

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE UM INCÊNDIO NATURAL

COMPARTIMENTADO: VALIDAÇÃO COM UM ESTUDO EXPERIMENTAL

Roberta Tabaczinski⁽¹⁾, Cristiano Corrêa⁽²⁾, Tiago Ancelmo Pires⁽¹⁾, José Jéferson Rêgo e Silva⁽¹⁾

RESUMO

A pesquisa apresenta os resultados de simulações computacionais de incêndio validadas com o estudo experimental de Teixeira et al. (2012). Para tanto, foi utilizado um *software* de simulação de incêndio baseado na fluidodinâmica computacional, o *Fire Dynamics Simulator* (FDS), aliado com indicações da norma NP EN 1991-1-2 (2010). As simulações realizadas mostraram que o FDS, por ser um *software* que não possui interface gráfica, acaba tornando a modelagem trabalhosa e demorada, uma vez que sua entrada de dados é feita inteiramente em arquivos de texto. Entretanto, quando devidamente calibrado, o modelo é capaz de oferecer ao usuário diversos dados como: temperaturas, deslocamento de fumaça, concentração de oxigênio, consideração de dispositivos de combate a incêndio (*sprinklers*), dentre outros que podem oferecer opções de estudos a serem realizados no contexto da Segurança Contra Incêndio em Edificações (SCIE). Em comparação com os resultados experimentais, o modelo desenvolvido no FDS foi capaz de representar adequadamente as temperaturas de gases desenvolvidas no incêndio real. Concluindo que este simulador é uma ferramenta importante, sobretudo quando calibrados através de resultados experimentais, na proposição de soluções para os desafios da SCIE.

Palavras-chave: Segurança contra incêndio. Incêndio Compartimentado. Simulação Computacional. *Fire Dynamics Simulator* (FDS).

(1) - Federal University of Pernambuco, Brazil

(2) - cristianocorreacbmpe@gmail.com, Fire Department of Pernambuco, Brazil

(3)

(4) <http://dx.doi.org/10535/rsae.v17i3.8648>

1 INTRODUÇÃO

A Segurança Contra Incêndio (SCI) é vista no mundo como uma ciência e vem recebendo cada vez mais incentivos e investimentos em suas diversas áreas de pesquisa. Inúmeras instituições e laboratórios internacionais se dedicam à análise e testes de materiais, componentes estruturais, sistemas construtivos, equipamentos e utensílios usados nas edificações do ponto de vista da SCI (SEITO, 2008). Entretanto, apesar dos esforços e investimentos voltados para esta área, o alto custo dos equipamentos e das instalações necessárias para a realização de experimentos que envolvam edificações completas em escala real torna esse tipo de pesquisa escassa no mundo e praticamente inexistente no Brasil (RUSCHEL, 2011; CUNHA, 2016; CORRÊA et al., 2017).

Atualmente, observa-se que a maioria dos estudos desenvolvidos na área da SCI são voltados para a análise de elementos estruturais ou sistemas construtivos isoladamente, que são ensaiados para resistir ao fogo de acordo com curvas padronizadas internacionalmente, como na ISO 834 (1999). No entanto, tal padronização não é capaz de representar o desenvolvimento de incêndios reais, visto que o comportamento destes depende de inúmeras variáveis, tais como, quantidade e posicionamento de aberturas, distribuição da carga de incêndio no ambiente, tipo de materiais combustíveis e incombustíveis presente no ambiente, utilização de exaustores e dispositivos de detecção e combate a incêndio, dentre muitos outros fatores que tornam cada incêndio único, com características próprias. Ademais, em incêndios reais, além do desenvolvimento de altas temperaturas há também liberação de fumaça e gases tóxicos que se tornam determinantes para a sobrevivência humana, pois, em caso de incêndios, são estas as maiores causas imediatas de mortes (SEITO, 2008). Sendo assim, é evidente a necessidade de uma análise mais profunda baseada no desempenho para adequar projetos de edificações em Situação de Incêndio (SI).

Como solução a estes impasses, a simulação computacional, por meio de *softwares* como o FDS, por exemplo, é uma ferramenta que vem sendo cada vez mais utilizada para a avaliação de edificações completas em escala real em SI, uma vez que possibilita a realização de análises de múltiplas alternativas, sem os riscos e os custos advindos de ensaios com modelos reais. Assim, se ajustadas adequadamente, essas simulações podem auxiliar na compreensão do comportamento do incêndio, tanto em aspectos estruturais servindo de suporte a análise das estruturas em SI, como também na definição de geometria dos ambientes, distribuição de aberturas, e materiais utilizados na construção, favorecendo a criação, revisão e aperfeiçoamento de projetos e normas técnicas de SCIE (RUSCHEL, 2011; CUNHA, 2016). No entanto, no Brasil, a utilização de *softwares* para este fim ainda é pouco difundida entre os pesquisadores da área, fato que acarreta em uma escassa disponibilidade de literatura para auxiliar a utilização dos mesmos. Ademais, a grande maioria dos estudos brasileiros tem utilizado o FDS como ferramenta para simulação de incêndios em edificações sem que haja uma validação de seus resultados (TABACZENSKI et al., 2017).

Neste contexto, e, compartilhando da opinião exposta por Byström et al. (2012), sobre a importância de estudos experimentais para validação dos modelos desenvolvidos neste *software*, neste trabalho é apresentado o desenvolvimento de um modelo computacional baseado no estudo experimental apresentado por Teixeira et al. (2012) a fim de avaliar a eficácia e limitações da utilização do FDS para simulação de incêndios em edificações. Complementarmente, para comparação dos resultados de taxa de liberação de calor (em inglês *Heat Release Rate*, HRR) calculados numericamente pelo FDS, foi calculada analiticamente uma curva HRR x TEMPO por meio das indicações da norma NP EN 1991-1-2 (2010).

Para realização das simulações computacionais utilizou-se do *software* FDS, desenvolvido pelo *National Institute of Standards and Technology* (NIST / EUA), cuja escolha se deu por

este ser um dos programas de fluidodinâmica computacional mais usado para simulações de incêndios para reconstituições (RUSCHEL, 2011; CHI, 2013), projeções e diagnósticos (CUNHA, 2016; LUTHER & MÜLLER, 2009), investigações policiais (HONMA, 2013), entre outras aplicações. Em seu pacote de instalação, o FDS inclui o programa Smokeview (SMV), também desenvolvido pelo NIST, um programa de visualização criado para reproduzir animações da propagação do fogo e fumaça, concentrações de gás e de crescimento e movimento de fumaça em toda a estrutura submetida à simulação.

Com isso, pretende-se avaliar a eficácia, dificuldades e potencialidades da utilização do *software* para simulação de incêndios reais, bem como contribuir com a literatura sobre o conhecimento desta ferramenta computacional.

2 ESTUDO EXPERIMENTAL UTILIZADO PARA VALIDAÇÃO

Para validar os resultados obtidos por meio do modelo desenvolvido no FDS, foram utilizados os resultados de temperaturas de gases obtidos experimentalmente no estudo realizado por Teixeira et al. (2012), cujo objetivo foi simular um incêndio real em um escritório. Neste experimento utilizou-se de um container com dimensões internas de 5,00 m x 2,00 m com 2,40 m do piso ao teto, possuindo uma janela de 0,70 m x 0,70 m (que permaneceu totalmente aberta durante o ensaio) e, uma porta de 0,90 m x 2,00 m (que ficou parcialmente aberta durante o ensaio), proporcionando ao ambiente uma ventilação cruzada que promoveu a ventilação e extração da fumaça, garantindo ao experimento comburente o suficiente para que a queima fosse controlada pelo combustível.

No compartimento todas as paredes e teto foram revestidos internamente com placas de lã de rocha com espessura de 0,05 m e densidade de 40 kg/m³, cobertos com placas de gesso de

0,025 m de espessura. O piso foi revestido com uma camada de lã de rocha de 175 kg/m³, e posteriormente coberto com placas cerâmicas de 0,25 m x 0,25 m e 0,005 m de espessura.

A carga de incêndio foi materializada por caibros de madeira com dimensões de 1,00 m x 0,05 m x 0,055 m, distribuídos em três pilhas que corresponderam a uma densidade de carga de incêndio total de 500 MJ/m² (TEIXEIRA et al., 2012).

Além disso, neste experimento foram feitos outros testes com diferentes densidades de carga e comparações com o *software* de modelo “*dual zone*”, o OZone, que não será representado em minúcia neste trabalho.

3 METODOLOGIA COMPUTACIONAL

Para realização das simulações foi utilizado o *software* FDS versão 6.5.3 (McGRATTAN et al., 2017) instalado em um *desktop* com processador Intel® Core™ i7 3.40 GHz e 16.0 GB de memória RAM.

O desenvolvimento do modelo no FDS se deu com o objetivo de reproduzir da melhor forma possível o experimento de Teixeira et al. (2012). Devido ao *software* não dispor de interface gráfica, os dados de entrada foram inseridos por meio de linhas de comando em um único arquivo de entrada, através de um editor de texto que conteve todas as informações do modelo, tais como: título da simulação, dimensões do domínio computacional, divisões da malha, tempo de simulação, condições iniciais do ambiente, propriedades dos materiais combustíveis e incombustíveis, condições de combustão, *outputs* desejados, dentre outros.

Ressalta-se que o programa entende como comando os caracteres escritos entre os símbolos “&” e “/”, cujos dados necessários para a análise são especificados no arquivo de entrada usando uma lista de comandos com formatos pré-definidos em sua programação, chamados de *namelist* (McGRATTAN et al., 2017).

Nas seções subsequentes são apresentadas algumas entradas de dados admitidas para o desenvolvimento do modelo, a explanação completa e mais detalhada é apresentada em Sá (2018) e, o arquivo de texto completo com a entrada de dados é apresentado em seu APÊNDICE A.

3.1 Domínio computacional e malha

Para o cenário analisado, considerou-se um domínio computacional com as seguintes dimensões: 6,40 m de comprimento (eixo x), 3,60 m de profundidade (eixo y) e, 3,20 m de altura (eixo z), com uma malha cúbica de 0,10 m de aresta, totalizando 73 728 elementos. Para definição deste domínio e das dimensões da malha no FDS foi inserida no arquivo de entrada através da *namelist* MESH com a seguinte linha de comando:

```
&MESH IJK=64,36,32, XB=-0.5,5.9,-0.5,3.1,-0.1,3.1 /
```

As dimensões da malha foram assim definidas por dois motivos: (i) limitação computacional, pois, uma malha mais refinada foi testada (com arestas de 0,05 cm), entretanto, o tempo requerido para o processamento do modelo foi muito acima do praticável; (ii) indicação da literatura, pois, na revisão da literatura essa dimensão foi a mais indicada pelos autores (BYSTRÖM et al., 2012; CUNHA, 2016).

No FDS, “por padrão, os limites externos do domínio computacional são assumidos como sendo um limite sólido que é mantido à temperatura ambiente” (McGRATTAN et al., 2017, tradução livre), semelhante a uma parede inerte. Sendo assim, nos extremos máximos e mínimos dos eixos x e y, e no extremo máximo do eixo z foram criadas superfícies abertas denominadas OPEN VENTS, indicando uma abertura passiva para o lado exterior do domínio computacional, garantindo desta forma que haja comunicação entre os ambientes interno e

externo e alimentação do incêndio com oxigênio. Esta definição foi inserida no arquivo de entrada através das seguintes linhas de comando:

```
&VENT MB='XMIN', SURF_ID='OPEN' /  
&VENT MB='XMAX', SURF_ID='OPEN' /  
&VENT MB='YMIN', SURF_ID='OPEN' /  
&VENT MB='YMAX', SURF_ID='OPEN' /  
&VENT MB='ZMAX', SURF_ID='OPEN' /
```

A extrapolação da malha para além das dimensões do container é justificada pela presença da porta e da janela abertas para o exterior do compartimento e, pelo fato de que, segundo McGrattan et al. (2017), as OPENS VENTS geralmente possuem condição de limite de pressão imperfeita e, neste caso é recomendado que se estenda o domínio alguns metros a fim de não afetar o padrão de fluxo desta região.

3.2 Condições ambientais iniciais

Algumas condições ambientais foram consideradas, tais como: temperatura ambiente inicial de 20 °C, pressão atmosférica de 101 325 Pa e, umidade relativa do ar de 50%, ambos atribuídos na *namelist* MISC, responsável pela entrada de parâmetros globais variados no FDS. Não foi considerado o fluxo inicial devido ao vento. Esses parâmetros foram inseridos no arquivo de entrada através das seguintes linhas de comando:

```
&MISC TMPA=20.0, P_INF=101325.0, HUMIDITY=50.0 /
```

3.3 Geometria

A representação das paredes, teto, piso e pilhas de madeira se deu através da modelagem de obstruções (*namelist* OBST) cuja geometria e distribuição no ambiente foram devidamente ajustadas com a malha adotada para que se assemelhem o máximo possível com o

experimento. Assim, todos os objetos sólidos presentes nesta simulação foram modelados com dimensões múltiplas de 0,10 m.

Para compatibilizar as dimensões dos caibros de madeira, estes foram modelados com dimensões de 1,00 m x 0,10 m x 0,10 m, também distribuídos em três pilhas que corresponderam a uma densidade de carga de incêndio total de 500 MJ/m², referente ao terceiro ensaio experimental realizado por Teixeira et al. (2012).

3.4 Aberturas

As aberturas podem ser inseridas no modelo através da *namelist* HOLE, ou, modelando as paredes em partes, deixando espaços vazios, sem obstruções. No caso da janela, como esta permaneceu totalmente aberta durante o experimento, foi inserida uma abertura de 0,70 m x 0,70 m com peitoril de 1,30 m, posicionada analogamente a mesma no ensaio experimental. No entanto, a impossibilidade de representar obstruções rotacionadas no FDS fez com que a consideração da porta semiaberta fosse feita através da inserção de uma abertura com largura menor que a original, com dimensões de 0,30 m x 2,00 m posicionada analogamente ao experimento.

3.5 Propriedades térmicas e de combustão dos materiais

No FDS, por padrão, ao serem inseridos em um modelo, todos os objetos (chamados de obstruções) são considerados como inertes, o que significa que sua temperatura é fixada na temperatura ambiente inicial (TMPA) durante toda a simulação. Para que um objeto tenha sua temperatura influenciada pelo ambiente, é necessário que suas propriedades sejam definidas através dos *namelist* MATL e SURF (McGRATTAN et al., 2017).

Para definir as propriedades de um sólido, o usuário deve criar uma superfície (através da *namelist* SURF) que pode ser composta de camadas de diferentes espessuras e materiais. As propriedades desses materiais são definidas na *namelist* MATL, que deve ter uma identificação (ID) para que possa ser associado a uma superfície (McGRATTAN et al., 2017). As propriedades térmicas dos materiais utilizados nas simulações foram as mesmas indicadas por Teixeira et al. (2012). Apenas da madeira que, por falta de dados indicados, teve suas propriedades definidas baseadas nas bibliografias e normas existentes conforme indicado na Tabela 1. Salienta-se que todas as propriedades de todos os materiais foram admitidas constantes, sem que houvessem variações em função da temperatura durante as simulações.

Tabela 1: Propriedades térmicas dos materiais empregados no modelo computacional

Material	Densidade (kg/m ³)	Emissividade	Condutividade Térmica (W/m.K)	Calor específico (kJ/kg.K)
Madeira	400,0 (1)	0,90 (*)	0,120 (1)	1,34 (1)
Gesso	1150,0	0,80	0,485	1,00
Azulejo	2000,0	0,80	1,200	1,00
Lã de rocha 1	40,0	0,80	0,037	1,03
Lã de rocha 2	175,0	0,80	0,040	1,03

(*) adotado
(1) NBR 15220-2 (ABNT, 2005)

As propriedades mostradas na Tabela 1 foram inseridas no arquivo de entrada através da *namelist* MATL. No caso dos materiais incombustíveis, as seguintes linhas de comando foram inseridas para o caso do material gesso:

```
&MATL ID='GESSO', DENSITY=1150.0, CONDUCTIVITY=0.485,  
SPECIFIC_HEAT=1.0, EMISSIVITY=0.80 /
```

Quanto à modelagem de objetos sólidos combustíveis no FDS, o usuário pode optar entre duas maneiras: (i) a primeira, e mais simples, é especificar nas características do material (MATL) o seu calor de combustão (HEAT_OF_COMBUSTION), e na superfície (SURF)

correspondente ao sólido, especificar a taxa de liberação de calor por unidade de área (HRRPUA) e temperatura de ignição (IGNITION_TEMPERATURE); (ii) a segunda, e mais complexa, é especificar um calor de reação, juntamente com outros parâmetros térmicos e de combustão do material.

Para fins práticos, neste modelo optou-se pela utilização da primeira alternativa, sendo esta a maneira mais simples pois não necessita a inserção de muitos parâmetros referentes ao material combustível presente no modelo.

Assim, considerou-se que esse material possui um calor de combustão de 17 500 kJ/kg, como sugerido por NP EN 1991-1-2 (2010), e atribuiu-se à sua superfície uma HRRPUA de 100 kW/m², ajustado conforme estudo realizado por Rocha (2014), e, temperatura de ignição de 210 °C, ajustada conforme sugerido por Figueroa & Moraes (2009).

O calor de combustão é utilizado pelo FDS para calcular a energia total armazenada pelo objeto, a HRRPUA indica ao *software* o quão rápido essa energia será liberada, e a temperatura de ignição indica quando (quando atingir determinada temperatura) essa liberação de energia será iniciada.

Ressalta-se que, para este modelo de combustão, a HRRPUA e a temperatura de ignição são propriedades essenciais para a determinação do comportamento do incêndio. Devido a variabilidade dos valores dessas propriedades (FIGUEROA & MORAES, 2009; ROCHA, 2014), diversos testes de calibração foram realizados até se ajustar aos valores adotados.

O calor de combustão é um parâmetro que é inserido no arquivo de entrada como parte do material (através da *namelist* MATL), enquanto a HRRPUA e a temperatura de ignição são inseridas como parte de uma superfície (através da *namelist* SURF), para isso, as seguintes linhas de comando foram inseridas:

```
&MATL ID='MADEIRA', SPECIFIC_HEAT=1.34, CONDUCTIVITY=0.12,
EMISSION=0.9, DENSITY=400.0, HEAT_OF_COMBUSTION=17500.0 /

&SURF ID='MAD', COLOR='BROWN', BURN_AWAY=.TRUE.,
BACKING='EXPOSED', MATL_ID='MADEIRA', THICKNESS=0.1,
IGNITION_TEMPERATURE=210, HRRPUA=100 /
```

Destas linhas: “BURN_AWAY=.TRUE.” indica ao FDS que o objeto deve desaparecer da simulação conforme for consumido; “THICKNESS” é a(s) espessura(s) da(s) camada(s) do(s) material(is); “BACKING='EXPOSED'” indica ao FDS que calcule a condução de calor através de toda a “THICKNESS”, sendo esta condição é indicada para objetos que não estão na borda do domínio (McGRATTAN et al., 2017).

Para definição das paredes, teto e piso, algumas superfícies foram criadas sendo compostas dos materiais pertencentes a cada obstrução, de acordo com as informações de Teixeira et al. (2012). A Tabela 2 mostra o resumo das superfícies criadas para o modelo desenvolvido.

Tabela 2: Superfícies das obstruções presentes no modelo computacional

Superfície	Material (camadas)	Espessura da camada de material (m)	Temperatura de ignição (°C)	Taxa de liberação de calor por área (kW/m²)
PAREDE	GESSO LÃ DE ROCHA 1	0,025 0,05	-	-
TETO	GESSO LÃ DE ROCHA 1	0,025 0,05	-	-
PISO	AZULEJO LÃ DE ROCHA 2	0,005 0,05	-	-
MAD	MADEIRA	0,10	210,0	100,0
MAD_HOT	MADEIRA	0,10	0,00	200,0

Ressalta-se que a(s) espessura(s) da(s) camada(s) do(s) material(is) que compõe as superfícies independem das dimensões da malha adotada. A dimensão da malha indica ao FDS as dimensões dos elementos que compõe o domínio, sendo que as dimensões das obstruções devem sempre ser ajustadas múltiplas desta malha, caso contrário, o *software* pode não identificar a presença desta obstrução na simulação. Já a(s) espessura(s) da(s) camada(s) do(s)

material(is) indicam ao FDS a(s) espessura(s) real(is) de cada material que compõe a superfície que será atribuída à obstrução, sendo que, este(s) valor(es) é(são) utilizado(s) pelo *software* para os cálculos de energia armazenada e liberada (no caso de materiais combustíveis), condução de calor pelo o objeto, entre outros.

3.6 Gás combustível

Nas simulações de incêndios feitas no FDS, é necessária a definição de um combustível gasoso que atuará como um substituto para todas as fontes de combustível em potencial. Assim, no caso de um modelo de química simples (caso esta reação não esteja definida na biblioteca padrão do *software*) o usuário pode especificar a formulação química do combustível gasoso junto com os rendimentos de monóxido de carbono (CO), fuligem e outros parâmetros referentes ao mesmo. Neste caso, o programa assumirá que esses parâmetros serão gerados em proporção direta à taxa de liberação de calor do combustível (McGRATTAN et al., 2017).

Considerando que a madeira foi o único material combustível presente no experimento, neste modelo a formulação química do combustível foi definida como $\text{CH}_{1,7}\text{O}_{0,74}\text{N}_{0,002}$, e foram definidos rendimentos CO e fuligem de 0,004 kg/kg e 0,015 kg/kg respectivamente, como indicado por Tewarson (2008, apud WEINSCHENK et al. 2014). Além disso, atribuiu-se a esse gás a propriedade de calor de combustão de 17500 kJ/kg, como sugerido por NP EN 1991-1-2 (2010). Esses parâmetros foram inseridos no arquivo de entrada através das seguintes linhas de comando:

```
&SPEC ID='wood', FORMULA='CH1.7O0.74N0.002' /  
&REAC ID='WOOD', FUEL='wood', SOOT_YIELD=0.015,  
CO_YIELD=0.004, HEAT_OF_COMBUSTION=17500.0 /
```

3.7 Ignição do incêndio

No experimento desenvolvido por Teixeira et al. (2012) a ignição das pilhas foi feita através de um trilho de aço envolvido por lã cerâmica embebida com álcool sob as pilhas de madeira.

No modelo desenvolvido no FDS, para desencadear o processo de queima das pilhas de madeira considerou-se que um dos caibros da pilha do centro do compartimento entraria em combustão imediatamente ao início da simulação. Para isso, criou-se uma superfície com temperatura de ignição de 0 °C e HRRPUA de 200 kW/m². Assim, com o aumento de temperatura, os demais caibros entram em ignição ao atingirem suas respectivas temperaturas de ignição, provocando uma reação em cadeia e a propagação do incêndio pelo compartimento.

3.8 Outputs

Para obtenção dos resultados da simulação, alguns medidores pontuais de temperaturas foram posicionados no interior do compartimento (inseridos através da *namelist* DEVC) analogamente aos termopares no experimento analisado. Para garantir o registro das temperaturas dos gases, esses medidores foram posicionados 0,10 m afastados de todas as obstruções do compartimento.

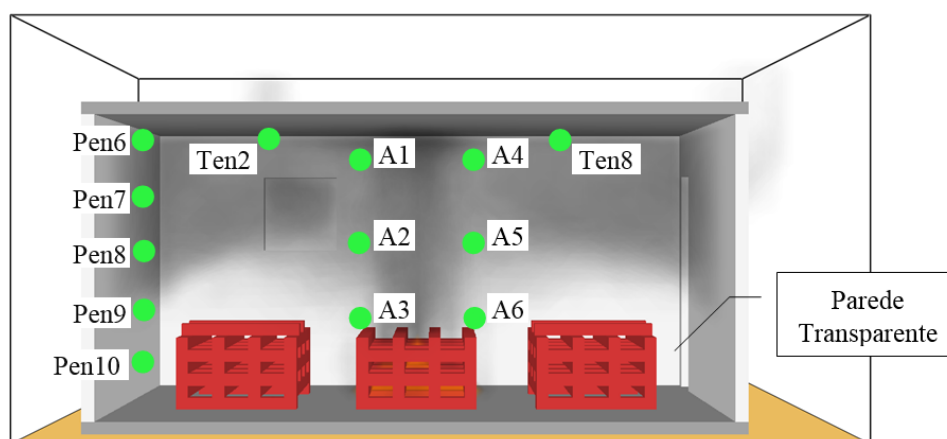
Complementarmente, foram inseridos dois planos de medição de temperaturas, denominados *slice* (inseridos através da *namelist* SLCF), sendo: um posicionado longitudinalmente ao compartimento, entre as pilhas de madeira e a parede que contem a janela e passando no meio da porta; e o outro posicionado transversalmente ao compartimento, passando no meio da janela.

Ressalta-se que os medidores inseridos na simulação através da *namelist* DEVC retornam resultados tabulados, enquanto os medidores inseridos através da *namelist* SLCF retornam resultados de visualização gráfica através do SMV.

3.9 Modelo desenvolvido

A Figura 1 mostra o compartimento e os caibros de madeira modelados no FDS, bem como os termopares considerados, baseados no ensaio experimental de Teixeira et al. (2012). Nesta figura também é possível visualizar que a parede oposta a janela foi considerada transparente, para a visualização da dinâmica do incêndio dentro do compartimento. As chamas e a fumaça emanando da pilha de madeira central indica o início da simulação.

Figura 1: Compartimento modelado no FDS e medidores de temperatura aplicados na simulação



Uma observação interessante a ser feita sobre o desenvolvimento de simulações de incêndio no FDS é que muitos *outputs* não são pré-definidos. Apesar de algumas informações serem geradas automaticamente (como a visualização no SMV e os resultados de HRR), os dados de temperaturas nos gases (tanto pontual quanto em planos), temperaturas em objetos, velocidade

do ar, e muitos outros, só serão capturados na simulação se o usuário introduzir os dispositivos de medição no modelo. Deixar de inserir um termopar no modelo, por exemplo, implica em perder a informação que seria capturada pelo dispositivo. Caso o usuário deseje obter esse dado, terá que voltar ao arquivo de entrada de dados, posicionar o termopar no modelo e, processar novamente a simulação.

Alguns ajustes pequenos podem ser feitos durante o processamento, entretanto, os dados gerados no tempo de simulação já processado são perdidos (no caso de posicionar um termopar ou qualquer outro dispositivo no modelo após o processamento ter iniciado). Uma forma de fazer isso é introduzir no arquivo de entrada um comando que faz com que o FDS crie arquivos de *restart* durante o processamento das simulações. Assim, caso seja necessário, o usuário pode pausar o processamento, fazer pequenos ajustes, e continuar simulação do último ponto de *restart* criado. Ressalta-se que esse recurso só é ativado no *software* se o usuário introduzi-lo no arquivo de entrada. Isso pode ser feito através da seguinte linha de comando:

```
&DUMP DT_RESTART=10.0 /
```

Neste caso, é solicitado ao programa que crie um arquivo de *restart* a cada 10 s de processamento. Para iniciar um *restart* o usuário deve acrescentar a seguinte linha de comando no arquivo de entrada após pausar a simulação e fazer os devidos ajustes:

```
&MISC ESTART=.TRUE. /
```

Esse artifício também é útil no caso de queda de energia, ou se o usuário desejar desligar o computador antes do final do processamento, pois, se isso acontecer e não houver um arquivo de *restart* criado, para finalizar a simulação, o processamento deverá ser executado desde o início novamente.

Diante desses impasses, aconselha-se que para o desenvolvimento de um modelo no FDS seja realizado um “plano de simulação”, semelhante ao “plano experimental” de ensaios de experimentais. Assim, o usuário pode planejar melhor as etapas de desenvolvimento do modelo, evitando esquecimentos ou imprevistos indesejados.

3.10 Situações analisadas

Desenvolvido o modelo computacional, para comparação e análise das informações adquiridas da revisão da literatura, foram admitidas duas situações para as simulações:

- (i) Situação 1: em que, todas as obstruções, com exceção das pilhas de madeira, foram consideradas inertes, sem a atribuição de propriedades térmicas, visto que alguns autores (RODRIGUES, 2009; RUSCHEL, 2011) sugerem que esta simplificação não prejudica os resultados e reduz o custo computacional do processamento;
- (ii) Situação 2: em que todas as obstruções receberam suas respectivas propriedades conforme o indicado nas Tabela 1 e Tabela 2, visto que alguns autores (BYSTRÖM et al., 2012; WEINSCHENK et al., 2014) sugerem que a consideração destas propriedades é importante para a obtenção de resultados coerentes com a realidade.

Para ambas as situações o tempo de simulação estabelecido foi de 120 minutos.

4. RESULTADOS

4.1 Tempo de processamento

O primeiro ponto observado nas simulações realizada no FDS diz respeito ao tempo de processamento, que para o caso analisado foi de aproximadamente 33 horas para a Situação 1, e 52 horas para a Situação 2. Isso indica que o pressuposto exposto por alguns autores, como Rodrigues (2009) e Ruschel (2011) por exemplo, que a consideração das propriedades

térmicas de todos os materiais presentes nos cenários de incêndio simulados no FDS aumenta o tempo requerido para o processamento dos modelos, pode estar correto. Entretanto, para que tal afirmação seja conclusiva, recomenda-se que mais testes sejam realizados.

4.2 Taxa de liberação de calor

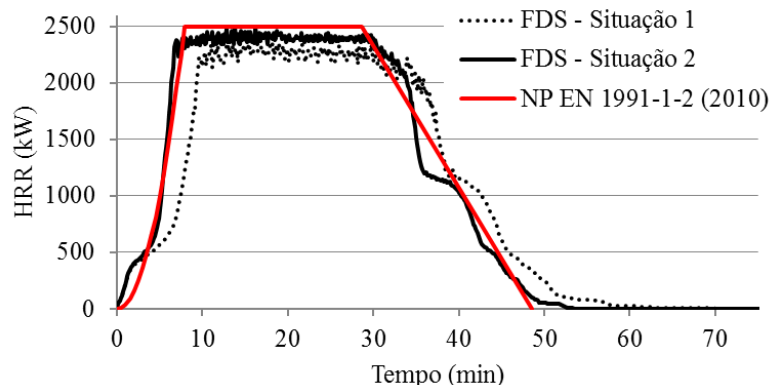
A HRR é a quantidade de energia liberada por um combustível por unidade de tempo (NP EN 1991-1-2, 2010). Com esta é possível verificar a energia total liberada em um incêndio, analisar o comportamento da liberação de calor, verificar o tempo requerido para consumo total da carga de incêndio, dentre outros. Esta medida quantifica o tamanho do incêndio e é um dos poucos *outputs* que são gerados automaticamente pelo FDS.

Este dado pode facilmente ser calculado com base nos pressupostos do “Anexo E” da NP EN 1991-1-2 (2010), levando em consideração a densidade da carga de incêndio, o tipo de ocupação da edificação analisada, dentre outros parâmetros. Neste anexo é possível identificar que o cálculo da HRR é realizado para três fases bem definidas: (i) fase de crescimento; (ii) fase estacionária; (iii) fase de arrefecimento.

Devido ao modelo desenvolvido no FDS não ter contemplado a produção de carvão em decorrência da queima da madeira, para fins comparativos, no cálculo da HRR por meio das indicações da NP EN 1991-1-2 (2010) adotou-se um fator de combustão igual a 1,00, indicando que o material combustível deve ser totalmente consumido pelo incêndio, desta forma, a energia total liberada deve ser correspondente a densidade da carga de incêndio contida no container.

A Figura 2 mostra a HRR registrada nas simulações da Situação 1 e Situação 2 no FDS, bem como seus valores calculados analiticamente por meio das indicações da NP EN 1991-1-2 (2010).

Figura 2: HRR registrada nas simulações do FDS e calculada analiticamente



Analisando a HRR obtida através das indicações da NP EN 1991-1-2 (2010), constou-se que a fase de crescimento é limitada aos 8 minutos. Nesse momento inicia a fase estacionária com valor fixado em 2500 kW. Aos 29 minutos a fase estacionária termina, dando início à fase de arrefecimento. Nesse momento, 70 % da carga de incêndio presente no compartimento foi consumida. Aos 49 minutos a carga de incêndio é totalmente consumida, dando fim a liberação de calor pelo combustível. Somando a área abaixo desta curva, obtém-se a energia total liberada pelo combustível, que, no caso analisado foi 5 000 MJ, exatamente a carga de incêndio presente no container (500 MJ/m² distribuídos em 10,00 m² de piso).

Analisando a HRR registrada nas simulações realizadas no FDS (Situação 1 e Situação 2), constatou-se um comportamento similar ao determinado analiticamente através das indicações da NP EN 1991-1-2 (2010), sendo que a energia total liberada também foi de 5 000 MJ.

Na Situação 1, a fase de crescimento é limitada aos 10 minutos. A partir deste momento até os 35 minutos de simulação, é mantida a fase estacionária, com valor médio de 2250 kW. Aos 72 minutos a madeira é totalmente consumida.

Na Situação 2, a fase de crescimento é limitada aos 7 minutos. A partir deste momento até os 30 minutos de simulação, é mantida a fase estacionária, com valores em torno de 2400 kW. Aos 54 minutos a madeira é totalmente consumida.

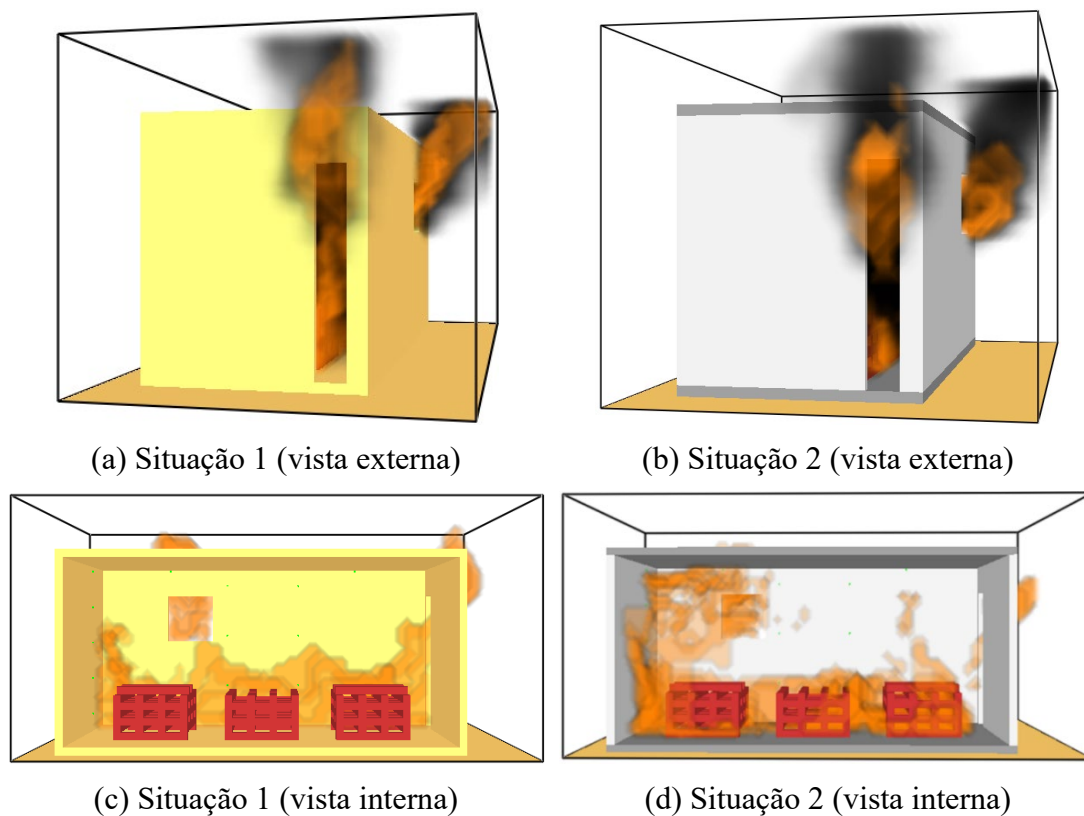
Apesar do comportamento semelhante e de a energia total liberada ter sido a mesma em ambas as situações analisadas no FDS, a Situação 2 foi a que mais se aproximou dos valores calculados analiticamente através da NP EN 1991-1-2 (2010). Indicando que a consideração das propriedades das paredes, teto e piso, podem influenciar no comportamento do crescimento do incêndio, proporcionando resultados mais fidedignos.

4.3 Propagação do incêndio

Quanto ao comportamento da propagação do fogo e da fumaça, observou-se que, em ambas as situações simuladas no FDS (Situação 1 e Situação 2), este foi semelhante ao ocorrido no ensaio experimental.

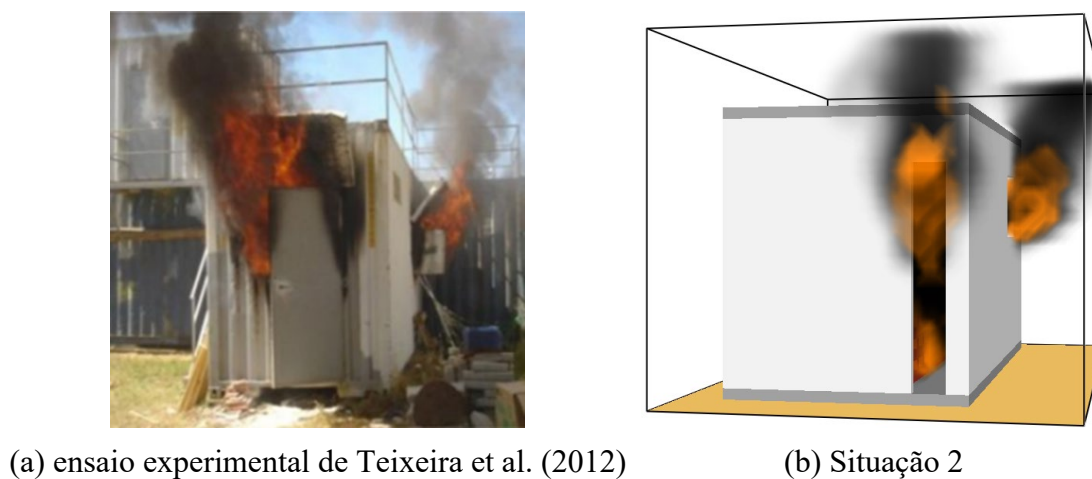
A Figura 3 mostra o incêndio plenamente desenvolvido nas simulações realizadas no FDS (aproximadamente aos 30 minutos). Observa-se que as chamas que saíram pelas aberturas do compartimento aos 30 minutos eram mais volumosas na Situação 1 (Figura 3a) do que na Situação 2 (Figura 3b). Ao analisar a dinâmica das chamas no interior do compartimento, constatou-se que durante praticamente todo o tempo de simulação da Situação 1 (Figura 3c) as chamas ficaram localizadas próximas a parede que continha a janela, justificando o volume que saía pelas aberturas. Ao analisar do interior do compartimento na simulação da Situação 2 (Figura 3d) constatou-se que as chamas ficaram mais concentradas nas pilhas de madeira, mostrando um comportamento mais próximo da realidade.

Figura 3: Incêndio plenamente desenvolvido na Situação 1 e Situação 2 (aos 30 minutos)



A Figura 4 mostra uma vista externa do compartimento, onde é possível visualizar o comportamento do incêndio plenamente desenvolvido no ensaio experimental de Teixeira et al. (2012) e na simulação da Situação 2.

Figura 4: Incêndio em plenamente desenvolvido (aos 30 minutos)



Fonte: Adaptado de Teixeira et al. (2012)

Como pode-se observar, houve uma boa concordância entre o comportamento da propagação do incêndio apresentado pela simulação computacional realizada FDS na Situação 2 e o ensaio experimental de Teixeira et al. (2012).

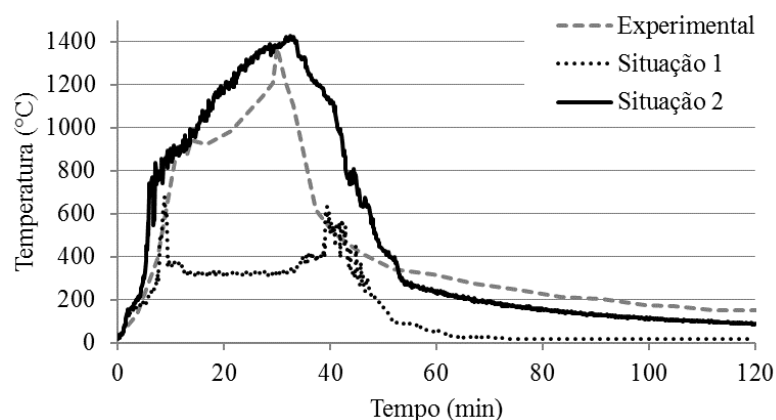
Ressalta-se que a Figura 3b e Figura 4b mostram apenas o comportamento do incêndio aos 30 minutos de simulação da Situação 2, a cronologia completa pode ser observada no “APÊNDICE C”, “APÊNDICE D” e “APÊNDICE E” da pesquisa completa (SÁ, 2018).

4.4 Temperatura dos gases

Para comparar os resultados de temperaturas obtidos através das simulações realizadas no FDS (Situação 1 e Situação 2) com os apresentados por Teixeira et al. (2012), são apresentados a seguir os valores máximos registrados nos gases dentro do compartimento. Esses resultados foram registrados pelo termopar A6 tanto no ensaio experimental quanto nas simulações realizadas no FDS.

Na Figura 5 é apresentada a evolução das temperaturas no compartimento obtidas através da simulação no FDS (Situação 1 e Situação 2) e as obtidas no ensaio experimental de Teixeira et al. (2012).

Figura 5: Temperaturas nos gases, registradas no termopar A6



Na simulação da Situação 1, observa-se que na fase de crescimento do incêndio as temperaturas aumentam de forma coerente com o experimento até os 9 minutos, quando

atinge o valor máximo de 670 °C. Depois disso, entre 10 e 38 minutos, as temperaturas caem e mantêm-se com valores abaixo de 400 °C. Aos 39 minutos há um novo pico de temperaturas que chega a 635 °C. A partir daí as temperaturas caem rapidamente novamente: aos 60 minutos (momento em que a madeira já está quase toda consumida) a temperatura registrada é de 54 °C, e, aos 72 minutos (instante em que a madeira é toda consumida) todos os termopares considerados nesta simulação estão registrando 20 °C. Nesse mesmo instante (72 minutos) a temperatura registrada no experimento era de 250 °C, e, aos 120 minutos era de 150 °C, ou seja, diferente do observado na simulação da Situação 1, o calor ainda não havia dissipado completamente no compartimento.

Observando os resultados expostos na Figura 5, fica evidente que a Situação 1 simulada no FDS não foi capaz de representar adequadamente o desenvolvimento das temperaturas no compartimento analisado. Isso mostra que a não consideração das propriedades térmicas dos materiais não combustíveis na simulação (paredes, teto e piso) acarreta na obtenção de resultados de temperaturas dos gases incoerentes com a realidade.

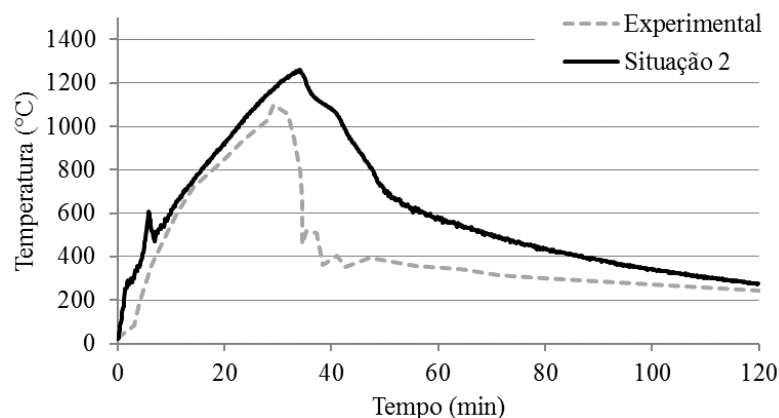
Na simulação da Situação 2, observa-se que na fase de crescimento do incêndio as temperaturas registradas aumentam de forma coerente ao experimento, atingindo a temperatura máxima de 1420 °C aos 33 minutos de simulação. Este comportamento foi similar ao ocorrido no experimento de Teixeira et al. (2012), onde a temperatura máxima é atingida aos 30 minutos, com o valor de 1400 °C. Na fase de arrefecimento, o decaimento das temperaturas obtidas através do FDS apresenta um comportamento coerente (apesar de serem maiores que as obtidas no ensaio experimental), as temperaturas caem após o pico máximo até atingir 165 °C aos 54 minutos (neste instante a madeira foi totalmente consumida na simulação). A partir desse instante (54 minutos) as temperaturas caem mais lentamente na simulação realizada no FDS, apresentando um comportamento muito semelhante ao ensaio

experimental, porém, sempre com valores cerca de 60 °C mais baixos. Isso talvez tenha ocorrido devido ao fato do modelo desenvolvido no FDS não ter contemplado a produção de carvão durante a queima da madeira, diferentemente do ocorrido no ensaio experimental, onde, segundo Teixeira et al. (2012) estes produziram uma radiação intensa que provavelmente contribuiu para manter as temperaturas do ambiente mais elevadas no final do experimento. Ao final da simulação (aos 120 minutos) a temperatura registrada através do FDS foi de 90 °C, enquanto que no experimento esse valor era de 150 °C. Apesar da diferença, pode-se afirmar que nesta situação, o calor ainda não havia dissipado completamente, o que mostra um comportamento coerente com a realidade.

Observando os resultados expostos na Figura 5, fica evidente que, apesar de algumas sutis diferenças, a Situação 2 simulada no FDS foi capaz de representar adequadamente o desenvolvimento das temperaturas no compartimento analisado. Isso mostra que a consideração dos materiais envolvidos numa simulação computacional, bem como o conhecimento de sua natureza (combustível ou incombustível) e, propriedades térmicas e de combustão (ainda que de forma aproximada) são de suma importância para a obtenção de temperaturas dos gases coerentes com a realidade.

Os demais termopares considerados nas simulações realizadas no FDS apresentaram comportamentos semelhantes ao termopar A6 em ambas as situações analisadas. Na Figura 6 é apresentada a evolução de temperaturas registrada no termopar Ten8, posicionado 10 cm abaixo do teto do compartimento (camada superior), na simulação da Situação 2 no FDS e no ensaio experimental.

Figura 6: Temperaturas nos gases, registradas no termopar Ten8

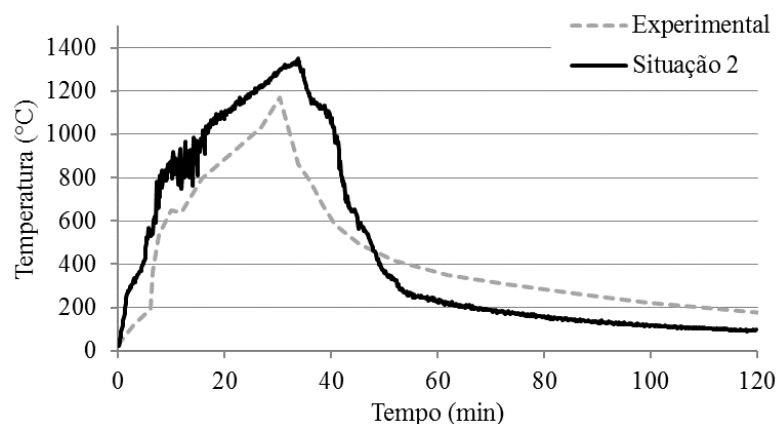


Observa-se que durante todo o tempo de simulação da Situação 2 realizada no FDS as temperaturas registradas no termopar Ten8 foram maiores que as registradas no ensaio experimental, até mesmo após ocorrer o consumo total da madeira. Isso provavelmente ocorreu devido ao fato de que quando aquecidos os gases se tornam menos densos tendendo a se concentrar na camada superior do compartimento, tornando essa região naturalmente mais quente após o consumo total do material combustível do incêndio. Esse fenômeno pode ser observado na Figura 8.

Na simulação da Situação 2 realizada no FDS, a temperatura máxima registrada no termopar Ten8 ocorreu aos 35 minutos com o valor de 1260 °C, enquanto que no ensaio experimental isso ocorreu aos 29 minutos com o valor de 1100 °C. Nota-se que, em ambos os casos (experimental e computacional no FDS), essa temperatura foi inferior à capturada no centro do compartimento pelo termopar A6 (Figura 5): isso provavelmente ocorreu porque este termopar foi posicionado muito próximo das pilhas de madeira, assim, tanto durante o experimento, quanto durante a simulação, as chamas do incêndio incidiram diretamente no mesmo, acarretando na leitura de temperaturas mais elevadas neste local.

Na Figura 7 é apresentada a evolução de temperaturas registradas no termopar Pen8, posicionado próximo a parede do compartimento, na simulação da Situação 2 realizada no FDS e no ensaio experimental.

Figura 7: Temperaturas nos gases, registradas no termopar Pen8



Observa-se que as temperaturas registradas na simulação computacional no FDS foram maiores que as registradas no ensaio experimental até os 48 minutos, quando o incêndio já estava na fase de arrefecimento. Após isso, os valores registrados na simulação foram menores que os registrados durante o experimento, ficando sempre em torno de 130 °C abaixo das temperaturas reais (comportamento semelhante ao observado no termopar A6). Na simulação computacional no FDS, a temperatura máxima capturada por este termopar (Pen8) foi de 1350 °C aos 34 minutos, enquanto no ensaio experimental esta foi de 1170 °C aos 30 minutos.

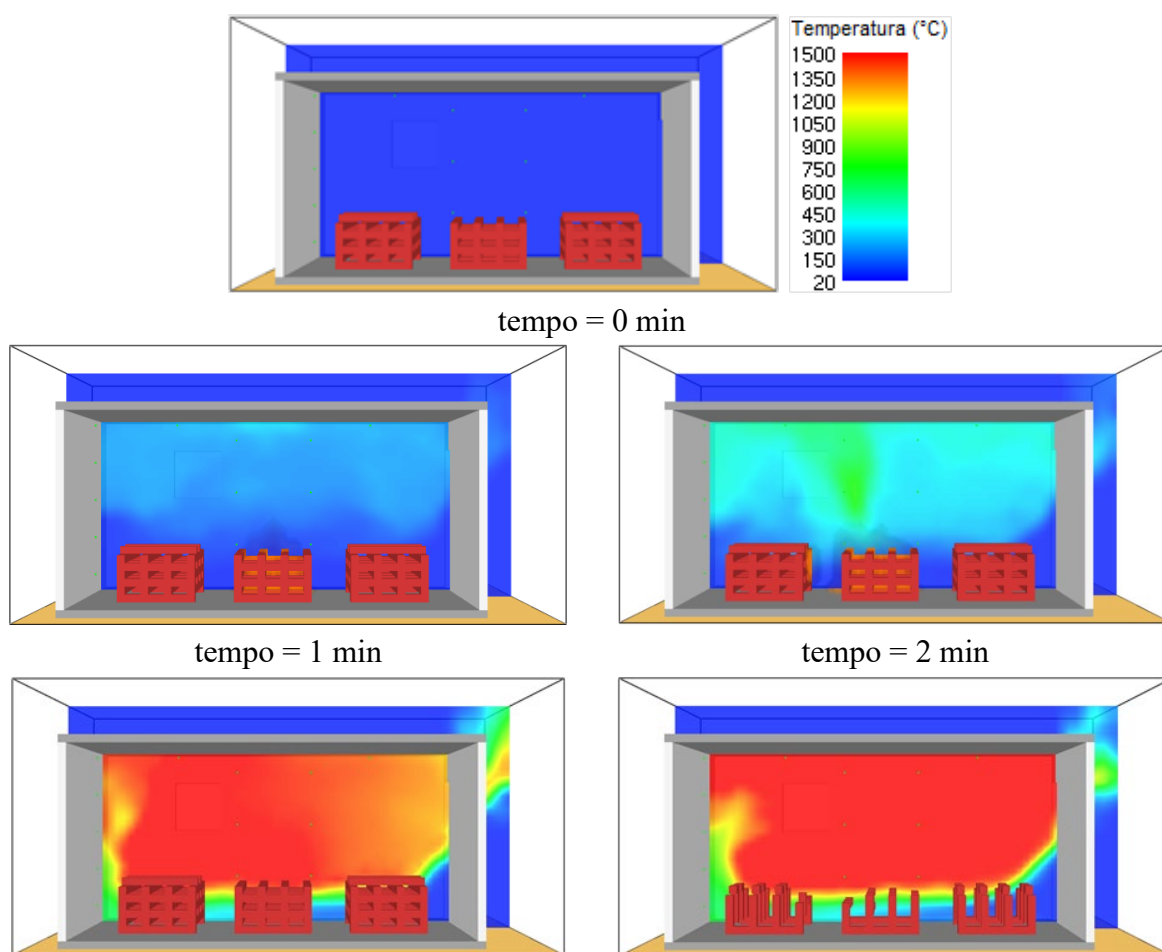
Apesar de algumas diferenças (principalmente na fase de arrefecimento), observou-se que o comportamento de desenvolvimento de temperaturas dos gases obtido através da simulação no FDS da Situação 2 foi coerente com o constatado no ensaio experimental. Da fase de crescimento do incêndio até o seu máximo desenvolvimento, observou-se resultados satisfatórios nas aferições das temperaturas, mantendo-se sempre um pouco acima dos resultados experimentais.

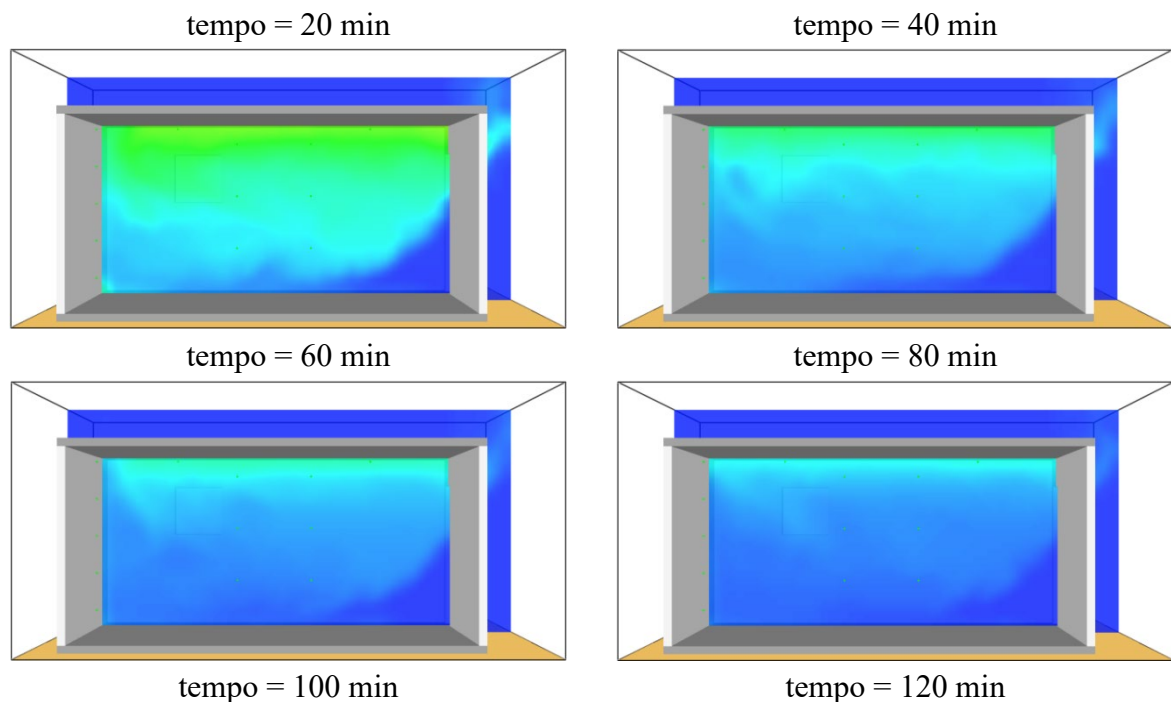
A Figura 8 apresenta a variação de temperaturas capturadas na simulação da Situação 2 realizada no FDS. Esses dados foram registrados através de um plano de medição (*slice*) que foi posicionado longitudinalmente ao compartimento, entre as pilhas de madeira e a parede

que contem a janela e passando no meio da porta. Ressalta-se que apenas em alguns recortes de tempo são mostrados nesta figura, a cronologia completa pode ser observada no “APÊNDICE F” da pesquisa completa (SÁ, 2018).

Na Figura 8 é possível visualizar que a convecção dos gases quentes faz com que esses se acumulem próximo ao teto do compartimento conforme as pilhas de madeira entram em combustão. Isso ocorre rapidamente logo nos instantes iniciais da simulação e vai se intensificando até aproximadamente 33 minutos, quando há o pico máximo de temperaturas. Depois disso, conforme o volume de madeira vai diminuindo os gases quentes saem do compartimento, e ficam mais concentrados próximo ao teto.

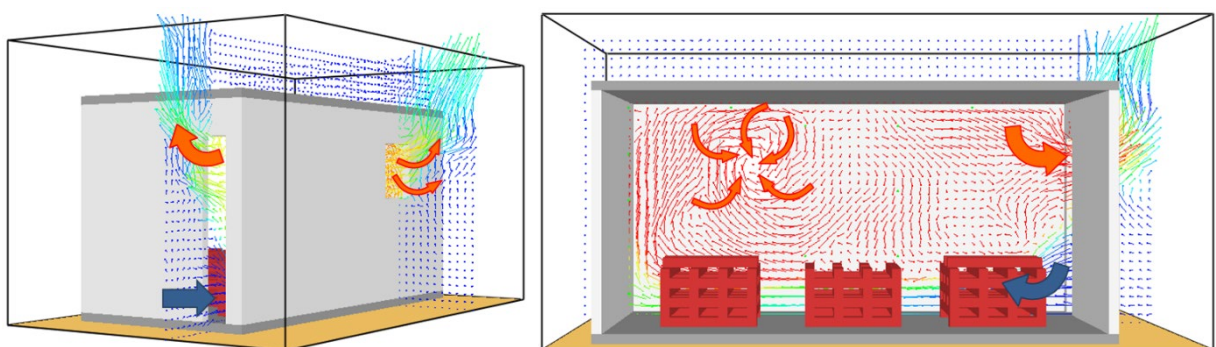
Figura 8: Evolução das temperaturas dos gases registradas através de um plano de medição e visualizado no SMV (Situação 2 - FDS)





Quando a camada de gases quentes atinge a altura da porta e da janela, é possível visualizá-los saindo do compartimento através dessas aberturas. Enquanto isso o incêndio é alimentado pelos gases frios que entram pela parte de baixo da abertura da porta. Esse fenômeno pode ser observado na Figura 9.

Figura 9: Convecção dos gases registrada através de planos de medição e visualizados no SMV (Situação 2 - FDS)



5. CONCLUSÕES

Neste artigo foi apresentado o desenvolvimento de um modelo computacional de simulação de incêndio no *software* FDS, cuja validação de temperaturas foi realizada com o estudo

experimental apresentado por Teixeira et al. (2012). Complementarmente, para comparação dos resultados de HRR, foi calculada analiticamente uma curva HRR x TEMPO por meio das indicações da norma NP EN 1991-1-2 (2010).

Alguns pontos considerados mais relevantes foram descritos de forma detalhada ao longo do manuscrito e a descrição completa do estudo é apresentada em Sá (2018).

Com base nos pressupostos observados na literatura dos trabalhos que utilizaram o FDS como ferramenta auxiliar, foram propostas duas situações para simulação: (i) Situação 1: em que todas as obstruções, com exceção do material combustível, foram consideradas inertes no modelo; (ii) Situação 2: em que todas as obstruções receberam suas respectivas propriedades térmicas. Com essas situações pôde-se constatar que:

- A Situação 1 teve um tempo de processamento de aproximadamente 33 horas, enquanto a Situação 2 esse tempo foi de 52 horas. Indicando que a consideração das propriedades térmicas dos materiais das paredes, teto e piso, dos cenários de incêndio simulados no FDS pode aumentar o tempo requerido para o processamento dos modelos;
- A HRR registrada nas simulações realizadas no FDS (Situação 1 e Situação 2) tiveram um comportamento semelhante a calculada por meio das indicações da norma NP EN 1991-1-2 (2010);
- A Situação 1 não foi capaz representar adequadamente o desenvolvimento das temperaturas dos gases no compartimento analisado. Mostrando que a não consideração das propriedades térmicas dos materiais das paredes, teto e piso, acarreta na obtenção de resultados de temperaturas incoerentes com a realidade;
- A Situação 2 foi capaz representar adequadamente o desenvolvimento das temperaturas no compartimento analisado. Mostrando que o conhecimento dos materiais envolvidos numa simulação computacional, bem como sua natureza (combustível ou incombustível) e,

propriedades térmicas e de combustão (ainda que de forma aproximada) é de suma importância para a obtenção de temperaturas de gases coerentes com a realidade;

- Apesar de algumas diferenças (principalmente na fase de arrefecimento), observou-se que o comportamento de desenvolvimento de temperaturas dos gases obtido através da simulação da Situação 2 foi coerente com constatado no ensaio experimental de Teixeira et al. (2012). Da fase de crescimento do incêndio até o seu máximo desenvolvimento observou-se resultados satisfatórios de temperaturas, mantendo-se sempre um pouco acima dos resultados experimentais;
- Apesar das situações propostas apresentarem um comportamento de propagação de chamas e fumaça semelhante, a Situação 2 foi a que representou de forma mais fidedigna o comportamento observado no ensaio experimental.

Ademais, percebeu-se que os maiores desafios enfrentados durante o desenvolvimento dos modelos computacionais no FDS são: a obtenção das propriedades térmicas e de combustão dos materiais a serem empregados, e a definição dos critérios a serem adotados nas simulações. Com a escassez dados precisos, para um modelo simples (como o apresentado nesse trabalho) alguns parâmetros podem ser ajustados através de testes de sensibilidade.

Por fim, diante de algumas dificuldades enfrentadas, aconselha-se que para o desenvolvimento de um modelo no FDS seja realizado um “plano de simulação”, semelhante ao “plano experimental” de ensaios experimentais. Assim, o usuário pode planejar melhor as etapas de desenvolvimento do modelo, evitando esquecimentos ou imprevistos indesejados.

REFERÊNCIAS

BYSTRÖM, A.; CHENG, X.; WICKSTRÖM, U.; VELJKOVIC, M. Full-scale experimental and numerical studies on compartment fire under low ambient temperature. **Building and Environment**, v.51, p. 255-262, 2012.

CHI, J. H. Using thermal analysis experiment and Fire Dynamics Simulator (FDS) to reconstruct an arson fire scene. **Journal of thermal analysis and calorimetry**, 113(2), p. 641-648, 2013.

CORRÊA, C.; BRAGA, G. C.; JUNIOR, J. B.; SILVA, J. J. R.; TABACZENSKI, R.; PIRES, T. A. Incêndio em compartimento de residência na Cidade do Recife: Um estudo experimental. **Revista ALCONPAT**, Mérida/Yucatán (México), v.7 n.3, p. 215-230, 2017.

CUNHA, L. J. B. F. **O desempenho da compartimentação horizontal seletiva na promoção da segurança contra incêndio em edificações**. Tese de Doutorado em Arquitetura e Urbanismo, Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRGN, Natal/RN, 237 p., 2016.

FIGUEROA, M. J. M.; MORAES, P. D. Comportamento da madeira a temperaturas elevadas. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, out./dez. v. 9, n. 4, p. 157-174, 2009.

HONMA, M.; OTAKE, T.; MIYAMOTO, H.; OKAMOTO, K.; WATANABE, N. **Simulation of fire development and spread in japanese-style rooms under different ventilation conditions**. In: 13th INTERFLAM, International Fire Science & Engineering Conference, Londres, Reino Unido, p. 1371-1382, 2013.

INTERNATIONAL STANDARD – **ISO 834-1:Fire-resistance tests - Elements of building construction. Part 1: General requirements**. Suíça, 1999.

LUTHER, W.; MÜLLER, W. C. FDS simulation of the fuel fireball from a hypothetical commercial airliner crash on a generic nuclear power plant. **Nuclear Engineering and Design**, 239(10), p. 2056-2069, 2009.

McGRATTAN, K.; HOSTIKKA, S.; McDERMOTT, R.; FLOYD, J.; WEINSCHENK, C.; OVERHOLT, K. **Fire Dynamics Simulator – User’s Guide**. NIST Special Publication 1019 Sixth Edition, Gaithersburg, Maryland, (EUA), 2017.

RODRIGUES, E. E. C. **Análise da eficiência do sistema de compartimentação vertical externa por afastamento entre janelas e por projeções horizontais segundo as exigências normativas brasileiras**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre/RS (Brasil), 178 p., 2009.

ROCHA, M. A. F. **Determinação experimental de propriedades de combustão de madeiras maciças brasileiras**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro/RJ, 147 p., 2014.

RUSCHEL, F. **Avaliação da utilização de ferramentas de simulação computacional para reconstituição de incêndios em edificações de concreto armado: aplicação ao caso Shopping Total em Porto Alegre - RS**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre/RS, 131 p., 2011.

SÁ, R. T. **Simulação numérica de incêndios em edificações**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Recife/PE, 179 p., 2018.

SEITO, A. I.; GILL, A. A.; PANNONI, F. D.; ONO, R.; SILVA, S. B.; DEL CARLO, U.; SILVA, V. P. **A segurança contra incêndio no Brasil**. São Paulo/SP (Brasil): Projeto Editora, 2008.

TABACZENSKI, R.; CORRÊA, C.; SANTOS, M. M. L.; PIRES, T. A. C.; SILVA, J. J. R. Aplicação do Software Fire Dynamics Simulator (FDS) no estudo da Segurança Contra Incêndios (SCI) no Brasil. **Revista FLAMMAE**, v.3, n.7, 2017.

TEIXEIRA, C. M.; RODRIGUES, J. P. C.; BARATA, P.; PIRES, T. A. C. **Experimental and Numerical Simulations of a natural Fire in a Compartment**. In: 15th ICEM15, International Conference on Experimental Mechanics, Porto (Portugal), 2012.

WEINSCHENK, C. G.; OVERHOLT, K. J.; MADRZYKOWSKI, D. **Simulation of an Attic Fire in a Wood Frame Residential Structure -Chicago, IL**. NIST – Technical Note 1838: National Institute of Standards and Technology (EUA), 39 p., 2014.

COMPUTATIONAL SIMULATION OF A NATURAL COMPARTMENTAL FIRE: VALIDATION WITH AN EXPERIMENTAL STUDY

ABSTRACT

The research presents the results of fire computational simulations validated with the experimental study of Teixeira et al. (2012). For that, a fire simulation software based on computational fluid dynamics was used, the Fire Dynamics Simulator (FDS), allied with indications of the norm NP EN 1991-1-2 (2010). The simulations carried out showed that the FDS, because it is a software that does not have graphical interface, ends up making the modeling laborious and time consuming, since its data entry is done entirely in text files. However, when properly calibrated, the model is able to offer the user various data such as: temperature, smoke displacement, oxygen concentration, consideration of fire-fighting devices (sprinklers), among others that may offer options of studies to be performed in the context of fire safety in buildings. In comparison with the experimental results, the model developed in the FDS was able to adequately represent the gas temperatures developed in the actual fire. Concluding that this simulator is an important tool, especially when calibrated through experimental results, in proposing solutions to the challenges of fire safety in buildings.

Palavras-chave: Fire Safety. Compartmentalized fire. Computer Simulation. Fire Dynamics Simulator (FDS).

CONCLUSIONS

In this paper we present the development of a computational model of fire simulation in FDS software, whose temperature validation was performed with the experimental study presented

by Teixeira et al. (2012). In addition, for comparison of the Heat Release Rate (HRR) results, an HRR x TIME curve was calculated analytically by means of the indications of the standard NP EN 1991-1-2 (2010).

Some points considered more relevant were described in detail throughout the manuscript and the complete description of the study is presented in Sá (2018).

Based on the assumptions observed in the literature of the works that used the FDS as an auxiliary tool, two situations were proposed for simulation: (i) Situation 1: in which all obstructions, with the exception of combustible material, were considered inert in the model; (ii) Situation 2: in which all the obstructions received their respective thermal properties. With these situations it could be verified that:

- Situation 1 had a processing time of approximately 33 hours, while Situation 2 this time was 52 hours. Indicating that the consideration of the thermal properties of wall, ceiling and floor materials of the simulated fire scenarios in the FDS may increase the time required for the processing of the models;
- The HRR recorded in the simulations carried out in the FDS (Situation 1 and Situation 2) had a behavior similar to that calculated by the indications of the norm NP EN 1991-1-2 (2010);
- Situation 1 was not able to adequately represent the development of the gas temperatures in the analyzed compartment. The lack of consideration of the thermal properties of the materials of the walls, roof and floor, results in the results of temperatures incoherent with reality;
- Situation 2 was able to adequately represent the development of temperatures in the compartment analyzed. The results show that the knowledge of the materials involved in a computational simulation, as well as their nature (fuel or incombustible), and thermal and

combustion properties (although approximate) is of paramount importance in obtaining gas temperatures consistent with reality;

- Despite some differences (mainly in the cooling phase), it was observed that the gas temperature development behavior obtained through the Situation 2 simulation was consistent with the experimental Teixeira et al. (2012). From the growth phase of the fire to its maximum development satisfactory temperatures were observed, always remaining a little above the experimental results;
- In spite of the proposed situations presenting similar flame and smoke propagation behavior, Situation 2 was the one that represented more accurately the behavior observed in the experimental test.

Moreover, it was noticed that the major challenges faced during the development of the computational models in the FDS are: the obtaining of the thermal and combustion properties of the materials to be used, and the definition of the criteria to be adopted in the simulations. With the lack of accurate data, for a simple model (as presented in this paper) some parameters can be adjusted through sensitivity tests.

Finally, due of some difficulties encountered, it is advised that for the development of a model in the FDS a "simulation plan", similar to the "experimental plan" of experimental tests. This way, the user can better plan the stages of development of the model, avoiding unforeseen forgetfulness or unforeseen.