

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

ESTUDO NUMÉRICO DO ESCOAMENTO DE GASES POR UMA ABERTURA DURANTE UM
INCÊNDIO EM AMBIENTE CONJUGADO

por

Lucas Vinícius Matos

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

Porto Alegre, Julho de 2017



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

ESTUDO NUMÉRICO DO ESCOAMENTO DE GASES POR UMA ABERTURA DURANTE UM
INCÊNDIO EM AMBIENTE CONJUGADO

por

Lucas Vinícius Matos

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

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

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

Orientador: Prof. Dr. Felipe Roman Centeno

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Francis Henrique Ramos França

Prof^a. Dr^a. Thamy Cristina Hayashi

M. Eng. Guilherme Crivelli Fraga

Porto Alegre, 20 de Julho de 2017.

AGRADECIMENTOS

Aos meu pais e avós, cujo amor e dedicação empregados em minha educação construíram sólida base para meu desenvolvimento pessoal e profissional. Sem eles essa conquista não seria possível.

Ao amor de minha companheira Laís, sempre com algum ensinamento, seja ele simples ou complexo, compensando minha falta de disciplina e tornando minha jornada mais amena.

Aos professores do Departamento de Engenharia Mecânica da UFRGS, por manterem o reconhecido nível de excelência de nosso curso, em especial ao Prof. Dr. Felipe Roman Centeno pelo incentivo, paciência e conhecimento compartilhado.

A dois engenheiros mecânicos pelo compartilhamento de profunda experiência e pela demonstração de grandeza no desempenho da profissão, Eng. Fernando Coimbra Fabbrin e Eng. João Carlos Antonioli.

MATOS, L. V. **Estudo Numérico do escoamento de Gases por uma Abertura Durante um Incêndio em Ambiente Conjugado**. 2017. 15 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

RESUMO

Um dos principais riscos para as vítimas de incêndios em ambientes fechados é a intoxicação pela fumaça resultante da combustão. Um melhor conhecimento do comportamento do escoamento dos fluidos envolvidos neste tipo de incêndio motiva o presente trabalho, onde aplicou-se um estudo numérico utilizando dinâmica de fluidos computacional a um modelo de ambiente conjugado com duas salas interligadas por uma abertura, objetivando principalmente a análise da vazão mássica em regime permanente por essa abertura. Utilizou-se como ferramenta para solução do modelo numérico o *software* Fire Dynamics Simulator baseado na metodologia de simulação de grandes escalas, um código para solução de escoamentos induzidos por fogo. Três casos foram estudados para comparação de resultados e observou-se a representatividade os dados experimentais pela simulação. Os dados da simulação também foram comparados com resultados calculados através de correlações empíricas que relacionam a vazão com o campo de temperaturas nas salas e a geometria da abertura, concluindo-se que as correlações podem ser boas ferramentas desde que observadas as incertezas associadas.

PALAVRAS-CHAVE: Incêndio em confinamento; Escoamento de fumaça; FDS.

MATOS, L. V. **Numerical Evaluation of a Combined Enclosure Fire Opening Flow**. 2017. 15. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

ABSTRACT

Among compartment fire risks, intoxication by combustion gases is one of the most important to be understood. The better understanding of the fluid flow on this kind of fire is the motivation for this study, where a CFD numerical analysis is applied to a twin room ambient model consisting of two rooms connected by an opening, the main goal is the evaluation of the steady state mass flow through the opening. The chosen simulation tool is a Large Eddy Simulation based fire driven flow model known as Fire Dynamics Simulator or FDS. A total of three cases were analyzed to further results comparison and the simulation outputs predicted the experimental data. The simulation data were further compared with results evaluated by correlation equations based on room temperatures field and opening geometry, concluding that the correlation equations are a powerful tool when applied regarding the associated uncertainties.

KEYWORDS: Compartment Fire; Smoke flow; FDS.

ÍNDICE

| | Pág. |
|--|------|
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 2 |
| 2.1 Incêndio Confinado | 2 |
| 2.1.1 Fases do Incêndio Confinado | 3 |
| 2.1.2 Taxa de Liberação de Calor (HRR) e Fatores de Influência | 3 |
| 2.1.3 Chama, Pluma, Jato de Teto e Produtos da Combustão | 4 |
| 2.1.4 Transferência de Calor, Pressão e Vazão Mássica..... | 4 |
| 2.2 Métodos Numéricos | 6 |
| 3. METODOLOGIA | 8 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 11 |
| 5. CONCLUSÕES..... | 14 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 15 |
| Anexo I | 16 |
| Apêndice I | 17 |
| Apêndice II | 18 |
| Apêndice III | 19 |
| Apêndice IV | 20 |

1. INTRODUÇÃO

Alguns eventos recentes envolvendo incêndios em ambientes fechados no Brasil despertaram o interesse da classe política acerca do assunto, como por exemplo o desastre ocorrido na cidade de Santa Maria, estado do Rio Grande do Sul, onde um incêndio acidental em uma casa noturna deixou centenas de vítimas fatais. A reação imediata comumente presenciada após um evento trágico como esse é o aumento da fiscalização sobre a aplicação de métodos de prevenção de incêndio baseado em normas reguladoras, porém os fatos acabam sendo esquecidos e pouco aprendido é retirado dos acontecimentos.

A pesquisa científica relacionada a incêndios em ambientes fechados é fundamental para o desenvolvimento de novas técnicas de engenharia visando à prevenção de acidentes, a aplicação de rotinas de evacuação e o levantamento de custos com segurança. A produção científica sobre o assunto, que é escassa no Brasil, tem potencial de melhorar as práticas de prevenção de incêndio através do entendimento dos fenômenos envolvidos e do desenvolvimento de ferramentas que facilitam o trabalho do engenheiro, o que motiva o tema do presente trabalho de conclusão de curso.

O estudo científico de incêndios confinados foi desenvolvido em grande parte com projetos experimentais em escala real ou reduzida, principalmente até a década de 1990. Os dados da produção científica experimental sustentam a base das ferramentas computacionais de engenharia utilizadas atualmente no estudo do assunto. Como exemplo deste fato, os autores Tanaka *et al.*, 1985, realizaram um estudo experimental de um incêndio confinado em uma estrutura de dois ambientes em escala real, objetivando analisar a toxicidade da mistura de gases na fase de regime permanente do incêndio.

A metodologia e a geometria do experimento de Tanaka *et al.*, 1985, foram amplamente utilizadas em outros artigos científicos, embasando novos estudos e validando modelos numéricos, como é o caso de Nakaya *et al.*, 1986, que estudaram a vazão mássica nas aberturas das portas, propondo uma correlação empírica embasada na mesma geometria. Pretrel *et al.*, 2016, realizaram um experimento em escala real de três salas interligadas ventiladas mecanicamente com um foco de incêndio na sala central, objetivando a análise das velocidades e vazões mássicas nas aberturas entre as salas para casos de convecção natural e mista.

Embora o estudo experimental seja uma boa ferramenta na análise de incêndios confinados, o custo e o tempo de preparação deste método de estudo são muito elevados, incentivando o desenvolvimento de novas ferramentas. A evolução dos microprocessadores permitiu a implementação de estudos numéricos através da dinâmica de fluidos computacional, CFD (da sigla em inglês para *Computational Fluid Dynamics*), diminuindo o custo e o tempo de análise sem perda de qualidade dos dados finais. Utilizando o método de solução das equações de Navier-Stokes com médias de Reynolds, RANS (da sigla em inglês para *Reynolds Averaged Navier-Stokes*), Tili *et al.*, 2016, analisaram numericamente diferentes geometrias de tetos de compartimentos e diferentes posições do foco de incêndio, desenvolvendo uma correlação que calcula uma vazão mássica adimensional através da abertura da porta, baseado na posição do foco de incêndio.

Chow e Zou, 2005, simularam um modelo numérico do experimento de Tanaka *et al.*, 1985, utilizando o *software* FDS (da sigla em inglês para *Fire Dynamics Simulator*), baseado na metodologia de simulação de grandes vórtices, LES (da sigla em inglês para *Large Eddy Simulation*) e os resultados apresentaram satisfatória proximidade com os dados experimentais colhidos por Tanaka *et al.*, 1985.

Os autores Wang e Quintiere, 2009, realizaram uma análise matemática e numérica da vazão mássica através de uma abertura de porta em um incêndio em confinamento. Uma correlação generalista para cálculo da vazão mássica também foi apresentada e os resultados calculados foram comparados com a simulação numérica realizada no *software* FDS. O autor Xiao, 2012, realizou uma análise numérica também utilizando o *software* FDS para simulação de um incêndio em um grande ambiente fechado e posteriormente comparou os dados com uma análise experimental prévia, concluindo que o *software* representou a condição real do incêndio.

Suard *et al.*, 2015, analisou numericamente um pequeno ambiente com um foco de incêndio objetivando comparar os dados de temperatura e vazão mássica pela abertura com resultados experimentais. Como embasamento teórico, o autor apresenta uma extensa pesquisa bibliográfica comparando análises numéricas realizadas utilizando LES e RANS, diferentes condições de contorno e refinamentos de malha, classificando os dados de acordo com o tamanho do ambiente confinado em que o incêndio foi simulado.

Grande parte dos estudos científicos apresentados acima objetivam o melhor entendimento do comportamento da variável vazão mássica através de uma abertura no ambiente confinado onde o foco de incêndio está posicionado. Há especial interesse nessa variável pois, em casos de incêndios em ambientes fechados, de acordo com o Handbook de engenharia de proteção contra incêndios, publicado pela Sociedade de Engenheiros de Proteção Contra Incêndio, SFPE, 2016, 75% das fatalidades relacionadas a intoxicação por fumaça ocorrem em ambientes distantes do foco de incêndio. A abertura da porta ou janela é o principal direcionador da fumaça; portanto, o conhecimento da vazão mássica por essas aberturas permite prever com determinada exatidão o caminho que a fumaça e os gases quentes irão percorrer até o ambiente externo e a velocidade com que isso acontece.

Este trabalho objetiva contribuir com o estudo do escoamento de gases em incêndios analisando numericamente o comportamento de três cenários de incêndio em confinamento. Baseando-se no estudo experimental de Tanaka *et al.*, 1985, foi criado um modelo numérico de dois ambientes conjugados conectados ao ambiente externo, simulando uma situação comum em residências de arquitetura moderna, como, por exemplo, uma cozinha interligada à sala de estar. Como ferramenta CFD optou-se pelo *software* de distribuição gratuita FDS, desenvolvido pelo Instituto Nacional de Normas e Tecnologia, NIST (da sigla em inglês para *National Institute of Standards and Technology*), entidade governamental norte-americana. A escolha é justificada por recomendações de diversos autores em conclusões de artigos científicos, pela fonte confiável, por citações ao *software* em importantes publicações como por exemplo SFPE, 2016, e pelo extenso material técnico distribuído gratuitamente em conjunto com o *software*.

Três casos foram abordados no trabalho, objetivando a verificação do modelo numérico construído, a análise do escoamento em regime permanente, principalmente através do levantamento da vazão mássica pela abertura, a comparação da vazão mássica obtida por estudo numérico com valores calculados através de correlações empíricas, a comparação entre resultados numéricos obtidos e experimentais coletados na literatura e também a avaliação do comportamento do *software* escolhido para simulação.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Incêndio Confinado

O comportamento do escoamento nos incêndios confinados em ambientes com alguma abertura é característico e pode ser observado na Figura 2.1. Os gases quentes resultantes da combustão escoam para a porção superior do confinamento devido à diferença de massa específica em relação aos gases dos arredores, formando uma coluna chamada pluma. Quando a pluma atinge o teto do confinamento, os gases quentes escoam para as laterais, formando o jato de teto, atingindo também as paredes.

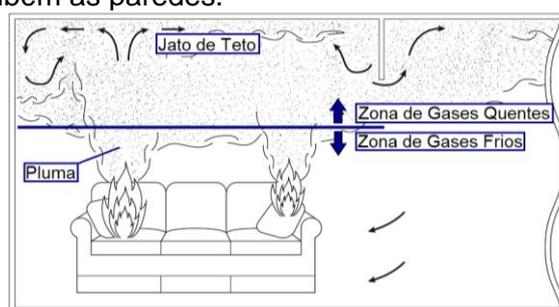


Figura 2.1 – Características do incêndio em confinamento. Fonte: SFPE, 2016.

A porção superior do confinamento, constantemente alimentada pela pluma com uma mistura de gases quentes, cresce até atingir a abertura para outro ambiente. Verifica-se então um movimento cíclico dentro do confinamento contendo o foco, os gases quentes escoando para o ambiente adjacente através da porção superior da abertura e os gases frios, mais densos, obedecendo a conservação de massa no volume de controle do confinamento, entrando pela porção inferior da abertura, alimentando a chama. O resultado deste fenômeno é a divisão clara entre uma zona superior, zona de gases quentes, e uma zona inferior, zona de gases frios, conforme a Figura 2.1. O desenvolvimento do incêndio em confinamento é dividido em fases de acordo com as temperaturas, vazões mássicas e diferenças de pressão ao longo do ambiente e das aberturas. Conforme Quintiere, 2006, as fases do incêndio confinado são: ignição, desenvolvimento, *flashover*, completamente desenvolvido, decaimento e extinção.

2.1.1. Fases do Incêndio Confinado

A primeira etapa, ignição, é rápida ou instantânea em muitos casos, e o confinamento tem pouca influência sobre ela e sobre a porção inicial da segunda fase, denominada desenvolvimento. O tempo de duração da fase de desenvolvimento do incêndio é definido pela disponibilidade e características do combustível, quantidade de oxigênio disponível e a interação com o ambiente que cerca o foco. O período que compreende os dois primeiros estágios do incêndio pode ser tratado como *pre-flashover*. Ao final da etapa de desenvolvimento ocorre o *flashover*, descrito por Quintiere, 2006, como uma transição da fase de desenvolvimento do incêndio para a fase completamente desenvolvida, onde o incêndio passa de um foco localizado para envolvimento completo de toda a superfície combustível disponível, fenômeno associado à instabilidade térmica e dependente de diversos fatores.

O período *pós-flashover* é compreendido pelas etapas de incêndio completamente desenvolvido, decaimento e extinção. Na fase completamente desenvolvida, a taxa de liberação de calor está em seu maior valor e o incêndio é controlado pela quantidade de oxigênio disponível. O perfil de temperatura apresenta pouca variação durante essa fase, que pode durar horas, seguida pelo decaimento que consiste na queda da taxa de liberação de energia até a extinção do incêndio.

2.1.2. Taxa de Liberação de Calor (HRR) e Fatores de Influência

O confinamento é um dos principais influenciadores no desenvolvimento e nas características do incêndio confinado, devido à geometria, tamanho e localização de aberturas e aos materiais das barreiras físicas que o compõem. [Quintiere, 2006]. A posição do combustível tem um peso importante na caracterização desta classe de incêndio; se está distante das paredes, a pluma é alimentada com gases frios provenientes de todas as direções; se posicionado próximo às paredes, a disponibilidade de oxigênio pode ser limitada, resultando em temperaturas elevadas no confinamento e chamas alongadas, estendendo-se ao longo do teto.

Quanto à geometria do confinamento, a posição e a forma geométrica do teto definem a limitação de altura da camada de gases quentes, principal responsável pela transferência de calor por radiação para as paredes. A geometria e a área das aberturas no confinamento tem importante influência no desenvolvimento do incêndio e em sua fase completamente desenvolvida, por definir a quantidade de oxigênio que estará disponível à reação de combustão. Os materiais de construção das barreiras do confinamento podem ser considerados combustíveis caso haja reação química e degradação do material quando em contato com as chamas, aumentando a taxa de liberação de calor do incêndio. Materiais não combustíveis recebem calor da camada de gases quentes por convecção e de todo ambiente por radiação; este calor é conduzido ao longo da espessura do material até deixar o confinamento.

SFPE, 2016, define HRR como a taxa com que as reações de combustão produzem calor, medida em unidades de [kW]. Por simplificação de tratamento, a sigla do termo em inglês é utilizada: *heat release rate* (HRR). A taxa de liberação de calor em um incêndio confinado é utilizada como importante parâmetro para o desenvolvimento de projetos de engenharia

envolvendo proteção contra incêndio. A partir da seleção destes dados, é possível estimar a HRR total de um incêndio em sua fase completamente desenvolvida. A Tabela 2.1 exemplifica valores de HRR para alguns objetos combustíveis presentes em ambientes residenciais. Os dados foram obtidos experimentalmente e citados por SFPE, 2016, e representam a taxa média de liberação de calor para cada objeto e o tempo que esta taxa é mantida.

Tabela 2.1 – Exemplo de taxas de liberação de calor para mobiliário. [SFPE, 2016]

| Combustível | HRR [kW] | Tempo [s] |
|----------------------------|----------|-----------|
| Roupa de cama | 125 | 400 |
| 4 Cadeiras estofadas | 100 | 1000 |
| Mesa de estudos de madeira | 150 | 1500 |
| Cesto de lixo | 50 | 300 |

2.1.3. Chama, Pluma, Jato de Teto e Produtos da Combustão

Durante um incêndio, uma coluna de gases quentes origina-se da chama até o teto do confinamento devido à diferença de massa específica. Essa mistura de gases quentes, e, em alguns casos, chamas, é denominada pluma. As características da chama são a base para a formação da pluma, e no campo de estudo dos incêndios em confinamento, de acordo com SFPE, 2016, a chama é modelada como turbulenta por difusão. Duas características destacam-se neste tipo de chama: a mistura entre gases acontece predominantemente devido ao empuxo gerado pelas diferenças de massa específica e a radiação de calor tem uma maior influência no ambiente do incêndio.

A turbulência na chama é caracterizada pela presença de oscilações periódicas em forma de vórtices, resultantes da instabilidade na interface entre a chama e os gases a temperaturas inferiores. Grandes vórtices são gerados nessa interface, extraíndo energia do escoamento principal. Após sucessivas reduções de tamanho, os vórtices dissipam-se, retornando a energia ao escoamento principal. Este escoamento principal, já caracterizado como pluma, colide com o teto do confinamento e se espalha paralelamente a ele para todas as direções, ocupando toda a extensão do ambiente, movimento definido como jato de teto.

A combustão é caracterizada como o conjunto reações químicas de oxidação de um combustível. Caso essas reações sejam completas, os produtos esperados são apenas dióxido de carbono (CO_2) e vapor de água (H_2O). As reações que ocorrem durante incêndios em confinamentos são caracterizadas pela combustão incompleta, gerando produtos como monóxido de carbono (CO) e fuligem, que é definido como um resíduo sólido de baixa massa específica composto por carbono. [Karlsson e Quintiere, 2000]. Produtos originados da combustão incompleta podem alterar condições de escoamento nas aberturas do confinamento; a formação destes produtos depende do modelo de combustão, da composição química do combustível e da disponibilidade de oxigênio.

2.1.4. Transferência de Calor, Pressão e Vazão Mássica

A transferência de calor observada durante um incêndio em confinamento é complexa, envolvendo os modos de condução, convecção e radiação. De acordo com SFPE, 2016, para o combustível propano considera-se que 30% do calor liberado é transferido por radiação para o ambiente e o restante é transferido por convecção pela pluma para a camada de gases quentes. Nesta camada superior há uma mistura de fumaça e fuligem, de onde o calor é transferido por convecção e radiação para os fluidos e sólidos adjacentes. Tratando-se da transferência de calor por convecção, conforme Karlsson e Quintiere, 2000, grande parte da convecção associada aos incêndios em confinamento ocorre como convecção natural. O calor recebido pelas paredes por convecção e radiação é transferido por condução no interior dos sólidos até a superfície externa, sendo dissipado para o ambiente externo.

Segundo Karlsson e Quintiere, 2000, em situações de incêndio o escoamento dos fluidos é induzido por diferenças de pressão geradas por expansão térmica, que só é considerada no

cálculo em confinamentos sem aberturas significativas, e por diferença de pressão proporcional à diferença de massa específica entre os gases, ilustrada na Figura 2.2. Na abertura, a linha que identifica a altura em que a pressão do compartimento (P_i) e a pressão externa (P_e) se igualam é denominada linha neutra, uma das variáveis mais importante no cálculo da vazão mássica por uma abertura durante um incêndio.

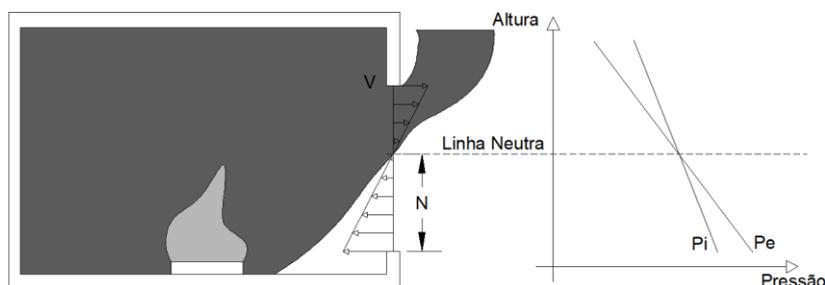


Figura 2.2 – Perfil de pressão característico para incêndio em confinamento.

Conforme SFPE, 2016, durante o *pré-flashover* a pressão no interior do confinamento é maior que a pressão do ambiente externo devido à expansão e ao acúmulo dos gases quentes na camada superior. No início desta fase, o balanço de massa no confinamento é mantido por uma corrente de ar frio sendo expulsa da sala, sem presença de vazão mássica adentrando o volume. Quando a porção de fumaça alcança o limite superior da abertura, uma vazão mássica de gases quentes do interior para o exterior do confinamento (\dot{m}_g) é estabelecida e, para manter o balanço de massa no volume de controle, uma vazão mássica de gases frios escoando do exterior para o interior do confinamento (\dot{m}_a) é observada; porém neste período final do *pré-flashover*, $\dot{m}_a \neq \dot{m}_g$. No período *pós-flashover* a sala é tomada pelos gases quentes e na abertura verifica-se uma camada de entrada de gases frios na porção inferior e uma camada de saída de gases quentes na porção superior, com iguais vazões mássicas. Para os casos em que o compartimento é preenchido uniformemente por fumaça, o perfil de velocidades na abertura pode ser aproximado como linear, conforme demonstrado na Figura 2.2.

O cálculo das vazões mássicas de entrada e de saída do compartimento em chamas é viabilizado pela aproximação de gases ideais e aplicando-se a equação de Bernoulli na abertura onde há o escoamento. Porém, na condição real, os fluidos que atravessam a abertura não seguem a hipótese de gás ideal nem as premissas para aplicação da equação de Bernoulli, de não deslizamento, incompressibilidade e isotérmico; portanto, haverá uma resistência associada ao escoamento. Esta resistência é denotada pelo coeficiente de abertura C_o para o escoamento de saída e C_i para o escoamento de entrada. Estes coeficientes adimensionais são definidos inicialmente por aproximação baseada no número de Reynolds local do escoamento, e seus valores segundo Karlsson e Quintiere, 2000, ficam entre 0,6 e 0,7. Para casos específicos são realizados estudos experimentais como citado por Nakaya *et al.*, 1986, que recomendam valores de $C_o = 0,68$ e $C_i = 0,68$ para aberturas retangulares como portas e janelas.

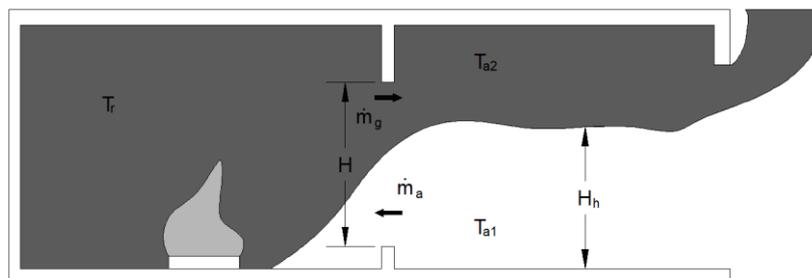


Figura 2.3 – Distribuição das variáveis no campo de escoamento.

A avaliação da vazão mássica utilizando as equações algébricas derivadas da equação de Bernoulli depende da medição das massa específicas dos gases envolvidos no incêndio, o

que não é viável na prática. Para simplificação, diversos autores apresentam equações que correlacionam as vazões mássicas \dot{m}_a e \dot{m}_g com variáveis de fácil medição, como por exemplo as dimensões das aberturas, as temperaturas dos gases no compartimento em chamas e em salas adjacentes.

$$\dot{m}_g = W\rho_\infty T_\infty C_o \left[\frac{2}{3} \left(\frac{2g}{T_r} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{1}{T_{a2}} - \frac{1}{T_r} \right)^{-1} \left\{ \left(\left(\frac{1}{T_{a2}} - \frac{1}{T_r} \right) (H - H_h) + \left(\frac{1}{T_{a1}} - \frac{1}{T_r} \right) (H_h - N) \right)^{\frac{3}{2}} - \left(\left(\frac{1}{T_{a1}} - \frac{1}{T_r} \right) (H_h - N) \right)^{\frac{3}{2}} \right\} + \left(\frac{2g}{T_r} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{1}{T_{a1}} - \frac{1}{T_r} \right)^{\frac{1}{2}} (H_h - N)^{\frac{3}{2}} \right] \quad (2.1)$$

$$\dot{m}_a = C_i W \rho_\infty T_\infty \frac{2}{3} \left(\frac{2g}{T_{a1}} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{1}{T_{a1}} - \frac{1}{T_r} \right)^{\frac{1}{2}} N^{\frac{3}{2}} \quad (2.2)$$

Para o caso de duas salas adjacentes com ligação entre elas, os autores Nakaya *et al.*, 1986, apresentaram as Equações 2.1 e 2.2, que correlacionam as vazões \dot{m}_g e \dot{m}_a com algumas variáveis identificadas nas Figuras 2.2 e 2.3: temperatura média do confinamento em chamas (T_r), as temperaturas médias das camadas inferior e superior da sala adjacente, (T_{a1}) e (T_{a2}) respectivamente, a altura (H) e largura (W) da abertura, a massa específica do ar ambiente (ρ_∞), a temperatura ambiente (T_∞), os coeficientes de abertura C_o e C_i , a altura da interface entre as camadas inferior e superior na sala adjacente (H_h) e a altura da linha neutra no plano da abertura (N). Aqueles autores recomendam que as Equações 2.1 e 2.2 sejam aplicadas a casos que apresentem uniformidade de temperatura no confinamento em chamas e em cada camada da sala adjacente.

$$\dot{m}_g = \frac{2}{3} C_o \rho_\infty T_\infty (2g)^{\frac{1}{2}} W H^{\frac{3}{2}} \left\{ \left[\left(\frac{H_h - N}{H} \right) + \frac{3}{2} \left(1 - \frac{H_h}{H} \right) \right] \left[\frac{1}{T_r} \left(\frac{1}{T_{a1}} - \frac{1}{T_r} \right) \left(\frac{H_h - N}{H} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (2.3)$$

$$\dot{m}_a = 0,47 W H^{\frac{3}{2}} \quad (2.4)$$

Os autores Chow e Zou, 2005, apresentaram a correlação representada pela Equação 2.3, associada às mesmas variáveis, porém destinadas a representar melhor os casos em que há estratificação em camadas não uniformes no confinamento em chamas. Para \dot{m}_a , os autores apresentaram também equações simplificadas semelhantes baseadas apenas na geometria da abertura entre as salas, objetivando uma avaliação rápida da vazão. Chow e Zou, 2005, indicaram em seu estudo, a Equação 2.4.

2.2. Métodos Numéricos

Conforme Versteeg e Malalasekera, 2007, os modelos CFD objetivam resolver as equações que regem o escoamento dividindo o domínio em subdomínios para o cálculo das equações em cada subdomínio e apresentando os resultados com ferramentas de pós-processamento para análise. Os escoamentos induzidos por incêndio são governados pelas equações que seguem:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_j) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \mu}{\partial x_i} \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right] + F_i \quad (2.6)$$

A Equação 2.5, equação da continuidade, assegura a conservação de massa no subdomínio. Os subíndices i, j e k indicam as direções dos eixos X, Y e Z. A variável u indica a

velocidade; ρ representa a massa específica e t o tempo. A Equação 2.6 define a conservação do *momentum* no volume de controle, onde p indica a pressão, μ a viscosidade e F_i o termo fonte que carrega informações da gravidade e das reações de combustão.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_e) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i Y_e) = \frac{\partial}{\partial x_i}[\rho D_e \frac{\partial Y_e}{\partial x_i}] + \dot{\omega}_e \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i h) = \frac{\partial}{\partial x_i}[\frac{\mu}{Pr} \frac{\partial h}{\partial x_i}] + \mu \left(\frac{1}{Sc_e} - \frac{1}{Pr} \right) \sum_{e=1}^N h_e \frac{\partial Y_e}{\partial x_i} + \frac{\partial p}{\partial t} + S_{rad} \quad (2.8)$$

A Equação 2.7, equação do transporte de espécies agrupadas, apresenta o balanço de massa de uma espécie e em relação a convecção, difusão e reação de combustão. A variável D_e denota a difusividade mássica da espécie e ; Y_e denota a fração mássica da espécie e na mistura e $\dot{\omega}_e$ indica a taxa de geração volumétrica da espécie e devido às reações de combustão. A conservação de energia é associada a Equação 2.8 e denotada em relação à variação da entalpia h devido a: convecção, difusão, variação de pressão e radiação. A variável Pr indica o número de Prandtl, Sc_e o número de Schmidt associado a espécie e e S_{rad} a variação de entalpia relacionada a transferência de calor por radiação.

O programa FDS divide o domínio em um número finito de volumes de controle retangulares de faces paralelas para a solução das equações que governam o problema. O código considera a hipótese de espécies agrupadas. Por exemplo, o ar é considerado uma espécie agrupada contendo uma mistura de gases, assim apenas um cálculo das equações 2.7 e 2.8 é necessário para cada espécie agrupada. Um método preditor-corretor é aplicado, a difusividade é calculada a partir das viscosidades molecular e turbulenta e do número de Schmidt, que é considerado constante. Com o objetivo de diminuir as oscilações das variáveis, o código aplica o limitador de fluxo Superbee de segunda ordem [NIST, 2017].

Seguindo a metodologia LES, antes de solucionar as equações transientes de Navier-Stokes, um filtro espacial é aplicado, selecionando apenas as oscilações turbulentas de maior porte para serem resolvidas, enquanto a influência das oscilações turbulentas de menor porte no escoamento é aproximada por um modelo de escala sub-malha ou modelo SGS (da sigla do termo em inglês *Sub-Grid Scale*). De acordo com Versteeg e Malalasekera, 2017, o objetivo do método LES é atualizar os valores médios de massa, momento e energia em cada volume de controle, levando em conta os efeitos químicos e de transporte sub-malha no campo de escoamentos. O filtro espacial aplicado é adotado como sendo o próprio volume de controle utilizado para discretização.

Para o cálculo da viscosidade turbulenta o *software* apresenta, além de outras opções, um modelo difundido no meio científico, utilizado em muitos estudos envolvendo incêndios em confinamento, modelo Smagorinsky Dinâmico [Germano *et al.*, 1991]. O termo deixa de ser constante e o modelo passa a carregar informações das perturbações maiores, resolvidas no escoamento adjacente, assim o valor resultante para as perturbações turbulentas da escala sub-malha é modelado proporcionalmente ao valor das menores perturbações resolvidas no escoamento adjacente.

Apesar de apresentar opções de química complexa, para solução das reações de combustão, o FDS utiliza como padrão um modelo de combustão limitado por mistura para reação infinitamente rápida de espécies agrupadas. Assim que misturado, o combustível entra em ignição e o termo fonte da reação química é calculado utilizando o modelo de Magnussen e Hjertager [Magnussen e Hjertager, 1977].

$$\frac{dI(\mathbf{r}, \mathbf{s})}{ds} = kI(\mathbf{r}) - (k + \sigma_s)I(\mathbf{r}, \mathbf{s}) + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_{4\pi} I_-(\mathbf{s}_i) \Phi(\mathbf{s}_i, \mathbf{s}) d\Omega_i \quad (2.9)$$

A Equação 2.9 representa a equação de transferência radiativa, RTE (da sigla do termo em inglês *Radiative Transfer Equation*), que governa a transferência de calor ao longo do caminho percorrido por um feixe de raios, indicado pelo vetor posição \mathbf{r} , e direção \mathbf{s} . Um meio no qual ocorre emissão, absorção e espalhamento é considerado. A variável I indica a

intensidade de radiação; I_0 a intensidade de radiação incidente; k o coeficiente de absorção e σ_s o coeficiente de espalhamento. O código FDS resolve a RTE através do método de volumes finitos utilizando aproximadamente 100 ângulos discretos para o cálculo da Equação 2.9. O método possui este nome pois sua construção é análoga ao método de volumes finitos para transporte convectivo. Apesar de conter a opção de resolução das propriedades radiantes pelo modelo de banda larga, o *software* traz como padrão o modelo de gases cinzas, pois o comportamento espectral dos produtos de combustão gerados por incêndios podem ser simplificados como sendo independentes do comprimento de onda. Mesmo com simplificações, a solução da radiação ocupa em média 20% do tempo de processamento.

A condução de calor no código FDS é solucionada apenas na direção normal a superfície do obstáculo. Para o cálculo da influência das paredes na velocidade do escoamento, o algoritmo aplica a condição de não deslizamento através da relação entre uma velocidade adimensional e uma distância adimensional normal à superfície da parede. Para distâncias menores que 11,81 vezes o tamanho da célula, a distância adimensional é tomada diretamente no cálculo, e para distâncias maiores, uma função logarítmica desta distância adimensional é utilizada. Como padrão, o coeficiente de transferência de calor por convecção é calculado através de correlações para convecção forçada e natural, porém para cálculos refinados uma opção é apresentada calculando-se o coeficiente de transferência de calor por convecção de forma análoga ao modelo de velocidade próximo a parede. Para isso uma temperatura adimensional é definida e, juntamente com o número de Prandtl, substitui a velocidade adimensional na equação análoga. A estabilidade numérica do código é assegurada por algumas condições de restrição, como, por exemplo, a condição de Courant-Friedrichs-Lewy.

3. METODOLOGIA

Três casos foram estudados, de acordo com a Tabela 3.1. As geometrias detalhadas na Figura 3.1 mostram o foco do incêndio no centro da sala 1, um ambiente adjacente chamado de sala 2, e uma terceira área representando o ambiente externo. Esta configuração permite a análise do escoamento da fumaça na sala que contém o fogo, no ambiente adjacente e nas transições entre eles. Para verificação dos parâmetros de simulação utilizados na construção deste trabalho e visando a geração de resultados que representam corretamente a condição real, o caso 1 simula um dos experimentos realizados por Tanaka *et al.*, 1985, e Nakaya *et al.*, 1986. Os casos 2 e 3 representam, na abertura 2, uma porta padrão e, na abertura 1, duas situações comumente encontradas em ambientes de arquitetura moderna: paredes que dividem cozinhas e salas de estar no caso 2 e divisão entre salas de estar e jantar no caso 3. Ambas aberturas estão centralizadas na direção Y.

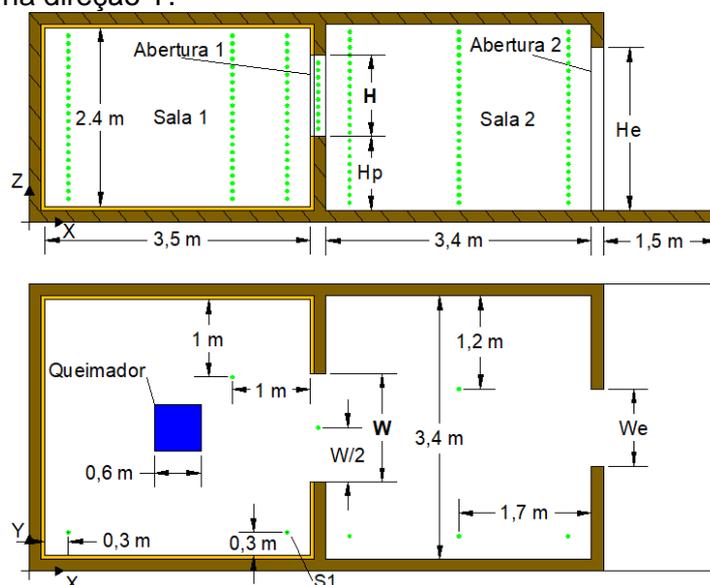


Figura 3.1 – Geometria detalhada do modelo.

Estão identificados em verde na Figura 3.1 os pontos de coleta dos valores de variáveis utilizadas para os cálculos das Equações 2.1, 2.2 e 2.3, distribuídos em torre espaçados 0,1 m entre si na direção Z a partir do piso, de acordo com a medição experimental utilizada por Tanaka *et al.* 1985, e Nakaya *et al.*, 1986. Para temperatura, também foi avaliado o dado obtido pelo modelo de termopar disponível no código, utilizando-se dois diâmetros de junta, 0,1 mm e 0,65 mm, para verificar a influência da radiação de calor nos dados.

Tabela 3.1 – Dimensões características para os casos estudados.

| Caso | H [m] | H _p [m] | H _e [m] | W [m] | W _e [m] |
|------|-------|--------------------|--------------------|-------|--------------------|
| 1 | 1,6 | 0 | 1,8 | 0,6 | 1,8 |
| 2 | 1 | 1 | 2,1 | 3,4 | 1 |
| 3 | 2,4 | 0 | 2,1 | 1 | 1 |

Almejando a simplificação da simulação e a possibilidade de comparação com resultados experimentais, as salas foram consideradas sem qualquer objeto ou mobília. O material das paredes, piso e teto, não inflamável; e a chama, criada a partir de um queimador difuso de propano. Considerando inicialmente o ar composto de 23,2% de oxigênio, 76,56% de nitrogênio, 0,18% vapor de água e 0,06% de dióxido de carbono, as condições iniciais da simulação são apresentadas na Tabela 3.2, onde ρ representa massa específica, g a aceleração da gravidade no eixo Z, P a pressão atmosférica, T_w a temperatura das paredes, V_∞ a velocidade do vento, Pr o número de Prandtl e Sc o número de Schmidt. Durante todo o período da simulação, nenhuma forma de escoamento forçado é imposta, apenas os escoamentos induzidos pelo incêndio foram considerados.

Tabela 3.2 – Condições iniciais da simulação.

| T_∞ | T_w | ρ_∞ | V_∞ | P | g | Pr | Sc |
|------------|-------|-------------------------|------------|-----------|-------------------------|------|------|
| 20°C | 20°C | 1,196 kg/m ³ | 0 m/s | 101325 Pa | - 9,81 m/s ² | 0,5 | 0,5 |

Para simulação numérica dos casos, o domínio foi discretizado em volumes finitos e utilizou-se como ferramenta CFD o *software* FDS versão 6.5.3. O pós-processamento é apresentado pelo *software* Smokeview versão 6.4.4, incluso no pacote FDS. O domínio de cálculo é delimitado por paredes, teto e piso nos ambientes internos e, para representação do ambiente externo, acrescentou-se 1,5 m ao domínio na direção X. Como a abertura 2 é uma região de interesse no estudo, um dos objetivos desta extensão no domínio é garantir a qualidade dos dados avaliados no plano da abertura, evitando a coleta de valores de variáveis no limite do domínio.

Para a resolução das perturbações sub-malha, optou-se pelo modelo Smagorinsky dinâmico. À interface entre o escoamento e paredes, foi aplicada a condição de não deslizamento, tratada por equações logarítmicas a fim de simular a camada limite de velocidade. Aplicou-se modelo análogo para a solução da transferência de calor próximo as paredes.

Definiu-se, para os limites do domínio na região externa, a condição de contorno aberta, possibilitando a liberdade de escoamento para a fumaça saindo e para o ar entrando no domínio. O ambiente além do domínio é considerado atmosfera livre mantida a características iniciais. Para a região interna, salas 1 e 2, as superfícies opostas das paredes, piso e teto estão sob o limite do domínio, sendo aplicada a elas a condição de contorno de exposição, considerando-se que estarão expostas a um ambiente mantido nas condições iniciais. A condução de calor é considerada, porém calculada apenas nas dimensões significativas de cada obstáculo na direção normal à superfície. A rugosidade de todas as superfícies foi considerada nula e, a condutividade térmica K do material isolante, variável conforme Tabela A.1 do Anexo I. A Figura 3.2 descreve as propriedades e dimensões das fronteiras, onde c indica calor específico e K a condutividade térmica.

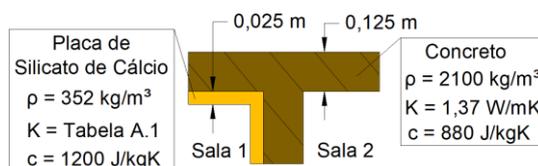


Figura 3.2 – Características das fronteiras do confinamento. Fonte: ASTM, 2013 e SFPE, 2016.

Paredes, piso e teto foram consideradas superfícies cinzas difusas de emissividade 0,9, baseando-se nas afirmações de Tanaka *et al.*, 1985, que descrevem o comportamento próximo ao de corpo negro observado nas paredes durante seus experimentos, devido à grande concentração de fumaça e de fuligem no confinamento. Aplicou-se um modelo simples para simulação da combustão, definindo-se uma área quadrada com $0,36 \text{ m}^2$ no centro da sala 1, com uma condição de contorno de vazão mássica constante de $0,009 \text{ kg/s}$ de propano puro. Quando o combustível mistura-se com o ar, acontece a ignição instantânea, cuja taxa de liberação de calor HRR resultante é de 418 kW , mantida constante durante a simulação. As características do combustível podem ser consultadas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Propriedades do combustível. Fonte: SFPE, 2016.

| ΔH_{prop} | ρ_{prop} | y_{CO} | y_{fuligem} |
|--------------------------|-------------------------|-----------------|----------------------|
| 46450 KJ/kg | 1,833 kg/m ³ | 0,005 kg/kg | 0,0024 kg/kg |

O pacote FDS estipula um passo de tempo inicial de $0,1 \text{ s}$ e o ajusta durante a simulação. Para o registro dos valores das variáveis durante a simulação, definiu-se um intervalo fixo de 1 s . Todas as análises de dados demonstradas no estudo representam a fase completamente desenvolvida do incêndio, caracterizada pela constância no valor médio das variáveis. Como critério de convergência, as simulações transientes foram interrompidas para coleta dos dados de regime permanente quando identificou-se não haver mais variação nas médias de todas as variáveis dentro de um intervalo de 100 s , exceto oscilações características do escoamento turbulento. Os valores das variáveis coletados para construção dos resultados são uma média dos 100 s seguintes a este período, excluindo-se os 10 maiores e os 10 menores valores.

Para o cálculo das Equações 2.1, 2.2 e 2.3, as incógnitas foram substituídas por dados de saída do *software*. Para cada torre de sensores da Figura 3.1, há três respostas do *software*: a altura da interface entre gases quentes e as médias das temperaturas na zona de gases quentes e frios. Os valores das variáveis H_b , T_{a1} e T_{a2} foram considerados como as médias aritméticas simples destas respostas entre todas as torres de sensores da sala 2. A resposta da simulação para altura da linha neutra na torre de sensores da abertura 1 foi considerada como o valor de N . O valor de T_r foi considerado como a média aritmética simples do dado de saída de temperatura em cada sensor na sala 1. A variável H_i , altura da interface entre gases quentes e frios na sala 1, não é considerada no cálculo das correlações, porém é calculada de maneira análoga a H_b , para a sala 1.

A pesquisa bibliográfica apresentada por Suard *et al.*, 2015, demonstra que, para estudos numéricos que utilizaram como ferramenta o *software* FDS aplicado a incêndios confinados, o tamanho de volume de controle δ_x para discretização varia de $0,025 \text{ m}$ a $0,1 \text{ m}$, dependendo do volume do confinamento estudado. Baseando-se nesta informação, três malhas de volumes cúbicos foram criadas e uma avaliação da sensibilidade de malha nos resultados foi realizada para o caso 1. Conforme a Tabela 3.4, o desempenho das malhas foi comparado através de duas variáveis: a temperatura, indicada na coluna T [°C], e a velocidade, indicada na coluna V [m/s]. A temperatura foi mensurada em um dos cantos da sala 1 a $0,3 \text{ m}$ de distância das paredes (direções X e Y) e dentro da região do jato de teto, $0,2 \text{ m}$ abaixo do teto (direção Z). Os dados de velocidade representam o escoamento no centro da abertura 1, a $1,4 \text{ m}$ do piso, em meio ao escoamento turbulento de gases quentes deixando a sala 1. Ainda na Tabela 3.4, as colunas $\overline{\Delta T}$ e $\overline{\Delta V}$ indicam as médias das oscilações nos valores das variáveis e a última coluna apresenta o tempo computacional necessário para cada malha.

Tabela 3.4 – Estudo de sensibilidade de malha.

| Malha | δ_x [m] | Volumes | T [°C] | $\overline{\Delta T}$ | V [m/s] | $\overline{\Delta V}$ | Tempo [h] |
|-------|----------------|---------|--------|-----------------------|---------|-----------------------|-----------|
| 1 | 0,1 | 81432 | 542,3 | 6,2 | 3,7 | 0,28 | 17 |
| 2 | 0,05 | 598500 | 561,4 | 6,1 | 2,8 | 0,31 | 38 |
| 3 | 0,025 | 4584636 | 562,9 | 21,3 | 2,7 | 0,80 | 168 |

A simulação mostrou-se convergente para todas as malhas, porém o tempo de cálculo transcorrido até o regime permanente para a malha 3 foi aproximadamente quatro vezes superior ao da malha 2 sem alteração significativa nos valores das variáveis avaliadas, justificando a escolha da malha 2 para apresentação dos resultados. Para os cálculos unidimensionais realizados nas regiões sólidas do domínio, o *software* define automaticamente a discretização necessária. O estudo de sensibilidade de malha foi realizado apenas para o caso 1 e considera-se sustentável a hipótese de que o mesmo é válido para os casos 2 e 3 devido à semelhança nas características do escoamento.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a realização das simulações propostas, a característica turbulenta e incompressível do escoamento confirmou-se para os três casos pois o número de Mach manteve-se abaixo de 0,015 e o número de Reynolds nas aberturas 1 e 2 manteve-se na ordem de 10^6 para todos os casos. Também observa-se na Figura II.1, no apêndice II, a presença de vorticidades e recirculações em diversos pontos do domínio. Para os três casos a chama não foi limitada por falta de oxigênio na mistura, mantendo sua HRR.

Os resultados da simulação para o caso 1 são apresentados na Tabela 4.1 e comparados com os resultados do estudo experimental análogo, realizado pelos autores Tanaka *et al.*, 1985 e Nakaya *et al.*, 1986. Observa-se que o experimento foi bem representado pelo modelo numérico, apresentando apenas o valor de H_h com uma variação maior que 10%.

Tabela 4.1 – Comparação entre os resultados do caso 1 e dados experimentais.

| | \dot{m}_g [kg/s] | \dot{m}_a [kg/s] | T_r [°C] | T_{a1} [°C] | T_{a2} [°C] | N [m] | H_h [m] |
|--------------|--------------------|--------------------|------------|---------------|---------------|---------|-----------|
| Caso 1 (CFD) | 0,571 | 0,558 | 469 | 27 | 268 | 0,642 | 1,19 |
| Experimental | 0,583 | 0,583 | 497 | 25 | 266 | 0,635 | 1,35 |
| Δ | 2,1% | 4,3% | 5,6% | 0,7% | 0,4% | 0,8% | 13,4% |

A Figura 4.1 compara o caso 1 com o estudo experimental de Tanaka *et al.*, 1985. Quanto ao perfil de temperatura ao longo do eixo Z na sala 1, utilizando os dados da torre de sensores identificada como S1 na Figura 3.1, procedimento análogo ao experimental. Os resultados mostram uma diferença média de 5% na região superior uniforme e de 20% para a região inferior e interface entre zonas.

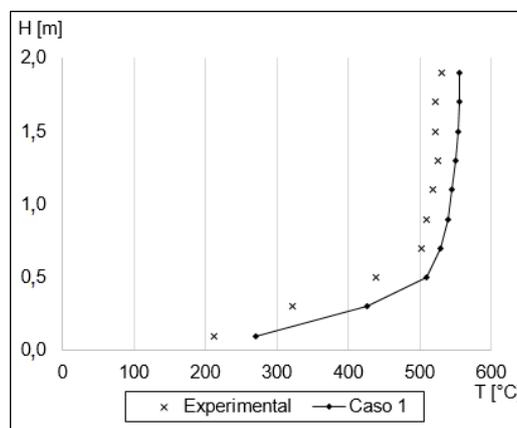


Figura 4.1 – Comparação entre dados experimentais e numéricos para torre de sensores S1.

Com base na análise da Tabela 4.1 e da Figura 4.1, o modelo numérico foi considerado representativo para os casos estudados. Os desvios observados na Figura 4.1 e na Tabela 4.1 são atribuídos à incerteza de estimativa para valores de alguns parâmetros não informados no relatório do estudo experimental, como, por exemplo: $T_{\infty}(\pm 10^{\circ}\text{C})$, espessura de parede ($\pm 0.025\text{ m}$) e propriedades dos materiais de construção aplicados. Informações sobre os coeficientes de variação das respostas do FDS podem ser consultadas na Tabela I.2 contida no apêndice I. A altura da interface entre gases quentes e frios na sala 1 (H_i) apresenta desvio padrão elevado, porém este fato não é atribuído à instabilidade numérica e sim à uniformidade da temperatura na sala 1, dificultando a identificação da interface H_i . A uniformidade das temperaturas na sala 1 é observada na Figura IV.1 contida no apêndice IV e na Tabela 4.2, verificando-se que, para os três casos, a altura da camada de gases frios não ultrapassa 20% da altura da sala 1.

Tabela 4.2 – Alturas características do escoamento para os casos 1, 2 e 3.

| Caso | H_h [m] | % altura sala 2 | H_i [m] | % altura sala 1 | N [m] | % H |
|------|-----------|-----------------|-----------|-----------------|---------|-------|
| 1 | 1,19 | 49,6% | 0,45 | 18,8% | 0,642 | 40,1% |
| 2 | 1,22 | 50,8% | 0,46 | 19,2% | 0,191 | 19,1% |
| 3 | 0,9 | 37,5% | 0,21 | 8,8% | 0,764 | 31,8% |

Os valores de velocidade na abertura 1, obtidos através da torre de sensores centralizada na abertura, conforme Figura 3.1, também apresentam elevado desvio padrão, porém o fato não é associado à instabilidade numérica e sim a oscilações características do escoamento induzido por fogo, principalmente em aberturas. Para visualização detalhada do perfil de velocidades, cabe consulta à Figura III.1 contida no apêndice III. A Figura 4.2 compara o perfil de velocidades na abertura 1 para os casos 1, 2 e 3. Para possibilitar a comparação direta entre os casos, o eixo das ordenadas representa a altura adimensional H^* , fração da altura total da abertura em cada caso. Fica caracterizada, na Figura 4.2, a semelhança entre o perfil de velocidades para o caso 1 e 3 na porção abaixo da linha neutra, explicada por geometrias semelhantes na abertura 1, com H dominante sobre W para ambos. Já o perfil do caso 2, mesmo com altos valores de \dot{m}_g e \dot{m}_a de acordo com a Tabela 4.3, apresenta velocidades menores, devido à grande largura W em relação a altura H .

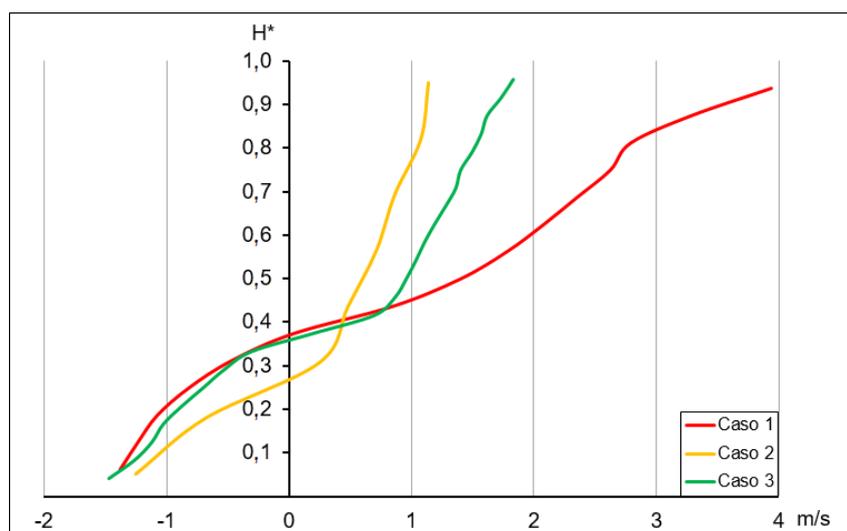


Figura 4.2 – Comparação do perfil de velocidades na abertura 1 para os casos 1, 2 e 3.

Na Tabela 4.3, A_1 e A_2 indicam a área das aberturas 1 e 2 respectivamente. Comparando-se a Figura 4.2 com a Tabela 4.3, é possível relacionar a menor área entre A_1 e A_2 , com o perfil de velocidades acima da linha neutra, para cada caso. Para os casos 2 e 3, a menor área de

abertura é A_2 , com valor igual para os dois casos. Assim observa-se um perfil semelhante de velocidades acima da linha neutra, aproximadamente paralelo, exceto na região próxima ao limite superior devido a influência da parede. Já o caso 1 tem como menor área, A_1 , com valor significativamente menor que A_2 , necessitando maior velocidade para que os gases quentes vençam a abertura A_1 .

Tabela 4.3 – Vazões mássicas e dados geométricos para os casos 1, 2 e 3.

| Caso | \dot{m}_g [kg/s] (FDS) | \dot{m}_a [kg/s] (FDS) | H [m] | W [m] | A_1 [m ²] | A_2 [m ²] |
|------|--------------------------|--------------------------|---------|---------|-------------------------|-------------------------|
| 1 | 0,571 | 0,558 | 1,6 | 0,6 | 0,96 | 3,24 |
| 2 | 0,911 | 0,879 | 1 | 3,4 | 3,4 | 2,1 |
| 3 | 1,005 | 0,993 | 2,4 | 1 | 2,4 | 2,1 |

Analisando a Tabela 4.3, nota-se que as vazões mássicas para os casos 2 e 3 estão próximas apesar das diferenças entre as geometrias da abertura 1 para os dois casos. Já as vazões mássicas no caso 1 são bastante inferiores aos casos 2 e 3. Este comportamento poderia ser justificado pelo valor menor de A_1 para o caso 1 em relação aos casos 2 e 3, porém há também uma variação grande de A_1 entre os casos 2 e 3 sem que haja significativa variação nas vazões mássicas. Comparando-se os valores de A_1 e A_2 para os três casos nota-se que, no caso 1, a área A_2 é mais de 3 vezes A_1 , o que não se repete nos casos 2 e 3, onde A_2 é a mesma para ambos. Essa característica, aliada à discussão do parágrafo anterior em relação à Figura 4.2, mostra que, para ambientes conjugados em que os gases necessitam escoar por duas aberturas para migrar do foco até o exterior ou do exterior para o foco, a abertura de menor área terá maior influência na caracterização da vazão mássica, pois o ambiente que contém a menor abertura estará sob maior pressão em relação a pressão exterior, e conseqüentemente haverá maior velocidade no escoamento de saída do ambiente e maior vazão mássica. A vazão mássica \dot{m}_a , obedecendo a conservação de massa no volume da sala, aumenta proporcionalmente conforme observado na Tabela 4.3.

Os dados utilizados para o cálculo das Equações 2.1 a 2.4 foram obtidos através do procedimento descrito na metodologia deste trabalho e podem ser consultados na Tabela I.1 do apêndice I. Um comparativo entre os valores de vazão mássica \dot{m}_g e \dot{m}_a resultantes das simulações e calculados utilizando-se as Equações 2.1 a 2.4 é apresentado na Tabela 4.4, assim como as diferenças entre os resultados de cada equação e os resultados do FDS (colunas Δ).

Tabela 4.4 – Comparativo entre vazões mássicas na abertura 1 [kg/s].

| Casos | FDS | Eq. 2.1 | | Eq. 2.3 | | FDS | Eq. 2.2 | | Eq. 2.4 | |
|-------|-------------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|-------------|----------|-------------|----------|
| | \dot{m}_g | \dot{m}_g | Δ | \dot{m}_g | Δ | \dot{m}_a | \dot{m}_a | Δ | \dot{m}_a | Δ |
| 1 | 0,571 | 0,766 | 34% | 0,609 | 7% | 0,558 | 0,571 | 2% | 0,571 | 2% |
| 2 | 0,911 | 3,301 | 262% | 2,578 | 183% | 0,879 | 0,419 | 48% | 1,598 | 82% |
| 3 | 1,005 | 1,248 | 24% | 1,157 | 15% | 0,993 | 1,026 | 3% | 1,747 | 76% |

Observou-se que o resultado obtido através das Equações 2.1 e 2.3 para \dot{m}_g apresenta uma elevada sensibilidade em relação à altura do plano neutro na abertura (N) e à altura da interface entre zona inferior e superior da sala 2 (H_h), sendo assim, a pouca não uniformidade de temperatura na sala 1 e na zona de gases quentes da sala 2 distanciou os resultados das correlações da resposta do *software* FDS. Conforme observado na Tabela 4.4, a Equação 2.3 apresentou menor sensibilidade à não uniformidade. Para o cálculo de \dot{m}_a , através da Equação 2.2 obteve-se resultado semelhante à simulação, exceto para o caso 2. A Equação 2.4 é um método para aproximação que, de acordo com os resultados, não pode ser utilizado para casos com qualquer variação à geometria em que foi baseado. Para o caso 2, nenhuma das correlações aproxima-se do caso real, fato observado pelo domínio da variável W em relação a H , condição contrária à geometria em que as correlações foram baseadas (por exemplo geometrias comuns de portas residenciais).

Verificou-se que os resultados numéricos das vazões mássicas tem uma pequena fonte de incerteza associada à condução de calor através das paredes. As alternativas de superfícies adiabáticas e isolamento perfeito foram analisadas objetivando anular a influência errônea da condução de calor nos resultados finais. Para ambas alternativas analisadas, a resposta obtida ficou distante do resultado experimental. A discrepância dos valores pode ser justificada por uma maior contribuição da radiação de calor proveniente das paredes na temperatura da camada de gases quentes, pois a temperatura das superfícies torna-se maior que o caso real. Essas alternativas foram abandonadas, entendendo-se que a incerteza associada às propriedades e dimensões das paredes é menor que o erro associado à condições de contorno distantes da realidade.

5. CONCLUSÕES

No estudo dos incêndios em confinamento, uma avaliação de engenharia sem base sólida pode resultar em elevado prejuízo financeiro e humano. Verificou-se, durante a construção deste trabalho, que algumas fontes de incerteza devem receber atenção durante o estudo de incêndios em confinamento, dentre as quais: perdas por condução, correta definição dos parâmetros de simulação e correta seleção de correlações empíricas para comparação entre resultados. Para obtenção de um resultado que represente a realidade, recomenda-se a comparação entre resultados obtidos através de correlações empíricas e simulação numérica. As simulações realizadas utilizando-se o programa FDS convergiram para os três casos e os resultados do caso 1 reproduziram os dados experimentais com pequenas diferenças, demonstrando que a metodologia de cálculo LES pode ser aplicada sem tempos de simulação excessivamente altos.

Através da comparação entre os resultados das simulações dos três casos, observou-se que não é possível estabelecer uma relação direta entre a vazão mássica pela abertura 1 e a área da abertura, porém, verificou-se que a menor área entre as aberturas 1 e 2 define a característica do escoamento na abertura 1. Para o caso 2, na abertura entre as salas, há um domínio da largura sobre a altura, situação na qual a vazão mássica pela abertura não foi representada pelas equações aplicadas, apresentando resultados discrepantes dos obtidos pelo FDS. Portanto, em situações semelhantes ao caso 2, recomenda-se a utilização de simulação numérica para avaliação da vazão mássica.

A correlação indicada na Equação 2.1 apresentou resultados distantes da simulação computacional para os três casos de incêndio em confinamento. A justificativa está associada a não uniformidade de temperatura no interior das zonas de gases quentes e frios. A Equação 2.4, apesar de indicada por seus autores para casos de aberturas retangulares, obteve valores de vazão mássica distantes dos calculados pelo FDS, exceto para o caso 1. Como essa correlação é baseada nos parâmetros geométricos da abertura, reproduziu apenas os resultados para a configuração em que foi baseada.

As Equações 2.2 e 2.3 reproduziram os resultados da simulação numérica, sendo indicadas como adequadas para o cálculo de vazões mássicas de saída e entrada, em configurações semelhantes aos casos 1 e 3. Portanto, a aplicação de correlações empíricas a incêndios em confinamento, mostrou-se uma ferramenta de cálculo possível, porém, recomenda-se a aplicação de correlações criadas especificamente para cada caso. A forma mais eficiente para avaliação é a associação de conhecimento teórico, simulação numérica e correlações específicas, baseadas em experimentos, para cada caso.

Como sugestões para continuação do estudo do tema, indica-se a utilização de correlações analíticas ou empíricas como fonte dos dados de entrada para cálculo da vazão mássica; assim como a elaboração de uma correlação que represente situações semelhantes ao caso 2. Ainda como sugestão, a análise da vazão mássica na abertura 2 permite uma relação com a vazão mássica na abertura entre as salas, e conseqüentemente, o melhor entendimento do escoamento de fumaça em casos de incêndio em ambiente conjugado. Com o objetivo de aproximar as simulações dos casos reais, móveis e superfícies inflamáveis podem ser introduzidos no modelo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM – American Society for Testing and Materials, “**Standard Specification for Calcium Silicate and Pipe Insulation**”, Designation: C533 – 13, 2013.

Chow, W. K., Zou, G. W., “**Correlation equations on fire-induced air flow rates through doorway derived by large eddy simulation**”, Building and Environment, vol. 40, pp 897-906, 2005.

Germano, M., Piomelli, U., Moin, P., Cabot, W. H., “**A Dynamic Subgrid-Scale Eddy Viscosity Model**”, Physics of fluids A, vol. 3(7), pp 1760-1765, 1991.

Karlsson, B., Quintiere, J. G., “**Enclosure Fire Dynamics**”, CRC Press LLC, 1st edition, 2000.

Nakaya, I., Tanaka, T., Yoshida, M., Steckler, K., “**Doorway Flow Induced by a Propane Fire**”, Fire Safety Journal, vol. 10, pp 185-195, 1986.

Magnussen, B. F., Hjertager, B. H., “**On Mathematical Modeling of Turbulent Combustion with Special Emphasis on Soot Formation and Combustion**”. In: Sixteenth International Symposium on Combustion, 1977, pp 719-729.

NIST, “**Fire Dynamics Simulator (version 6.5.3) – Technical Reference Guide Volume 1: Mathematical Model - Sixth Edition**”. NIST Special Publication 1018-1, National Institute of Standards and Technology, U.S.A., 2017.

Pretrel, H., Koched, A., Audouin, L., “**Doorway Flows Induced by the Combined Effects of Natural and Forced Ventilation in Case of Multi-compartments Large-Scale Fire Experiments**”, Fire Technology, vol. 52, pp 489-514, 2016.

Quintiere, J. G., “**Fundamentals of Fire Phenomena**”, John Wiley & Sons Ltd., 1st edition, 2006.

SFPE, “**SFPE Handbook of Fire Protection Engineering**”, Society of Fire Protection Engineers, Springer, U.S.A., 5th edition, 2016.

Suard, S., Koched, A., Pretrel, H., Audouin, L., “**Numerical simulations of fire-induced doorway flows in a small scale enclosure**”, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 81, pp 578-590, 2015.

Tanaka, T., Nakaya, I., Yoshida, M., “**Full Scale Experiments for Determining the Burning Conditions to Be Applied to Toxicity Tests**”. In: First International Symposium of Fire Safety Science, 1985, **Fire Safety Science - Proceedings of the First International Symposium**, 1985, pp 129-138.

Tlili, O., Mhiri, H., Bournot, P., “**Empirical correlation derived by CFD simulation on heat source location and ventilation flow rate in a fire room**”, Energy and Buildings, vol. 122, pp 80-88, 2016.

Versteeg, H. K., Malalasekera, W., “**An Introduction to Computational Fluid Dynamics**”, Pearson Education Limited, 2nd edition, 2007.

Wang, L., Quintiere, J. G., “**An analysis of compartment fire doorway flows**”, Fire Safety Journal, vol. 44, pp 718-731, 2009.

Xiao, B., “**Comparison of Numerical and Experimental Results of Fire Induced Doorway Flows**”, Fire Technology, vol. 48, pp 595-614, 2012.

ANEXO I

Tabela A.1 – Condutividade térmica de placas de silicato de cálcio. Fonte: ASTM, 2013.

| Temperatura [°C] | Condutividade Térmica [W/Mk] |
|---------------------|---------------------------------|
| 38 | 0,072 |
| 93 | 0,078 |
| 149 | 0,084 |
| 204 | 0,088 |
| 260 | 0,092 |
| 316 | 0,097 |
| 371 | 0,101 |
| 427 | 0,105 |
| 482 | 0,108 |
| 538 | 0,111 |

APÊNDICE I

Tabela I.1 – Dados empregados no cálculo das Equações 2.1 a 2.4.

| Caso | 1 | 2 | 3 |
|--------------------------------------|-------|-------|-------|
| T_{∞} [K] | 293 | 293 | 293 |
| T_r [K] | 770 | 588 | 598 |
| T_{a1} [K] | 298 | 321 | 315 |
| T_{a2} [K] | 539 | 617 | 548 |
| H_h [m] | 1,19 | 1,22 | 0,9 |
| N [m] | 0,64 | 0,19 | 0,76 |
| W [m] | 0,6 | 3,4 | 1 |
| H [m] | 1,6 | 1 | 2,4 |
| C_i [adm.] | 0,68 | 0,68 | 0,68 |
| C_o [adm.] | 0,68 | 0,68 | 0,68 |
| ρ_{∞} [kg/m ³] | 1,196 | 1,196 | 1,196 |
| g [m/s ²] | 9,81 | 9,81 | 9,81 |

Tabela I.2 – Coeficiente de Variação para respostas do FDS.

| Caso | 1 | 2 | 3 |
|---------------------------|-------|-------|-------|
| T_w [°C] | 0,9% | 1,6% | 0,8% |
| T_r [°C] | 1,5% | 13,5% | 14,1% |
| T_{a1} [°C] | 17,1% | 12,5% | 10,3% |
| T_{a2} [°C] | 5% | 3,1% | 3,1% |
| H_h [m] | 7,5% | 6% | 9,3% |
| H_i [m] | 16,6% | 28,7% | 14,1% |
| N [m] | 9,5% | 16,2% | 9% |
| \dot{m}_g [kg/s] | 12,5% | 8,8% | 7,9% |
| \dot{m}_a [kg/s] | 12% | 7,2% | 7,6% |
| V [m/s] (na abertura 1) | 17,8% | 19,8% | 20,4% |

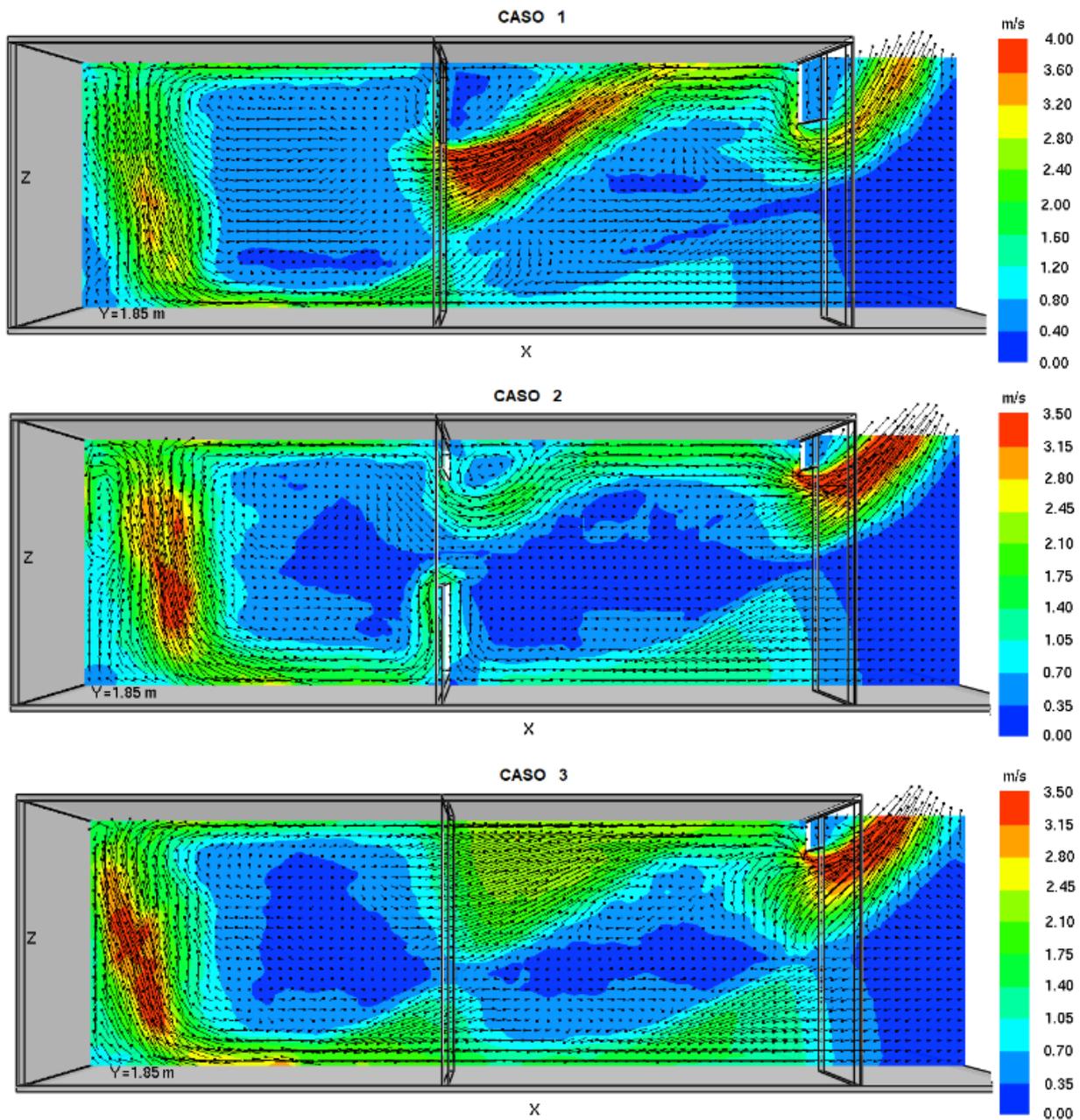


Figura II.1 – Campo vetorial de velocidades médias, em regime permanente, no plano Y=1,85 m para os casos 1, 2 e 3.

APÊNDICE III

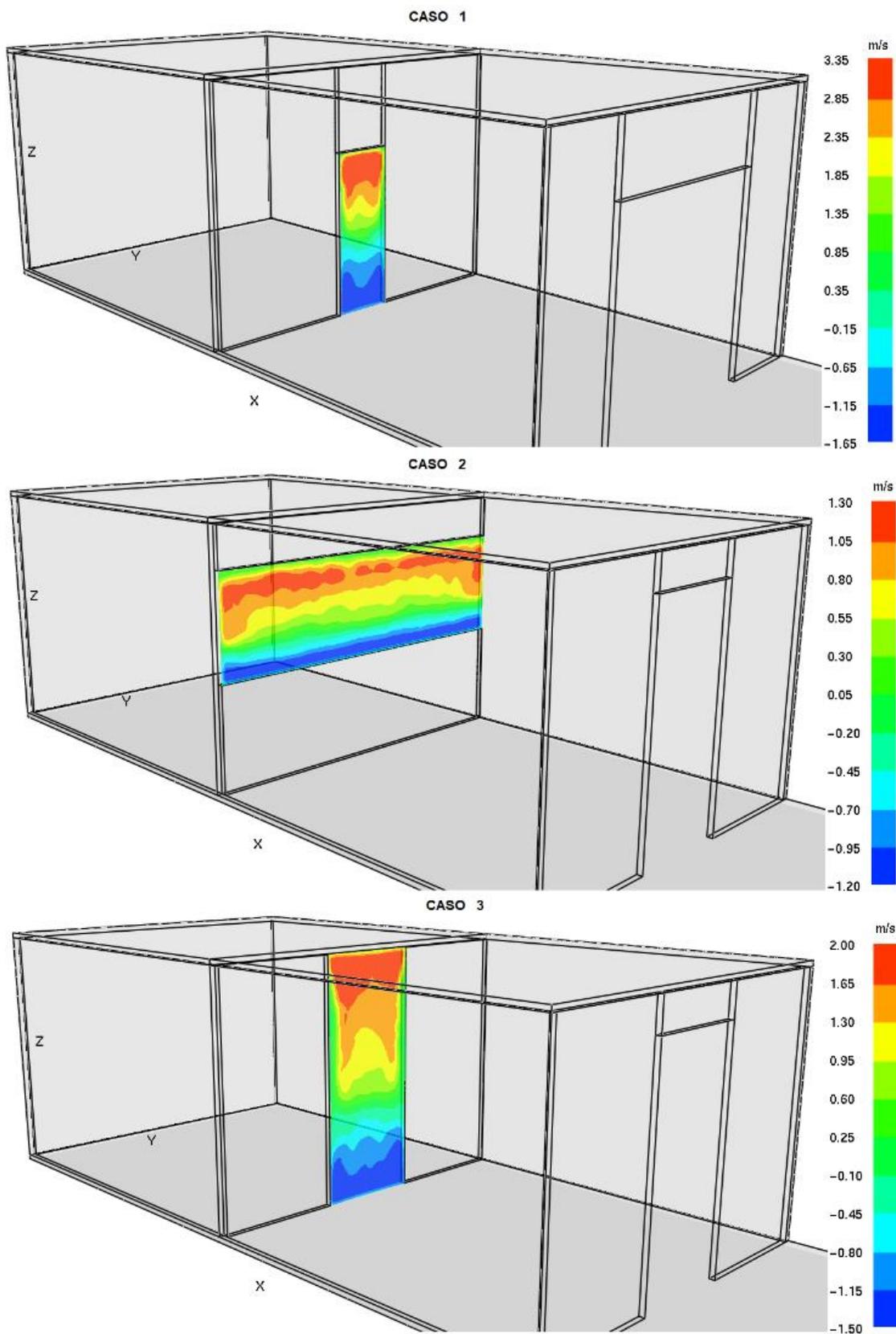


Figura III.1 – Componente da velocidade média em x, em regime permanente, na abertura 1, para os casos 1, 2 e 3.

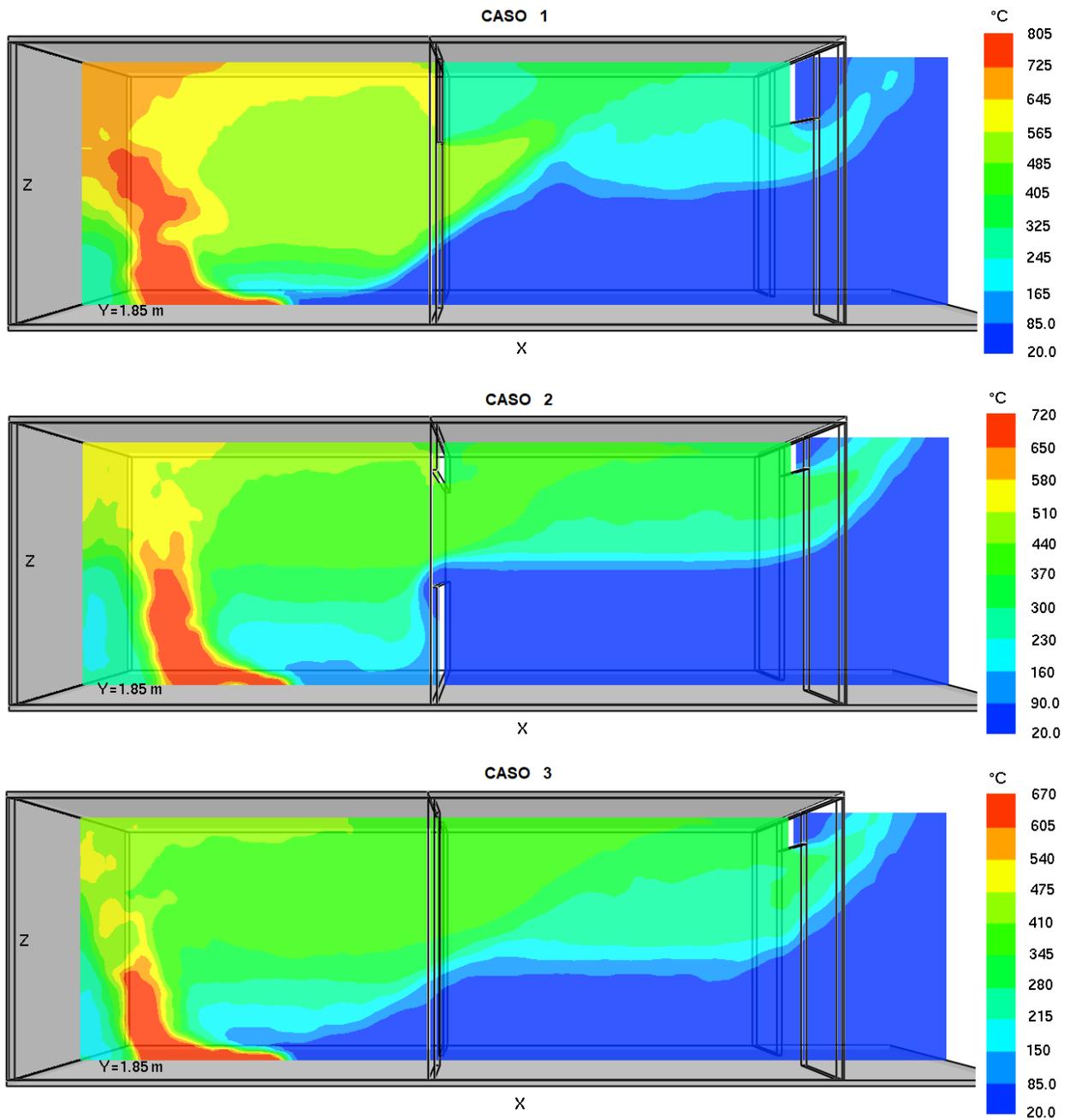


Figura IV.1 – Campo de temperaturas médias, em regime permanente, no plano $Y=1,85 \text{ m}$, para os casos 1, 2 e 3.