada de fumaça. Para o método N -percentual, os resultados foram obtidos para diversos valores da constante N ($N = 10, 20, 30, 40$ e 50%). Para os métodos da relação integral e da frequência de flutuação, foram ajustadas funções $T(z)$ para os perfis verticais de temperatura, possibilitando assim o emprego destes métodos. Os resultados obtidos pelo método padrão do FDS não necessitam de qualquer pós-processamento, sendo fornecidos diretamente pelo *software* FDS. Em seguida, a Seção 6.5 apresenta a análise e discussão desses resultados.

6.1 Resultados: túnel em escala reduzida

6.1.1 Cenário: Túnel 1

A Figura 6.1 apresenta os resultados obtidos para o cenário denominado *Túnel 1*, incluindo os dados experimentais e os resultados dos diferentes métodos de cálculo da altura da camada de fumaça.

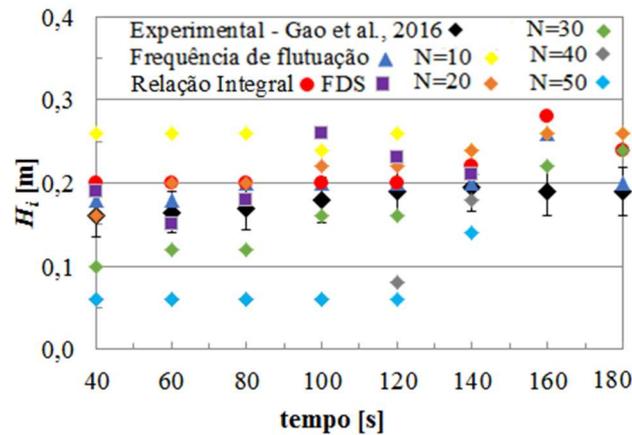


Figura 6.1. Altura da camada de fumaça para o cenário *Túnel 1*: dados experimentais e modelos testados neste trabalho (frequência de flutuação, relação integral, padrão-FDS e N -percentual com $N = 10, 20, 30, 40$ e 50%).

Uma vez que a Figura 6.1 apresenta resultados de 8 métodos de cálculo, além dos dados experimentais, pode ser difícil de visualizar os diferentes resultados nela. Assim, a Figura 6.2 mostra os resultados dos métodos frequência de flutuação, relação integral e padrão-FDS, além dos dados experimentais, facilitando a visualização destes resultados. Da mesma maneira, a Figura 6.3 apresenta os resultados obtidos com o método N -percentual para $N = 10, 20$ e 30% (os resultados para $N = 40$ e 50% foram suprimidos desta figura, pois não apresentaram boa concordância em relação ao experimento, contudo estes estão disponíveis na Figura 6.1).

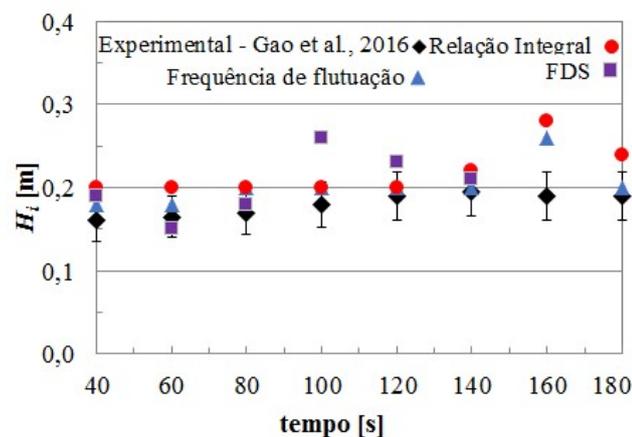


Figura 6.2. Altura da camada de fumaça para o cenário *Túnel 1*: dados experimentais e modelos testados neste trabalho (frequência de flutuação, relação integral e padrão-FDS).

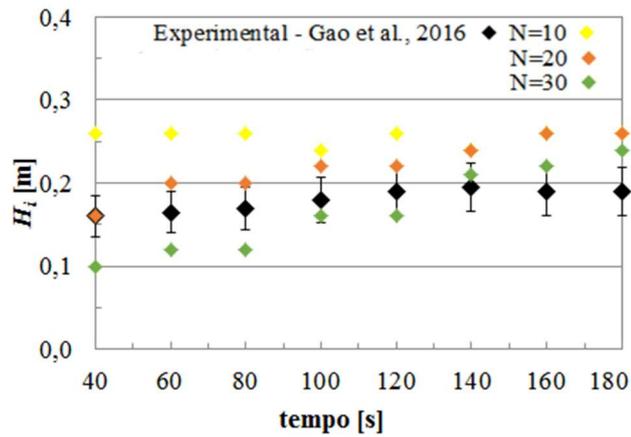


Figura 6.3. Altura da camada de fumaça para o cenário *Túnel 1*: dados experimentais e modelo testado neste trabalho N -percentual ($N = 10, 20$ e 30%).

6.1.2 Cenário: Túnel 2

A Figura 6.4 apresenta os resultados obtidos para o cenário *Túnel 2* para todos os métodos de cálculo da altura da camada de fumaça, junto aos dados experimentais. Para melhor visualização dos resultados, a Figura 6.5 exibe separadamente os resultados dos métodos frequência de flutuação, relação integral e padrão-FDS, enquanto a Figura 6.6 mostra os resultados obtidos com o método N -percentual.

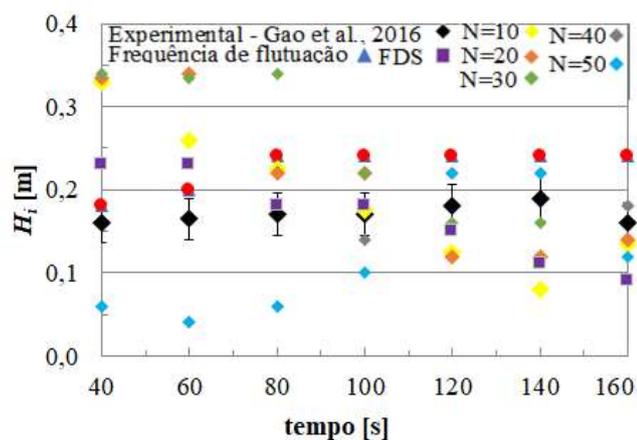


Figura 6.4. Altura da camada de fumaça para o cenário *Túnel 2*: dados experimentais e modelos testados neste trabalho (frequência de flutuação, relação integral, padrão-FDS e N -percentual com $N = 10, 20, 30, 40$ e 50%).

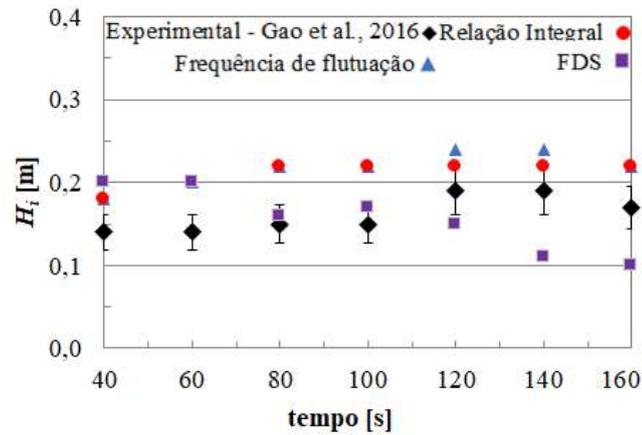


Figura 6.5. Altura da camada de fumaça para o cenário *Túnel 2*: dados experimentais e modelos testados neste trabalho (frequência de flutuação, relação integral e padrão-FDS).

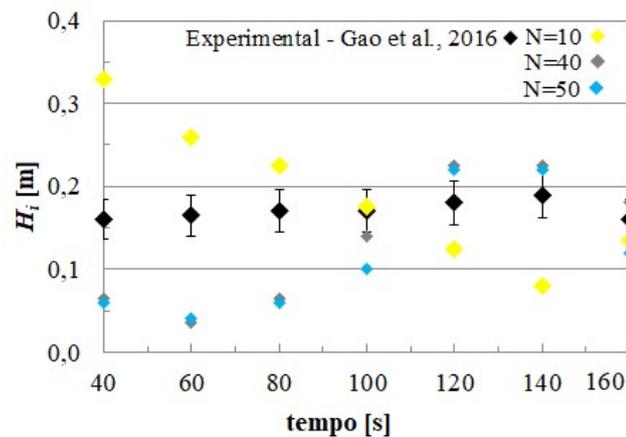


Figura 6.6. Altura da camada de fumaça para o cenário *Túnel 2*: dados experimentais e modelo testado neste trabalho N -percentual ($N = 10, 40$ e 50%).

6.1.3 Cenário: Túnel 3

Para o cenário *Túnel 3*, a Figura 6.7 apresenta os resultados obtidos com todos os métodos de cálculo da altura da camada de fumaça, enquanto as Figuras 6.8 e 6.9 mostram os resultados separados de alguns métodos (N -percentual na Figura 6.9 e os demais métodos na Figura 6.8), para facilitar a visualização destes resultados.

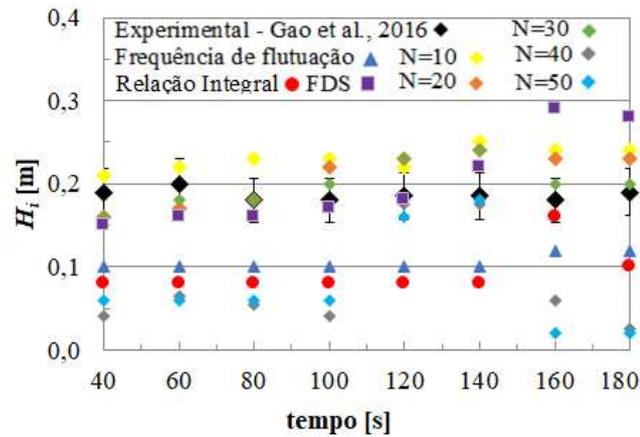


Figura 6.7. Altura da camada de fumaça para o cenário *Túnel 3*: dados experimentais e modelos testados neste (frequência de flutuação, relação integral, padrão-FDS e N -percentual com $N = 10, 20, 30, 40$ e 50%).

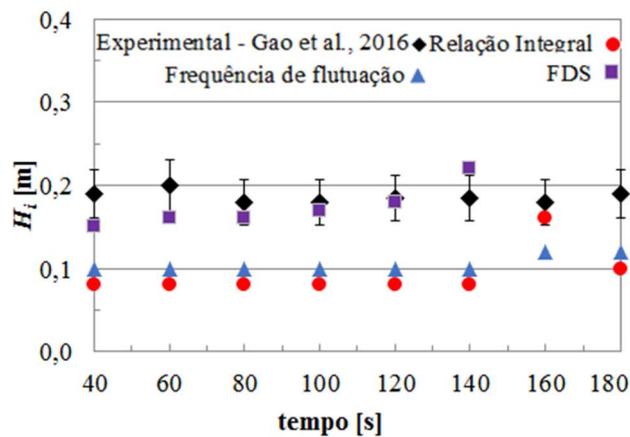


Figura 6.8. Altura da camada de fumaça para o cenário *Túnel 3*: dados experimentais e modelos testados neste trabalho (frequência de flutuação, relação integral e padrão-FDS).

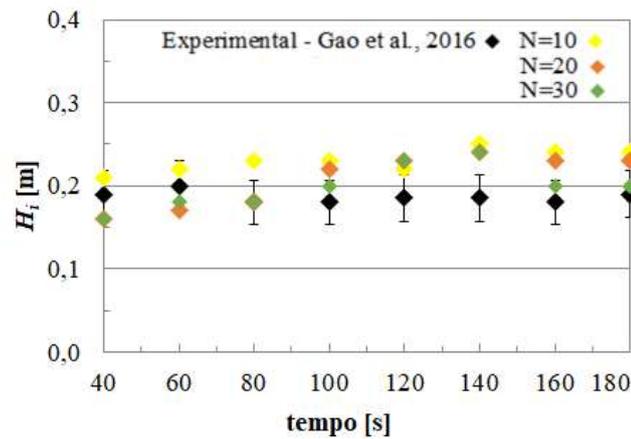


Figura 6.9. Altura da camada de fumaça para o cenário *Túnel 3*: dados experimentais e modelo testado neste trabalho N -percentual ($N = 10, 20$ e 30%).

6.1.4 Cenário: Túnel 4

Os resultados obtidos com todos os métodos de cálculo da altura da camada de fumaça para o cenário *Túnel 4* estão mostrados na Figura 6.10. Na Figura 6.11 estão mostrados somente os resultados para os métodos relação integral, frequência de flutuação e padrão-FDS, enquanto na Figura 6.12 estão mostrados os resultados do método N -percentual.

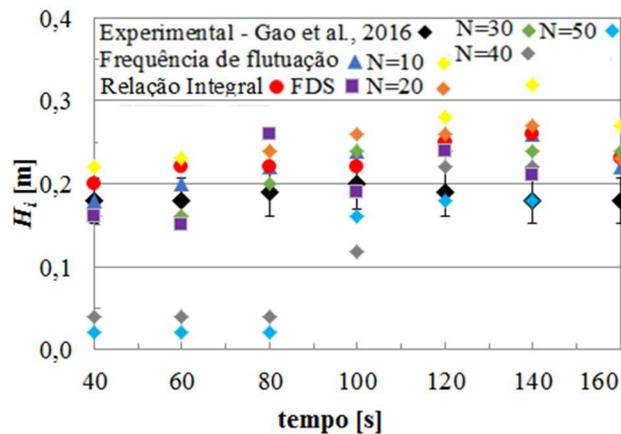


Figura 6.10. Altura da camada de fumaça para o cenário *Túnel 4*: dados experimentais e modelos testados deste trabalho (frequência de flutuação, relação integral, padrão-FDS e N -percentual com $N = 10, 20, 30, 40$ e 50%).

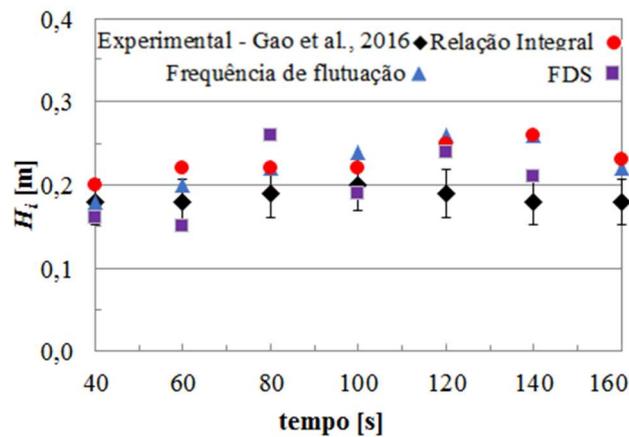


Figura 6.11. Altura da camada de fumaça para o cenário *Túnel 4*: dados experimentais e modelos testados neste trabalho (frequência de flutuação, relação integral e padrão FDS).

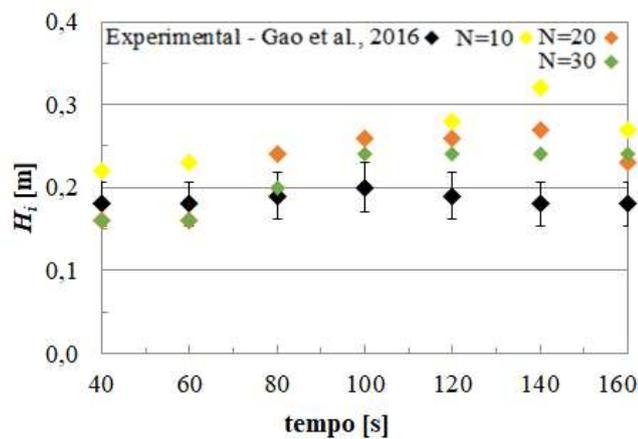


Figura 6.12. Altura da camada de fumaça para o cenário *Túnel 4*: dados experimentais e modelo testado neste trabalho N -percentual com ($N = 10, 20, 30\%$).

6.2 Resultados: Edificação residencial

Os resultados da edificação residencial estão divididos em duas seções: Seção 6.2.1 para o cenário *Edificação residencial 1* e Seção 6.2.2 para o cenário *Edificação residencial 2*.

6.2.1. Cenário: Edificação residencial 1

Os resultados obtidos para o cenário *Edificação residencial 1* estão apresentados nesta seção. Neste cenário, o fogo está localizado no centro da sala 1, enquanto a sala 2 está conectada

à sala 1 por meio de uma porta, por onde pode escoar fumaça, conforme mostrado na Figura 4.7. As alturas da camada de fumaça para este cenário foram obtidas a partir das medições de temperatura das árvores de termopares TC1, TC3, TC5 e TC6, sendo que neste cenário as árvores TC1 e TC3 estão na sala onde está localizado o fogo (sala 1), e as árvores TC5 e TC6 estão na sala adjacente (sala 2, sem fogo, mas por onde pode entrar fumaça através da porta). Assim, os resultados relativos às árvores TC1 e TC3 fornecem a altura da camada de fumaça na sala 1 (sala do fogo) e aqueles relativos às árvores TC5 e TC6 se referem à altura da camada de fumaça na sala 2 (sala adjacente, sem fogo).

As Figuras 6.13, 6.16, 6.19 e 6.22 mostram os resultados obtidos com todos os métodos de cálculo a partir das temperaturas medidas com as árvores TC1, TC3, TC5 e TC6, respectivamente. Para facilitar a visualização dos resultados, as Figuras 6.14, 6.17, 6.20 e 6.23 mostram os resultados obtidos somente com os métodos frequência de flutuação, relação integral e padrão-FDS, obtidos com as medições das árvores TC1, TC3, TC5 e TC6, respectivamente. Analogamente, as Figuras 6.15, 6.18, 6.21 e 6.24 mostram os resultados obtidos somente com o método N -percentual, para as árvores TC1, TC3, TC5 e TC6, respectivamente.

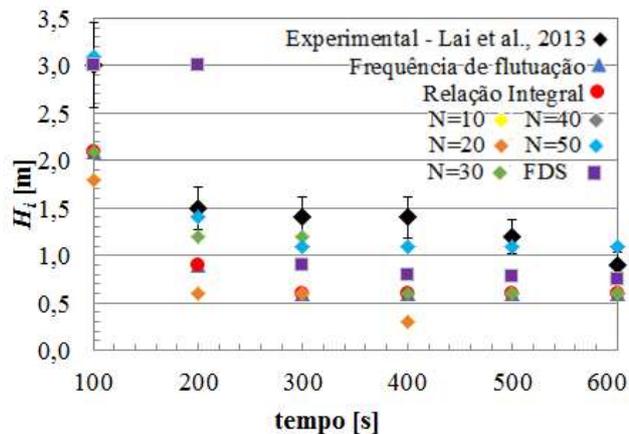


Figura 6.13. Altura da camada de fumaça para o cenário *Edifício residencial I* usando perfis de temperatura obtidos com a árvore de termopares TC1: dados experimentais e modelos testados neste trabalho (frequência de flutuação, relação integral, padrão-FDS e N -percentual com $N = 10, 20, 30, 40$ e 50%).

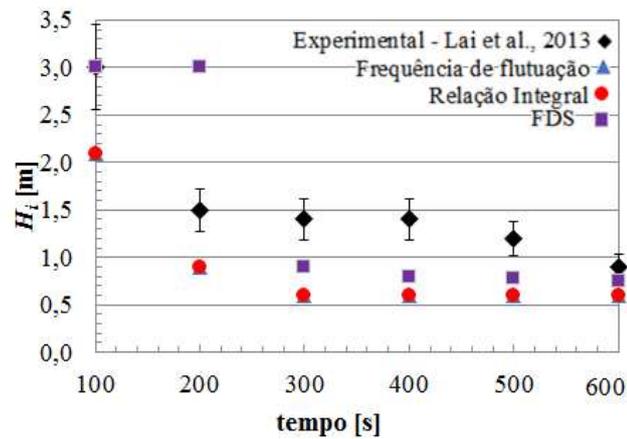


Figura 6.14. Altura da camada de fumaça para o cenário *Edificação residencial 1* usando perfis de temperatura obtidos com a árvore de termopares TC1: dados experimentais e modelos testados neste trabalho (frequência de flutuação, relação integral e padrão-FDS).

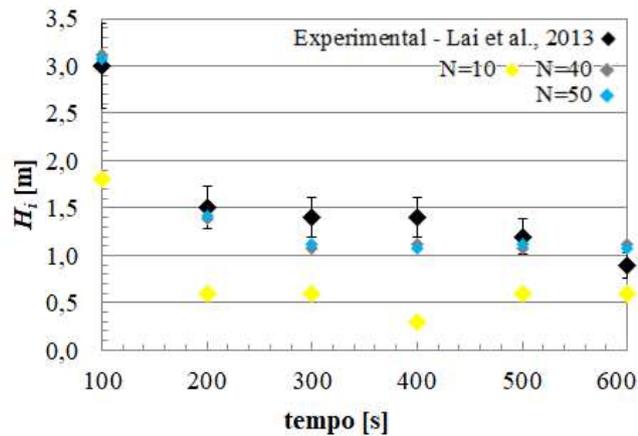


Figura 6.15. Altura da camada de fumaça para o cenário *Edificação residencial 1* usando perfis de temperatura obtidos com a árvore de termopares TC1: dados experimentais e modelo testado neste trabalho N -percentual ($N = 10, 40$ e 50%).

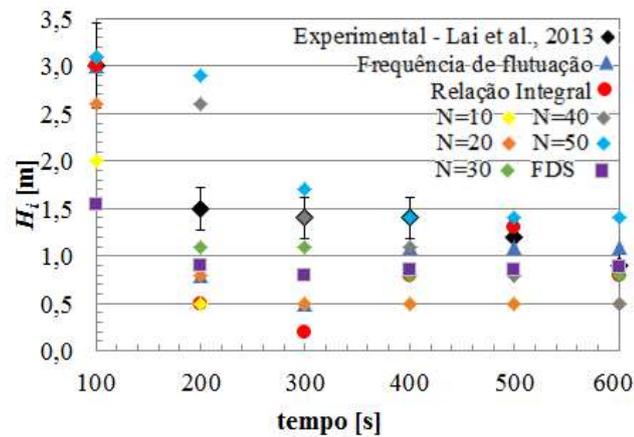


Figure 6.16. Altura da camada de fumaça para o cenário *Edificação residencial 1* usando perfis de temperatura obtidos com a árvore de termopares TC3: dados experimentais e modelos testados neste trabalho (frequência de flutuação, relação integral, padrão-FDS e N -percentual com $N = 10, 20, 30, 40$ e 50%).

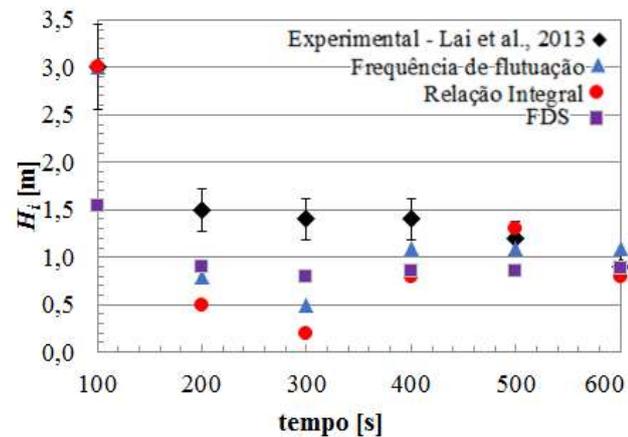


Figura 6.17. Altura da camada de fumaça para o cenário *Edificação residencial 1* usando perfis de temperatura obtidos com a árvore de termopares TC3: dados experimentais e modelos testados neste trabalho (frequência de flutuação, relação integral e padrão-FDS).

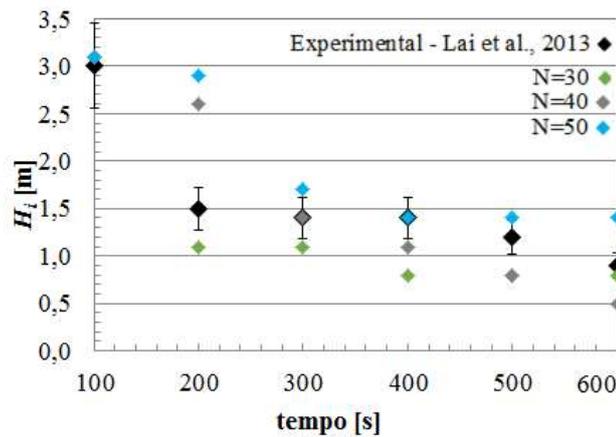


Figura 6.18. Altura da camada de fumaça para o cenário *Edificação residencial 1* usando perfis de temperatura obtidos com a árvore de termopares TC3: dados experimentais e modelo testado neste trabalho N -percentual ($N = 30, 40$ e 50%).

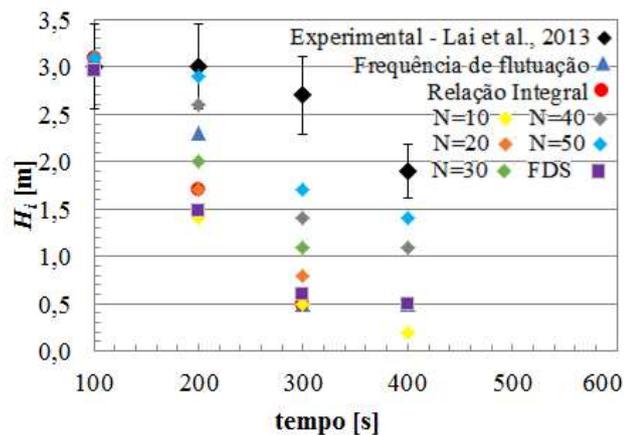


Figure 6.19. Altura da camada de fumaça para o cenário *Edificação residencial 1* usando perfis de temperatura obtidos com a árvore de termopares TC5: dados experimentais e modelos testados neste trabalho (frequência de flutuação, relação integral, padrão-FDS e N -percentual com $N = 10, 20, 30, 40$ e 50%).

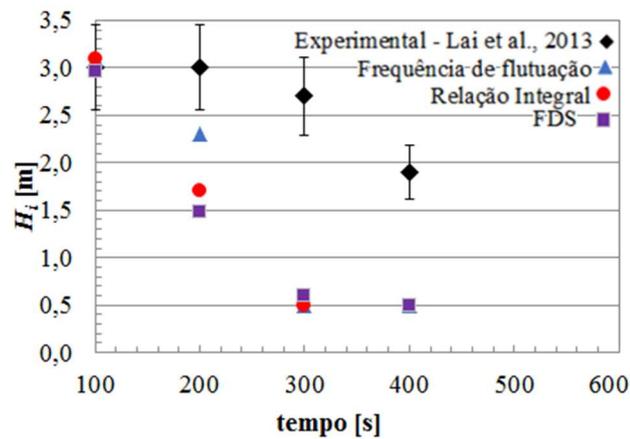


Figura 6.20. Altura da camada de fumaça para o cenário *Edificação residencial 1* usando perfis de temperatura obtidos com a árvore de termopares TC5: dados experimentais e modelos testados neste trabalho (frequência de flutuação, relação integral e padrão-FDS).

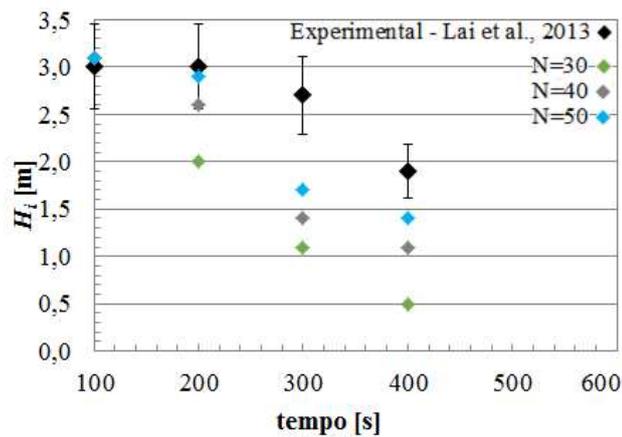


Figura 6.21. Altura da camada de fumaça para o cenário *Edificação residencial 1* usando perfis de temperatura obtidos com a árvore de termopares TC5: dados experimentais e modelo testado neste trabalho N -percentual ($N = 30, 40$ e 50%).

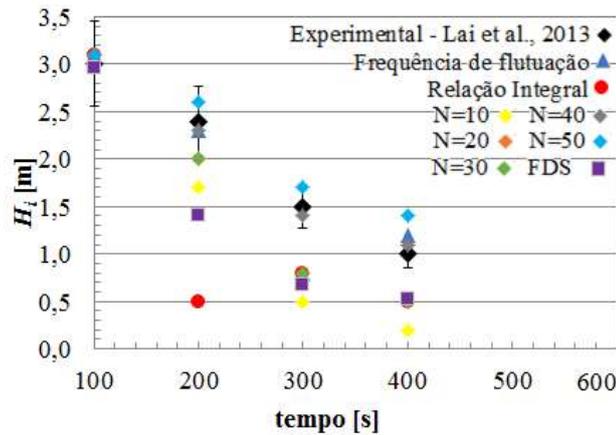


Figure 6.22. Altura da camada de fumaça para o cenário *Edificação residencial 1* usando perfis de temperatura obtidos com a árvore de termopares TC6: dados experimentais e modelos testados neste trabalho (frequência de flutuação, relação integral, padrão-FDS e N -percentual com $N = 10, 20, 30, 40$ e 50%).

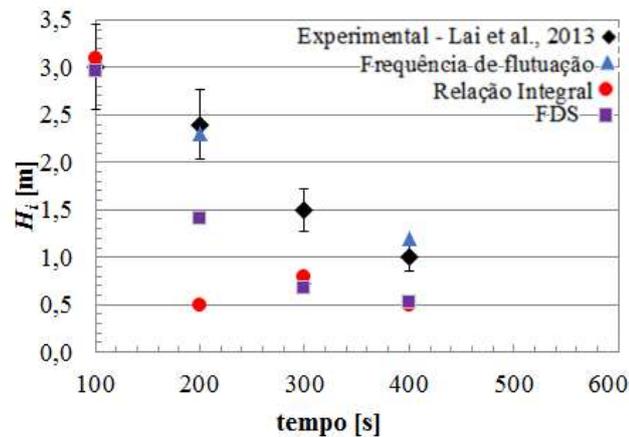


Figura 6.23. Altura da camada de fumaça para o cenário *Edificação residencial 1* usando perfis de temperatura obtidos com a árvore de termopares TC6: dados experimentais e modelos testados neste trabalho (frequência de flutuação, relação integral e padrão-FDS).

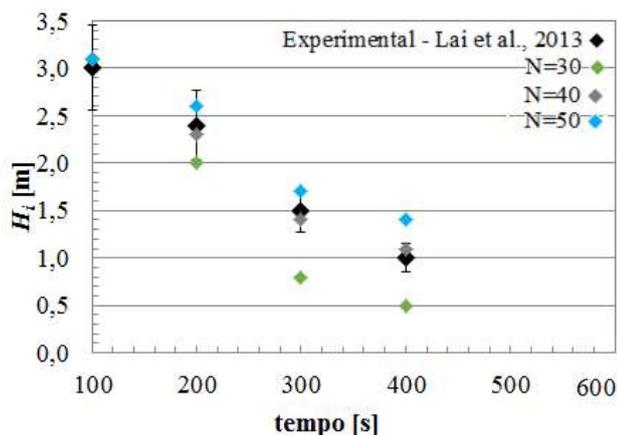


Figura 6.24. Altura da camada de fumaça para o cenário *Edificação residencial 1* usando perfis de temperatura obtidos com a árvore de termopares TC6: dados experimentais e modelo testado neste trabalho N -percentual ($N = 30, 40$ e 50%).

6.2.2. Cenário: Edificação residencial 2

Os resultados obtidos para o cenário *Edificação residencial 2* estão apresentados nesta seção. Neste cenário, o fogo está localizado no centro da sala 2, enquanto a sala 1 está conectada à sala 2 por meio de uma porta, por onde pode escoar fumaça, conforme mostrado na Figura 4.7. As alturas da camada de fumaça para este cenário foram obtidas a partir das medições de temperatura das árvores de termopares TC1, TC2, TC3, TC4 e TC6, sendo que neste cenário as árvores TC4 e TC6 estão na sala onde está localizado o fogo (sala 2), e as árvores TC1, TC2 e TC3 estão na sala adjacente (sala 1, sem fogo, mas por onde pode entrar fumaça através da porta). Assim, os resultados relativos às árvores TC4 e TC6 fornecem a altura da camada de fumaça na sala 2 (sala do fogo) e aqueles relativos às árvores TC1, TC2 e TC3 se referem à altura da camada de fumaça na sala 1 (sala adjacente, sem fogo).

As Figuras 6.25, 6.28, 6.31, 6.34 e 6.37 mostram os resultados obtidos com todos os métodos de cálculo a partir das temperaturas medidas com as árvores TC1, TC2, TC3, TC4 e TC6, respectivamente. Para facilitar a visualização dos resultados, as Figuras 6.26, 6.29, 6.32, 6.35 e 6.38 mostram os resultados obtidos somente com os métodos frequência de flutuação, relação integral e padrão-FDS, obtidos com as medições das árvores TC1, TC2, TC3, TC4 e TC6, respectivamente. Analogamente, as Figuras 6.27, 6.30, 6.33, 6.36 e 6.39 mostram os resultados obtidos somente com o método N -percentual, para as árvores TC1, TC2, TC3, TC4 e TC6, respectivamente.

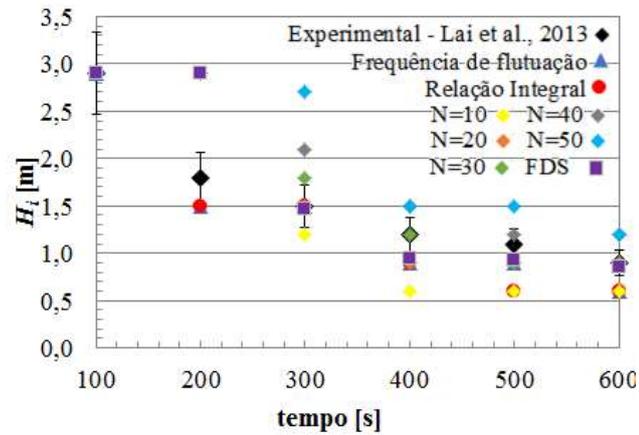


Figure 6.25. Altura da camada de fumaça para o cenário *Edificação residencial 2* usando perfis de temperatura obtidos com a árvore de termopares TC1: dados experimentais e modelos testados neste trabalho (frequência de flutuação, relação integral, padrão-FDS e N -percentual com $N = 10, 20, 30, 40$ e 50%).

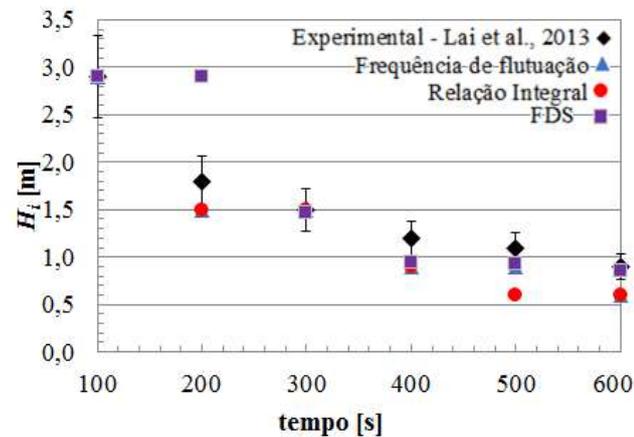


Figura 6.26. Altura da camada de fumaça para o cenário *Edificação residencial 2* usando perfis de temperatura obtidos com a árvore de termopares TC1: dados experimentais e modelos testados neste trabalho (frequência de flutuação, relação integral e padrão-FDS).

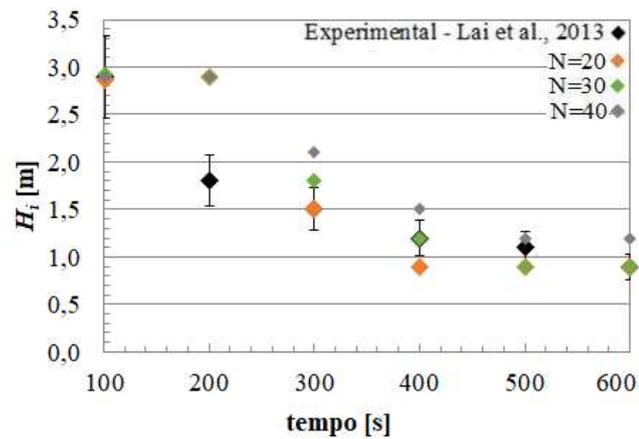


Figura 6.27. Altura da camada de fumaça para o cenário *Edificação residencial 2* usando perfis de temperatura obtidos com a árvore de termopares TC1: dados experimentais e modelo testado neste trabalho N -percentual ($N = 20, 30$ e 40%).

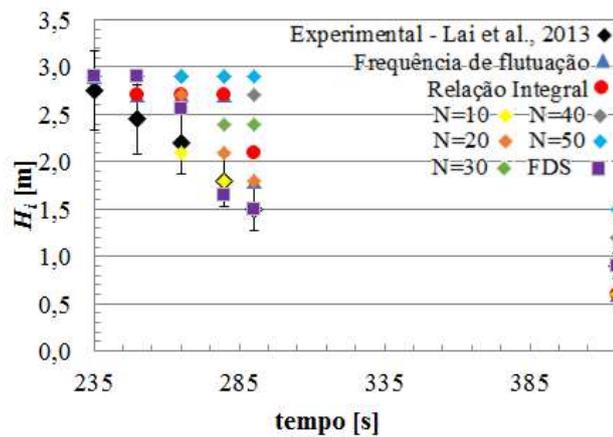


Figure 6.28. Altura da camada de fumaça para o cenário *Edificação residencial 2* usando perfis de temperatura obtidos com a árvore de termopares TC2: dados experimentais e modelos testados neste trabalho (frequência de flutuação, relação integral, padrão-FDS e N -percentual com $N = 10, 20, 30, 40$ e 50%).

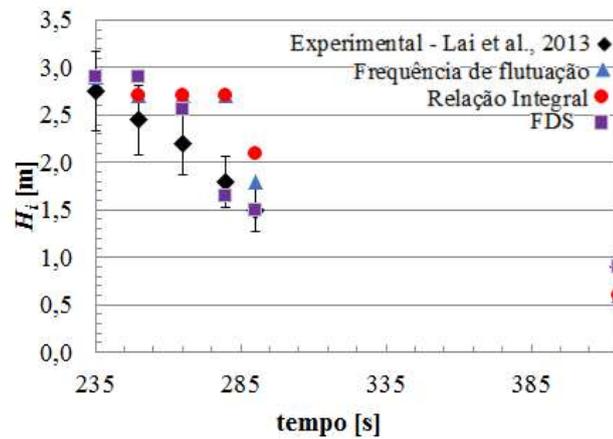


Figura 6.29. Altura da camada de fumaça para o cenário *Edificação residencial 2* usando perfis de temperatura obtidos com a árvore de termopares TC2: dados experimentais e modelos testados neste trabalho (frequência de flutuação, relação integral e padrão-FDS).

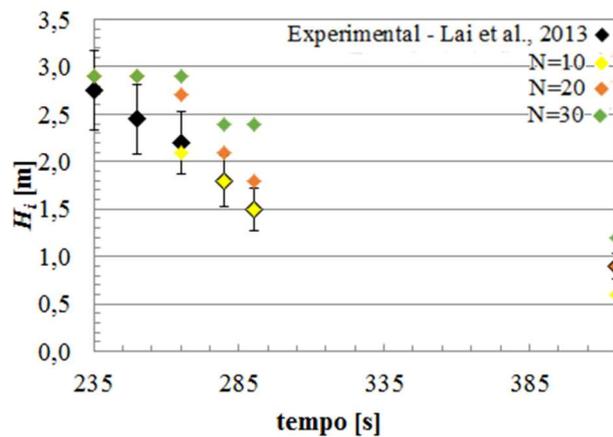


Figura 6.30. Altura da camada de fumaça para o cenário *Edificação residencial 2* usando perfis de temperatura obtidos com a árvore de termopares TC2: dados experimentais e modelo testado neste trabalho N -percentual ($N = 10, 20$ e 30%).

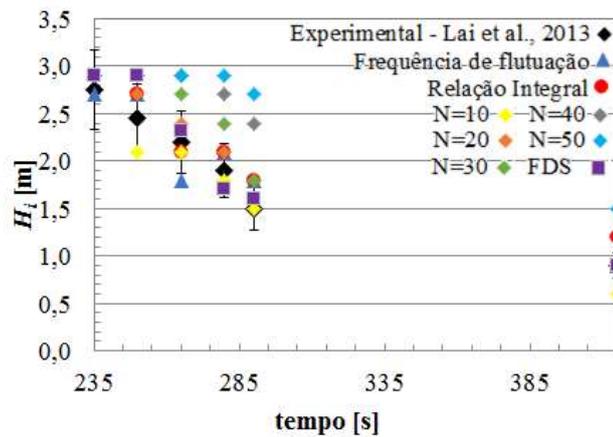


Figure 6.31. Altura da camada de fumaça para o cenário *Edificação residencial 2* usando perfis de temperatura obtidos com a árvore de termopares TC3: dados experimentais e modelos testados neste trabalho (frequência de flutuação, relação integral, padrão-FDS e N -percentual com $N = 10, 20, 30, 40$ e 50%).

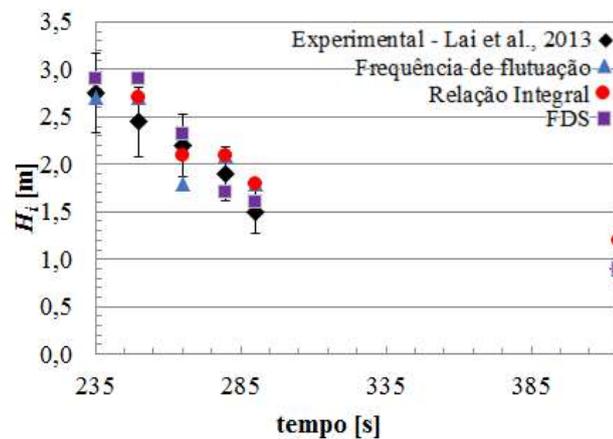


Figura 6.32. Altura da camada de fumaça para o cenário *Edificação residencial 2* usando perfis de temperatura obtidos com a árvore de termopares TC3: dados experimentais e modelos testados neste trabalho (frequência de flutuação, relação integral e padrão-FDS).

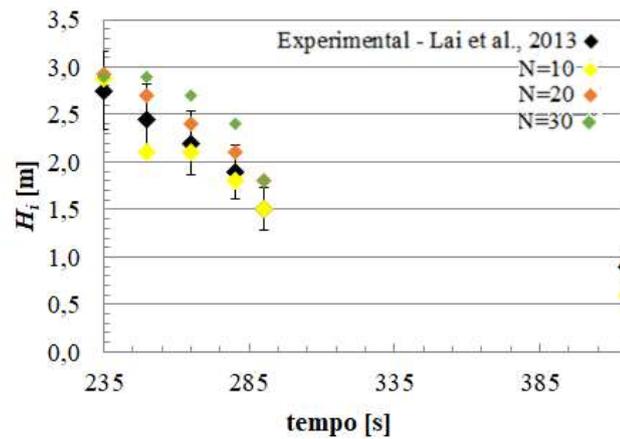


Figura 6.33. Altura da camada de fumaça para o cenário *Edificação residencial 2* usando perfis de temperatura obtidos com a árvore de termopares TC3: dados experimentais e modelo testado neste trabalho N -percentual ($N = 10, 20$ e 30%).

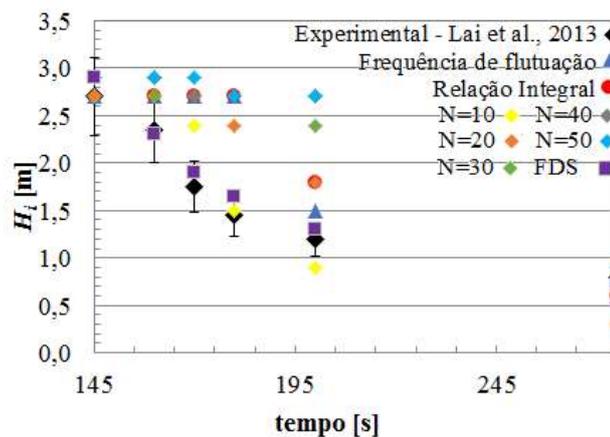


Figure 6.34. Altura da camada de fumaça para o cenário *Edificação residencial 2* usando perfis de temperatura obtidos com a árvore de termopares TC4: dados experimentais e modelos testados neste trabalho (frequência de flutuação, relação integral, padrão-FDS e N -percentual com $N = 10, 20, 30, 40$ e 50%).

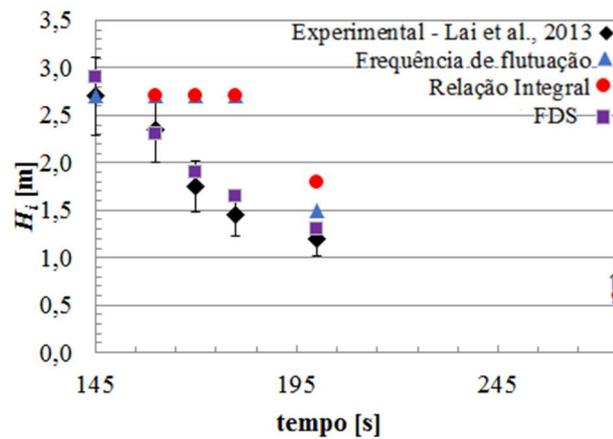


Figura 6.35. Altura da camada de fumaça para o cenário *Edificação residencial 2* usando perfis de temperatura obtidos com a árvore de termopares TC4: dados experimentais e modelos testados neste trabalho (frequência de flutuação, relação integral e padrão-FDS).

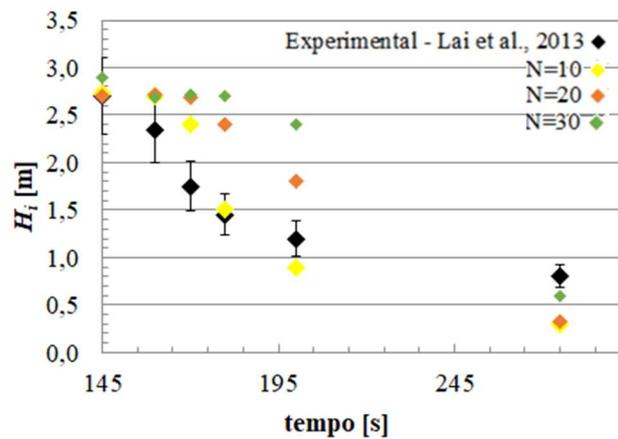


Figura 6.36. Altura da camada de fumaça para o cenário *Edificação residencial 2* usando perfis de temperatura obtido com a árvore de termopares TC4: dados experimentais e modelo testado neste trabalho N -percentual ($N = 10, 20$ e 30%).

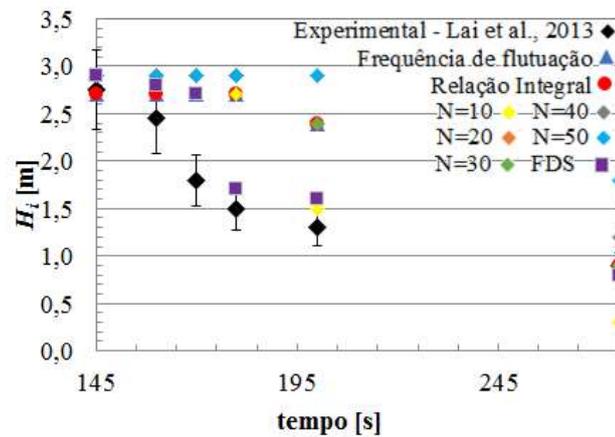


Figure 6.37. Altura da camada de fumaça para o cenário *Edificação residencial 2* usando perfis de temperatura obtidos com a árvore de termopares TC6: dados experimentais e modelos testados neste trabalho (frequência de flutuação, relação integral, padrão-FDS e N -percentual com $N = 10, 20, 30, 40$ e 50%).

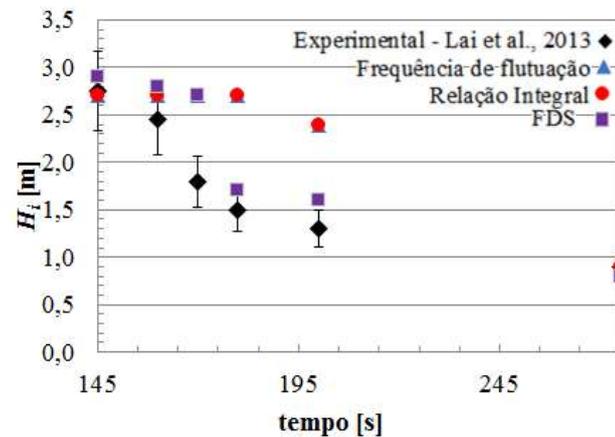


Figura 6.38. Altura da camada de fumaça para o cenário *Edificação residencial 2* usando perfis de temperatura obtidos com a árvore de termopares TC6: dados experimentais e modelos testados neste trabalho (frequência de flutuação, relação integral e padrão-FDS).

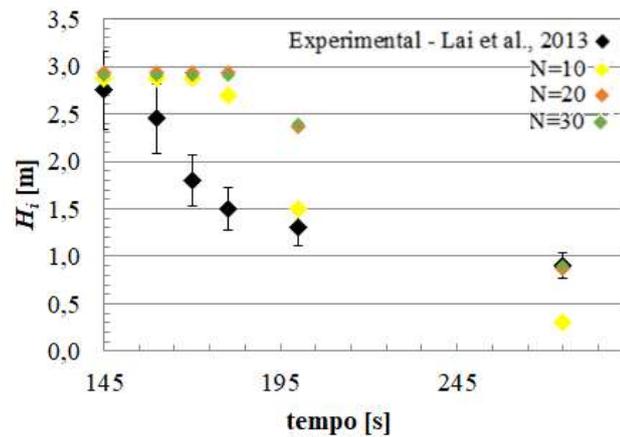


Figura 6.39. Altura da camada de fumaça para o cenário *Edificação residencial 2* usando perfis de temperatura obtidos com a árvore de termopares TC6: dados experimentais e modelo testado neste trabalho N -percentual ($N = 10, 20$ e 30%).

6.3 Resultados: Corredor subterrâneo

Os resultados obtidos para a altura da camada de fumaça para o cenário *Corredor subterrâneo 1* estão mostrados na Figura 6.40. A Figura 6.41 mostra os resultados obtidos com os métodos relação integral, frequência de flutuação e padrão-FDS, enquanto a Fig. 6.42 exhibe somente os resultados do método N -percentual.

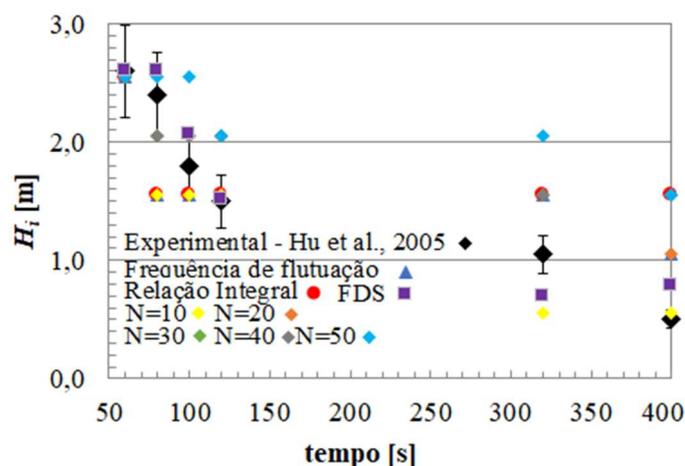


Figura 6.40. Altura da camada de fumaça para o cenário *Corredor subterrâneo 1*: dados experimentais e modelos testados neste trabalho (frequência de flutuação, relação integral, padrão-FDS e N -percentual com $N = 10, 20, 30, 40$ e 50%).

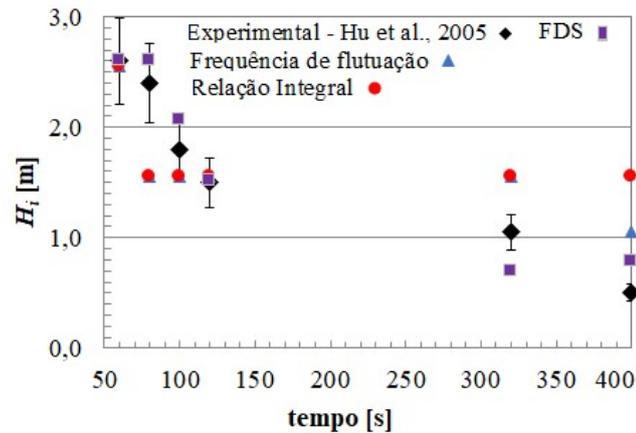


Figura 6.41. Altura da camada de fumaça para o cenário *Corredor subterrâneo 1*: dados experimentais e modelos testados neste trabalho (frequência de flutuação, relação integral e padrão-FDS).

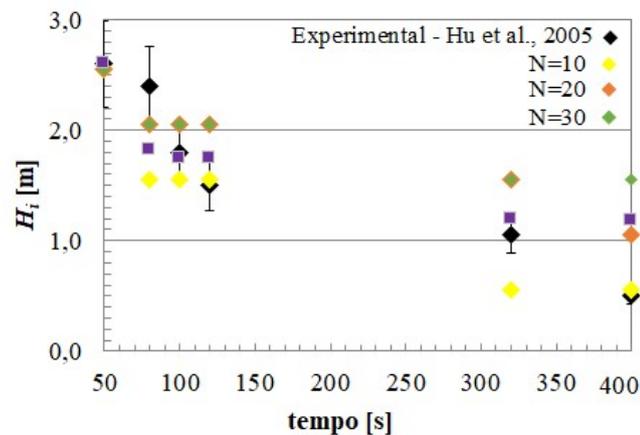


Figura 6.42. Altura da camada de fumaça para o cenário *Corredor subterrâneo 1*: dados experimentais e modelo testado neste trabalho N -percentual ($N = 10, 20$ e 30%).

Para o cenário *Corredor subterrâneo 2*, os resultados estão exibidos na Figura 6.43. A Figura 6.44 mostra os resultados obtidos com os métodos relação integral, frequência de flutuação e padrão-FDS, enquanto a Fig. 6.45 exhibe os resultados do método N -percentual.

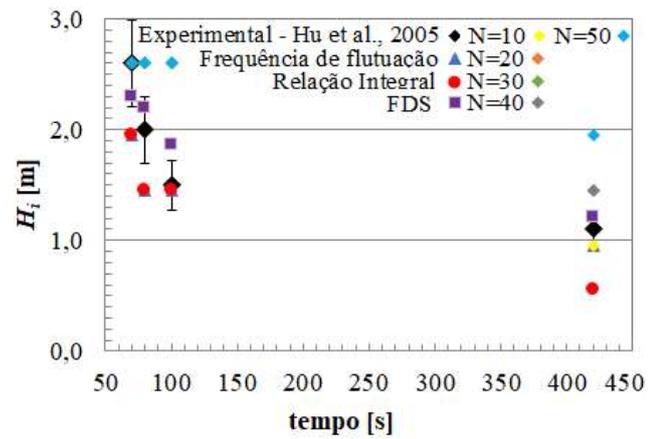


Figura 6.43. Altura da camada de fumaça para o cenário *Corredor subterrâneo 2*: dados experimentais e modelos testados neste trabalho (frequência de flutuação, relação integral, padrão-FDS e N -percentual com $N = 10, 20, 30, 40$ e 50%).

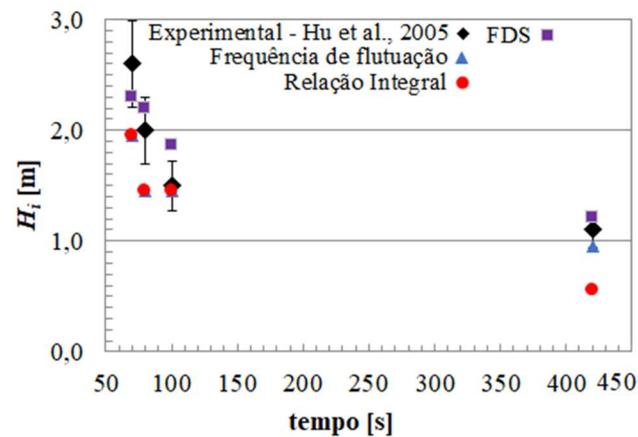


Figura 6.44. Altura da camada de fumaça para o cenário *Corredor subterrâneo 2*: dados experimentais e modelos testados neste trabalho (frequência de flutuação, relação integral e padrão-FDS).

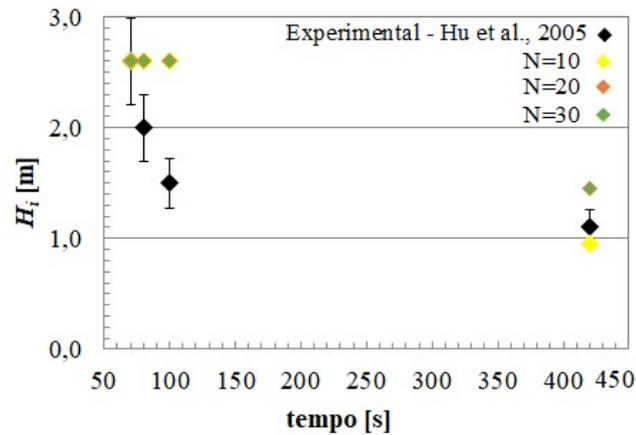


Figura 6.45. Altura da camada de fumaça para o cenário *Corredor subterrâneo 2*: dados experimentais e modelos testado neste trabalho N -percentual ($N = 10, 20$ e 30%).

6.4 Resultados: Átrio

Os resultados obtidos para a altura da camada de fumaça para o cenário *Átrio* estão mostrados na Figura 6.46. A Figura 6.47 mostra os resultados obtidos com os métodos relação integral, frequência de flutuação e padrão-FDS, enquanto a Figura 6.48 mostra somente os resultados do método N -percentual, facilitando assim a visualização destes resultados.

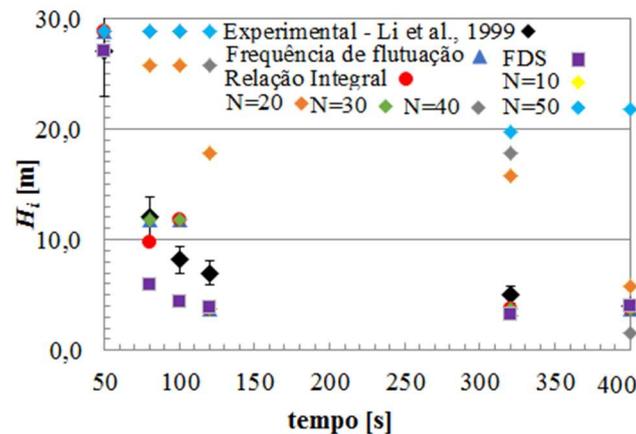


Figura 6.46. Altura da camada de fumaça para o cenário *Átrio*: dados experimentais e modelos testados neste trabalho (frequência de flutuação, relação integral, padrão-FDS e N -percentual com $N = 10, 20, 30, 40$ e 50%).

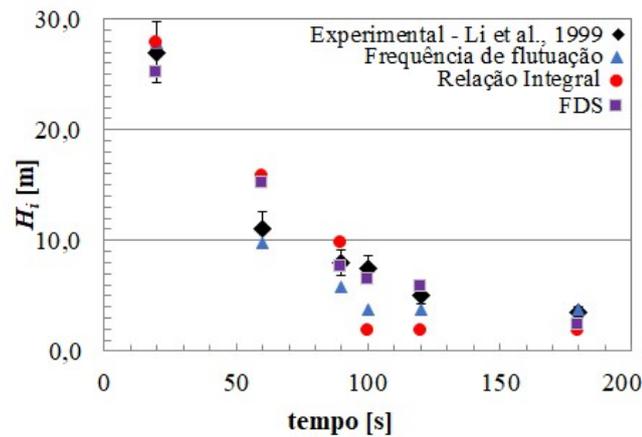


Figura 6.47. Altura da camada de fumaça para o cenário *Átrio*: dados experimentais e modelos testados neste trabalho (frequência de flutuação, relação integral e padrão-FDS).

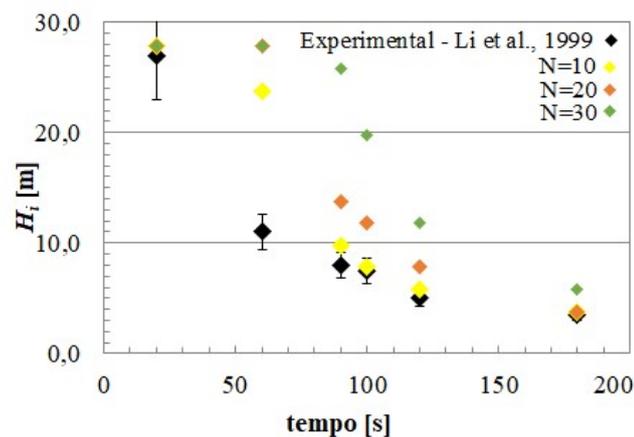


Figura 6.48. Altura da camada de fumaça para o cenário *Átrio*: dados experimentais e método modelos testado neste trabalho ($N = 10, 20$ e 30%).

6.5. Análise e discussão de resultados

A análise a seguir será feita considerando as seguintes classificações:

- Análise geral de todos os resultados (Seção 6.5.1)
- Análise de cada cenário de incêndio estudado (Seção 6.5.2)
- Análise dos diferentes tipos de exaustão (natural ou forçada) em cenários com geometria alongada longitudinalmente (Seção 6.5.3)
- Análise de cenários conforme o volume do compartimento (Seção 6.5.4)

- e) Análise da razão de aspecto dos compartimentos (Seção 6.5.5)
- f) Análise em função da taxa de liberação de calor (Seção 6.5.6)
- g) Análise de cenários com sala adjacente à sala do fogo (Seção 6.5.7)

6.5.1 Análise geral de todos os resultados

Para análise dos resultados obtidos para cada cenário de incêndio e cada método de cálculo da altura da fumaça, são utilizados três parâmetros estatísticos distintos: (i) desvio relativo médio, (ii) frequência relativa, e (iii) desvio padrão. Estes três parâmetros estatísticos também serão utilizados nas análises presentes nas seções subsequentes (6.5.2 à 6.5.7).

A Tabela 6.1 apresenta o desvio relativo médio de cada cenário estudado no presente trabalho, sendo este a média do desvio relativo, calculado conforme Equação 6.1, para todos os valores transientes da altura da camada de fumaça calculados para cada cenário e para cada método de cálculo (Seções 6.1 a 6.4).

$$Desvio(\%) = 100 \cdot \frac{H_{i,m} - H_{i,exp}}{H_{i,exp}} \quad (6.1)$$

onde $H_{i,m}$ é a altura da camada de fumaça obtida pelo método de cálculo e $H_{i,exp}$ é o correspondente valor experimental. Assim, valores positivos apresentados na Tabela 6.1 significam que, na média, determinado método de cálculo da altura da camada de fumaça fornece valores de H_i maiores do que o valor experimental, enquanto valores negativos representam o contrário. Sob o ponto de vista de engenharia de segurança contra incêndios, no que diz respeito à altura da camada de fumaça, um método de cálculo que forneça valores de H_i menores do que os experimentais é preferível, visto que isto levaria ao projeto de sistemas com maior segurança do que no caso em que se considere H_i maiores. Dessa forma, métodos de cálculo que forneçam desvios relativos médios negativos são preferíveis. A última linha da Tabela 6.1 mostra a média geral do desvio relativo para cada método de cálculo.

Analisando os valores apresentados na Tabela 6.1, percebe-se que os métodos frequência de flutuação, relação integral e padrão FDS, fornecem a média geral negativa para os desvios relativos; entretanto ao analisar, ainda na Tab. 6.1, os desvios relativos para cada cenário para estes métodos, percebe-se a existência de vários cenários com valores positivos de desvio relativo, o que indica a necessidade de analisar separadamente cada cenário (ou cada categoria de cenário) e método, assim como o parâmetro estatístico utilizado.

Tabela 6.1 – Desvios relativos médios para todos os cenários de incêndio estudados.

Cenário	Frequência de Flutuação	Relação Integral	N 10%	N 20%	N 30%	N 40%	N 50%	Padrão FDS
<i>Átrio</i>	-17%	-20%	28%	58%	124%	166%	166%	-1%
<i>Túnel 1</i>	13%	21%	43%	22%	-9%	-42%	-51%	18%
<i>Túnel 2</i>	27%	32%	15%	28%	48%	-24%	-33%	-1%
<i>Túnel 3</i>	-44%	-50%	23%	12%	7%	-57%	-58%	8%
<i>Túnel 4</i>	21%	23%	40%	21%	14%	-31%	-54%	20%
<i>Corredor 1</i>	18%	35%	-14%	32%	49%	49%	65%	8%
<i>Corredor 2</i>	-17%	-26%	22%	34%	34%	34%	45%	8%
<i>Edificação 1 TC1</i>	-45%	-45%	-16%	-53%	-34%	-5%	-5%	-5%
<i>Edificação 1 TC3</i>	-20%	-33%	-3%	-49%	-3%	-4%	32%	-34%
<i>Edificação 1 TC5</i>	-44%	-49%	-55%	-46%	-41%	-25%	-16%	-51%
<i>Edificação 1 TC6</i>	-7%	-43%	-43%	-28%	-28%	1%	16%	-36%
<i>Edificação 2 TC1</i>	-16%	-20%	-15%	3%	10%	28%	39%	3%
<i>Edificação 2 TC2</i>	13%	16%	-2%	14%	30%	38%	46%	5%
<i>Edificação 2 TC3</i>	3%	12%	-5%	9%	15%	37%	42%	4%
<i>Edificação 2 TC4</i>	26%	31%	-5%	20%	40%	51%	53%	-7%
<i>Edificação 2 TC6</i>	38%	38%	41%	44%	44%	56%	67%	20%
Média geral	-3%	-5%	3%	8%	19%	17%	22%	-3%

O segundo parâmetro estatístico utilizado é a frequência relativa em que os valores obtidos com cada método, para cada cenário, são menores do que os valores dos experimentos ou estão dentro da faixa de incerteza de medição. Este parâmetro estatístico é importante pois mostra o percentual de casos em que os valores de cada método são menores que o valor experimental, sendo então útil em projetos de sistemas de segurança contra incêndio. A frequência relativa é calculada como,

$$f_{ri} = 100 \cdot \frac{f_i}{n} \quad (6.2)$$

onde f_{ri} é a frequência relativa de ocorrência, f_i é a frequência simples de ocorrência do fato (quantidade de instantes de tempo de cada caso e cada método em que a altura da fumaça do modelo é menor do que a experimental ou estão dentro da faixa de incerteza de medição) e n é o tamanho da amostra (total de instantes de tempo em cada cenário). A Tabela 6.2 exibe os valores de frequência relativa para todos os cenários estudados e métodos aplicados. Numa análise geral dos resultados, percebe-se grande variação dos valores da frequência relativa conforme o método e o cenário de incêndio. Métodos de cálculo da altura da fumaça que forneçam valores de f_{ri} menores que 50% serão descartados das análises seguintes, pois nestes casos a altura da fumaça foi sobre-estimada em pelo menos metade dos instantes de tempo para

determinado cenário de incêndio; por outro lado, métodos de cálculo da altura da fumaça que forneçam, para determinado cenário de incêndio, valores de f_{ri} acima de 50% serão analisados em mais detalhes nas próximas seções. A existência de incertezas de medição presentes nos resultados experimentais, bem como a precisão dos resultados obtidos pelo *software* FDS e a existência de poucos pontos para comparação entre experimento e simulação, são fatores que devem ser considerados na análise. Analisando os valores de f_{ri} da Tab. 6.2, percebe-se que o método *N*-percentual não é indicado para o cenário do *Átrio*, para os casos *Túnel 1* e *Túnel 2* os métodos frequência de flutuação, relação integral e padrão do FDS devem ser desconsiderados, para os cenários *Túnel 3* e *Túnel 4* percebe-se bons resultados com o método *N*-percentual utilizando a constante $N = 40\%$ e $N = 50\%$ e com o método padrão do FDS. Para o cenário *Corredor 1*, obteve-se bons resultados com o método *N*-percentual ($N = 10\%$) e frequência de flutuação. Para o caso do *Corredor 2* os métodos frequência de flutuação, relação integral e *N*-percentual ($N = 10\%$) se apresentam como métodos adequados. No caso da *Edificação Residencial 1*, todos os métodos apresentam bons resultados, enquanto no caso *Edificação Residencial 2* os resultados se mostraram com grandes variações, porém com pelo menos um método se mostrando adequado para calcular a altura da camada de fumaça na sala do fogo e na sala adjacente.

Tabela 6.2 – Frequência relativa de ocorrência de valores da altura da camada de fumaça obtida com os modelos menores do que os valores experimentais.

Cenário	Frequência de Flutuação	Relação Integral	N 10%	N 20%	N 30%	N 40%	N 50%	Padrão FDS
<i>Átrio</i>	66,7%	50%	0%	0%	0%	0%	0%	66,7%
<i>Túnel 1</i>	0%	0%	0%	0%	62,5%	87,5%	100%	12,5%
<i>Túnel 2</i>	0%	0%	42,8%	42,8%	42,8%	57,1%	71,4%	0%
<i>Túnel 3</i>	100%	100%	0%	25%	25%	100%	100%	62,5%
<i>Túnel 4</i>	14,7%	0%	0%	0%	0%	100%	100%	85,7%
<i>Corredor 1</i>	50%	33,3%	66,7%	33,3%	33,3%	33,3%	16,7%	33,3%
<i>Corredor 2</i>	100%	100%	50%	0%	0%	0%	0%	25%
<i>Edificação 1 TC1</i>	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	83,3%
<i>Edificação 1 TC3</i>	100%	100%	100%	100%	100%	16,7%	16,7%	100%
<i>Edificação 1 TC5</i>	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
<i>Edificação 1 TC6</i>	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
<i>Edificação 2 TC1</i>	33,3%	33,3%	16,7%	50%	50%	16,7%	16,7%	100%
<i>Edificação 2 TC2</i>	16,7%	0%	50%	16,7%	0%	0%	0%	33,3%
<i>Edificação 2 TC3</i>	100%	16,7%	100%	16,7	16,7	0%	0%	16,7%
<i>Edificação 2 TC4</i>	16,7%	0%	16,7%	16,7%	0%	0%	0%	100%
<i>Edificação 2 TC6</i>	16,7%	16,7%	0%	16,7%	16,7%	16,7%	16,7%	0%

O terceiro parâmetro estatístico utilizado é o desvio padrão, calculado da seguinte forma:

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (6.3)$$

na qual \bar{x} é a média dos valores em cada posição e x_i é a posição da altura da camada de fumaça no tempo, sendo que um desvio padrão de valor similar ao do experimento, indica a existência de uma homogeneidade entre experimento e simulação. A Tabela 6.3 apresenta os desvios padrão das amostras obtidas em cada experimento, assim como em cada método matemático.

Tabela 6.3 – Desvio padrão para todos os cenários de incêndio estudados após análise gráfica.

Cenário	Experimento (m)	Frequência de Flutuação (m)	Relação Integral (m)	N 10% (m)	N 20% (m)	N 30% (m)	N 40% (m)	N 50% (m)	Padrão FDS (m)
<i>Átrio</i>	8,56	9,43	10,51	10,10	10,15	9,21	3,10	9,10	8,39
<i>Túnel 1</i>	0,011	0,021	0,025	0,089	0,096	0,087	0,078	0,075	0,054
<i>Túnel 2</i>	0,013	0,025	0,030	0,009	0,033	0,052	0,064	0,046	0,035
<i>Túnel 3</i>	0,007	0,009	0,03	0,014	0,032	0,026	0,063	0,06	0,056
<i>Túnel 4</i>	0,007	0,03	0,02	0,034	0,047	0,038	0,09	0,08	0,069
<i>Corredor 1</i>	0,80	0,408	0,258	0,757	0,516	0,376	0,376	0,409	0,52
<i>Corredor 2</i>	0,649	0,409	0,583	0,825	0,575	0,575	0,575	0,325	0,492
<i>Edificação 1 TC1</i>	0,734	0,6	0,6	0,528	0,528	0,592	0,801	0,801	1,13
<i>Edificação 1 TC3</i>	0,734	0,882	1	0,612	0,841	0,902	1,038	0,799	0,281
<i>Edificação 1 TC5</i>	0,52	1,311	1,237	1,304	1,167	1,132	0,954	0,85	1,138
<i>Edificação 1 TC6</i>	0,896	1,047	1,258	1,320	1,192	1,192	0,907	0,787	1,114
<i>Edificação 2 TC1</i>	0,726	0,826	0,869	1,134	0,983	0,937	0,794	0,796	0,982
<i>Edificação 2 TC2</i>	0,675	0,889	0,868	0,880	0,786	0,659	0,682	0,571	0,834
<i>Edificação 2 TC3</i>	0,672	0,675	0,615	0,763	0,723	0,786	0,55	0,561	0,796
<i>Edificação 2 TC4</i>	0,714	0,989	0,889	1,011	0,949	0,864	0,777	0,789	0,763
<i>Edificação 2 TC6</i>	0,703	0,720	0,720	1,079	0,801	0,801	0,694	0,449	0,846

Os resultados das Tabelas 6.1, 6.2 e 6.3 mostram grande variação de valores. Por este motivo, o restante deste Capítulo analisa os resultados de forma segmentada, com o objetivo de analisar para cada categoria de cenário os resultados obtidos com cada método de cálculo da altura da camada de fumaça.

6.5.2 Análise de cada cenário de incêndio estudado

A Tabela 6.4 mostra os desvios relativos médios para cada cenário de incêndio. Os valores referentes ao “Túnel” representam a média dos valores obtidos para os quatro cenários de túnel em escala reduzida (*Túnel 1, 2, 3 e 4*). Já os valores para o cenário “Corredor” referem-se à média dos cenários *Corredor subterrâneo 1* e *Corredor subterrâneo 2*. Os valores para o cenário de “Edificação” são a média dos resultados obtidos para os cenários *Edificação*

residencial 1 (TC1) e *Edificação residencial 2 (TC4)*, visto que nestes dois cenários o fogo estava na sala 1 e na sala 2, respectivamente, desta forma as árvores de termopares TC1 e TC4 encontram-se em posições equivalentes, então os desvios médios da Tabela 6.4 referem-se à altura da camada de fumaça na sala onde está o fogo. Para obter os valores da Tabela 6.4, assim como das tabelas nas seções seguintes, os métodos que forneceram $f_{ri} < 50\%$ (conforme Tab. 6.2) foram descartados da análise.

Tabela 6.4 – Desvios relativos médios segmentados para cada cenário de incêndio estudado.

Cenário	Frequência de Flutuação	Relação Integral	<i>N</i>	<i>N</i>	<i>N</i>	<i>N</i>	<i>N</i>	Padrão FDS
			10%	20%	30%	40%	50%	
Átrio	-17%	-20%	*	*	*	*	*	-1%
Túnel ¹	-44%	-50%	*	*	-9%	-39%	-49%	14%
Corredor ²	0%	-26%	-14%	*	*	*	*	*
Edificação ³	*	-45%	-16%	-53%	-34%	-5%	-5%	-6%

¹ média de resultados dos cenários *Túnel 1, 2, 3 e 4* com $f_{ri} > 50\%$

² média de resultados dos cenários *Corredor 1 e 2* com $f_{ri} > 50\%$

³ média de resultados dos cenários *Edificação residencial 1 (TC1)* e *Edificação residencial 2 (TC4)* com $f_{ri} > 50\%$

* métodos com $f_{ri} < 50\%$ foram descartados (Tab. 6.2)

Para o cenário *Átrio* os métodos frequência de flutuação, relação integral e padrão do FDS foram os mais conservadores nas análises do desvio relativo médio e frequência relativa, sendo o método padrão do FDS o que apresentou o desvio padrão mais próximo do experimental. Para o cenário *Túnel* o melhor método foi o *N*-percentual, utilizando o valor da constante $N = 40\%$, apresentando desvio relativo médio de -39% e frequência de ocorrência média $> 80\%$ (observa-se que $N = 10\%$ forneceu desvio relativo médio menor, mas f_{ri} média $< 50\%$). Para o cenário *Corredor subterrâneo* o melhor método foi frequência de flutuação, com desvio relativo médio de 0% e frequência de ocorrência média de 75% , seguido pelo método *N*-percentual ($N = 10\%$), com desvio relativo médio de -14% e frequência de ocorrência média próxima a 60% . Já no cenário *Edificação residencial* o método padrão do FDS apresentou o melhor resultado, com desvio relativo médio de -6% e f_{ri} média $> 90\%$, enquanto o método *N*-percentual também apresentou bons resultados, mas com f_{ri} média menor (mas ainda $> 50\%$).

De forma geral, estes resultados mostram que nenhum dos métodos de cálculo pode ser considerado o mais preciso ou recomendado para todos os cenários de incêndio. No entanto, deve-se observar que os métodos padrão do FDS e *N*-percentual (com diferentes valores da constante N) fornecem bons resultados para todos os cenários estudados.

6.5.3 Análise dos diferentes tipos de exaustão (natural ou forçada) em cenários com geometria alongada longitudinalmente

Os cenários com geometria alongada longitudinalmente com exaustão natural e forçada são os casos do *Túnel em escala reduzida* e do *Corredor subterrâneo*. A Tabela 6.5 apresenta a média dos desvios relativos obtidos, segmentando os cenários com apenas exaustão natural (entradas/saídas dos túneis), com exaustão natural (entradas/saídas dos túneis) e chaminé no teto, e com exaustão forçada. Para o caso de exaustão natural (entradas/saídas dos túneis) os valores da Tabela 6.5 referem-se à média dos cenários *Túnel 1* e *Túnel 2*; o caso de exaustão natural e chaminé no teto refere-se à média dos cenários *Túnel 3* e *Túnel 4*; enquanto o caso de exaustão forçada refere-se à média dos cenários *Corredor subterrâneo 1* e *Corredor subterrâneo 2*. Para obter os valores da Tabela 6.5, assim como nas tabelas das seções seguintes, os métodos que forneceram $f_{ri} < 50\%$ (conforme Tab. 6.2) foram descartados da análise.

Tabela 6.5 – Média dos desvios relativos para cenários com exaustão natural (com e sem chaminé) e exaustão forçada.

Tipo de exaustão	Frequência de Flutuação	Relação Integral	N 10%	N 20%	N 30%	N 40%	N 50%	Padrão FDS
Exaustão natural ¹	*	*	*	*	-9%	-33%	-42%	*
Exaustão natural + chaminé ²	-44%	-50%	*	*	*	-44%	-56%	14%
Exaustão forçada ³	0%	-26%	-14%	*	*	*	*	*

¹ média de resultados dos cenários: *Túnel 1* e *Túnel 2* com $f_{ri} > 50\%$

² média de resultados dos cenários: *Túnel 3* e *Túnel 4* com $f_{ri} > 50\%$

³ média de resultados dos cenários: *Corredor subterrâneo 1* e *Corredor subterrâneo 2* com $f_{ri} > 50\%$

* métodos com $f_{ri} < 50\%$ foram descartados (Tab. 6.2)

No cenário com exaustão natural, o melhor método de cálculo foi o N -percentual com $N = 30\%$, obtendo desvio relativo médio de -9% e f_{ri} média $> 50\%$; no entanto, $N = 40\%$ e $N = 50\%$ forneceram f_{ri} média $> 70\%$ e $> 85\%$, respectivamente, sendo então recomendados. Para o cenário de exaustão natural com chaminé, os métodos frequência de flutuação e N -percentual ($N = 40\%$) apresentaram o melhor desempenho, ambos com desvio relativo médio de -44% ; entretanto o método N -percentual apresentou $f_{ri} = 100\%$ para esta condição, sendo então preferível a sua utilização. Já para o cenário de exaustão forçada, o método frequência de flutuação forneceu o menor desvio relativo médio (0%) e f_{ri} média $= 75\%$; outro método com

bom desempenho no caso de exaustão forçada foi o N -percentual com $N = 10\%$, apresentando desvio relativo médio positivo (-14%) e com f_{ri} média $> 50\%$.

Cabe lembrar que, ao longo de toda Seção 6.5 deste trabalho, os métodos foram avaliados levando em consideração somente frequências de ocorrência relativas (f_{ri}) maiores que 50%, além de analisar o desvio relativo médio, o qual deve ser o mais próximo de zero possível. Sendo assim, um determinado método deve fornecer, em média, um valor para a altura da camada de fumaça menor ou igual ao valor experimental, sendo esta uma análise conservadora sob o ponto de vista de segurança contra incêndio.

Em relação à análise dos métodos aplicados em casos com diferentes tipos de exaustão (natural ou forçada) com geometria alongada longitudinalmente, destaca-se o bom desempenho do método N -percentual, o qual obteve bons resultados para situações com exaustão natural com ou sem chaminé, e também para casos com exaustão forçada.

6.5.4 Análise de cenários conforme o volume do compartimento

O objetivo desta seção é analisar o desempenho dos métodos de cálculo da altura da camada de fumaça em função do volume do compartimento estudado. Para isso, os cenários foram divididos em 3 categorias, conforme seus volumes: volume da ordem de 10 m^3 , volume da ordem de 100 m^3 e volume da ordem de 1000 m^3 . Os cenários de túnel em escala reduzida correspondem aos casos com volumes de $\sim 10 \text{ m}^3$, sendo os valores dos desvios relativos médios mostrados na Tabela 6.6 a média dos cenários *Túnel 1, 2, 3 e 4*. Para volumes de $\sim 100 \text{ m}^3$, considerou-se a média dos desvios relativos dos cenários *Edificação residencial 1 (TC1)* e *Edificação residencial 2 (TC4)*, sendo assim analisada somente a altura da camada de fumaça na sala com fogo (a análise da sala adjacente, sem fogo, será feita na Seção 6.5.7). Para volumes de $\sim 1000 \text{ m}^3$ considerou-se somente o cenário do átrio (o cenário do corredor subterrâneo também possui volume de $\sim 1000 \text{ m}^3$, porém possui exaustão forçada, sendo então desconsiderado na presente análise). Para obter os valores da Tabela 6.6, os métodos que forneceram $f_{ri} < 50\%$ (conforme Tab. 6.2) foram descartados da análise.

Tabela 6.6 – Média dos desvios relativos em função do volume do compartimento.

Volume do compartimento	Frequência de Flutuação	Relação Integral	N 10%	N 20%	N 30%	N 40%	N 50%	Padrão FDS
$V \sim 10 \text{ m}^3$	-44%	-50%	*	*	-9%	-39%	-49%	14%
$V \sim 100 \text{ m}^3$	*	-45%	-16%	-53%	-34%	-5%	-5%	-6%
$V > 1000 \text{ m}^3$	-17%	-20%	*	*	*	*	*	-1%

* métodos com $f_{ri} < 50\%$ foram descartados (Tab. 6.2)

Na análise dos desvios relativos médios para compartimentos de pequenas dimensões ($V \sim 10 \text{ m}^3$), o método N -percentual com $N = 30\%$ forneceu o menor desvio relativo médio (-9%), no entanto com baixa frequência de ocorrência relativa; assim, considerando os valores de f_{ri} , o melhor resultado deve ser considerado aquele obtido com $N = 40\%$ (desvio relativo médio de -39% e $f_{ri} > 50\%$ em todos cenários com pequenas dimensões).

Para compartimentos de volume intermediário ($V \sim 100 \text{ m}^3$), o método padrão do FDS forneceu desvio relativo médio de -6% e frequência de ocorrência relativa superior a 90%, sendo então adequado para esta condição, enquanto o método N -percentual ($N = 40\%$ e $N = 50\%$) apresentou desvio relativo um pouco menor (-5%), porém com $f_{ri} < 50\%$ em alguns cenários (Tab. 6.2).

Para grandes volumes ($V \sim 1000 \text{ m}^3$), o método padrão do FDS forneceu o melhor resultado, sendo o desvio relativo médio de -1%, com frequência de ocorrência relativa próxima a 70%, bem como desvio padrão próximo ao experimento.

Por fim, na análise dos métodos em relação ao volume dos compartimentos, os métodos N -percentual e padrão do FDS se destacam, sendo o primeiro adequado para pequenos compartimentos e o segundo recomendado para médios e grandes volumes.

6.5.5 Análise da razão de aspecto dos compartimentos

A norma ISO/WD 13390 estabelece razões entre comprimento (L), largura (W) e altura (H) do compartimento para serem utilizadas como referência no uso de modelos de duas zonas, amplamente empregados em projetos de engenharia de segurança contra incêndios. Seguindo as razões geométricas descritas naquela norma, esta seção apresenta a análise dos métodos de cálculo da altura da camada de fumaça em função da razão de aspecto, conforme segue:

- Formato tipo *caixa*: $L/H \leq 3$ e $L/W \leq 3$ e $W/H \geq 0,4$
- Formato tipo *túnel*: $L/H > 3$ e $L/W > 3$ e $W/H < 0,4$

Assim, os resultados referentes ao formato tipo *caixa* são aqueles obtidos para os cenários da *Edificação residencial (Edificação residencial 1 TC1 e Edificação residencial 2 TC4)* e do *Átrio*, enquanto o formato tipo *túnel* refere-se aos resultados dos cenários *Túnel em escala reduzida* e *Corredor subterrâneo*. A Tabela. 6.7 apresenta o desvio relativo médio para cada uma das categorias de razão de aspecto descritas. Para obter os valores desta tabela, os métodos que forneceram $f_{ri} < 50\%$ (conforme Tab. 6.2) foram descartados da análise.

Tabela 6.7 – Média dos erros percentuais em função do formato do compartimento.

Formato do compartimento	Frequência de Flutuação	Relação Integral	N 10%	N 20%	N 30%	N 40%	N 50%	Padrão FDS
Tipo <i>caixa</i>	-17%	-33%	-16%	-53%	-34%	-5%	-5%	-4%
Tipo <i>túnel</i>	-14%	-38%	-14%	*	-9%	-39%	-49%	14%

* métodos com $f_{ri} < 50\%$ foram descartados (Tab. 6.2)

Para o formato tipo *caixa* considera-se que o método padrão do FDS forneceu os melhores resultados, com desvio relativo médio de -4% e f_{ri} superior a 80%, enquanto o método N -percentual ($N = 40\%$ e $N = 50\%$) forneceu desvio relativo médio também baixo (-5%), porém com $f_{ri} < 50\%$ em alguns cenários que compõem o formato tipo *caixa*. Para o formato tipo *túnel*, o método com melhor desvio relativo médio foi o N -percentual ($N = 30\%$), com desvio relativo médio de -9%, porém com $f_{ri} < 50\%$ em vários casos que compõem o formato tipo *túnel*; assim, $N = 40\%$ forneceu o melhor resultado para esta condição, com desvio relativo médio de -39% e frequência de ocorrência relativa média $> 50\%$ para os casos que compõem o formato tipo *túnel* (apesar de fornecer $f_{ri} < 50\%$ em alguns cenários, este foi o melhor método para o formato tipo *túnel* ao analisar em conjunto o desvio relativo médio e f_{ri}). Assim, observa-se novamente o satisfatório desempenho dos métodos N -percentual e padrão do FDS na análise relacionada ao formato do compartimento.

6.5.6 Análise em função da taxa de liberação de calor

A taxa de liberação de calor é um dos principais parâmetros para a determinação de características das chamas e do incêndio. Esta seção analisa os resultados obtidos com os diferentes métodos de cálculo da altura da camada de fumaça em função da taxa de liberação de calor, sendo selecionadas duas faixas para este parâmetro: ~ 100 kW e ~ 1000 kW, em decorrência dos cenários que estão sendo analisados neste trabalho. Para a faixa de ~ 100 kW,

os resultados da Tabela 6.8 consideram a média dos desvios relativos obtidos para os cenários do *Túnel em escala reduzida* e da *Edificação residencial (Edificação residencial 1 TC1 e Edificação residencial 2 TC4)*, enquanto para taxas ~ 1000 kW considera-se a média dos cenários *Átrio* e *Corredor subterrâneo*. Para obter os valores da Tabela 6.8, os métodos que forneceram $f_{ri} < 50\%$ (conforme Tab. 6.2) foram descartados da análise.

Tabela 6.8 – Média dos desvios relativos em função da taxa de liberação de calor.

Faixa de taxa de liberação de calor	Frequência de Flutuação	Relação Integral	N 10%	N 20%	N 30%	N 40%	N 50%	Padrão FDS
~ 100 kW	-44%	-48%	-16%	-53%	-22%	-32%	-40%	4%
~ 1000 kW	-5%	-23%	-14%	*	*	*	*	-1%

* métodos com $f_{ri} < 50\%$ foram descartados (Tab. 6.2)

Para os cenários com baixa taxa de liberação de calor (~ 100 kW), observa-se na Tabela 6.8 que o método N -percentual ($N = 10\%$) apresenta o melhor desvio relativo médio (-16%), porém a frequência de ocorrência média entre os casos que compõem esta faixa de taxa de liberação de calor é muito baixa; assim, o mesmo método, mas com $N = 40\%$ fornece f_{ri} médio superior a 70% e desvio relativo médio de -32%, sendo então preferível. Para os cenários com taxa de liberação de calor elevada (~ 1000 kW), os melhores resultados foram alcançados com o método frequência de flutuação (desvio relativo médio de -5%) e f_{ri} média $> 70\%$, enquanto o método padrão do FDS forneceu desvio relativo médio de -1%, mas f_{ri} média de 40%, sendo então preferível o primeiro método.

6.5.7 Análise de cenários com sala adjacente à sala do fogo

Os cenários *Edificação residencial 1* e *2* são compostos por dois compartimentos, sendo conectados por uma porta por onde a fumaça pode escoar do ambiente onde ela é produzida para o ambiente adjacente. O estudo de Lai et al., 2013, obteve medições de perfis de temperaturas em diversas posições dentro dessas salas, conforme mostrado na Figura 4.6. Esta seção do trabalho analisa o desempenho dos métodos de cálculos da altura da camada de fumaça na sala do fogo e na sala adjacente em função da posição onde o perfil de temperatura é obtido. Assim a Tabela 6.9 apresenta os desvios relativos médios para quatro casos (para obter os valores desta tabela, os métodos que forneceram $f_{ri} < 50\%$ (conforme Tab. 6.2) foram descartados da análise.):

- Altura da camada de fumaça na sala do fogo com perfil de temperaturas medido na porta desta sala (caso *Sala fogo, TC porta* da Tabela 6.9): estes resultados referem-se à média dos desvios relativos para o cenário Edificação 1 (fogo na sala 1) usando a árvore de termopares TC1 (localizada na porta da sala 1) e o cenário Edificação 2 (fogo na sala 2) usando a árvore de termopares TC4 (localizada na porta da sala 2).
- Altura da camada de fumaça na sala do fogo com perfil de temperaturas medido próximo à parede desta sala (caso *Sala fogo, TC parede* da Tabela 6.9): estes resultados referem-se à média dos desvios relativos para o cenário Edificação 1 (fogo na sala 1) usando a árvore de termopares TC3 (localizada próxima à parede da sala 1) e o cenário Edificação 2 (fogo na sala 2) usando a árvore de termopares TC6 (localizada próxima à parede da sala 2).
- Altura da camada de fumaça na sala adjacente com perfil de temperaturas medido no centro desta sala (caso *Sala adjacente, TC centro* da Tabela 6.9): estes resultados referem-se à média dos desvios relativos para o cenário Edificação 1 (fogo na sala 1) usando a árvore de termopares TC5 (localizada no centro da sala adjacente – sala 2) e o cenário Edificação 2 (fogo na sala 2) usando a árvore de termopares TC2 (localizada no centro da sala adjacente – sala 1).
- Altura da camada de fumaça na sala adjacente com perfil de temperaturas medido próximo à parede desta sala (caso *Sala adjacente, TC parede* da Tabela 6.9): estes resultados referem-se à média dos desvios relativos para o cenário Edificação 1 (fogo na sala 1) usando a árvore de termopares TC6 (localizada próximo à parede da sala adjacente – sala 2) e o cenário Edificação 2 (fogo na sala 2) usando a árvore de termopares TC3 (localizada próximo à parede da sala adjacente – sala 1).

Tabela 6.9 – Desvios relativos médios em função da posição de medição do perfil de temperaturas para o cenário *Edificação residencial*.

Cenário	Freq. de Flutuação	Relação Integral	N 10%	N 20%	N 30%	N 40%	N 50%	Padrão FDS
Sala fogo, TC porta	*	-45%	-16%	-53%	-34%	-5%	-5%	-6%
Sala fogo, TC parede	-20%	-33%	-3%	-49%	-3%	*	*	-34%
Sala adjacente, TC centro	-44%	-49%	-29%	-46%	-41%	-25%	-16%	-51%
Sala adjacente, TC parede	-2%	-43%	-24%	-28%	-28%	1%	16%	-36%

* métodos com $f_{ri} < 50\%$ foram descartados (Tab. 6.2)

Os resultados da Tabela 6.9 mostram que a posição de medição do perfil de temperaturas para a obtenção da altura da camada de fumaça na sala do fogo influencia nos resultados de cada método de cálculo. Observa-se que o método N -percentual ($N = 40\%$ e $N = 50\%$) forneceu o melhor desvio relativo médio (-5%) para a obtenção da altura da camada de fumaça na sala do fogo, com posicionamento da árvore de termopares próxima à porta desta sala, no entanto a média de f_{ri} para os casos que compõem esta condição é 50%. O método padrão do FDS também forneceu bons resultados para este caso, com desvio relativo médio de -6%, com a vantagem de fornecer f_{ri} médio $> 90\%$, sendo então preferível. Quando a altura da camada de fumaça na sala do fogo foi calculada com as medições de temperatura obtidas perto da parede, novamente o melhor método foi o N -percentual $N = 30\%$, o qual apresenta desvio relativo médio de -3% e f_{ri} média próxima a 60%. Estes resultados explicam a escolha dos cenários *Edificação 1 TC1* e *Edificação 2 TC4* nas seções anteriores deste trabalho ao analisar os resultados da altura da camada de fumaça na sala do fogo em função do volume do compartimento, razão de aspecto e taxa de liberação de calor.

Em relação à obtenção da altura da camada de fumaça nas salas adjacentes, para os termopares posicionados no centro das salas (na Tab. 6.9: Sala adjacente, TC Centro), observa-se que os melhores resultados foram obtidos com o método N -percentual com $N = 10\%$ (desvio relativo médio de -29% e f_{ri} média = 75%). Realizando a mesma análise nas salas adjacentes, mas para os termopares posicionados próximos às paredes (na Tab. 6.9: Sala adjacente, TC parede), os melhores métodos foram a frequência de flutuação e N -percentual com $N = 10\%$, com desvios relativos médios de -2% e -24%, e ambos com $f_{ri} = 100\%$ em todos os casos que compõem esta condição.

7 CONCLUSÕES

Nove cenários experimentais de incêndios em compartimentos foram analisados com o *software* FDS: átrio (1 cenário), túnel em escala reduzida (4 cenários), corredor subterrâneo (2 cenários) e edificação residencial (2 cenários). Utilizando perfis verticais de temperatura no interior dos compartimentos obtidos através do *software* FDS, o cálculo da altura da camada de fumaça foi feito usando quatro métodos matemáticos: frequência de flutuação, relação integral, N -percentual e o método padrão do FDS.

Dos quatro métodos matemáticos avaliados, o pós-processamento do perfil de temperaturas se faz necessário em três deles para obter a altura da camada de fumaça, sendo que os métodos de frequência de flutuação e relação integral dependem de uma equação para o perfil vertical de temperaturas, enquanto o método N -percentual depende da constante N ; o método padrão do FDS não necessita de pós-processamento, pois o *software* fornece diretamente a altura da camada de fumaça.

A avaliação dos resultados obtidos com o método frequência de flutuação mostraram a importância do ajuste da equação do perfil de temperaturas. O método da relação integral tem o mesmo desafio, somando a necessidade de estimar valores da altura da camada de fumaça para encontrar o resultado final. O método N -percentual pode apresentar resultados bastante diferentes dependendo da constante N adotada, a qual variou entre 10% e 50% no presente estudo. O método padrão do FDS mostrou-se o método mais estável para os cenários testados, com desvios relativos médios variando entre -51% e 20%, enquanto os demais métodos forneceram desvios relativos médios mais elevados (atingindo até 166%), entretanto numa análise segmentada de resultados, o método padrão do FDS não seria recomendado em algumas situações.

Através dos cenários de incêndio estudados, foi possível analisar a capacidade do *software* FDS de simular casos experimentais de incêndio em compartimentos, tendo como dados de entrada diferentes parâmetros como a taxa de massa de combustível queimada e a taxa de liberação de calor, também percebe-se a capacidade de simulação de sistemas com emprego de exaustão natural e mecânica, simulações de grandes compartimentos como o corredor e o átrio, e de pequenos compartimentos como é o caso do túnel em escala reduzida. A etapa de análise de qualidade de malha realizada mostrou que os resultados da altura da camada de fumaça são pouco influenciados pela discretização do domínio de cálculo, sendo esta

discretização avaliada de duas formas neste trabalho: análise do parâmetro D^*/δ e comparação entre perfis de temperaturas experimentais e numéricos do FDS.

Numa análise geral dos métodos matemáticos avaliados, percebe-se que não existe um método ideal para análise da altura da camada de fumaça a partir de dados relacionados com a temperatura, sendo que em cada cenário de incêndio estudado um dos métodos forneceu o melhor resultado. Entretanto, segmentando os cenários de incêndio conforme determinadas características, tais como tipo de exaustão (natural ou forçada), volume do compartimento, razão de aspecto do compartimento, e taxa de liberação de calor, foi possível mostrar que três métodos se destacam: (1) o método padrão do FDS possui bons resultados para muitos casos, e com pouca variação do desvio relativo médio e frequência de ocorrência relativa, (2) o método N -percentual forneceu bons resultados para todos os segmentos analisados, porém com diferentes valores da constante N , sendo este um método atrativo para ser estudado com mais profundidade, (3) o método frequência de flutuação, que em várias situações apresentou desvio relativo médio e frequência de ocorrência adequados ao comparar seus resultados com os valores experimentais.

7.1 Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestões para próximos trabalhos, destacam-se a realização de simulações numéricas de outros cenários de incêndio e elaboração de um novo método matemático para determinar a altura da camada de fumaça a partir do perfil de temperaturas.

Considerando que os casos experimentais reportados na literatura e utilizados no presente trabalho muitas vezes são deficientes em informações completas para a montagem da simulação, tais como informações sobre posicionamento de termopares, taxa de queima do combustível, e materiais construtivos, os quais afetam de maneira considerável os resultados, outra sugestão de estudo futuro é a execução de experimentos em laboratório, que contemplem as diferentes características de incêndios em compartimento (por exemplo, tipo de exaustão, volume do compartimento, razão de aspecto do compartimento, e taxa de liberação de calor), fornecendo assim dados completos para a simulação numérica e estudo posterior de métodos de cálculo da altura da camada de fumaça.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bengtson, S. and Hägglund, B. “**A Smoke-Filling Simulation Model and ITS Engineering Applications.**” *Fore Technology*, Vol. 22, No. 2, May 1986, p.92

Bennard, V. e Inzaghi, N., “**A Mathematical Model of the Smoke Layer Evolution Compartment Fires**”. *The Open Thermodynamics Journal*, 2010,4,191-200

Chow, W.K., Li, Y.Z., Cui, E. and Huo. R. “**Natural smoke filling in atrium with liquid pools fire up to 1.6 MW.**” *Building and Environment*, 2000.

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., Harkleroad, M., Quintiere, J. and Rinkinen, W. **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.

Deardorff, J.W. Stratocumulus-capped mixed layers derived from a three-dimensional model. **Boundary-Layer Meteorology**, vol.18(4), p. 495-527, 1980.

Dreisbach, J., McGrattan K. Verification and validation of selected fire models for nuclear power plant applications. In: *Fire dynamics simulator (FDS)*, NUREG-1824 final report, vol. 7. **U.S.Nuclear Regulatory Commission**, Office of Nuclear Regulatory Research, 2007.

Drysdale, D., *An Introduction to fire dynamics*. 3 Ed. Universiade de Edinburgh, Escócia, 2011.

Gao, Z.H., Ji, J., Fan, C.G., Li, L.J. and Sun, J.H. **Determination of Smoke Layer Interface Height of Medium Scale Tunnel Fire Scenarios.** *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 56, pp. 118–124, 2016.

Gross, D., Loftus, J.J., Roberson, A.F.. “Method for measuring smoke from burning materials”. **Symposium on Fire Test Methods**, Philadelphia, 1967.

Gutiérrez-Montes, C., Sanmiguel-Rojas, E., Viedma, A., Rein, G. Experimental data and numerical modelling of 1.3 and 2.3 MW fires in a 20 m cubic atrium, **Building and Environment**, 2008.

Hall, J. e Harwood, B. “**Smoke or burns, which is deadlier?**”. *National Fire Protection Association -NFPA J*, 89, pp. 38-44, 1995.

He, Y., Fernando, A., Luo, M. **Determination of Interface Height from Measured Parameter Profile in Enclosure Fire Experiment.** *Fire Safety Journal*, vol. 31, no. 1, pp. 19–38, 1998.

Hu, L.H., Li, Y.Z., Huo, R., Yi, L., Chow, W.K., **Full-scale experimental studies on mechanical smoke exhaust efficiency in an underground corridor**. Science Direct, 2005.

Huang, L., Ma, J., Li, A., Wu, Y., **Scale modelling experiments of fire-induced smoke and extraction via mechanical ventilation in an underground hydropower plant**. Sustainable Cities and Society, 2018.

Hurley, M.J., **ASET-B: Comparison of Model Predictions with Full-scale Test Data**. *Journal of Fire Protection Engineering*, Vol.13, 2003

Kwon, J., **Evaluation of FDS V.4: Upward Flame Spread**, Worcester Polytechnic Institute, MA, USA, 2006.

Lai, C., Chen, C., Tsai, M.J., Tsai, M.H. and Lin, T., Determination of fire smoke height in a naturally ventilated room. *Fire Safety Journal*, Vol. 58, pp. 1–14, 2013.

Li, S., Cheng, X., Mei, P., Lu, S., Yang, H., Zhang, H. “Multiple scattering of light transmission in smoke layer”, **State Key Laboratory of Fire Science**, University of Science and Technology of China, 2013.

Li, Y.Z., Huo, R., Yuan L.M., Li P.D., Fan, W.C., Cui. E., Study of smoke filling processes in an atrium. *Journal of China University of Science and Technology*, Vol 29:590-4, 1999.

Ludwig, C. B., Malkmus, W., Reardon, J. E., and Thomson, J. A. L. **Handbook of Infrared Radiation From Combustion Gases**, 1973.

Magnussen B.F e Hjertager, B.H, On Mathematical Modeling of Turbulent Combustion with Special Emphasis on Soot Formation a Combustion, **In Proceedings of the Sixteenth Symposium (International) on Combustion**, p. 719–729. Pittsburgh, Pennsylvania, 1977.

McDermott, R. J., Forney, G. P., McGrattan, K., and Mell, W. E. **Fire Dynamics Simulator version 6: complex geometry, embedded meshes, and quality assessment**. In V European Conference on Computational Fluid Dynamics ECCOMAS CFD, p. 14–17. Lisboa, Portugal, 2010.

McGrattan, K., Hostikka, S., McDermott, R., Floyd, J., Vanella, M., Weinschenk, C., and Overholt, K. **Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 1: Mathematical Model (Sixth Edit)**. NIST Special Publication. Gaithersburg, MD, 2017a.

McGrattan, K., Hostikka, S., McDermott, R., Floyd, J., Vanella, M., Weinschenk, C., and Overholt, K. **Fire Dynamics Simulator User’s Guide (Sexta edição)**. NIST Special Publication. Gaithersburg, MD, 2017b.

McGrattan, K., Hostikka, S., McDermott, R., Floyd, J., Vanella, M., Weinschenk, C., and Overholt, K. **Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 3: Validation (Sixth Edit)**. NIST Special Publication. Gaithersburg, MD, 2017c.

Meira, L.Q. Simulação Computacional da Altura e Temperatura da Camada de Fumaça. Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, 2017.

Molica, J. **Aspiração de toxinas ameaça carreiras de sobrevivente de incêndio.** <https://veja.abril.com.br/brasil/aspiracao-de-toxinas-ameaca-carreira-de-sobreviventes-do-incendio/>. Acesso em 30-03-2020.

Pope, S.B. **Turbulent Flows.** Cambridge University Press, 2000.

Qin, T.X, Guo, Y.C., Chan, C.K. e Lin, W.Y., **Numerical simulation of the spread of smoke in a atrium under fire scenario.** Building and Environment., 2009.

Rafinazari, A., Hadjisophocleous, G. **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 Baum, H. R. The equations of motion for thermally driven, buoyant flows. **Journal of Research of the National Bureau of Standards**, vol. 83(3), p. 297, 1978.

Stroup, D., and Lindeman, A. **Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications.** NUREG-1824, supplement 1. Washington, DC, 2013

Sun-yoon,H. Korea Joongang Daily. <https://www.koreajoongangdaily.joins.com/newa/article>, 2003, Acesso em 30-03-2020.

Sun, X.Q., Hu, L.H., Li, Y.Z., Huo, R., Chow, W.K., Fong, N.K., Lui, G., Li, K.Y. **Studies on smoke movement in stairwell induced by an adjacent compartment fire.** Applied Thermal Engineering, 2009.

Tilley, N., Rauwoens, P., Merci, B. **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. Acesso em 30/03/2020.

Xu, J., Zhang,C., Zhao, C., Chen, Q., Wu, J., J. **The Study of the Mechanical Smoke Evacuation System in Atrium Building.** Published by Elsevier Ltd, 2013.

Zhang, J., Zhou, X., Xu, Q., Yang, L. **The Inclination Effect on CO Generation and Smoke Movement in an Inclined Tunnel Fire.** Tunneling and Underground Space Technology, vol. 29, pp. 78–84, 2012.

Zukoski, E. E. **Development of a stratified ceiling layer in the early stages of a closed room fire.** Fire and Materials, vol. 2(2), p. 54–62, 1978.

APÊNDICE A

Altura da camada de fumaça usando perfis experimentais de temperaturas

A.1 EDIFICAÇÃO RESIDENCIAL

Para o cenário da edificação residencial, Lai et al., 2013, fornece as temperaturas nas colunas de termopares TC1 para o caso *Edificação residencial 1* e TC4 para o caso *Edificação residencial 2*, conforme exibido nas Figuras 5.2 e 5.3. Através destes perfis de temperatura experimentais, foram calculadas as alturas da camada de fumaça com os métodos frequência de flutuação, relação integral e N -percentual (com a constante $N = 10, 20, 30, 40, 50\%$). As Figuras A1 e A2 mostram os gráficos da altura da camada de fumaça para a coluna de termopares TC1 da *Edificação residencial 1* e TC4 da *Edificação residencial 2*, respectivamente.

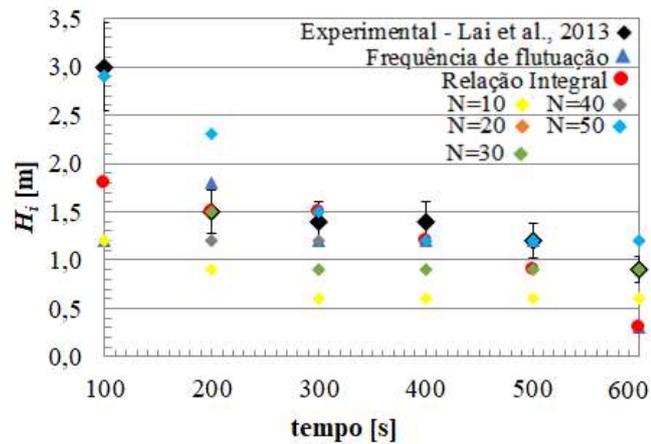


Figura A1. Altura da camada de fumaça para o cenário *Edificação residencial 1* usando perfil de temperaturas experimental obtido com a árvore de termopares TC1: dados experimentais e métodos matemáticos (frequência de flutuação, relação integral e N -percentual com $N = 10, 20, 30, 40$ e 50%).

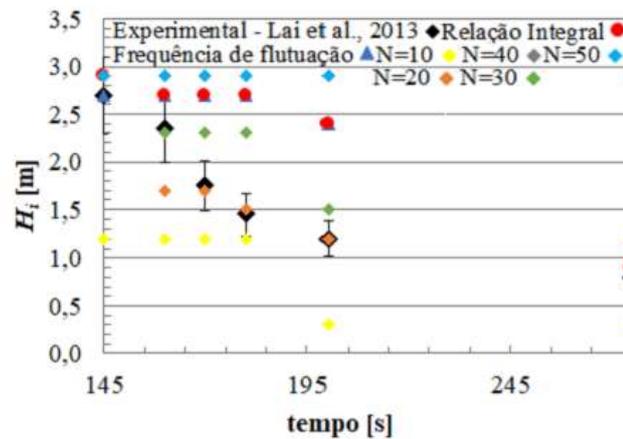


Figura A2. Altura da camada de fumaça para o cenário *Edificação residencial 2* usando perfil de temperaturas experimental obtido com a árvore de termopares TC4: dados experimentais e métodos matemáticos (frequência de flutuação, relação integral e N -percentual com $N = 10, 20, 30, 40$ e 50%).

Além do cálculo da altura da camada de fumaça para os casos da coluna de termopares TC1 da *Edificação residencial 1* e da coluna de termopares TC4 da *Edificação residencial 2*, foi realizada uma comparação entre os resultados obtidos com as medições experimentais de temperatura e aquelas obtidas do FDS. A Tabela A1 fornece os desvios relativos médios para os dois casos, para os diferentes métodos de cálculo da altura da camada de fumaça. Como esperado, percebe-se que os resultados obtidos usando o perfil experimental de temperaturas fornecem alturas da camada de fumaça mais próximas das experimentais, com desvios relativos médios inferiores ao caso em que foi usado o perfil de temperatura do FDS, demonstrando assim a importância de obter perfis de temperaturas com boa precisão nas simulações. Contudo, observa-se que a influência dos diferentes perfis de temperatura (experimental e numérico) é diferente conforme o método de cálculo empregado. Os métodos frequência de flutuação e relação integral foram mais influenciados pelos diferentes perfis de temperaturas, com diferenças nos resultados de $\sim 20\%$, enquanto o método N -percentual foi menos sensível a estes perfis de temperaturas, com diferenças de $\sim 3\%$, demonstrando assim a robustez deste método. Observa-se ainda que o método N -percentual forneceu os melhores resultados usando tanto perfis de temperaturas experimentais quanto numéricos.

Tabela A1 – Desvios relativos médios para a altura da camada de fumaça para os cenários *Edificação residencial 1* (TC1) e *Edificação residencial 2* (TC4), usando perfil de temperatura experimental e obtido numericamente com o FDS.

Cenário	Frequência de Flutuação	Relação Integral	<i>N</i> 10%	<i>N</i> 20%	<i>N</i> 30%	<i>N</i> 40%	<i>N</i> 50%
<i>usando perfis experimentais de temperatura</i>							
<i>Edificação 1</i> TC1	-23%	-23%	-19%	-20%	-17%	-3%	13%
<i>Edificação 2</i> TC4	45%	46%	-48%	-1%	28%	100%	100%
<i>usando perfis de temperatura do FDS (Tabela 6.1)</i>							
<i>Edificação 1</i> TC1	-45%	-45%	-16%	-53%	-34%	-5%	-5%
<i>Edificação 2</i> TC4	26%	31%	-5%	20%	40%	51%	53%
<i>diferença entre os resultados usando perfis experimentais e do FDS</i>							
<i>Edificação 1</i> TC1	22%	22%	3%	33%	17%	2%	18%
<i>Edificação 2</i> TC4	19%	15%	43%	21%	12%	49%	47%

A.2 TÚNEL EM ESCALA REDUZIDA

No cenário do *Túnel 2* é possível calcular a altura da camada de fumaça para o tempo de 40 s, a partir do perfil experimental de temperaturas, exibido na Figura 5.1. Através deste perfil de temperatura experimental, foi calculada a altura da camada de fumaça com os métodos frequência de flutuação, relação integral e *N*-percentual (com a constante $N = 10, 20, 30, 40, 50\%$). A Figura A3 apresenta o gráfico da altura da camada de fumaça do cenário *Túnel 2* no tempo de 40 s.

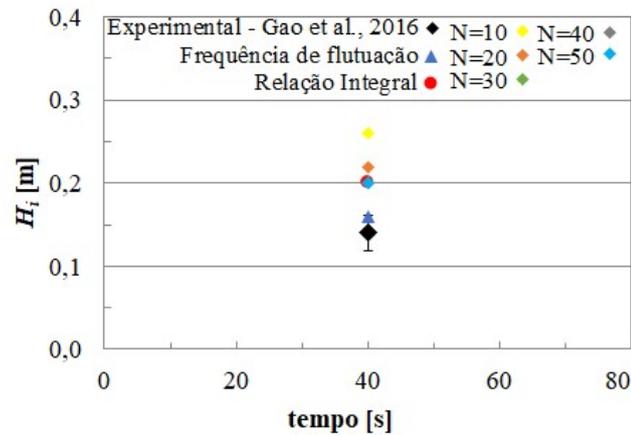


Figura A3. Altura da camada de fumaça para o cenário *Túnel 2* no tempo 40 s, usando perfil de temperaturas experimental obtido com a árvore de termopares: dados experimentais e métodos matemáticos (frequência de flutuação, relação integral e N -percentual com $N = 10, 20, 30, 40$ e 50%).

Após o cálculo da altura da camada de fumaça para o caso do *Túnel 2*, no tempo de 40 s, foi realizada uma comparação entre os resultados obtidos usando os perfis experimentais de temperatura e os perfis de temperatura obtidos do FDS. A Tabela A2 fornece os desvios relativos médios para os dois casos, para os diferentes métodos de cálculo da altura da camada de fumaça, onde se observa a influência do perfil de temperatura usado no cálculo da altura da camada de fumaça em cada método.

Tabela A2 – Desvios relativos médios para a altura da camada de fumaça para o cenário do *Túnel 2* no tempo 40 s, usando perfil de temperatura experimental e obtido numericamente com o FDS.

Cenário	Frequência de Flutuação	Relação Integral	N 10%	N 20%	N 30%	N 40%	N 50%
<i>usando perfis experimentais de temperatura</i>							
<i>Túnel 2</i>	14%	35%	86%	57%	43%	43%	43%
<i>usando perfis de temperatura do FDS (Tabela 6.1)</i>							
<i>Túnel 2</i>	13%	13%	113%	113%	113%	-63%	-63%
<i>diferença entre os resultados usando perfis experimentais e do FDS</i>							
<i>Túnel 2</i>	1%	22%	27%	56%	70%	106%	106%

A.3 ÁTRIO

No cenário do *Átrio* é possível calcular a altura da camada de fumaça para o tempo de 120 e 180 s usando perfis experimentais de temperatura, exibidos nas Figuras 5.5 e 5.6. Através dos perfis de temperatura experimental exibidos nas figuras, foi calculada a altura da camada de fumaça com os métodos frequência de flutuação, relação integral e N -percentual (com a constante $N = 10, 20, 30, 40, 50$). A Figura A4 apresenta o gráfico da altura da camada de fumaça do *Átrio* nos tempos de 120 s e 180 s.

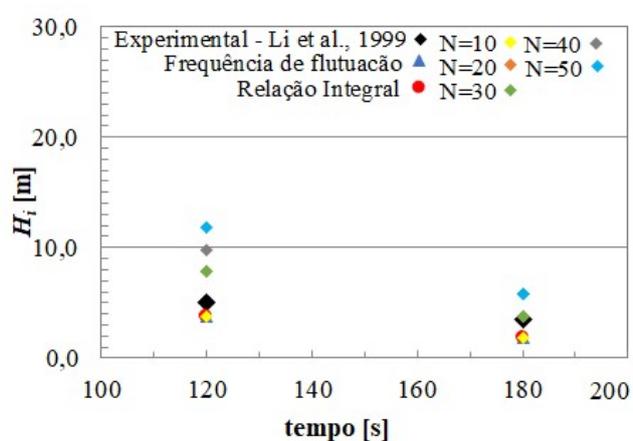


Figura A4. Altura da camada de fumaça para o caso do *Átrio* nos tempos 120 s e 180 s, usando perfil de temperaturas experimental obtido com a árvore de termopares: dados experimentais e métodos matemáticos (frequência de flutuação, relação integral e N -percentual com $N = 10, 20, 30, 40$ e 50%).

Após o cálculo da altura da camada de fumaça para o caso do *Átrio*, nos tempos de 120 s e 180 s, foi realizada uma comparação entre os resultados obtidos com as medições experimentais de temperatura e aquelas obtidas do FDS para os mesmos tempos. A Tabela A3 fornece os desvios relativos médios para os dois casos, para os diferentes métodos de cálculo da altura da camada de fumaça. Observa-se que os métodos frequência de flutuação e relação integral forneceram resultados conservadores para ambos perfis de temperaturas, enquanto o método N -percentual apresenta desvios positivos (não conservadores).

Tabela A3 – Desvios relativos médios para a altura da camada de fumaça para o cenário do *Átrio*, usando perfil de temperatura experimental e obtido numericamente com o FDS.

Cenário	Frequência de Flutuação	Relação Integral	<i>N</i> 10	<i>N</i> 20	<i>N</i> 30	<i>N</i> 40	<i>N</i> 50
<i>usando perfis experimentais de temperatura</i>							
<i>Átrio</i>	-8%	-56%	-8%	32%	32%	81%	101%
<i>usando perfis de temperatura do FDS</i>							
<i>Átrio</i>	-36%	-36%	12%	32%	101%	161%	161%
<i>diferença entre os resultados usando perfis experimentais e do FDS</i>							
<i>Átrio</i>	28%	20%	20%	0%	69%	80%	60%