



SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO CONTROLE DE FUMAÇA EM GALPÕES SUBMETIDOS À TEMPERATURA ELEVADA

José Edier Paz Hurtado

Francisco Carlos Rodrigues

Rodrigo Barreto Caldas

Tiago Tadeu Fonseca do Carmo

Pedro Enrique Batista Borges Louro

jpaz_hurtado@hotmail.com

Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia, UFMG.

Av. Antônio Carlos, 6627. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. CEP: 31270-901.

Resumo. O presente trabalho apresenta uma série de quatro simulações numéricas de um incêndio em um galpão tendo como objetivo principal o estudo do sistema de controle de fumaça e a comparação das temperaturas obtidas em cada simulação. A primeira simulação foi realizada sem controle de fumaça; a segunda simulação com controle de fumaça natural; a terceira simulação com controle de fumaça mecânico e a última apenas com sprinkler. Por se tratar de testes preliminares, o valor da carga de incêndio não coincide com o uso e ocupação da edificação segundo os critérios da norma ABNT NBR 14432:2001 e foi de 1728 MJ, representada por um bloco de poliuretano com volume de 1,44 m³. Para as simulações numéricas foi utilizado o programa Fire Dynamics Simulator (NIST), versão 6.1.2. Como resultado deste trabalho se evidenciou, que a introdução de maior volume de ar ao compartimento acelera o processo de combustão e, consequentemente a carga de incêndio é queimada em menor tempo. De igual maneira, as aberturas para exaustão de fumaça e calor reduzem a temperatura e a concentração de gases perigosos, além de oferecer proteção, mesmo que os sprinklers não funcionem.

Palavras chaves: Incêndio, Fumaça, Temperatura, Compartimento, Controle.

INTRODUÇÃO

A engenharia de segurança contra incêndio de edificações abrange muitos tópicos, e um deles é o controle de fumaça. Este tem sido aplicado há anos em alguns países da Europa. No Brasil, devido a desastres como o incêndio na Boate Kiss, a implantação e fiscalização com maior rigor do emprego do sistema de controle de fumaça é bem recente. Atualmente não existe uma norma técnica brasileira que estabeleça os parâmetros para a implantação do controle de fumaça nas edificações em geral. No entanto, existe a Instrução Técnica (IT) No. 15 /2011 - Controle de Fumaça - do Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo (CBPMSP), sendo esta a única referência nacional neste tema. Em Minas Gerais, por sua vez, está sendo analisada para aprovação a IT No. 39 do Corpo de Bombeiros Militar de Minas Gerais (CBMMG). Nos Estados Unidos e na Inglaterra, a extração de fumaça dedicada ao controle do incêndio tornou-se popular em edifícios industriais devido a alguns grandes incêndios. Como exemplos: o incêndio da fábrica da *General Motors* em Michigan, EUA, ocorrido em 12 de agosto de 1953; os incêndios na planta da *Jaguar* em Coventry, Reino Unido, em 1957 e na *Vauxhall Motors* em Luton, Reino Unido, em 1963; nesta última já tinha sido implementado um protótipo de sistema mecânico de extração de fumaça. O controle de fumaça tem os seus princípios visados à manutenção de um ambiente seguro nas edificações durante o tempo necessário para a saída do local sinistrado, visando à salvaguarda das pessoas, evitando os perigos da intoxicação e permitindo a visibilidade das rotas de fuga.

O objetivo geral deste trabalho é o estudo do comportamento do incêndio com base nos resultados obtidos por meio de simulações numéricas utilizando o software *Fire Dynamics Simulator* (FDS), com a utilização do sistema de controle de fumaça natural e mecânico, como meio para reduzir as temperaturas nos compartimentos referidos na IT No. 15/2011 do CBPMSP. Com os resultados numéricos obtidos até o momento, verifica-se a possibilidade de, através de um estudo paramétrico, determinar um fator de ponderação das medidas de segurança contra incêndio para o cálculo do Tempo Equivalente preconizado na norma brasileira ABNT NBR 14432:2001, e nas Instruções Técnicas (ITs) dos Corpos de Bombeiros de São de Paulo e de Minas Gerais e, futuramente, em todo o País.

1 METODOLOGIA

1.1 Geração do Cenário

Para o presente trabalho foram feitas quatro simulações numéricas de um galpão com dimensões de 25 m de comprimento, 10 m de largura e 6 m de altura. A primeira simulação foi realizada sem controle de fumaça; a segunda simulação com controle de fumaça natural; a terceira simulação com controle de fumaça mecânico e a última apenas com *sprinkler*. Para a geração da geometria do cenário de incêndio no FDS, versão 6.1.2 (*Fire Dynamics Simulator* - NIST, 2014) é necessário criar uma malha tridimensional onde será construído o cenário. A definição do cenário é feita em um sistema de coordenadas tridimensional. Para a geração da malha foram adotadas as medidas de 20 cm x 20 cm, normalmente consideradas em outras pesquisas utilizando o FDS. Sabe-se que quanto menor a malha, maior é o refinamento dos dados, mas isto pode se traduzir em desprendimento desnecessário de tempo na simulação. A unidade de medida geométrica do programa é o metro.

Para o ensaio sem controle de fumaça, foi construída uma malha ou caixa geométrica de 25 m de comprimento no eixo X, 12 m de largura no eixo Y - deixando um espaço de 2 m para a circulação de ar e fumaça - e 6 m de altura no eixo Z. Para os outros ensaios a malha

foi alterada, tendo 25 m de comprimento no eixo X, 14 m de largura no eixo Y e 9 m de altura no eixo Z, deixando livre 2 m em cada face do eixo Y e 3 m no eixo Z, com o objetivo de obter visibilidade do comportamento da fumaça e da circulação do ar.

A Figura 1 apresenta as imagens da geometria dos cenários nos eixos X, Y e Z.

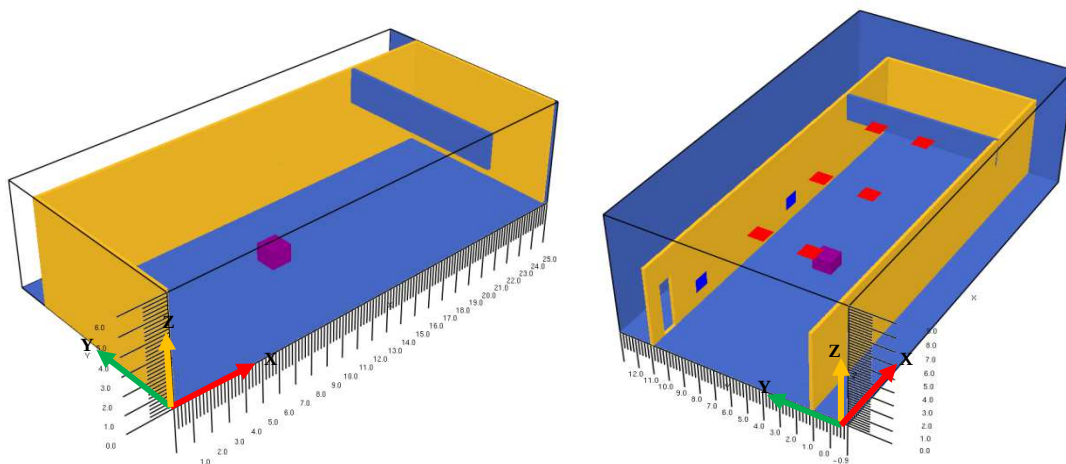


Figura 1. Cenários do galpão

Como carga de incêndio utilizou-se um bloco de poliuretano de 1,44 m³, com densidade de 40 kg/m³, com poder calorífico de 30 MJ/kg, resultando em uma carga de incêndio de 1728 MJ. A área do queimador foi de 0,64 m², com uma taxa de liberação de calor por unidade de área (HRRPUA) de 1800 kW/m² que correspondem a um queimador de 1152 kW. Foram colocados termopares em alturas de 2,00 m, 4,00 m e 5,80 m, para a coleta de dados de temperatura. Esses sensores foram denominados de termopar 3, termopar 2 e termopar 1, respectivamente. O tempo de simulação foi de 2000 segundos para cada ensaio. Foi inserido um painel de acantonamento de fumaça ao longo do eixo Y, com uma altura 2,00 m com o objetivo de observar a retenção da fumaça no compartimento.

As simulações numéricas foram desenvolvidas no programa computacional *Fire Dynamics Simulator*, versão 6.1.2 (FDS – NIST), desenvolvido pelo *National Institute of Standards and Technology* (NIST, 2014) para análise computacional de dinâmica de fluidos (CFD).

2 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

2.1 Simulação sem Controle de Fumaça

Este ensaio foi projetado para simular um incêndio em situação normal, sem elementos de proteção ativa e passiva para o controle do fogo. As dimensões do galpão são aquelas citadas no item 2.1. Foi adicionada uma abertura que representa uma porta aberta com dimensões de 1,00 m de largura por 4,00 m de altura, para poder introduzir ar e alimentar a reação de combustão da carga de incêndio. As paredes do compartimento e o painel de acantonamento de fumaça foram desenhados com material incombustível, para não interferir como carga de incêndio na simulação. A carga de incêndio foi colocada no meio do galpão; nesta posição foram alojados os termopares a uma altura de 2,00 m; 4,00 m e 5,80 m. (ver Figura 2).

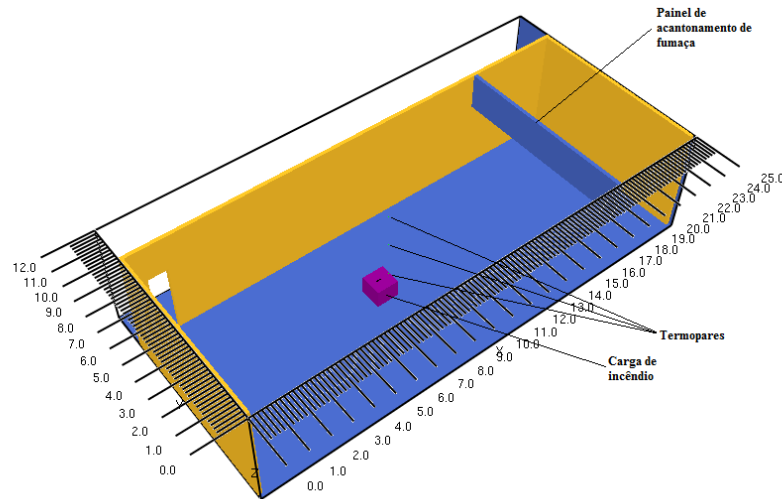


Figura 2. Vista do cenário do galpão

Nesse ensaio as temperaturas atingiram um pico máximo de 983°C no termopar localizado a uma altura de 2,00 m, 672°C no termopar localizado a 4,00 m de altura e 512°C no termopar localizado a 5,80 m. Devido aos picos de temperaturas apresentados, se optou por determinar um valor das temperaturas médias nesses termopares, com intervalos de 30 segundos, chegando à temperaturas de 759°C , 513°C e 437°C , nos termopares localizados a 2,00 m, 4,00 m e 5,80 m respectivamente, como mostrado na figura 3. O fogo extinguiu-se totalmente no tempo de 1846 segundos, consumindo aproximadamente 90% da carga de incêndio. Observou-se que o painel de acantonamento de fumaça não teve um bom desempenho e a fumaça ficou contida no compartimento até os 80 segundos. No tempo de 916 segundos o compartimento foi completamente tomado pela fumaça (ver Figura 4).

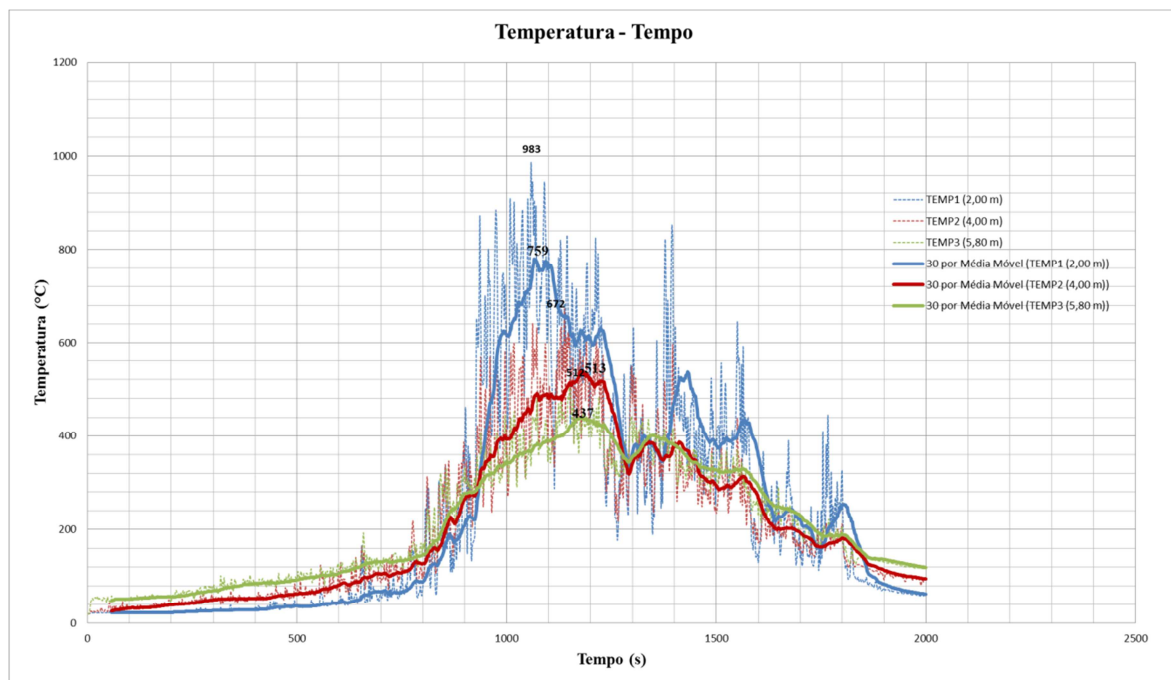


Figura 3. Gráfico de temperaturas vs tempo



Figura 4. Comportamento da fumaça na simulação sem controle de fumaça

2.2 Simulação com Controle de Fumaça Natural

Para a presente simulação numérica foram projetadas aberturas de entrada e saída de ar de forma natural. Para realizar o cálculo para definir as áreas de aberturas foi utilizada a Instrução Técnica (IT) No. 15/2011- Controle de fumaça, Parte 3 – Controle de fumaça natural em indústrias, depósitos e áreas de armazenamento em comércios - do Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo (CBPMSP). Foram obtidos as áreas de $1,65 \text{ m}^2$ para a entrada de ar e também para a exaustão de ar. Estas áreas foram divididas em duas aberturas de $1,00 \text{ m}^2$ para cada função, como mostrado na figura 5. A cobertura do galpão foi projetada transparente para poder ter visibilidade dentro do compartimento, motivo pelo qual as aberturas de exaustão não são visíveis na simulação.

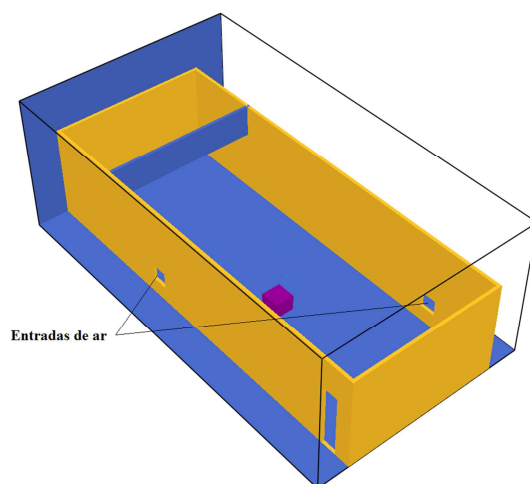


Figura 5. Cenário da simulação com controle de fumaça natural

O volume máximo de entrada de ar limpo foi de $2,00 \text{ m}^3/\text{s}$, já o volume de exaustão de fumaça no início foi de aproximadamente $1,50 \text{ m}^3/\text{s}$. No tempo da combustão generalizada este volume passou a ser de $3,50 \text{ m}^3/\text{s}$ e no decaimento das temperaturas até o final do tempo

de simulação este volume foi de 1,50 m³/s. Como ocorrido na simulação anterior, o fogo extinguiu-se aos 1610 segundos consumindo 90% da carga de incêndio. A máxima temperatura registrada no termopar à altura de 2,00 m foi de 848°C, apresentando uma diminuição com referência à simulação anterior de 135°C. No termopar localizado a 4,00 m do piso a máxima temperatura foi de 421°C e o termopar a 5,80 m registrou uma temperatura de 399°C. Nesta simulação as temperaturas médias obtidas com intervalo de 30 segundos foram de 261°C, 218°C e 282°C, nos termopares localizados a 2,00 m, 4,00 m e 5,80 m de altura com referência ao piso.

A simulação numérica com controle de fumaça natural apresentou decréscimos nos picos de temperaturas máximas nos termopares localizados nas alturas de 2,00 m, 4,00 m e 5,80 m com referência à simulação sem controle de fumaça. No caso do comportamento da fumaça nesta simulação, o compartimento ficou tomado nos tempos de 1286 segundos até 1618 segundos. Na sequência, o controle de fumaça natural continuou trabalhando e extraindo a fumaça para o exterior, o que permitiu novamente ter visibilidade dentro do galpão. O painel de acantonamento de fumaça teve um desempenho similar ao ensaio anterior, contendo a propagação da fumaça por mais 14 segundos.

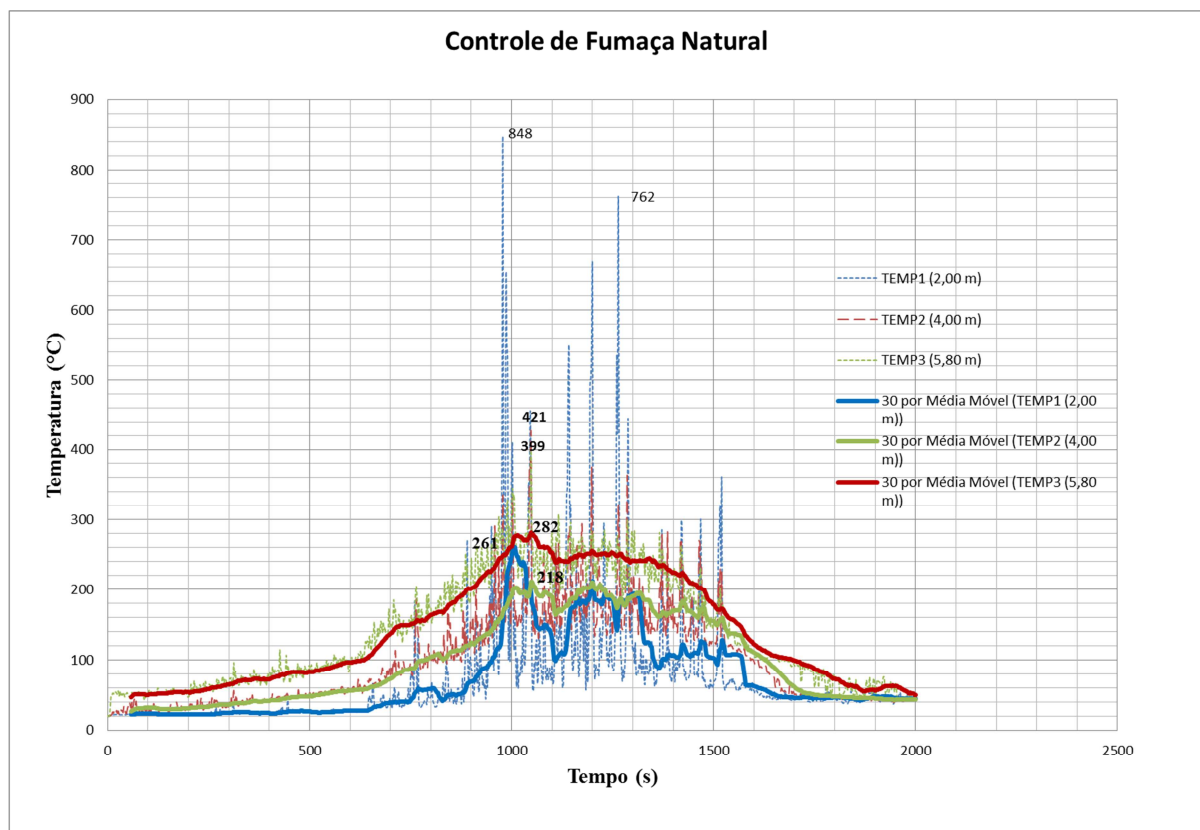


Figura 6. Gráfico temperatura vs tempo com controle de fumaça natural

2.3 Simulação Numérica com Controle de Fumaça Mecânico

Nesta simulação numérica foi realizado o cálculo para definir as aberturas de entrada de ar limpo e a área de exaustão de fumaça, de acordo com a IT 15/2011- Controle de fumaça, Parte 5 – Controle de fumaça mecânico em edificações horizontais, áreas isoladas em um pavimento ou edificações que possuam seus pavimentos isolados - do CBPMSP. Foi obtido como resultado uma vazão de entrada de ar de 15,09 m³/s, dividida em 4 entradas de 1,00 m²,

com uma vazão de 4,00 m³/s, totalizando 16,00 m³/s. A vazão de exaustão de ar foi de 25,16 m³/s, dividida em 6 saídas de 1,00 m², com uma vazão de 4,3 m³/s, para um total de 25,00 m³/s (ver figura 7).

As saídas de fumaça foram ativadas aos 300 segundos quando o termopar no teto (5,80 m) atingiu temperaturas entre 70°C e 92°C. As entradas de ar foram abertas aos 350 segundos quando as temperaturas oscilavam entre 50°C e 70°C.

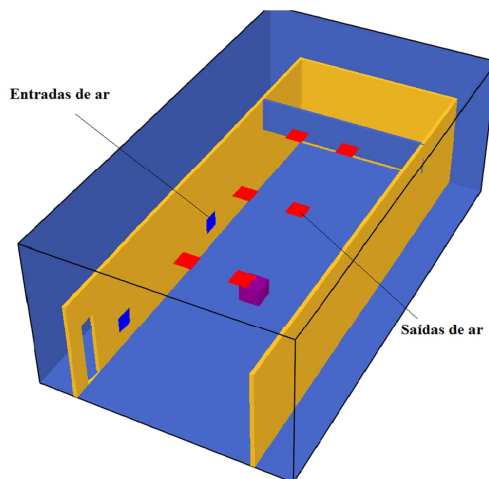


Figura 7. Cenário da simulação numérica com controle de fumaça mecânico

Nesta simulação numérica o fogo extinguiu-se completamente aos 1526 segundos. O funcionamento do painel de acantonamento de fumaça foi similar ao das simulações anteriores. A camada de fumaça foi descendo no compartimento e no tempo de ativação dos exaustores a fumaça lotou completamente o compartimento até o momento da ativação da entrada de ar limpo; quando foi ativada a insuflação de ar a camada de fumaça começou a subir permitindo ter visibilidade na zona inferior do compartimento, até extrair por completo a fumaça como mostrado na figura 8. Os picos de temperaturas máximas atingidas nos termopares localizados nas alturas de 2,00 m, 4,00 m e 5,80 m foram de 765°C, 307°C e 242°C respectivamente, já as temperaturas médias foram de 363°C, 139°C e 180°C, nas respectivas alturas antes mencionadas (ver figura 9).

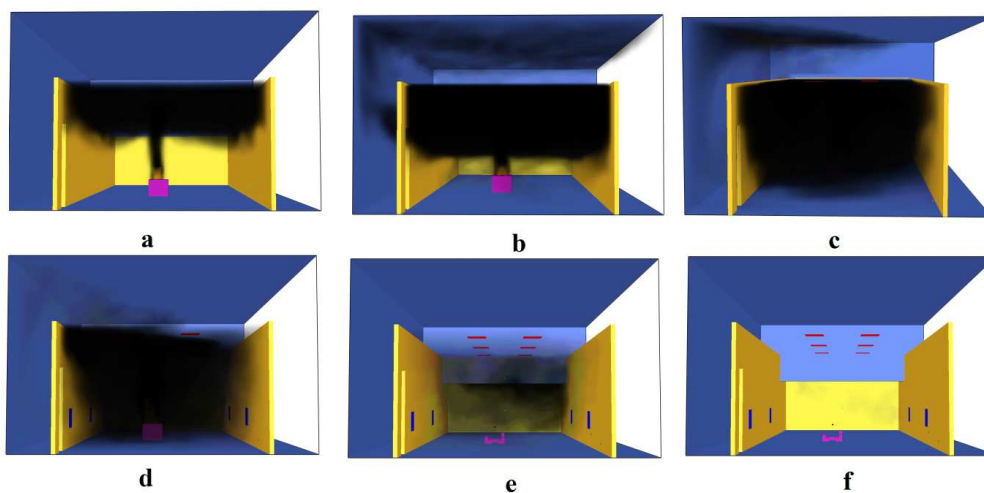


Figura 8. Imagens da simulação numérica com controle de fumaça mecânico

- | | | |
|-----------------|------------------|------------------|
| a. 60 segundos | b. 298 segundos | c. 332 segundos |
| d. 418 segundos | e. 1582 segundos | f. 1968 segundos |

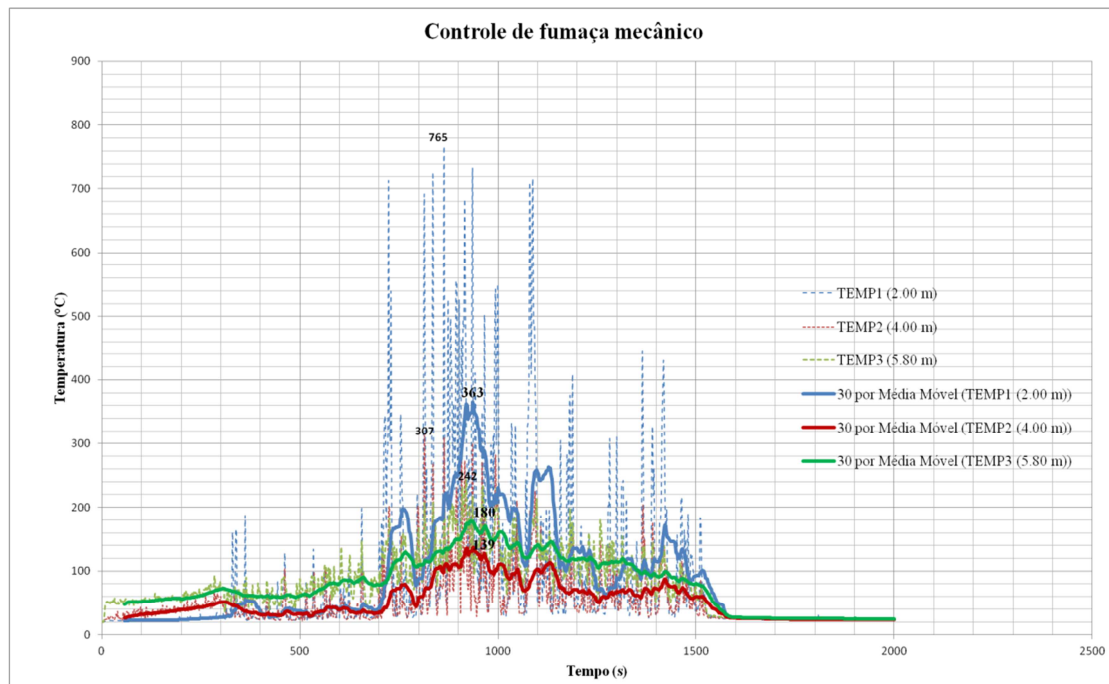


Figura 9. Gráfico temperatura vs tempo com controle de fumaça mecânico

2.4 Simulação Numérica com Sprinkler

A presente simulação numérica tem a mesma configuração geométrica do que a simulação do item 3.1. A área do queimador foi de $0,64 \text{ m}^2$ com uma taxa de liberação de calor por unidade de área de 1800 kW/m^2 que corresponde a um queimador de 1152 kW . Nesta simulação foi instalado um *sprinkler* tipo *pendent* a $5,80 \text{ m}$ de altura, sendo que a temperatura de ativação do *sprinkler* foi de 68°C , a angulação do *spray* foi de 30 e 80 graus, com vazão de 15 litros/min e diâmetro do orifício de $0,011 \text{ mm}$.

O *sprinkler* foi ativado aos 506 segundos da simulação numérica. Nesta simulação a fumaça desceu lentamente deixando um espaço de $1,80 \text{ m}$ até o nível do piso. Quando foi ativado o *sprinkler* o colchão de fumaça começou a descer lotando por completo o compartimento aos 1262 segundos e permanecendo assim até o final da simulação. A ativação do *sprinkler* permitiu que o fogo se apagasse aos 1800 segundos, consumindo 75% da carga combustível (vide Figura 10).

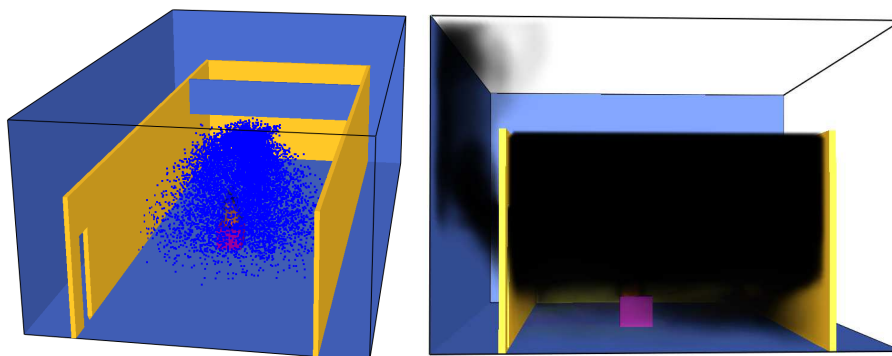


Figura 10. Ativação do sprinkler e comportamento da fumaça

Os picos de máximas temperaturas obtidas nesta simulação foram para o termopar 1 de 988°C, o termopar 2 de 696°C e o termopar 3 de 477°C localizados às alturas de 2,00 m, 4,00 m e 5,80 m respectivamente. As temperaturas médias obtidas foram de 718°C, 516°C e 387°C. No gráfico da figura 11 podemos observar as curvas de temperatura da presente simulação. Se comparado com o gráfico de temperaturas da simulação do item 3.1 – sem controle de fumaça-, nota-se uma diferença mínima nos picos de temperaturas em cada termopar, sendo a diferença mínima de 5°C e a máxima de 35°C, como mostrado na tabela 1.

Na Tabela 2, mostra-se a comparação das temperaturas médias obtidas com intervalos de 30 segundos em cada termopar.

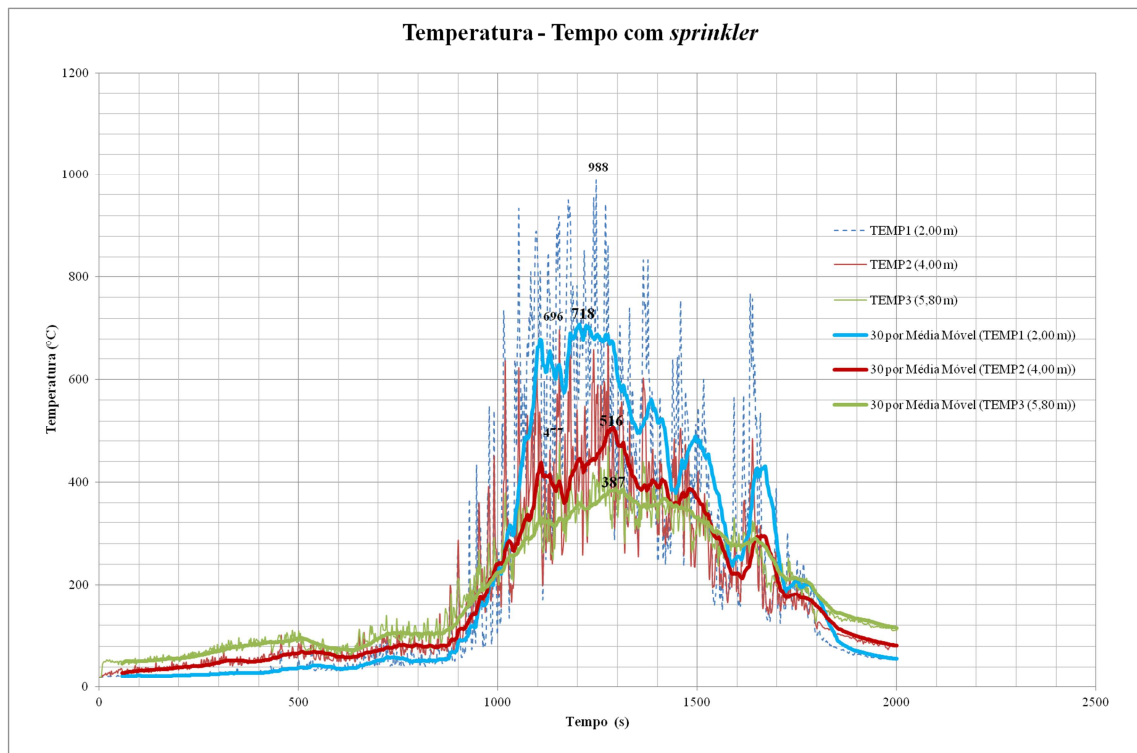


Figura 11. Gráfico temperatura vs tempo simulação com sprinkler

3 ANÁLISE DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES

As quatro simulações numéricas foram realizadas com uma mesma carga de incêndio equivalente a 1728 MJ e um queimador com área de 0,64 m² com potência de 1152 kW. Nestes ensaios a carga de incêndio foi consumida em diferentes tempos e porcentagens. Nas três simulações, contando da primeira, a carga foi consumida em 90%, já na última simulação a carga consumida foi de 75%. O maior tempo de queima foi de 1846 segundos na simulação sem controle de fumaça e o menor tempo foi de 1526 segundos, na simulação com controle de fumaça mecânico. O tempo de consumo da carga de incêndio na simulação com controle de fumaça natural foi de 1610 segundos e na simulação com sprinkler foi de 1800 segundos.

Baseando-se nos resultados anteriores dos tempos e porcentagens de consumo da carga de incêndio, podemos afirmar que a introdução de maior volume de ar ao compartimento, acelera o processo de combustão e conseqüentemente a carga de incêndio é queimada em menor tempo, como foi apresentado na simulação numérica com controle de fumaça mecânico.

Nas quatro simulações numéricas, os picos das temperaturas apresentaram em cada situação comportamento diferente, obtendo como temperatura máxima 988°C no termopar localizado a 2,00 m do piso na simulação com *sprinkler* e temperatura mínima de 765°C nesta mesma altura na simulação com controle de fumaça mecânico, apresentando-se uma diferença de 218°C devido à insuflação e extração de ar no compartimento. Na Tabela 1, se apresenta um resumo comparativo das temperaturas em cada simulação.

Tabela 1. Comparativo de temperaturas (°C)

Termopar	Sem CF	CF - CFN	CFN	CFN - CFM	CFM	CF - CFM	SPK	Sem CF - SPK
Termp1 (2,00 m)	983	135	848	83	765	218	988	5
Termp2 (4,00 m)	672	251	421	114	307	365	696	24
Termp3 (5,80 m)	512	113	399	157	242	270	477	35

Sem CF= Sem Controle de Fumaça CFN= Controle de Fumaça Natural
 CFM= Controle de Fumaça Mecânico SPK= *Sprinkler*

Na Tabela 2 se apresenta um resumo comparativo das temperaturas médias das simulações numéricas com intervalos de 30 segundos.

Tabela 2. Comparativo de temperaturas médias (°C)

Termopar	Sem CF	CF - CFN	CFN	CFN - CFM	CFM	CF - CFM	SPK	Sem CF - SPK
Termp1 (2,00 m)	759	498	261	102	363	396	718	41
Termp2 (4,00 m)	513	295	218	79	139	374	516	3
Termp3 (5,80 m)	437	155	282	102	180	257	387	50

Sem CF= Sem Controle de Fumaça CFN= Controle de Fumaça Natural
 CFM= Controle de Fumaça Mecânico SPK= *Sprinkler*

Na tabela 1 observa-se que entre a simulação com controle de fumaça natural (CFN) e a simulação com controle de fumaça mecânico (CFM), a diferença das temperaturas foi de 83°C, 114°C e 157°C. Este mesmo comportamento é observado na tabela 2, onde as diferenças das temperaturas médias entre o CFN e o CFM são de 102°C, 79°C e 102°C. Baseados neste estudo pode-se assumir que o controle de fumaça mecânico oferece melhores resultados para controlar as temperaturas em um compartimento. Em referência ao comportamento da fumaça, o controle de fumaça mecânico também teve um melhor desempenho, já que extraiu a fumaça em menor tempo permitindo melhor visibilidade no compartimento. É conhecido que a instalação de um sistema de controle de fumaça mecânico resulta em um elevado custo da construção em relação ao sistema natural, porém, se

comparado o controle de fumaça natural com a simulação sem controle de fumaça e com a simulação com *sprinkler*, o sistema de controle de fumaça natural oferece um melhor desempenho.

De acordo com Beyler & Cooper (2001) as aberturas de fumaça e calor reduzem a temperatura e a concentração de gases perigosos, além de oferecer proteção, mesmo que os *sprinklers* não funcionem.

4 AGRADECIMENTOS

À FAPEMIG, à CAPES, ao CNPq e à o departamento de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da UFMG que tornaram possível a elaboração e a apresentação deste trabalho.

5 REFERÊNCIAS

Associação Brasileira De Normas Técnicas – ABNT. NBR: 14432 - 2001. Exigências de Resistência ao Fogo de Elementos Construtivos de Edificações. Rio de Janeiro.

Beyler, C.L. & Cooper, L.Y. 2001. Interaction of Sprinklers with Smoke and Heat Vent. *Fire Technology*, 37. Pp 9-35.

Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo. CBPMSP IT- 15/ 2011. Controle de Fumaça. São Paulo.

Corpo de Bombeiros Militar de Minas Gerais. CBMMG IT-09. -. Carga de Incêndio nas Edificações e Área de Risco. Belo Horizonte. 2006

National Institute Of Standards And Technology. NIST. 2014. Fire Dynamics Simulator, Version 6.1.2. *User's Guide, Special Publication 1019*, Sexta Edição. < <http://code.google.com/p/fds-smv/>> Quincy, Massachuset.