

Simulación numérica y experimento de incendio en dormitorio residencial

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

*Autor de Contacto: cristianocorreacbmpe@gmail.com

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

Recepción: 29/05/2018 | Aceptación: 06/11/2018 | Publicación: 30/12/2018

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 Correa 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 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.

Citar como: R. Tabaczinski, C. Corrêa, T. Ancelmo Pires, J. J. Rêgo Silva (2019), "Simulación numérica y experimento de incendio en dormitorio residencial", Revista ALCONPAT, 9(1), pp. 15-29, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i1.315>

¹ Universidade Federal de Pernambuco, Brasil.

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el tercer número del año 2019 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del segundo número del año 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*.

Simulação numérica e experimento de incêndio em dormitório residencial

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*

1. INTRODUCCIÓN

Los incendios son eventos trágicos que ocurren con frecuencia en Brasil y en el mundo, teniendo un gran potencial destructivo de patrimonio y de vidas. Según el estudio realizado por Corrêa *et al.* (2015) sobre la ocurrencia de incendios en la ciudad de Recife (Pernambuco – Brasil) en los años de 2011-2013, alrededor de 33% de las ocurrencias de esos eventos han sido en edificaciones. De este porcentaje, alrededor de 40% corresponde a edificaciones residenciales, siendo que la gran mayoría de esos eventos, aproximadamente 75%, ocurren en residencias unifamiliares. Según los autores, este hecho es preocupante, visto, en Brasil este tipo de edificación no posee orientaciones normativas preventivas sobre Seguridad Contra Incendios (SCI), mostrando la necesidad de inversión en investigaciones en esta área de conocimiento.

Estudios sobre el comportamiento y desarrollo de incendios en edificaciones son de suma importancia para auxiliar a los investigadores y estudiosos en la comprensión de este fenómeno. Con esos estudios es posible, entre otras cosas, estimar temperaturas y prever el movimiento del humo en edificaciones incendiadas, incluso antes de la ocurrencia del siniestro, auxiliando en el desarrollo de estrategias que visan a la protección de la vida de sus ocupantes y del patrimonio.

La simulación computacional es una herramienta que presenta grandes potencialidades en el auxilio a los estudios direccionados hacia la Seguridad Contra Incendios en Edificaciones (SCIE), proporcionando al investigador una mejor comprensión del comportamiento de este fenómeno.

Actualmente, el uso de esta herramienta es una práctica común entre los investigadores de este asunto alrededor del mundo. Sin embargo, en Brasil, la utilización de *software* para este fin todavía es poco difundida, hecho que conlleva una escasa disponibilidad de literatura para auxiliar a la comprensión y utilización de estos (TABACZENSKI, *et al.*, 2017a).

En resumen, los *software* de simulación de incendios pueden estar basados en el modelo de zonas, como los *software* OZone, desarrollado por la *University of Liège*, y el *Consolidated Model of Fire and Smoke Transport* (CFAST), desarrollado por la *National Institute of Standards and Technology* de los Estados Unidos de América (NIST/EUA), o basados en el modelo de fluidodinámica computacional (en inglés *Computational Fluid Dynamics*, CFD), como los *software* *Fire Dynamics Simulator* (FDS), también desarrollado por el NIST, y el *SMARTFIRE*, desarrollado por la *University of Greenwich*.

Entre los *softwares* de simulación de incendios, el FDS es el más utilizado en investigaciones técnico-científicas, y por consecuencia, el más rico en literatura disponible. Desde el inicio de su divulgación, en el año 2000, este ha sido ampliamente utilizado en estudios de SCIE alrededor del mundo. En Brasil, las primeras publicaciones de investigaciones realizadas con el auxilio de este *software* fechan hacia el año 2008 y poco a poco ha ganado espacio en el medio técnico-científico como herramienta para auxiliar a los estudios direccionados sea hacia el diagnóstico, sea para los pronósticos de edificaciones en situación de incendio.

Debido al conocimiento insuficiente de las propiedades de los materiales (principalmente de los materiales combustibles), y de modelos completos de pirólisis y comportamiento de combustión de esos materiales, todavía hay que mejorar las técnicas de simulación en este *software*. Así pues, los ensayos experimentales de incendio en escala completa son de suma importancia para mejorar los conocimientos acerca del comportamiento de este fenómeno, posibilitando la comparación de las medidas obtenidas con los resultados numéricos, a fin de mejorar la precisión de los modelos desarrollados (BYSTRÖM *et al.*, 2012).

A fin de demostrar algunas de las potencialidades de la utilización del FDS en el auxilio a los estudios de SCIE, este trabajo tiene por objetivo desarrollar un modelo computacional que sea capaz de reproducir el desarrollo de las temperaturas en los primeros minutos de un incendio realizado experimentalmente por Corrêa *et al.* (2017), en un cómodo que ha representado una habitación perteneciente a residencias unifamiliares típicamente incendiadas en la ciudad de Recife.

1.1 Revisión Bibliográfica

En el panorama mundial, diversos estudios de SCIE han utilizado ensayos experimentales para calibrar a los modelos de simulación computacional de incendios desarrollados en el FDS (McGRATTAN *et al.*, 2013; WANG *et al.*, 2016; YU LONG-XING *et al.*, 2018). Byström *et al.* (2012), han realizado un ensayo experimental de incendio con piezas de madera bajo temperatura ambiente, en un edificio de hormigón de dos pisos y, posteriormente, han desarrollado un modelo computacional de este experimento en el FDS. Los resultados experimentales del desarrollo de temperaturas han sido comparados con los resultados de las simulaciones numéricas, demostrando que el modelo desarrollado ha presentado resultados coherentes con los obtenidos experimentalmente.

Yuen *et al.* (2014) han conducido algunos ensayos experimentales de incendio en un dormitorio totalmente amueblado, y en seguida han desarrollado un modelo computacional de este escenario en el FDS. El análisis de los resultados ha demostrado que el modelo computacional ha sido capaz de proporcionar previsiones de temperatura, flujo de calor y propagación del incendio y humo coherentes con los obtenidos experimentalmente.

Entre los estudios desarrollados en Brasil, se percibe un predominio de análisis pronósticos, y hay una carencia de estudios experimentales que puedan auxiliar en la validación de los modelos computacionales desarrollados. Sin embargo, algunos estudios han utilizado ensayos

experimentales encontrados en la literatura para calibrar a los modelos desarrollados en el FDS (TABACZENSKI *et al.*, 2017a).

Centeno *et al.* (2015) han desarrollado un modelo computacional de un incendio de charco (en inglés *pool fire*) confinado a un ambiente residencial, basado en un caso experimental encontrado en la literatura. Con ese estudio, los autores han observado que el perfil de temperatura obtenido con el FDS ha tenido concordancia con los resultados experimentales, demostrando la capacidad del software de reproducir el incendio estudiado.

Tabaczenski *et al.* (2017b) han desarrollado un modelo computacional de un incendio en un compartimiento representando una oficina, basado en un ensayo experimental encontrado en la literatura. Con ese estudio los autores han constatado que el conocimiento y la aplicación de las propiedades térmicas no sólo de los materiales combustibles, sino también de los materiales incombustibles envueltos en una simulación computacional en el FDS es de suma importancia para obtener resultados coherentes con las situaciones reales. De este modo, los resultados obtenidos han demostrado que, cuando calibrados adecuadamente, los modelos desarrollados en el *software* pueden retornar previsiones confiables de desarrollo de temperaturas de los gases en escenarios de incendio.

2. ESTUDIO EXPERIMENTAL

El estudio experimental ha sido presentado por Corrêa *et al.* (2017). En este estudio se ha realizado un análisis de desarrollo de temperaturas resultantes de un incendio en una habitación perteneciente al piso terreo del Taller de entrenamiento de Combate a Incendio, dentro del Centro de Enseñanza e Instrucción del Cuerpo de Bomberos Militar de Pernambuco (CBMPE). Esta habitación ha sido adaptada para reproducir un dormitorio semejante a los encontrados en las residencias unifamiliares típicamente incendiadas en la ciudad de Recife, de acuerdo con la investigación de Corrêa *et al.* (2016).

La carga de incendio de esta habitación fue materializada por los muebles y objetos determinados en la investigación de Corrêa *et al.* (2016), basada en la cartografía de incendios en edificaciones en esta ciudad durante el trienio de 2011-2013 realizado por Corrêa *et al.* (2015). La Figura 1 muestra las dimensiones internas y los muebles de esa habitación.



Figura 1. Habitación incendiada en el estudio realizado por Corrêa *et al.* (2017).

Estos muebles y objetos han tenido sus dimensiones y peso medidos para que, a través del potencial calorífico de los materiales predominantes en su composición, fuera determinado el valor de la carga incendio presente en la habitación. El poder calorífico de los materiales fue obtenido a través de la CBMSC IN 003 (2014) y, con eso, se ha concluido que la carga de incendio de esta habitación fue de 499,56 MJ/m² (CORRÊA *et al.*, 2017).

La estructura de esta habitación, así como de toda la edificación, es de hormigón, el piso de concreto sencillo, y el techo de losa pre-moldada con relleno de piezas de cerámica y capa de concreto. Las paredes de la habitación son constituidas por ladrillos de cerámica no estructurales,

revestidas externamente por argamasa de cemento e internamente por diferentes materiales, siendo esos: mezcla gruesa (paredes P1 y P4), argamasa de yeso (pared P2) y argamasa de cemento (pared P3) (CORRÊA *et al.*, 2017).

La ignición del incendio se ha dado a través de un dispositivo en parafina utilizado para encender chimeneas, posicionado bajo el lecho inferior de la litera. Para medir las temperaturas se ha instalado 24 termopares tipo K, distribuidos en los muebles, centro y paredes del compartimiento, según mostrado en la Figura 2.

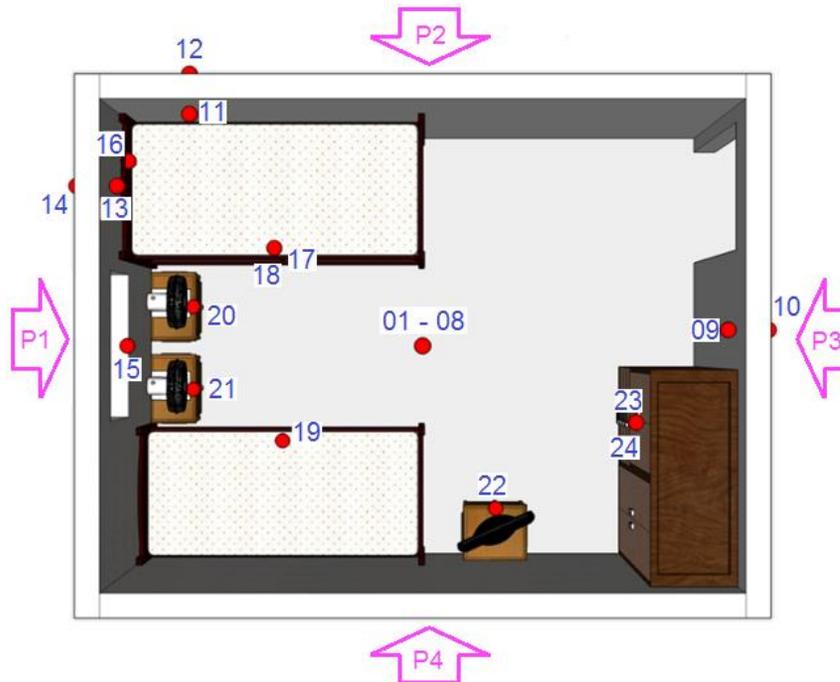


Figura 2. Distribución de los termopares en el compartimiento ensayado por Corrêa *et al.* (2017).

Durante el ensayo experimental, que ha durado 48 minutos, la ventana perteneciente a la habitación incendiada se ha quedado totalmente abierta, mientras que la puerta permaneció cerrada durante los primeros minutos, haciendo con que el incendio fuera controlado por la ventilación, y desarrollase ciclos de combustión y agotamiento. A los 18 minutos, para impedir la extinción natural del incendio, la puerta del compartimiento fue abierta, proporcionando una ventilación cruzada, llevando el flujo de calor rápidamente hacia el compartimiento adyacente al ensayado. Sin embargo, a pesar de esta estrategia, no hubo una generalización del incendio, sino que, después de algunos ciclos de combustión y agotamiento, el mismo entró en declive hasta que un equipo de Combate a Incendio del Cuerpo de Bomberos entró en el ambiente, promoviendo la extinción de las llamas restantes y el resfriamiento de las paredes (CORRÊA, *et al.* 2017).

3. MODELO COMPUTACIONAL DESARROLLADO EN EL FDS

El desarrollo del modelo computacional en el FDS se ha hecho con el objetivo de reproducir en la mejor forma posible el ensayo experimental realizado por Corrêa *et al.* (2017). Los parámetros de entrada y estrategias adoptadas para desarrollar el modelo se han basado en la cronología del evento, geometría y especificidades de la edificación, observación de las condiciones ambientales y normas técnicas pertinentes.

El FDS es un *software* de simulación de incendio basado en el modelo CFD que, entre otras cosas, permite obtener las temperaturas de los gases y en objetos sólidos, además de representar gráficamente el comportamiento de la propagación de incendios y el movimiento del humo en toda la edificación simulada. En este *software* es posible simular varias habitaciones a la vez,

permitiendo realizar análisis no tan solo en la habitación incendiada, sino también en las adyacentes al mismo tiempo. De esta forma, para realizar un análisis más próximo a la realidad, todo el piso terreo de la edificación utilizada para realizar el estudio experimental ha sido considerado en el modelo computacional desarrollado en el FDS. La Figura 3 muestra el bosquejo esquemático del piso terreo de la edificación donde ha ocurrido el ensayo experimental.

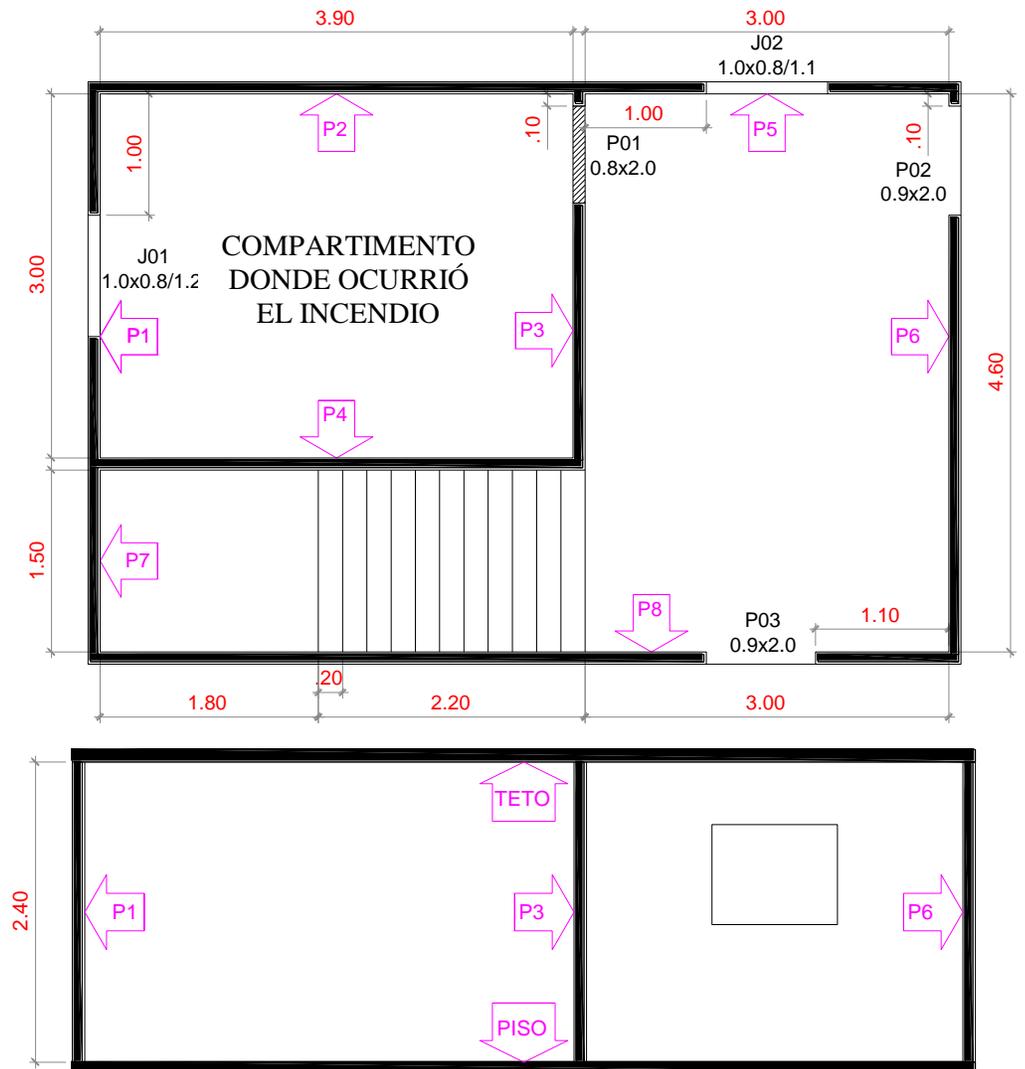


Figura 3. Bosquejo esquemático del piso terreo de la edificación donde ha ocurrido el ensayo experimental.

Según la orientación de McGrattan *et al.* (2016), y con el intuito de analizar el flujo de humo a través de las aberturas hacia el exterior, se ha considerado un dominio computacional que ha extrapolado algunos metros más allá de las dimensiones del piso (Figura 3), con las siguientes dimensiones: 10.0 m (eje x) x 7.5 m (eje y) x 4.0 m (eje z), con una malla cúbica de 10 cm, totalizando 300,000 elementos. Con eso, todas las geometrías del modelo (paredes, techo, piso, puertas, ventanas, escaleras y material combustible) han tenido sus dimensiones y posicionamiento ajustado, para que sus bordes fueran múltiplos de 10 cm, ocupando siempre un elemento entero en el dominio computacional.

En los extremos máximos y mínimos de los ejes x e y, y en el extremo máximo del eje z, fueron creadas superficies abiertas, denominadas OPEN VENTS, indicando una abertura hacia el exterior del dominio computacional, garantizando que haya comunicación entre los ambientes interno y externo del dominio, y alimentación del incendio con oxígeno.

Como parámetros ambientales iniciales, han sido considerados: temperatura ambiente de 29.50°C, de acuerdo con las lecturas obtenidas por Corrêa *et al.* (2017); presión atmosférica al nivel del mar de 101 325 Pa; humedad relativa del aire de 80% y velocidad del viento de 3.0 m/s, tal como ocurrió en el día del ensayo experimental con lo indicado por INMET (2017).

Con la ausencia de parámetros indicados por Corrêa *et al.* (2017), las propiedades térmicas atribuidas a las paredes, techo y piso de la edificación, con excepción de la Emisividad, que tuvo su valor adoptado, han sido definidas de acuerdo con las indicaciones de la norma ABNT NBR 15220-2 (2005). Estas propiedades, que han sido asumidas como constantes durante la simulación, son presentadas en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades térmicas de los materiales incombustibles utilizados en las simulaciones computacionales.

Material	Densidad (kg/m ³)	Conductividad térmica (W/m.K)	Calor específico (kJ/kg.K)	Emisividad
Ladrillo Cerámico	1400	0.90	0.92	0.90
Mortero de Yeso	1200	0.70	0.84	0.90
Mortero de Cemento	2000	1.15	1.00	0.90
Concreto	2300	1.75	1.00	0.90
Acero	7800	55.00	0.46	0.70

Análogamente a lo ocurrido en el ensayo experimental en estudio, en la simulación realizada computacionalmente las paredes de la habitación han sido consideradas con distintos revestimientos internos. Debido a la imposibilidad de representar la rugosidad proveniente de la mezcla gruesa, este fue descrito en el *software* como siendo una camada de argamasa de cemento con espesura más pequeña que las demás camadas compuestas por ese material. Las espesuras y materiales que han formado a las camadas de las paredes, techo y piso, son mostradas en la Tabla 2.

De esta tabla, Camada 1 es la camada interna, Camada 2 es la camada intermediaria, y Camada 3 es la camada exterior del compartimiento. Las demás paredes de la edificación han sido asumidas con las mismas características de la pared P3. Se resalta que estas espesuras son independientes de las dimensiones de la malla adoptada.

En la ausencia de parámetros indicados por Corrêa *et al.* (2017) y, debido a la dificultad para obtener propiedades térmicas de todos los materiales combustibles presentes en el ensayo experimental, para modelar el incendio en la habitación se ha considerado una estrategia simplificada, donde la carga de incendio fue materializada por vigas de madera, distribuidas en el ambiente conforme la distribución de los muebles y objetos del ensayo experimental, cuyas propiedades térmicas han sido: Densidad, Conductibilidad térmica, Calor específico, con valores respectivos de 400 kg/m³, 0.12 W/m.K y 1.34 kJ/kg.K, definidos conforme las indicaciones de la ABNT NBR 15220-2 (2005); Emisividad, con valor adoptado de 0.9; Poder Calorífico de 17500 kJ/kg, definido conforme las indicaciones del NP EN 1991-1-2 (2010); Temperatura de ignición de 210 °C, conforme el estudio realizado por Figueroa & Moraes (2009); Tasa de liberación de calor de 100 kW/m², conforme el estudio de Rocha (2014).

Tabla 2. Espesura y materiales de las capas de las paredes, techo y piso del compartimiento simulado.

Lado	Capa 1		Capa 2		Capa 3	
	Espesor (cm)	Material	Espesor (cm)		Espesor (cm)	Material
Pared P1	‘	Mortero de Cemento	10.0	Pared P1	‘	Mortero de Cemento
Pared P2	2.5	Mortero de Yeso	10.0	Pared P2	2.5	Mortero de Yeso
Pared P3	2.5	Mortero de Cemento	10.0	Pared P3	2.5	Mortero de Cemento
Pared P4	1.0	Mortero de Cemento	10.0	Pared P4	1.0	Mortero de Cemento
Techo	7.0	Ladrillo Cerámico	3.0	Techo	7.0	Ladrillo Cerámico
Piso	10.0	Concreto		Piso	10.0	Concreto

La geometría del modelo desarrollado para simulación computacional del incendio en el FDS es presentada en la Figura 4.

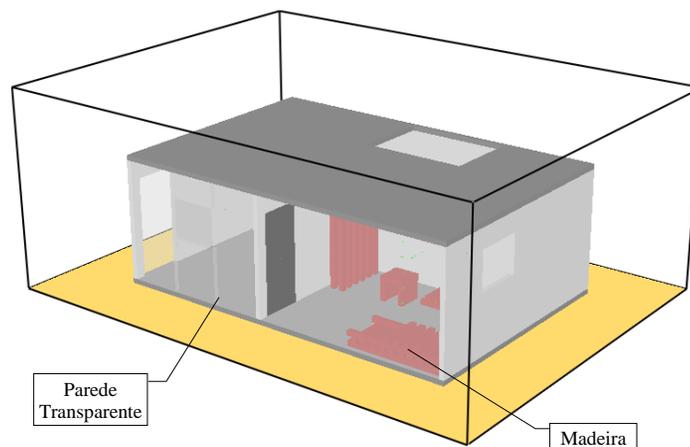


Figura 4. Modelo desarrollado en el FDS.

En las simulaciones de incendios hechas en el FDS, es necesaria la definición de una reacción del combustible gaseoso que actuará como un sustituto para todas las fuentes de combustible en potencial. Caso esta reacción no esté definida en la biblioteca standard del *software*, el usuario puede especificar la formulación química del combustible junto con los rendimientos de CO, hollín, y otros parámetros referentes al mismo (McGRATTAN *et al.*, 2016). En el modelo desarrollado en este estudio, el combustible de madera fue representado por la formulación química $\text{CH}_{1.7}\text{O}_{0.74}\text{N}_{0.002}$, con rendimientos de monóxido de carbono y hollín de 0.004 kg/kg y 0.015 kg/kg respectivamente. Estos rendimientos son expresados en cantidad de monóxido de carbono y hollín emitidos por unidad de masa de combustible consumido (WEINSCHEK *et al.*, 2014).

Para considerar la ignición del incendio que se ha dado a través del dispositivo de parafina en el ensayo experimental de Corrêa *et al.* (2017), se ha utilizado un quemador posicionado análogamente al dispositivo en el ensayo experimental. Este quemador fue desactivado después de 150 segundos, liberando aproximadamente 0.06% de la carga de incendio total, y tuvo la función de tan solo iniciar el incendio. Con eso, el aumento de temperatura ha generado una reacción en cadena, provocando la propagación del fuego a través de la quema de las vigas de madera que entran en combustión después de atingir su respectiva temperatura de ignición.

Para obtener lecturas de las temperaturas desarrolladas durante el incendio, fueron inseridos algunos medidores, posicionados análogamente a los termopares en el ensayo experimental (véase Figura 2). Fueron considerados los siguientes termopares: 01 – 08 (gases en el centro de la habitación), 09 y 10 (caras interna y externa de la pared P3), 11 y 12 (caras interna y externa de la pared P2), y 13 y 14 (caras interna y externa de la pared P1).

Así como en el ensayo experimental, en esta simulación computacional la ventana de la habitación incendiada fue considerada abierta durante toda la simulación, mientras que la puerta fue abierta solamente a los 18 minutos. En este intervalo de tiempo, entre el inicio del incendio y la abertura de la puerta, en el ensayo experimental las temperaturas máximas variaron entre 600 °C y 800 °C. Bajo estas condiciones de temperatura, la integridad de la vida humana ya se habría corrompido. Así pues, en la comparación de los resultados obtenidos, este estudio se ha detenido en los minutos iniciales del incendio, hasta la abertura de la puerta, como es presentado a continuación.

4. RESULTADOS

Así como en el ensayo experimental, en la simulación computacional realizada a través del *software* FDS (hasta 18 minutos) no ha habido generalización del incendio (*Flashover*). Eso se debe al agotamiento de oxígeno en el ambiente, visto que, con la puerta cerrada no ha habido ventilación cruzada que pudiera proporcionar el suministro de la cantidad suficiente del comburente para el desarrollo del fuego. De esta forma, como se puede observar en la Figura 5, el fuego ha quedado restringido a las vigas de madera que representaron la litera, presente en el ensayo experimental. En esta figura, el humo ha sido ocultado para efecto de visualización sólo del fuego.

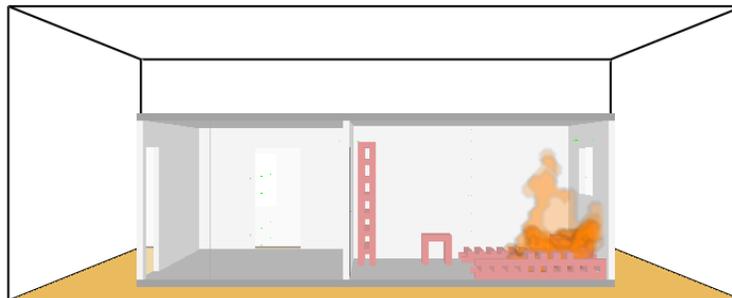


Figura 5. Simulación computacional en el FDS – Propagación del fuego.

Así como en el ensayo experimental, se ha observado que en menos de 5 minutos la habitación fue totalmente tomada por el humo, como se puede observar en la Figura 6.

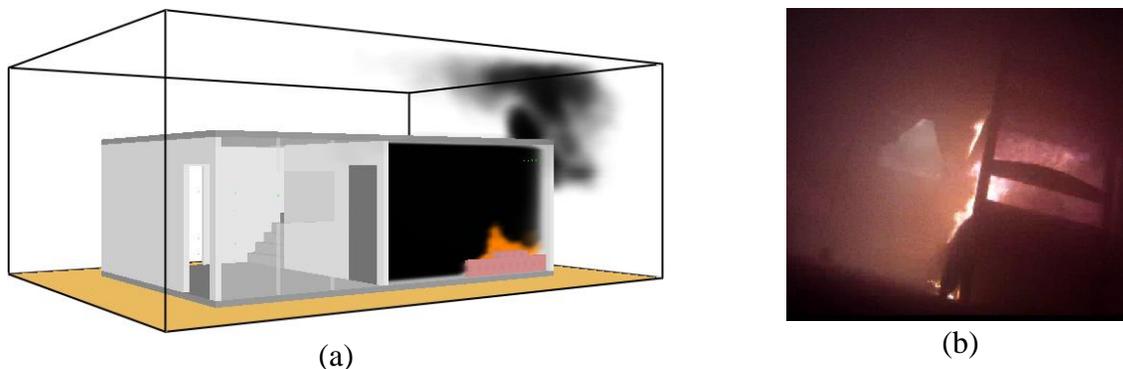


Figura 6. Propagación del humo a los 4 minutos de incendio: (a) Simulación computacional en el FDS; (b) Ensayo experimental de Corrêa *et al.* (2017).

En la simulación computacional no se ha observado los ciclos de combustión y exhaustión como en el ensayo experimental presentado por Corrêa *et al.* (2017). A pesar de eso, de un modo general, se ha observado que las temperaturas obtenidas con el modelo desarrollado han sido próximas a las temperaturas medias obtenidas en el ensayo experimental. En la Figura 7 son presentadas las temperaturas de los gases obtenidas a través del termopar 08, posicionado apenas abajo del techo del compartimiento (camada superior), en la simulación computacional en el FDS y en el ensayo experimental.

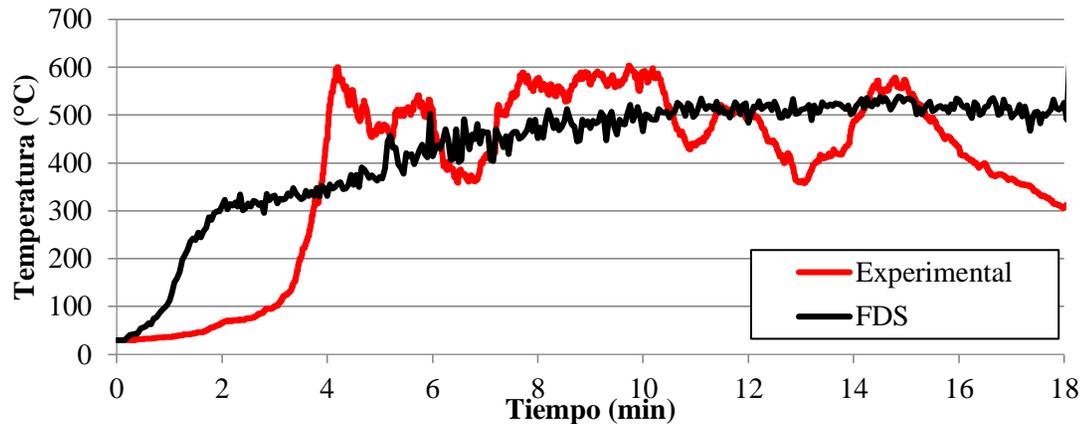


Figura 7. Temperaturas de los gases en la camada superior del compartimiento (termopar 08).

En la simulación computacional se observa un rápido crecimiento de las temperaturas hasta los 2 minutos, llegando a 300 °C; en seguida, el crecimiento ocurre más lentamente, hasta llegar a la base de 500 °C a los 6 minutos. En el ensayo experimental, este crecimiento repentino ocurre entre 2 y 4 minutos, hasta que la habitación sea tomada por el humo, promoviendo una saturación gaseosa en el ambiente. Después de eso comienzan los ciclos de combustión y agotamiento, culminando en picos de hasta 600 °C y valles de 360 °C de temperatura.

Este comportamiento se repite en todos los puntos de medición en el centro de la habitación. En la Figura 8 son presentadas las temperaturas de los gases obtenidas a través del termopar 04, posicionado a una altura de 120 cm del piso del compartimiento (camada intermediaria).

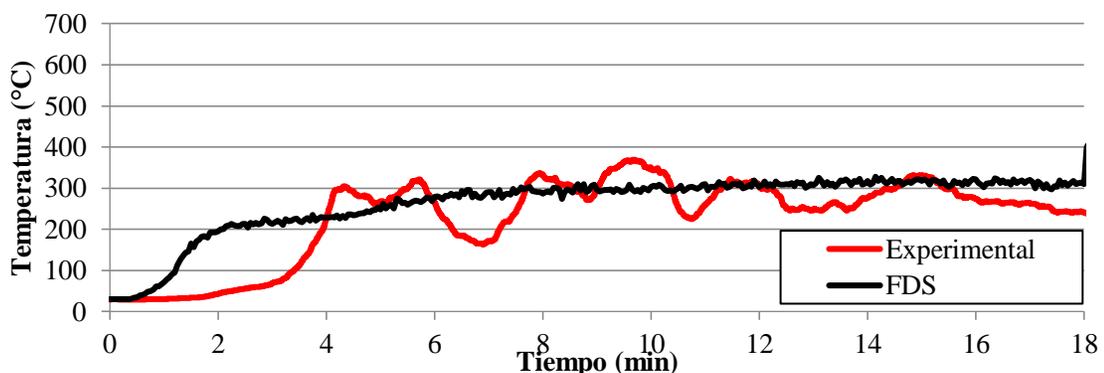


Figura 8. Temperaturas de los gases en la camada intermediaria del compartimiento (termopar 04).

En la camada intermediaria del compartimiento las diferencias en los resultados experimental y computacional se vuelven más discretas. Se observa que en el ensayo experimental la temperatura máxima es atingida a los 10 minutos, con valor de 360 °C. En este mismo momento, en la simulación computacional la temperatura medida es de 300 °C.

En la camada más inferior del compartimiento, los valores se invierten. En este punto las temperaturas medidas a través de la simulación computacional se vuelven mayores que las medidas

experimentalmente, aun así, la diferencia entre esos valores se mantiene siempre entre 50 °C y 100 °C. En la Figura 9 se presenta a las temperaturas de los gases obtenidas a través del termopar 01, posicionado a una altura de 30 cm desde el piso del compartimiento (camada inferior).

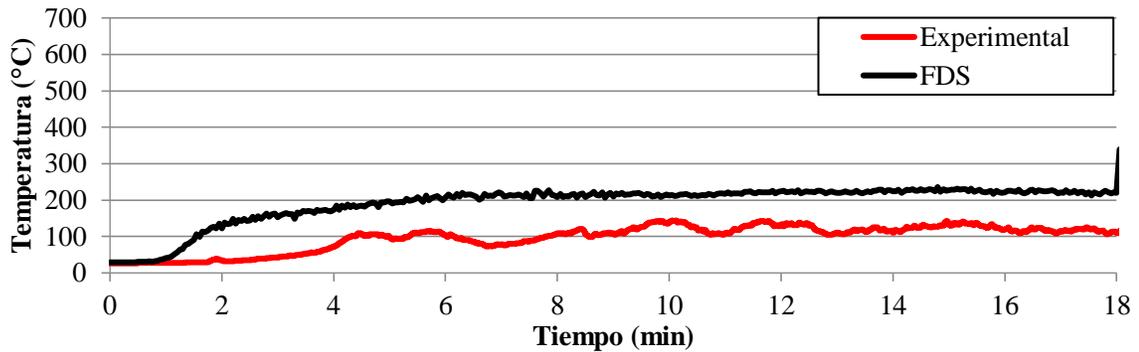


Figura 9. Temperaturas de los gases en la camada inferior del compartimento (termopar 01).

Como visto a través de las Figuras 7, 8 y 9, la simulación computacional ha presentado resultados de temperaturas más homogéneas a lo largo de la altura del compartimento. Desde estos resultados se puede delinear algunos perfiles de temperatura obtenidos en el centro del compartimento estudiado, como mostrado en la Figura 10.

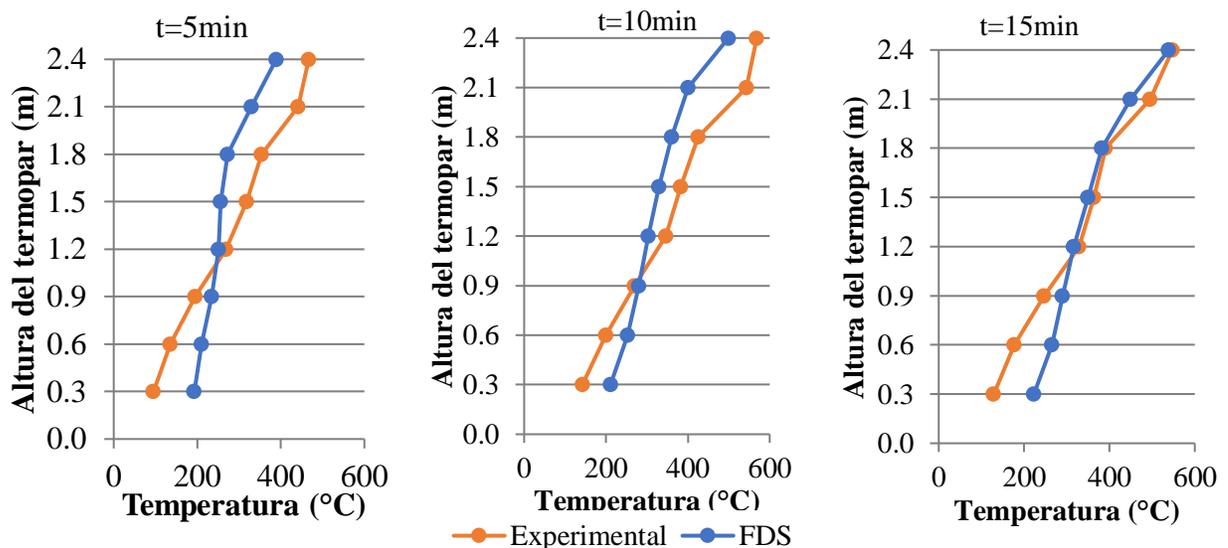


Figura 10. Perfiles de temperatura en el centro de la habitación (termopares 01 a 08).

Se observa que en las capas inferiores de la habitación los resultados de temperaturas obtenidas a través de la simulación computacional en general han sido más altas que las obtenidas experimentalmente.

En las capas superiores, en cambio, ese comportamiento es al revés, o sea, los resultados obtenidos experimentalmente han sido, en general, más altos que los obtenidos a través de la simulación computacional.

A pesar de la simulación computacional proporcionar un gradiente de temperaturas menos expresivo, es evidente la diferencia entre las alturas analizadas. A los 15 minutos de simulación, la camada más inferior del compartimento (a 30 cm desde el piso) se encuentra a 220 °C, mientras que la camada más superior (próxima al techo, a 240 cm desde el piso) se encuentra a 540 °C, comportamiento típico a causa de la convección de gases calientes en el ambiente.

La Figura 11 muestra el perfil de temperaturas en plano XZ de la habitación computacional, en el centro de la habitación incendiada, a los 15 minutos de simulación.

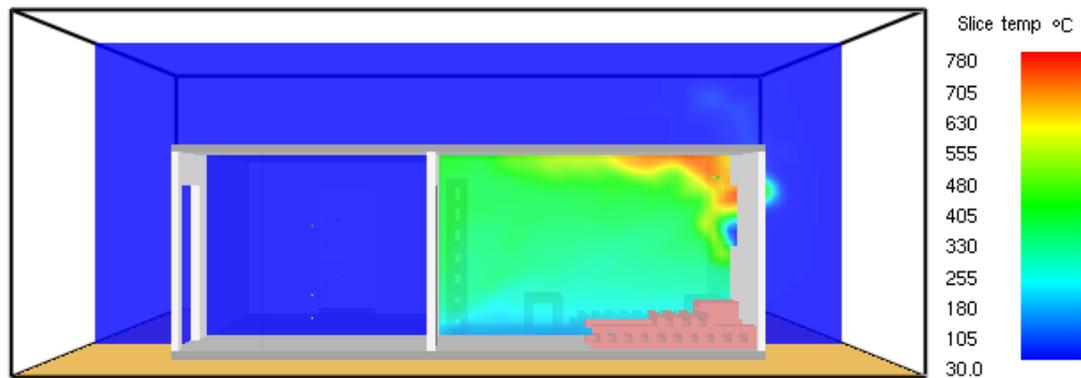


Figura 11. Perfil de temperaturas en el plano XZ en el centro de la habitación (Tiempo = 15 min).

A través de este perfil es posible visualizar el gradiente de temperaturas desarrollado en todo el plano XZ en la habitación en consecuencia de la convección de los gases del ambiente. Queda evidente que las temperaturas máximas ocurren próximo a la ventana que estaba abierta. En este mismo local también es posible visualizar una pequeña entrada de aire fresco proveniente del exterior de la edificación.

En lo que se refiere a las temperaturas medidas en las caras de las paredes, debido a las incertezas de las medidas, se ha posicionado termopares análogamente al ensayo experimental, proporcionando la medida de temperaturas que, de hecho, han sido absorbidas por las paredes a través de la radiación térmica del incendio, y complementariamente se ha posicionado termopares alejados algunos centímetros de las caras de estas, proporcionando la medición de temperaturas en los gases próximos a las mismas.

En el análisis de los resultados se ha constatado que las temperaturas capturadas en la simulación computacional que más se acercan a las obtenidas experimentalmente han sido aquellas medidas en los gases más cercanos a las paredes y no a las caras de estas. La Figura 12 muestra el desarrollo de temperaturas medidas en la pared P3, cuyo revestimiento interno era de argamasa de cemento.

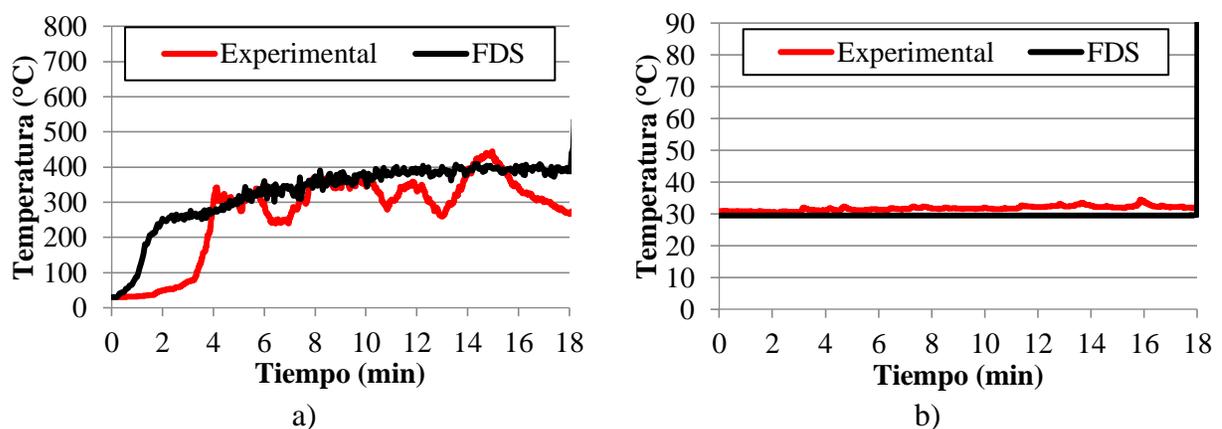


Figura 12. Temperaturas medidas en la pared P3: (a) cara interna (termopar 09); (b) cara externa (termopar 10).

En la cara interna de la pared (cara expuesta al incendio), las temperaturas máximas desarrolladas han sido de 400 °C, valor bien próximo al obtenido experimentalmente. En la cara externa de la pared, las temperaturas medidas, tanto computacionalmente cuanto experimentalmente, no pasan de 35 °C.

Las Figuras 13 y 14 muestran el desarrollo de temperaturas medidas en las paredes P2 y P1, cuyo revestimiento interno fue argamasa de yeso y mezcla gruesa, respectivamente.

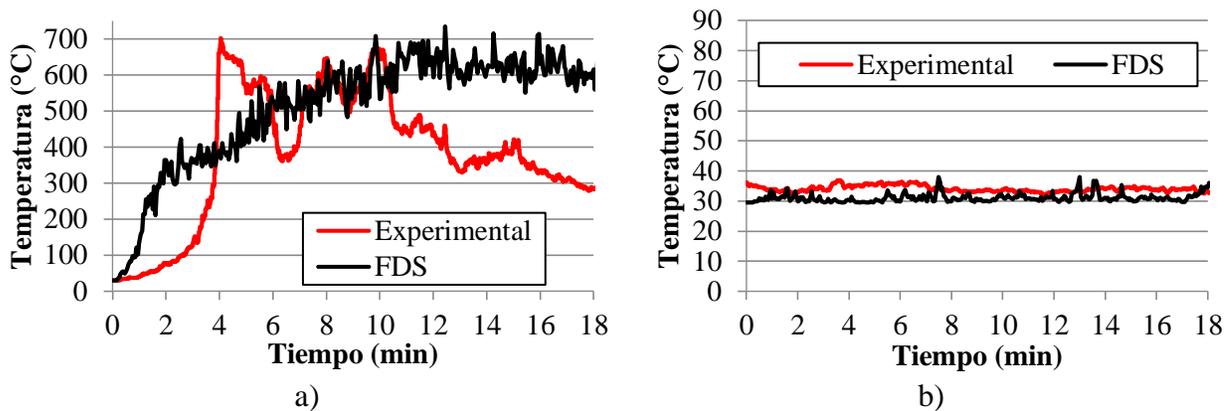


Figura 13. Temperaturas medidas en la pared P2: (a) cara interna (termopar 11); (b) cara externa (termopar 12).

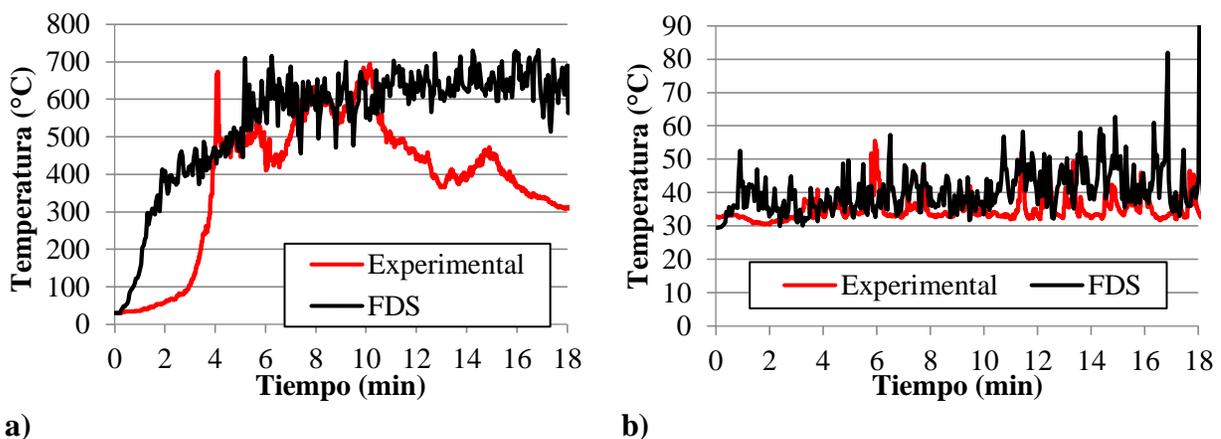


Figura 14. Temperaturas medidas en la pared P1: (a) cara interna (termopar 13); (b) cara externa (termopar 14).

En las caras internas de las paredes (caras expuestas al incendio), las temperaturas máximas desarrolladas fueron cerca de 700 °C, valor bastante cercano al obtenido experimentalmente. En estas medidas se nota una oscilación más grande en los resultados en las caras externas de las paredes, especialmente en la pared P1. Este hecho se justifica por los termopares estar posicionados cerca de la ventana de la habitación. Así, pues, debido a la incidencia del viento en el local, este instrumento midió temperaturas venidas de la convección de los gases que han salido de la habitación.

En la cara externa de la pared P2 las temperaturas medidas, tanto computacionalmente cuanto experimentalmente, no pasan de 38 °C. En la pared P1 la diferencia entre los resultados fue un poco más grande: en el ensayo experimental la temperatura máxima registrada fue de 65 °C, mientras que en la simulación computacional ese valor fue 82 °C.

5. CONCLUSIONES

Este estudio ha presentado la simulación computacional de un incendio en habitación de residencias unifamiliares típicamente incendiadas en la ciudad de Recife (Pernambuco, Brasil), cuyo ensayo experimental fue presentado por Corrêa *et al.* (2017).

La simulación computacional fue realizada a través del *software* FDS, y tuvo por objetivo el análisis del desarrollo de las temperaturas en la habitación incendiada. Delante de los resultados presentados, se puede enumerar las siguientes conclusiones:

- Así como en el ensayo experimental, no hubo generalización del incendio, debido al agotamiento del oxígeno en el ambiente.
- La simulación computacional no ha presentado a los ciclos de combustión, producción intensa de gases y exhaustivos como en el ensayo experimental. La ocurrencia de este comportamiento ha levantado dos hipótesis: (1) la admisión de estrategias simplificadas para el desarrollo de los modelos no contempla todos los fenómenos ocurridos en el ensayo experimental. Se subraya que en el FDS hay la posibilidad de inserción de inúmeras propiedades fisicoquímicas de los materiales, que permiten una caracterización más fiel de estos en una simulación computacional. Sin embargo, esas propiedades son difíciles de obtener, haciendo tal refinamiento también difícil de ser ejecutado; (2) el modelo de combustión del FDS no es adecuado para escenarios en que hay ausencia de oxígeno en el compartimento, llevando la simulación computacional bajo esta condición a desarrollar un comportamiento distinto del ensayo experimental.
- En las capas inferiores de la habitación, los resultados de temperaturas obtenidas a través de la simulación computacional generalmente han sido más altos que los obtenidos experimentalmente. En cambio, en las capas superiores, los resultados obtenidos experimentalmente han sido generalmente más altos que los obtenidos a través de la simulación computacional;
- Las temperaturas máximas desarrolladas en el incendio han ocurrido próximas a la ventana de la habitación, siendo esta la única fuente de suministro de comburente al incendio en los 18 minutos iniciales del ensayo experimental;
- En el centro de la habitación, la temperatura más alta medida fue 530 °C, próxima al techo (a 240 cm desde el piso), a los 15 minutos de simulación.
- En las paredes, las temperaturas más altas medidas han sido de aproximadamente 730 °C después de 10 minutos de simulación, en las caras internas de las paredes P1 y P2. Este comportamiento ya era esperado, pues estas eran las más próximas al foco inicial del incendio;
- A pesar de la estrategia simplificada adoptada, las temperaturas desarrolladas han quedado próximas a las temperaturas medias obtenidas en el ensayo experimental, mostrando que, a pesar de no reproducir fielmente el comportamiento ocurrido en el incendio real, el modelo desarrollado fue capaz de presentar resultados coherentes con las temperaturas desarrolladas durante el incendio.

4. AGRADECIMENTOS

Los autores dan gracias a la Coordinación de Perfeccionamiento de Personal de Nivel Superior (CAPES) por el incentivo de esta investigación.

5. REFERENCIAS

- 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
- Figueroa, 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.