
**MODELAGEM COMPUTACIONAL DE DISPERSÃO DE FUMAÇA EM INCÊNDIO
DE UMA EDIFICAÇÃO DE MÚLTIPLOS PAVIMENTOS**

**COMPUTATIONAL MODELING OF SMOKE DISPERSION IN A FIRE IN A
MULTI-STORY BUILDING**

Leonardo Gonçalves Alexandrino¹

Vilson Gomes da Assunção Júnior²

RESUMO

Os incêndios em edificações representam um grande desafio em termos de segurança, tanto no Brasil quanto globalmente, ocasionando danos materiais e, em muitos casos, perdas humanas. A dinâmica de propagação do fogo é um fenômeno altamente complexo, sujeito a uma série de variáveis que tornam cada incêndio único. Elementos como a liberação de calor, a formação de fumaça e a redução da visibilidade têm grande impacto, especialmente no que se refere à evacuação das pessoas. Este trabalho visa realizar uma simulação computacional de incêndio em um edifício residencial, explorando dois cenários distintos para examinar como a fumaça se espalha e como isso afeta a visibilidade que influencia diretamente no tempo de evacuação. Utilizando os softwares PyroSim e FDS (Fire Dynamics Simulator), o estudo analisa o comportamento do fogo, considerando a propagação da fumaça, o tempo de alcance das áreas e os efeitos sobre a visibilidade. Os resultados indicaram que a fumaça se concentra inicialmente na área de origem do incêndio, prejudicando a visibilidade e aumentando o tempo necessário para uma evacuação eficaz.

Palavras-chave: incêndio; simulação computacional; Pyrosim; FDS (Fire Dynamics Simulator); fumaça; visibilidade.

ABSTRACT

Fires in buildings pose a significant challenge in terms of safety, both in Brazil and globally, causing material damage and, in many cases, human casualties. The dynamics of fire propagation is a highly complex phenomenon, subject to a variety of variables that make each fire unique. Elements such as heat release, smoke formation, and visibility reduction have a major impact, especially regarding the evacuation of people. This study aims to conduct a computational fire simulation in a residential building, exploring two distinct scenarios to examine how smoke spreads and how this affects visibility, which directly influences evacuation time. Using the PyroSim and FDS (Fire Dynamics Simulator) software, the study analyzes fire behavior, considering smoke propagation, area reach times, and the effects on visibility. The results indicated that smoke initially concentrates in the area of the fire origin, impairing visibility and increasing the time required for effective evacuation.

Keywords: fire; computational simulation; PyroSim; FDS (Fire Dynamics Simulator); smoke; visibility.

¹ Acadêmico do curso de Engenharia Civil do Centro Universitário Filadélfia - UniFil

² Docente dos cursos de Engenharias do Centro Universitário Filadélfia – UniFil

1 INTRODUÇÃO

A segurança contra incêndios em edifícios residenciais é uma questão primordial, envolvendo a compreensão profunda dos mecanismos de evacuação e dispersão de fumaça para o desenvolvimento de estratégias eficazes de prevenção e mitigação. Neste contexto, a modelagem computacional surge como uma ferramenta essencial para analisar e simular o comportamento do fogo e da fumaça em ambientes edificados.

Este estudo visa investigar a fundo a modelagem computacional da dispersão de fumaça em edificações residenciais, utilizando abordagens avançadas da ciência da computação. Buscamos compreender os padrões de comportamento da fumaça em diferentes cenários simulados.

Além disso, a análise de parâmetros como a taxa de liberação de calor e a produção de fumaça desempenha um papel crucial na estimativa da extensão e da escala de um incêndio. Estes fatores são influenciados por diversos aspectos, incluindo a tipologia da edificação, as condições internas e os materiais combustíveis presentes no ambiente (Corrêa et al., 2017; Tabaczenski et al., 2017).

A construção de um sistema eficiente de detecção de incêndio e evacuação segura depende fundamentalmente da estimativa precisa de fatores como a taxa de liberação de calor e a produção de fumaça. Esses parâmetros são cruciais para avaliar o comportamento do fogo em diferentes cenários e prever com maior exatidão os impactos que ele causará no ambiente, especialmente em termos de segurança das pessoas. De acordo com (Min-Ho et al., 2021). A precisão na modelagem desses fatores permite o desenvolvimento de sistemas mais eficazes, capazes de antecipar os riscos e oferecer um tempo de resposta adequado para a evacuação. Dessa forma, é possível otimizar o uso de tecnologias de detecção e alerta, além de aprimorar as estratégias de evacuação, garantindo que elas sejam rápidas e seguras, minimizando as chances de ferimentos e fatalidades.

Dados estatísticos recentes destacam a relevância desta pesquisa, com um aumento alarmante no número de sinistros em edificações residenciais. Por exemplo, entre 2018 e 2020, o Paraná registrou 41.566 sinistros, dos quais 22% ocorreram em edificações, resultando em 320 feridos e 84 óbitos. Esses números ressaltam a urgência de desenvolver estratégias mais sofisticadas para lidar com incêndios em ambientes residenciais (Corrêa et al., 2017; Tabaczenski et al., 2020; CBPMR, 2023).

Desta forma, este trabalho busca contribuir significativamente para o avanço do conhecimento sobre segurança contra incêndios em edifícios residenciais, por meio da modelagem computacional da evacuação e dispersão de fumaça através de um software (PyroSim), desenvolvido pela Thunderhead Engineering Consultants, que funciona como uma interface gráfica de entrada e visualização do FDS, auxiliando o usuário no desenvolvimento de modelos de incêndio. Ao integrar dados empíricos, simulações computacionais e metodologias de análise avançadas, esperamos fornecer insights valiosos para o desenvolvimento de diretrizes e políticas de segurança mais robustas e eficazes, integrando dados empíricos, simulações computacionais e metodologias de análise avançadas. Esperamos fornecer insights valiosos para o desenvolvimento de diretrizes e políticas de segurança mais robustas e eficazes, contribuindo assim para a proteção das vidas humanas e do patrimônio.

Os modelos baseados na dinâmica computacional de fluídos usam equações de conservação de massa, espécies, momentos e energia, dividindo os ambientes estudados em pequenas células, formando um espaço tridimensional completo (Mcgrattan et al., 2023). Esses softwares possibilitam, entre outras funcionalidades, a obtenção de dados sobre a temperatura dos gases, a temperatura de superfícies sólidas, a concentração de gases, a altura da camada de fumaça livre e a visualização gráfica do comportamento do incêndio e da dispersão da fumaça em todos os pontos da edificação simulada.

88

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 MÉTODO

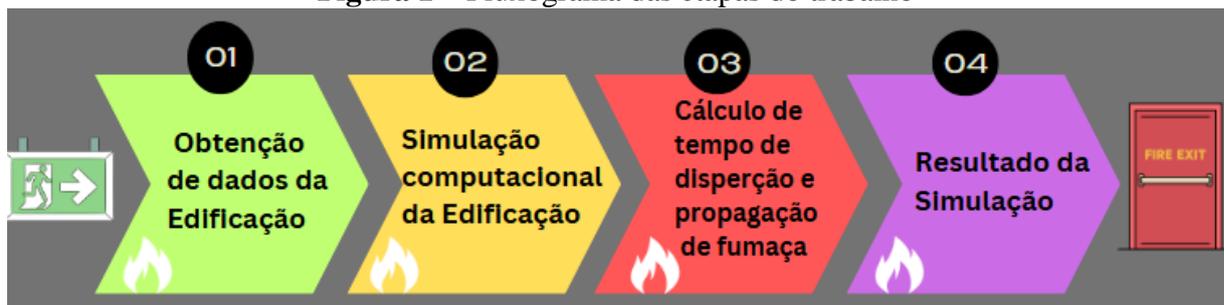
Este trabalho, estuda uma simulação computacional, com o auxílio do software, a dispersão de fumaça, e propagação de incêndio em uma edificação de múltiplos pavimentos, etapa essa fundamental para a projeção e simulação que este trabalho busca mostrar.

Para este estudo foi escolhido o software FDS v. 6.8.0, desenvolvido pelo NIST (*National Institute of Standards and Technology*), O programa nos permite mostrar uma simulação de incêndio baseado em CFD (Dinâmica Computacional de Fluídos), que numericamente resolve as equações de Navier-Stokes que são apropriadas para um fluxo de baixa velocidade e termicamente induzidos, com foco no transporte de fumaça e quantidade de calor de incêndios (NIST, 2023).

Este software tem a ausência de uma interface gráfica, portanto os dados de entrada deverão ser inseridos pelo usuário por meio de linhas de comando em um único arquivo, utilizando um editor de texto que deve conter todas as informações do modelo. Para simplificar este processo, será empregado o software Pyrosim versão 2024.1, que permite inserir a geometria do ambiente, os materiais e suas propriedades (THUNDERHEAD ENGINEERING, 2024).

Dessa forma, este estudo irá realizar uma simulação computacional de incêndio em um edifício residencial, considerando dois cenários diferentes: um com o incêndio originando-se na sala de estar do primeiro andar e outro com o fogo iniciando na sala de estar do terceiro andar. O foco da análise será a propagação da fumaça e a redução da visibilidade, fatores que têm um impacto direto no tempo necessário para a evacuação segura do local. A Figura 1 mostra o fluxograma das etapas para a realização deste trabalho.

Figura 1 – Fluxograma das etapas do trabalho



Fonte: O Autor (2025).

A edificação do estudo, está localizada na cidade de Londrina-PR, sendo um edifício residencial de porte executado pelo sistema de parede de alvenaria estrutural e concreto armado, tendo como sua altura total de 14 m. Este edifício está dividido em térreo além de mais 3 pavimentos, sendo esses pavimentos tipo, e uma cobertura onde fica as caixas d'água. Por sua vez o térreo possui uma área total de 44,15 m², sendo dividido em 1 apartamento contendo 27,94 m², e o Hall de acesso ao prédio que possui uma área de 14,5 m². Já os 3 pavimentos tipo obtém uma área de 140,78 m². Cada pavimento possui 4 apartamentos, sendo 2 com uma área de 32,2 m², e os outros 2 com área de 30,94 m², totalizando 494,43 m² de área do edifício, e o terreno possui área de 416,1 m².

Figura 2 – Imagem superior do terreno da edificação



Fonte: O Autor (2025).

Figura 3 – Foto da edificação



Fonte: O Autor (2025).

De acordo com o Código de Segurança Contra Incêndio e Pânico (CBPMR, 2018) a edificação é classificada como residencial (A-2; Edifício de apartamento em geral), sendo risco leve, onde a carga de incêndio seja até 300 MJ/m². A rota de fuga dos pavimentos tipo possuem uma escada 1,7 m de largura, e no térreo possui uma porta de acesso principal onde sua largura é de 1 m para a evacuação da edificação, além de sinalizações e iluminações em caso de incêndio mostrando a rota de fuga até o acesso do prédio.

90

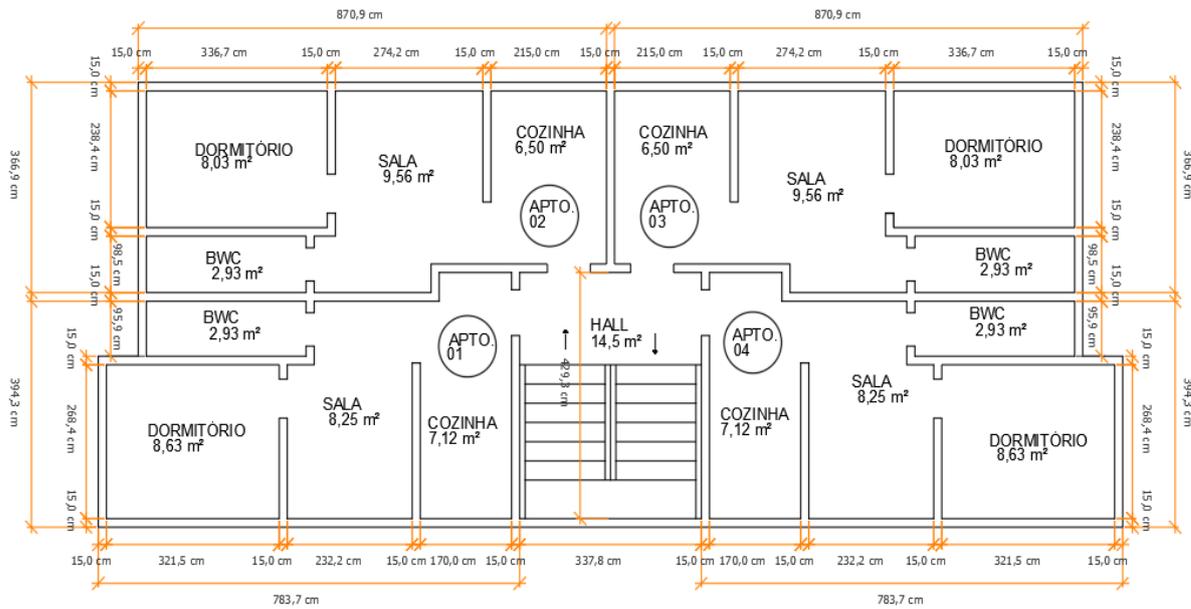
Figura 4 – informações da edificação

	LOCALIZAÇÃO:
	RUA ANDIRÁ - LONDRINA/PR
	ÁREA DO TERRENO:
	416,1 M ²
	ÁREA CONTRUÍDA:
	494,43 M ²
	TIPOLOGIA:
	EDIFÍCIO RESIDENCIAL
	PROCESSO CONTRUTIVO:
	ALVENARIA ESTRUTURAL E LAJES DE CONCRETO ARMADO
NÚMERO DE PAVIMENTO:	
TÉRREO + 3 PAVIMENTOS TIPO	
ALTURA TOTAL DA EDIFICAÇÃO:	
14M	

Fonte: O Autor (2025).

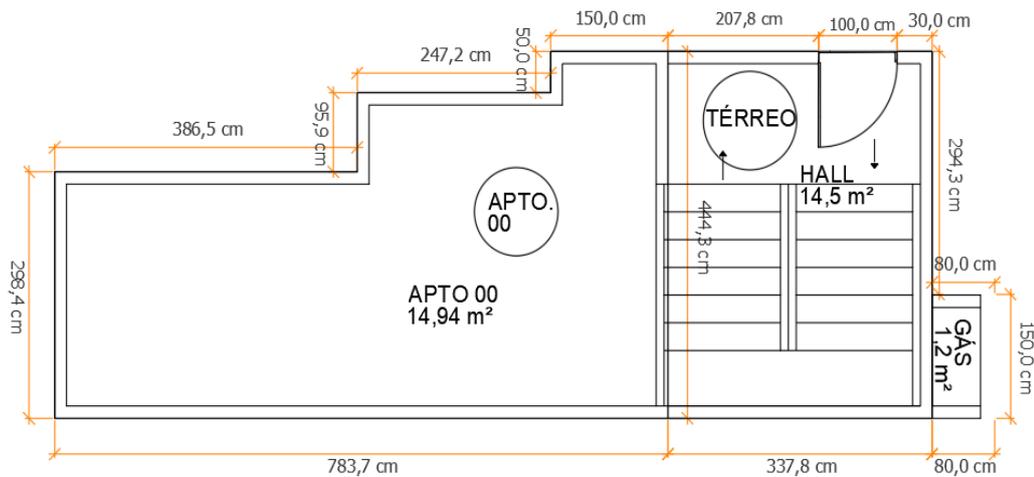
Esse edifício contém 13 apartamentos com 1 quarto cada, levando em consideração de 2 pessoas por dormitório, tendo um total de 26 moradores, possuindo assim uma classificação para exigências para edificações antigas e existentes como (Existente-Tipo 2), de acordo com a NPT 002 e CSCIP vigente.

Figura 5 – Croqui do pavimento tipo da edificação.



Fonte: O Autor (2025).

Figura 6 – Croqui do pavimento térreo da edificação.

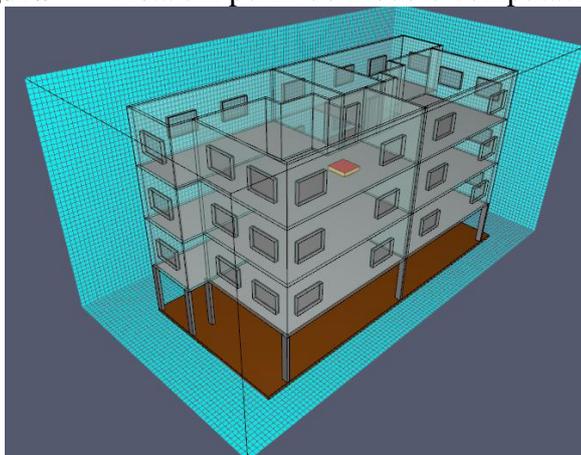


Fonte: O Autor (2025).

Para analisar o fluxo de fumaça através das aberturas para o exterior da edificação, considerou-se um domínio computacional que extrapolou de 1,0 a 1,3 metros além das dimensões da edificação (Figura 7), com as seguintes dimensões mínimas e máximas respectivamente: -3.0 m (eixo x) x -3.0 m (eixo y) x -0.2 m (eixo z) e 21.64 m (eixo x) x 10.2 m (eixo y) x 12.0 m (eixo z). O modelo foi realizado com uma malha cúbica de aresta 20 cm, em função da limitação computacional, visto que malhas menores que 20 cm resultariam em tempos de processamento elevado e uma malha maior implica em perda de precisão nos resultados. A malha final do modelo apresentou 342.720 elementos de 20 x 20 x 20 cm.

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.

Figura 7 – Vista em perfil do modelo computacional



Fonte: O Autor (2025).

Quanto aos parâmetros ambientais foram utilizados os valores padrões fornecidos pelo programa, sendo estes: temperatura ambiente de 23 °C, pressão atmosférica ao nível do mar de 101.325 Pa; umidade relativa do ar de 40% e velocidade do vento de 3,0 m.s⁻¹.

Como primeira situação o combustível para o incêndio foi considerado um estofado, levando em conta que estofados são fontes de polímeros, como poliuretano, que são inflamáveis e liberam gases tóxicos e partículas quando queimados. Além de se inflamar rapidamente e liberar fumaça espessa e tóxica, gerando riscos à saúde e redução de visibilidade, tornando a evacuação do local mais difícil durante um incêndio.

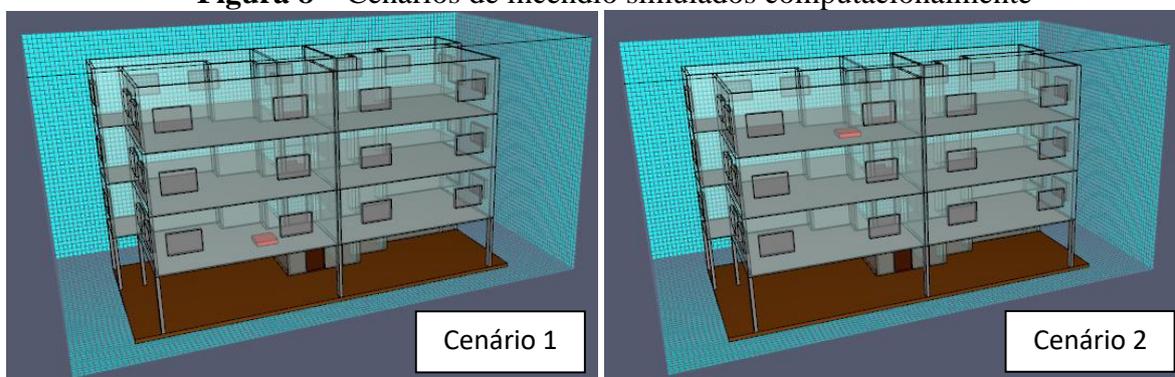
A representação do estofado se deu através da modelagem de obstrução, com 2,0 m de comprimento, 1,0 m de largura e 0,2 m de altura como mostrado na Figura 8. Para simular o incêndio foi definido uma reação, para essa reação foi selecionado da biblioteca do programa o poliuretano, cujas propriedades térmicas são: condutividade térmica de 0,03 W.m⁻¹.K⁻¹, densidade de 40 kg.m⁻³, emissividade de 0,90, poder calorífico de 25 MJ.kg⁻¹, temperatura de ignição de 275°C e taxa de liberação de calor 200 kW.m⁻¹.

Já para a segunda situação o combustíveis para o incêndio foi considerada um móvel de madeira, que oferece uma queima mais lenta e controlada, o que a torna uma escolha superior para quem busca uma fonte de calor mais estável, duradoura e segura em comparação com

materiais como o poliuretano. Isso ocorre devido à sua densidade, composição orgânica e menor emissão de fumaça e gases perigosos durante a combustão.

A representação do móvel se deu através da modelagem de obstrução, com 2,0 m de comprimento, 1,0 m de largura e 0,2 m de altura como mostrado na Figura 8. Para simular o incêndio foi definido uma reação, para essa reação foi selecionado da biblioteca do programa a madeira, cujas propriedades térmicas são: condutividade térmica de $0,013 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, densidade de 39 kg.m^{-3} , emissividade de 0,82, poder calorífico de 19 MJ.kg^{-1} , temperatura de ignição de 273°C e taxa de liberação de calor de 200 kW.m^{-1} .

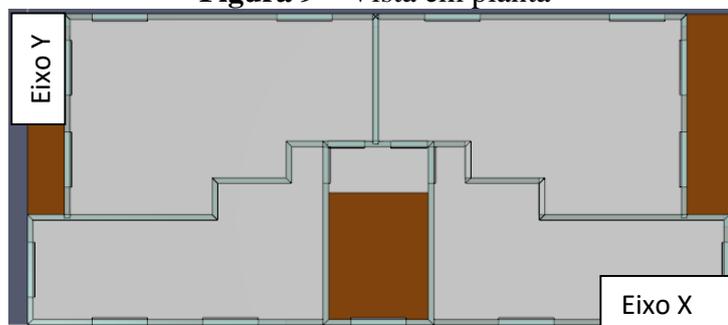
Figura 8 – Cenários de incêndio simulados computacionalmente



Fonte: O Autor (2025).

Para possibilitar o fluxo da fumaça dos ambientes e sua dispersão pelo edifício, foram implementadas duas aberturas em cada simulação, a primeira conectando o apartamento afetado pelo incêndio ao corredor e a segunda estabelecendo uma ligação entre o ambiente interior do edifício e o ambiente exterior. Para avaliar a visibilidade durante a simulação, foram criados dois cortes, um ao longo do eixo x e outro ao longo do eixo y.

Figura 9 – Vista em planta



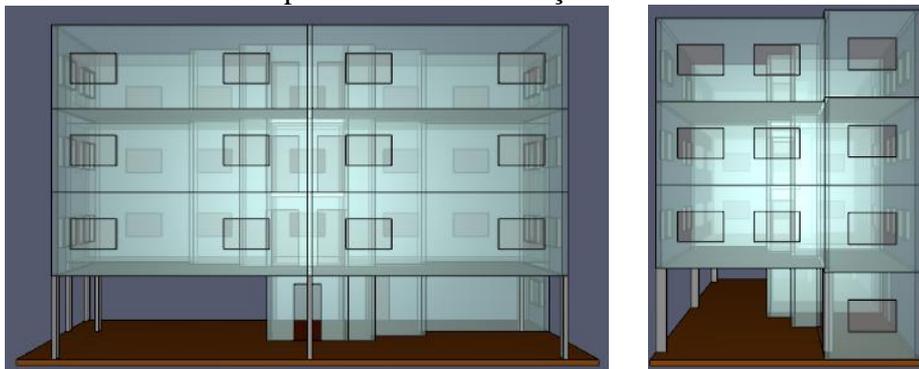
Fonte: O Autor (2025).

Após a definição das geometrias e dos materiais e suas propriedades, a simulação foi executada simulando os dois cenários de incêndio: um em que o incêndio ocorreu no 1º andar outro em que ocorreu no 3º andar, com ambos os incidentes ocorrendo na sala de estar.

2.2 RESULTADOS

O modelo computacional foi desenvolvido levando em consideração as dimensões físicas da edificação. Para proporcionar uma melhor visualização, a edificação foi representada em tons de azul, com uma transparência de 70%. Os resultados do modelo podem ser observados nas figuras 10 e 11.

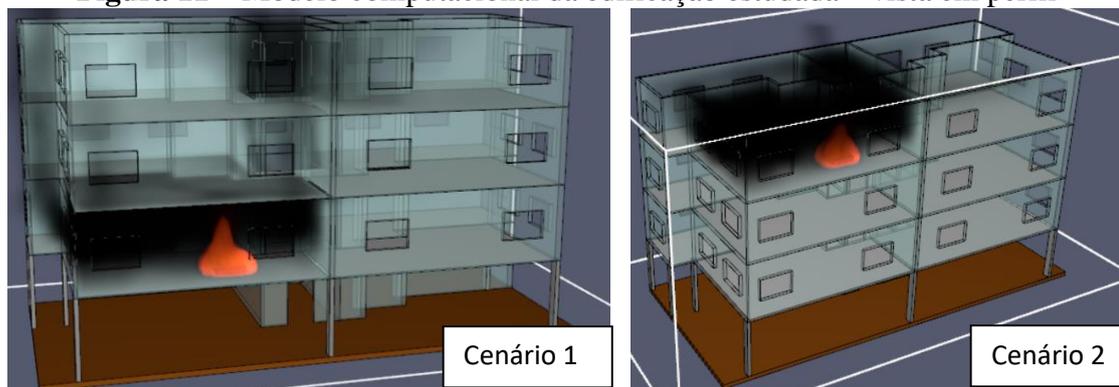
Figura 10 – Modelo computacional da edificação estudada – vista frontal e lateral



Fonte: O Autor (2025).

94

Figura 11 – Modelo computacional da edificação estudada – vista em perfil

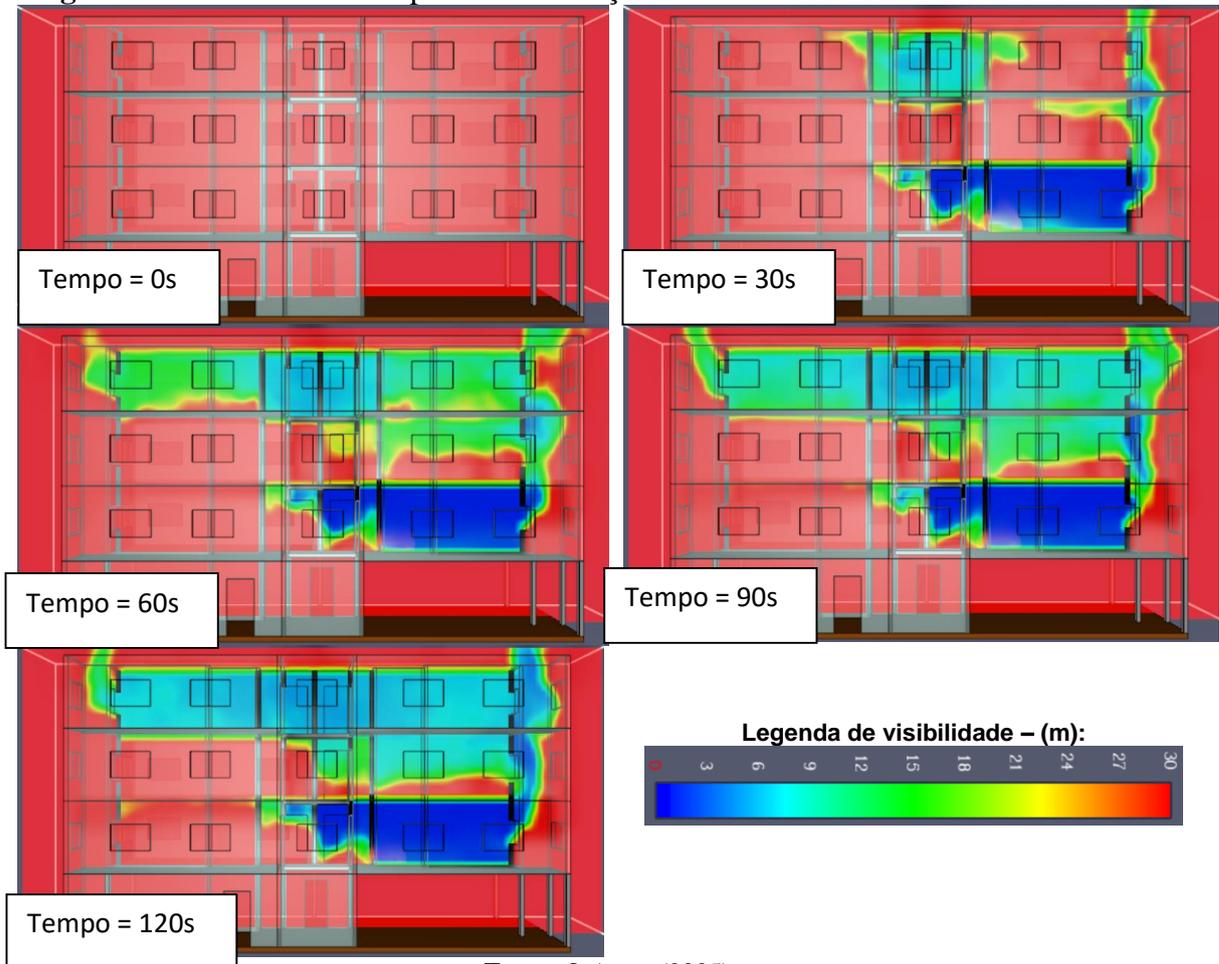


Fonte: O Autor (2025).

As Figuras 12 e 13 exibem os resultados da dispersão de fumaça e da visibilidade no primeiro cenário de incêndio, no qual o fogo ocorre no 1º pavimento. O combustível utilizado

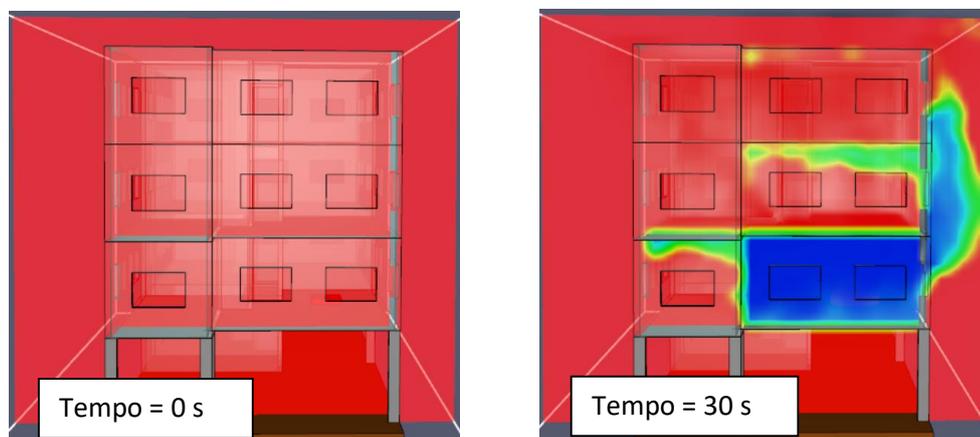
para esta primeira situação foi o estofado (poliuretano). Para a obtenção desses resultados, foi necessário um tempo de processamento de 6 horas e 22 minutos, considerando um período de 120 segundos de incêndio.

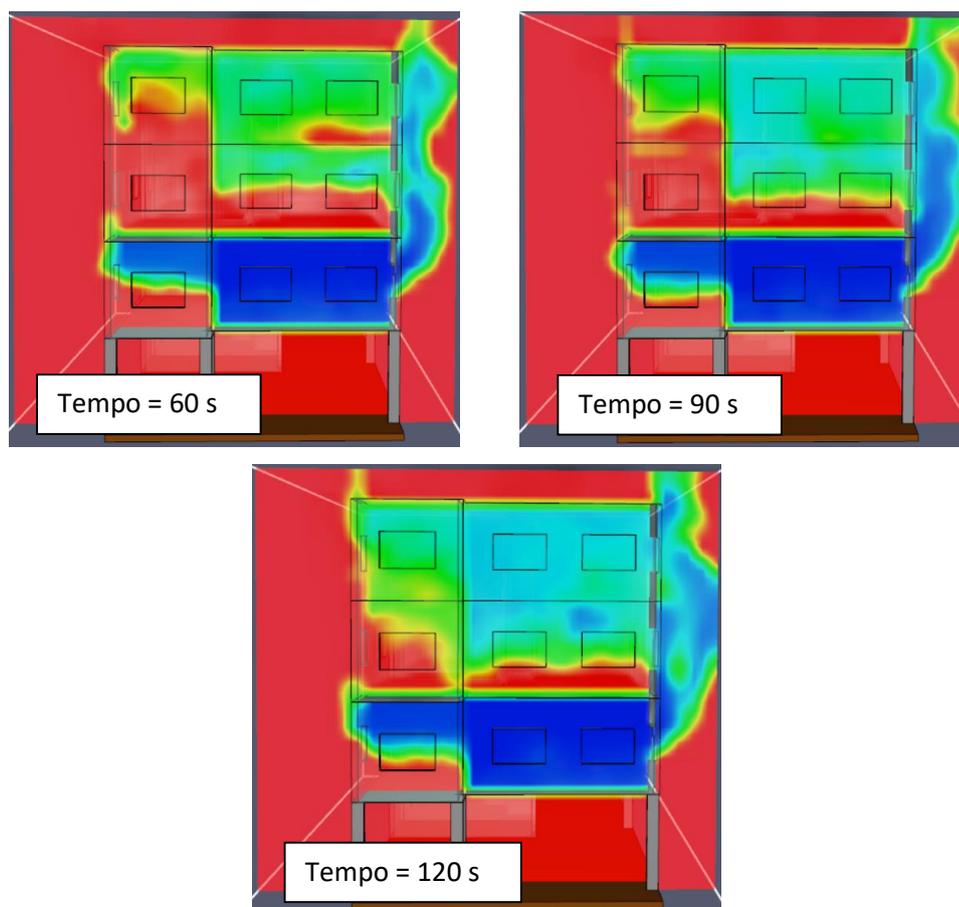
Figura 12 – Resultado de dispersão da fumaça em intervalos de 30s de incêndio – Eixo X



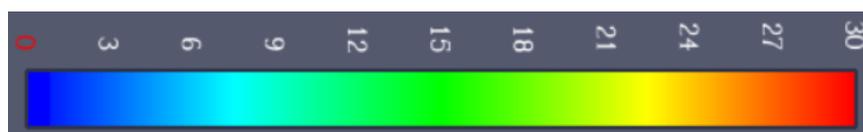
Fonte: O Autor (2025).

Figura 13 – Resultado de dispersão da fumaça em intervalos de 30s de incêndio – Eixo Y





Legenda de visibilidade – (m):



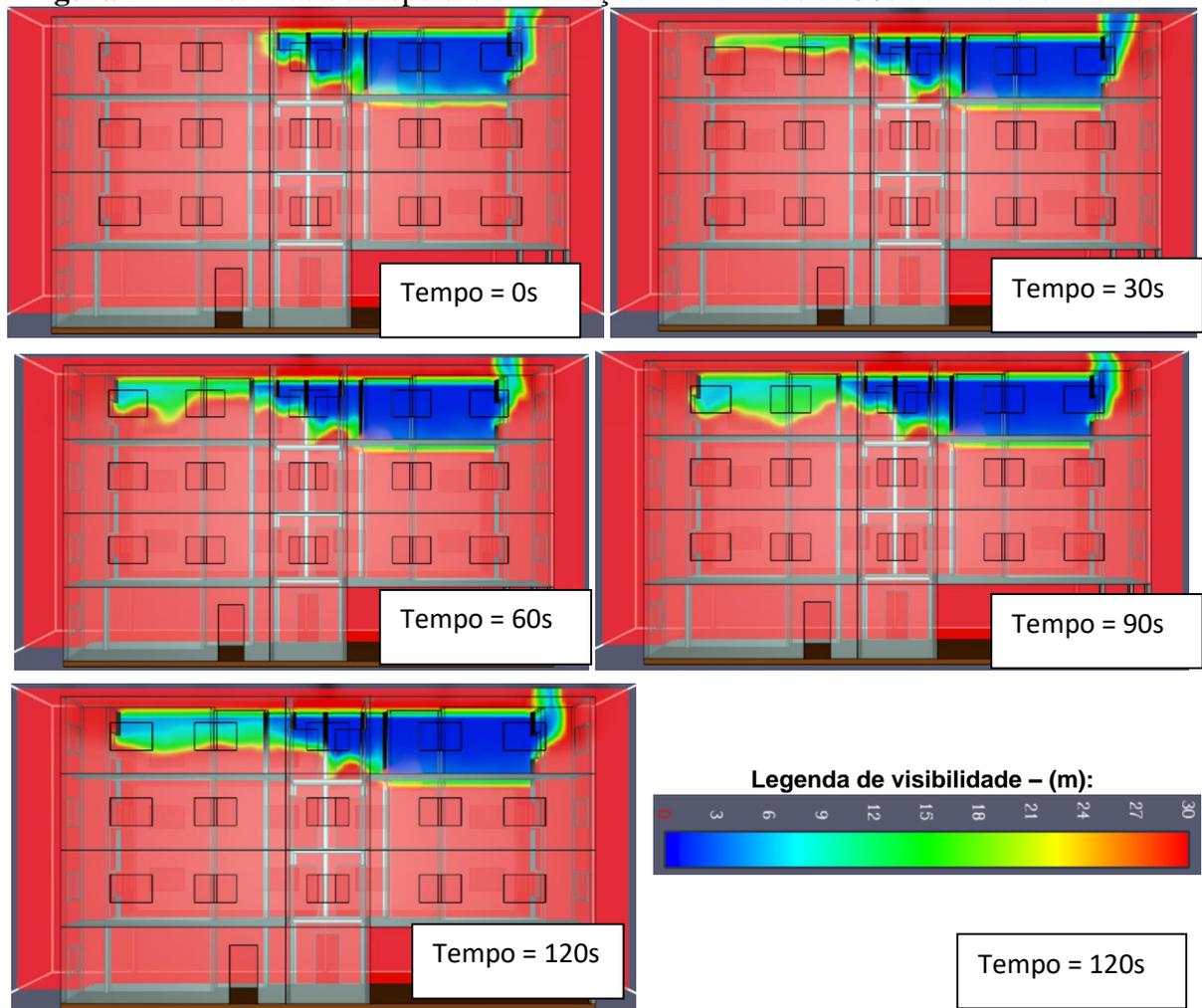
Fonte: O Autor (2025).

A partir das imagens apresentadas, pode-se perceber que, quando o incêndio ocorre no 1º pavimento, a fumaça se acumula de forma significativa nesse andar antes de começar a se espalhar para os andares superiores. Esse comportamento se repete nos níveis subsequentes, resultando em uma ocupação gradual de fumaça em toda a edificação. Além disso, é importante destacar que, após 60 segundos do início do incêndio, a visibilidade necessária para uma evacuação segura é severamente comprometida, especialmente no 1º pavimento, que é fortemente afetado. Isso representa um risco considerável, já que todos os ocupantes do edifício precisarão passar por essa área durante a evacuação.

As Figuras 14 e 15 exibem os resultados da dispersão de fumaça e da visibilidade no

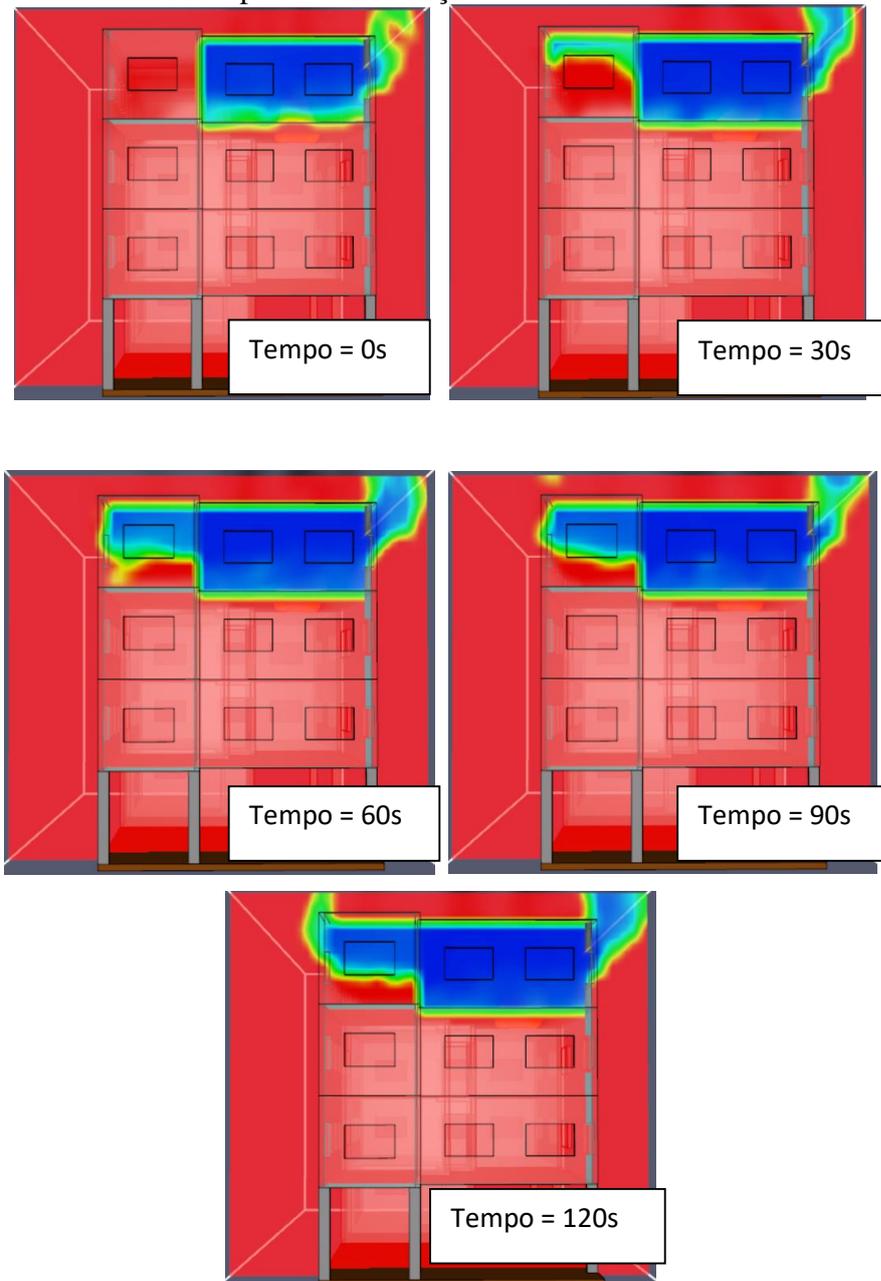
segundo cenário de incêndio, no qual o fogo ocorre no 3º andar. O combustível utilizado para esta primeira situação foi o estofado (poliuretano). Para a obtenção desses resultados, foi necessário um tempo de processamento de 3 horas e 28 minutos, considerando um período de 120 segundos de incêndio.

Figura 14 – Resultado de dispersão da fumaça em intervalos de 30s de incêndio – Eixo Y



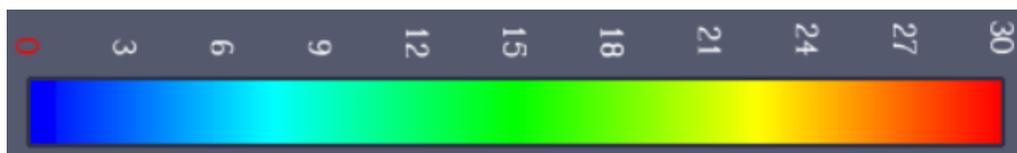
Fonte: O Autor (2025).

Figura 15 – Resultado de dispersão da fumaça em intervalos de 30s de incêndio – Eixo Y



Fonte: O autor - Pyrosim (2024).

Legenda de visibilidade – (m):

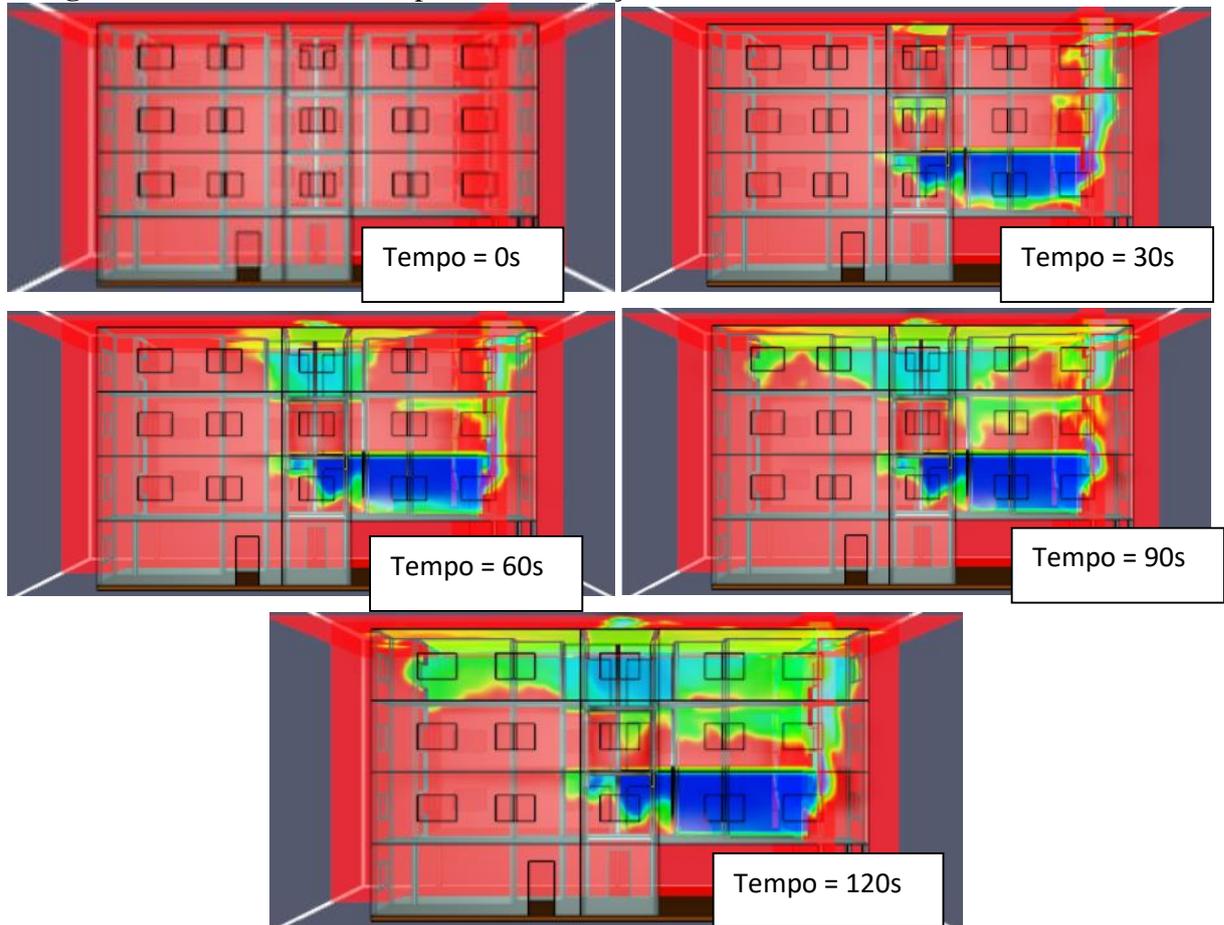


Fonte: O Autor (2025).

As Figuras 16 e 17 exibem os resultados da dispersão de fumaça e da visibilidade no primeiro cenário de incêndio, no qual o fogo ocorre no 1º pavimento. O combustível utilizado

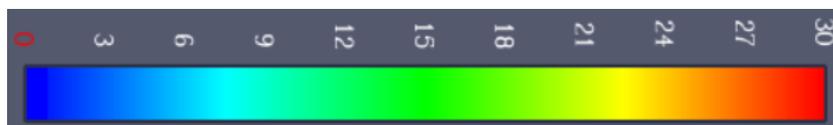
para esta segunda situação foi o móvel (madeira). Para a obtenção desses resultados, foi necessário um tempo de processamento de 2 horas e 41 minutos, considerando um período de 120 segundos de incêndio.

Figura 16 – Resultado de dispersão da fumaça em intervalos de 30s de incêndio – Eixo X



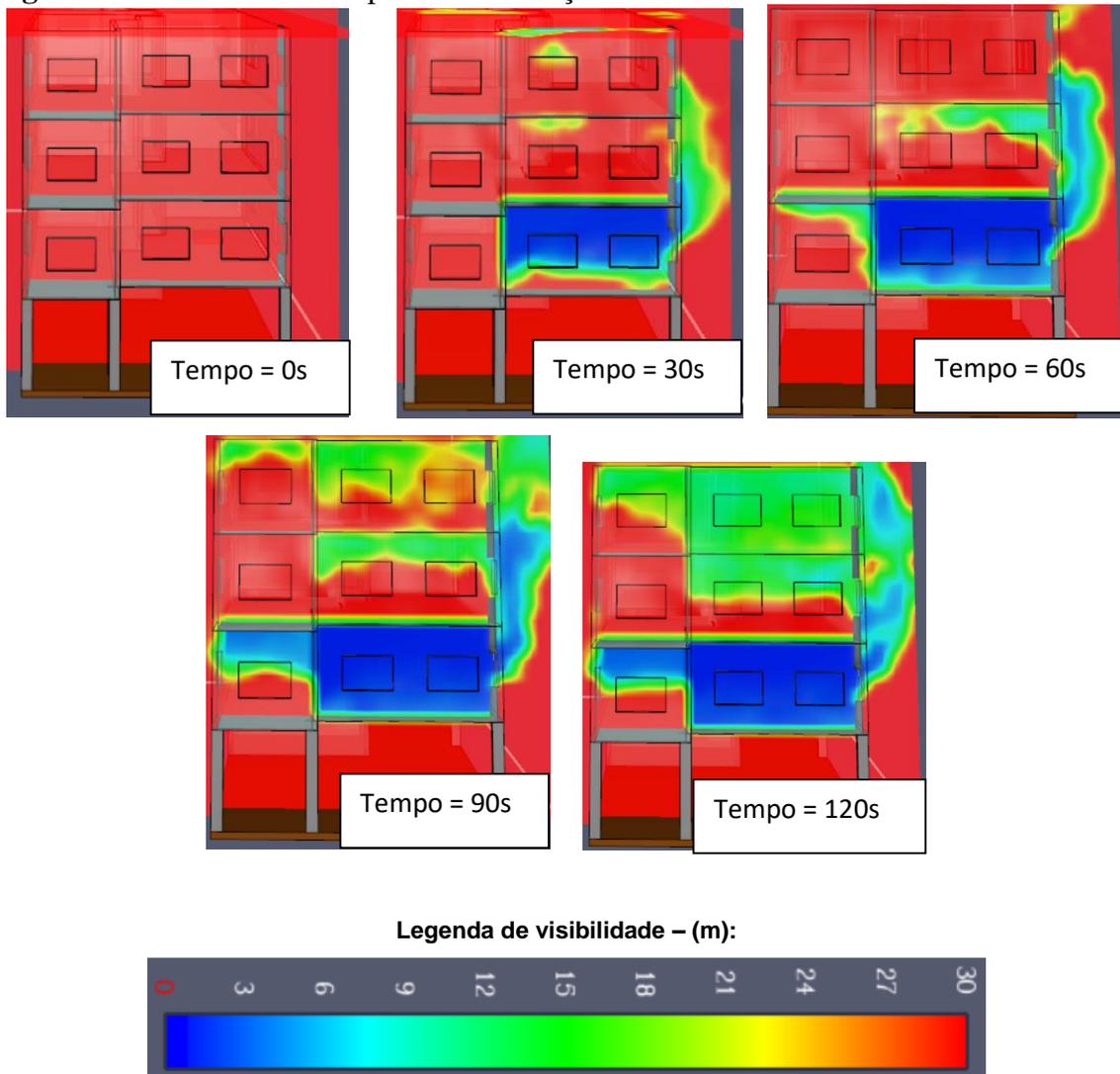
99

Legenda de visibilidade – (m):



Fonte: O Autor (2025).

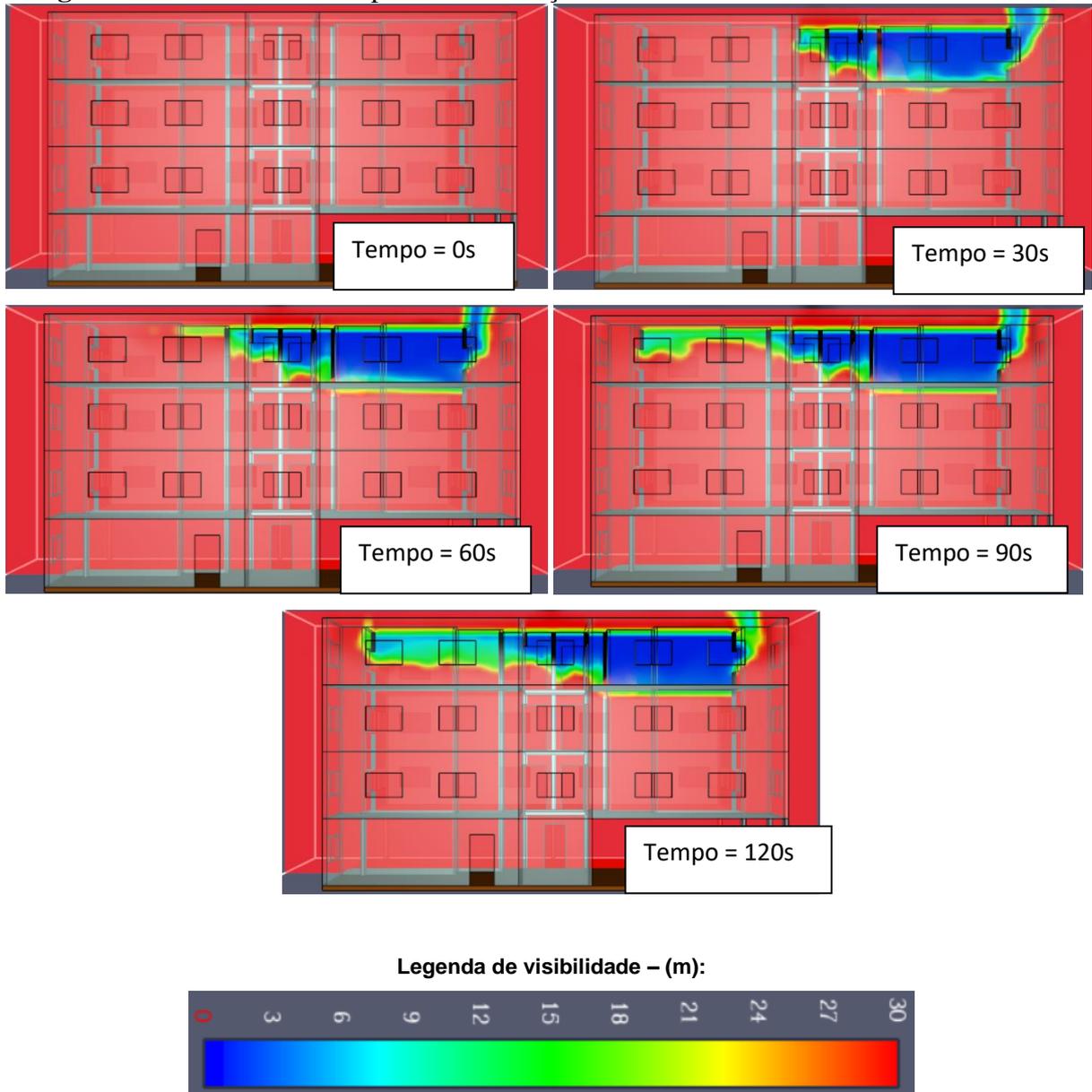
Figura 17 – Resultado de dispersão da fumaça em intervalos de 30s de incêndio – Eixo Y



Fonte: O Autor (2025).

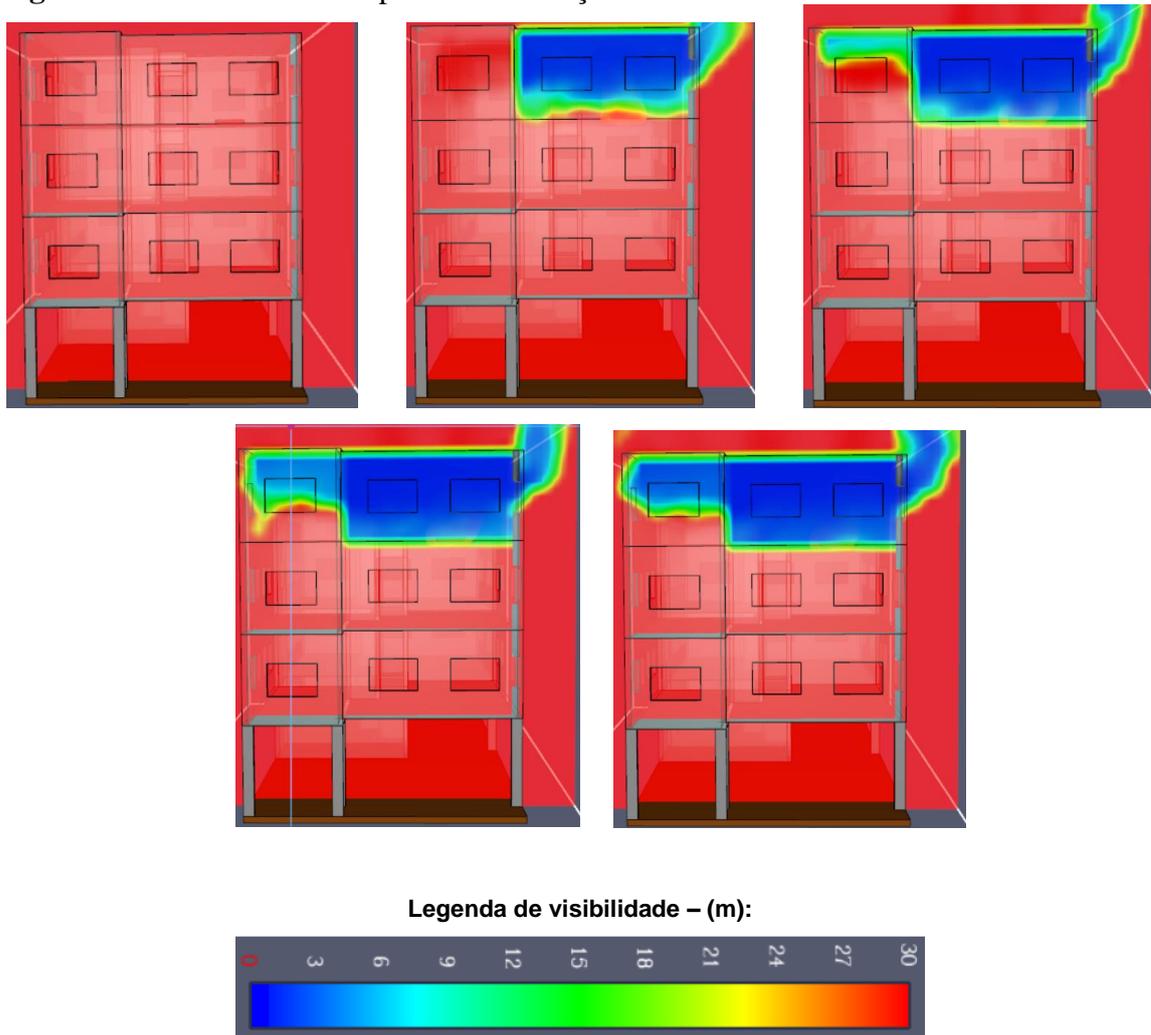
As Figuras 18 e 19 exibem os resultados da dispersão de fumaça e da visibilidade no segundo cenário de incêndio, no qual o fogo ocorre no 3º andar. O combustível utilizado para esta primeira situação foi o móvel (madeira). Para a obtenção desses resultados, foi necessário um tempo de processamento de 2 horas e 17 minutos, considerando um período de 120 segundos de incêndio.

Figura 18 – Resultado de dispersão da fumaça em intervalos de 30s de incêndio – Eixo X



Fonte: O Autor (2025).

Figura 19 – Resultado de dispersão da fumaça em intervalos de 30s de incêndio – Eixo Y



Fonte: O Autor (2025).

Com base nas imagens apresentadas, é evidente que, quando um incêndio se inicia no último pavimento, a fumaça tende a se acumular completamente antes de se dispersar para os pavimentos inferiores. No tempo adotado de simulação de 120 segundos, foi possível observar a fumaça atingir apenas 1 andar inferior. Adicionalmente, é fundamental ressaltar que, decorridos 60 segundos desde o início do incêndio, a visibilidade para a evacuação no último andar sofre um comprometimento significativo.

3 CONCLUSÃO

Este trabalho abordou a simulação computacional de incêndios em um edifício residencial, com foco em duas situações tendo dois tipos de materiais combustíveis de

diferentes propriedades: o poliuretano e a madeira. Além disso foi simulado em dois cenários distintos: um incêndio no primeiro andar e outro no terceiro.

A pesquisa concentrou-se na análise da propagação da fumaça, da visibilidade, podendo assim ocorrer uma evacuação segura dos ocupantes. Observou-se que na primeira situação de poliuretano a fumaça tende a se acumular inicialmente no local do incêndio, antes de se espalhar para os andares superiores, comprometendo a visibilidade e representando um risco adicional devido à presença de gases tóxicos e partículas prejudiciais à saúde. Já na segunda situação a fumaça tende a se acumular também inicialmente no local do incêndio, antes de se espalhar para os andares superiores, comprometendo de forma menos impactante a visibilidade em comparação ao poliuretano, e, a fumaça é menos espessa e mais limpa. A sua queima de maneira mais lenta e controlada devido à sua alta densidade e composição rica em lignina e celulose, o que resulta em uma liberação gradual de calor. Nos dois cenários analisados, a visibilidade foi rapidamente afetada, tornando a evacuação uma tarefa desafiadora.

No caso do incêndio no primeiro pavimento, a redução da visibilidade teve um impacto ainda mais grave, afetando todos os andares do edifício e dificultando o deslocamento seguro dos ocupantes.

Com base nesses resultados, fica clara a importância de incorporar no projeto de edifícios residenciais medidas que contenham a rápida propagação da fumaça, como sistemas eficientes de detecção e alarme, além de soluções para melhorar a visibilidade, como iluminação de emergência e sinalização adequada. Essas estratégias são essenciais para garantir uma evacuação segura e eficaz.

Em síntese, o estudo contribui para o entendimento dos desafios envolvidos na segurança contra incêndios em edifícios residenciais, destacando que a proteção dos ocupantes deve ser a prioridade em qualquer projeto. A pesquisa contínua nesse campo é fundamental para aprimorar as práticas de segurança e reduzir os riscos associados a incêndios. Para investigações futuras, sugere-se a utilização de equipamentos com maior capacidade de processamento, que permitam simulações mais longas e a análise de cenários mais complexos, incluindo o comportamento humano durante a evacuação.

REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15219:2005** - Segurança contra incêndio - Parte 1: Conceitos básicos e critérios de projeto.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 15219:2013** - Segurança contra incêndio - Parte 2: Inspeção, manutenção e operação de edificações.

CBPMMPR. Corpo de Bombeiros do Paraná. **Relatório Anual de Sinistros no Paraná**. Paraná, 2023.

CBPMMPR. Corpo de Bombeiros do Paraná. **Código de Segurança Contra Incêndio e Pânico-CSCIP**. Paraná, 2018.

CBPMMPR. Corpo de Bombeiros do Paraná. **NPT 002 – Adaptação às Normas de Segurança Contra Incêndio – Edificações Existentes e Antigas**, CBPMMPR, 2018.

MCGRATTAN, K.; HOSTIKKA, S.; FLOYD, J.; McDERMOTT, R.; VANELLA, M.; MUELLER, E. **Fire Dynamics Simulator – User’s Guide**. NIST Special Publication 1019 Sixth Edition, Gaithersburg, Maryland, (EUA), (FDS Version 6.8.0), 12 ago. 2023.

MIN-HO, M.; HYUNG-JUN, K.; SU-GYEONG, M.; SUNG-CHAN K.; WON-JUN, P., “Simulation of indoor fire dynamics of residential buildings with full-scale fire test”, **Sustainability**, Vol. 13, pp. 4897, April, 2021.

104

NIST (n.d.). **Home - National Institute of Standards and Technology**. Disponível em: <https://www.nist.gov/>. Acesso em: 3 out. 2023.

TABACZENSKI, R.; CORRÊA, C.; SANTOS, M.; PIRES, T.; SILVA, J., Aplicação do software Fire Dynamics Simulator (FDS) no estudo da segurança contra incêndios (SCI) no Brasil. **Revista Flammae**, Recife–PE (Brasil), 3(7), 87-116, 2017.

THUNDERHEAD ENGINEERING. (n.d.). **Home - Thunderhead Engineering**. Disponível em: <https://www.thunderheadeng.com/>. Acesso em: 3 out. 2024.