

ANÁLISE COMPARATIVA DA EVOLUÇÃO DAS CHAMAS EM VARANDAS ENVIDRAÇADAS: ESTUDO COMPARATIVO UTILIZANDO FIRE DYNAMICS SIMULATOR (FDS)

*João Paulo Borges Thomaz*¹

<https://orcid.org/0009-0000-9012-1735>

*George Cajaty Braga*²

<https://orcid.org/0000-0001-9060-5844>

*Cristina Engel de Alvarez*³

<https://orcid.org/0000-0002-3898-8515>

RESUMO

Este estudo teve como objetivo analisar a influência do envidraçamento da varanda na propagação vertical do fogo em edifícios residenciais. A varanda é um elemento importante nas edificações brasileiras, contribuindo para o convívio social, o conforto térmico, a iluminação e a segurança contra incêndios. No entanto, a tendência de envidraçamento das varandas tem aumentado a carga de incêndio do ambiente e reduzido as medidas de segurança, o que pode facilitar a propagação das chamas. Para analisar essa questão, a metodologia utilizada consistiu em simulações de modelos genéricos no programa Fire Dynamics Simulator – FDS com uso de índices de compartimentação de incêndio aplicados na norma do Corpo de Bombeiros Militar do Espírito Santo (Brasil). Os resultados demonstraram que a retirada de índices de compartimentação torna a evolução das chamas de 3 a 4 vezes mais rápida do que no modelo padrão. Diante disso, há necessidade de revisões periódicas das normas de compartimentação e a fiscalização da manutenção destas medidas, além de constantes requalificações de ensaios computacionais para manter a segurança das pessoas e do patrimônio.

Palavras chave: Varanda envidraçada. Compartimentação de incêndio. Edifícios residenciais. Fire Dynamics Simulator (FDS). Segurança contra incêndios.

¹Bacharel em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade Federal do Espírito Santo, Mestrando em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade Federal do Espírito Santo. Integrante do quadro de praças do Corpo de Bombeiros do ES. E-mail: jpthomaz@hotmail.com.

²Coronel do Corpo de Bombeiros Militar do Distrito Federal (Quadro Complementar). Doutor em Física e Pós-doutorado em Segurança Contra Incêndio pelo NIST/EUA. E-mail: george.braga@gmail.com

³Professora Titular na Universidade Federal do Espírito Santo. Doutora em Arquitetura e Urbanismo pela FAUUSP. E-mail: cristina.engel@ufes.br

**COMPARATIVE ANALYSIS OF THE EVOLUTION OF FLAMES IN
GLAZED BALCONIES: COMPARATIVE STUDY USING FIRE
DYNAMICS SIMULATOR (FDS)**

ABSTRACT

This study aimed to analyze the influence of balcony glazing on the vertical propagation of fire in residential buildings. The balcony is an important element in Brazilian constructions, contributing to social interaction, thermal comfort, lighting, and fire safety. However, the trend of glazing balconies has increased the fire load of the environment and reduced safety measures, which may facilitate the spread of flames. To analyze this issue, the methodology used consisted of simulations of generic models in the Fire Dynamics Simulator - FDS program using fire compartmentation indices applied in the standards of the Espírito Santo Military Fire Brigade (Brazil). The results showed that the removal of compartmentation indices makes the evolution of the flames 3 to 4 times faster than in the standard model. Therefore, there is a need for periodic revisions of compartmentation standards and the supervision of the maintenance of these measures, in addition to constant requalifications of computational tests to maintain the safety of people and property.

Keywords: Glassed-in balcony. Fire compartmentation. Residential buildings. Fire Dynamics Simulator (FDS). Fire safety.

Artigo Recebido em 16/05/2023
Aceito em 29/09/2023
Publicado em 10/10/2023

1. INTRODUÇÃO

A varanda é um elemento presente em muitas edificações no Brasil, seja em casas ou apartamentos, e é vista como um atrativo por ser um espaço de conexão com o exterior. No entanto, a terminologia usada para descrever essa área é variada, tanto na linguagem cotidiana quanto na arquitetura, e os usos são diversos.

As varandas têm uma função social e de conforto ambiental como um espaço para encontros e transição entre interior e exterior, e fatores como ventilação e iluminação são elementos a serem considerados no projeto. Além disso, a varanda proporciona sombra para áreas internas, contribuindo para o conforto térmico, lumínico e acústico da edificação. O fechamento com painéis de vidro é uma prática comum no Brasil, permitindo maior controle sobre as condições climáticas e ganho de área útil na unidade habitacional.

Com o aumento do uso de sistemas de envidraçamento em varandas, surge uma preocupação adicional com a segurança contra incêndios e pânico. O envidraçamento propõe um novo uso do espaço, com mobiliário e equipamentos que aumentam a carga de incêndio. Além disso, o fechamento da varanda muitas vezes reduz as distâncias mínimas de segurança previstas na norma de compartimentação, pois a aba horizontal da varanda não é considerada na distância de segurança a ser percorrida.

Na cidade de Vitória, existem diversas condicionantes que levam os usuários a fechar a varanda, sendo a poluição um fator potencial na hora da escolha do uso de vedação do ambiente. Para Jorge (2012, p. 427), “a associação de varandas a um determinado ambiente é consequência da possibilidade de efetuar o fechamento dessas, procedimento usual que permite controlar as condições climáticas, acústicas e potencializar a privacidade dos moradores”.

A Norma Técnica 11/2010 do Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Espírito Santo (CBMES) estabelece parâmetros para a compartimentação de incêndio em edifícios, a fim de retardar a propagação do fogo entre unidades. É importante revisar constantemente as normas de segurança contra incêndios para se adaptar às novas propostas arquitetônicas e evitar perdas humanas e materiais.

Observa-se que as simulações são estratégias adotadas para a produção de conhecimento técnico-científico, permitindo a comprovação de teorias e auxiliando na elaboração de normas mais eficazes. No caso de incêndios, há uma grande variedade de cenários possíveis e, conseqüentemente, de fatores de interferência, o que dificulta a previsão do comportamento do fogo, mesmo quando são considerados parâmetros como carga de incêndio, ventilação, velocidade e direção do vento. Por isso, as simulações ajudam a reduzir os custos e o tempo necessários para testar as hipóteses, permitindo a realização de ensaios apenas do número de vezes necessárias. Assim, é possível obter informações valiosas sobre a propagação do fogo, a distribuição das temperaturas, o movimento da fumaça e a concentração dos gases, contribuindo para o desenvolvimento de soluções mais efetivas para a prevenção e combate a incêndios.

2. METODOLOGIA

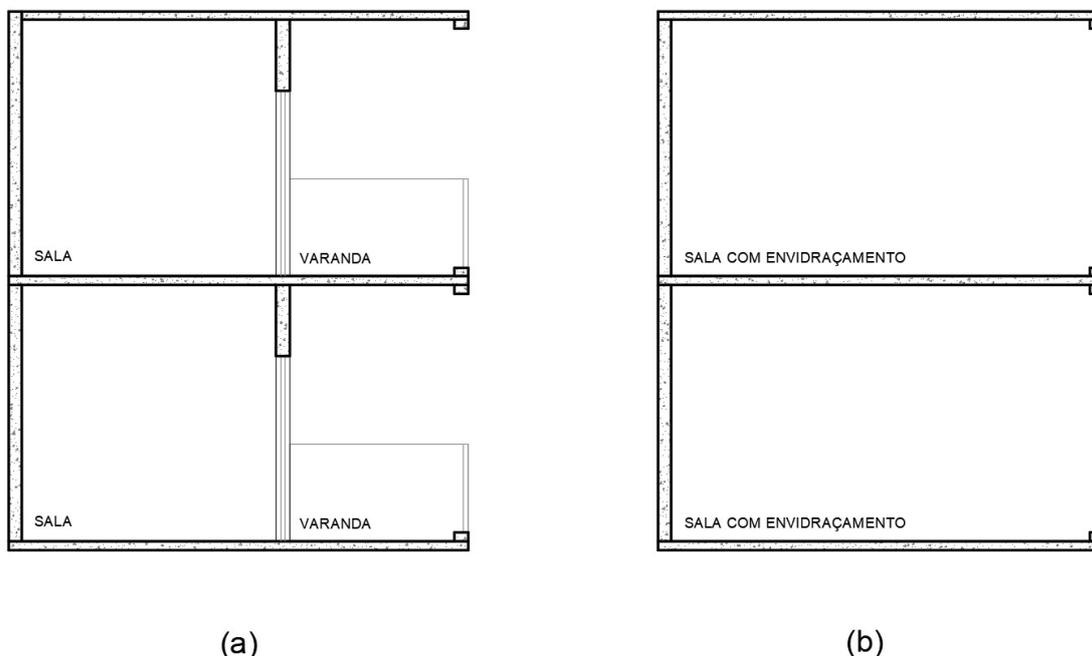
O estudo consistiu na análise comparativa da evolução das chamas em dois pavimentos consecutivos, simulando um incêndio no pavimento inferior se propagando para o pavimento superior de um edifício residencial. A simulação foi feita em um modelo com varandas aberta e outro com varanda envidraçada, conforme Figura 1, com carga de incêndio iguais para ambos modelos. O objetivo foi verificar se há influência da varanda envidraçada na evolução do

incêndio em edifícios verticais, com o intuito de propor adequações na norma de compartimentação de incêndio vigente. A dinâmica da transição das chamas no sentido vertical para a unidade imediatamente superior foi analisada em dois cenários distintos, buscando-se a confirmação ou não da hipótese. Vale ressaltar que essa dinâmica se repete para os pavimentos superiores em uma situação real, independentemente da quantidade de andares da edificação, sendo influenciada pelo encontro de elementos que proporcionem a queima de materiais combustíveis.

Para Rodrigues (2009), as normas vigentes para compartimentação estavam defasadas, tendo a necessidade de reavaliar os índices de compartimentação vertical do incêndio através de testes que pudessem comprovar a eficácia das legislações vigentes. O autor realizou ensaios em escala reduzida de uma edificação e por meio do FDS, a fim de avaliar os efeitos do incêndio em fachadas e sua propagação vertical para outros pavimentos.

Yuen *et al.* (2014) realizaram experimentos no FDS a fim de orientar os bombeiros australianos no combate a incêndio em edifícios residenciais. Para isso, determinaram as cargas de incêndio para o ambiente a partir da literatura existente e simularam em um modelo experimental antes de transpor para o FDS, onde realizaram simulações para melhor compreensão da evolução do fogo.

Figura 1 - Corte esquemático do modelo proposto. (a) modelo com varanda aberta. (b) modelo com varanda fechada.



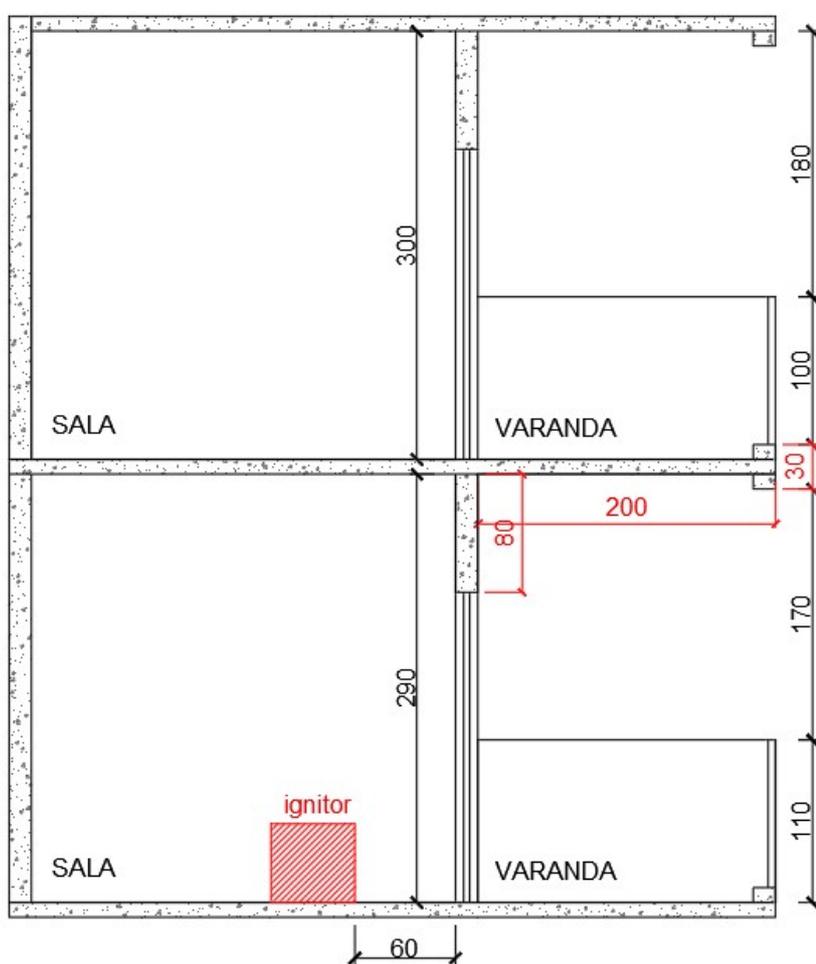
Fonte: os autores (2023).

Para a simulação foi utilizado o programa Fire Dynamics Simulator – FDS, que é um simulador de incêndio livre desenvolvido pelo NIST (National Institute of Standards and Technology) baseado na Computational Fluid Dynamics (CFD). Este programa computacional utiliza a equação de Navier-Stokes para baixas velocidades, com fluxo termicamente orientado e com ênfase em transporte de calor e fumaça. Neste tipo de modelagem podem ser avaliadas a dinâmica de um incêndio e a movimentação da fumaça (MCGRATTAN et al., 2013).

O modelo consiste de uma sala e uma varanda que são mantidas em ambas as simulações. No primeiro cenário, a varanda é aberta, com apenas um guarda-corpo de vidro de 1,10 metros de altura e o acesso entre a sala e a varanda é por meio de uma porta de vidro. No segundo cenário, a varanda tem as mesmas dimensões, mas é considerada envidraçada, criando um único espaço com a sala.

A arquitetura do experimento foi concebida respeitando o valor mínimo de 1,20 metros para efeitos de compartimentação vertical descrito na Norma Técnica 11 (CBMES, 2010). Para aplicação no modelo de varanda aberta, adotou-se o valor de 3,10 metros (0,80 m + 2,00 m + 0,30 m), conforme mostra Figura 2.

Figura 2 - Corte esquemático com as distâncias entre pavimentos (verga + peitoril) do modelo projetado com varanda aberta para simulação computacional.



Fonte: os autores (2023).

No modelo de varanda envidraçada, foram mantidas as mesmas medidas, porém com o envidraçamento o valor mínimo para compartimentação

vertical foi suprimido para 33% do valor normativo, como pode ser visto na Figura 3.

Figura 3 - Planta baixa esquemática da edificação projetada com envidraçamento de varanda para as simulações computacionais. Medidas em centímetros e sem escala.



Fonte: os autores (2023).

Yokoi (1960) *apud* Rosso (1975) concluiu em suas pesquisas que as chamas que saem pela janela apenas terão efeito considerável para a propagação vertical direta do incêndio quando excederem 500°C, bem como as temperaturas da pluma que atingem externamente o pavimento superior serão menores ou no máximo iguais a este valor, sendo capazes de propagarem o fogo, mas não de comprometerem a resistência ao fogo dos elementos construtivos externos.

Quando a compartimentação for adequadamente projetada, construída e mantida, tendo aberturas protegidas, ela deverá ser capaz de conter incêndios de severidade máxima em qualquer tipo de ocupação (MARCATTI *et al.*, 2008).

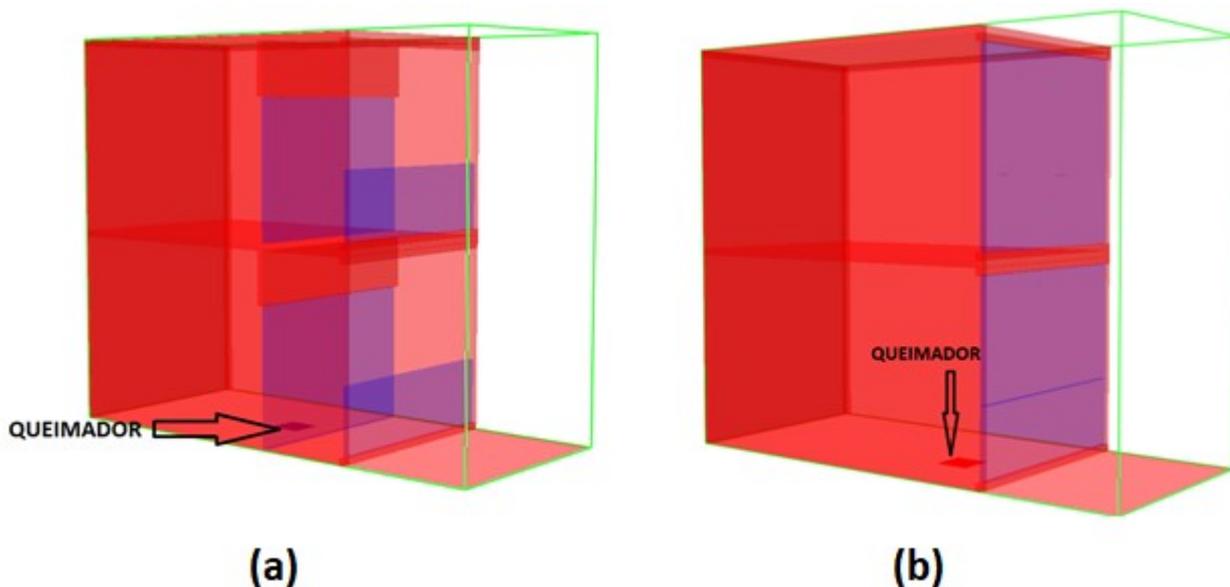
A norma técnica NBR 7199, estabelecida pela ABNT, define as diretrizes para sistemas de envidraçamento de sacadas, requisitos para guarda-corpos em edifícios e especificações sobre o tipo de vidro a ser usado em cada aplicação. Para este estudo, os vidros da porta, guarda-corpo e envidraçamento foram escolhidos do tipo laminado, espessura de 10 mm, em conformidade com a NBR 7199 de 2016 e a NBR 14718.

Segundo Marcatti *et al.* (2008), carga de incêndio é a medida do calor máximo que seria liberado se todos os combustíveis em determinada área queimassem. A máxima liberação de calor é produto do peso de cada combustível multiplicado pelo seu potencial calorífico. Em um edifício típico, a carga de incêndio inclui mobiliário, acabamento interno, acabamento do piso e elementos estruturais.

A carga de incêndio é a quantidade de energia que pode ser liberada pelos materiais presentes em uma edificação quando entram em combustão, e é um fator determinante para a gravidade do incêndio. Para converter unidades de medida, é utilizada a fórmula (1) desenvolvida por Bailey (2008). Essa fórmula permite a conversão da carga de incêndio (q) multiplicada pela área de interferência (A_f) em MJ/m² para a potência liberada (Q) em MW durante um incêndio de 20 minutos, qual seja:

$$Q = (A_f \times q) / 1200 \quad (1)$$

Figura 4 - Compartimento simulado pelo FDS mostrando esquematicamente a localização do queimador (“vent”) no compartimento inferior do modelo com varanda aberta (a) e varanda envidraçada (b).



Fonte: os autores (2023).

Para determinar a carga de incêndio utilizada nos ensaios, foram considerados os valores indicados na Norma Técnica 04 – Carga de Incêndio (CBMES, 2020) para edifícios residenciais, que é de 300 MJ/m². Ao aplicar essa carga de incêndio à área dos cômodos, que foi de 15 m² para a varanda aberta e 21 m² para a varanda envidraçada, obteve-se os valores correspondentes a 3,75 MW e 5,25 MW, respectivamente, em escala real. Para equiparar a carga de incêndio nos ensaios em escala reduzida, foi criado um queimador de 50 x 50 cm no compartimento inferior, como mostrado na figura 4. Para ambos os modelos, foi utilizado o valor encontrado para a varanda aberta (15 m²) na fórmula de carga de incêndio mencionada anteriormente para efeito de parametrização. A figura 4 apresenta o esquema da disposição do queimador nos dois modelos.

Nilsson *et al.* (2018) afirmam que os modelos gerados pelo Pyrosim/FDS são considerados adequados como uma ferramenta de simulação de

propagação externa de incêndios em fachadas constituídas de materiais não combustíveis.

Para a radiação, é apresentada na tabela 1, uma forma simplificada com as taxas de liberação de calor e os efeitos térmicos gerais nos materiais e na pele humana, baseadas na relação de Stefan-Boltzmann.

Tabela 1 - Efeitos da radiação térmica nos sólidos (madeira, plásticos) e pele humana.

Fonte	Fluxo de calor por radiação (kW/m ²)	Temperatura da superfície (°C)	Efeitos observados
Sol durante o verão	1	40	Sem efeitos
Distante de um incêndio	2 a 4	45	Dor após 30 segundos
Próximo de um incêndio	4 a 6	54	Dor após 10 segundos
Muito próximo de um incêndio	10	100 a 200	Chamuscamento de alguns materiais; Derretimento (fusão) de alguns plásticos.
Junto do incêndio	20	200 a 300	Alguns materiais celulósicos e sintéticos ignem em menos de 60 s
Dentro do incêndio	30	300 a 400	Autoignição de muitos materiais entre 0-30 segundos (madeira em >60 s
Junto às chamas	50	400	Autoignição de todos os materiais
Pós-flashover	120 a 150	> 500	Combustão rápida

Fonte: ASTM E1321(1997): Standard Test Method for Determining material ignition and flame spread properties apud DeHaan (2007).

Todos os materiais previstos no modelo a ser simulado necessitam de dados de condutividade térmica, densidade e calor específico para que sejam inseridos no FDS, servindo de base para o experimento. Na tabela 2 são indicados os parâmetros utilizados no modelo obtidos a partir dos estudos publicados por RIVERO (1986) que classificou o comportamento térmico de

alguns vidros utilizados na construção civil e para o tijolo foi considerado a ABNT NBR 15220-2 que trata do desempenho térmico das edificações.

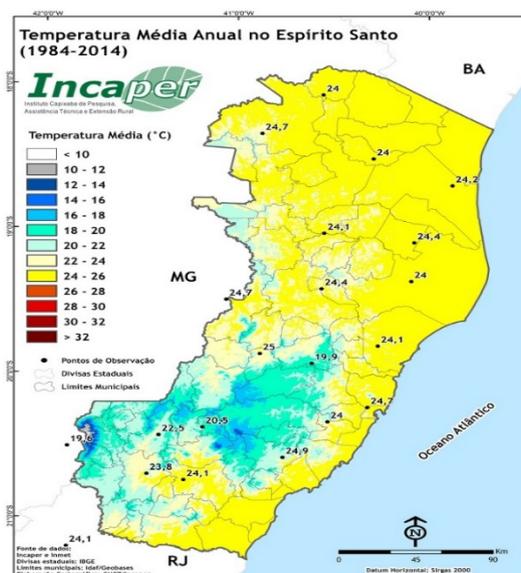
Tabela 2 - Propriedades Térmicas dos Materiais adotados no modelo a ser simulado.

Propriedades Térmicas dos Materiais			
Material	Condutividade térmica (W/mK)	Calor específico (MJ/m ³ K)	Densidade (Kg/m ³)
Tijolo	0,90	0,92	1600
Vidro	1,049	0,837	2300

Fonte: os autores (2023)

Foram consideradas as seguintes condições ambientais: a temperatura ambiente padrão do FDS é de 20,0 °C, porém foi considerada o valor de 25,7 °C que foi a média de temperatura indicada pelo Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural INCAPER, conforme mostra a Figura 5. O fluxo inicial devido ao vento foi considerado e a pressão atmosférica adotada foi de 101.325,0 Pa (padrão FDS) e umidade relativa do ar de 40% (padrão FDS).

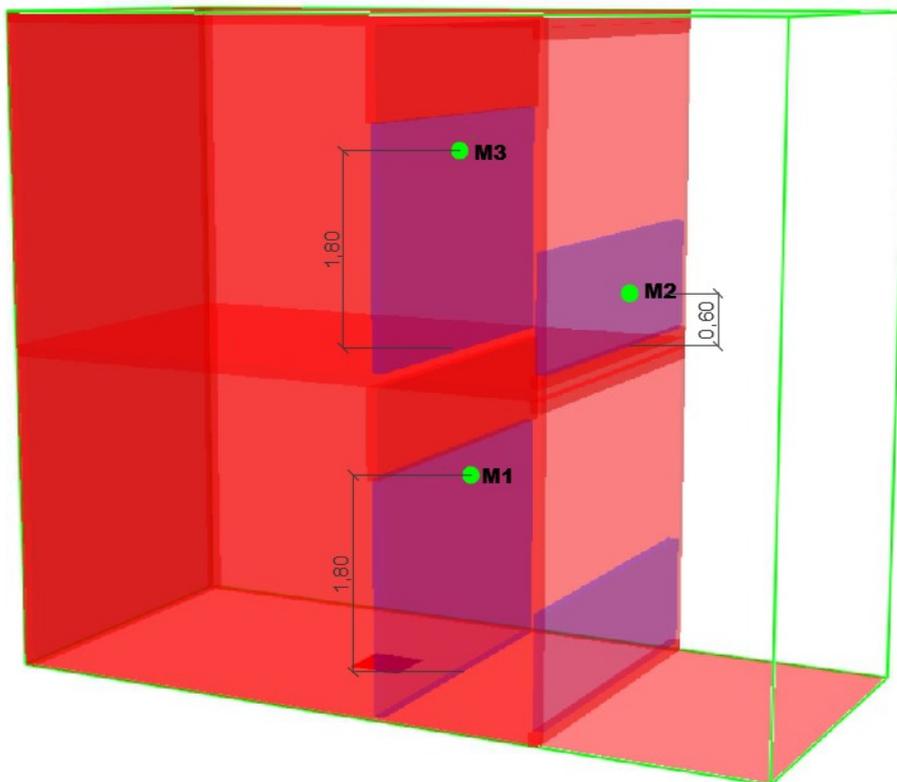
Figura 5 - Temperatura média anual no Espírito Santo (1984-2014)



Fonte: <https://meteorologia.incaper.es.gov.br/mapas-de-temperatura-media>.
(acessado em 23 de jan. de 2023).

Em relação às dimensões da malha, buscando o equilíbrio entre a precisão dos resultados e o custo computacional, no compartimento a malha adotada foi mais refinada, com dimensões 0,10m x 0,10m x 0,10m. As espessuras das paredes e lajes foram de 0,20m a fim de melhor se ajustarem à malha escolhida para simulação computacional. Já a espessura da carga de incêndio foi de 0,10 m, tendo em vista que a malha desse compartimento tem 0,10m de aresta.

Figura 6 - Localização esquemática dos dispositivos de medição de temperatura no modelo projetado com varanda aberta para simulação computacional.



Fonte: os autores (2023).

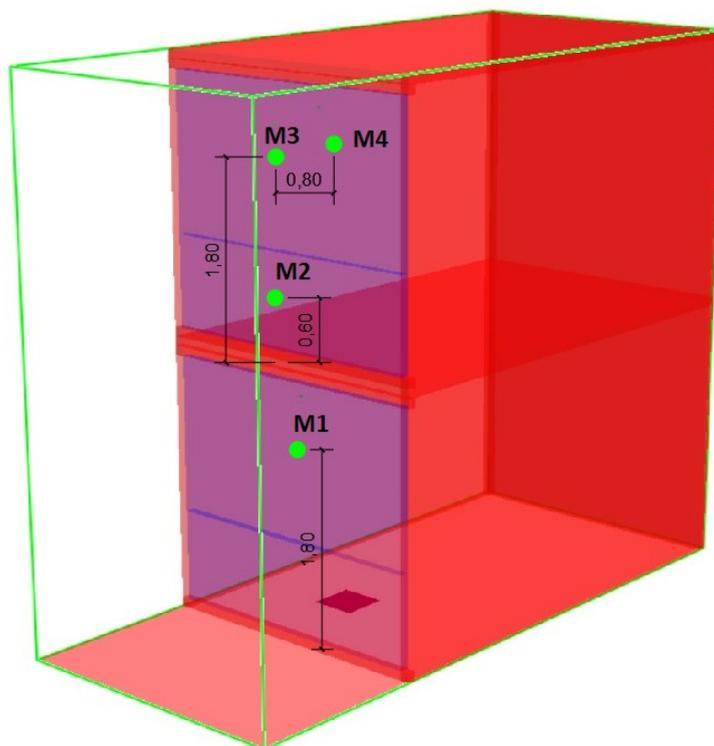
Na parte externa, representada por linhas verdes na figura 6, foi definido um espaço de ventilação para o movimento natural da fumaça, assim não acumulando na parte superior do pavimento acima do início das chamas.

Para fins de medição e aferição dos resultados, foram posicionados pontos para captação da temperatura durante o tempo previsto para o incêndio, que foi determinado em 1200 segundos. O fator determinante para a escolha do tempo foi a otimização da simulação, pois o processo demanda diversos testes e refinamento até o produto final. Ainda para Hassani *et al.* (1994) nos seus estudos houve o rompimento do vidro quando a temperatura atingiu 450 °C, temperatura esta que ocorreu nos testes de simulação próximo dos 5 minutos. A escolha das alturas dos termopares foi determinada de forma a manter a mesma altura para os pontos mais altos, sendo este 1,80m que equivale a 2/3 da altura do pé direito do modelo que possui 2,70m. Neste ponto a capa térmica apresenta maior poder calorífico para que ocorra o rompimento da barreira de vidro. O ponto com altura de 0,60m foi definido em um ponto médio do vidro da varanda e foi mantido para os dois casos.

No modelo de varanda aberta foram instalados dispositivos de medição em pontos estratégicos para medir a temperatura dos sólidos, conforme mostra a Figura 5. O ponto M1 foi colocado na face interna da porta de vidro, M2 na face externa do guarda-corpo da varanda do pavimento superior, e M3 na face externa da porta de acesso à varanda. A seleção desses pontos foi feita considerando a quebra dos vidros e a movimentação da fumaça para o pavimento superior.

Para o modelo de varanda envidraçada, foram instalados quatro dispositivos de medição para captar a temperatura em diferentes pontos do prédio durante a simulação. Os medidores foram fixados na face interna do vidro do pavimento incendiado (M1), na face externa do guarda-corpo de vidro da varanda do pavimento superior (M2), na face externa do envidraçamento da varanda do pavimento superior (M3) e no interior do pavimento superior (M4), afastado do vidro, para medir a temperatura após 1200 segundos. Os pontos de inserção dos dispositivos foram escolhidos, conforme Figura 7, considerando a quebra dos vidros e a movimentação da fumaça para o interior do pavimento superior.

Figura 7 - Localização esquemática dos dispositivos de medição de temperatura no modelo projetado com varanda envidraçada para simulação computacional.



Fonte: os autores (2023).

O FDS possui uma ferramenta para medir o valor da temperatura superficial de sólidos (*wall temperature*), considerando a taxa de absorvidade do material para determinar sua temperatura. Este dispositivo não mede o comportamento da temperatura no interior do sólido, porém fornece o valor superficial da temperatura.

Cada *Wall Temperature* posicionado irá indicar o ponto em que houve rompimento do material da porta e da estrutura da varanda que é de vidro. No estudo de Hassani *et al.* (1994), foi constatado que o vidro exposto a uma temperatura de 450 °C se rompe devido a energia liberada pelo calor do incêndio.

Os dispositivos instalados foram posicionados de forma estratégica para registrar a temperatura em pontos específicos e, também, para indicar o

momento em que o vidro de cada ambiente irá romper. Dessa forma, é possível mensurar a influência do envidraçamento na evolução do incêndio, uma vez que a quebra do vidro pode permitir que o fogo se propague mais rapidamente para outros ambientes.

3. RESULTADOS

As duas simulações foram realizadas nas mesmas condições de configuração do FDS, índices da norma de compartimentação, taxa de liberação de calor do ignitor e carga de incêndio.

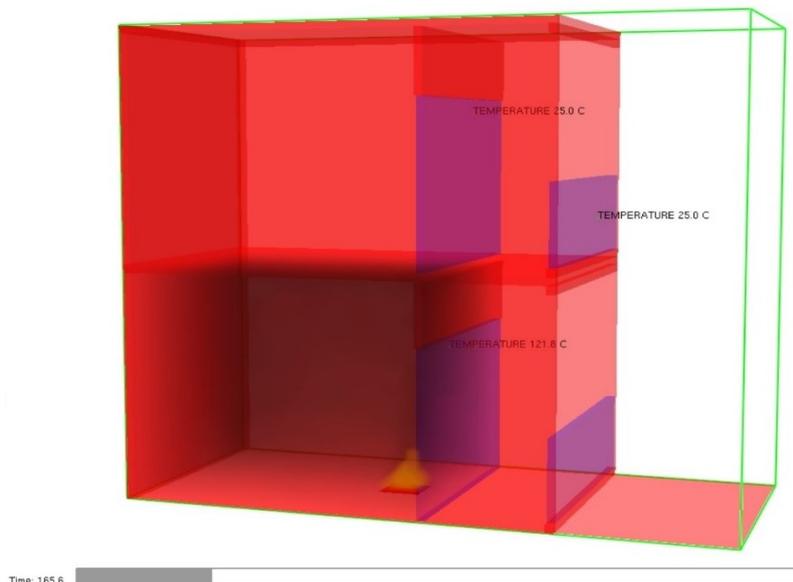
Seguem explicitados os resultados obtidos, em especial nas temperaturas observadas nos medidores M1, M2 e M3 de cada modelo.

3.1 Dinâmica do incêndio no modelo com varanda aberta

A simulação começa no momento 0 segundos com a ignição do objeto ignitor, cuja potência aumenta gradualmente até atingir o máximo de 3,75 MW configurado no sistema.

Na Figura 8, pode-se observar que aos 165 segundos de simulação, a temperatura do ambiente atinge 121,8 °C, o que impede a presença humana devido à baixa disponibilidade de oxigênio, excesso de calor e alta densidade de fumaça.

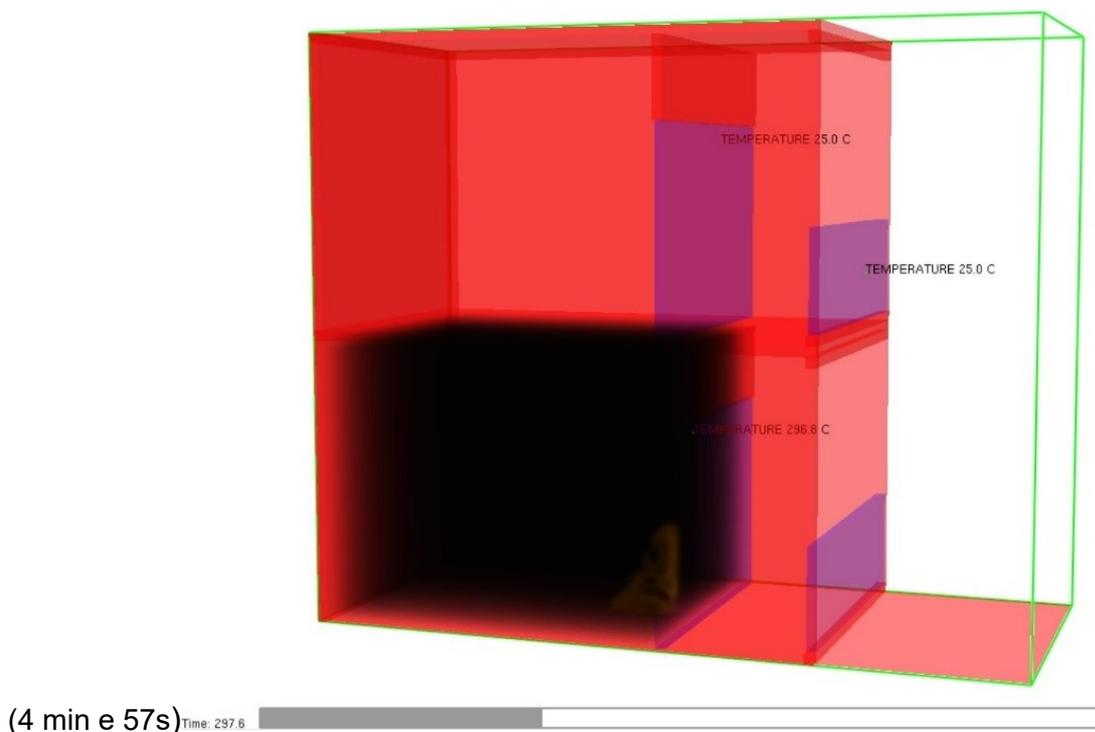
Figura 8 - Cronologia do incêndio no modelo de varanda aberta – tempo 165s (2 min e 45s).



Fonte: os autores (2023).

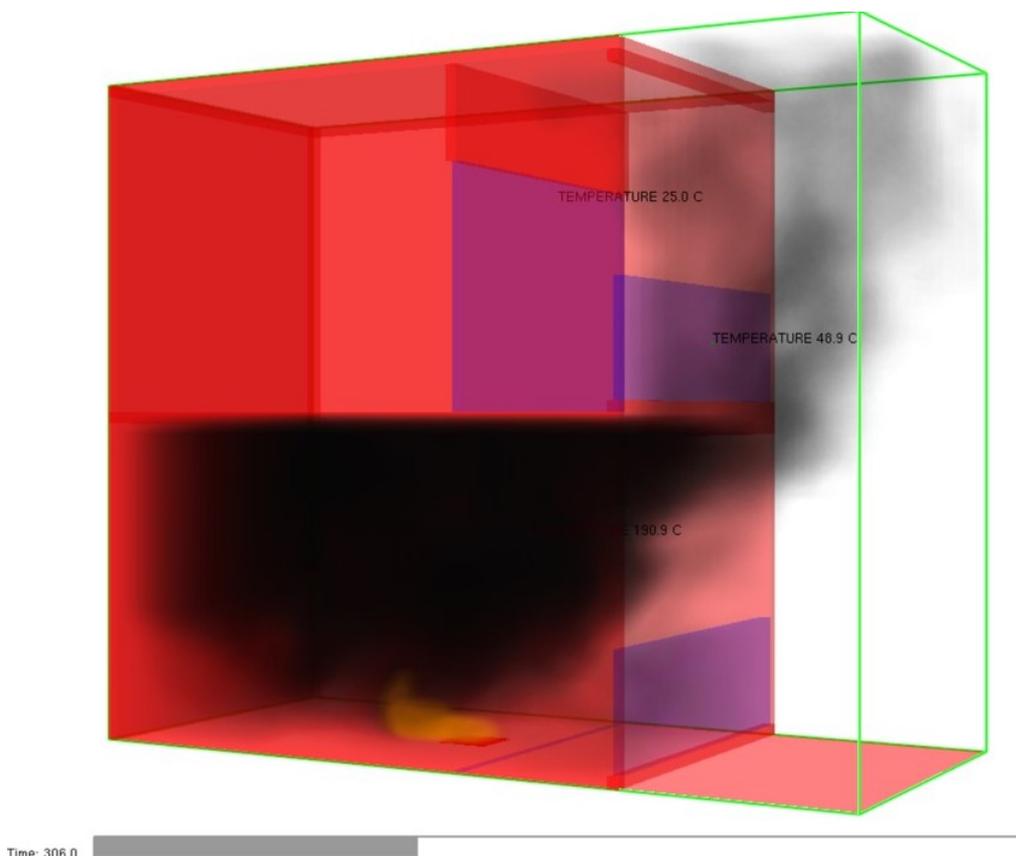
A Figura 9 retrata o momento em que a capa térmica já se espalhou por todo o ambiente, com a temperatura variando entre 300 °C e 450 °C, pouco antes da quebra do vidro da porta do pavimento incendiado.

Figura 9 - Cronologia do incêndio no modelo de varanda aberta – tempo 297s



Após a quebra do vidro da porta de acesso a varanda aberta (306 segundos ou 5 minutos e 6 segundos), a fumaça se espalha para o pavimento superior, resultando em um aumento de temperatura de 49,8 °C no vidro do guarda-corpo do pavimento superior. No compartimento incendiado, com a entrada de oxigênio e ventilação, a temperatura reduz significativamente para valores entre 190 °C e 240 °C. Na Figura 10, é possível observar que a fumaça se movimenta verticalmente e, após o rompimento do vidro, começa a acumular calor no pavimento superior.

Figura 10 - Cronologia do incêndio no modelo de varanda aberta – tempo 306s (5 m e 06 s).

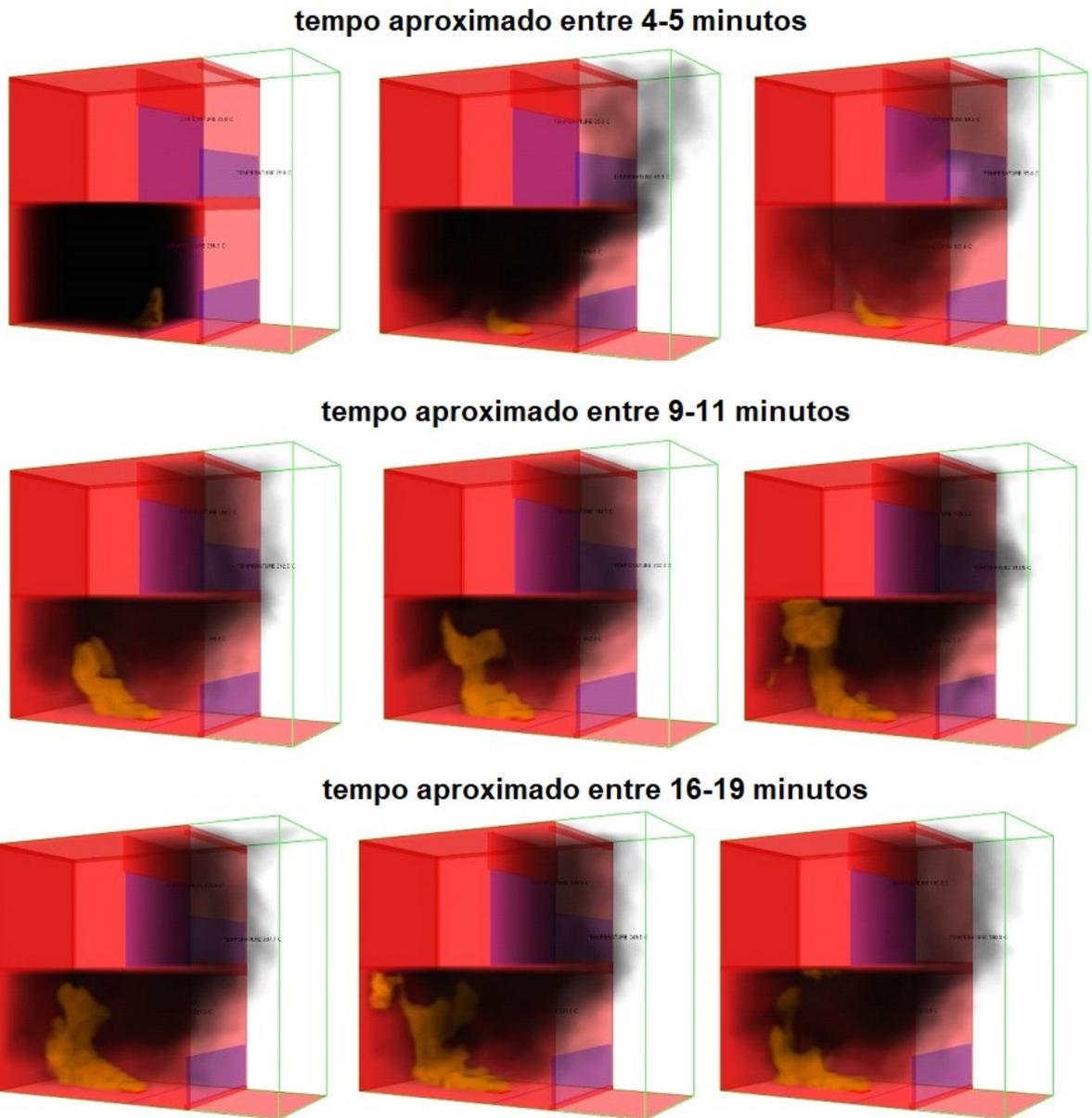


Fonte: os autores (2023).

A partir deste momento, com a manutenção das chamas no pavimento inferior a fumaça continua o movimento vertical provocando acúmulo de

temperatura na varanda superior. Na Figura 11, podem ser vistos três intervalos de tempo e o comportamento da fumaça na simulação.

Figura 11 - Cronologia do incêndio modelo computacional varanda aberta.



Fonte: os autores (2023).

Durante a queima do material, é possível observar que não houve acumulação de fumaça no interior da sala, permanecendo a fumaça restrita à varanda aberta. A temperatura máxima foi alcançada somente ao final do

experimento, quando se aproximou de 200 °C no medidor M3 que estava disposto na porta entre a sala e a varanda.

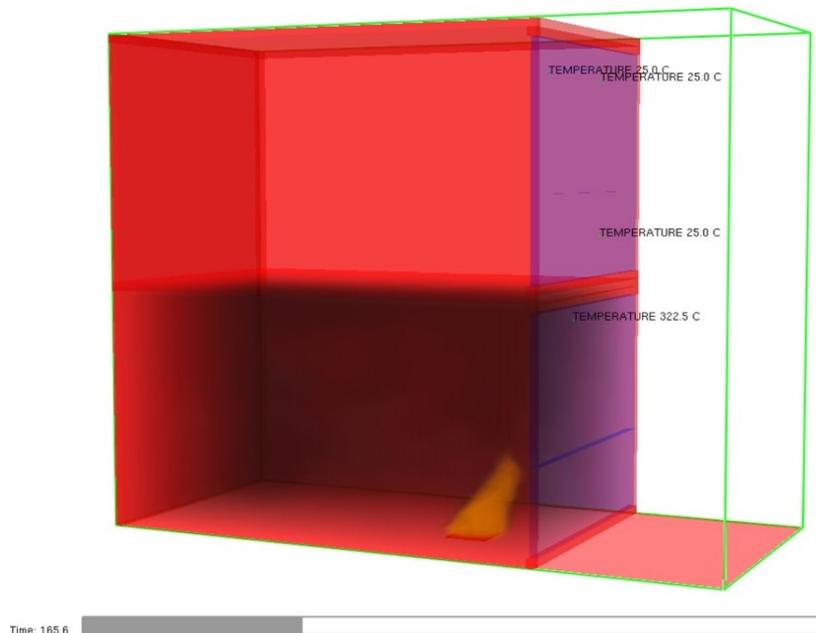
3.2 Dinâmica do incêndio no modelo com varanda envidraçada

A simulação em questão tem início no tempo 0 segundos, com a ignição do objeto ignitor, cuja potência é gradualmente aumentada ao longo da simulação até atingir o máximo configurado no sistema, que é de 3750 W. É importante mencionar que o ponto inicial da simulação é o mesmo do experimento anterior, no qual o ignitor tem um aumento gradual de temperatura até atingir o ponto máximo definido no modelo.

Um ponto relevante a ser destacado é que a Figura 12 demonstra que, aos 165 segundos de simulação, a temperatura no interior do compartimento incendiado alcançou a marca de 322,5 °C. É importante notar ainda que, quando comparado ao experimento anterior com varanda aberta, esse valor é cerca de três vezes maior.

Acredita-se que uma das razões para a temperatura no interior do compartimento incendiado ter alcançado três vezes mais no experimento em questão em relação ao modelo com varanda aberta seja a proximidade do vidro com o teto do ambiente, com uma distância de apenas 0,10m. Em contrapartida, no modelo com varanda aberta, há uma distância maior de 0,80m de alvenaria antes da porta, o que provavelmente prolongou a resistência da falha do vidro.

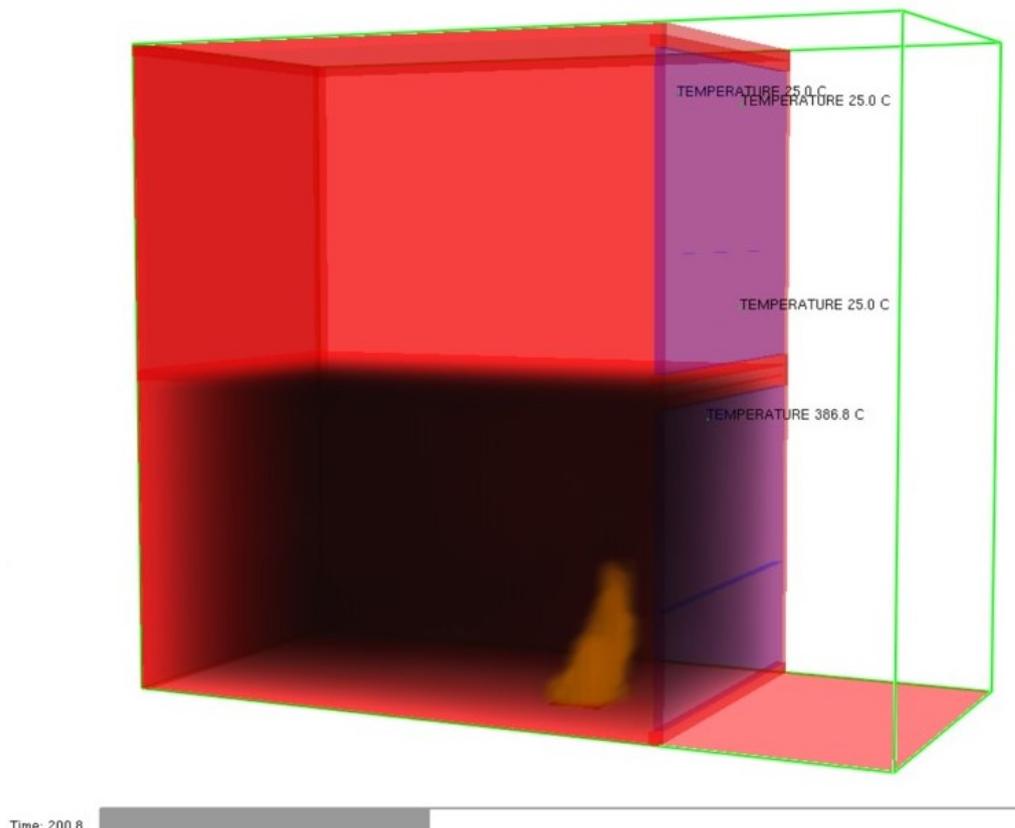
Figura 12 - Cronologia do incêndio no modelo de varanda envidraçada – tempo 165s (2 min e 45s).



Fonte: os autores (2023).

Após alguns segundos, mais precisamente aos 200 segundos, a Figura 13 apresenta um ponto crucial na simulação, ou seja, o instante que antecede a ruptura do vidro usado no envidraçamento da varanda do ambiente incendiado. Nesse momento, a temperatura já atinge 386,8 °C, representando o ponto máximo do calor no compartimento. A quebra do vidro, por sua vez, possibilita a entrada de oxigênio no ambiente, intensificando o fogo.

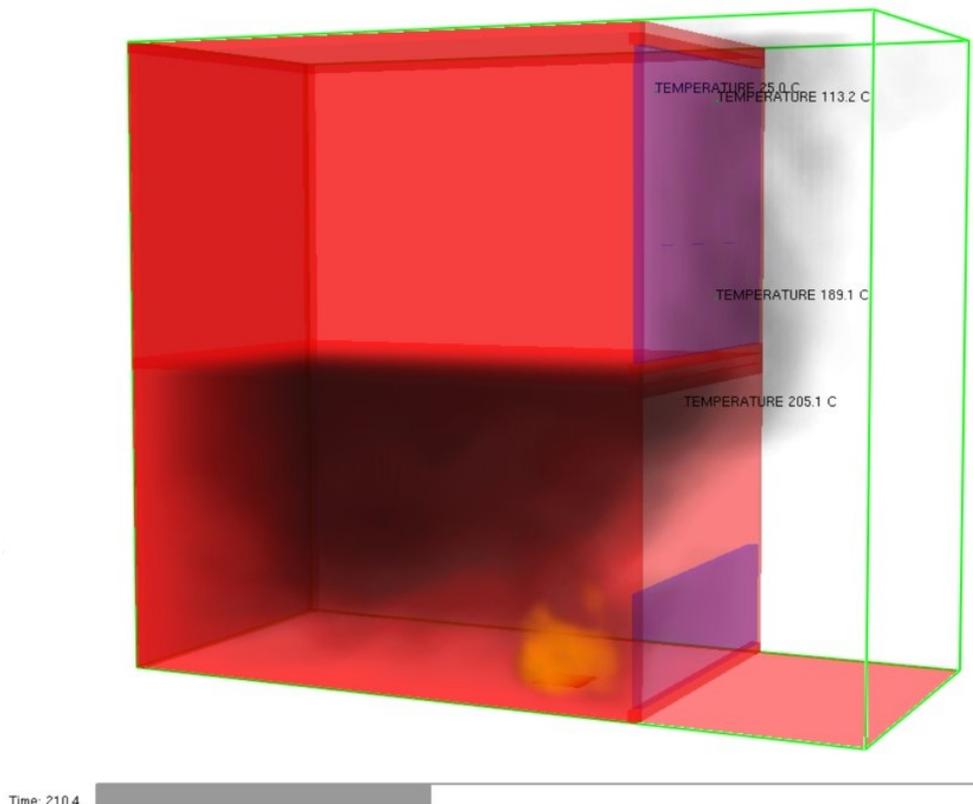
Figura 13 - Cronologia do incêndio no modelo de varanda envidraçada – tempo 200s (3 min e 20s).



Fonte: os autores (2023).

Com a abertura de uma ventilação, o ar rico em oxigênio do ambiente externo é renovado e, conseqüentemente, alimenta a combustão, levando a um deslocamento vertical da fumaça para o pavimento superior, conforme ilustrado na Figura 14. Esse movimento, por sua vez, provoca um aumento de temperatura nos termopares localizados no pavimento superior da edificação, ao mesmo tempo em que reduz o calor interno no ambiente incendiado. Em menos de 10 segundos a temperatura no termopar do guarda-corpo da varanda superior (M2) é de 189 °C, mais de sete vezes maior que a temperatura antes do rompimento do vidro.

Figura 14 - Cronologia do incêndio no modelo de varanda envidraçada – tempo 210s (3 min e 30s).

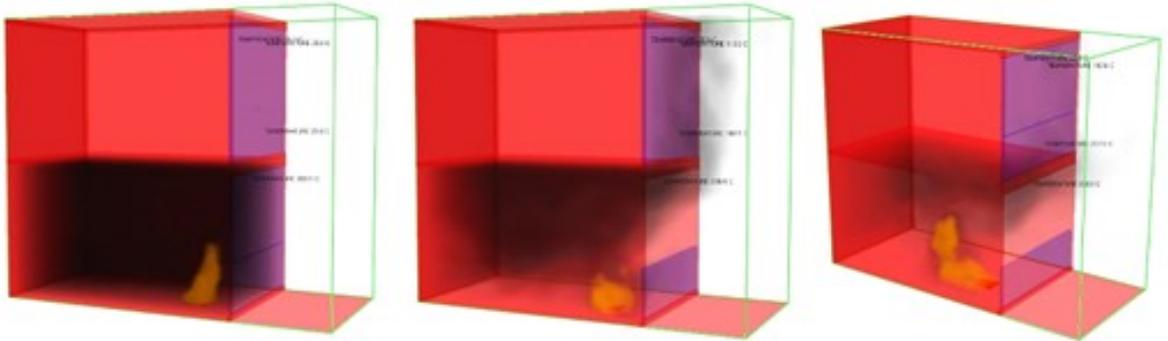


Fonte: os autores (2023).

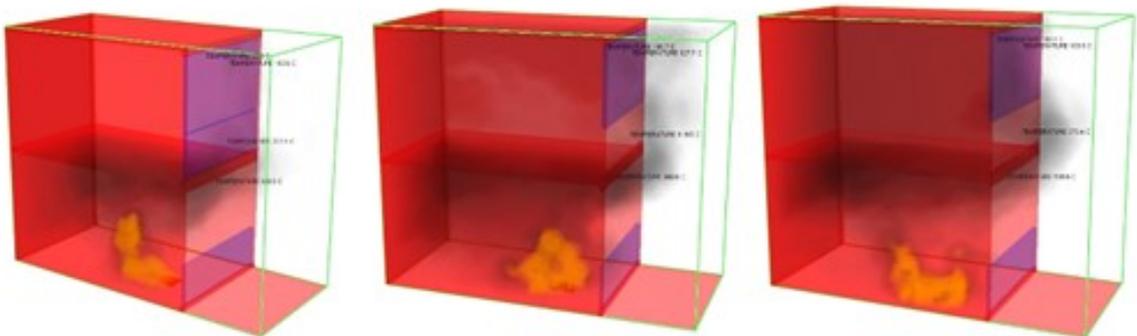
A Figura 15 ilustra como as chamas evoluíram em três momentos distintos. Pode-se observar que, após aproximadamente 9 minutos, o guarda-corpo da varanda superior se rompe cede, permitindo que a fumaça penetre no interior do compartimento. Cerca de 7 minutos depois, ou seja, próximo aos 16 minutos, não existe mais barreira para a fumaça com a quebra do vidro do fechamento de varanda superior. A não extinção nesta fase é extremamente perigosa para a evolução do incêndio, pois a tendência é que o mesmo sinistro cause danos semelhantes ao pavimento imediatamente superior, tornando uma cadeia de eventos.

Figura 15 - Cronologia do incêndio modelo computacional varanda fechada.

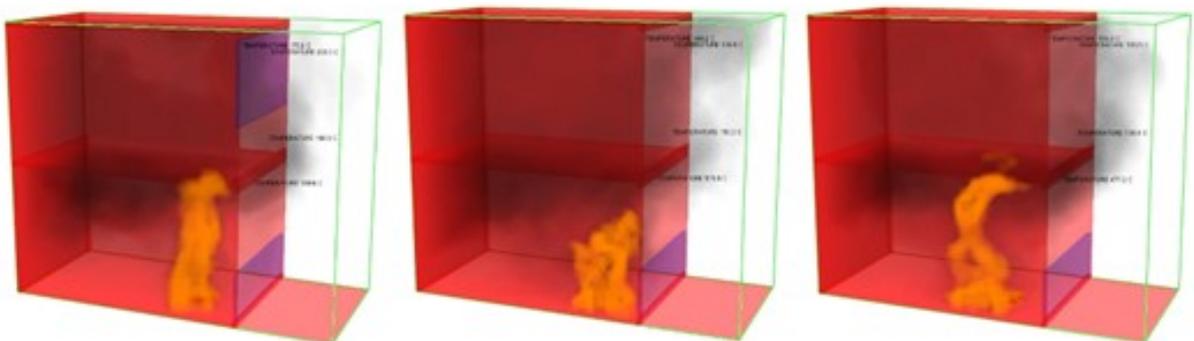
tempo aproximado entre 4-5 minutos



tempo aproximado entre 9-11 minutos



tempo aproximado entre 16-19 minutos

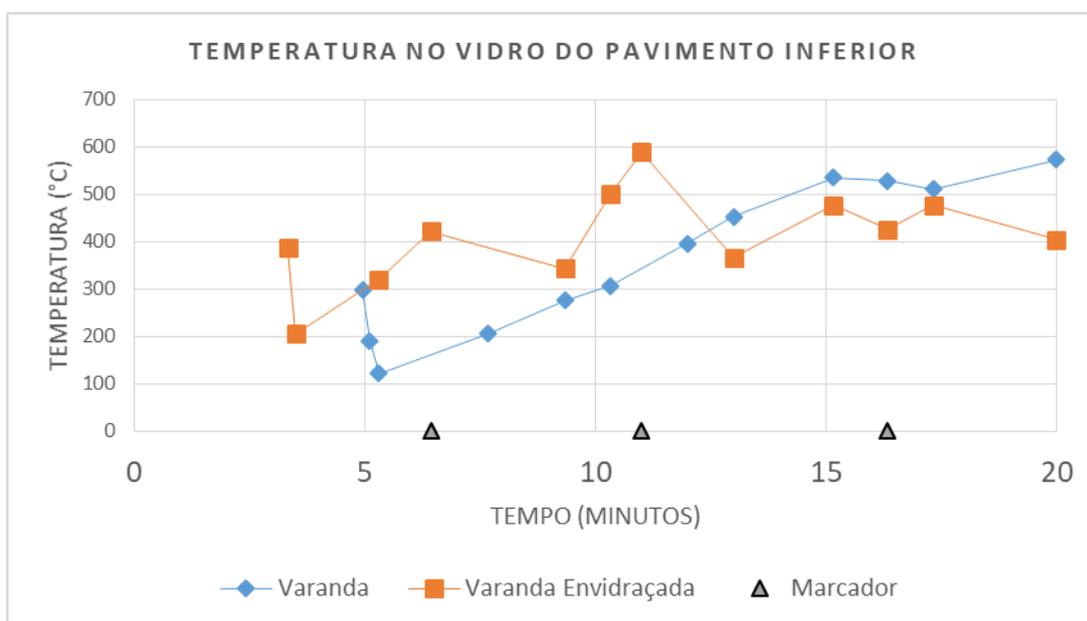


Fonte: os autores (2023).

3.3 Análise comparativa da temperatura nos medidores

O gráfico 1 ilustra as mudanças de temperatura do vidro em uma varanda aberta durante um incêndio. Ao longo do tempo, há um aumento gradual da temperatura. Na varanda sem fechamento, a temperatura aumenta rapidamente e atinge seu primeiro pico em cerca de 5 minutos, chegando a cerca de 300°C no momento em que a porta de acesso de vidro é quebrada. A entrada de ar fresco resultante da quebra da barreira causa uma diminuição temporária na temperatura. No entanto, a temperatura começa a subir novamente após esse ponto, devido à acumulação de calor e fumaça no ambiente. No final do experimento, a temperatura atinge valores próximos a 600° C.

Gráfico 1 - Evolução da temperatura no termopar M1 dos modelos.

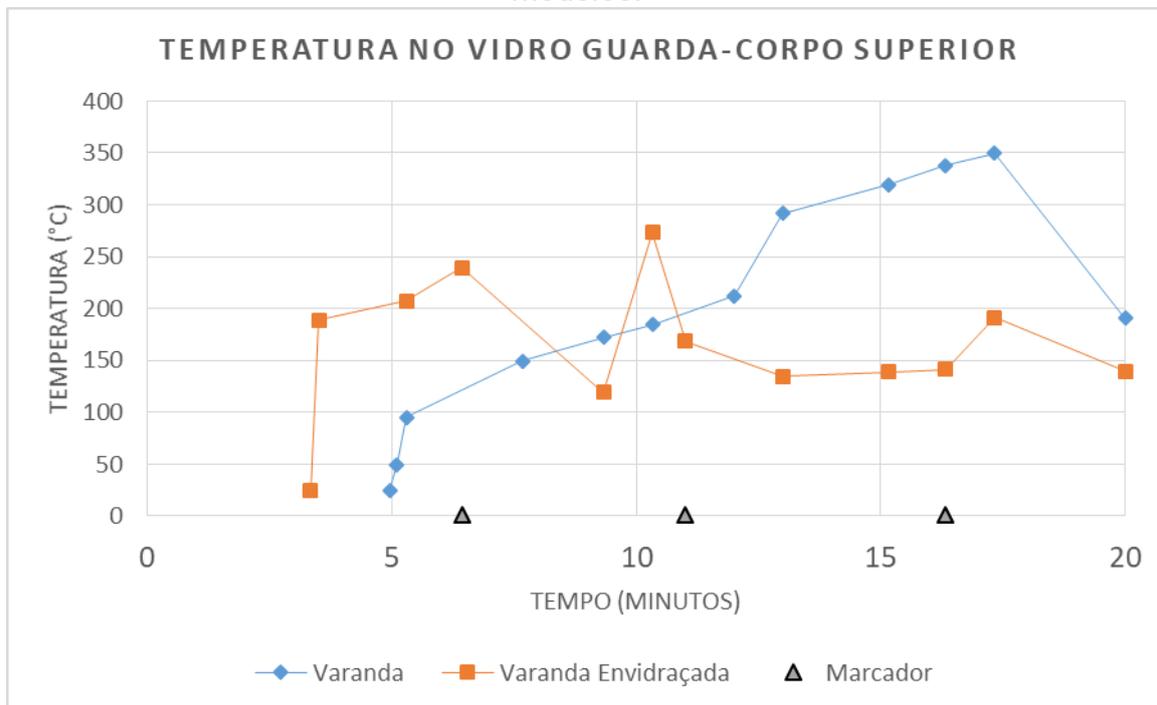


Fonte: os autores (2023).

A varanda envidraçada apresenta um comportamento diferente da varanda aberta devido às interrupções na temperatura causadas pelas quebras dos elementos, como o guarda-corpo que sustenta o vidro da varanda. De

acordo com o gráfico 2, houve três picos de temperatura associados à quebra de barreiras neste andar. Durante o experimento, a temperatura na varanda aberta aumentou gradualmente, atingindo o ponto de ruptura do vidro em torno do 17º minuto de exposição. Já na varanda envidraçada, um pico de calor ocorreu logo antes dos 7 minutos, quebrando o vidro do guarda-corpo do andar superior. Com a entrada de ar, houve uma queda na temperatura, mas como as chamas continuaram a queimar no pavimento inferior, a temperatura logo aumentou novamente. Aos 12 minutos, ocorreu um novo pico de temperatura, seguido por outra queda na temperatura devido ao mesmo motivo anterior. Mesmo após a quebra da barreira, o termopar M2 continuou medindo a temperatura na varanda envidraçada, mostrando um declínio na temperatura nos últimos 8 minutos do experimento.

Gráfico 2 - Evolução da temperatura no guarda-corpo superior nos dois modelos.

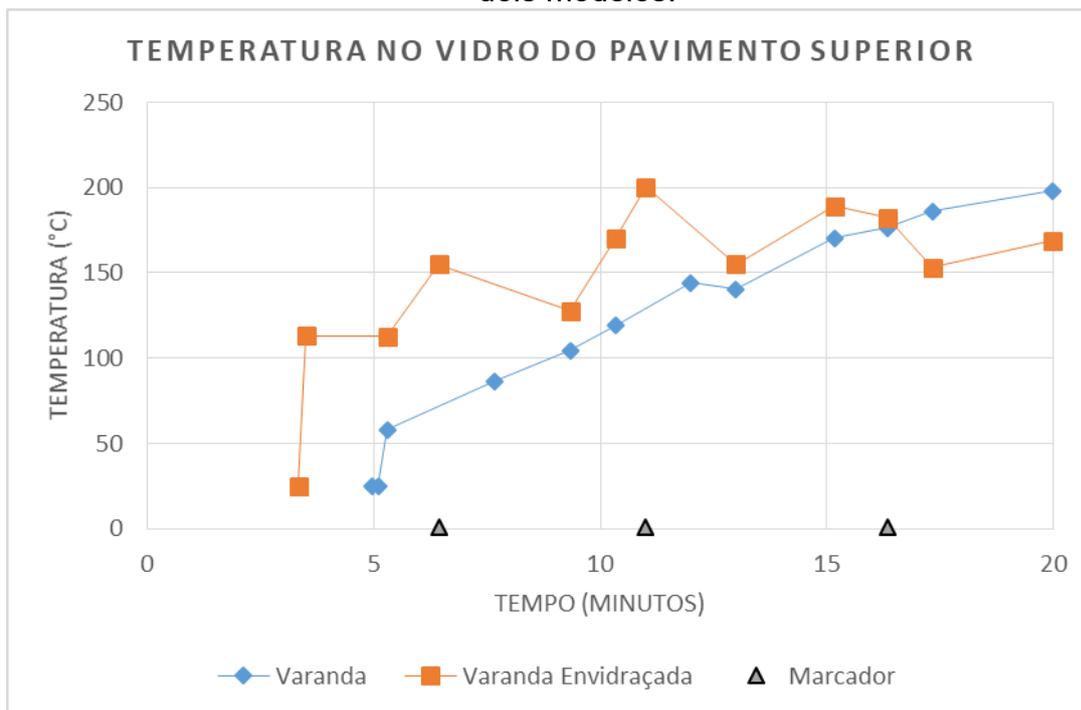


Fonte: os autores (2023).

O gráfico 3 mostra que o vidro da barreira da varanda aberta permaneceu estável durante todo o experimento, com um aumento significativo

de temperatura no final que não resultou em sua quebra. Já na varanda envidraçada, o vidro quebrou logo após o décimo minuto do incêndio, aumentando a concentração de fumaça no pavimento superior e o risco para os ocupantes do ambiente.

Gráfico 3 - Evolução de temperatura no vidro da varanda superior (M3) dos dois modelos.



Fonte: os autores (2023).

Como observado nos três gráficos anteriores, os picos de temperatura foram mais evidentes na varanda envidraçada, cujas barreiras foram rompidas em um tempo menor em relação ao experimento com varanda aberta. A cada quebra de vidro, o ambiente do pavimento superior acumulou mais fumaça e calor, aumentando o risco de ignição de outros elementos no ambiente, como móveis, cortinas e equipamentos elétricos. Na varanda aberta, durante os 20 minutos de simulação, não houve quebra de vidro e, portanto, nenhum acúmulo de fumaça no pavimento para os ocupantes.

4. CONCLUSÕES

As normas de segurança contra incêndio e pânico demandam uma grande discussão técnica e comprovações científicas dos experimentos. Para que haja credibilidade das exigências é de fundamental importância que sejam realizadas revisões constantes face as mudanças frequentes na construção civil, no uso da moradia e na geração de novos conhecimentos relacionados ao tema.

O uso de simulação computacional provou ser uma ferramenta importante para verificar o comportamento do incêndio, servindo de embasamento qualitativo para avaliação de alterações normativas ou emissão de pareceres técnicos que promovam a melhora das normas vigentes.

Com base nisso, foi possível comprovar que a compartimentação de incêndio é uma medida de segurança essencial para proteção e retardamento da generalização do incêndio para outros pavimentos, sendo que a aplicação correta dos índices de compartimentação de incêndio citados nas normas pode reduzir os impactos causados pelas chamas, na eventual ocorrência de um sinistro.

É desejável que os Corpos de Bombeiros revisem periodicamente as normas de combate a incêndios, adaptando-os à evolução das construções. Cabe ressaltar a importância de considerar medidas de segurança adicionais para varandas envidraçadas, que podem ser alteradas após a aprovação inicial dos planos de incêndio. Além disso, ressalta-se a relevância de manter a manutenção da compartimentação de incêndio ao mesmo nível de prioridade de outros itens de segurança, como extintores e hidrantes.

Por fim, o uso de programas de simulação pode servir para adoção de novas funcionalidades e melhorias nas ferramentas e, ainda, contribuir para adoção de normas de incêndio mais seguras e atualizadas frente as constantes movimentações arquitetônicas dos edifícios.

REFERENCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR7199: Projeção, execução e aplicações de vidros na construção civil. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR13860: Glossário de termos relacionados com a segurança contra incêndio. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14718: Guarda-corpos para edificação, Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14925 – Elementos construtivos envidraçados resistentes ao fogo para compartimentação. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 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, 2005.

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO ES. CBMES Norma Técnica 04. Carga de incêndio nas edificações e áreas de risco. Vitória, 2020. 50 p.;

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO ES. CBMES Norma Técnica 11. COMPARTIMENTAÇÃO HORIZONTAL E VERTICAL. Vitória, 2010. 16 p.;

DEHAAN, John D. Kirk's fire investigation. 6th ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2007. p. 45-58;

HASSANI, S. K., Shields, T. J., and Silcock, G. W., An Experimental Investigation into the Behaviour of Glazing in Enclosure Fire, J. Applied Fire Science 4, 303-323 (1994/5).

JORGE, Liziane De Oliveira. Estratégias de Flexibilidade na Arquitetura Residencial Multifamiliar. Tese (Tese em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade de São Paulo. São Paulo, 511 f., 2012.

MARCATTI, Jovelli; COELHO FILHO, Hamilton da Silva; BERQUÓ FILHO, Jolan Eduardo. Compartimentação e afastamento entre edificações. In: SEITO, Alexandre Itiu et al. A segurança contra incêndio no Brasil. São Paulo: Projeto Editora, 2008. cap. XI, p. 169- 179

MCGRATTAN, Kevin et al. Fire dynamics simulator (version 6) - technical reference guide. Washington: NIST special publication, 2013. Disponível em: https://github.com/firemodels/fds/releases/download/FDS6.5.3/FDS_User_Guide.pdf Acessado em 24 jul. 2022.

NILSSON, Markus et. al. A numerical comparison of protective measures against external fire spread. Fire and Materials, v42, n. 5, p. 493-507, 2018. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/fam.2527> Acessado em 29 de jul. 2022.

RIVERO, R. (1986). Arquitetura e clima: condicionamento térmico natural. 2ª edição, DC Luzzatto Editores Ltda, 240 p.

RODRIGUES, E.C.R. Análise da Eficiência do Sistema de Compartimentação Vertical Externa por Afastamento entre Janelas e por Projeções Horizontais Segundo as Exigências Normativas Brasileiras. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

ROSSO, Teodoro. Incêndios e arquitetura. São Paulo: FAUUSP, 1975. p. 115; 265-273;

YUEN, A.C.Y.; YEOH, G.H.; ALEXANDER, R.; COOK, M. Fire scene reconstruction of a furnished compartment room in a house fire. Case Studies in Fire Safety, v.1, p. 29-35, 2014.