

Simulação numérica e experimento de incêndio em dormitório residencial

R. Tabaczinski¹ , C. Corrêa^{1*} , T. Ancelmo Pires¹ , J.J. Rêgo Silva¹ 

* Autor de Contato: cristianocorreacbmpe@gmail.com

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i1.315>

Recepção: 29/05/2018 | Aceitação: 06/11/2018 | Publicação: 30/12/2018

RESUMO

Este artigo apresenta a simulação computacional de um incêndio realizado experimentalmente em um cômodo que reproduziu um dormitório de residência unifamiliar tipicamente incendiada na cidade de Recife (Pernambuco – Brasil). O ensaio experimental deste incêndio é apresentado por Corrêa et al. (2017), e o estudo discutido neste artigo tem por objetivo comparar os resultados de desenvolvimento de temperaturas dos gases obtidos através da simulação computacional com o software Fire Dynamics Simulator (FDS) com as aferições obtidas experimentalmente. Verificou-se que os resultados de temperaturas obtidos através do modelo desenvolvido no FDS foram coerentes com os obtidos experimentalmente. Aspira-se que este estudo auxilie e incentive o uso desta ferramenta em estudos de Segurança Contra Incêndio em Edificações (SCIE).

Palavras-chave: segurança contra incêndios em edificações (scie); incêndios em cômodos; incêndios em residências; simulação computacional de incêndios; fire dynamics simulator.

Citar como: R. Tabaczinski, C. Corrêa, T. Ancelmo Pires, J. J. Rêgo Silva (2019), "*Simulação numérica e experimento de incêndio em dormitório residencial*", Revista ALCONPAT, 9(1), pp. 15-30, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i1.315>

¹ Universidade Federal de Pernambuco, Brasil.

Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de direitos de uso exclusivo, No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antiga estrada para Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

É totalmente proibida a reprodução total ou parcial dos conteúdos e imagens da publicação sem autorização prévia do ALCONPAT International A.C.

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no terceiro número do ano 2019, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do segundo número do ano de 2019.

Numerical simulation and fire experiment in residential dormitory

ABSTRACT

This article presents a computer-made simulation of a fire that had already been done by experiment in a room that reproduced a bedroom of a one-family residence, typically burned in the city of Recife (Pernambuco - Brazil). The experimental test of this fire has been presented by Corrêa *et al.* (2017), and the study presented in this article has as objective to compare the results on the development of the temperature of gases, got from the computer-made simulation with the *software Fire Dynamics Simulator* (FDS) with the values got by the experiment. We have found out that the temperature obtained through the model developed by the FDS were coherent with the ones obtained by experiment. We hope this study shall help and encourage this tool's use in studies about Buildings' Fire Prevention (BFP) in rooms and fire in residences.

Keywords: buildings' fire prevention (bfp); fire in rooms; fire in residences; computer-made fire simulation; *fire dynamics simulator*.

Simulación numérica y experimento de incendio en dormitorio residencial

RESUMEN

Este artículo presenta la simulación computacional de un incendio previamente realizado como un experimento en una habitación que reproducía un cuarto de residencia unifamiliar típicamente incendiada en la ciudad de Recife (Pernambuco - Brasil). El ensayo experimental de este incendio es presentado por Corrêa *et al.* (2017), y el estudio discutido en este artículo tiene por objetivo comparar los resultados del desarrollo de las temperaturas de los gases obtenidos a través de la simulación computacional con el *software Fire Dynamics Simulator* (FDS) con las medidas obtenidas en el experimento. Se ha verificado que los resultados obtenidos a través del modelo desarrollado en el FDS han sido coherentes con los obtenidos experimentalmente. Se aspira a que este estudio auxilie e incentive el uso de esta herramienta en estudios de Seguridad Contra Incendios en Edificaciones (SCIE), en habitaciones e incendios en residencias.

Palabras-clave: seguridad contra incendios en edificaciones (scie); incendios en habitaciones; incendios en residencias; simulación computacional de incendios; *fire dynamics simulator*.

1. INTRODUÇÃO

Incêndios são eventos trágicos que ocorrem com frequência no Brasil e no mundo, possuindo um grande potencial destrutivo de patrimônio e de vidas. Segundo o estudo realizado por Corrêa *et al.* (2015) sobre a ocorrência de incêndios na cidade de Recife (Pernambuco – Brasil) nos anos de 2011-2013, cerca de 33% das ocorrências desses eventos foram em edificações. Desta porcentagem, cerca de 40% corresponde a edificações residenciais, sendo que, a grande maioria destes eventos, aproximadamente 75%, ocorrem em residências unifamiliares. Segundo os autores, esse fato é preocupante, visto que, no Brasil este tipo de edificação não possui orientações normativas preventivas sobre Segurança Contra Incêndios (SCI), mostrando a necessidade de investimento em pesquisas nesta área de conhecimento.

Estudos do comportamento e desenvolvimento de incêndios em edificações são de suma importância para auxiliar investigadores e pesquisadores na compreensão deste fenômeno. Com esses estudos é possível, dentre outros, estimar temperaturas e prever a movimentação de fumaça em edificações incendiadas antes mesmo da ocorrência do sinistro, auxiliando no desenvolvimento de estratégias que visam a proteção à vida de seus ocupantes e ao patrimônio.

A simulação computacional é uma ferramenta que apresenta grandes potencialidades no auxílio de estudos voltados para a Segurança Contra Incêndios em Edificações (SCIE), proporcionado ao

pesquisador uma melhor compreensão do comportamento deste fenômeno. Atualmente, o uso desta ferramenta é uma prática comum entre os pesquisadores desta área pelo mundo. Entretanto, no Brasil, a utilização de *softwares* para este fim ainda é pouco difundida, fato que acarreta em uma escassa disponibilidade de literatura para auxiliar na compreensão e utilização dos mesmos (TABACZENSKI, *et al.*, 2017a)

Em suma, os *softwares* de simulação de incêndios podem ser baseados no modelo de zonas, como os *softwares* OZone, desenvolvido pela *University of Liège*, e o *Consolidated Model of Fire and Smoke Transport* (CFAST), desenvolvido pelo *National Institute of Standards and Technology* dos Estados Unidos da América (NIST/EUA), ou, baseados no modelo de fluidodinâmica computacional (em inglês *Computational Fluid Dynamics*, CFD), como os *softwares* *Fire Dynamics Simulator* (FDS), também desenvolvido pelo NIST, e o *SMARTFIRE*, desenvolvido pela *University of Greenwich*.

Dos *softwares* de simulação de incêndios, o FDS é o mais utilizado em pesquisas técnico-científicas, e conseqüentemente o mais rico em literatura disponível. Desde o início da sua divulgação, no ano de 2000, este vem sendo amplamente utilizado em estudos de SCIE no mundo. No Brasil, as primeiras publicações de pesquisas realizadas com o auxílio deste *software* datam o ano de 2008 e, aos poucos este tem ganhado espaço no meio técnico-científico como ferramenta para auxiliar estudos voltados tanto para diagnóstico, como para prognósticos de edificações em situação de incêndio.

Devido ao conhecimento insuficiente das propriedades dos materiais (principalmente dos materiais combustíveis), e de modelos completos de pirólise e comportamento de combustão destes materiais, ainda há uma necessidade de melhorias nas técnicas de simulação neste *software*. Sendo assim, os ensaios experimentais de incêndio em escala completa são de suma importância para aprimorar os conhecimentos acerca do comportamento deste fenômeno, possibilitando a comparação de medições aferidas com os resultados numéricos, afim de melhorar a precisão dos modelos desenvolvidos (BYSTRÖM *et al.*, 2012).

A fim de demonstrar algumas das potencialidades da utilização do FDS no auxílio de estudos de SCIE, este trabalho tem por objetivo desenvolver um modelo computacional que seja capaz de reproduzir o desenvolvimento de temperaturas nos primeiros minutos de um incêndio realizado experimentalmente por Corrêa *et al.* (2017), em um cômodo que representou um dormitório pertencente a residências unifamiliares tipicamente incendiadas na cidade de Recife.

1.1 Revisão Bibliográfica

No panorama mundial, diversos estudos de SCIE vêm utilizando ensaios experimentais para calibrar os modelos de simulação computacional de incêndios desenvolvidos no FDS (McGRATTAN *et al.*, 2013; WANG *et al.*, 2016; YU LONG-XING *et al.*, 2018). Byström *et al.* (2012), realizaram um ensaio experimental de incêndio com peças de madeira sob baixa temperatura ambiente, em um edifício de concreto de dois andares e, posteriormente desenvolveu um modelo computacional deste experimento no FDS. Os resultados experimentais do desenvolvimento de temperaturas foram comparados com os resultados das simulações numéricas, mostrando que o modelo desenvolvido apresentou resultados coerentes com os obtidos experimentalmente.

Yuen *et al.* (2014), conduziram alguns ensaios experimentais de incêndio em um dormitório totalmente mobiliado e posteriormente desenvolveu um modelo computacional deste cenário no FDS. A análise dos resultados mostrou que o modelo computacional foi capaz de proporcionar previsões de temperatura, fluxo de calor, e propagação do incêndio e fumaça coerentes com os obtidos experimentalmente.

Entre os estudos desenvolvidos no Brasil, percebe-se uma predominância de análises prognósticas e há uma carência de estudos experimentais que possam auxiliar na validação dos modelos computacionais desenvolvidos. Apesar disso, alguns estudos têm utilizado ensaios experimentais

encontrados na literatura para calibrar os modelos desenvolvidos no FDS. (TABACZENSKI *et al.*, 2017a)

Centeno *et al.* (2015) desenvolveram um modelo computacional de um incêndio de poça (em inglês *pool fire*) confinado em um ambiente residencial, baseado em um ensaio experimental encontrado na literatura. Com este estudo, os autores observaram que o perfil de temperatura obtido com o FDS teve concordância com os resultados experimentais, demonstrando a capacidade do software em reproduzir o incêndio estudado.

Tabaczenski *et al.*(2017b) desenvolveram um modelo computacional de um incêndio em um compartimentado representando um escritório, baseado em um ensaio experimental encontrado na literatura. Com este estudo os autores constataram que o conhecimento e aplicação das propriedades térmicas não só dos materiais combustíveis, mas também dos materiais incombustíveis envolvidos numa simulação computacional no FDS é de suma importância para a obtenção de resultados coerentes com as situações reais. Desta forma, os resultados obtidos mostraram que, quando calibrados adequadamente, os modelos desenvolvidos no *software* podem retornar previsões confiáveis de desenvolvimento de temperaturas dos gases em cenários de incêndio.

2. ESTUDO EXPERIMENTAL

O estudo experimental é apresentado por Corrêa *et al.* (2017). Neste estudo, foi realizada uma análise de desenvolvimento de temperaturas decorrentes de um incêndio em um cômodo pertencente ao pavimento térreo da Oficina de treinamento de Combate a Incêndio, dentro do Centro de Ensino e Instrução do Corpo de Bombeiros Militar de Pernambuco (CBMPE). Este cômodo foi adaptado para reproduzir um dormitório semelhante aos pertencentes a residências unifamiliares tipicamente incendiadas na cidade de Recife, de acordo com a pesquisa de Corrêa *et al.* (2016).

A carga de incêndio deste dormitório foi materializada através dos móveis e objetos determinados na pesquisa de Corrêa *et al.* (2016), baseada no mapeamento de incêndios em edificações nesta cidade durante o triênio de 2011-2013 realizado por Corrêa *et al.* (2015). A Figura 1 mostra as dimensões internas e mobiliário deste dormitório.



Figura 1. Dormitório incendiado no estudo realizado por Corrêa *et al.* (2017).

Estes móveis e objetos tiveram suas dimensões e peso mensurados para, através do potencial calorífico dos materiais predominantes em sua composição, ser determinado o valor da carga de incêndio presente no dormitório. O poder calorífico dos materiais foi obtido através da CBMSC IN 003 (2014) e, com isso, concluiu-se que a carga de incêndio presente neste dormitório foi de 499,56 MJ/m² (CORRÊA *et al.*, 2017).

A estrutura deste dormitório, bem como de toda a edificação, é de concreto armado, o piso de concreto simples e o forro de laje pré-moldada com preenchimento de lajotas cerâmicas e capa de concreto. As paredes do dormitório são constituídas de tijolos cerâmicos não estruturais, revestidas externamente com argamassa de cimento e internamente com diferentes materiais, sendo eles: chapisco cimentício (paredes P1 e P4), argamassa de gesso (parede P2) e argamassa de cimento (parede P3) (CORRÊA *et al.*, 2017).

A ignição do incêndio se deu através de um dispositivo em parafina para acendimento de lareiras posicionado sob o leito inferior do beliche. Para aferição de temperaturas, foram instalados 24 termopares tipo K, distribuídos nos móveis, centro e paredes do compartimento conforme mostrado na Figura 2.

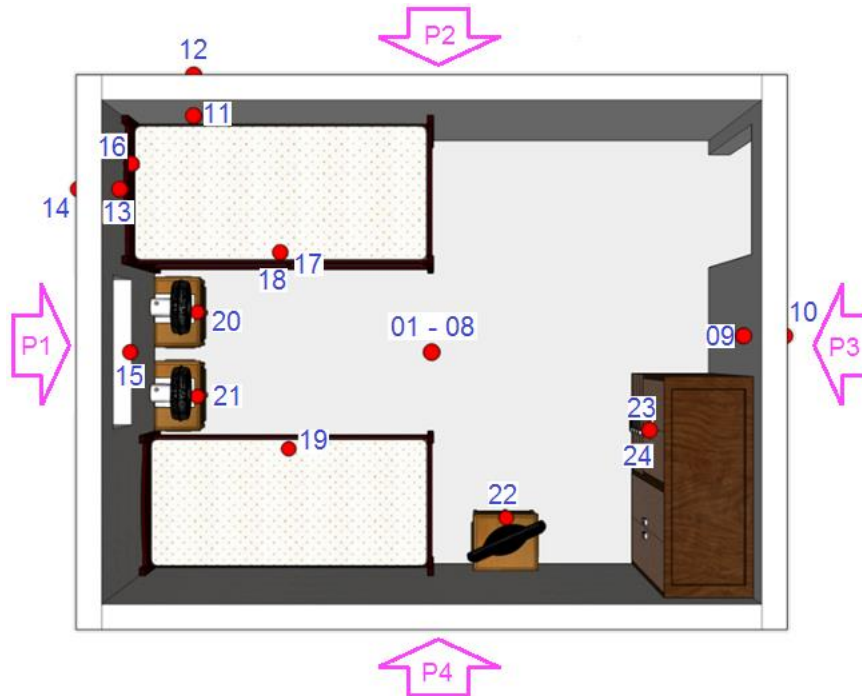


Figura 2. Distribuição dos termopares no compartimento ensaiado por Corrêa *et al.* (2017).

Durante o ensaio experimental, que durou 48 minutos, a janela pertencente ao dormitório incendiado ficou totalmente aberta, enquanto a porta permaneceu fechada durante os primeiros minutos, fazendo com que o incêndio fosse controlado pela ventilação e desenvolvesse ciclos de combustão e exaustão. Aos 18 minutos, para impedir a extinção natural do incêndio, a porta do compartimento foi aberta, proporcionando uma ventilação cruzada, levando o fluxo de calor rapidamente para o compartimento adjacente ao ensaiado. Entretanto, apesar desta estratégia, não houve uma generalização do incêndio, ao invés disso, após mais alguns ciclos de combustão e exaustão o mesmo entrou em declive até que uma equipe de Combate a Incêndio do Corpo de Bombeiros adentrou ao ambiente promovendo a extinção das chamas remanescentes e resfriamento das paredes (CORRÊA, *et al.* 2017).

3. MODELO COMPUTACIONAL DESENVOLVIDO NO FDS

O desenvolvimento do modelo computacional no FDS se deu com o objetivo de reproduzir da melhor forma possível o ensaio experimental realizado por Corrêa *et al.* (2017). Os parâmetros de entrada e estratégias adotadas para desenvolver o modelo foram baseados na cronologia do evento, geometria e especificidades da edificação, observação das condições ambientais e normas técnicas pertinentes.

O FDS é um *software* de simulação de incêndio baseado no modelo CFD que, dentre outros, permite a obtenção de temperaturas dos gases e em objetos sólidos, além de representar graficamente o comportamento da propagação de incêndios e movimentação de fumaça em toda a edificação simulada. Neste *software* é possível simular vários cômodos ao mesmo tempo, permitindo realizar análises não só no cômodo incendiado, mas também nos adjacentes ao mesmo. Desta forma, para realizar uma análise mais próxima da realidade, todo o pavimento térreo da edificação utilizada para realizar o estudo experimental foi considerado no modelo computacional desenvolvido no FDS. A Figura 3 mostra o croqui esquemático o pavimento térreo da edificação onde ocorreu o ensaio experimental.

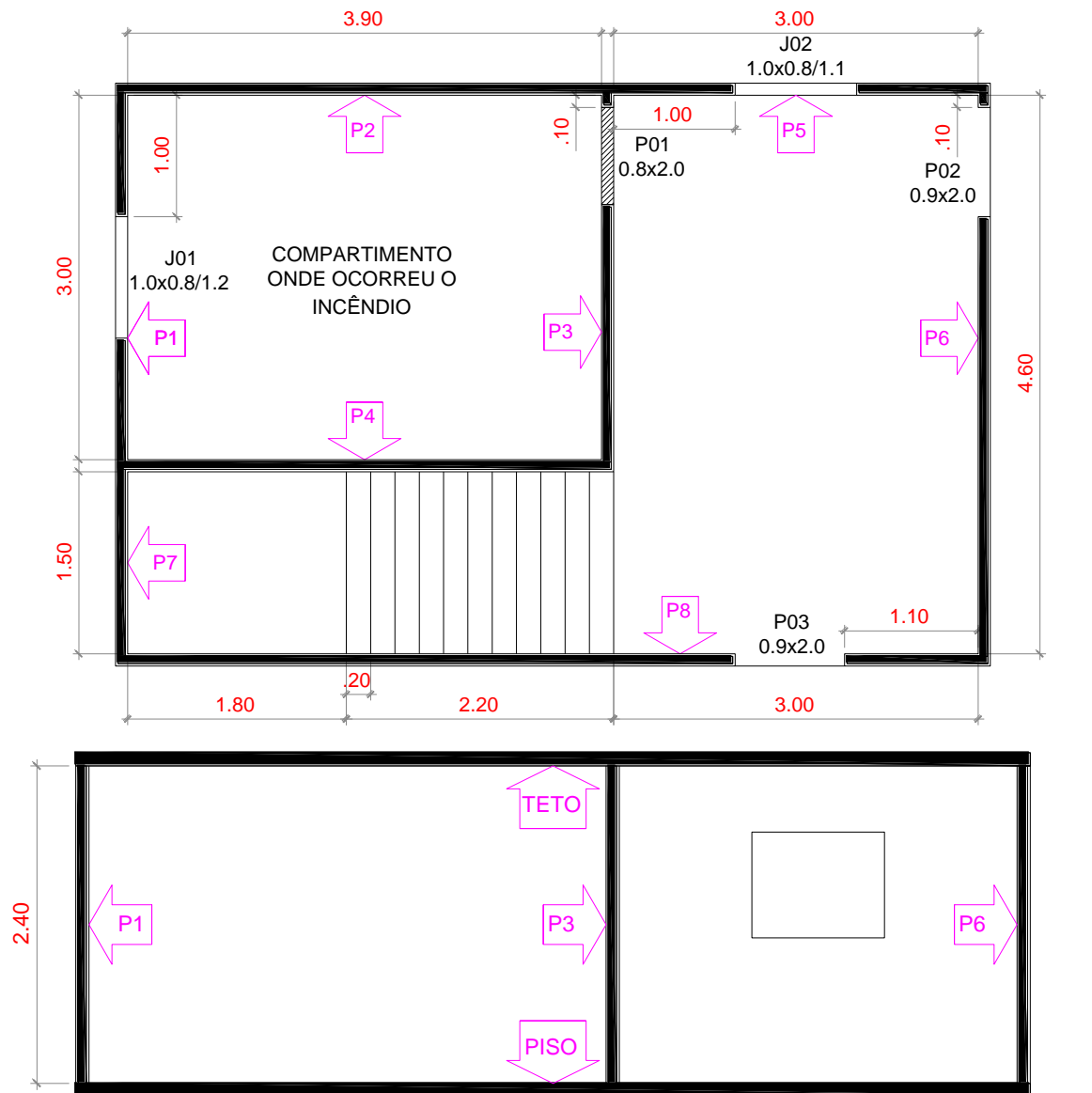


Figura 3. Croqui esquemático o pavimento térreo da edificação onde ocorreu o ensaio experimental.

Seguindo a orientação de McGrattan *et al.* (2016) e, a fim de analisar o fluxo de fumaça através das aberturas para o exterior, considerou-se um domínio computacional que extrapolou alguns metros além das dimensões do pavimento (Figura 3), com as seguintes dimensões: 10,0 m (eixo x) x 7,5 m (eixo y) x 4,0 m (eixo z), com uma malha cúbica de 10 cm, totalizando 300 000 elementos. Com isso, todas as geometrias do modelo (paredes, teto, piso, portas, janelas, escada e material

combustível) tiveram suas dimensões e posicionamento ajustado para que suas arestas fossem múltiplas de 10 cm, ocupando sempre um elemento inteiro no domínio computacional.

Nos extremos máximos e mínimos dos eixos x e y, e no extremo máximo do eixo z foram criadas superfícies abertas denominadas de OPEN VENTS indicando uma abertura para o exterior do domínio computacional, garantindo que haja comunicação entre os ambientes interno e externo do domínio e alimentação do incêndio com oxigênio.

Como parâmetros ambientais iniciais, foram considerados: temperatura ambiente de 29.50 °C, de acordo com as leituras obtidas por Corrêa *et al.* (2017); pressão atmosférica ao nível do mar de 101 325 Pa; umidade relativa do ar de 80% e velocidade do vento de 3.0 m/s, tal como ocorrido no dia do ensaio experimental de acordo com o indicado por INMET (2017).

Na ausência de parâmetros indicados por Corrêa *et al.* (2017), as propriedades térmicas atribuídas às paredes, teto e piso da edificação, com exceção da Emissividade que teve seu valor adotado, foram definidas de acordo com as indicações da norma ABNT NBR 15220-2 (2005). Estas propriedades, que foram assumidas como constantes durante a simulação, são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1. Propriedades térmicas dos materiais incombustíveis utilizados nas simulações computacionais.

Material	Densidade (kg/m ³)	Condutividade térmica (W/m.K)	Calor específico (kJ/kg.K)	Emissividade
Tijolo Cerâmico	1400	0.90	0.92	0.90
Argamassa de Gesso	1200	0.70	0.84	0.90
Argamassa de Cimento	2000	1.15	1.00	0.90
Concreto	2300	1.75	1.00	0.90
Aço	7800	55.00	0.46	0.70

Analogamente ao ocorrido no ensaio experimental em estudo, na simulação realizada computacionalmente as paredes do dormitório foram consideradas com diferentes revestimentos internos. Devido à impossibilidade de representar a rugosidade advinda do chapisco cimentício, este foi descrito no *software* como sendo uma camada de argamassa de cimento com espessura menor que as demais camadas compostas por este material. As espessuras e materiais que compuseram as camadas das paredes, teto e piso são mostradas na Tabela 2.

Desta tabela, Camada 1 é a camada interior, Camada 2 é a camada intermediária e Camada 3 é a camada exterior ao compartimento. As demais paredes da edificação foram assumidas com as mesmas características da parede P3. Salienta-se que estas espessuras independem das dimensões da malha adotada.

Na ausência de parâmetros indicados por Corrêa *et al.* (2017) e, devido à dificuldade de obtenção de propriedades térmicas de todos os materiais combustíveis presentes no ensaio experimental, para modelar o incêndio no cômodo considerou-se uma estratégia simplificada onde, a carga de incêndio foi materializada por caibros de madeira, distribuídos no ambiente conforme a distribuição dos móveis e objetos do ensaio experimental, cujas propriedades térmicas foram: Densidade, Condutividade térmica e Calor específico, com valores respectivos de 400 kg/m³, 0.12 W/m.K e 1.34 kJ/kg.K, definidos conforme as indicações da ABNT NBR 15220-2 (2005); Emissividade, com valor adotado de 0.9; Poder Calorífico de 17500 kJ/kg, definido conforme as indicações do NP EN 1991-1-2 (2010); Temperatura de ignição de 210 °C, conforme o estudo realizado por Figueroa & Moraes (2009); Taxa de liberação de calor de 100 kW/m², conforme o estudo de Rocha (2014).

Tabela 2. Espessura e materiais das camadas das paredes, teto e piso do compartimento simulado.

Lado	Camada 1		Camada 2		Camada 3	
	Espessura (cm)	Material	Espessura (cm)	Material	Espessura (cm)	Material
Parede P1	2.5	Argamassa de Cimento	10.0	Tijolo Cerâmico	2.5	Argamassa de Cimento
Parede P2	2.5	Argamassa de Gesso	10.0	Tijolo Cerâmico	2.5	Argamassa de Cimento
Parede P3	2.5	Argamassa de Cimento	10.0	Tijolo Cerâmico	2.5	Argamassa de Cimento
Parede P4	1.0	Argamassa de Cimento	10.0	Tijolo Cerâmico	2.5	Argamassa de Cimento
Teto	7.0	Tijolo Cerâmico	3.0	Concreto		
Piso	10.0	Concreto				
Porta	0.03	Aço				

A geometria do modelo desenvolvido para simulação computacional do incêndio no FDS é mostrada na Figura 4.

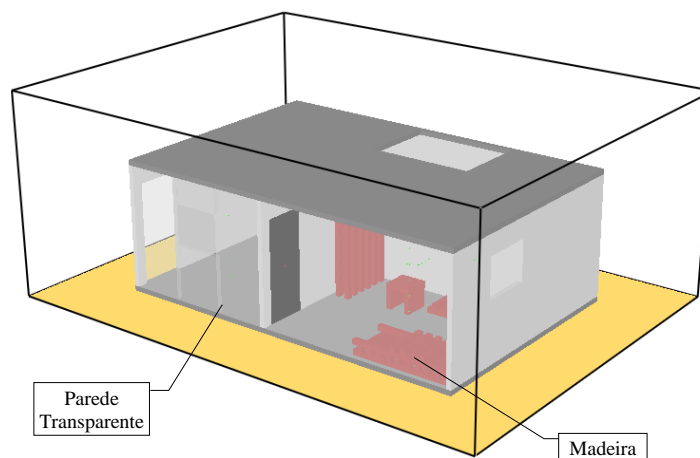


Figura 4. Modelo desenvolvido no FDS.

Nas simulações de incêndios feitas no FDS, é necessária a definição de uma reação do combustível gasoso que atuará como um substituto para todas as fontes de combustível em potencial. Caso esta reação não esteja definida na biblioteca padrão do *software*, o usuário pode especificar a formulação química do combustível junto com os rendimentos de CO, fuligem, e outros parâmetros referentes ao mesmo. (McGRATTAN *et al.*, 2016). No modelo desenvolvido neste estudo, o combustível de madeira foi representado pela formulação química $\text{CH}_{1.7}\text{O}_{0.74}\text{N}_{0.002}$, com rendimentos de monóxido de carbono e fuligem de 0.004 kg/kg e 0.015 kg/kg respectivamente. Estes rendimentos são expressos em quantidade de monóxido de carbono e fuligem emitidos por unidade de massa de combustível consumido (WEINSCHENK *et al.*, 2014).

Para considerar a ignição do incêndio que se deu através do dispositivo em parafina no ensaio experimental de Corrêa *et al.* (2017), utilizou-se de um queimador posicionado analogamente ao dispositivo no ensaio experimental. Este queimador foi desativado após 150 segundos, liberando aproximadamente 0.06% da carga de incêndio total, e teve a função de apenas iniciar o incêndio. Com isso, o aumento de temperatura gerou uma reação em cadeia, provocando a propagação do

fogo através da queima dos caibros de madeira que entram em combustão após atingir sua respectiva temperatura de ignição.

Para obtenção de leituras das temperaturas desenvolvidas durante o incêndio, foram inseridos alguns medidores posicionados analogamente aos termopares no ensaio experimental (vide Figura 2). Foram considerados os seguintes termopares: 01 – 08 (gases no centro do dormitório), 09 e 10 (faces interna e externa da parede P3), 11 e 12 (faces interna e externa da parede P2), e, 13 e 14 (faces interna e externa da parede P1).

Assim como no ensaio experimental, nesta simulação computacional a janela do dormitório incendiado foi considerada aberta durante toda a simulação, enquanto a porta foi aberta somente aos 18 minutos. Neste intervalo de tempo, entre o início do incêndio e a abertura da porta, no ensaio experimental as temperaturas máximas variaram entre 600 °C e 800 °C. Sob estas condições de temperaturas a integridade à vida humana já teria sido corrompida. Sendo assim, na comparação dos resultados obtidos, este estudo deteve-se aos minutos iniciais do incêndio até a abertura da porta, como é mostrado a seguir.

4. RESULTADOS

Assim como no ensaio experimental, na simulação computacional realizada através do *software* FDS (até 18 minutos) não houve generalização do incêndio (*Flashover*). Isso se deu devido ao esgotamento de oxigênio no ambiente, visto que, com a porta fechada não houve ventilação cruzada que pudesse proporcionar o fornecimento da quantidade suficiente do comburente para desenvolvimento do fogo. Desta forma, como pode-se observar na Figura 5, o fogo ficou restrito aos caibros de madeira que representaram o beliche presente no ensaio experimental. Nesta figura a fumaça foi ocultada para efeito de visualização do fogo apenas.

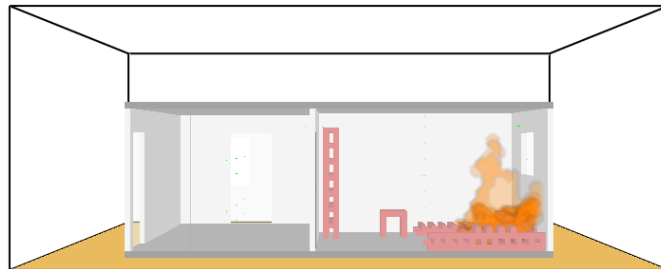


Figura 5. Simulação computacional no FDS – Propagação do fogo.

Assim como no ensaio experimental, observou-se que em menos de 5 minutos o dormitório foi totalmente tomado pela fumaça, como pode-se observar na Figura 6.

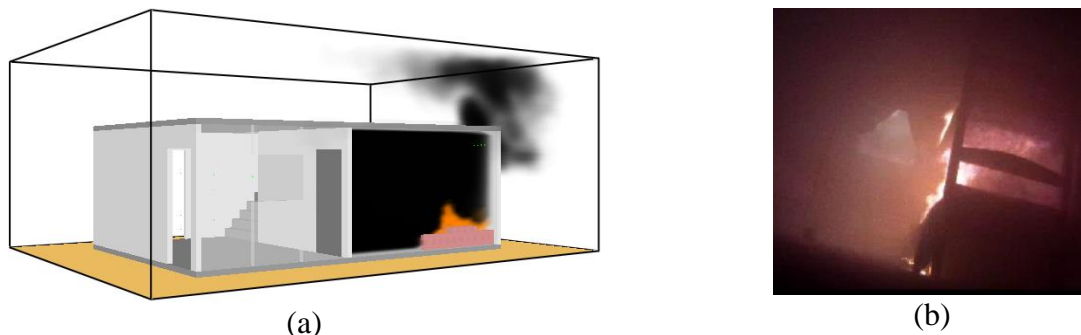


Figura 6. Propagação da fumaça aos 4 minutos de incêndio: (a) Simulação computacional no FDS; (b) Ensaio experimental de Corrêa *et al.* (2017).

Na simulação computacional não foi observado os ciclos de combustão e exaustão como no ensaio experimental apresentado por Corrêa *et al.* (2017). Apesar disso, de maneira geral observou-se que as temperaturas obtidas com o modelo desenvolvido foram próximas das temperaturas médias obtidas no ensaio experimental. Na Figura 7 são apresentadas as temperaturas dos gases obtidas através do termopar 08, posicionado logo abaixo do teto do compartimento (camada superior), na da simulação computacional no FDS e no ensaio experimental.

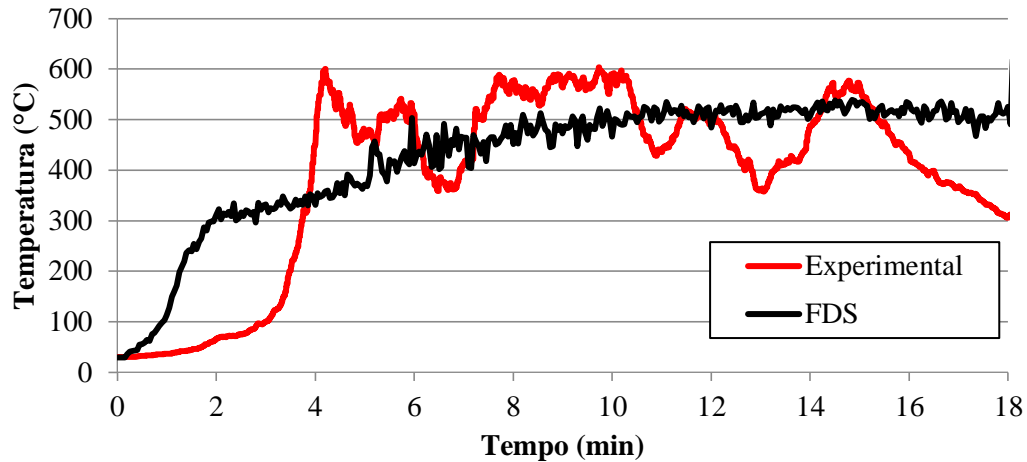


Figura 7. Temperaturas dos gases na camada superior do compartimento (termopar 08).

Na simulação computacional, observa-se um rápido crescimento das temperaturas até os 2 minutos, atingindo 300 °C, depois disso o crescimento ocorre mais lentamente até atingir o patamar de 500 °C aos 6 minutos. No ensaio experimental este crescimento repentino ocorre entre 2 e 4 minutos até o dormitório ser tomado pela fumaça promovendo uma saturação gasosa no ambiente, depois disso começam os ciclos de combustão e exaustão culminando em picos de até 600°C e vales de 360°C de temperatura.

Este comportamento se repete em todos os pontos de medição no centro do dormitório. Na Figura 8 são apresentadas as temperaturas dos gases obtidas através do termopar 04, posicionado a uma altura de 120 cm do piso do compartimento (camada intermediária).

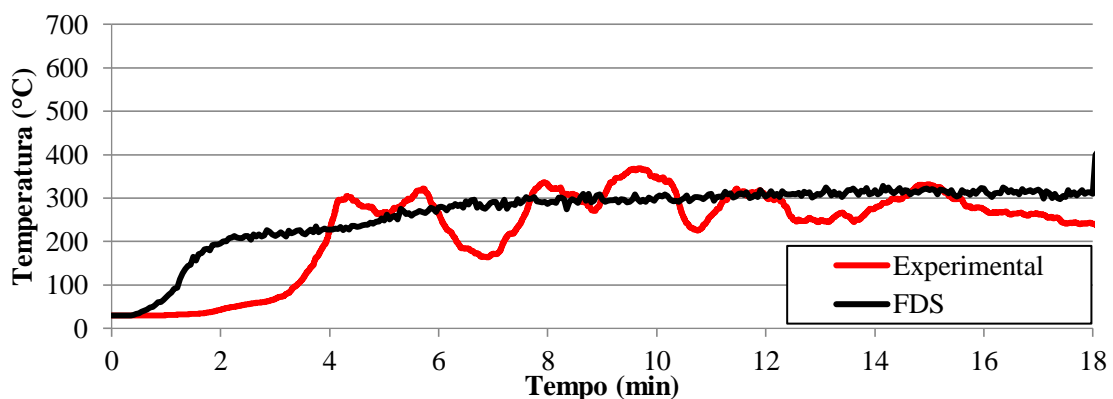


Figura 8. Temperaturas dos gases na camada intermediária do compartimento (termopar 04).

Na camada intermediária do compartimento as diferenças nos resultados: experimental e computacional se tornam mais discretas. Observa-se que no ensaio experimental a temperatura máxima é atingida aos 10 minutos com valor 360 °C. Neste mesmo momento na simulação computacional a temperatura aferida é de 300 °C.

Na camada mais inferior do compartimento os valores se invertem. Neste ponto, as temperaturas aferidas através da simulação computacional se tornam maiores que as aferidas experimentalmente,

ainda assim, a diferença entre esses valores se mantém sempre entre 50 °C e 100 °C. Na Figura 9 são apresentadas as temperaturas dos gases obtidas através do termopar 01, posicionado a uma altura de 30 cm do piso do compartimento (camada inferior).

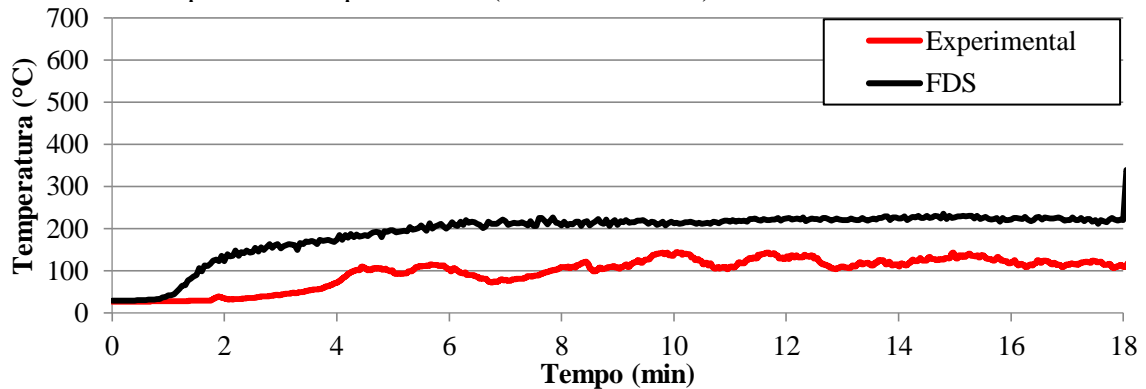


Figura 9. Temperaturas dos gases na camada inferior do compartimento (termopar 01).

Como visto através das Figura 7, Figura 8 e Figura 9, a simulação computacional apresentou resultados de temperaturas mais homogêneas ao longo da altura do compartimento. Destes resultados, pode-se traçar alguns perfis de temperatura obtidos no centro do compartimento estudado, como mostrado na Figura 10.

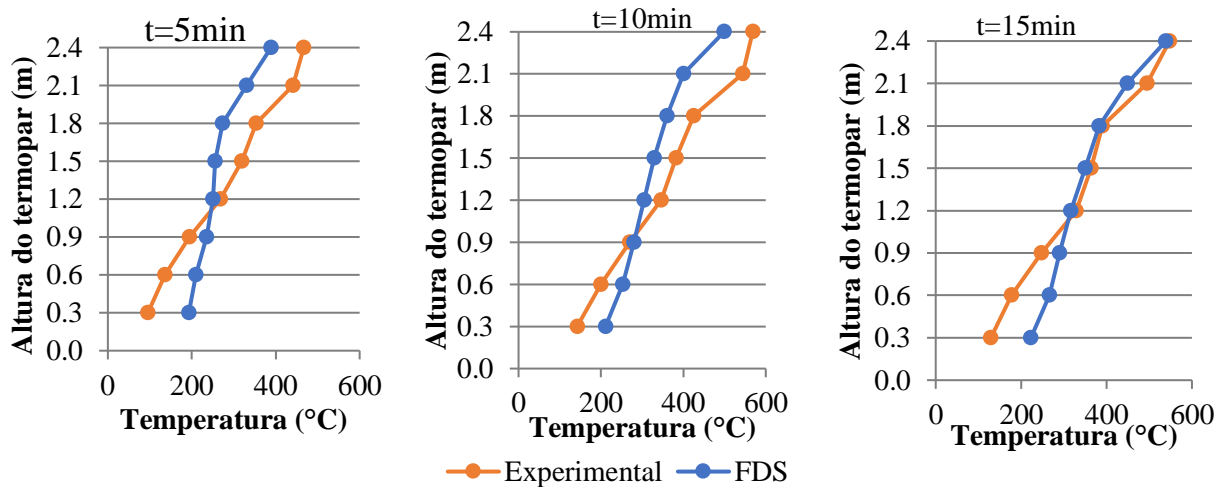


Figura 10. Perfis de temperaturas no centro do dormitório (termopares 01 a 08).

Observa-se que, nas camadas inferiores do dormitório, os resultados de temperaturas obtidas através da simulação computacional geralmente foram maiores que os obtidos experimentalmente. Já nas camadas superiores esse comportamento é inverso, ou seja, os resultados obtidos experimentalmente geralmente foram maiores que os obtidos através da simulação computacional. Apesar da simulação computacional proporcionar um gradiente de temperaturas menos expressivo, é evidente a diferença entre as alturas analisadas. Aos 15 minutos de simulação, a camada mais inferior do compartimento (a 30 cm do piso) encontra-se com 220 °C, enquanto que a camada mais superior (próxima ao teto, a 240 cm do piso) encontra-se com 540 °C, comportamento típico decorrente da convecção dos gases quentes no ambiente.

A Figura 11 mostra o perfil de temperaturas no plano XZ do domínio computacional no centro do dormitório incendiado, aos 15 minutos de simulação.

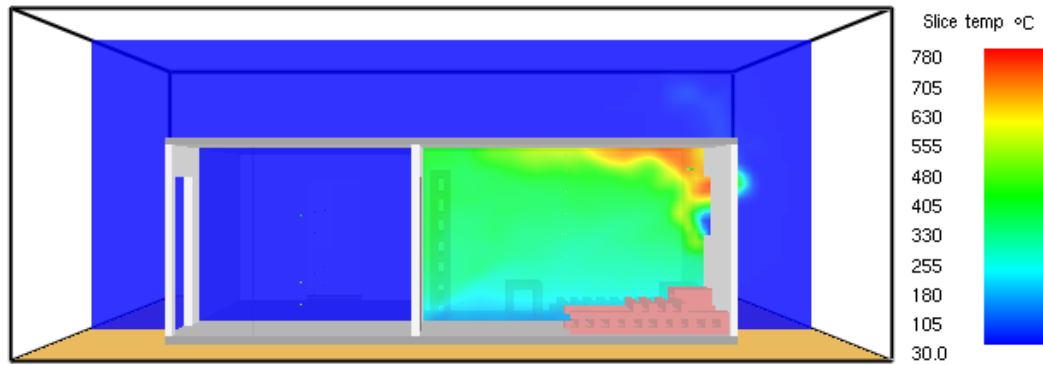


Figura 11. Perfil de temperaturas no plano XZ no centro do dormitório (Tempo = 15 min).

Através deste perfil é possível visualizar o gradiente de temperaturas desenvolvido em todo o plano XZ no dormitório decorrente da convecção dos gases no ambiente. Fica evidente que as temperaturas máximas ocorrem próximas a janela que estava aberta. Neste mesmo local também é possível visualizar uma pequena entrada de ar fresco vindo do exterior da edificação.

Quanto às temperaturas aferidas nas faces das paredes, devido às incertezas de medições, foram posicionados termopares analogamente ao ensaio experimental, proporcionando a aferição de temperaturas que de fato foram absorvidas pelas paredes através da radiação térmica do incêndio, e, complementarmente foram posicionados termopares afastados alguns centímetros das faces destas, proporcionando a aferição de temperaturas nos gases próximos às mesmas.

Na análise dos resultados, constatou-se que as temperaturas capturadas na simulação computacional que mais se aproximaram das obtidas experimentalmente foram as aferidas nos gases próximos às paredes, e não na face das mesmas. A Figura 12 mostra o desenvolvimento de temperaturas aferidas na parede P3, cujo revestimento interno foi argamassa de cimento.

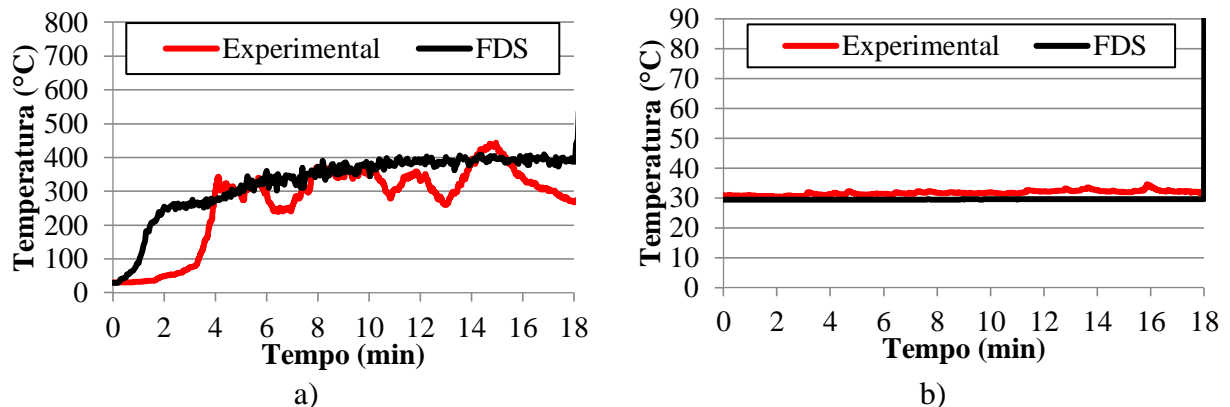


Figura 12. Temperaturas aferidas na parede P3: (a) face interna (termopar 09); (b) face externa (termopar 10).

Na face interna da parede (face exposta ao incêndio), as temperaturas máximas desenvolvidas foram de 400 °C, valor bem próximo do obtido experimentalmente.

Na face externa da parede, as temperaturas aferidas, tanto computacionalmente quanto experimentalmente, não ultrapassaram 35 °C. As Figura 13 e Figura 14 mostram o desenvolvimento de temperaturas aferidas nas paredes P2 e P1, cujo revestimento interno foi argamassa de gesso e chapisco cimentício, respectivamente.

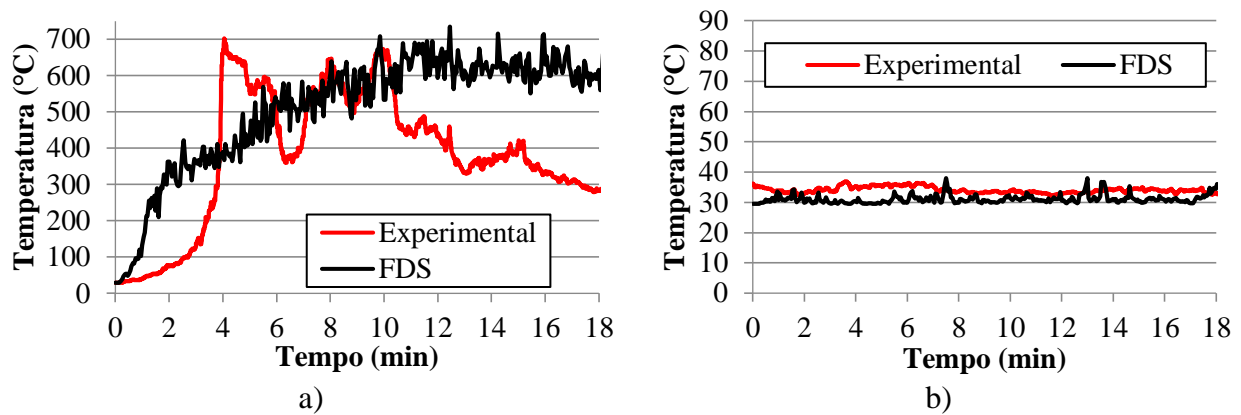


Figura 13. Temperaturas aferidas na parede P2: (a) face interna (termopar 11); (b) face externa (termopar 12).

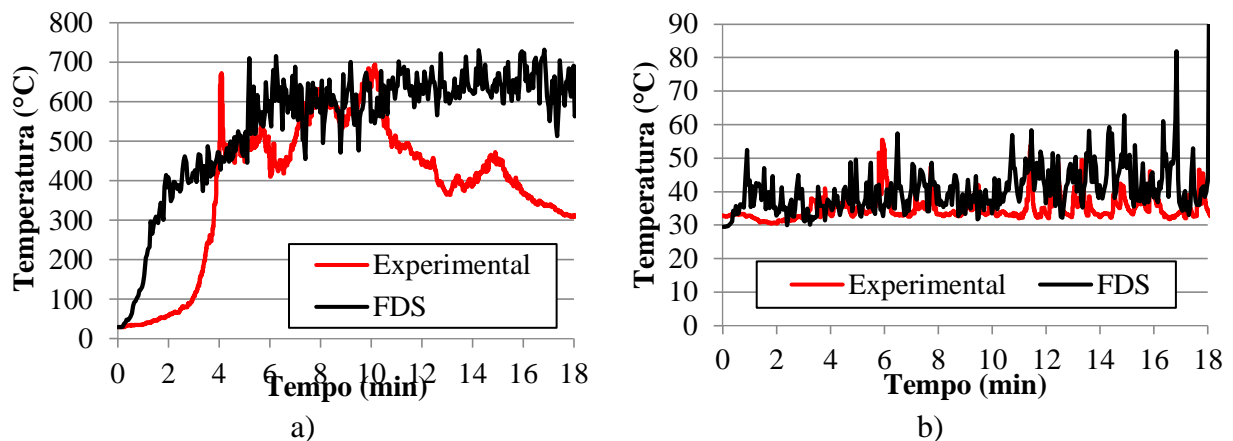


Figura 14. Temperaturas aferidas na parede P1: (a) face interna (termopar 13); (b) face externa (termopar 14).

Nas faces internas das paredes (faces expostas ao incêndio), as temperaturas máximas desenvolvidas foram de aproximadamente 700 °C, valor bem próximo do obtido experimentalmente. Nestas aferições nota-se uma oscilação maior nos resultados nas faces externas das paredes, sobretudo na parede P1. Este fato justifica-se pelos termopares estarem posicionado próximos a janela do dormitório. Assim, devido à incidência do vento no local, este medidor aferiu as temperaturas advindas da convecção dos gases que saíram do dormitório.

Na face externa da parede P2, as temperaturas aferidas, tanto computacionalmente quanto experimentalmente, não ultrapassaram 38 °C. Na parede P1 a diferença entre os resultados foi um pouco maior: no ensaio experimental a temperatura máxima registrada foi de 65 °C, enquanto que na simulação computacional esse valor foi de 82 °C.

5. CONCLUSÕES

Este estudo apresentou a simulação computacional de um incêndio em dormitório de residências unifamiliares tipicamente incendiadas na cidade de Recife (Pernambuco, Brasil), cujo ensaio experimental foi apresentado por Corrêa *et al.* (2017).

A simulação computacional foi realizada através do *software* FDS e teve por objetivo a análise do desenvolvimento das temperaturas no dormitório incendiado. Diante dos resultados apresentados pode-se enumerar as seguintes conclusões:

- Assim como no ensaio experimental, não houve generalização do incêndio, devido ao esgotamento de oxigênio no ambiente;

- A simulação computacional não apresentou os ciclos de combustão, produção intensa de gases e exaustão como no ensaio experimental. A ocorrência deste comportamento levantou duas hipóteses: (1) a admissão de estratégias simplificadas para desenvolvimento dos modelos não contempla todos os fenômenos ocorridos no ensaio experimental, decorrentes da ausência de oxigênio e excesso de fumaça no compartimento. Ressalta-se que no FDS há a possibilidade de inserção de inúmeras propriedades físico-químicas dos materiais, que permitem uma caracterização mais fiel destes em uma simulação computacional, entretanto, essas propriedades são de difícil obtenção, tornando tal refinamento também difícil de ser executado; (2) o modelo de combustão do FDS não é adequado para cenários em que há a ausência de oxigênio no compartimento, levando a simulação computacional sob esta condição desenvolver um comportamento diferente do ensaio experimental;
- Nas camadas inferiores do dormitório, os resultados de temperaturas obtidas através da simulação computacional geralmente foram maiores que os obtidos experimentalmente. Já nas camadas superiores os resultados obtidos experimentalmente foram geralmente maiores que os obtidos através da simulação computacional;
- As temperaturas máximas desenvolvidas no incêndio ocorreram próximas a janela do dormitório, sendo esta a única fonte de fornecimento de comburente ao incêndio nos 18 minutos iniciais do ensaio experimental;
- No centro do dormitório, a maior temperatura aferida foi 530 °C próxima ao teto (a 240 cm do piso), aos 15 minutos de simulação,
- Nas paredes, as maiores temperaturas aferidas foram aproximadamente 730 °C após 10 minutos de simulação, nas faces internas das paredes P1 e P2. Este comportamento já era esperado, pois estas eram as mais próximas do foco inicial do incêndio;
- Apesar da estratégia simplificada adotada, as temperaturas desenvolvidas foram próximas das temperaturas médias obtidas no ensaio experimental, mostrando que, apesar de não reproduzir fielmente o comportamento ocorrido no incêndio real, o modelo desenvolvido foi capaz de representar resultados coerentes com as temperaturas desenvolvidas durante o incêndio.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo fomento desta pesquisa.

7. REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005), *ABNT NBR 15220-2:Desempenho térmico de edificações - Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações*. Rio de Janeiro.
- Byström, A.; Cheng, X.; Wickström, U.; Veljkovic, M. (2012), *Full-scale experimental and numerical studies on compartment fire under low ambient temperature*. Building and Environment, v.51, p. 255-262.
- Centeno, F. R.; Cassol, F.; Rodrigues, E. E. C. (2015), *Validação de modelagem numérica empregando o Software Fire Dynamics Simulator para um ambiente habitacional em situação de incêndio*. In: 3º Congresso Ibero-Latino-Americano sobre Segurança Contra Incêndios (3º CILASCI), Porto Alegre – RS (Brasil).
- Corrêa, C.; Silva, J. J. R.; Oliveira, T. A. C. P.; Braga, G. C. (2015), *Mapeamento de Incêndios em Edificações: um estudo de caso na cidade do Recife*. Revista de Engenharia Civil IMED, Passo Fundo – RS (Brasil), v.2 n.3, p. 15-34.

- Corrêa, C.; Silva, J. J. R.; Pires, T. A.; Braga, G. C.; Melo, I. A. V. (2018), *Edifício Modal: Uma representação para o Estudo de Incêndios na cidade de Recife*. Revista Cientec, Recife – PE (Brasil), v.10, n.2, p.01-10.
- Corrêa, C., Braga, G. C., Junior, J. B., Silva, J. J. R., Tabaczinski, R., Pires, T. A. (2017), *Incêndio em compartimento de residência na Cidade do Recife: Um estudo experimental*. Revista ALCONPAT, Mérida – Yucatán (México), v.7 n.3, p. 215-230
- Figuroa, M. J. M., Moraes, P. D. (2009), *Comportamento da madeira a temperaturas elevadas*. Ambiente Construído, Porto Alegre – RS (Brasil), v. 9, n. 4, p. 157-174.
- Instituto Nacional de Meteorologia – INMET (2017), *Estações automáticas - gráficos*. Brasil. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=rede_estacoes_auto_graf>. Acessado em: 20 mar. 2017.
- McGrattan, K. B., McDermott, R. J., Weinschenk, C. G., Forney, G. P. (2013), *Fire dynamics simulator, technical reference guide*. Special Publication (NIST SP) – 1018, <https://dx.doi.org/10.6028/NIST.sp.1018>
- McGrattan, K., Hostikka, S., McDermott, R., Floyd, J., Weinschenk, C., Overholt, K. (2016), *Fire Dynamics Simulator – User’s Guide: Sixth Edition*. NIST – Special Publication 1019: National Institute of Standards and Technology – NIST & Technical Research Centre of Finland – VTT, Maryland (EUA).
- Norma Portuguesa (2010), *NP EN 1991-1-2: Acções em estruturas Parte 1-2: Acções gerais Acções em estruturas expostas ao fogo*. Caparica (Portugal).
- Rocha, M. A. F. (2014), *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 (Brasil), pp. 147.
- Tabaczinski, R., Corrêa, C., Santos, M. M. L., Pires, T. A. C., Silva, J. J. R. (2017), *Aplicação do Software Fire Dynamics Simulator (FDS) no Estudo da Segurança Contra Incêndios (SCI) no Brasil*. Revista Flammae, Recife – PE (Brasil), v.3, n.7, p.87-116, 2017.
- Tabaczinski, R., Pires, T. A. C., Silva, J. J. R., Negreiros, R. (2017), *Simulação computacional de um incêndio natural compartimentado: validação com um estudo experimental*. In: 4º Congresso Ibero-Latino-Americano sobre Segurança Contra Incêndios (4º CILASCI), Recife – PE (Brasil).
- Wang, X., Fleischmann, C., Spearpoint, M. (2016), *Assessing the influence of fuel geometrical shape on fire dynamics simulator (FDS) predictions for a large-scale heavy goods vehicle tunnel fire experiment*. Case Studies in Fire Safety, v. 5, p. 34-41.
- Weinschenk, C. G., Overholt, K. J., Madrzykowski, D. (2014), *Simulation of an Attic Fire in a Wood Frame Residential Structure -Chicago, IL*. NIST – Technical Note 1838: National Institute of Standards and Technology (EUA), pp. 39.
- Yu, L.-X., Beji, T., Maragkos, G., Liu, F., Weng, M.-C., Merci, B. (2018), *Assessment of Numerical Simulation Capabilities of the Fire Dynamics Simulator (FDS 6) for Planar Air Curtain Flows*. Fire Technology, Volume 54, Issue 3, pp 583–612, <https://doi.org/10.1007/s10694-018-0701-7>
- Yuen, A. C. Y., Yeoh, G. H., Alexander, R., Cook, M. (2014), *Fire scene reconstruction of a furnished compartment room in a house fire*. Case Studies in Fire Safety, v.1, p. 29-35.