

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Janaína Saydelles Volpato

**USO DE SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS DE EVACUAÇÃO E  
INCÊNDIO: UM ESTUDO DE CASO DE UMA EDIFICAÇÃO  
EDUCACIONAL**

Santa Maria, RS  
2023

Janaína Saydelles Volpatto

**USO DE SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS DE EVACUAÇÃO E INCÊNDIO: UM ESTUDO DE CASO DE UMA EDIFICAÇÃO EDUCACIONAL**

Projeto de Dissertação de Mestrado, apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

Orientador: Dr. André Lübeck

Coorientador: Dr. Rogério Cattelan Antochaves de Lima

Santa Maria, RS  
2023

Saydelles Volpatto, Janaina  
Uso de simulações computacionais de evacuação e  
incêndio: Um estudo de caso de uma edificação educacional  
/ Janaina Saydelles Volpatto.- 2023.  
121 p.; 30 cm

Orientador: André Lübeck  
Coorientador: Rogério Cattelan Antochaves de Lima  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil, RS, 2023

1. Simulação de evacuação 2. Simulação de incêndio 3.  
Modelagem BIM 4. Uso dos softwares Pyrosim e Pathfinder  
I. Lübeck, André II. Cattelan Antochaves de Lima,  
Rogério III. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(s). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Declaro, JANAINA SAYDELLES VOLPATTO, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

**Janaína Saydelles Volpatto**

**USO DE SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS DE EVACUAÇÃO E INCÊNDIO: UM ESTUDO DE CASO DE UMA EDIFICAÇÃO EDUCACIONAL**

Projeto de Dissertação de Mestrado, apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

Aprovado em 30 de agosto de 2023:

---

André Lübeck, Dr., UFSM  
(Presidente/Orientador)

---

Rogério Cattelan Antochaves de Lima, Dr., UFSM  
Coorientador

---

René Quispe Rodriguez, Dr., UFSM

---

Ângela Graeff, Dra., UFRGS

Santa Maria, RS  
2023

## AGRADECIMENTOS

Registro meu agradecimento à Universidade Federal de Santa Maria / Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, pela oferta de ensino público, gratuito e de qualidade e pelo trabalho administrativo primoroso durante o período de formação em nível de Mestrado Acadêmico.

Ao professor Dr. André Lübeck e ao prof. Dr. Rogério Cattelan Antochaves de Lima, respectivamente orientador e coorientador, pela parceria constante e contínua durante o meu itinerário formativo, meus sinceros agradecimentos. O desafio de ser orientado à distância, por conta da pandemia de Covid-19, foi superado pela pronta resposta de ambos nos momentos de dúvidas, angústias e incertezas.

Faço referência, ainda, ao professor Dr. René Quispe Rodriguez e à professora Dr<sup>a</sup> Ângela Graeff, por terem aceitado contribuir com esta pesquisa durante a Defesa da Dissertação. O olhar criterioso de profissionais altamente competentes em suas áreas de atuação, certamente qualificam o trabalho desenvolvido.

Ao Instituto Federal Farroupilha, em especial, registro meu agradecimento pelo fomento proporcionado por meio do Programa Institucional de Incentivo à Qualificação Profissional. Aos colegas e aos bolsistas, com os quais convivi durante os dois anos de curso, dividindo atividades, preocupações e conquistas, agradeço a parceria na jornada.

Aos amigos, pelas reiteradas palavras de incentivo e mais variadas ajudas, minha gratidão pela contribuição de cada um para a finalização desse trabalho.

E por fim, agradeço imensamente aos meus familiares, pelo suporte fundamental e por compreenderem as ausências inerentes ao processo de formação acadêmica.

## RESUMO

### USO DE SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS DE EVACUAÇÃO E INCÊNDIO: UM ESTUDO DE CASO DE UMA EDIFICAÇÃO EDUCACIONAL

AUTOR: Janaína Saydelles Volpato

ORIENTADOR: André Lübeck

COORDINATOR: Rogério Cattelan Antochaves de Lima

A segurança dos usuários das edificações em situações de incêndios é garantida pela rápida evacuação e pelo consequente rápido combate ao fogo. Para que a evacuação seja bem-sucedida, é necessário que as edificações sejam dotadas de condições apropriadas, como rotas de saídas desobstruídas, acessíveis, com sinalização e dimensionamento adequados. Nesta pesquisa, será utilizada uma edificação educacional como estudo de caso, com a finalidade de estudar o impacto do fogo (*software* Pyrosim) durante a evacuação dos ocupantes (*software* Pathfinder). A edificação foi modelada no *software* BIM/Revit e importada nos programas de simulação. A análise das larguras de passagem das saídas disponíveis na revelou que elas excedem os requisitos estabelecidos pela Resolução Técnica CBMRS N.º 11. Referente ao incêndio, considerando a propagação da fumaça, temperatura, visibilidade e concentração de CO, o parâmetro que mais se aproximou do limite de tolerância foi a concentração de CO, visto que aos 120 s já tinha alcançado um limite crítico, dependendo do tempo de exposição. Obtiveram-se os resultados quanto ao tempo de evacuação para os 3 cenários propostos, para a o cenário 1 em situação normal, tendo todas as saídas e escadas disponíveis, e nos cenários 2 e 3 estavam em situação de incêndio, sendo que no cenário 2 podiam ser usadas somente uma das escadas e 3 portas, e no cenário 3 podia ser usada somente uma escada e 2 portas. Em situação normal, cenário 1, usando o modo SFPE, teve o menor tempo de evacuação que foi 88,8 s e o cenário 3, também sob o mesmo modo, porém em situação de incêndio, teve o maior tempo de evacuação que foi 154,5 s. Foram gerados gráficos onde foram calculados o número total de ocupantes em cada saída, bem como a taxa e fluxo e o fluxo específico em ambos os modos simulados, para os 3 cenários. Os valores de fluxo específico tanto no modo *Steering* como no modo SFPE não alcançaram o valor previsto em norma para a ocupação de reunião de público que é de 3,03 pessoas/m.s, tendo alcançado o fluxo específico máximo no cenário 2 de 1,49 pessoas/m.s. Diante dos resultados obtidos, foi possível concluir que por meio da combinação da tecnologia BIM, aliada aos softwares Pyrosim e Pathfinder, proporciona uma compreensão mais detalhada da influência do incêndio na evacuação da edificação e pode permitir a identificação de possíveis melhorias e otimizações no processo ainda em fase de projeto, possibilitando a elaboração de projetos que não só estejam conforme as normas, mas que sejam eficientes e seguros.

**Palavras-chave:** Simulação. Incêndio. BIM. Pyrosim. Pathfinder.

## ABSTRACT

### APPLICATION OF COMPUTER EVACUATION AND FIRE SIMULATIONS: A CASE STUDY OF AN EDUCATIONAL BUILDING

AUTHOR: Janaína Saydelles Volpatto

ADVISOR: André Lübeck

COORIENTADOR: Rogério Cattelan Antocheves de Lima

The safety of building users in fire situations is guaranteed by rapid evacuation and subsequent rapid firefighting. For evacuation to be successful, buildings must be equipped with appropriate conditions, such as unobstructed, accessible exit routes, with adequate signage and dimensioning. In this research, an educational building will be used as a case study, with the purpose of studying the impact of fire (Pyrosim software) during the evacuation of occupants (Pathfinder software). The building was modeled in BIM/Revit software and imported into simulation programs. The analysis of the passage widths of the exits available revealed that they exceed the requirements established by CBMRS Technical Resolution No. 11. Regarding the fire, considering the spread of smoke, temperature, visibility and concentration of CO, the parameter that came closest to the tolerance limit was the CO concentration, since at 120 s it had already reached a critical limit, depending on the exposure time. The results were obtained regarding the evacuation time for the 3 proposed scenarios, for scenario 1 in a normal situation, with all exits and stairs available, and in scenarios 2 and 3 they were in a fire situation, whereas in scenario 2 they could only use one of the stairs and 3 doors could be used, and in scenario 3 only one staircase and 2 doors could be used. In a normal situation, scenario 1, using the SFPE mode, had the shortest evacuation time, which was 88.8 s, and scenario 3, also using the same mode, but in a fire situation, had the longest evacuation time, which was 154.5 s. Graphs were generated where the total number of occupants at each exit were calculated, as well as the rate and flow and the specific flow in both simulated modes, for the 3 scenarios. The specific flow values in both Steering mode and SFPE mode did not reach the standard value for public meeting occupancy, which is 3.03 people/m.s, having reached the maximum specific flow in scenario 2 of 1.49 people/m.s. Given the results obtained, it was possible to conclude that through the combination of BIM technology, combined with Pyrosim and Pathfinder software, it provides a more detailed understanding of the influence of fire on the evacuation of the building and can allow the identification of possible improvements and optimizations in the process. in the design phase, enabling the development of projects that not only comply with standards, but are efficient and safe.

**Keywords:** Simulation. Fire. BIM. Pyrosim. Pathfinder.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - <i>Layout</i> e pontos de medição do piso de incêndio. ....	24
Figura 2 - Comparação da propagação da fumaça em $t = 530$ s: (a) janela aberta; (b) janela fechada.....	25
Figura 3 - Modelagem da biblioteca. a) O modelo da sala de leitura. b) Modelo do átrio.....	26
Figura 4 - Planta da edificação da universidade. a) Térreo b) Primeiro andar. ....	29
Figura 5 - Indústria farmacêutica. (a) Prédio inteiro (b) Piso do incêndio (1º andar). ....	30
Figura 6 - Comparação da fumaça espalhada pelo piso de incêndio para o cenário A em diferentes tempos. (a) 60s (b) 180s (c) 500s. ....	31
Figura 7 - Comparação de fumaça espalhada no piso de incêndio para o cenário B nos seguintes tempos: (a) 50s (b) 150s e no 2º andar aos (c) 270s.....	31
Figura 8 - A variação de (a) temperatura, (b) visibilidade e (c) concentração de CO <sub>2</sub> com o tempo em diferentes escadas e cruzamento de corredores no 1º andar para carga de combustível de 1000 kg de etanol (cenário A).....	33
Figura 9 - A variação de (a) temperatura, (b) visibilidade e (c) concentração de CO com o tempo em diferentes escadas e interseção de corredores no 1º andar para carregamento de combustível de papelão na área de embalagem (cenário B).....	33
Figura 10 - Estrutura da simulação utilizando os <i>softwares</i> BIM, Pyrosim e Anylogic. ....	35
Figura 11 - a) Planta do segundo andar. b) Localização do incêndio no PyroSim.....	37
Figura 12 - a) Temperatura (°C). b)Visibilidade (m).....	37
Figura 13 - Edificação utilizada no estudo. a) Modelagem da construção em BIM. b) Edificação real.....	39
Figura 14 - a) Modelagem no Pathfinder de evacuação do público da biblioteca. b) Obstáculos no modelo de evacuação de emergência no Pathfinder.....	39
Figura 15 - Mapa de densidade de pessoal em um tempo de evacuação de 20,6 s. ....	40
Figura 16 - Planta do primeiro andar do edifício central com base no Pathfinder. ....	41
Figura 17 - Distribuição das pessoas evacuadas no edifício central.....	42
Figura 18 - Modelo da biblioteca elaborado com Pathfinder com a população da edificação. ....	44
Figura 19 - Cenário de simulação do incêndio. a) Localização do incêndio. (b) Estrutura da escada no quarto andar. ....	45
Figura 20 - Propagação da fumaça nos seguintes tempos: a) 50 segundos, b) 100 segundos, c) 150 segundos, d) 236 segundos e e) 334 segundos. ....	46



Figura 21 - Plantas do teatro. a) Planta baixa b) Modelo BIM renderizado.....	47
Figura 22 - Distribuição dos grupos no teatro, sendo que a saída 00 está bloqueada. ....	48
Figura 23 - Propagação da fumaça nos seguintes tempos: a) 30 segundos, b) 110s, c) 180s e d) 600s. ....	49
Figura 24 - Síntese dos resultados obtidos nas simulações. ....	51
Figura 25 - Metodologia utilizada na pesquisa.....	59
Figura 26 - Edificação escolar modelada e interface mostrada no <i>software</i> Revit.....	61
Figura 27 - Interface do programa Pyrosim. ....	64
Figura 28 - Interface do <i>software</i> Pathfinder.....	66
Figura 29 - Planta biblioteca. a) Planta baixa do pavimento térreo onde constam as saídas de emergência, escadas, acervo, salas e disposição do mobiliário. b) Planta baixa do segundo pavimento onde constam as escadas, salas e disposição do mobiliário. ....	69
Figura 30 - a) Modelo da biblioteca no Revit. a)Vista isométrica do prédio. b)Planta baixa do primeiro pavimento da biblioteca. c) Planta baixa do segundo pavimento da biblioteca. ....	71
Figura 31 - Estrutura da biblioteca importada no formato <i>.ifc</i> no programa Pyrosim.....	73
Figura 32 – Refinamento da malha usada no estudo. a) 0,45m x 0,45m; b) 0,40m x 0,40m; c) 0,35m x 0,35m; d) 0,30m x 0,30m e e) 0,25m x 0,25m. ....	74
Figura 33 – Área do queimador usado na estudo. ....	76
Figura 34 - Posicionamento das seções na biblioteca no programa Pyrosim. a) Planta baixa do primeiro pavimento. b) Vista isométrica. ....	76
Figura 35 - Modelo do BIM importado no <i>software</i> Pathfinder. a) Planta baixa do pavimento térreo. b) Planta baixa do segundo pavimento. ....	79
Figura 36 – Ocupantes nos dois pavimentos no programa Pathfinder. ....	81
Figura 37 – Propagação da fumaça. a) Aos 30 segundos de simulação. b) 60s. c) 120s. d) 300s. ....	84
Figura 38 – Mudança de temperatura na seção longitudinal aos 8 m. a) Aos 30s. b) 60s. c) 120s. d) 300s.....	86
Figura 39 – Mudança de temperatura na seção transversal aos 3 m. a) Aos 30s. b) 60s. c) 120s e d) 300s. ....	87
Figura 40 – Mudança de temperatura na seção transversal aos 26 m. a) Aos 30s. b) 60s. c)120s. d) 300s. ....	87
Figura 41 – Mudança de temperatura na seção transversal aos 37 m. a) Aos 30s. b) 60s. c) 120s. d) 300s.....	88

Figura 42 – Mudança de visibilidade na seção longitudinal aos 8 m. a) Aos 30s. b) 60s. c) 120s. d) 300s.....	89
Figura 43 – Mudança de visibilidade na seção transversal aos 3 m. a) Aos 30s. b) 60s. c) 120s. d) 300s. ....	90
Figura 44 – Mudança de visibilidade na seção transversal aos 26 m. a) Aos 30s. b) 60s. c) 120s. d) 300s.....	90
Figura 45 – Mudança de visibilidade na seção transversal aos 37 m. a) Aos 30s. b) 60 s. c) 120 s. d) 300 s.....	91
Figura 46 – Concentração de gás CO na seção longitudinal aos 8 m. a) Aos 30s. b) 60s. c) 120s. d) 300s.....	92
Figura 47 – Concentração de gás CO na seção transversal aos 3 m. a) Aos 30 segundos de simulação. b) 60 s. c) 120 s. d) 300 s. ....	93
Figura 48 – Concentração de gás CO na seção transversal aos 26 m. a) Aos 30 segundos de simulação. b) 60 s. c) 120 s. d) 300 s. ....	93
Figura 49 – Concentração de gás CO na seção transversal aos 37 m. a) Aos 30 segundos de simulação. b) 60 s. c) 120 s. d) 300 s. ....	94
Figura 50 – Evacuação dos ocupantes em situação normal no cenário 1 aos 30 s. a) Modo <i>Steering</i> . b) Modo SFPE.....	95
Figura 51 – Evacuação dos ocupantes no cenário 2 em situação de incêndio aos 30 s. a) Modo <i>Steering</i> . b) Modo SFPE.....	96
Figura 52 – Evacuação no cenário 3 em situação de incêndio aos 30 s. a) Modo <i>Steering</i> . b) Modo SFPE. ....	97
Figura 53 - Modo <i>Steering</i> . a) Número de ocupantes nas saídas. b) Taxa de fluxo. c) Fluxo específico.....	100
Figura 54 - Cenário 1 – Modo SFPE. a) Número de ocupantes nas saídas. b) Taxa de fluxo. c) Fluxo específico. ....	101
Figura 55 - Cenário 2 – Modo <i>Steering</i> . a) Número de ocupantes nas saídas. b) Taxa de fluxo. c) Fluxo específico. ....	102
Figura 56 - Cenário 2 – Modo SFPE. a) Número de ocupantes nas saídas. b) Taxa de fluxo. c) Fluxo específico. ....	103
Figura 57 - Cenário 3 – Modo <i>Steering</i> . a) Número de ocupantes nas saídas. b) Taxa de fluxo. c) Fluxo específico. ....	104
Figura 58 - Cenário 3 – Modo SFPE. a) Número de ocupantes nas saídas. b) Taxa de fluxo. c) Fluxo específico. ....	105

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Resumo dos limites de tolerância.....	52
Quadro 2 - Resumo dos estudos correlatos ao desta pesquisa.....	55

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - O tempo de evacuação seguro necessário (segundos).....	28
Tabela 2 - Resumo da simulação de evacuação para os diferentes cenários de incêndio considerados. ....	33
Tabela 3 - Tempo de processamento para as diferentes medidas de malha. ....	74
Tabela 4 - Resultados da temperatura máxima com diferentes malhas.....	75
Tabela 5 – Tempo de evacuação em segundos dos cenários propostos. ....	98
Tabela 6 – Valores das taxas de fluxo e de fluxo específico máximos para as simulações no modo <i>Steering</i> .....	106
Tabela 7 – Valores das taxas de fluxo e de fluxo específico máximos para as simulações no modo SFPE.....	107

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação (1) – Taxa de liberação de calor.....	44
Equação (2) – Fluxo específico .....	67
Equação (3) – Taxa de fluxo.....	68
Equação (4) – Largura das saídas .....	82

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>11</b>
1.1	OBJETIVOS	15
1.1.1	Objetivo geral	15
1.1.2	Objetivos específicos	16
1.2	JUSTIFICATIVA	16
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	17
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b>	<b>18</b>
2.1	INCÊNDIOS QUE OCORRERAM NO CENÁRIO NACIONAL	18
2.2	LEGISLAÇÃO DE SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO	19
2.3	LITERATURA RELEVANTE NA ÁREA	20
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>59</b>
3.1	PROGRAMAS COMPUTACIONAIS USADOS NA PESQUISA	60
3.1.1	Modelagem com <i>Building Information Modeling</i>	60
3.1.2	Simulação do incêndio - Pyrosim	63
3.1.3	Simulação de evacuação - Pathfinder	66
3.2	MODELAGEM BIM – REVIT	68
3.2.1	Escolha da edificação	68
3.2.2	Construção do modelo	70
3.3	SIMULAÇÃO DE INCÊNDIO – <i>SOFTWARE</i> PYROSIM	72
3.4	SIMULAÇÃO DE EVACUAÇÃO – <i>SOFTWARE</i> PATHFINDER	77
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>82</b>
4.1	DIMENSIONAMENTO DAS SAÍDAS	82
4.2	ANÁLISE DA PROPAGAÇÃO DE INCÊNDIO	83
4.2.1	Propagação da fumaça	83
4.2.2	Temperatura	85
4.2.3	Visibilidade	88
4.2.4	Análise da concentração de CO	91
4.3	ANÁLISE DO PROCESSO DE EVACUAÇÃO	94
4.3.1	Evacuação no cenário 1	95
4.3.2	Evacuação no cenário 2	96
4.3.3	Evacuação no cenário 3	97
4.4	TAXA DE FLUXO E FLUXO ESPECÍFICO NAS PORTAS DE SAÍDAS	99
4.4.1	Cenário 1	99

4.4.2	Cenário 2 .....	102
4.4.3	Cenário 3 .....	104
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>108</b>
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	109
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>111</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O fogo foi uma descoberta que mudou a humanidade, porém com o avanço da sociedade e a densificação urbana, acidentes com o fogo, em especial os incêndios de edificações, ainda provocam graves prejuízos e perdas de vidas humanas. De acordo com as estatísticas disponibilizadas pelo Corpo de Bombeiros Militar do Rio Grande do Sul (CBMRS), no estado foram atendidos 11.909 incêndios no ano de 2017, 16.730 em 2018, 19.629 em 2019, 26.521 em 2020, 21.557 em 2021 e no ano de 2022, dos meses de janeiro a maio, foram atendidas 10.490 ocorrências. Os dados demonstram o grande número de ocorrências de incêndios que foram atendidas no decorrer dos anos.

A segurança dos usuários das edificações em situações de emergência, como a ocorrência de incêndios, atentados ou terremotos, é garantida pela rápida evacuação e, no caso de incêndios, pelo consequente rápido combate ao fogo. Para que a evacuação seja bem-sucedida, é necessário que as edificações sejam dotadas de condições apropriadas, como rotas de saídas desobstruídas, acessíveis, com sinalização e dimensionamento adequados.

Conforme Alves, Campos e Braga (2008), a segurança contra incêndio em edificações deve ser considerada, principalmente, na fase de projeto, pois é nessa fase que vários problemas que possam existir na fase de uso do edifício podem ser previstos e resolvidos, e os projetos de arquitetura, quando bem elaborados, representam papel importante como medida preventiva e de proteção passiva nas edificações. A reação ao fogo dos materiais, principalmente os de revestimento de pisos, paredes e tetos, tem grande influência sobre o tempo disponível para a evacuação dos compartimentos afetados por incêndios (GOUVEIA e ETRUSCO, 2002), portanto a correta especificação destes materiais é de fundamental importância para alcançar projetos com adequado desempenho frente a condições de incêndios.

Além do comportamento humano e das características do incêndio, segundo Sun e Turkan (2020), o desempenho da evacuação interna também depende das propriedades físicas dos edifícios, como o *layout* da edificação e a capacidade de ocupação. Especificamente, os caminhos de saída e uma densidade de ocupantes adequada podem ajudar a evitar aglomerações em certos locais de construção, por exemplo, perto da entrada principal de edifícios, o que pode levar a falhas de evacuação. Porém, caminhos de saída redundantes ocupariam espaço extra e impactariam negativamente a utilização do espaço do edifício. Portanto, para alcançar tanto a segurança contra incêndio quanto os objetivos de projeto e construção ideais do edifício, é



desejável otimizar a utilização dos espaços, permitindo tempo para que todos os ocupantes saiam da instalação com segurança. Caso contrário, o projeto do edifício (número de saídas, larguras dos caminhos e capacidade de ocupantes) deveria ser ajustado para atingir o caso em que o tempo necessário de escape seja menor que o tempo disponível para o abandono do edifício.

O tempo de escape necessário em uma edificação, de acordo com Gouveia e Etrusco (2002), é composto de várias parcelas: tempo de detecção (tempo decorrido entre o início e a detecção do sinistro), tempo de alarme (tempo até a notificação dos ocupantes), tempo de pré-movimento (tempo decorrido entre a notificação dos ocupantes e o início da evacuação) e tempo de evacuação (tempo gasto no deslocamento até a saída). Para Zhang e Long (2021), o tempo de escape seguro necessário pode ser dividido em três fases: tempo de detecção, tempo de reação e tempo de fuga.

Segundo Xiao *et al.* (2021), quando ocorre um incêndio em uma edificação, a evacuação segura do local depende principalmente da comparação entre o tempo de evacuação seguro necessário (TESN) e o tempo de evacuação seguro disponível (TESD). O TESH refere-se ao tempo necessário para que todas as pessoas no local sejam evacuadas com segurança a partir do momento em que a emergência é descoberta e o TESH refere-se ao tempo limite que as pessoas no local estão expostas ao risco de acidentes externos após a ocorrência de uma emergência de incêndio. Para que pessoas possam sair de uma edificação em segurança, o TESH deve ser menor ou igual ao TESH.

Ainda de acordo com os autores, o TESH é composto pela soma dos tempos de alarme, de resposta e de evacuação, sendo que o tempo de alarme se refere ao tempo entre a descoberta de um acidente pelas pessoas no local e a notificação de todas as pessoas, tempo de resposta refere-se ao tempo que as pessoas levam para iniciar a evacuação após receberem instruções sobre a situação perigosa e tempo de evacuação é o tempo total necessário e é determinado em conjunto pelos atributos físicos das pessoas, mudanças psicológicas, características do ambiente, e outros fatores, sendo este valor de difícil determinação.

Não é realista e seria inaceitável estudar o desempenho da evacuação humana sob um prédio em chamas, pelo risco envolvido e, assim, as ferramentas de simulação, especialmente as computacionais, tendem a ser a melhor abordagem para simular o crescimento do fogo, bem como a resposta humana aos riscos de incêndio (SUN e TURKAN, 2020). De acordo com Shi, Ren e Chen (2009), os custos de realização de experimentos práticos são muito onerosos e os

dados experimentais são difíceis de capturar, então a simulação de evacuação computacional tornou-se popular nos últimos anos. Conforme Wagner e Agrawal (2014), a modelagem e simulações buscam remediar esse problema, permitindo o teste de vários cenários específicos do ambiente a baixo custo.

Os modelos computacionais têm sido utilizados, em nível mundial, para estimar o tempo de evacuação e simular o crescimento de um incêndio em edificações. Segundo Lia *et al.* (2020), a simulação de evacuação é uma abordagem eficaz para reproduzir o comportamento de evacuação dos ocupantes durante emergências de incêndio em edifícios, sendo importante para avançar no entendimento sobre a tomada de decisões dos ocupantes durante a evacuação e para desenvolver medidas apropriadas para facilitar o processo de evacuação e, portanto, reduzir os riscos que os ocupantes podem enfrentar.

Conforme Li *et al.* (2018) e Xu e Peng (2020), com o desenvolvimento da simulação numérica, muitos *softwares* foram disponibilizados comercialmente, os autores citam mais de 20 opções para a simulação de fogo e modelagem de evacuação, incluindo PyroSim, Pathfinder, STEP e Analog, dentre outros. A simulação numérica permite alcançar resultados que demandariam experimentos muito grandes e custosos para a obtenção, bem como, possui a vantagem de que vários cenários podem ser simulados, com a finalidade de que sejam propostos projetos com uma maior eficiência em termos de segurança contra incêndio.

O BIM (*Building Information Modeling*, em inglês) é uma tecnologia que visa aumentar o nível de automação em projetos de arquitetura, engenharia e construção. O modelo virtual criado da instalação permite coordenar todas as etapas durante todo o ciclo de vida do edifício e fornece, não apenas informações sobre a geometria da instalação, mas também informações descritivas sobre o edifício e seus elementos, conforme Lesniak, Monika e Skrzypczak (2021). Durante a fase de projeto e implementação, os modelos BIM facilitam a otimização de tempo, custos e qualidade e, na fase operacional, apoiam a gestão eficaz da execução.

Segundo os autores, a característica e vantagem mais importante do BIM é sua capacidade de salvar dados sobre uma determinada instalação em um só lugar, ou seja, no modelo BIM e no modelo gráfico resultante em uma visão multidimensional. O BIM permite a criação rápida de diferentes versões de objetos na fase conceitual, o que reduz custos posteriores de alterações já na fase de construção. A tecnologia BIM facilita, assim, o planejamento, o controle efetivo e o acompanhamento da execução dos projetos de construção, contribuindo para o sucesso da execução do projeto. Os autores mencionam que algumas barreiras para a implementação do BIM estão relacionadas à falta de conhecimento e treinamento, bem como a

relutância que as pessoas têm em mudar hábitos já adquiridos, além dos custos para aquisição de *softwares* e *hardwares*.

Na década de 1980 houve o desenvolvimento das tecnologias da informação na construção civil e a implementação de *software* CAD baseado nas informações sobre o objeto em tecnologia 2D. Durante a década de 1990, houve tentativas de combinar informações gráficas e não gráficas no modelo conceitual de um edifício. Nos anos seguintes houve a expansão da modelagem BIM tridimensional tradicional (3D) e a inclusão de mais possibilidades de informações, chamadas de dimensões do BIM, mas que não seguem uma regra fixa ou normatizada. Por exemplo, a tecnologia BIM 4D seria um modelo virtual de um edifício com planos de construção e a capacidade de controlar o andamento das obras ao longo do tempo juntamente com a visualização do edifício criado virtualmente. Já o modelo 5D permite a criação de uma estimativa de custos e eliminação de erros potenciais na lista de quantidades, o modelo 6D introduz o desenvolvimento sustentável no processo de investimento, enquanto o modelo 7D permite o gerenciamento do ciclo de vida do produto que, na construção, é referido como gerenciamento do ciclo de vida do edifício.

A modelagem BIM oferece uma representação detalhada do edifício, incluindo informações sobre sua geometria, estrutura, sistemas de construção e demais instalações. Utilizando essa modelagem como base para avaliar cenários usando programas de simulação de incêndio e evacuação, seria possível obter uma análise abrangente do comportamento do fogo, levando em consideração as características específicas do edifício, avaliando a evacuação de forma realista e permitindo que o arquiteto ou engenheiro tome decisões que permitam que o abandono do edifício seja feito de maneira rápida e eficiente.

Dentre as diferentes opções de *softwares* disponíveis para realizar essas simulações, pode-se destacar o Pyrosim para avaliar a dinâmica do incêndio na edificação e o Pathfinder que simula a evacuação. Ambos os *softwares* já foram amplamente testados no meio técnico. De acordo com Sun e Turkan (2020), a integração entre a modelagem BIM e os programas de simulação de incêndio e evacuação podem oferecer várias vantagens significativas na simulação, como a eficiência na elaboração dos modelos, podendo acelerar o processo de criação, já que muitas informações relevantes já estavam disponíveis no modelo BIM, economizando tempo dos projetistas. Outra vantagem relevante seria a integração de sistemas, uma vez que a modelagem BIM permite a integração de informações de diferentes sistemas, como quando são utilizados sprinklers, detecção de incêndio, materiais de construção utilizados, dentre outros.

Liu, Gu e Hong (2023) usaram a modelagem de informações de construção (BIM) e um simulador dinâmico de incêndio (FDS) para analisar as características de incêndio e fugas de pessoas em túneis subterrâneos com o auxílio dos *softwares* Pyrosim e Pathfinder. Zhang et al. (2022) estudaram o incêndio e evacuação em um teatro, Xiao et al. (2021) e Zheng et al. (2022) pesquisaram o incêndio e evacuação em uma biblioteca. O emprego da modelagem BIM e dos programas Pyrosim e Pathfinder tem sido usado na literatura recente, sendo que o modelo BIM ao ser importado nos *softwares* traz informações importantes o que torna mais eficiente o estudo, e o uso dos programas de simulação proporciona economia de tempo e recursos e podem ser usados para que projetos mais seguros sejam elaborados. Conforme Sun e Turkan (2020), dada a variedade de ferramentas de modelagem disponíveis para uso, deve ser tirado proveito dos respectivos pontos fortes do uso dessas tecnologias e implementá-los no gerenciamento de segurança contra incêndio.

Nesta pesquisa, será utilizada uma edificação educacional como estudo de caso, sendo usado um prédio de uma biblioteca, com a finalidade de estudar o impacto do fogo durante a evacuação da edificação estudada. Com a utilização da tecnologia BIM, a edificação será modelada e informações a respeito dos materiais usados, mobiliário, bem como, a localização das saídas, por exemplo, serão inseridos no modelo, através da utilização do *software* Revit. Após a modelagem da edificação, com a utilização do *software* Pyrosim, será simulada a propagação do incêndio e, assim, poderá ser avaliada a propagação da camada de fumaça e, conseqüente, perda da visibilidade, bem como, o crescimento da temperatura e propagação de monóxido de carbono (CO) na edificação. Por fim, com a utilização do *software* Pathfinder, será simulada a evacuação dos ocupantes, considerando a influência das condições de incêndio, analisando diferentes cenários possíveis.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo, analisar a influência de um incêndio no tempo de evacuação dos ocupantes de uma edificação com fins educacionais, através de modelagem computacional, aliando o BIM e simulações da propagação do fogo e do processo de evacuação.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Verificar se as saídas de emergência presentes na edificação estavam dimensionadas adequadamente conforme a Resolução Técnica CBMRS N° 11 – Parte 1/2016 Saídas de Emergência;
- Avaliar a propagação da camada de fumaça, aumento da temperatura, diminuição da visibilidade e concentração de CO durante a ocorrência do incêndio;
- Analisar o tempo de evacuação e a dinâmica de movimento dos agentes na edificação em situação normal e em situação de pânico quando ocorre um incêndio sob diferentes cenários;
- Analisar a taxa de fluxo e o fluxo específico para as portas de acesso e saídas de emergência durante a evacuação nos diferentes cenários.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Podem ser mencionados os seguintes pontos:

- A escolha por esse tema justifica-se pela necessidade de compreender e analisar a propagação de incêndios e a dinâmica de movimentos dos agentes em situações de pânico e emergência.
- Não é viável estudar o desempenho da evacuação sob um prédio em chamas, pelo risco e custo envolvidos e, assim, as ferramentas de simulação têm sido usadas para simular o crescimento do fogo, bem como a resposta humana aos riscos de incêndio.
- A segurança contra incêndio é um aspecto importante nos projetos e construções das edificações, e com a verticalização dos prédios torna-se fundamental que os projetos sejam eficientes e seguros para assim evitar perdas. Com o avanço da tecnologia e o aumento da complexidade das estruturas, a aplicação da tecnologia BIM, torna-se cada vez mais importante para garantir a eficiência e precisão na elaboração de projetos de incêndio.
- Com o uso da tecnologia BIM e dos programas de simulação Pyrosim e Pathfinder é possível simular e analisar incêndios e a evacuação de pessoas em edifícios, o que pode contribuir significativamente para que projetos mais seguros sejam elaborados e os ocupantes possam abandonar as edificações em caso de emergência em segurança.

### 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho foi estruturado em cinco capítulos. O primeiro capítulo aborda a introdução e contextualização da questão da segurança contra incêndio, além de salientar a importância da simulação computacional como um instrumento auxiliar para a elaboração de projetos bem como introduz e salienta a importância da modelagem BIM. Expõe também os objetivos gerais e específicos, a justificativa e a estrutura da dissertação.

No segundo capítulo será apresentada a revisão de literatura, onde foram descritos de maneira sucinta incêndios que ocorreram no cenário nacional, algumas normas e regulamentações são mencionadas. Os estudos correlatos e com temas semelhantes aos objetivos da pesquisa são apresentados.

São abordados no terceiro capítulo a metodologia usada no trabalho. São mencionados os programas computacionais utilizados na pesquisa como o BIM usado na modelagem da edificação, o Pyrosim usado para a simulação da propagação do incêndio e o Pathfinder que foi utilizado para simular a evacuação dos ocupantes são apresentados neste capítulo. Os métodos de pesquisa com determinação das etapas e procedimentos metodológicos empregados no desenvolvimento do estudo são apresentados neste capítulo. O quarto capítulo trará os resultados das simulações e as discussões para os cenários propostos, onde com o auxílio do *software* Pyrosim serão analisados a propagação da fumaça, aumento da temperatura, diminuição da visibilidade e concentração de monóxido de carbono (CO) para a edificação usada como estudo de caso. Usando o *software* Pathfinder será analisada a evacuação dos ocupantes na edificação considerando esta em situação normal e quando ocorre um incêndio. Por fim, as taxas de fluxo e fluxos específicos das portas serão apresentadas.

O quinto capítulo será destinado para as considerações finais da pesquisa, bem como, para a apresentação das sugestões de trabalhos futuros. Finalizando, apresentam-se as referências consultadas e utilizadas para o desenvolvimento desta pesquisa.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Nesse capítulo serão apresentados e discutidos os principais tópicos relacionados ao estudo realizado. Será realizado um breve panorama sobre incêndios que ocorreram no Brasil, bem como será abordada de maneira sucinta a legislação de segurança contra incêndio no Brasil e no estado do Rio Grande do Sul. Por fim, será feita uma revisão da literatura relevante na área da pesquisa que está sendo realizada.

### 2.1 INCÊNDIOS QUE OCORRERAM NO CENÁRIO NACIONAL

Alguns incêndios marcaram a história do Brasil, em edificações com as mais diversas ocupações, desde prédios comerciais, museus, até casas noturnas.

O estado do Rio de Janeiro foi cenário para grandes incêndios, destacando-se o ocorrido no Gran Circus Norte Americano, no ano de 1961, tendo este evento deixado muitas vítimas fatais e, também, um grande número de feridos. Nos anos de 1970, ocorreram os grandes incêndios dos edifícios Andraus e Joelma, ambos na cidade de São Paulo. Eventos traumáticos, com perdas de muitas vidas e extensa cobertura midiática, motivando o estudo e publicação de legislações relacionadas à segurança contra incêndios no estado de São Paulo (VALENTIM, 2008).

No Rio Grande do Sul, em 2013, um incêndio em uma casa noturna, a Boate Kiss, foi responsável pela morte direta de 242 jovens. Segundo Martins, Cajaty e Braga (2019), o adequado dimensionamento de saídas de emergência neste incêndio poderia ter colaborado sensivelmente para redução da quantidade de mortes ou para a não ocorrência delas.

Em 2018, na cidade do Rio de Janeiro, o Museu Nacional também sofreu um incêndio de grandes proporções e, ainda que não tenha tido vítimas fatais, a perda histórica foi imensurável. Também na cidade do Rio de Janeiro, no ano de 2019, um incêndio no Ninho do Urubu, alojamento de categorias de base de um time de futebol, vitimou dez jovens jogadores.

Em outubro de 2022, duas pessoas perderam a vida em um incêndio numa casa de eventos em Minas Gerais. Em abril de 2023, no Recife, um incêndio em um abrigo para crianças

vitimou 4 pessoas e deixou ao menos 15 pessoas feridas. Outros incêndios com vítimas fatais e com perdas de propriedades ocorreram nos demais estados do país.

Esses eventos marcantes, apesar de traumáticos, serviram para mudar as legislações relacionadas aos projetos de edificações com vistas a evitar e combater incêndios, além de facilitar a fuga no caso desses sinistros.

## 2.2 LEGISLAÇÃO DE SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO

No Brasil, conforme Valentin (2008), as normas e regulamentações que são seguidas possuem critérios prescritivos e, assim, os profissionais projetavam para estar em conformidade com essas regulamentações, ou seja, a ideia envolvida é que para que os usuários estejam em segurança, à largura da rota de fuga deve ser pré-determinada, ou um material pode ser utilizado enquanto outro não. A experiência prévia indica o que pode ou não ser feito, ou que soluções de projeto podem ou não serem desenvolvidas.

Os requisitos prescritivos são valores e critérios muitas vezes definidos empiricamente ou através da experiência dos autores, e nem sempre possuem fundamentação teórica, mas principalmente, dificultam inovações tecnológicas. Nos casos em que os requisitos possuem fundamentação teórica, na maioria das vezes essa fundamentação deriva de normas ou regulamentações estrangeiras e estas nem sempre refletem a realidade brasileira. Em um enfoque prescritivo, segundo Gouveia e Etrusco (2002), o tempo de evacuação seguro disponível é determinado de forma subjetiva, em geral tendo em vista a experiência das autoridades públicas de segurança contra incêndio e que reflete as exigências mínimas estabelecidas para cada ocupação.

A partir de 1970 teve início uma mudança no paradigma prescritivo, de acordo com Valentin (2008), visto que com o desenvolvimento da engenharia de segurança contra incêndios, novas possibilidades passaram a ser consideradas, sem que a segurança contra incêndio fosse diminuída. Nos países desenvolvidos houve um crescente aumento no interesse pelos projetos baseados em desempenho. O sistema baseado em desempenho define de forma clara os objetivos a serem atingidos e, assim, possibilita várias soluções técnicas para atingir o mesmo fim, desde que devidamente justificadas.



A maioria dos eventos que demandam uma rápida evacuação está relacionada a incêndios, segundo Martins, Cajaty e Braga (2019), por isso as saídas de emergência foram incluídas como medidas de segurança nas normas contra incêndio. Cada estado brasileiro tem seu regramento próprio referente ao dimensionamento das rotas de fuga e, quando não o possui, geralmente remetem à norma brasileira NBR 9077 (ABNT, 2001) – *Saídas de emergência em edifícios*, que subsidiou a elaboração da Instrução Técnica (IT) do Corpo de Bombeiros da Polícia Militar de São Paulo IT 11 – Saídas de emergência – sendo, portanto, documentos muito similares. Essa norma estadual passou por várias atualizações, enquanto a última versão da norma brasileira foi publicada em 2001, há mais de duas décadas.

O incêndio na Boate Kiss ocorrido em 2013 reacendeu o debate sobre a segurança contra incêndio em todo o país, e especialmente no Rio Grande do Sul, pelo grande número de vítimas que o incêndio causou. No mesmo ano da tragédia, foi aprovada a Lei Complementar Nº 14.376 que trata sobre as normas de segurança, prevenção e proteção contra incêndios nas edificações e áreas de risco de incêndio no estado, e sofreu algumas alterações posteriormente, ficando conhecida como Lei Kiss. No que se refere às saídas de emergência, o estado possui resolução própria, tendo sido publicada a Resolução Técnica CBMRS Nº 11, Parte 01/2016 – Saídas de Emergência, que estabelece os requisitos mínimos necessários para o dimensionamento das saídas de emergência para que as edificações possam ser abandonadas, em caso de incêndio ou pânico. Já em relação ao controle dos materiais de acabamento e de revestimento empregados nas edificações, o estado não possui regramento próprio e deve seguir a Instrução Técnica Nº 10/2019 do Corpo de Bombeiros da Polícia Militar de São Paulo.

### 2.3 LITERATURA RELEVANTE NA ÁREA

Nesta seção é apresentada uma revisão da literatura recente sobre as técnicas de simulação propostas neste estudo e que utilizaram os mesmos *softwares* aqui usados ou outros equivalentes.

Valentin (2008) em seu estudo, utilizando o modelo matemático de abandono comportamental denominado *building Exodus*, simulou o abandono de 4 escolas e 3 cenários foram investigados com o objetivo de avaliar as saídas de emergências, sendo que nas simulações não foram considerados os efeitos do incêndio, ou seja, não havia aumento da temperatura nem fumaça nas simulações realizadas na pesquisa.

Algumas das conclusões do autor foram que a velocidade das pessoas sofre uma redução nas escadas e, pelo fato das escadas concentrarem o fluxo proveniente de todos os pavimentos, elas acabam regulando o fluxo durante o processo de abandono e devem ser projetadas de maneira a não proporcionarem o estreitamento do fluxo. De acordo com os estudos de caso analisados, os projetistas restringem-se a seguir as exigências contidas nas regulamentações e quando adotam soluções que vão além das exigências, como a adoção de mais de uma escada, não a fazem de maneira correta.

Utilizando como estudo de caso um prédio comercial, Alves, Campos e Braga (2008), através de simulações utilizando os *softwares* FDS (dinâmica de fogo) e *Simulex* (evacuação de pessoas), analisaram a influência da fumaça e da temperatura na fuga das pessoas durante um incêndio na edificação e verificaram a eficiência dos preceitos das normas.

Os autores trazem que a NBR 9077 (ABNT, 2001) estabelece que a capacidade da unidade de passagem deve evacuar 60 pessoas por minuto pelas escadas e 100 pessoas por minuto pelos corredores e portas. Então os pavimentos estariam completamente evacuados em um minuto, o que não foi verificado pela simulação, mesmo seguindo as prescrições quanto ao dimensionamento das escadas. A duração do incêndio na edificação foi obtida a partir da simulação do tempo necessário para a evacuação total do prédio no *software Simulex*. Foi obtido o tempo de 450 s para a total saída das pessoas da edificação e o tempo de esvaziamento de cada andar foi em torno de 100 s.

Conforme foi descrito na pesquisa, a altura da camada de fumaça foi de fundamental importância para que as pessoas tivessem êxito em sair da edificação e seria a maior causadora de mortes em incêndios. A altura da camada de fumaça no estudo de caso alcançou cerca de 1 metro a partir do teto no corredor de acesso à escada de emergência menos de um minuto após o início do fogo, e os ocupantes não mais conseguiriam sair na posição ereta e sim agachados, o que causava um acréscimo no tempo necessário para a saída das pessoas. Outro ponto que dificultou a saída das pessoas que foi identificado na simulação, foi à temperatura na rota de fuga, sendo que a temperatura na camada de fumaça após 1 minuto de queima ultrapassou 200°C. Outro ponto observado foi à queda dos níveis de fumaça após o fechamento das portas corta-fogo durante a evacuação.

Palmiere, Riascos e Riascos (2015) em seu estudo fizeram uma análise de incêndio e eficiência energética utilizando como estudo de caso edifícios verdes, que são edificações projetadas para serem sustentáveis, eficientes, econômicas e melhorarem a qualidade de vida

dos usuários e moradores próximos. Nesta pesquisa, foi analisado um edifício comercial com duas opções de fachada, sendo uma fachada totalmente envidraçada (pele de vidro) e uma fachada com área permeável de 40%, para que pudessem ser analisados a eficiência energética em edifícios verdes e os padrões de segurança contra incêndios. Os autores usaram para a simulação da eficiência energética os seguintes programas: *Google Sketch UP 8* para criar a envolvente do edifício a ser simulada no *EnergyPlus 7-2*, e as simulações de incêndio e evacuação foram realizadas utilizando os *softwares* *Pyrosim* e *Pathfinder*, respectivamente.

Os resultados encontrados mostram que no edifício com fachada com 40% de área de janelas, os pisos afetados pelo incêndio foram do 3º ao 9º, e no edifício com pele de vidro foram afetados do 3º ao 11º. Considerando a instalação de sprinklers automáticos, a segurança dos ocupantes estaria garantida, pois o fogo seria controlado em até 3 minutos após o seu início. Foi concluído no estudo, que em termos de prevenção de incêndio, edifícios com área de janela menor são mais seguros apresentando um tempo de evacuação maior do que o edifício com pele de vidro. Outro fator importante mencionado pelos autores foi que, às vezes, os vidros especiais aplicados em edificações com pele de vidro, como os vidros resistentes ao fogo, podem dificultar o acesso dos bombeiros ao edifício.

Cuesta *et al.* (2017) realizaram a coleta de dados de evacuações em prédios escolares, entre 2011 e 2014, e as informações coletadas foram usadas como referência de dados de evacuação, com foco nos tempos de pré-evacuação, nas rotas empregadas, nas velocidades de deslocamento adotadas e nos tempos de chegada. Usando quatro *softwares* (*Building Exodus*, *MassMotion*, *Pathfinder* e *STEPS*) e o modelo hidráulico da *Society of Fire Protection Engineering* (cálculo manual), foram feitas comparações entre o resultado dos *softwares* e o resultado observado em um dos casos de evacuações observados. O objetivo do trabalho foi fornecer informações sobre a configuração dos modelos para cenários equivalentes, examinar qualquer variação nas condições simuladas dadas condições iniciais equivalentes e fornece sugestões sobre como realizar estudos de validação para vários modelos de evacuação.

Os autores concluíram que não seria seguro supor que o entendimento do desempenho em um ambiente possa ser aplicado diretamente em outro e as evacuações escolares representam um bom exemplo onde tal abordagem não seria apropriada. Para que seja possível quantificar o desempenho da evacuação com confiança na aplicabilidade dos métodos, seriam necessários modelos de evacuação que possam ser configurados adequadamente e que tenham sido testados em relação aos padrões de desempenho para aumentar nossa confiança nos resultados produzidos. No estudo foram produzidos dados para melhorar a compreensão das

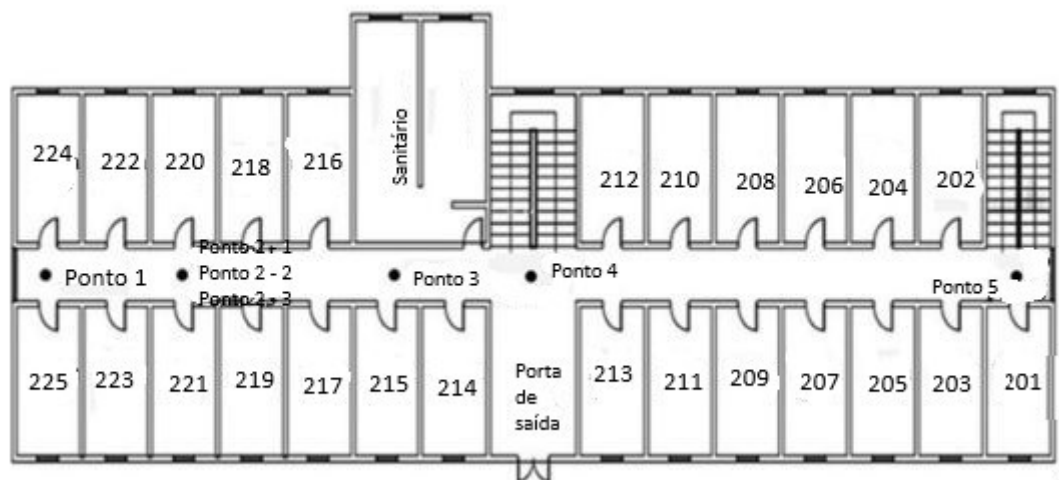
evacuações escolares, a configuração e execução de cinco modelos de evacuação e analisados os resultados produzidos. Os resultados produzidos foram animadores, tanto em termos da capacidade de usuários independentes configurarem os modelos quanto da precisão dos modelos examinados.

Samad, Taib e Ying (2017) em seu estudo tiveram como objetivo investigar a eficácia das legislações prescritivas usadas como base em prédios públicos durante o processo de evacuação envolvendo grandes multidões durante emergências. Utilizaram duas edificações como estudo de caso, dois centros de pesquisa, e usaram os *softwares* Pyrosim e Pathfinder, para analisar os efeitos da espessura de fumaça sobre a evacuação, respectivamente. Os resultados apresentados são relativos à temperatura, visibilidade e tempo de evacuação e, em ambos os estudos de caso, foi presumido que o incêndio teria origem em um mesmo compartimento (átrio). Foi usada uma malha de 0,83 x 0,83 x 0,83 m para precisão e visibilidade dos resultados.

Foi concluído pelos autores que a proteção passiva contra incêndio, o *layout*, o tipo de estrutura e os materiais de acabamento, atendem ao padrão exigido na legislação, bem como a proteção ativa, os sistemas de detecção e supressão de incêndio são suficientes. No entanto, devido ao átrio com pé-direito elevado e a posição da ventilação e dos sprinklers serem altos, o incêndio deve ser muito grande para que os sprinklers possam ser ativados, o que resultará em condições insustentáveis nos níveis mais baixos do átrio. As simulações relativas à propagação do incêndio, estudo de fumaça e modelagem de evacuação, demonstrou que os meios de fuga projetados de acordo com os regulamentos cumprem os requisitos de tempos disponíveis e necessários das edificações. Porém, embora existam saídas adequadas designadas de acordo com os requisitos de incêndio, o impacto da geometria dos átrios no comportamento do fogo e da fumaça tem efeito significativo no tempo de fuga, especialmente para usuários desconhecidos das instalações.

Long, Zhang e Lou (2017) realizaram o estudo do risco de incêndio utilizando como estudo de caso um edifício de dormitórios de uma universidade, onde foram analisados o fluxo de calor, visibilidade, altura da camada de fumaça, temperatura e movimento da fumaça. Para o estudo usaram o *software* Pyrosim para o estudo do fogo e o Pathfinder para a evacuação das pessoas. O *layout* da edificação é mostrado na Figura 1. Apenas a porta no meio do primeiro andar pode ser usada para fuga. Foi feita a suposição de que o fogo começou no beliche superior do quarto 220, no segundo andar.

Figura 1 - *Layout* e pontos de medição do piso de incêndio.



Fonte: Long, Zhang e Lou (2017).

A condição inicial era que as portas e janelas estivessem todas abertas, e a condição de contraste era que a janela da sala de origem do fogo estava fechada, enquanto outras portas e janelas estavam todas abertas. O número total de alunos no prédio foi de 400 pessoas. Foi adotada uma malha de  $0,2 \times 0,2 \times 0,2$  m no estudo.

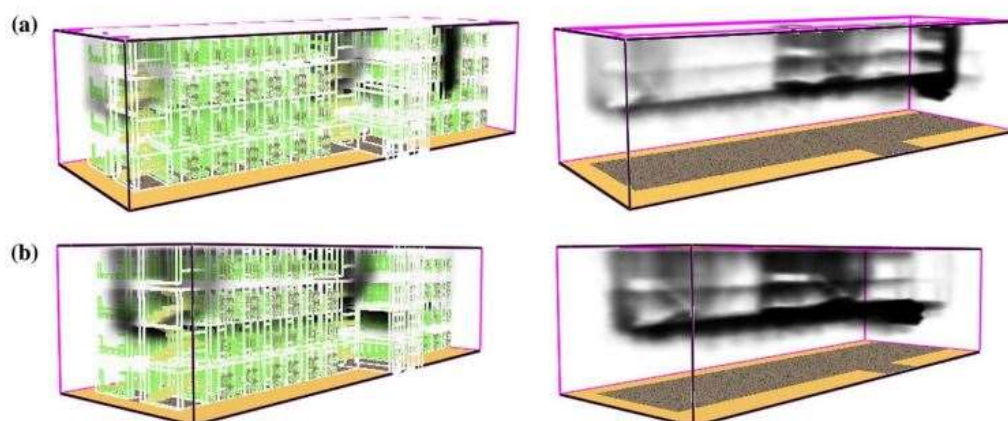
Conforme descrito pelos autores, o modelo Pyrosim foi importado para o Pathfinder. O modo de evacuação adotado no Pathfinder foi o SFPE, os ocupantes foram modelados como indivíduos independentes, não sendo limitados por grupos sob este modelo, e as pessoas se movem em direção a saída pelo caminho mais curto. A velocidade de escape adotada no *software* foi o valor padrão de 1,19 m/s para obter o melhor momento para que os ocupantes pudessem escapar.

Em todo o processo, a temperatura no edifício não foi elevada, exceto na sala onde o fogo se originou. Portanto, a temperatura teve pouca influência na fuga das pessoas. Para as pessoas na sala de origem do incêndio, elas deviam ficar abaixo da camada de fumaça para evitar a alta temperatura ao escapar da sala. A visibilidade na parte esquerda do corredor onde o fogo começou era a mais baixa. Em relação à altura da camada de fumaça, quando a altura fosse inferior a 2,5 m, a fuga das pessoas ficava prejudicada e quando ela fosse inferior a 1,5 m, as pessoas não conseguiriam completar a fuga. Como a combustão da superfície de madeira ocorria lentamente, a altura da camada de fumaça permaneceu inalterada nos primeiros 20 s. A altura da camada de fumaça caiu rapidamente para o mínimo entre 20 e 40 s, e então

permaneceu estável em 1,4 m. As pessoas na sala em chamas deveriam escapar da sala nos primeiros 40 s, ou estariam em perigo.

Os resultados obtidos pelos autores demonstram que com todas as janelas abertas, a zona de maior temperatura é a sala de origem do incêndio e a temperatura do piso do incêndio foi superior a dos outros pisos. Quando todas as janelas e portas estavam abertas, a fumaça escapava pela janela e depois se espalhava para cima. As salas acima da sala do início do fogo foram as mais seriamente influenciadas pela fumaça. Quando a janela da sala de origem do fogo estava fechada, a fumaça se espalhava pela porta, lateralmente e para cima a partir das escadas. Nesse caso, os corredores horizontais e as escadas eram os mais influenciados pela fumaça. Portanto, quando ocorre um incêndio em uma sala, seria melhor abrir a janela da sala de origem do incêndio e fechar as janelas das salas acima da origem do incêndio para evitar o reingresso da fumaça. Quanto mais perto da fonte de fogo, menor a visibilidade. Com a janela fechada, a temperatura ambiente de origem do incêndio e o fluxo de calor são muito maiores do que com a janela aberta, enquanto a altura da camada de fumaça é muito menor. A Figura 2 mostra a comparação da propagação da fumaça nos dois estados em  $t = 530$  s.

Figura 2 - Comparação da propagação da fumaça em  $t = 530$  s: (a) janela aberta; (b) janela fechada.



Fonte: Long, Zhang e Lou (2017).

Usando o Pathfinder, Hu e Chen (2014) simularam a evacuação de emergência de uma biblioteca. Foram propostos cinco cenários, sendo que inicialmente foram feitas duas simulações de cenários que poderiam ocorrer, e posteriormente, foram feitas três simulações visando solucionar problemas que poderiam ocorrer no processo de evacuação. No primeiro

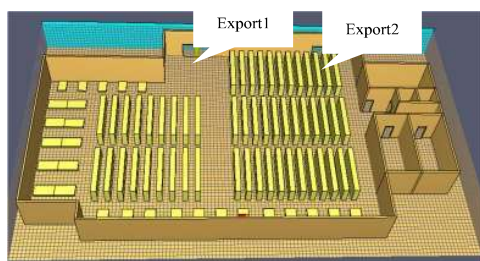
cenário umas saídas estavam abertas e outras fechadas, no segundo cenário todas as saídas estavam abertas, no terceiro cenário todas as saídas estavam abertas e haviam pessoas treinadas orientando a evacuação, no quarto cenário todas as saídas estavam abertas e algumas escadas estavam fechadas e por fim no quinto cenário os assentos de leitura foram ajustados.

Foi concluído que a evacuação de uma das áreas da biblioteca (área norte) foi mais eficiente do que outra (área sul) e os autores recomendaram que os assentos das salas de leitura fossem reorganizados, para desviar as pessoas e, assim, utilizar a capacidade de evacuação da área mais eficiente. O uso desequilibrado das escadas de evacuação de emergência foi o principal fator que restringiu o tempo de evacuação, sendo então sugerido que os funcionários da biblioteca reforcem o treinamento, ou seja, atuem enquanto brigada de incêndio para tornar o processo mais eficiente e atuem rapidamente durante uma emergência e orientem os alunos a encontrarem rotas e saídas seguras.

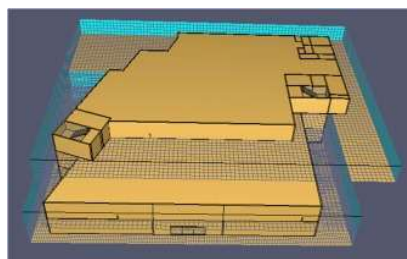
Li *et al.* (2018) pesquisaram a propagação da fumaça e evacuação de pessoas quando o sistema de extinção de incêndio falhava em uma biblioteca universitária durante um incêndio (Figura 3). O Pyrosim foi usado para modelar a biblioteca e analisar a variação de temperatura, a altura da camada de fumaça, a perda de visibilidade, concentração de CO e fumaça tóxica. A fumaça tóxica é avaliada usando o método FED (Dose Efetiva Fracionada), que é calculado pelo *software*, com base no método de concentração dos componentes da fumaça. Quando o valor de FED é menor que 0,1, é seguro para quem está exposto a ele. O Pathfinder foi usado para simular a evacuação da sala de leitura e de toda a biblioteca. O tamanho da malha na simulação da sala de leitura foi 0,4 x 0,4 x 0,4 m, na biblioteca foi usado no átrio uma malha com as mesmas dimensões da sala de leitura e em toda a edificação foi usada uma malha com 0,8 x 0,8 x 0,8 m.

Figura 3 - Modelagem da biblioteca. a) O modelo da sala de leitura. b) Modelo do átrio.

a)



b)



Fonte: Li *et al.* (2018).

Os resultados obtidos pelos autores com o uso do Pyrosim demonstram que a taxa de liberação de calor da fonte de fogo no início teve um crescimento exponencial, atingindo o poder de fogo definido de 4 MW em 292 s e, em seguida, manteve um desenvolvimento constante. Em cerca de 280 s, a altura da fumaça na saída do primeiro andar tinha caído para 2 m e a altura da fumaça na saída do terceiro andar nunca havia diminuído.

Portanto, com base nos resultados da simulação da altura da camada de fumaça, o tempo de chegada do perigo de incêndio é de 280 s. Através da simulação da visibilidade, concentração de CO e valor FED (fumaça tóxica), os resultados mostraram que não há perigo para as pessoas dentro de 400 s. Pode-se concluir que quando o sistema de extinção de incêndio falha, o tempo de risco da biblioteca é de 280 s, na escala de incêndio de 4 MW. Através da simulação da temperatura, altura da camada de fumaça, visibilidade, concentração de CO e valor FED, foi concluído que quando o sistema de extinção de incêndio falha, o tempo de risco da sala de leitura é de 125 s, na escala de incêndio de 8 MW.

Usando o Pathfinder, os resultados de evacuação de toda a biblioteca e da sala de leitura foram analisados pelos autores, sendo os dois modos do *software* (modo SFPE e modo *Steering*) utilizados. A velocidade padrão foi de 1,19 m/s foi usada na pesquisa, o número de pessoas foi considerado de acordo com o número máximo real, sendo definido como o número de pessoas na biblioteca de 2.344, o número de pessoas na sala de leitura foi fixado em 160 e a população foi considerada jovem.

Os resultados da simulação obtidos por Li *et al.* (2018) demonstram que serão necessários 331 segundos para que todas as pessoas abandonem a biblioteca, sendo que todos os indivíduos na sala de leitura serão evacuados em 85s, sob o modo *Steering*. Quando o modo SFPE foi adotado, as pessoas na biblioteca e na sala de leitura foram completamente evacuadas, exigindo 344s e 44s, respectivamente. Nos dois modos começam a aparecer congestionamentos na saída do 3º andar e, como resultado deste congestionamento, há um gargalo de evacuação, eventualmente levando primeiro a um aumento da velocidade de evacuação e depois uma diminuição. O tempo de evacuação segura necessário é mostrado na Tabela 1.



Tabela 1 - O tempo de evacuação seguro necessário (segundos).

Modelo	Sala de leitura	Biblioteca
<i>Steering</i>	165	411
SFPE	125	424

Fonte: Li *et al.* (2018).

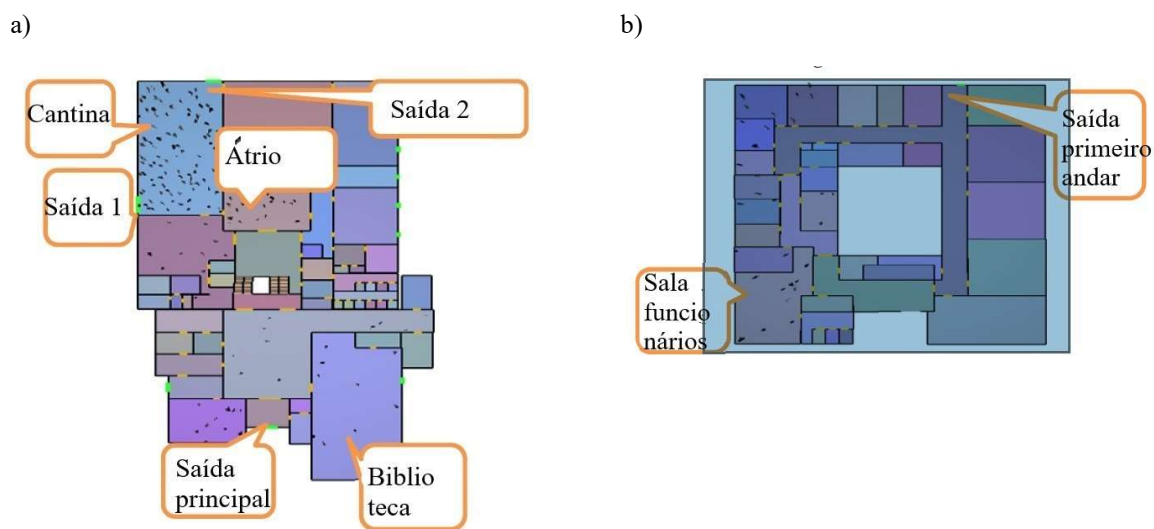
Como conclusão da pesquisa, Li *et al.* (2018) entendem que o modelo *Steering* é mais adequado para simular a evacuação da biblioteca e o tempo de evacuação seguro necessário para a sala de leitura e biblioteca foi de 165 s e 411 s, respectivamente. As pessoas não conseguiram completar a saída durante o tempo de evacuação disponível, portanto ficariam vulneráveis à fumaça durante o incêndio. A saída do terceiro andar é a área mais perigosa para uma evacuação segura, e o seu tempo de congestionamento foi responsável por 94,3% do tempo necessário para uma evacuação segura. A velocidade de evacuação segura foi significativamente reduzida devido ao congestionamento e o principal motivo foi a grande densidade populacional e o uso de escadas compartilhadas. Portanto, novas saídas de emergência, indicadores de rota e iluminação de emergência devem ser adicionados, e o sistema de alarme de incêndio deve ser melhorado, conforme os autores.

Em relação à simulação do incêndio, os resultados encontrados pelos autores mostraram que, através de uma análise comparativa da temperatura, altura da camada de fumaça, visibilidade, concentração de CO e valor FED, o tempo limite de perigo da biblioteca e da sala de leitura, é o tempo em que a altura da fumaça chega a 2 m. Logo, o volume de fumaça e alarme de detecção e outros fatores, deveriam ser considerados no projeto do sistema de controle de fumaça. Foi recomendado o uso de instalações adequadas para evitar a entrada de fumaça nos andares e assim aumentar a segurança das pessoas.

Ahmed, Mehmood e Kristensen (2019) fizeram uma análise crítica sobre o processo de evacuação de uma edificação de uma instituição pública de ensino e pesquisa de uma universidade. Conforme mencionado por eles, as atividades curriculares e extracurriculares diárias do campus universitário o tornam vulnerável a incidentes de incêndio. O processo de evacuação foi modelado e simulado utilizando o Pathfinder e, assim, através da simulação identificaram os perigos e riscos de congestionamento e atropelamento de ocupantes em caso de emergência, para que então pudessem propor melhorias para o plano de emergência do campus.

Na Figura 4 são apresentadas as plantas da edificação que foram modeladas no Pathfinder. Ambos os modos do *software* (*Steering* e SFPE) foram simulados. Os resultados de ambos os modos foram bastante semelhantes (tempo máximo no modo *Steering* foi de aproximadamente 68 s, enquanto no modo SFPE foi de 67 s).

Figura 4 - Planta da edificação da universidade. a) Térreo b) Primeiro andar.



Fonte: Ahmed, Mehmood e Kristensen (2019) – Adaptado pela autora.

Os autores concluíram que além do tempo total de evacuação, também foi possível identificar as áreas potencialmente perigosas, sendo que no estudo a área mais perigosa foi à cantina, onde poderiam ocorrer congestionamentos devido a outros ocupantes vindos do átrio, o que poderia ocasionar pânico nos ocupantes da edificação. Da mesma forma, os ocupantes do átrio deixaram o prédio pelas saídas de emergências 1 e 2, causando possíveis gargalos. A fim de diminuir o risco de congestionamento, através de ajustes na sinalização de emergência, os autores sugeriram que os ocupantes do átrio deveriam ser orientados a usar a saída principal, o que reduziria o risco de congestionamento próximo às saídas de emergências 1 e 2.

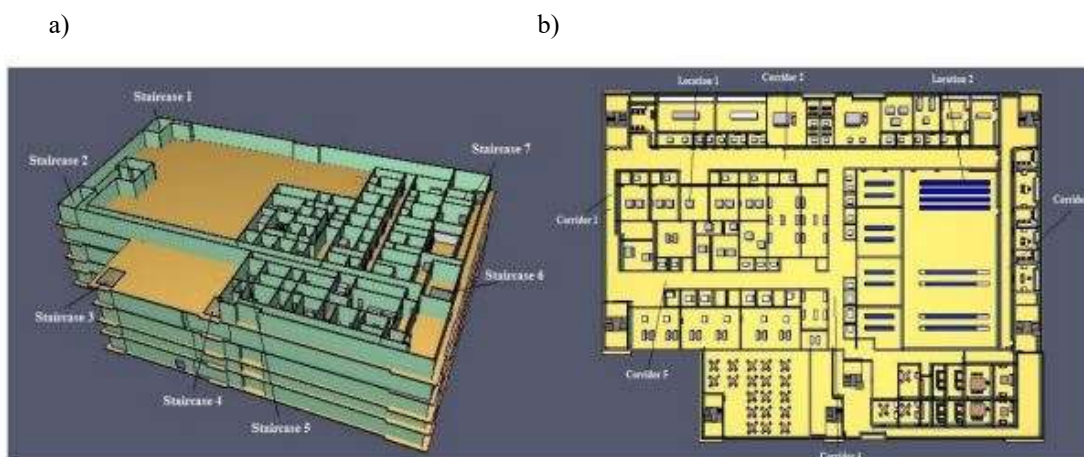
Motivados pelo grande número de incêndios que ocorreram em casas noturnas, Martins, Cajaty e Braga (2019), utilizando o *software* Pathfinder, escolheram como estudo de caso uma edificação de reunião de público e tiveram como objetivo principal analisar a eficiência das normas quanto ao dimensionamento das saídas de emergência.

Com as simulações, os autores obtiveram dados de tempo de evacuação, fluxo específico, taxa de fluxo e dinâmica de evacuação, e foi possível identificar locais de

congestionamento, gargalos e obstáculos na evacuação. O menor tempo de evacuação foi 149 segundos, obtido nas simulações utilizando o modo SFPE (simulação 1). Quando realizada a simulação usando o modo *Steering* (simulação 2), o tempo de evacuação aumentou para 185 s. Quanto ao fluxo específico, o maior valor obtido foi de 1,45 pessoas/s.m, ainda inferior ao que pode ser extraído das normas de saídas de emergência nacionais e estaduais que, supostamente, seria de 3,03 pessoas/s.m. Concluíram que o nível de segurança propiciado pelas normas de saídas de emergência para a edificação estudada e destinada à reunião de público não é o esperado e mesmo normas que passaram por recentes atualizações ainda adotam um caráter prescritivo.

Saha *et al.* (2019) utilizaram uma instalação farmacêutica de sala limpa (ambientes controlados, onde são realizados testes e/ou fabricação de produtos, com pressão positiva) como estudo de caso em sua pesquisa, Figura 5, com o objetivo de modelar o incêndio e a evacuação para abordar o risco de incêndio e examinar o desempenho da edificação em termos de evacuação, usando os programas Pyrosim e Pathfinder.

Figura 5 - Indústria farmacêutica. (a) Prédio inteiro (b) Piso do incêndio (1º andar).



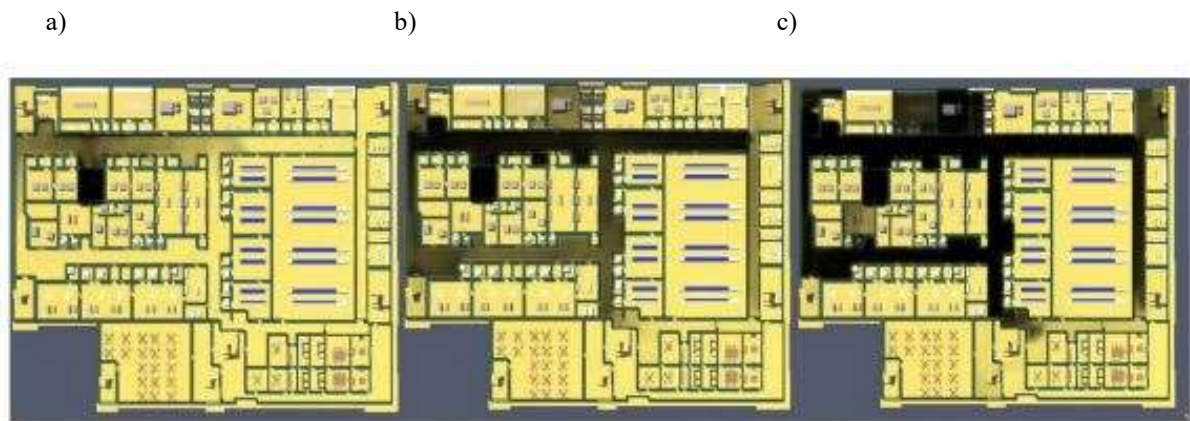
Fonte: Saha *et al.* (2019).

O prédio utilizado possui 5 andares e dois cenários de incêndio em dois locais diferentes da instalação de sala limpa foram considerados, sendo o Cenário A uma piscina de etanol da sala limpa e o Cenário B uma sala de embalagens. Os parâmetros que devem permanecer abaixo de limites específicos durante um incêndio para que as pessoas possam sair com segurança

foram temperatura, concentração de fumaça (monóxido de carbono - CO) e visibilidade. Esses parâmetros foram avaliados em diferentes locais do prédio.

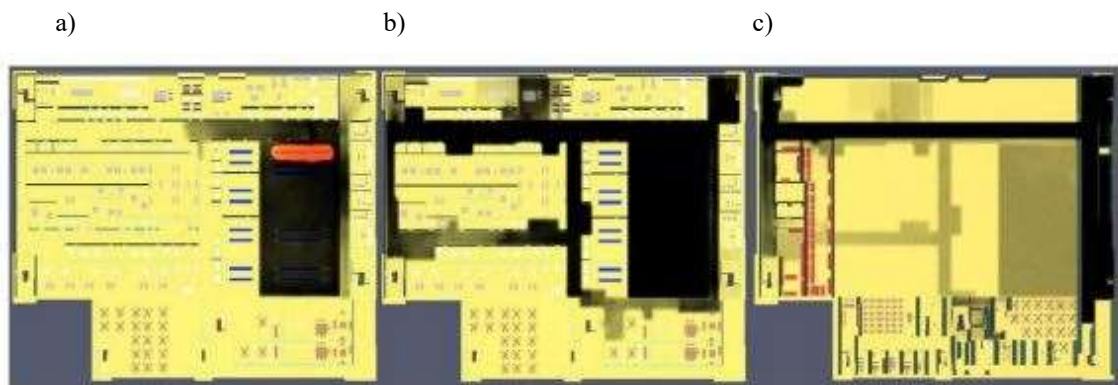
A propagação da fumaça no prédio para as duas diferentes cargas de combustível e condições de incêndio são mostradas nas Figuras 6 e 7. Para o cenário de incêndio A (1000 kg etanol), todos os corredores e escadas (1 e 7) do piso do incêndio foram cobertos por fumaça dentro de 490 s a partir do início do fogo. A redução da visibilidade foi maior para os ocupantes que estavam na porção esquerda do corredor 1 e escada 1 por ser a mais próxima do incêndio.

Figura 6 - Comparação da fumaça espalhada pelo piso de incêndio para o cenário A em diferentes tempos. (a) 60s (b) 180s (c) 500s.



Fonte: *Saha et al.* (2019).

Figura 7 - Comparação de fumaça espalhada no piso de incêndio para o cenário B nos seguintes tempos: (a) 50s (b) 150s e no 2º andar aos (c) 270s.



Fonte: *Saha et al.* (2019).

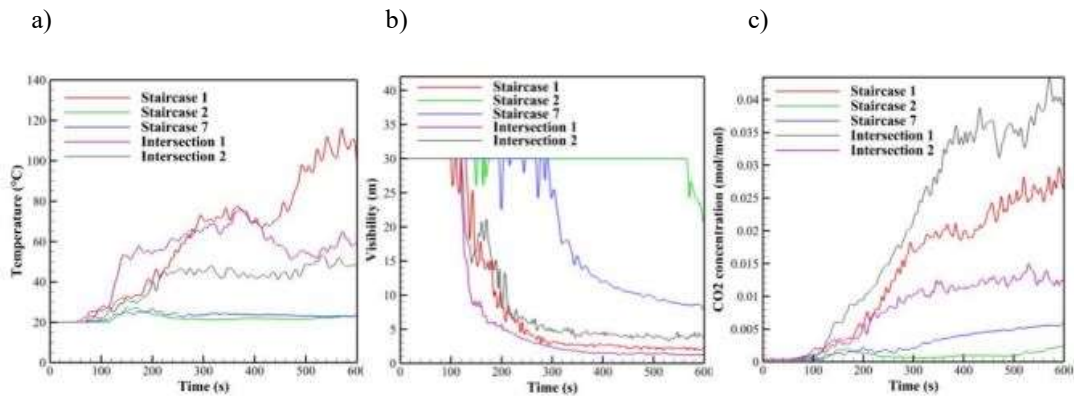
Para o cenário de incêndio B (Figura 9), a fumaça levou 70% menos tempo do que o cenário de incêndio A (Figura 8) para se espalhar por todos os corredores e a escada 7 do piso de incêndio. Como a quantidade de combustível é muito alta, os corredores e as escadas (1,6 e 7) do 2º e 3º andar também ficaram cobertos por uma camada de fumaça. Duas portas da área de embalagem foram mantidas abertas para investigar o pior cenário. A escada 1 ultrapassou o limite suportável de temperatura após 280 s e o limite de visibilidade após 260s da origem do incêndio para o cenário A. A temperatura máxima foi encontrada na escada 1 (110°C), enquanto a temperatura das escadas 2 e 7 estava abaixo do limite suportável.

A visibilidade caiu abaixo do limite suportável pela primeira vez na interseção-1. Pode ser visto na Figura 8 (a) que a temperatura máxima foi de 520 °C no corredor 2. Para o cenário de incêndio B, a escada 7 atingiu a estabilidade de temperatura após 80 s e o limite de visibilidade depois de 75 s após o início do incêndio.

A simulação da evacuação foi considerada para 3 cenários diferentes. O primeiro caso é o caso ideal onde o efeito da propagação do fogo e fumaça não foi considerado e os ocupantes foram evacuados usando as saídas operacionais, ou seja, as portas de emergência permaneceram fechadas/trancadas. O segundo caso considerou a evacuação de ocupantes durante um incêndio resultante de uma carga de incêndio de 1000 kg de etanol (cenário de incêndio A) colocado próximo a uma saída de emergência para o pior cenário dentro da sala limpa. A evacuação durante um incêndio na seção de embalagem (cenário de incêndio B) foi considerada como o terceiro caso.

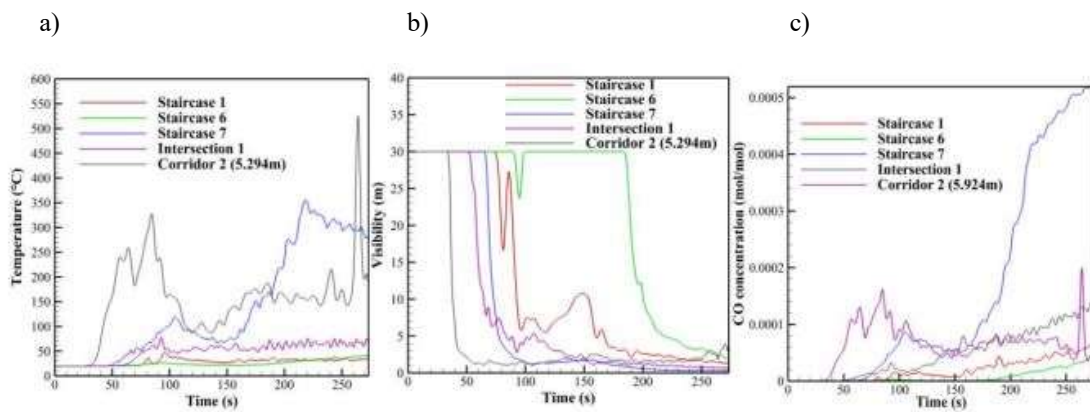
De acordo com o procedimento de operação padrão, as portas de emergência devem permanecer abertas durante um incêndio. Por esta razão, tanto no segundo como no terceiro caso, as portas de emergência são mantidas abertas. Os autores consideraram que a temperatura foi o fenômeno mais crítico para determinar a situação de perigo. A temperatura atingiu seu limite suportável significativamente antes da toxicidade e visibilidade. Os resultados obtidos da simulação para esses casos são mostrados na Tabela 2.

Figura 8 - A variação de (a) temperatura, (b) visibilidade e (c) concentração de CO<sub>2</sub> com o tempo em diferentes escadas e cruzamento de corredores no 1º andar para carga de combustível de 1000 kg de etanol (cenário A).



Fonte: *Saha et al. (2019)*.

Figura 9 - A variação de (a) temperatura, (b) visibilidade e (c) concentração de CO com o tempo em diferentes escadas e interseção de corredores no 1º andar para carregamento de combustível de papelão na área de embalagem (cenário B).



Fonte: *Saha et al. (2019)*.

Tabela 2 - Resumo da simulação de evacuação para os diferentes cenários de incêndio considerados.

Caso	Cenário	Tempo de evacuação (segundos)	Nº de ocupantes que não conseguiram evacuar
Primeiro	Nenhum incidente de incêndio, portas de emergências fechadas	81	0
Segundo	Incêndio em sala limpa (Cenário A), todas as portas de emergências abertas	110	0
Terceiro	Incêndio em sala de embalagens (Cenário B), todas as portas de emergências abertas	124	12

Fonte: *Saha et al. (2019)*.

A partir dos resultados da simulação para o 1º caso, verificou-se que o tempo total necessário para evacuar todos os ocupantes foi 81s. Este foi o menor tempo de evacuação entre os três casos, resultado esperado, pois não foi considerado o efeito da propagação do fogo e da fumaça. O tempo de resposta neste caso foi mantido como zero. Uma vez que as portas de emergência foram mantidas fechadas, os ocupantes puderam utilizar apenas as escadas 3, 4 e 5.

Embora todas as portas estivessem abertas no segundo caso, o tempo de evacuação aumenta devido à inclusão do tempo de resposta e efeito da propagação do fogo e fumaça no procedimento de evacuação. A primeira pessoa a evacuar precisou de 41 segundos desde o início do fogo, que estava localizada no piso térreo, perto de uma saída. Na análise do cenário de propagação de incêndios, verificou-se que o uso do corredor 1 que estava ligado à escada 1 tornou-se insustentável devido à sua temperatura ultrapassar o limite suportável após 80 s de ignição. Os evacuados tiveram que mudar suas rotas, pois encontraram condições insustentáveis, levando a um maior tempo de evacuação. Além disso, foi observado no trabalho que os evacuados escolheram rotas familiares, porém mais longas, em vez de rotas desconhecidas, mas mais curtas e esta foi uma tendência comum para os evacuados que não foram devidamente treinados, conforme os autores.

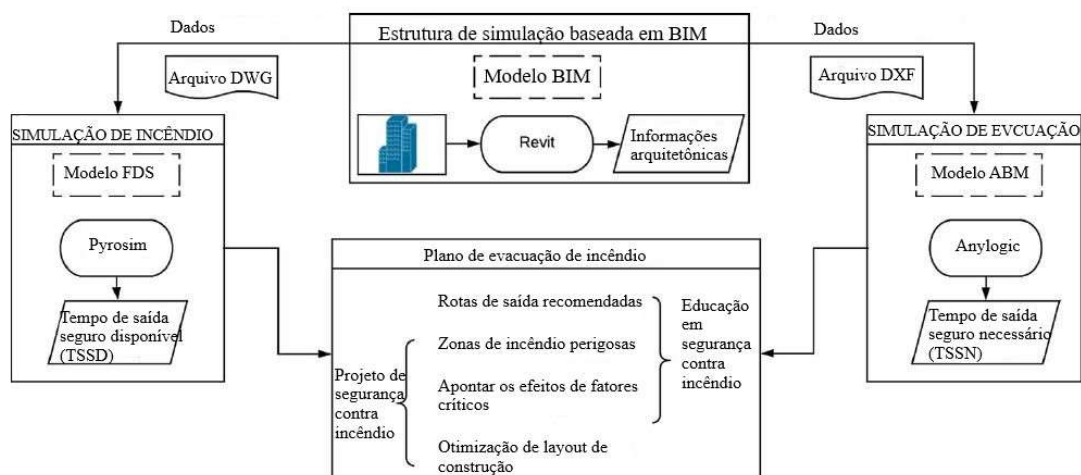
O cenário mais grave foi o terceiro caso (Cenário B) onde o incêndio teve origem na sala de embalagem. A sala de embalagem tinha a maior densidade de ocupantes, o que a tornava mais vulnerável em situações de incêndio. Doze ocupantes ficaram presos, pois todas as vias de saída ao seu redor foram bloqueadas, pois a temperatura excedeu o limite suportável. Foi constatado que os ocupantes da sala de embalagem estavam tentando evacuar pela porta menor, pois era a rota de saída mais perto e evitaram a porta mais larga onde a saída era um pouco mais longe. Como resultado, um congestionamento foi criado na porta menor e alguns ocupantes não conseguiram sair da sala de embalagem. O tempo total de evacuação foi superior ao do segundo caso porque a alta temperatura torna o uso das escadas 6 e 7 insustentável após 62 e 80 s, respectivamente. Os ocupantes tiveram que mudar sua rota da escada 6 e 7 para a escada 5 e isso custou alguns segundos extras para a evacuação e a última pessoa a abandonar o prédio com segurança precisou de 124s. A fumaça obstruiu os corredores e escadas em diferentes posições do edifício devido à alta concentração de CO e temperatura.

Sun e Turkan (2020) em seu estudo tiveram como objetivo desenvolver uma estrutura de simulação baseada em BIM que implemente o *Fire Dynamic Simulator* (FDS) e a modelagem baseada em agentes para simular o crescimento do incêndio e o desempenho da evacuação para diferentes cenários de *layout* arquitetônico, usando como estudo de caso uma

casa noturna. As simulações foram realizadas para validar a estrutura proposta, que verificou os benefícios de usar o BIM para oferecer uma plataforma para conduzir o projeto de simulação e visualizar os resultados, simular o crescimento do fogo usando a ferramenta FDS (Pyrosim), desenvolver um modelo baseado em agentes que considere os fatores críticos que afetam o desempenho da evacuação (*software Anylogic*) e aplicar uma análise estatística para investigar os efeitos de parâmetros influentes do modelo proposto.

Primeiramente, os autores desenvolveram um modelo BIM arquitetônico para a edificação escolhida, Figura 10, utilizando o *software* Autodesk Revit, e as informações como propriedades dos materiais também foram incluídas no modelo. Após, foi realizada a importação do BIM arquitetônico para o Pyrosim para análise FDS para testar o nível de resistência ao fogo do edifício que é avaliado pelo seu tempo de evacuação seguro disponível (TESD) para os ocupantes durante um incêndio. As informações físicas do edifício que são armazenadas no modelo BIM também foram importadas para o *AnyLogic* para simular o cenário de evacuação. Durante a importação, o *AnyLogic* obtém a informação dimensional do edifício do modelo BIM e foi usado para prever o tempo de evacuação seguro necessário (TESN) para os ocupantes. Sendo que os tempos de evacuação podem mudar com base no número de saídas, largura dos caminhos e capacidade de ocupação de uma instalação. As propriedades térmicas dos principais materiais de construção foram obtidas da norma ASTM E84 (2007).

Figura 10 - Estrutura da simulação utilizando os *softwares* BIM, Pyrosim e Anylogic.



Fonte: Sun e Turkan (2020) – Adaptado pela autora.



Os resultados obtidos pelos autores indicam que: (1) a camada de fumaça atinge 1,5 m em 180s e 1,2 m em 300s, o que causará uma redução na velocidade de circulação de pedestres de 10% e 40%, respectivamente; (2) a densidade de fumaça atinge 85% em 380s, que ocorre mais cedo do que as outras limitações físicas humanas (isto é, tolerância à temperatura e toxicidade) nas saídas de emergência. Além disso, a animação utilizando o *software Smokeview* demonstrou que a área da pista de dança é responsável pela propagação mais rápida do fogo. Em resumo, os estágios do TESP desta simulação foram determinados como (1) 180s para fuga ilesa (1º estágio), (2) 300s para fuga de feridos sem morte (2º estágio), e (3) 380s para falha em escapar com vida (3º estágio).

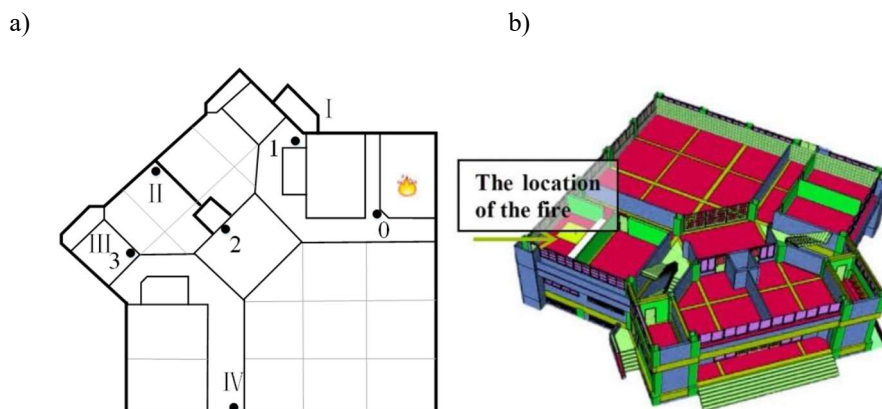
Em relação a simulação de evacuação, os resultados obtidos pelos autores são resumidos como: (1) 127 agentes chegaram a um abrigo em 180 s e escaparam ilesos; (2) 215 agentes chegaram a um abrigo entre 180 e 300 s, escapando com ferimentos leves; (3) 28 agentes chegaram a um abrigo entre 300 e 380 s, que escaparam com ferimentos mais significativos; (4) 92 agentes não conseguiram escapar em 380 segundos e foram considerados mortos; e (5) ao final, o TESP médio para todos os agentes chegarem ao abrigo foi calculado como 510 s. O fluxo de densidade de pedestres indicou que a entrada principal foi frequentemente congestionada durante a evacuação. Algumas das soluções apontadas na pesquisa seriam que o projeto original do edifício poderia ser mantido, porém a capacidade de ocupação deveria ser reduzida de 462 para 323 pessoas, para assim melhorar o sucesso da evacuação e, também, através de treinamento aumentar o número de agentes que estavam familiarizados com as saídas seguras da edificação, para assim melhorar o efeito guia, além de aumentar a conscientização e educação sobre segurança contra incêndio.

Xu e Peng (2020) estudaram o incêndio de um edifício universitário, e construíram um modelo de simulação baseado nos *softwares* BIM, PyroSim e Pathfinder, de acordo com a localização da fonte de fogo, o tipo de crescimento do fogo e a taxa máxima de liberação de calor e analisaram a segurança do edifício.

A planta baixa do estudo de caso proposto pelos autores é apresentada na Figura 11 (a), onde 0 é a posição inicial do fogo, 1-3 eram as escadas e I-III eram as saídas. Em caso de incêndio, a fumaça pode se espalhar nas direções vertical e horizontal e assim todos os ocupantes do prédio devem ser evacuados. O prédio tem dois andares, 3 escadas e 4 saídas de evacuação e o incêndio simulado irrompe em uma sala de aula no segundo andar. O modelo BIM do edifício foi importado para o PyroSim para modelagem, e o ponto de ignição foi definido como mostrado na Figura 11 (b). Com o *software* PyroSim foram simulados

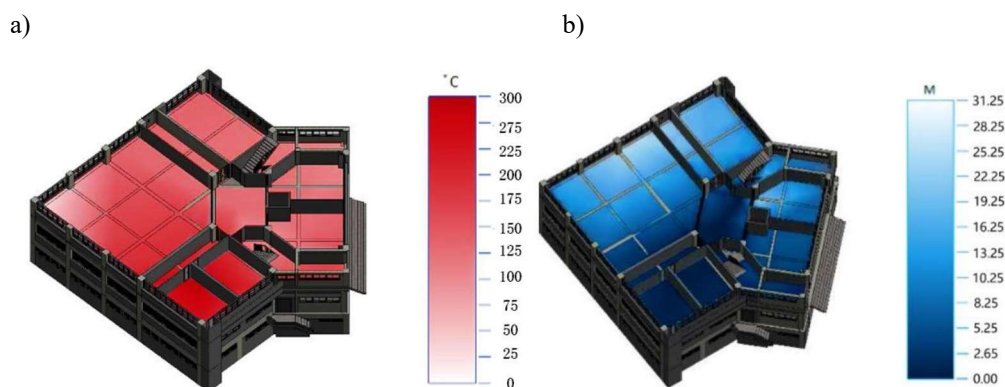
visualmente vários parâmetros de fogo. Por exemplo, a temperatura ao redor do local do incêndio foi visualizada com base nos dados simulados no piso e a visibilidade em fumaça também pode ser visualizada (Figura 12).

Figura 11 - a) Planta do segundo andar. b) Localização do incêndio no PyroSim.



Fonte: Xu e Peng (2020).

Figura 12 - a) Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ). b) Visibilidade (m).



Fonte: Xu e Peng (2020).

A escada 1 é a mais próxima da sala de aula de incêndio, e foi a primeira e mais gravemente afetada e ambos os andares foram fortemente afetados pelo fogo. A escada 1 no segundo andar foi afetada a partir dos 12s, onde a fumaça atingiu a altura crítica em 63s; a partir de então, esta parte da escada foi fechada. A escada 1 do primeiro andar foi afetada aos 21s, onde a fumaça atingiu a altura crítica em 88s; e desde então esta parte da escada foi fechada.

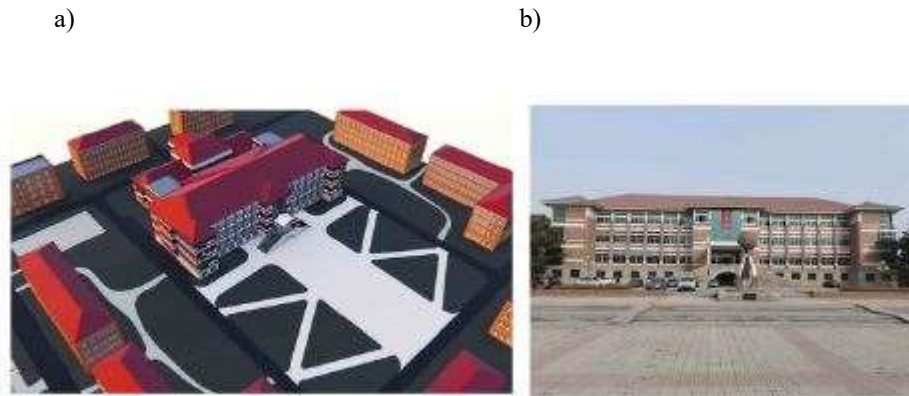
Após concluída a análise de incêndio do estudo, os autores obtiveram o momento em que cada saída de evacuação se tornou intransitável, tomando esse momento como restrição, a evacuação do incêndio foi simulada no Pathfinder. Concluiu-se que a evacuação total das

peessoas no prédio levou 168s sem fogo e 189s sob fogo, ou seja, aumentou 12,5% quando ocorreu o incêndio, e este tempo aumentou devido a saída 1 que fica próxima ao foco do incêndio ter ficado intransitável. A saída de evacuação I, que fica perto da sala de incêndio, ficou intransitável com 86s.

Os autores concluíram que a simulação de incêndio mostrou que a fumaça nas escadas 1 e 2, que ficam próximas a sala do incêndio, no segundo andar, atingiu o ponto crítico de altura em 63s e 76s, respectivamente; e apesar de uma distância relativamente longa da sala de aula do incêndio, a fumaça na escada 3 do segundo andar atingiu a altura crítica em 123s, tornando a escada intransitável. A altura crítica da fumaça foi determinada com base na altura dos alunos da faculdade. Entre as quatro saídas de evacuação, a saída I sofreu a maior ação do fogo, e tornou-se intransitável desde 86s. As outras saídas e escadas no primeiro andar foram afetadas, mas ainda transitáveis, exceto a sala de aula de incêndio. A variação média de temperatura no segundo andar foi de 5°C. Após o início do incêndio, o tempo total de evacuação aumentou em 12,5%.

Xiao *et al.* (2021) também se dedicaram a estudar a evacuação do prédio de uma biblioteca do campus de uma Universidade com a utilização do Pathfinder, considerando a capacidade máxima da edificação. O foco do estudo foi a influência do número de mesas, cadeiras, estantes de livros e outros itens no processo de evacuação e a influência do número de evacuados em cada andar no tempo de evacuação. Foi constatado na pesquisa que, por conveniência da gestão, as entradas e as saídas nos lados leste, oeste e norte da biblioteca estão bloqueadas e a grande quantidade de objetos empilhados dificulta abri-las rapidamente, o que impõe um grande obstáculo à evacuação das pessoas na biblioteca. Se ocorresse um incêndio, um grande número de usuários tentaria escapar usando a rota mais comum, o que inevitavelmente causaria congestionamento na escada e entrada principal. Também foi descoberto que existem mesas e cadeiras de estudo no corredor interno, o que afetaria muito a saída rápida das pessoas em caso de emergência. O Revit foi usado para construir um modelo BIM, e o modelo foi simplificado e exportado para o Pathfinder para simular a evacuação segura das pessoas (Figura 13).

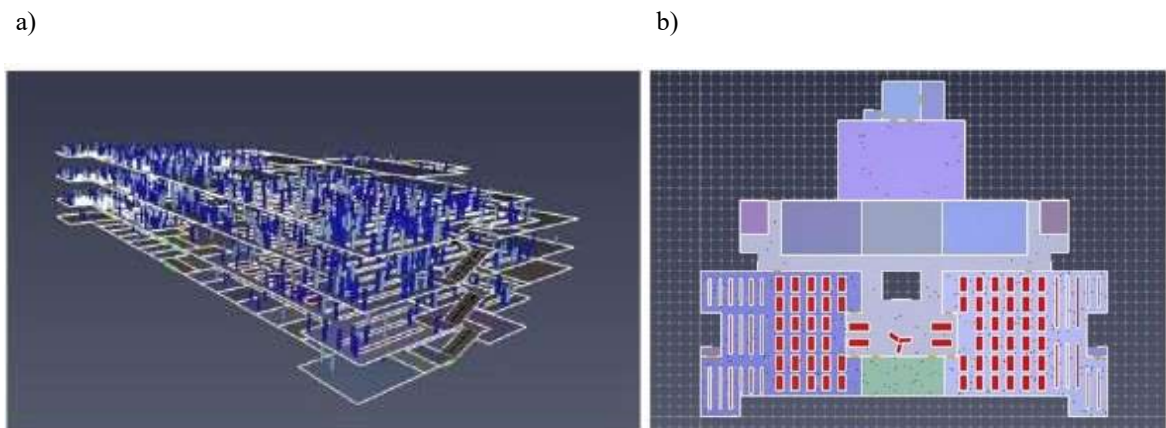
Figura 13 - Edificação utilizada no estudo. a) Modelagem da construção em BIM. b) Edificação real.



Fonte: Xiao *et al.* (2021).

Para simplificar a simulação os autores consideraram que todas as portas de emergência estavam abertas e foi simulada a evacuação das pessoas num cenário de incêndio. Nos parâmetros de simulação de evacuação foram definidos o perfil das pessoas a serem evacuadas (atributos físicos, proporção, velocidade, etc), e o modo de comportamento *Steering* foi adotado. A distribuição das pessoas no cenário de evacuação é mostrada na Figura 14 (a). Os obstáculos como mesas e cadeiras na área de leitura, área de estudo e corredor interno foram colocados no cenário, como mostrado na Figura 14 (b).

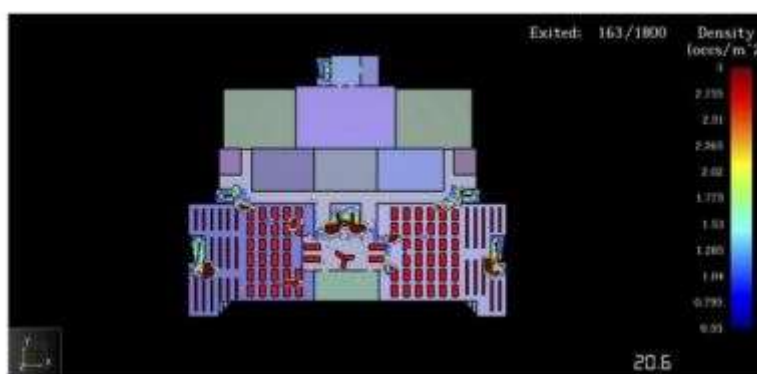
Figura 14 - a) Modelagem no Pathfinder de evacuação do público da biblioteca. b) Obstáculos no modelo de evacuação de emergência no Pathfinder.



Fonte: Xiao *et al.* (2021).

Um total de 1800 funcionários foram evacuados e o tempo de evacuação foi de 163,8s. A Figura 15 mostra o mapa de densidade de pessoas no tempo de evacuação de 20,6 s. Os autores observaram que o corredor de evacuação e a área de desembarque são as áreas com maior densidade de pessoas e os congestionamentos podem ocorrer facilmente no corredor de evacuação e nas escadas de evacuação.

Figura 15 - Mapa de densidade de pessoal em um tempo de evacuação de 20,6 s.



Fonte: Xiao *et al.* (2021).

Os resultados encontrados pelos autores revelaram que o tempo necessário de evacuação segura das pessoas no estudo de caso da biblioteca foi de 365,7s, sendo maior que o tempo de evacuação de segurança disponível, o que significa que a evacuação falhou e a evacuação segura não seria concluída. O tempo de evacuação poderia ser efetivamente reduzido pelo planejamento razoável da posição de empilhamento de itens, como mesas, cadeiras, estantes e materiais publicitários e, também, reduzir a população na biblioteca, para garantir a evacuação através de escadas, além de fornecer melhores orientações de evacuação aos ocupantes.

Os resultados da segunda simulação após reduzirem o número de pessoas e otimizarem o layout, revelaram que o tempo de evacuação seguro necessário foi de 336,75s, menor que o tempo de evacuação de segurança disponível, que está de acordo com os requisitos da norma de proteção contra incêndio do edifício.

Os autores concluíram que através da simulação do esquema de evacuação de emergência usando o Pathfinder, os problemas de projeto arquitetônico puderam ser identificados antecipadamente durante a fase de projeto da edificação. Assim, quaisquer

potenciais riscos de segurança podem ser reduzidos melhorando o esquema de emergência de segurança.

Zhang e Long (2021) usaram como objeto de pesquisa um prédio central de um hospital, e no seu estudo utilizaram um modelo BIM para fornecer dados básicos para o gerenciamento do incêndio no prédio e o Pathfinder para modelar a evacuação, de forma que pudessem analisar a eficiência e as dificuldades no processo de evacuação. A simulação de evacuação do edifício central usou o modo de movimento *Steering* do Pathfinder.

O modelo foi criado e importado do Revit para o *Pathfinder* onde foi feita a criação do elevador de incêndio, para que os cenários com e sem o uso do elevador pudessem ser simulados e feitas as devidas análises. Foram criados quatro grupos de ocupantes no programa, sendo eles crianças, mulheres adultas, homens adultos e idosos. Durante o processo de evacuação, os pacientes têm a prioridade mais alta, seguida por crianças saudáveis e idosos, depois por mulheres adultas saudáveis e, finalmente, homens adultos. Conforme descrito pela pesquisa, a linha verde indica as portas que levam diretamente para a área externa. Existem 10 saídas que levam diretamente para o exterior no primeiro andar do edifício central, conforme a Figura 16.

Figura 16 - Planta do primeiro andar do edifício central com base no Pathfinder.

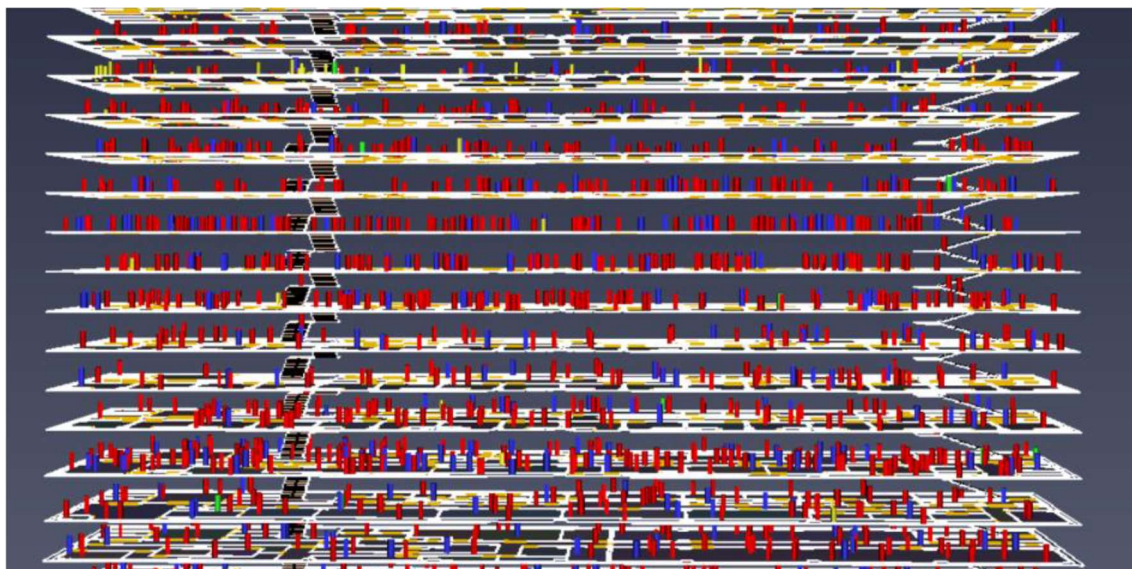


Fonte: Zhang e Long (2021).

Os cenários de simulação de evacuação foram todos realizados sob o número total extremo de 2.718 pessoas. De acordo com os dados do estudo, os quatro grupos são aleatoriamente distribuídos em cada andar, Figura 17. A largura de ombros, altura e velocidade de caminhada de todos os indivíduos são atribuídos por um método de alocação aleatória. Ao

mesmo tempo, todos os modelos de grupo são configurados para selecionar métodos de evacuação aleatórios para tornar a cena mais realista.

Figura 17 - Distribuição das pessoas evacuadas no edifício central.



Fonte: Zhang e Long (2021).

Conforme os resultados encontrados pelos autores, sem a utilização de elevadores de incêndio, o menor tempo de simulação da evacuação foi de 376,4s e o menor tempo de evacuação total foi de 1112s. Percebeu-se que o maior gargalo para fuga no prédio central foi o bloqueio das escadas de evacuação. Em segundo lugar, com base na distribuição de pessoas em cada andar, a pressão de evacuação na escada leste foi maior. Se os indivíduos escolheram a distância mais curta para escapar, mais pessoas iriam para o leste. Mas há mais saídas e elevadores de incêndio no lado oeste do primeiro piso.

Com a utilização de elevadores de incêndio, o menor tempo de simulação da cena de evacuação usando o elevador de incêndio foi 332,5s, e o tempo de fuga total foi de 863,0s. Os resultados da simulação mostraram que o elevador de incêndio efetivamente alivia a pressão do uso de escadas de evacuação. Durante o processo de simulação, foi observado, através do modelo dinâmico tridimensional, que um pequeno número de indivíduos que precisava escapar pelo elevador de incêndio estava hesitante em escolher entre ir para o elevador ou ir para a saída ao decidir sua rota.

Os autores concluíram, através da análise da simulação, que as estatísticas diárias em tempo real do fluxo de pessoas em todos os andares devem ser registradas, a largura das portas

de evacuação perto das escadas de evacuação e os elevadores de incêndio devem ser aumentados de forma adequada e as equipes precisam ser treinadas para essas situações.

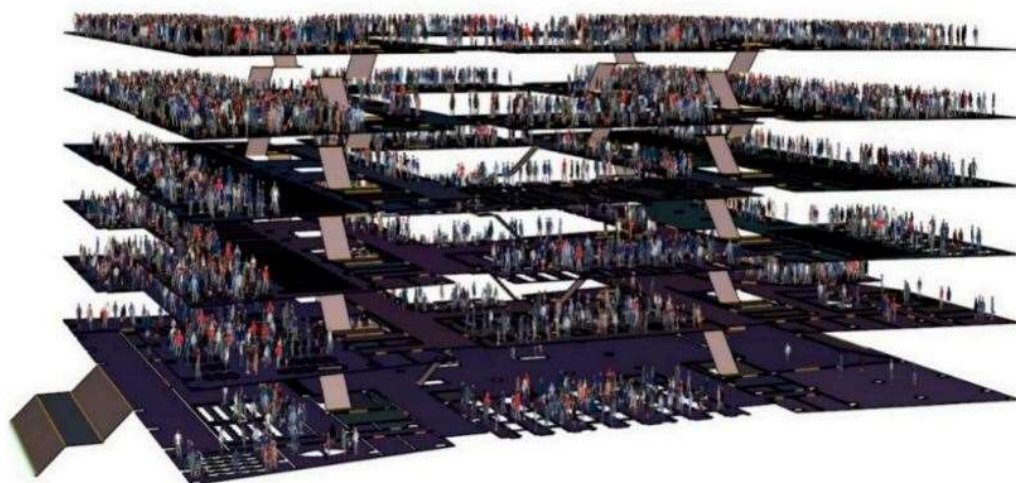
Costa (2021) teve como principal objetivo em seu estudo realizar a análise e a melhoria do processo de evacuação de um hotel, utilizando a simulação computacional, com o *software* Pathfinder. Foi criado um modelo de simulação que permitisse estudar e analisar diferentes estratégias de evacuação, encontrar o menor tempo total de evacuação e encontrar possíveis pontos de estrangulamento e de congestionamento. Foram definidas seis estratégias de evacuação, as quais se baseiam na utilização de determinadas saídas de evacuação, na orientação dos ocupantes em direção às saídas de emergência e no funcionamento dos elevadores. Para cada estratégia foram estudados vários cenários, para perceber o impacto dos mesmos na evacuação dos ocupantes.

O autor concluiu que a evacuação do edifício com as três portas disponíveis (central, lateral e spa), com a orientação dos ocupantes em direção as rotas de fuga e com a utilização dos elevadores, mostrou ser a estratégia com o menor tempo total de evacuação. Foi verificado também que com os elevadores disponíveis para a evacuação de todos os pisos do hotel, houve um aumento considerável do tempo total de evacuação e um grande congestionamento junto dos mesmos e a não existência de orientação em direção as rotas de saída resultou, no geral, num grande congestionamento na escadaria central do hotel.

Zheng *et al.* (2022) utilizaram uma biblioteca universitária como exemplo, justificando que neste tipo de edificação a concentração de livros eleva a carga de incêndio, além de existir uma população grande utilizando o prédio. Um modelo BIM foi construído com uso do *software* Revit, a saída de evacuação com a maior taxa de utilização foi determinada por meio do *software* Pathfinder e o Pyrosim foi usado para determinar a propagação da fumaça, diminuição da visibilidade, concentração de CO e variação da temperatura em cada saída de escada quando ocorre um incêndio. O prédio possui seis andares e a fonte de incêndio foi definida perto da passagem com a maior taxa de utilização. O modelo da biblioteca construído com o *software* Pathfinder foi mostrado na Figura 18.



Figura 18 - Modelo da biblioteca elaborado com Pathfinder com a população da edificação.



Fonte: Zheng *et al.* (2022).

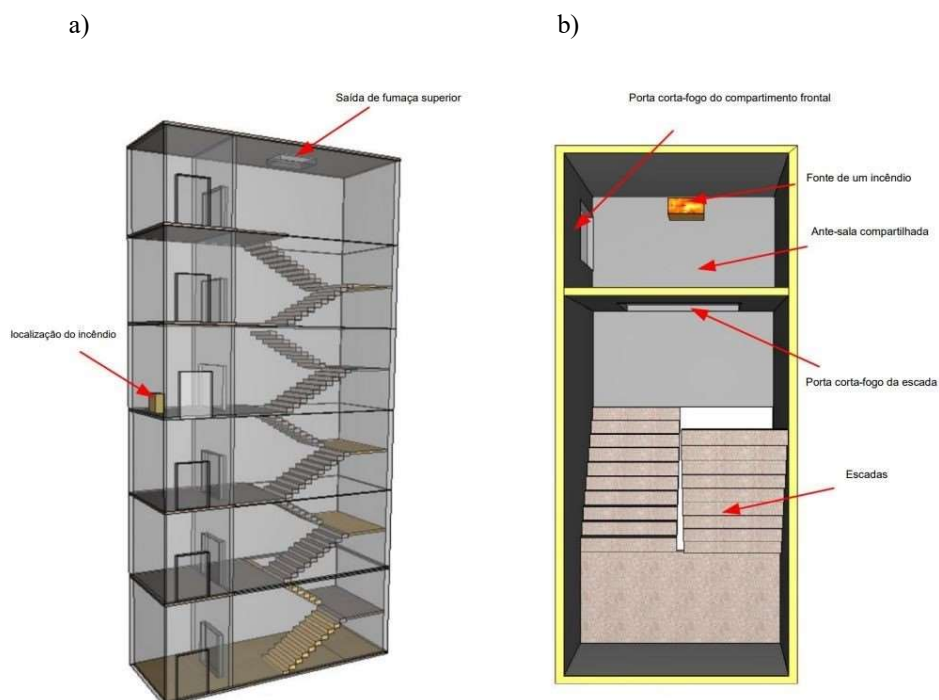
Conforme os autores, devido ao grande número de assentos de leitura no quarto andar e pavimentos acima, que são mais lotados do que nos outros andares, este pavimento seria mais difícil de evacuar, então a fonte de incêndio no estudo estava localizada na sala da frente da escada do quarto andar, encostada na parede, com área de  $1 \times 2$  m.

Os combustíveis na biblioteca são principalmente livros e estantes, e a madeira foi selecionada como combustível para simular a queima das estantes. O cenário de simulação do incêndio consta na Figura 19. A taxa de liberação de calor foi calculada com a Equação (1) usando a seguinte fórmula:

$$Q = b \cdot t^2 \quad (1)$$

onde  $Q$  é a taxa de liberação de calor (KW),  $b$  é o coeficiente de desenvolvimento do fogo ( $\text{kW/s}^2$ ) e  $t$  é o tempo (s) de desenvolvimento do fogo. O poder de fogo foi determinado como 5 MW e o coeficiente de desenvolvimento do fogo foi  $0,04689 \text{ kW/s}^2$ . O tempo para a combustão atingir a estabilidade calculada foi 326,55s. Para obter resultados de simulação mais abrangentes, o tempo de simulação de incêndio foi definido como 900s.

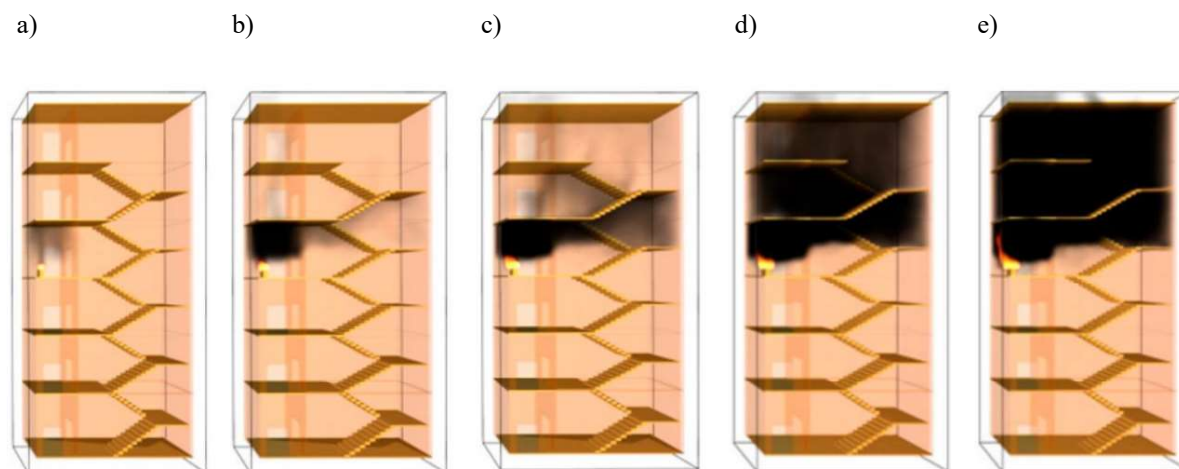
Figura 19 - Cenário de simulação do incêndio. a) Localização do incêndio. (b) Estrutura da escada no quarto andar.



Fonte: Zheng *et al.* (2022).

Conforme os resultados, no processo de propagação da fumaça, aos 334 s as escadas do quarto e sexto andares estão cheias de fumaça, propagando-se para cima. Neste momento, as escadas do piso de incêndio e superiores estavam cheias de fumaça, já não tendo condições para uma evacuação segura, conforme Figura 20. Referente à temperatura, na escada no piso de incêndio, a temperatura aumenta relativamente devagar e excedeu 60 °C em 275 s, atingindo um estado perigoso.

Figura 20 - Propagação da fumaça nos seguintes tempos: a) 50 segundos, b) 100 segundos, c) 150 segundos, d) 236 segundos e e) 334 segundos.



Fonte: Zheng *et al.* (2022).

A visibilidade das escadas no quarto e quinto andares diminui lentamente em comparação com a sala da frente, caindo abaixo de 10 m em 210s e 240s, respectivamente, e abaixo de 3 m após 380 s. Devido à saída de fumaça no topo, a visibilidade da escada no sexto andar foi sempre cerca de 30 m. Em todo o processo de simulação, a concentração de gás CO nas escadas e salas da frente no quinto e sexto andares aumentou, e o valor máximo foi 367 ppm, longe de atingir 500 ppm, o nível que iria ameaçar a segurança das pessoas. Apenas a concentração de CO na sala da frente no quarto andar excedeu 500 ppm após 215 s e continuou a subir, sendo alcançado o máximo de 1400 ppm, colocando seriamente em risco a saúde humana.

Com base na análise da propagação da fumaça, visibilidade, temperatura e concentração de gás CO, o tempo permitido de evacuação segura das escadas em cada andar foi obtido da seguinte forma: a evacuação segura está disponível nos andares 1–3, e o tempo de evacuação segura do quarto, quinto e sexto andares foi de 83s, 227s e 256s, respectivamente.

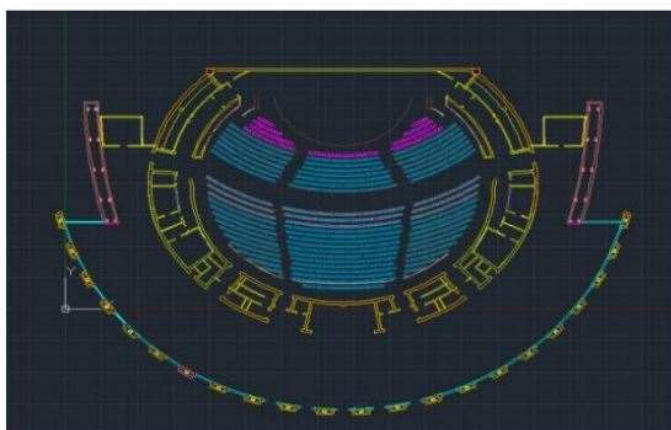
A evacuação foi comparada após o planejamento da rota e os resultados indicaram quais as saídas tinham a maior taxa de utilização. O tempo de evacuação segura foi de 739,275s, sendo reduzido para 638,025s após o planejamento da rota, tendo um aumento de 13,67% na eficiência da evacuação.

Zhang *et al.* (2022), por meio da combinação de um modelo BIM e os *softwares* Pyrosim e Pathfinder, investigaram a propagação da fumaça e a evacuação de pessoas num incêndio

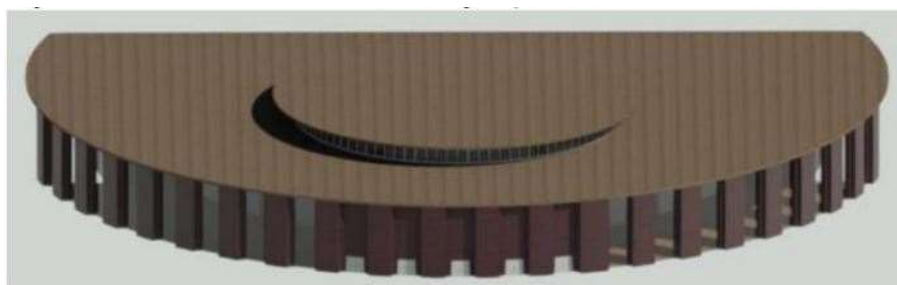
utilizando como estudo de caso um teatro. Todo o edifício é um semicírculo e pode acomodar 1.562 espectadores. Na Figura 21 foram mostradas a planta baixa e o modelo renderizado do teatro.

Figura 21 - Plantas do teatro. a) Planta baixa b) Modelo BIM renderizado.

a)



b)

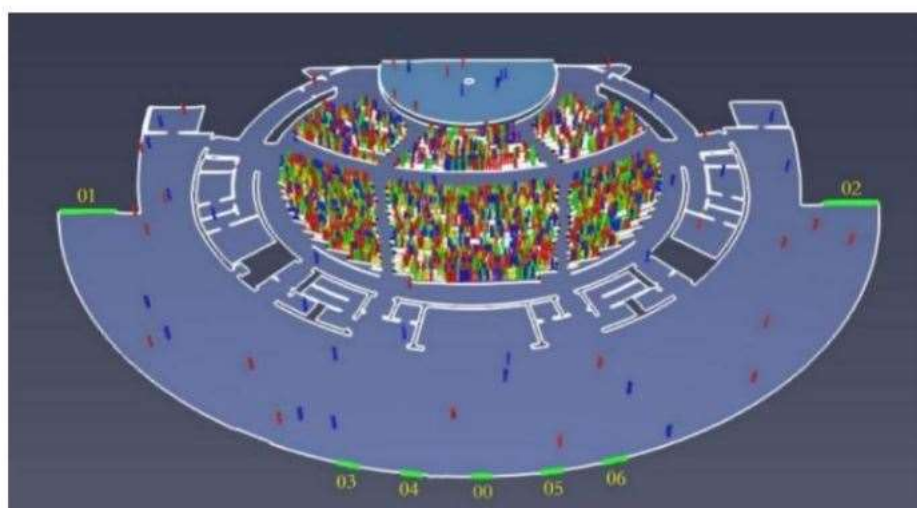


Fonte: Zhang *et al.* (2022).

O estudo importou o modelo BIM e definiu a malha apropriada e demais parâmetros necessários para a obtenção dos resultados. De acordo com casos anteriores de incêndios em teatros, como há materiais inflamáveis e circuitos elétricos complexos no palco, este foi considerado o principal local que poderia causar um incêndio, então o centro do palco foi definido como o ponto de início do fogo no estudo. Os fatores mais desfavoráveis foram considerados na simulação do incêndio, então o sistema de sprinklers e o sistema mecânico de exaustão de fumaça não funcionariam normalmente devido a falhas, e apenas a claraboia superior de exaustão de fumaça natural foi aberta. Como a população de um teatro é

heterogênea, foram criados quatro grupos, sendo eles idosos, crianças, homens e mulheres adultos. A Figura 22 mostra a distribuição dos grupos no teatro. As indicações em verde na figura indicam os locais de saída, por onde as pessoas podem chegar a um local seguro, onde o portão 00 está bloqueado, para considerar uma situação mais desfavorável.

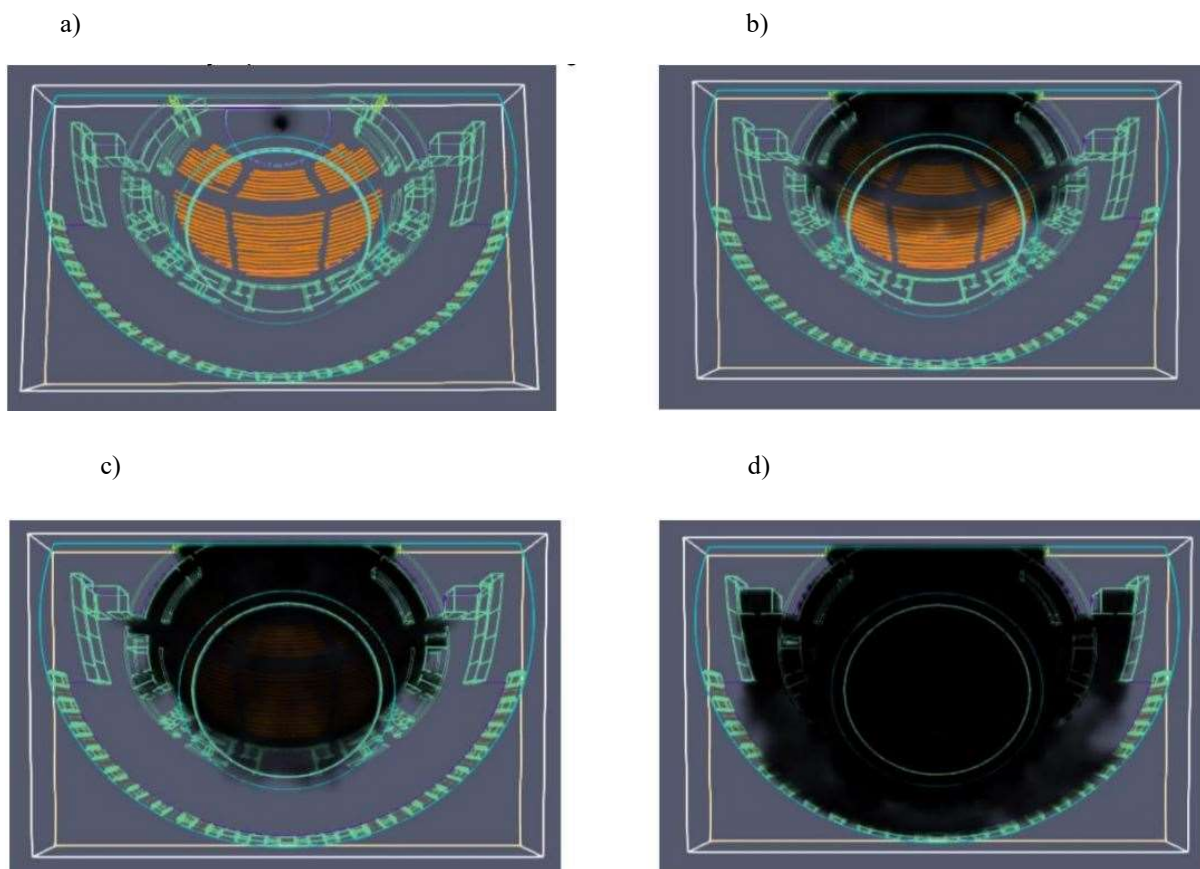
Figura 22 - Distribuição dos grupos no teatro, sendo que a saída 00 está bloqueada.



Fonte: Zhang *et al.* (2022).

Os resultados dos autores indicam que, conforme a Figura 23, 30s após o início do incêndio, a fumaça se espalhou para o telhado e para a plateia. Aos 110s, a fumaça começou a se espalhar para fora do teatro através da claraboia de exaustão de fumaça, porém a claraboia descarregava apenas uma pequena quantidade de fumaça e a maior parte permaneceu dentro do teatro. Por volta de 130 s, a fumaça se espalhou para metade da plateia do teatro e começou a se espalhar até a saída mais próxima. Aos 180 s a fumaça se espalhou pelo palco, plateia e saídas de todo o teatro e, por fim, aos 600 s, todo o teatro estava coberto de fumaça.

Figura 23 - Propagação da fumaça nos seguintes tempos: a) 30 segundos, b) 110s, c) 180s e d) 600s.



Fonte: Zhang *et al.* (2022).

Conforme os dados de altura e visibilidade, a fumaça se moveu para as saídas 01 e 02 em cerca de 300 s, a visibilidade caiu drasticamente e a velocidade de fuga das pessoas ficou bastante reduzida. Em relação a influência de gases, a concentração de monóxido de carbono na saída 1 atingiu seu pico em cerca de 600 s. A concentração de monóxido de carbono na saída 02 atingiu seu pico em cerca de 570s, na saída 03 atingiu seu pico em cerca de 560s e na saída 06 atingiu seu pico em cerca de 580s.

Com relação ao processo de evacuação, sem considerar o incêndio, o tempo para concluir a evacuação é de 349,5s. A taxa de utilização da saída 1 foi maior que a da saída 2, e a taxa de utilização da saída 3 também foi maior que da saída 6. A taxa de utilização da saída 1 e 2 foi mais alta do período de 50s a 250s, e a taxa de utilização da saída 3 e 6 foi mais alta no período de 50s a 300s. Os autores perceberam através da animação gerada pelo Pathfinder que algumas pessoas hesitaram em planejar o caminho quando começaram a evacuar.

Ao ser combinado os programas Pyrosim e Pathfinder, sendo considerada a evacuação e o incêndio, quando o incêndio atingiu 180°C, a vida das pessoas que ficam no auditório do teatro estava em perigo. Quando o incêndio chegou aos 600s, a multidão que fica na área do auditório do teatro não teria chance de sobreviver. De acordo com os resultados, quando o incêndio atingiu 350s, todas as pessoas foram evacuadas.

Os autores concluíram que por meio da combinação das tecnologias BIM, Pyrosim e Pathfinder, ao investigar a propagação da fumaça e a evacuação no teatro, foi possível economizar mão de obra e recursos financeiros. Com base nas análises das simulações, foi concluído que garantir o funcionamento normal das instalações de combate a incêndio e treinar as equipes pode ajudar a melhorar a eficiência e garantir a evacuação segura dos ocupantes.

Uliana (2022) utilizou como estudo de caso o prédio do Centro de Convenções da Universidade Federal de Santa Maria, e por meio de simulações computacionais com o auxílio do programa Pathfinder analisou o tempo de evacuação da edificação, a taxa de fluxo e o fluxo específico das portas de acesso e das saídas de emergência, a dinâmica de movimentação dos ocupantes e identificou os pontos críticos relacionados ao processo de evacuação, por meio de alguns cenários de simulação, considerando os ocupantes em condição normal e em situação de emergência e pânico.

O autor utilizou os dois modos do programa para descrever os resultados, sendo que o movimento dos ocupantes nos cenários de evacuação do modo SFPE configurou-se em filas, e no modo *Steering*, o movimento foi espontâneo e aleatório. Quando o autor utilizou como cenário as portas desobstruídas, no modo SFPE o tempo de evacuação em condição normal foi de 331 s e pânico 179 s. Já no modo *Steering*, o tempo total de evacuação foi de 461 s, e em condição de pânico e emergência foi de 171 s. Ou seja, em condições normais de evacuação houve um acréscimo de 39,27% no tempo de evacuação considerando o modo *Steering*, já em condições de pânico, houve o acréscimo de somente 4,46% no tempo total de evacuação.

Pode-se observar que em condições normais houve um acréscimo bem relevante de tempo comparando os dois modos, já em condições de pânico houve um acréscimo bem pequeno de tempo. O mesmo ocorreu quando o cenário eram portas parcialmente bloqueadas, houve um acréscimo de 46,97% no tempo de evacuação considerando o modo *Steering*, já em condições de pânico, houve o acréscimo de somente 11,52% no tempo total de evacuação. A Figura 24 apresenta uma síntese dos resultados obtidos no estudo.

Figura 24 - Síntese dos resultados obtidos nas simulações.

Cenário	Modo de simulação	Situação da evacuação	Condições das portas PA (porta de acesso) e PSE (porta de saída de emergência)	Tempo de evacuação (s) X ocupantes evacuados (p)						Porta mais utilizada pelos ocupantes (p) na evacuação	Porta com a maior taxa de fluxo (pessoas/s) e momento de ocorrência (s)	Porta com o maior fluxo específico (pessoas/m.s) e momento de ocorrência (s)	Distância máxima percorrida (m)
				(s)	(p)	(s)	(p)	(s)	(p)				
1	SFPE	Normal	Livres	(s) 0 60 120 180 240 300 331	(p) 0 355 672 968 1193 1351 1430					PA 06 (384 p)	PA 07 - 2,04 (62 s)	PA 07 - 1,20 (62 s)	202,20
2	SFPE	Normal	Parc. bloq.	(s) 0 60 120 180 240 300 330	(p) 0 353 673 968 1194 1351 1430					PA 06 (444 p)	PA 03 - 2,21 (51 s)	PA 03 - 1,30 (51 s)	219,00
3	SFPE	Pânico	Livres	(s) 0 30 60 90 120 150 179	(p) 0 419 707 963 1194 1371 1430					PSE 06 (334 p)	PSE 03 - 2,00 (42 s)	PSE 02 - 1,36 (40 s)	77,80
4	SFPE	Pânico	Parc. bloq.	(s) 0 30 60 90 120 150 180 210 217	(p) 0 354 633 873 1100 1259 1383 1421 1430					PSE 03 (342 p)	PA 03 - 2,02 (52 s)	PSE 02 - 1,36 (40 s)	83,90
5	Steering	Normal	Livres	(s) 0 60 120 180 240 300 360 420 461	(p) 0 318 593 819 994 1162 1261 1366 1430					PA 03 e PA 06 (386 p)	PA 07 - 1,74 (64 s)	PA 07 - 0,87 (64 s)	179,90
6	Steering	Normal	Parc. bloq.	(s) 0 60 120 180 240 300 360 420 485	(p) 0 314 599 806 982 1149 1265 1364 1430					PA 03 (453 p)	PA 06 - 2,18 (59 s)	PA 06 - 1,09 (58 s)	172,70
7	Steering	Pânico	Livres	(s) 0 30 60 90 120 150 171	(p) 0 499 835 1104 1268 1387 1430					PSE 06 (392 p)	PSE 06 - 3,87 (80 s)	PSE 06 - 2,15 (80 s)	102,20
8	Steering	Pânico	Parc. bloq.	(s) 0 30 60 90 120 150 180 192	(p) 0 411 756 978 1168 1329 1417 1430					PSE 05 (352 p)	PSE 03 - 3,15 (25 s)	PSE 05 - 1,76 (75 s)	115,00

Fonte: Uliana (2022).

Foi concluído no estudo que a localização das portas no *layout* refletiu, diretamente, no tempo de evacuação, e todas as portas foram relevantes para garantir a saída dos ocupantes com segurança no âmbito da edificação. Foram identificados pelo autor os pontos críticos no processo de evacuação. O tempo de evacuação também sofreu influência do comportamento dos ocupantes durante o processo, tanto em situação normal quanto em situação de pânico.

O autor destacou ainda que no modo SFPE, o movimento dos ocupantes foi determinado com base nos cálculos do fluxo de saída, sendo o modelo que se aproxima dos conceitos das normas prescritivas. E no modo *Steering*, o movimento dos ocupantes foi baseado na combinação de mecanismos de direção e tratamento de colisão, visando analisar como os agentes realizam seus objetivos e respondem a um ambiente em transformação, evitando possíveis colisões. É o modo que pode ser aproximado ao comportamento humano. Ao ser elaborado projetos arquitetônicos e de segurança contra incêndios, a simulação computacional auxilia na análise das fragilidades, readequações e melhorias no ambiente construído, de forma a aumentar e garantir a segurança contra incêndio.

Zhang *et al.* (2022) estudaram e analisaram a distribuição de fumaça e a evacuação de diferentes esquemas de layout de uma estação de metrô caso ocorresse um incêndio, e para isso combinaram a modelagem BIM e os programas Pyrosim e Pathfinder. Foi determinado no



estudo o tempo que levava para que a concentração de CO, temperatura da fumaça e visibilidade atingisse o valor crítico de perigo.

Os resultados dos autores mostraram que a visibilidade na estação leva menos tempo para atingir o valor crítico em condições de incêndio, e a ameaça à segurança da evacuação foi maior. Os tempos disponíveis de evacuação caso o incêndio ocorresse na extremidade ou no meio da plataforma foram calculados. O tempo de evacuação seguro disponível da estação de metrô otimizada (quando adicionada uma escada rolante ascendente e recombinação o tráfego vertical) foi maior que o tempo de evacuação segura necessário em diferentes condições de incêndio, ou seja, o arranjo otimizado da estação de metrô pode garantir a evacuação segura das pessoas na estação de metrô em condições de incêndio. Foi concluído pelos autores que a combinação da tecnologia BIM e dos *softwares* de simulação pode efetivamente melhorar a eficiência e precisão da modelagem de simulação, e facilitar a análise comparativa e pesquisa, ajudando a melhorar a precisão dos resultados de evacuação e mostrando o processo de simulação de evacuação de forma mais intuitiva.

Considerando os limites de tolerância das pessoas a fumaça do incêndio, aumento da temperatura, visibilidade e concentração de CO, alguns estudos trazem o limite de tolerância das pessoas a esses critérios, conforme apresentado no Quadro 1.

Quadro 1 - Resumo dos limites de tolerância

(continua)

**LIMITES DE TOLERÂNCIA**

<b>Autor</b>	<b>Visibilidade</b>	<b>Temperatura</b>	<b>Altura da camada de fumaça</b>	<b>CO</b>
Samad, Taib e Ying (2017)	A evacuação dos ocupantes torna-se crítica quando a visibilidade é limitada a apenas 6m a 9m.	Temperatura acima de 55 °C dificulta a evacuação.		

(continua)

Li et al (2018)	Em espaços pequenos é de 5m e grandes espaços é de 10m.	É seguro que a temperatura do ar inalável seja inferior a 60 ° C.	Quando a camada de fumaça está mais que 2m acima do solo ou piso, a temperatura de tolerância limite é de 200 ° C.	Concentração de CO de $3000 \times 10^{-6}$ ppm dentro de 20 - 30 min de exposição pode causar a morte e $10.000 \times 10^{-6}$ dentro de 1 minuto de exposição poderá causar a morte, sendo considerado no estudo nível crítico de $3000 \times 10^{-6}$ ppm.
Long, Zhang e Lou (2017)	Quando a visibilidade não é inferior a 4 m as pessoas podem se familiarizar com os edifícios e saírem com segurança.		Quando a altura da camada de fumaça for inferior a 2,5 m, a fuga das pessoas seria severamente afetada; quando a altura da camada de fumaça for inferior a 1,5 m, as pessoas não conseguiriam completar a fuga.	
Saha <i>et al.</i> (2019)		Temperatura limite foi considerada 60°C.		Concentração crítica de CO foi tomada como 3000 ppm.
Xu e Peng (2020)			A altura média das pessoas foi de 1,52m. O valor é 0,8 vezes a altura média, pois as pessoas iriam se movimentar com o corpo inclinado para frente durante o incêndio. Como a altura líquida do pavimento é de 3,5 m, a altura crítica de fumaça pode ser obtida como sendo menor que 1,5.	

(conclusão)

Sun e Turkan (2020)		O calor gerado começa a prejudicar o corpo humano quando (1) a intensidade da radiação da camada superior atinge 180 °C e (2) a camada de contato direto atinge 60 °C	A fumaça afeta a velocidade de movimento humano (1) coeficiente de 0,9 quando a camada inferior atinge 1,5 m, (2) coeficiente de 0,6 quando a camada inferior atinge 1,2 m; e (3) começa a doer nas pessoas enquanto a densidade chega a 85%.	A concentração de toxicidade do CO começa a prejudicar o corpo humano quando atinge 2500 ppm.
Zheng <i>et al.</i> (2022)	A visibilidade abaixo da altura segura é inferior a 10 m, se considera ter atingido um estado perigoso.	Quando a temperatura na altura segura (2 m do solo) atinge acima de 60 ° C, considera-se que atingiu um estado perigoso.	Altura segura considera-se 2 m do solo.	Quando a concentração de CO na altura segura (2 m do solo) atinge 500 ppm, considera-se que atingiu um estado perigoso.
Zhang <i>et al.</i> (2022 - University Library)	-	Quando o incêndio atingir 180 graus, a vida das pessoas estaria em perigo.	-	Em circunstâncias normais, 50ppm é a quantidade máxima que os adultos podem suportar. A 200 ppm, geralmente dentro de duas a três horas, aparecerão náuseas e tonturas. A 400 ppm, a vida das pessoas estará em perigo após três horas. A 800 ppm, as pessoas morreriam dentro de duas a três horas.
Zhang <i>et al.</i> (2022 - Subway Station)	Visibilidade considerada na altura dos olhos das pessoas (1,65 m), sendo perigosa quando menor que 10 m	Quando a temperatura atinge acima de 65 ° C, considera-se que atingiu um estado perigoso.	-	Considerada perigosa menor ou igual que 2500 ppm

Fonte: Autoria própria.

Com o intuito de fazer um resumo dos estudos que foram feitos por diversos autores que são correlatos a esta pesquisa, apresenta-se o Quadro 2 onde constam os autores, as

edificações utilizadas como estudo de caso nas pesquisas, além dos *softwares* usados e das principais conclusões dos autores.

Quadro 2 - Resumo dos estudos correlatos ao desta pesquisa.

(continua)

**TABELA RESUMO DOS ESTUDOS CORRELATOS**

<b>Autor – Ano do estudo</b>	<b>Edificação</b>	<b>Softwares</b>	<b>Conclusão</b>
Valentim (2008)	Escolas	<i>Building Exodus</i>	* Velocidade sofre redução nas escadas * Escadas regulam o fluxo
Alves, Campos e Braga (2008)	Prédio comercial	<i>FDS e Simulex</i>	* A altura da camada de fumaça foi fundamental para que as pessoas tivessem êxito em sair da edificação e seria a maior causadora de mortes em incêndios. * Houve queda nos níveis de fumaça após o fechamento das portas corta-fogo.
Palmiere, Riascos e Riascos (2015)	Edifícios verdes - Prédio comercial	<i>Google Sketch UP 8, EnergyPlus 7-2, Pyrosim e Pathfinder</i>	* Edifícios com área de janela menor são mais seguros apresentando um tempo de evacuação maior do que edifício com pele de vidro. * Sprinklers automáticos aumentam a segurança dos ocupantes.
Cuesta <i>et al.</i> (2017)	Escolas	<i>Building Exodus, MassMotion, Pathfinder e STEPS</i>	* Os modelos de evacuação devem ser configurados adequadamente e serem testados em relação aos padrões de desempenho. * Não seria seguro supor que o entendimento do desempenho em um ambiente possa ser aplicado diretamente em outro
Samad, Taib e Ying (2017)	Prédios públicos - centros de pesquisa	<i>Pyrosim e Pathfinder</i>	* As simulações relativas à propagação do incêndio, estudo de fumaça e modelagem de evacuação, demonstrou que os meios de fuga projetados de acordo com os regulamentos cumprem os requisitos de tempos disponíveis e necessários das edificações. * Devido ao pé-direito elevado, o incêndio deve ser muito grande para que os sprinklers possam ser ativados.
Long, Zhang e Lou (2017)	Edifício de dormitórios	<i>Pyrosim e Pathfinder</i>	* As salas acima da sala do início do fogo foram as mais seriamente influenciadas pela fumaça. * Quando ocorre um incêndio em uma sala, seria melhor abrir a janela da sala de origem do incêndio e fechar as janelas das salas acima da origem do incêndio para evitar o reingresso da fumaça.

(continua)

u e Chen (2014)	Biblioteca	<i>Pathfinder</i>	* A evacuação de uma das áreas da biblioteca foi mais eficiente do que outra e recomendaram que os assentos das salas de leitura fossem reorganizados. * Foi sugerido que os funcionários reforcem o treinamento e atuem rapidamente orientando a evacuação.
Li <i>et al.</i> (2018)	Biblioteca	<i>Pyrosim e Pathfinder</i>	* Modelo <i>Steering</i> foi mais adequado para simular a evacuação da biblioteca. * As pessoas não conseguiram sair durante o tempo de evacuação disponível, ficariam vulneráveis à fumaça durante o incêndio. * A velocidade de evacuação segura é reduzida devido ao congestionamento e o principal motivo é a grande densidade populacional e o uso de escadas compartilhadas.
Ahmed, Mehmood e Kristensen (2019)	Instituição de ensino	<i>Pathfinder</i>	* Foram identificadas as áreas potencialmente perigosas no processo de evacuação. * Os ocupantes do átrio deveriam ser orientados a usar a saída principal, para reduzir o risco de congestionamento próximo às saídas de emergências.
Martins, Cajaty e Braga (2019)	Casa noturna	<i>Pathfinder</i>	* Obtiveram dados de tempo de evacuação, fluxo específico, taxa de fluxo e dinâmica de evacuação, e foi possível identificar locais de congestionamento, gargalos e obstáculos. * Foi concluído que o nível de segurança propiciado pelas normas de saídas de emergência para a edificação estudada não é o esperado e mesmo normas que passaram por atualizações adotam um caráter prescritivo.
Saha <i>et al.</i> (2019)	Instalação farmacêutica	<i>Pyrosim e Pathfinder</i>	* O incêndio foi mais severo quando o cenário de propagação do fogo foi a sala de embalagens, e alguns ocupantes não conseguiriam escapar neste cenário. * A temperatura foi o fenômeno mais crítico para determinar a situação de perigo. * Os ocupantes da sala de embalagens estavam tentando sair pela porta menor, pois era a rota de saída mais perto e evitaram a porta mais larga onde a saída era um pouco mais longe.

(continua)

Sun e Turkan (2020)	Casa noturna	<i>BIM, Pyrosim e AnyLogic</i>	* Partes dos ocupantes não conseguiriam abandonar a edificação com segurança. * A capacidade da edificação deveria ser diminuída para garantir a saída segura de todos os ocupantes. * Através de treinamento aumentar o número de agentes que estavam familiarizados com as saídas seguras da edificação, para assim melhorar o efeito guia.
Xu e Peng (2020)	Edifício universitário	<i>BIM, Pyrosim e Pathfinder</i>	* Após o início do incêndio, o tempo total de evacuação aumentou em 12,5%. * A saída I sofreu a maior ação do fogo, por ficar mais próxima a fonte no incêndio e tornou-se intransitável durante a simulação.
Xiao et al. (2021)	Biblioteca	<i>BIM (Revit) e Pathfinder</i>	* O tempo necessário era maior que o tempo disponível, ou seja, a evacuação não seria segura. * Reduzir o número de pessoas e reposicionar mobiliário iriam diminuir o tempo necessário de evacuação. * Com o uso do Pathfinder seria possível identificar problemas de projeto ainda em fase de concepção do mesmo.
Zhang e Long (2021)	Hospital	<i>BIM (Revit) e Pathfinder</i>	* Aumentar a largura das portas de evacuação perto das escadas de evacuação e os elevadores de incêndio devem ser aumentados. * Realizar treinamento das equipes para tornar o processo de evacuação mais eficiente.
Costa (2021)	Hotel	<i>Pathfinder</i>	* Quando os elevadores estavam disponíveis para a evacuação verificou-se um aumento do tempo total de evacuação e um grande congestionamento junto dos mesmos. * A falta de orientação em direção a caminhos de evacuação resultou num grande congestionamento na escadaria central do hotel e a orientação dos ocupantes permitiu diminuir o tempo total de evacuação do edifício.
Zheng et al. (2022) - Evacuation in Buildings Based on BIM: Taking a Fire in a University Library as an Example	Biblioteca	<i>BIM (Revit), Pyrosim e Pathfinder</i>	* O tempo de evacuação em caso de incêndio é reduzido após o planejamento da rota e aumentada a eficiência. * A simulação numérica pode efetivamente reduzir os custos, visto que é preciso muita mão de obra e recursos financeiros para realizar experimentos.

(conclusão)

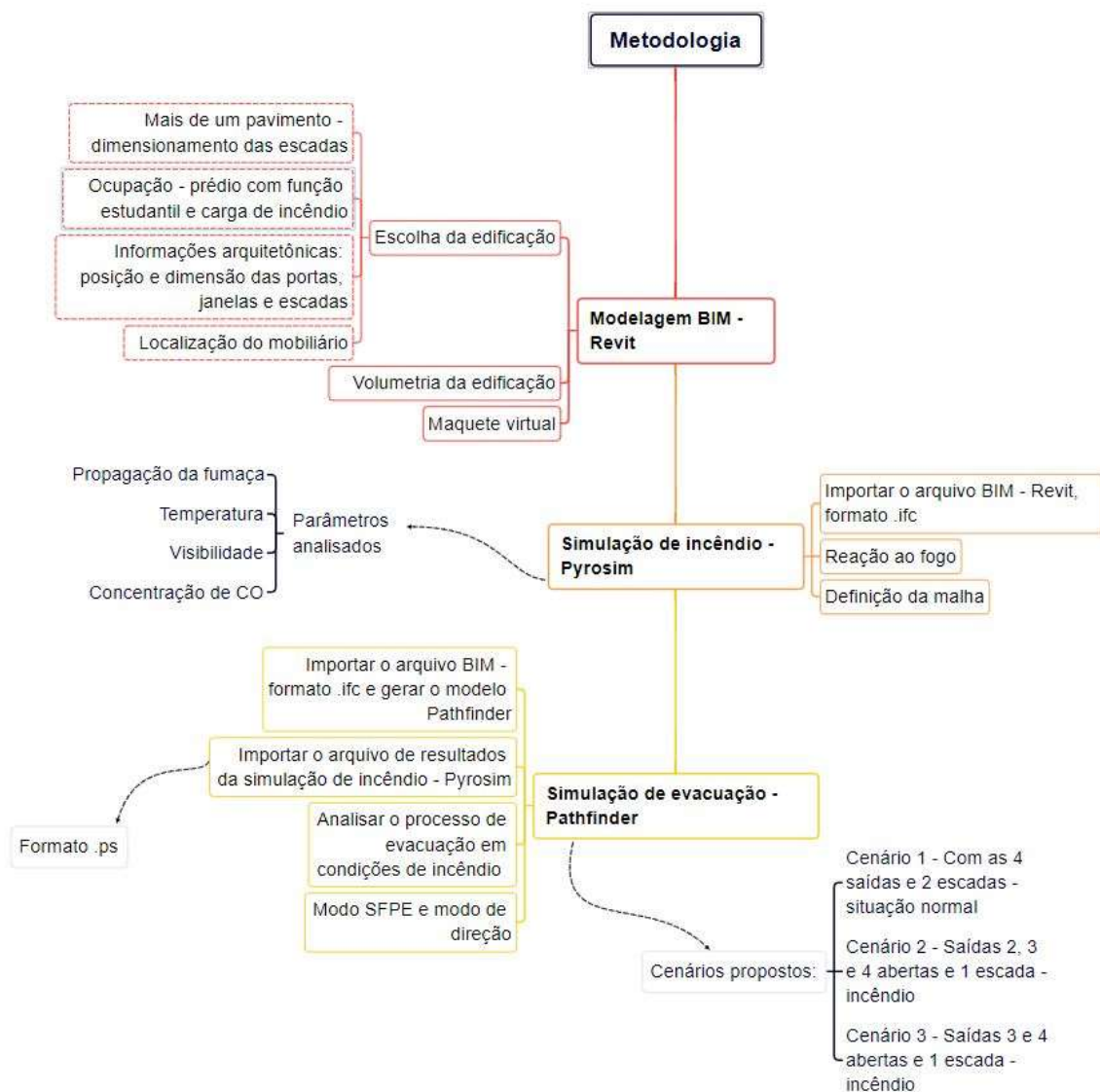
hang <i>et al.</i> (2022) - Evacuation Simulation of Large Theater Based on Pyrosim and Pathfinder	Teatro	<i>BIM (Revit), Pyrosim e Pathfinder</i>	* Utilizando os <i>softwares</i> foi possível economizar mão de obra e recursos financeiros. * Garantir o funcionamento normal das instalações de combate a incêndio e treinar as equipes pode ajudar a melhorar a eficiência e garantir a evacuação segura dos ocupantes.
Zhang <i>et al.</i> (2022) - Study on Fire Smoke Distribution and Safety Evacuation of Subway Station Based on BIM	Estação de metrô	<i>BIM, Pyrosim e Pathfinder</i>	* O tempo de evacuação segura disponível da estação de metrô otimizada foi maior que o tempo de evacuação segura necessário em diferentes condições de incêndio. * A visibilidade na estação leva menos tempo para atingir o valor crítico em condições de incêndio.
Uliana (2022)	Centro de Convenções - Reunião de público	<i>Pathfinder</i>	* Identificou a localização dos pontos críticos do layout da edificação. *A localização das portas no layout refletiu, diretamente, no tempo de evacuação, e todas as portas foram relevantes para garantir a saída dos ocupantes com segurança no âmbito da edificação. * Modo SPFE se assemelha as normas prescritivas e o modo <i>Steering</i> se parece com a realidade.

Fonte: Autoria própria.

### 3 METODOLOGIA

Com a finalidade de atender os objetivos propostos nesta pesquisa, foram estabelecidas as etapas metodológicas apresentadas na Figura 25 e que serão detalhadas neste capítulo.

Figura 25 - Metodologia utilizada na pesquisa.



Fonte: Autoria própria.



### 3.1 PROGRAMAS COMPUTACIONAIS USADOS NA PESQUISA

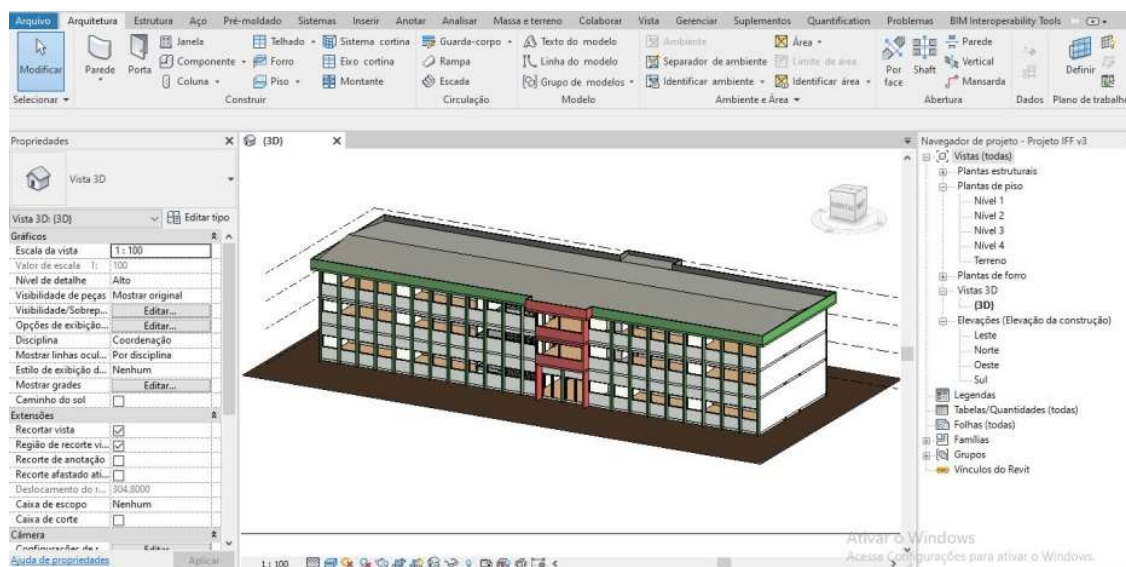
A simulação computacional de incêndio e evacuação é uma importante ferramenta para conhecimento da dinâmica do fogo e de abandono das edificações pelos usuários, bem como dos efeitos da temperatura e da fumaça, conforme Alves, Campos e Braga (2008). Realizando simulações através de *softwares* específicos é possível verificar a variação da temperatura, a perda da visibilidade e a mobilidade da fumaça durante um incêndio. Segundo os autores, a fumaça possui cinco características: é opaca, tóxica, móvel, quente e inflamável, sendo que, quando acontece um incêndio, a propagação da fumaça e a evacuação das pessoas ocorrem ao mesmo tempo, por isso é importante estudar e prever como ela se manifesta, para que os projetos possam ser elaborados de maneira eficiente e minimizar as perdas ocasionadas em incêndios. Conforme Sun e Turkan (2020), a modelagem BIM preenche a lacuna técnica entre o FDS e a modelagem baseada em agentes para um projeto de simulação eficiente e eficaz.

Neste estudo, para modelar a edificação será usada a tecnologia BIM, e o modelo será importado no *software* Pyrosim, para que o incêndio e seus efeitos possam ser simulados. Com a utilização do *software* Pathfinder, o abandono da edificação será simulado através da análise de alguns cenários. Assim, a seguir esses três softwares são apresentados e os principais aspectos envolvidos na simulação são discutidos.

#### 3.1.1 Modelagem com *Building Information Modeling*

Arquitetos e engenheiros aderiram à tecnologia BIM para criar modelos 3D das edificações, usando programas como o *Revit (AutoDesk)*. Os benefícios da utilização da plataforma BIM são perceptíveis desde a concepção do projeto, passando pela execução da obra até a manutenção da edificação, ou seja, o BIM pode ser aplicado a várias etapas ao longo do ciclo de desenvolvimento do projeto, construção e operação do edifício. A Figura 26 mostra a interface do *software* Revit.

Figura 26 - Edificação escolar modelada e interface mostrada no *software* Revit.



Fonte: Autoria própria.

A aplicação da tecnologia BIM começou na indústria da construção e gradualmente se expandiu para outros campos, conforme Zhang et al. (2022). A tecnologia BIM possui alta precisão e credibilidade na hora de construir maquetes, pois pode fornecer cenas de simulação para simulação de evacuação e simulação de incêndio e exibir a estrutura interna das edificações em três dimensões, entre outras vantagens. Estudiosos nacionais e estrangeiros usam a tecnologia BIM como base, juntamente com a simulação numérica e algoritmos e conduzem pesquisas detalhadas e aprofundadas sobre evacuação e resgate de segurança contra incêndio.

De acordo com Sun e Turkan (2020), há muitos estudos que implementaram o BIM para gestão de segurança contra incêndio, no entanto, todo o potencial de uso da tecnologia BIM ainda não foi alcançado.

Conforme os autores, o Revit é um *software* BIM que foi amplamente utilizado no projeto de construção devido as seguintes propriedades: é interoperável com uma variedade de programas de simulação, ou seja, permite a importação/exportação de formatos de arquivo comuns para suportar a troca de informações, as visualizações 3D em perspectiva e ortográfica no Revit permitem que os usuários visualizem melhor e se comuniquem de forma mais eficaz com e sobre os modelos e, por fim, o Revit permite a análise do projeto de construção, fornecendo não apenas informações 3D, mas também registros da construção e materiais, ou seja, o modelo carrega informações sobre a construção. Como a utilização do ambiente BIM

permite contribuições de várias disciplinas para um modelo acessado centralmente, eliminando assim o retrabalho.

Segundo Wehbe e Shahrour (2021), o BIM é uma ferramenta muito útil para gerenciamento de riscos, especialmente gerenciamento de resposta a desastres e emergências e tem sido utilizado em conjunto com diversas tecnologias para melhorar a segurança em ambientes fechados por localizar e rastrear ocupantes dentro de um edifício, gerar caminhos de evacuação em tempo real e orientar os usuários através do BIM e aplicativos móveis. Também é possível realizar a otimização do projeto utilizando a modelagem BIM juntamente com os programas de simulação, pois é possível realizar iterações e ajustes no projeto do edifício com o objetivo de melhorar a segurança contra incêndios, sendo por exemplo, possível avaliar o posicionamento de sprinklers e do sistema de ventilação, a fim de otimizar o desempenho do edifício em caso de incêndio.

As pesquisas para melhorar a segurança dos ocupantes durante evacuações de incêndio, conforme os autores, tem se concentrado no uso do BIM no gerenciamento de evacuação de incêndio, no desenvolvimento de sistemas de detecção precoce de incêndios e, também, no uso de *Fire Dynamic Simulation (FDS)* e *Agent Based Simulation (ABS)* para otimizar as rotas de evacuação.

É possível realizar as simulações de incêndio e evacuação realizando o lançamento da edificação diretamente nos programas, porém isso demanda um maior tempo de concepção do modelo o que, inclusive, aumenta o custo e pode ocasionar retrabalho. Conforme Chen, Liu e Wu (2018), o uso da modelagem BIM além de agilizar e tornar esse processo mais eficiente e menos suscetível a erros traz muitas informações do modelo para os programas de simulação. Essas informações são importantes para a simulação precisa do comportamento do fogo e evacuação, pois fornecem dados reais sobre a estrutura física do edifício. As horas que são poupadas no lançamento do edifício com a utilização do modelo BIM podem ser usadas na análise e interpretação dos resultados, por exemplo.

O uso da modelagem BIM interligado com a simulação de incêndios e evacuação permite avaliar a eficácia das medidas de segurança contra incêndios implementadas no projeto. É possível analisar a localização e o desempenho dos sistemas de detecção de incêndios, sprinklers, rotas de evacuação, portas corta-fogo, sistemas de ventilação, entre outros. Essa avaliação auxilia na identificação de possíveis deficiências e na implementação de medidas corretivas. Com a obtenção das informações precisas sobre a geometria do edifício e as rotas de evacuação, ao combinar essa informação do modelo BIM com a simulação de incêndio no

PyroSim e de evacuação no Pathfinder, é possível analisar e otimizar as rotas de evacuação, identificando potenciais pontos de congestionamento, áreas de fumaça visto que usando o modelo BIM facilita a simulação de propagação de fumaça porque o modelo armazena as propriedades de cada componente do edifício, de acordo com Chen, Liu e Wu (2018), e outras condições que podem afetar a evacuação segura das pessoas.

Zhang e Long (2021) estudaram a evacuação em um hospital e para isso importaram o arquivo no formato .IFC (formato usado para compartilhar informações de construção em projetos de engenharia e arquitetura) para gerar o modelo na pesquisa. Para estudarem a propagação do incêndio e evacuação, Zhang et al. (2022) importaram o modelo BIM no formato .DWG (formato associado a arquivos gerados com o uso do programa AutoCAD) de um teatro, enquanto Sun e Turkan (2020) importaram o arquivo no formato .DWG para estudar o incêndio e o modelo no formato .DXF (formato de intercâmbio de dados CAD) para prever a evacuação de uma casa noturna. Xiao et al. (2021) ao estudar a evacuação de uma biblioteca importou o modelo no formato .DXF.

Nesta pesquisa a edificação que será usada como estudo de caso será modelada usando o *software* Revit com licença estudante, e após o modelo pronto, será importado no programa de simulação de incêndio, para que possa ser dada sequência ao estudo e importado no programa de evacuação no formato .IFC.

### 3.1.2 Simulação do incêndio - Pyrosim

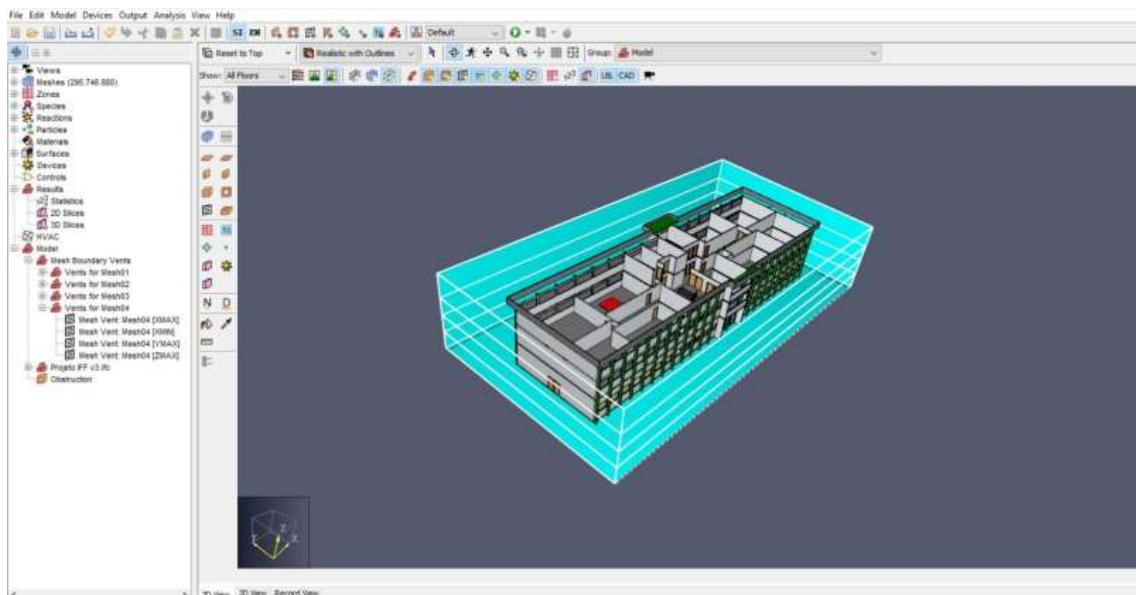
O crescimento do fogo e a propagação da fumaça podem ser modelados com a ajuda de diferentes ferramentas computacionais, e neste estudo será usado o *software* Pyrosim, que é uma interface gráfica para emprego do *Fire Dynamics Simulator* (FDS), versão 6.7.4 Os modelos FDS podem prever a dispersão e concentração de fumaça, crescimento da temperatura, concentração de monóxido de carbono e outras substâncias durante incêndios. Os resultados dessas simulações são usados para garantir a segurança dos edifícios antes da construção, avaliar as opções de segurança das edificações existentes, reconstruir incêndios para investigação pós-acidente e auxiliar no treinamento de bombeiros (*THUNDERHEAD ENGINEERING*, 2023).

O FDS é um simulador de incêndio que foi desenvolvido pelo *National Institute of Standards and Technology* (NIST). O FDS simula cenários de incêndio usando dinâmica de fluidos computacional otimizado para fluxo de baixa velocidade e acionado em função da temperatura. Essa abordagem é muito flexível e pode ser aplicada a incêndios que variam de fogões a tanques de armazenamento de óleo. Também pode modelar situações que não incluem incêndio, como ventilação em edifícios (*THUNDERHEAD ENGINEERING, 2023*).

Conforme Zheng et al. (2022), a maior característica do programa Pyrosim é que ela torna a construção do modelo mais intuitiva, sem a necessidade de inserir as informações por meio de um código como o FDS, sendo possível visualizar o modelo enquanto ele é construído, o que melhora a precisão.

De acordo com o manual do fabricante, os grandes problemas que a maioria dos usuários do *software* enfrentam são selecionar uma malha, definir sua geometria, selecionar uma reação e definir as condições de contorno corretas. Na Figura 27 apresenta-se a interface do Pyrosim.

Figura 27 - Interface do programa Pyrosim.



Fonte: Autoria própria.

Conforme Sun e Turkan (2020), o *software* FDS é interoperável com *softwares* BIM arquitetônicos, ou seja, o arquivo BIM arquitetônico pode ser importado no *software* FDS para simular o crescimento do fogo e exibir os resultados através de um *software* de visualização conhecido como *Smokeview*, que é uma ferramenta gráfica incluída no Pyrosim.

Embora o PyroSim não possa importar diretamente os arquivos do Autodesk Revit (RVT), há várias maneiras de exportar os dados do Revit para um formato de arquivo que o Pyrosim possa ler, sendo que cada método tem vantagens e desvantagens. Exportar um modelo de informações de construção IFC, esse método é simples de usar e preserva grande parte das informações de construção presentes no modelo, porém perde todas as informações de textura, então os modelos não são visualmente tão interessantes quando exibidos no Pyrosim. Exportar um modelo do Revit para DWG, que pode então ser importado para o PyroSim, é simples de executar e exige apenas o Revit, mas esse método perde todas as informações sobre materiais, incluindo texturas, devido ao suporte DWG limitado do Revit. Exportar um modelo Revit para FBX usando plug-in de terceiros (por exemplo, a empresa SimLab Soft), produz bons resultados com materiais, texturas e coordenadas de textura bem suportadas, em muitos casos, este é o método mais confiável de reproduzir a representação gráfica do arquivo Revit original no Pyrosim (*THUNDERHEAD ENGINEERING, 2023*).

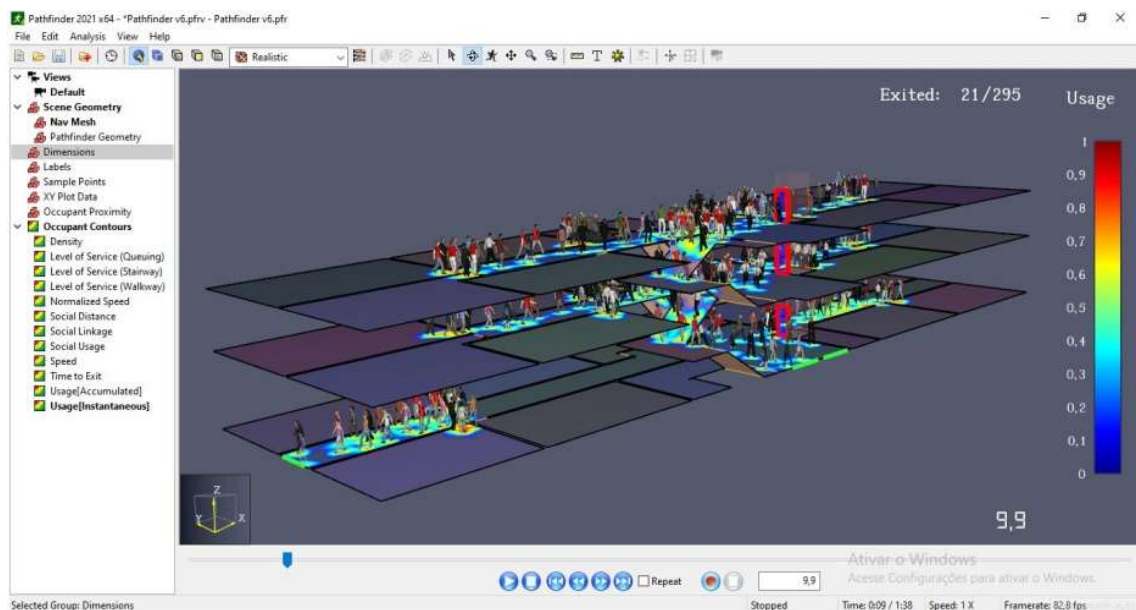
Todos os cálculos FDS são realizados dentro de malhas computacionais. Cada objeto na simulação (por exemplo, obstruções e aberturas) deve estar de acordo com a malha. Quando a localização de um objeto não corresponde exatamente a uma malha, o objeto é reposicionado automaticamente durante a simulação. Qualquer objeto que se estenda além do limite do domínio físico é cortado no limite. Para obter a precisão ideal da simulação, é importante usar células de malha que tenham aproximadamente o mesmo tamanho nas três direções. Para simular uma superfície feita de sólidos condutores de calor ou um combustível, deve ser especificado um material que descreva certas propriedades térmicas e comportamento de pirólise. O Pyrosim oferece duas categorias de materiais: materiais sólidos e combustíveis líquidos. Exemplos de materiais sólidos incluem tijolo, placa de gesso e estofamento. Exemplos de combustíveis líquidos incluem querosene e etanol. (*THUNDERHEAD ENGINEERING, 2023*).

A ferramenta *Smokeview* permite visualizar e analisar os resultados das simulações de incêndio fornece uma representação visual dos dados gerados pela simulação como, por exemplo, propagação do fogo, distribuição de fumaça, alteração de temperatura, dentre outros. Após a conclusão da simulação no Pyrosim, os resultados são salvos em arquivos com a extensão *.smv*, sendo que o *Smokeview* é capaz de importar esses arquivos e exibir os resultados de forma visual e apresentar uma visualização 3D interativa do ambiente simulado, podendo girar, ampliar, criar seções e mover a cena para visualizar diferentes perspectivas (*THUNDERHEAD ENGINEERING, 2023*).

### 3.1.3 Simulação de evacuação - Pathfinder

Pathfinder é um simulador de saídas ou evacuação de edificações de modelagem baseada em agentes (ABM) que usa comportamentos de direção para modelar o movimento dos ocupantes (*Thunderhead Engineering, 2023*). Ele consiste em três módulos: uma interface gráfica do usuário, o simulador e um visualizador de resultados 3D. O Pathfinder foi escolhido para este estudo devido à sua interface acessível e capacidade de avaliar o desempenho da evacuação humana em uma plataforma de simulação baseada em BIM. Na Figura 28 apresenta-se um exemplo de uma edificação com 3 pavimentos, onde é possível visualizar a interface do programa, e a população fazendo a evacuação através das escadas e portas.

Figura 28 - Interface do *software* Pathfinder.



Fonte: Autoria própria.

Modelos baseados em agentes, conforme Lia *et al.* (2020), consideram cada pessoa evacuante como um agente autônomo, que pode perceber os ambientes ao redor, trocar informações com outros agentes, tomar decisões de evacuação informadas e implementar estratégias de evacuação. Esses modelos podem não apenas simular agentes e ambientes heterogêneos, mas também capturar fenômenos emergentes (como congestionamento de multidões) e comportamentos humanos complexos (como comportamento competitivo,

comportamento de fila e comportamento de rebanho). Portanto, esses modelos foram popularizados na literatura mais recente pelas possibilidades de análise.

Conforme Uliana (2022) e *Thunderhead Engineering* (2023), o Pathfinder além de permitir a simulação dos movimentos dos agentes em processo de evacuação, possibilita: inserir as características do agente com relação ao perfil, velocidade de caminhada, conectar e analisar os ocupantes em grupos, de acordo com as peculiaridades e objetivos, desenvolver simulações complexas, com inclusão de pessoas com deficiência, cadeirantes ou acamados, acompanhados de assistente/cuidador, criar e identificar áreas de abrigo/refúgio, modelar e analisar o movimento dos agentes em escadas e rampas, sendo fixas ou rolantes, utilizar elevadores como componentes de evacuação, calcular a Dose Efetiva Fracionada (FED) para agentes que se movem em atmosfera perigosa e contaminante, escolher a porta com base no tamanho da fila e taxa de fluxo e analisar a disponibilidade de portas, com base no tempo e velocidades de movimento em superfícies, dentre outras aplicações.

O Pathfinder oferece duas opções principais para o movimento dos ocupantes, sendo eles o modo *Society of Fire Protection Engineers* (SFPE) e o modo *Steering*. O modo SFPE é um modelo de fluxo, onde as velocidades de caminhada são determinadas pela densidade de ocupantes dentro de cada sala e o fluxo através das portas é controlado pela largura da porta. Já o modo de *Steering* foi baseado na ideia de comportamentos de direção inversa e permite que um comportamento mais complexo surja naturalmente como um subproduto dos algoritmos de movimento, eliminando a necessidade de filas e densidade de portas explícitas. No modo SFPE vários ocupantes podem ocupar o mesmo ponto na superfície de navegação e os ocupantes não tentam evitar uns aos outros, conforme Ahmed, Mehmood e Kristensen (2019).

São gerados no *software* gráficos quando for de interesse analisar a evacuação no decorrer do tempo de salas específicas, também são gerados gráficos com o total de ocupantes que passam por cada saída, em cada andar que seja especificado no programa, assim como são gerados demonstrando o fluxo específico em cada saída ou escada e a taxa de fluxo.

Conforme Valentim (2008) e Martins, Cajaty e Braga (2019), fluxo específico é determinado pelo número de pessoas que cruzam por um ponto na rota de fuga, por uma unidade de largura efetiva em uma unidade de tempo. A largura inadequada do caminho pode ser um fator limitante para o fluxo. O fluxo específico pode ser determinado pela Equação (2), onde  $F_e$  representa a taxa de fluxo específico (pessoas/m.s);  $D$  representa a densidade de ocupação/populacional (pessoas/m<sup>2</sup>) e  $V$  representa a velocidade (m/s). 1



A taxa de fluxo representa o número de pessoas que cruzam um determinado ponto em uma unidade de tempo, e pode ser determinada pela Equação (3), onde  $T$  é a taxa de fluxo (pessoas/s);  $Fe$  representa a taxa de fluxo específico (pessoas/m.s) e  $L$  representa a largura (m).

$$Fe = D x V, \quad (2)$$

$$T = Fe x L. \quad (3)$$

As visualizações e animações geradas pelas simulações permitem que os profissionais envolvidos nos projetos entendam o comportamento do fogo e suas interações com a estrutura do edifício, bem como visualizar a tomada de decisões dos ocupantes durante o abandono da edificação, o que pode facilitar a identificação de soluções para melhorar a segurança em situações de incêndios.

## 3.2 MODELAGEM BIM – REVIT

### 3.2.1 Escolha da edificação

A definição da ocupação de uma edificação corresponde ao seu uso e está vinculada à função social, econômica, comercial ou técnica exercida. Ela é utilizada pelas legislações nacionais e estaduais de segurança contra incêndio para classificar as edificações em grupos, a exemplo da NBR 9077 (ABNT, 2001) e Resolução Técnica CBMRS N.º 11, Parte 01/2016.

Nesta pesquisa adotou-se como objeto de estudo uma edificação destinada a uma biblioteca escolar, visto que esses prédios reúnem um grande número de usuários, como é o caso de professores e demais profissionais que ali atuam, bem como os alunos que utilizam aquele espaço. A área total do prédio é de 1.435,57m<sup>2</sup>, distribuídos em dois pavimentos. Essa edificação já foi construída em diferentes campi do Instituto Federal de Ciências e Tecnologia Farroupilha (IFFar).

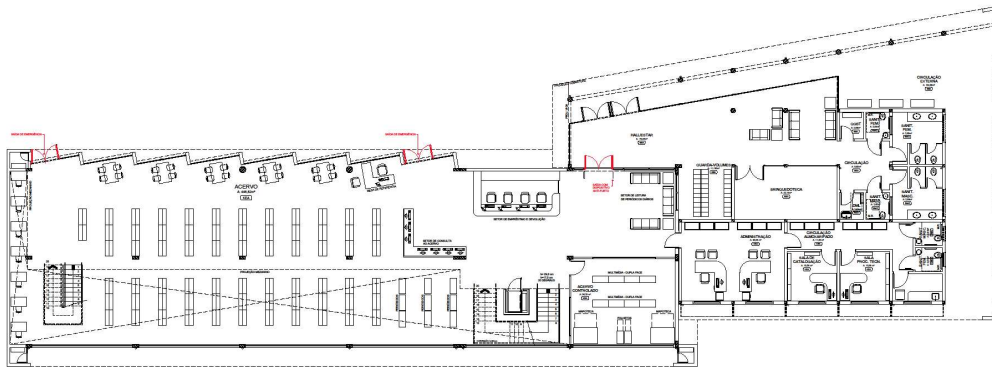
Conforme pode ser visto na Figura 29 (a), no pavimento térreo existe um espaço destinado ao acervo, mesas de estudo, bem como área administrativa, sanitários, além de uma plataforma elevatória destinada ao uso de pessoas com deficiência. Existem quatro saídas no

pavimento térreo, sendo duas saídas de emergência e duas saídas que ficam localizadas no hall de acesso ao prédio, sendo que para acessar estas saídas é necessário passar por uma porta que possui dispositivo anti-furto, sendo que esta porta tem dimensão de 1,80 m, e as saídas possuem 1,80 metros cada. Esta porta que fica entre o acervo e o hall tem por finalidade a segurança do acervo do prédio, e embora não tenha sido feita alguma proposta de cenário analisando a largura desta porta, de maneira intuitiva é possível supor que esta acaba por prejudicar a eficiência da evacuação em caso de incêndio. Todas as saídas são para a fachada norte da edificação.

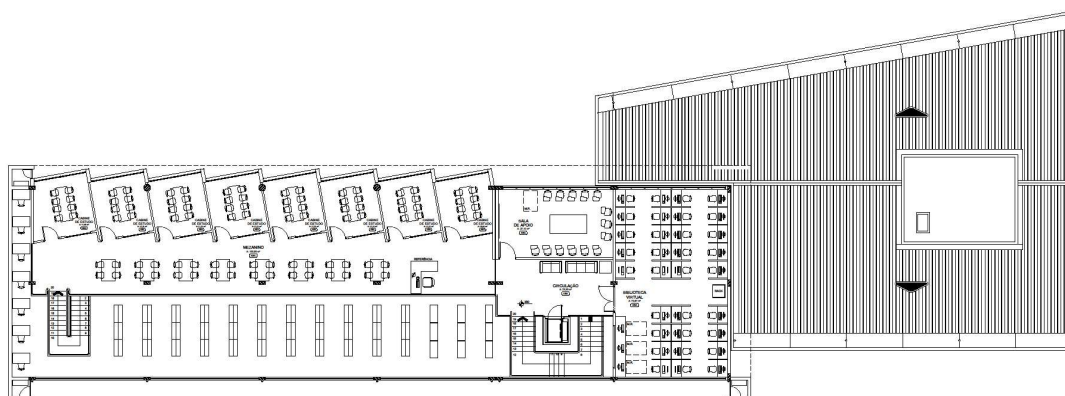
No segundo pavimento, Figura 29 (b), constam as cabines de estudo, bem como algumas mesas de estudo na área do mezanino, junto da área de circulação, sala de apoio e uma biblioteca virtual. Existem duas escadas, sendo uma do lado leste outra do lado oeste do prédio.

Figura 29 - Planta biblioteca. a) Planta baixa do pavimento térreo onde constam as saídas de emergência, escadas, acervo, salas e disposição do mobiliário. b) Planta baixa do segundo pavimento onde constam as escadas, salas e disposição do mobiliário.

a)



b)



Fonte: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Farroupilha.

### 3.2.2 Construção do modelo

A edificação teve a arquitetura modelada no *software* Revit (Autodesk, versão estudantil, 2022). No modelo constaram as informações da geometria, bem como dos principais materiais que foram utilizados na construção. O modelo foi inteiramente lançado no Revit, sem importação de um arquivo DWG previamente criado em outro *software*, com a finalidade de verificar quais as vantagens de utilizar o modelo BIM no estudo.

A topografia do terreno não foi modelada no *software*, já que o prédio é uma construção já existente. Os níveis foram lançados de acordo com o projeto arquitetônico, sendo considerado o nível 0,0 para o pavimento térreo, a laje do segundo pavimento foi considerada no nível 3,50 m e, por fim, a laje de fechamento da edificação no nível 6,70 m.

As paredes foram lançadas conforme a dimensão do projeto arquitetônico, sendo os blocos em alvenaria de tijolo cerâmico furado, e o revestimento foi considerado emboço (massa única) com pintura, totalizando 15 cm de espessura após os acabamentos, tanto nas paredes internas como nas externas. O piso usado na modelagem foi piso vinílico, as janelas e portas externas são em esquadrias de alumínio e fechamento com vidro, as portas internas são de madeira. As lajes do primeiro e segundo pavimentos são lajes em concreto armado, as escadas também possuem estrutura em concreto armado e acabamento com emboço e pintura.

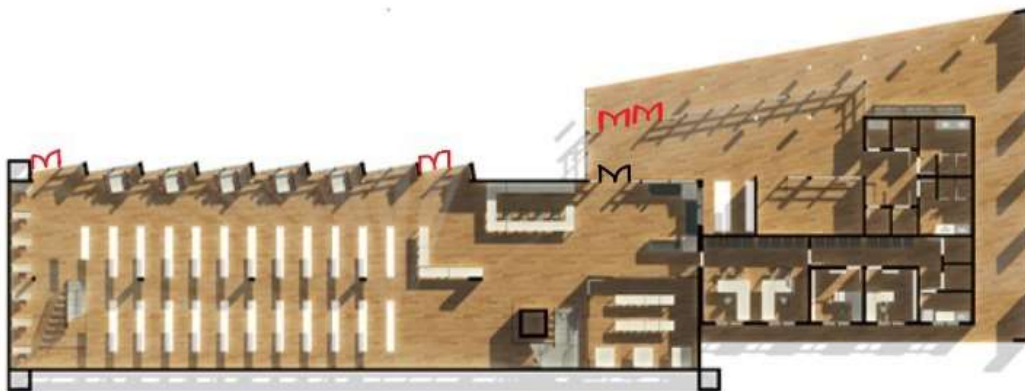
Também foram modelados no Revit os móveis que constavam no projeto arquitetônico, sendo basicamente as estantes de madeira na área do acervo da biblioteca, mesas de estudo na área de circulação e nas cabines de estudo, as mesas de computador na biblioteca virtual, além de algumas mesas na parte administrativa do prédio. Na Figura 30 (a) apresenta-se a vista isométrica da edificação, onde pode ser visualizada na fachada norte as 4 portas de saída, destacando-se que todas as portas se encontram na mesma fachada. A Figura 30 (b) e (c) demonstram a planta baixa do pavimento térreo e do segundo pavimento, respectivamente. É possível visualizar as duas escadas, o mobiliário de ambos os pavimentos, além da localização das portas e janelas.

Figura 30 - a) Modelo da biblioteca no Revit. a) Vista isométrica do prédio. b) Planta baixa do primeiro pavimento da biblioteca. c) Planta baixa do segundo pavimento da biblioteca.

a)



b)



c)



Fonte: Autoria própria.

Para verificar se as saídas de emergência atendem as normas e fazer o cálculo da população da biblioteca, foi usada como referência a Resolução Técnica CBMRS Nº 11 – Parte 1/2016 Saídas de Emergência. As saídas de emergência são dimensionadas em função da população da edificação, sendo que a população também foi usada para fazer o cálculo do número de ocupantes que iriam realizar a evacuação do prédio.

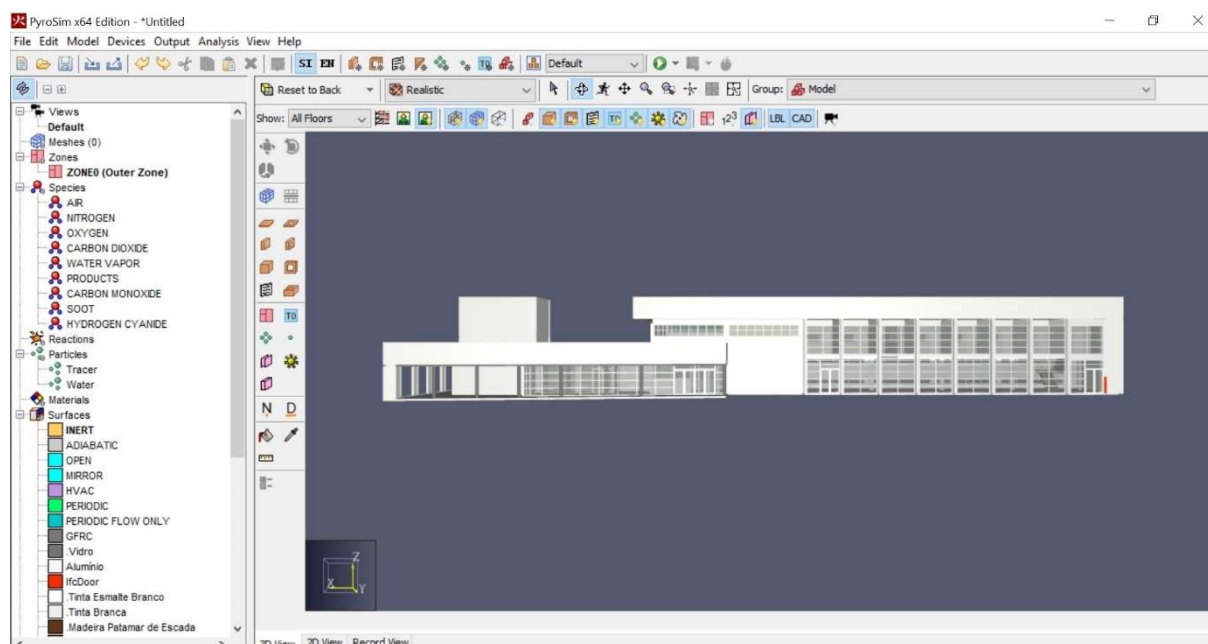
### 3.3 SIMULAÇÃO DE INCÊNDIO – *SOFTWARE* PYROSIM

Conforme Sun e Turkan (2020), o aumento da resolução da malha tem resultados de simulação mais precisos, no entanto, também aumenta significativamente o tempo de computação. Após a definição da resolução da malha, propriedades e comportamentos de pirólise de materiais de construção destinam-se a afetar a reação ao fogo. As bibliotecas de propriedades do Pyrosim incluem as propriedades térmicas de um número limitado de materiais de amostra, e as propriedades térmicas de outros materiais precisam ser buscadas em outros manuais. Depois de definir as propriedades do material, uma reação ao fogo é criada por meio de uma superfície do queimador e um sistema de dispositivo é construído para medir vários produtos de pirólise em termos de calor, gás e fluido. Como resultado, as medições dinâmicas são apresentadas como uma animação 3D no programa *Smokeview* ou como gráficos de tempo 2D no programa estatístico incorporado no Pyrosim.

Após a construção do modelo no Revit, foi exportado um arquivo no formato *.ifc*, que foi importado no *software* Pyrosim (versão estudantil), conforme mostra a Figura 31, para que

o incêndio possa ser simulado e, assim, obter as características da propagação do incêndio. Os parâmetros que foram analisados na simulação do fogo foram a propagação e altura da camada de fumaça, visto que esta tem influência na visibilidade para que os ocupantes possam abandonar a edificação em segurança, a elevação de temperatura do ambiente e a emissão de gases como o CO que são liberados com o aumento e avanço do incêndio.

Figura 31 - Estrutura da biblioteca importada no formato *.ifc* no programa Pyrosim.



Fonte: Autoria própria.

Ao importar o modelo do Revit, já é possível verificar a estrutura da edificação, onde aparecem os pavimentos, cobertura, lajes, escadas, esquadrias e demais características do prédio. Com a finalidade de diminuir o tempo de processamento, foi importado o modelo BIM - Revit sem os móveis no Pyrosim. As estantes de madeira do acervo no pavimento térreo foram consideradas nessa etapa como mobiliário, visto que foram usadas como local onde o fogo teve início no estudo.

Conforme descrito no manual do fabricante, uma das dificuldades encontradas para a modelagem no programa é a definição da malha. Inicialmente foram feitos testes no modelo considerando uma malha de 0,45m x 0,45m e após foram sido feitos refinamentos com malhas menores e aumentando o número de elementos e tempo de processamento, conforme a Tabela 3, sendo usado para o processamento um notebook com as seguintes especificações:

processador Intel I7 de sétima geração, 20 GB de memória RAM e SSD com 480 GB. O computador usado iria ultrapassar 17 horas de uso para concluir o processamento da malha de 0,20m x 0,20m, por isso o teste com esta malha não fora concluído.

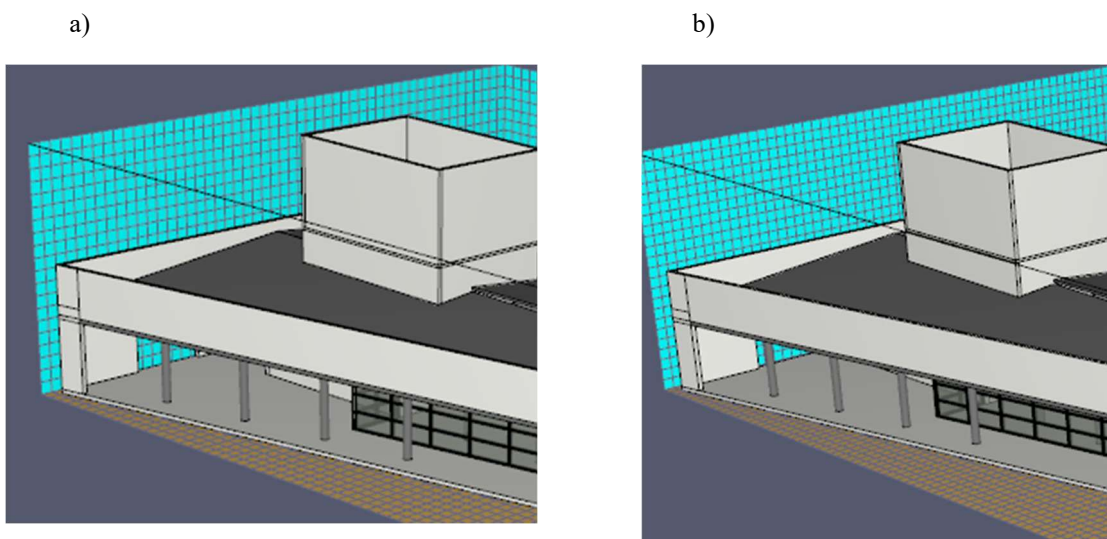
A malha usada na pesquisa foi definida como sendo a malha 0,30m x 0,30m, por apresentar pouca diferença nos resultados para a malha menor e por ter um tempo de processamento bem menor em relação à malha mais refinada, conforme Figura 32. Foi possível verificar na Tabela 4 que com a malha de 0,30mx0,30m as temperaturas médias medidas nos pontos definidos nas saídas 1, 2 e 3 da edificação estavam convergindo, não apresentando diferença significativas nos resultados apresentados entre eles.

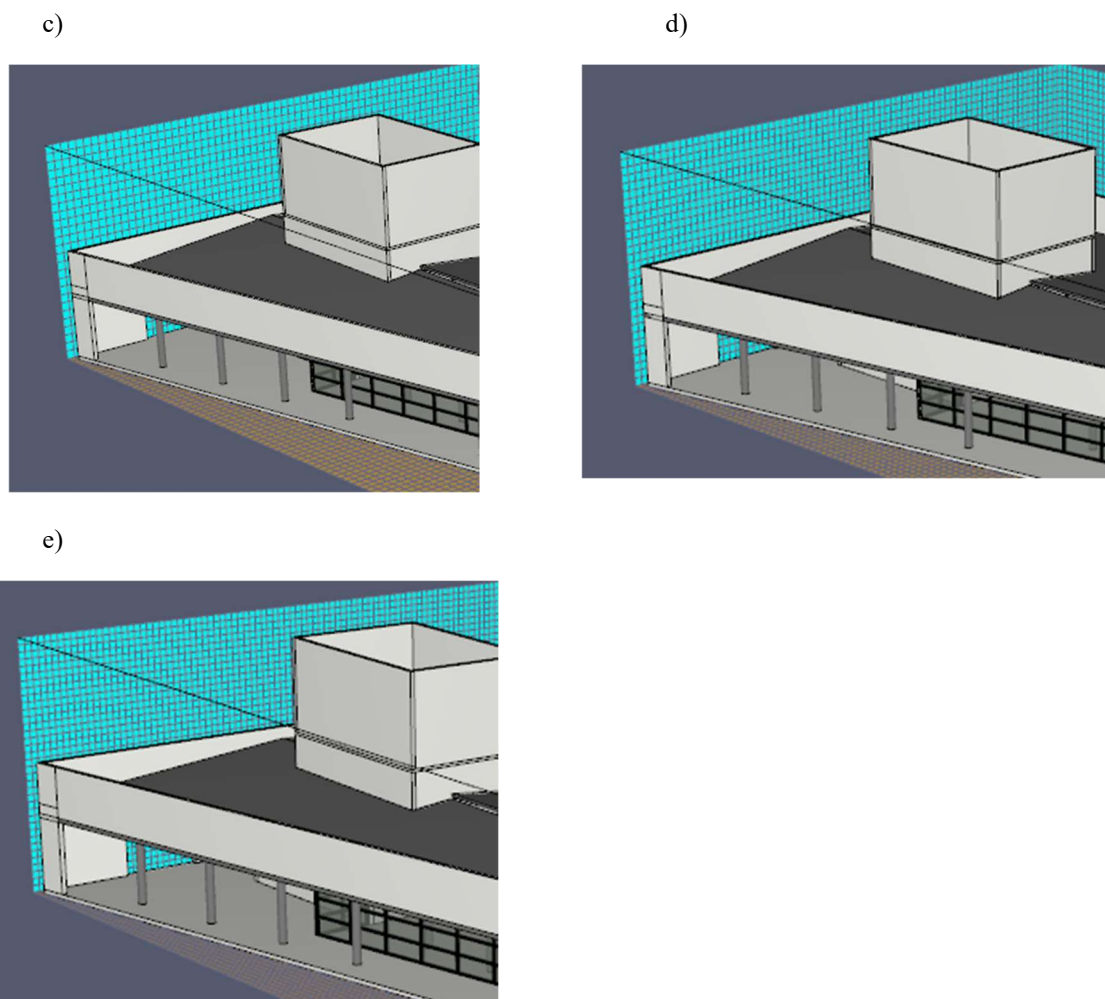
Tabela 3 - Tempo de processamento para as diferentes medidas de malha.

Malha	Nº de elementos	Tempo de processamento
0,45m x 0,45m	145.600	1.585s
0,40m x 0,40m	210.772	4.766s
0,35m x 0,35m	308.880	7.122s
0,30m x 0,30m	485.100	11.708s
0,25m x 0,25m	834.624	25.362s

Fonte: Autoria própria.

Figura 32 – Refinamento da malha usada no estudo. a) 0,45m x 0,45m; b) 0,40m x 0,40m; c) 0,35m x 0,35m; d) 0,30m x 0,30m e e) 0,25m x 0,25m.





Fonte: Autoria própria.

Tabela 4 - Resultados da temperatura máxima com diferentes malhas.

Malha	Saída 1	Saída 2	Saída 3
0,45m x 0,45m	21,79°C	21,98°C	20,46°C
0,40m x 0,40m	29,22°C	33,87°C	35,22°C
0,35m x 0,35m	49,16°C	37,12°C	38,50°C
0,30m x 0,30m	38,88 °C	38,88°C	39,55°C
0,25m x 0,25m	46,73°C	38,35°C	38,16°C

Fonte: Autoria própria.

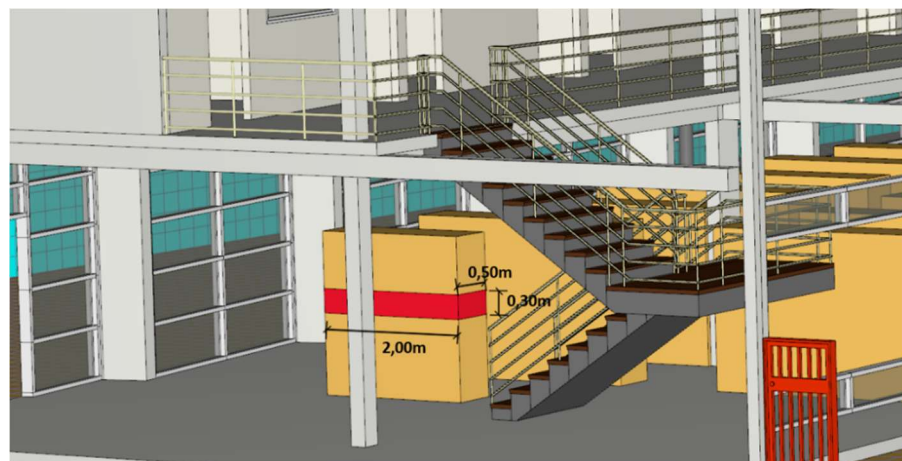
A reação ao fogo usada, ou seja, qual material que iria propagar o incêndio neste estudo foi definido como sendo o papel dos materiais das prateleiras do acervo. A temperatura inicial do prédio utilizada foi de 20 °C e a perda de massa do papel usada foi de 0,04 kg/(m<sup>2</sup>.s), conforme Luz (2017) e Braga (2019). A carga de incêndio no estudo foi o papel presente em



uma prateleira, sendo que o queimador considerado no estudo (Figura 33) possuía uma área de superfície de  $2,50 \text{ m}^2$ , e ficava localizado próximo a saída 1 (Figura 34). Os demais materiais da edificação foram considerados inertes, ou seja, não há transferência de calor através destes materiais. O tempo total da simulação definido foi de 300 s.

Foram adicionados os parâmetros que serão analisados para a simulação 3D, sendo que na mesma pode-se adicionar seções 2D em qualquer ponto da malha, para que possam ser medidos e visualizados os resultados pretendidos. Foram posicionadas as seções na edificação conforme a Figura 38 (b), sendo uma seção no sentido longitudinal aos 8 m, e 3 seções no sentido transversal coincidindo com as saídas do prédio, aos 3 m, 26 m e 37 m, para que pudessem ser visualizadas as escadas, local de circulação das pessoas (corredores) e saídas da edificação.

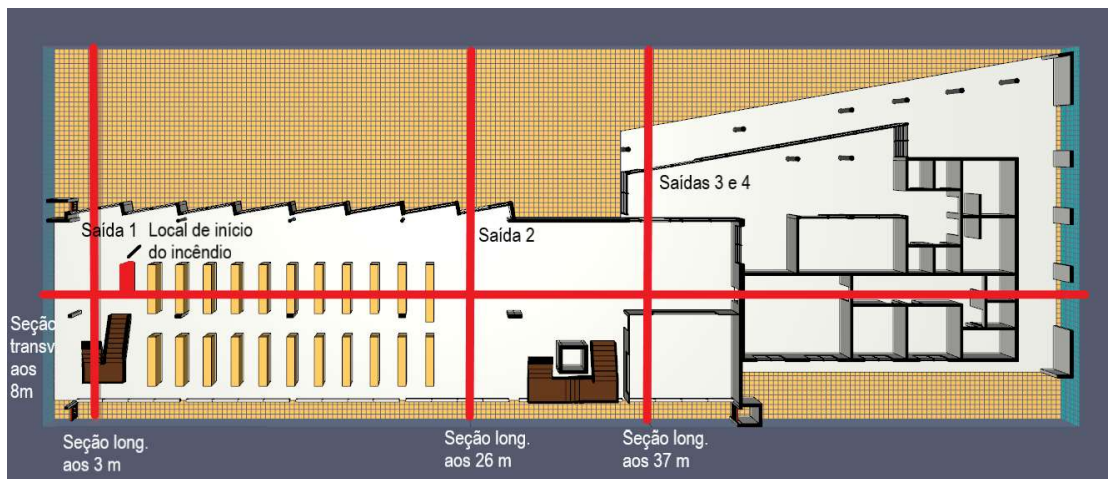
Figura 33 – Área do queimador usado no estudo.



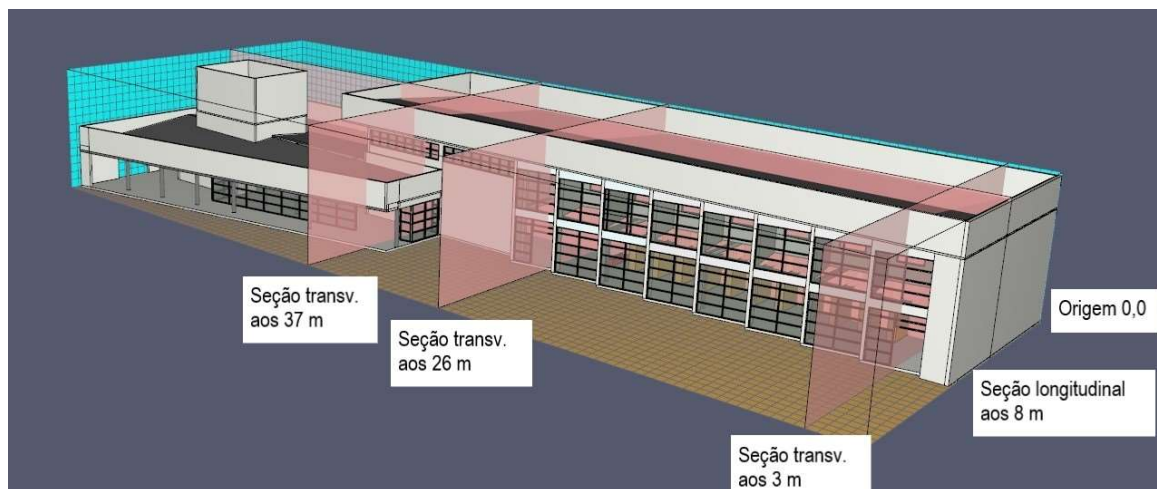
Fonte: Autoria própria.

Figura 34 - Posicionamento das seções na biblioteca no programa Pyrosim. a) Planta baixa do primeiro pavimento. b) Vista isométrica.

a)



b)



Fonte: Autoria própria.

### 3.4 SIMULAÇÃO DE EVACUAÇÃO – *SOFTWARE* PATHFINDER

Para as simulações de evacuação, foi utilizado o *software* Pathfinder (versão estudantil), e foram usados os dois modos do programa para simular a evacuação das pessoas da biblioteca. Conforme Li et. al. (2018), o Pathfinder usa duas opções principais para o movimento do ocupante: o modo SFPE e o modo *Steering*. O modo SFPE implementa os conceitos do *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Nesse modo a largura da porta controla um modelo de fluxo, onde a densidade dos ocupantes determina as velocidades de caminhada dentro de cada sala e o fluxo através das portas. O modo de direção é baseado na ideia de comportamentos de direção inversos. O modo *Steering* do Pathfinder permite que o comportamento mais complexo surja naturalmente como um subproduto dos algoritmos de movimento eliminando a necessidade de filas de portas explícitas e cálculos de densidade. Os parâmetros gerais são aplicáveis aos dois modos do programa e os avançados ao modelo *Steering*. Os dois modos de simulação do *software* foram usados nesta pesquisa.

Os dados de entrada do modelo para proceder com as simulações de evacuação dos cenários proposto, seguem os parâmetros gerais e avançados do programa Pathfinder. Os parâmetros gerais foram aplicáveis nos dois modos de movimentação (SFPE e *Steering*) e os parâmetros avançados apenas no modo *Steering* (Martins, Cajaty e Braga (2019) e Uliana (2022)).

Conforme Martins, Cajaty e Braga (2019), os principais parâmetros gerais e avançados apresentados no referencial técnico do *Thunderhead Engineering* (2018) são descritos a seguir:

- **Parâmetros gerais:**

Largura do ombro – Padrão: 45,58 cm

Velocidade de caminhada – 1,19m/s

- **Parâmetros avançados:**

Fator de redução – Padrão: 0,7

Distância de conforto – Padrão: 0,08 m

Tempo de persistência – Padrão: 1,0 s

Tempo de resposta a colisão – Padrão: 1,5 s

Fator de demora – Padrão: 0,1

Para fins desta pesquisa, a velocidade de movimento adotada para os agentes em situação normal, que representa um caminhar padrão do adulto saudável, foi de 1,19 m/s, conforme Martins, Cajaty e Braga (2019) e Uliana (2022).

Segundo os autores, fator de redução é quanto um ocupante pode se deslocar passando por outros em corredores apertados, distância de conforto é a distância desejada que um ocupante tentará manter dos outros, tempo de persistência é o tempo que o ocupante manterá uma prioridade elevada ao tentar resolver conflitos de movimento, o tempo de resposta a colisão controla a distância em que a pessoa começará a calcular um custo para colidir com outros ocupantes e fator de demora especifica uma fração da velocidade dos ocupantes no qual eles são considerados lentos.

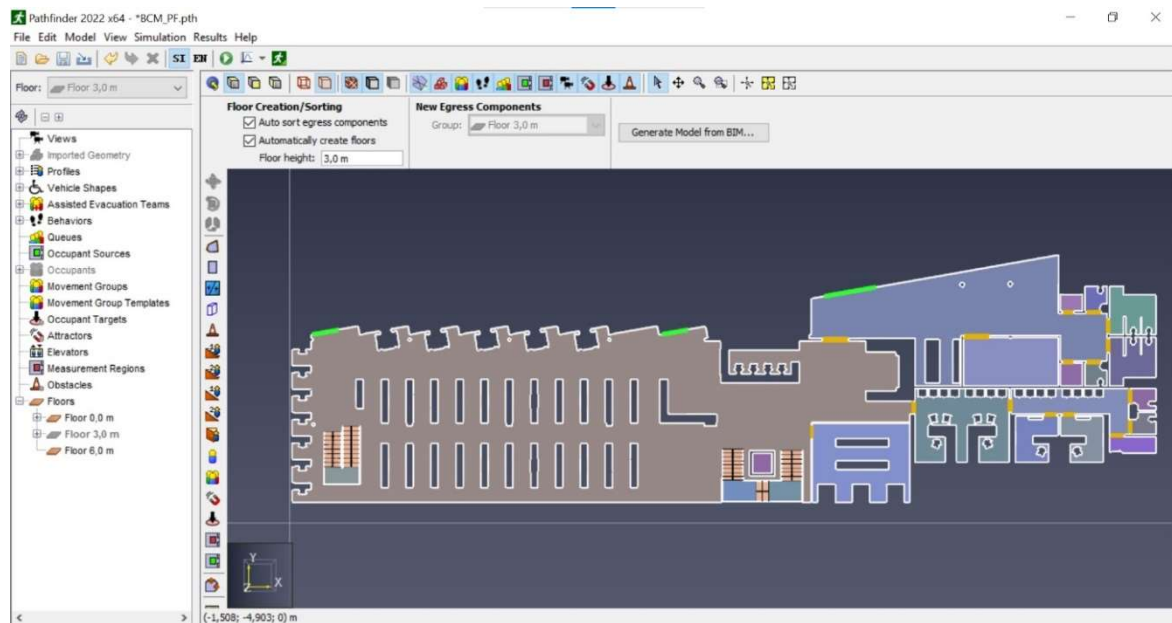
Será assumido que os agentes reagem instantaneamente no início do fogo, portanto o tempo de resposta e o tempo de alarme não foram considerados como um parâmetro dentro da análise. Logo, todos os ocupantes iniciaram seu deslocamento no início da simulação. O uso da plataforma elevatória também não será considerado no estudo visto que o cenário foi um incêndio e a edificação não conta com plataforma resistente ao fogo.

Para que a simulação de evacuação pudesse ser realizada, foi feita a importação do modelo BIM no formato *.IFC*, conforme a Figura 35, para que o movimento dos ocupantes de abandono da edificação pudesse ser visualizado. Como a evacuação das pessoas e o incêndio ocorrem ao mesmo tempo, sendo eventos concomitantes, foi realizada a importação do arquivo de resultados gerados na simulação de incêndio no programa Pyrosim no formato *.PS*, para que

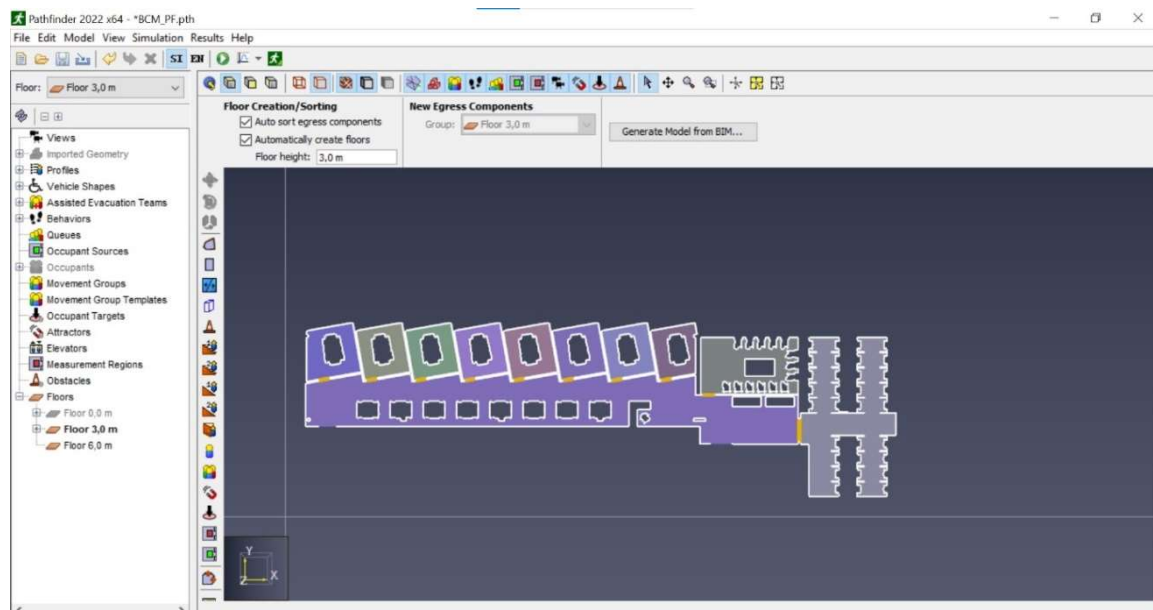
pudessem ser trazidos para a evacuação os efeitos do incêndio, ou seja, a propagação da fumaça, condições de temperatura, visibilidade e gás CO e, assim, pudessem ser gerados os resultados de tempo e condições na evacuação e visto a influência do incêndio no abandono da edificação usada como estudo de caso.

Figura 35 - Modelo do BIM importado no *software* Pathfinder. a) Planta baixa do pavimento térreo. b) Planta baixa do segundo pavimento.

a)



b)



Fonte: Adaptado de *Thunderhead Engineering* (2023).

Alguns cenários foram propostos e analisados, para que pudessem ser visualizadas as diferenças no tempo de evacuação através das saídas, sendo estes:

Cenário 1 – Considerando neste cenário a condição normal para que os ocupantes evacuassem o prédio, e que os agentes possam usar todas as 4 saídas da edificação, ou seja, as saídas 1 e 2 que são saídas de emergência e ficam no acervo da biblioteca, e as saídas 3 e 4 que ficam após o hall de acesso, estão todas disponíveis. Como seria necessário passar pela porta que possui o dispositivo anti-furto antes de acessar as saídas 3 e 4, sendo possível visualizar nas simulações se essa porta acaba agindo como um gargalo e prejudicando a eficiência da evacuação.

A largura de passagem disponível das 4 saídas disponíveis deste cenário seria 7,20 m, ou seja, possui 13 unidades de passagem conforme a Resolução Técnica CBMRS Nº 11 – Parte 1/2016, sendo este número bem superior as 4 unidades de passagem requeridas pela Resolução.

Cenário 2 – Neste cenário foi considerado que estava ocorrendo o incêndio durante a simulação da evacuação no cenário em questão, e que devido ao incêndio ocorrer na prateleira próxima a porta 1 e escada, que ambos estariam inacessíveis para os ocupantes, então estavam disponíveis somente a saída 2 que fica no acervo e as saídas 3 e 4 que ficam no hall de acesso ao prédio e após a porta que possui o dispositivo anti-furto. Os ocupantes iriam poder utilizar somente a escada próxima a saída 2 para que pudessem descer do segundo pavimento. Foi considerado um perímetro de 2,5m em torno da prateleira onde seria o foco do incêndio, para que os ocupantes não passassem próximo deste local.

A largura de passagem disponível das 3 saídas disponíveis deste cenário seria 5,40 m, ou seja, possui 9 unidades de passagem conforme a Resolução Técnica CBMRS Nº 11 – Parte 1/2016, sendo este número bem superior as 4 unidades de passagem requeridas pela Resolução;

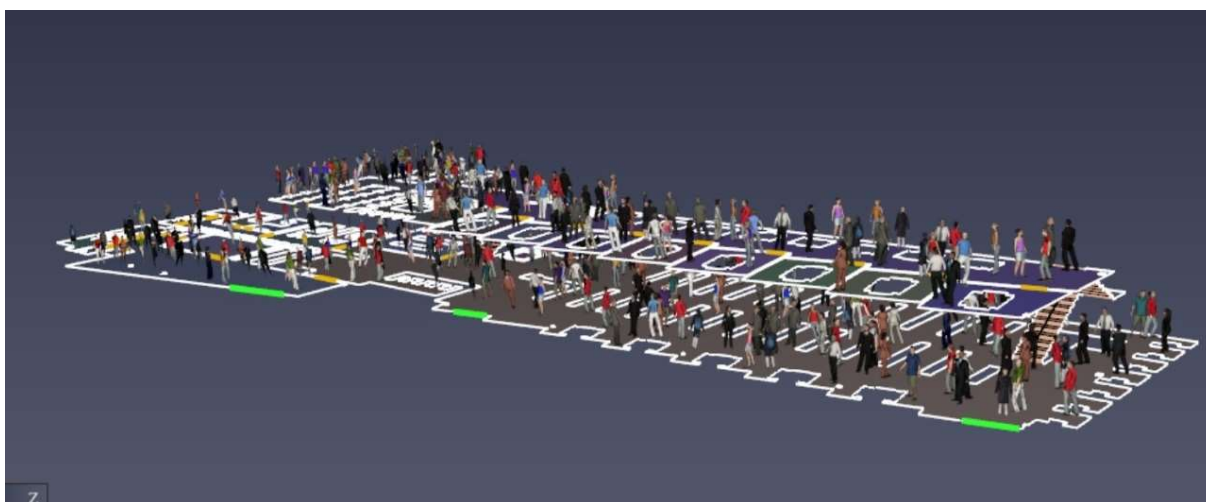
Cenário 3 – Neste cenário também foi considerado que estava ocorrendo o incêndio durante a simulação da evacuação no cenário, e que devido ao incêndio ocorrer na prateleira próxima a porta 1 e escada, que ambas estariam inacessíveis para os ocupantes e, também, como as saídas 1 e 2 são saídas de emergência e ficam localizadas no acervo da biblioteca, poderiam estarem fechadas e não pudessem serem usadas pelos ocupantes. Então estavam disponíveis somente as saídas 3 e 4 que ficam no hall de acesso ao prédio e após a porta que possui o dispositivo anti-furto.

Os ocupantes iriam poder utilizar somente a escada próxima a saída 2 para que pudessem descer do segundo pavimento. Também foi considerado um perímetro de 2,5 m em torno da prateleira onde seria o foco do incêndio, para que os ocupantes não passassem próximo deste local.

Esse cenário foi testado porque as portas 1 e 2 poderiam estar trancadas por causa de furtos de livros. A largura de passagem disponível das 2 saídas disponíveis deste cenário seria 3,60 m, ou seja, possui 6 unidades de passagem conforme a Resolução Técnica CBMRS Nº 11 – Parte 1/2016, sendo este número ainda superior as 4 unidades de passagem requeridas pela Resolução.

O total de ocupantes foi colocado de maneira aleatória nos pavimentos de acordo com o tipo de ocupação das salas (24 pessoas nas salas administrativas, 49 pessoas na sala de aula e 267 pessoas na biblioteca), conforme Figura 36.

Figura 36 – Ocupantes nos dois pavimentos no programa Pathfinder.



Fonte: Adaptado de *Thunderhead Engineering* (2023).

## 4 RESULTADOS

### 4.1 DIMENSIONAMENTO DAS SAÍDAS

Para fazer o cálculo das saídas de emergência e da população da biblioteca, foi usada como referência a Resolução Técnica CBMRS N° 11 – Parte 1/2016. Conforme a classificação das edificações quanto à sua ocupação, o prédio usado na pesquisa, por ser uma biblioteca, é classificado como F1, local de reunião de público. A Tabela 1 da resolução foi consultada para o cálculo da população e o dimensionamento das saídas, sendo que os índices considerados para o cálculo são os seguintes:

D1 – Local para prestação de serviços profissionais (Escritórios administrativos ou técnicos) - Uma pessoa a cada 7,00 m<sup>2</sup> de área;

E1 – Escolas em geral (Escolas de primeiro, segundo e terceiro graus) - Uma pessoa a cada 1,50 m<sup>2</sup> de área;

F1 - Locais onde há objetos de valor inestimável (Biblioteca) - Uma pessoa a cada 3,00 m<sup>2</sup> de área.

A área administrativa no pavimento térreo possui 166 m<sup>2</sup>, então de acordo com o cálculo da população, atende 24 pessoas. A sala de aula do segundo pavimento tem 73 m<sup>2</sup>, por isso a população considerada foi de 49 pessoas. Por fim, a biblioteca no primeiro pavimento tem 556 m<sup>2</sup> e no segundo pavimento 241 m<sup>2</sup>, tendo a população de 186 e 81 pessoas, respectivamente. A população total de acordo com o somatório das três ocupações foi de 340 pessoas.

A largura das saídas foi dimensionada em função do número de pessoas que por elas deva transitar. A largura das saídas (dos acessos, escadas, descargas e outros) foi dada pela Equação (4), onde  $N$  é o número de unidades de passagem, arredondado para número inteiro;  $P$  é a população, conforme coeficiente da Tabela 1 da resolução e  $C$  é a capacidade da unidade de passagem.

$$N = \frac{P}{C} \quad (4)$$

Com os dados da edificação da pesquisa, são necessárias 4 unidades de passagem (0,55 metros cada unidade) para atender a norma, sendo necessário 2,20 metros. Considerando as 4 saídas da edificação tem um total de 7,40 metros (1,80 m cada), portanto de acordo com os cálculos, a largura das portas de saída de emergência está atendendo o que a norma preconiza, e as saídas possuem dimensões bem maiores do que a resolução estabelece como mínimas.

Porém antes das saídas 3 e 4 que possuem 1,80 m cada, existe a porta com dispositivo anti-furto com largura de 1,80 m, e provavelmente essa porta irá causar congestionamentos quando os ocupantes forem passar por ela para poder acessar as saídas 3 e 4, e isso poderá ser visualizado nas animações geradas pelo programa de simulação de evacuação para ver se essa porta realmente prejudica a eficiência da evacuação.

## 4.2 ANÁLISE DA PROPAGAÇÃO DE INCÊNDIO

### 4.2.1 Propagação da fumaça

Neste estudo foi simulada a propagação da fumaça do incêndio com auxílio do *software* Pyrosim. Conforme Xu e Peng (2020), na fase inicial da combustão, muita fumaça é liberada devido à combustão lenta. A fumaça contém uma grande quantidade de gases tóxicos e partículas minúsculas, que podem sufocar ou envenenar as pessoas. As partículas na fumaça reduzem a taxa de passagem da luz, diminuindo a visibilidade e aumentando a dificuldade de fuga e resgate.

A propagação da fumaça em diferentes momentos foi ilustrada na Figura 37. A partir dos resultados da simulação, após 30s do início do incêndio, a fumaça ainda não alcançou as saídas e as escadas da edificação, enquanto está começando a se difundir para o segundo pavimento a partir da área do mezanino.

Aos 60s, verificou-se que a fumaça estava mais intensa próxima a saída 1 e escada próxima a ela, por ser mais próxima ao foco do incêndio e já alcançou o segundo pavimento da edificação através da área do mezanino. De acordo com os limites de tolerância, conforme Li et al. (2018), em espaços pequenos o limite para visibilidade é 5 m e, fazendo uma análise juntamente com as Figuras 42, 43, 44 e 45, referentes a visibilidade, ainda existe condições para uma saída segura dos ocupantes quando decorrido esse tempo, sendo possível visualizar as escadas e saídas do prédio.



Aos 120 s, uma grande quantidade de fumaça já se espalhou para o segundo pavimento, porém ainda não alcançou a sala de aula lá localizada. A evacuação das pessoas nas escadas já estaria um pouco prejudicada pela fumaça. Aos 300 s, as escadas no primeiro e segundo pavimentos já estariam cheias de fumaça e o prédio já não apresenta mais condições para uma evacuação segura.

Assim como no estudo de Xu e Peng (2020), a escada que fica mais próxima do foco do incêndio foi a primeira e mais gravemente afetada pela ação do fogo, que no caso desta pesquisa foi a escada próxima a saída 1.

Figura 37 – Propagação da fumaça. a) Aos 30 segundos de simulação. b) 60s. c) 120s. d) 300s.

a)



b)



c)



d)



## 4.2.2 Temperatura

As variações da temperatura em diferentes momentos foram ilustradas na Figura 38, 39, 40 e 41.

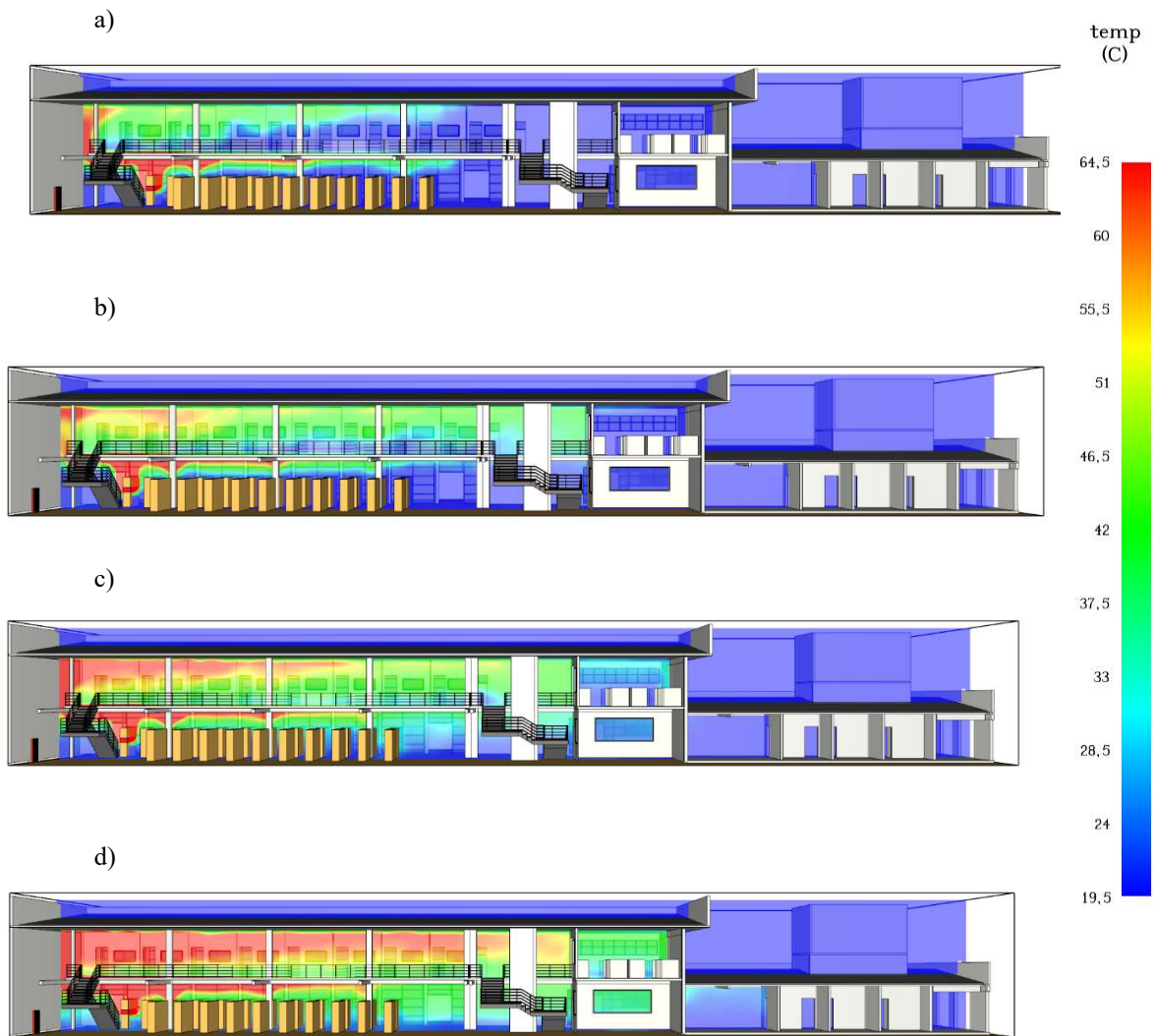
A fumaça de alta temperatura gerada pelo incêndio se espalhou pelo prédio, fazendo com que a temperatura perto da fonte de incêndio subisse rapidamente. A temperatura inicial do prédio foi definida como 20°C. Com 30s de simulação, a temperatura próxima a fonte do incêndio subiu rapidamente e alcançou os 65°C, porém nesse momento ainda não havia subido o suficiente para que pudesse variar de maneira expressiva a temperatura no segundo pavimento, tendo subido a temperatura próxima a saída 1 e escada próxima a ela por estarem perto da prateleira que foi o foco do incêndio.

Já aos 60s a temperatura no segundo pavimento já alcançou aproximadamente 37°C, enquanto as saídas 2, 3 e 4 ainda não foram afetadas pelo aumento da temperatura. De acordo com Zheng et al. (2022), a temperatura de 60°C já é suficiente para dificultar a saída dos ocupantes.

Com 120s de simulação, ambas as escadas já foram afetadas com a mudança de temperatura, chegando a alcançar em torno de 42°C em alguns locais do segundo pavimento, e a temperatura já se elevou na maior parte do prédio, porém ainda não alcançou o limite de tolerância apresentado no Quadro 1 de 60°C, conforme Li et al. (2018) e Sun e Turkan (2020). Ou seja, ao menos até 120s a saída segura dos ocupantes ainda seria possível de ser realizada. Com 300s de incêndio, a escada próxima a saída 1 já estaria muito afetada pelo aumento de temperatura, e inclusive a sala de aula do segundo pavimento já estaria sofrendo elevação de temperatura.

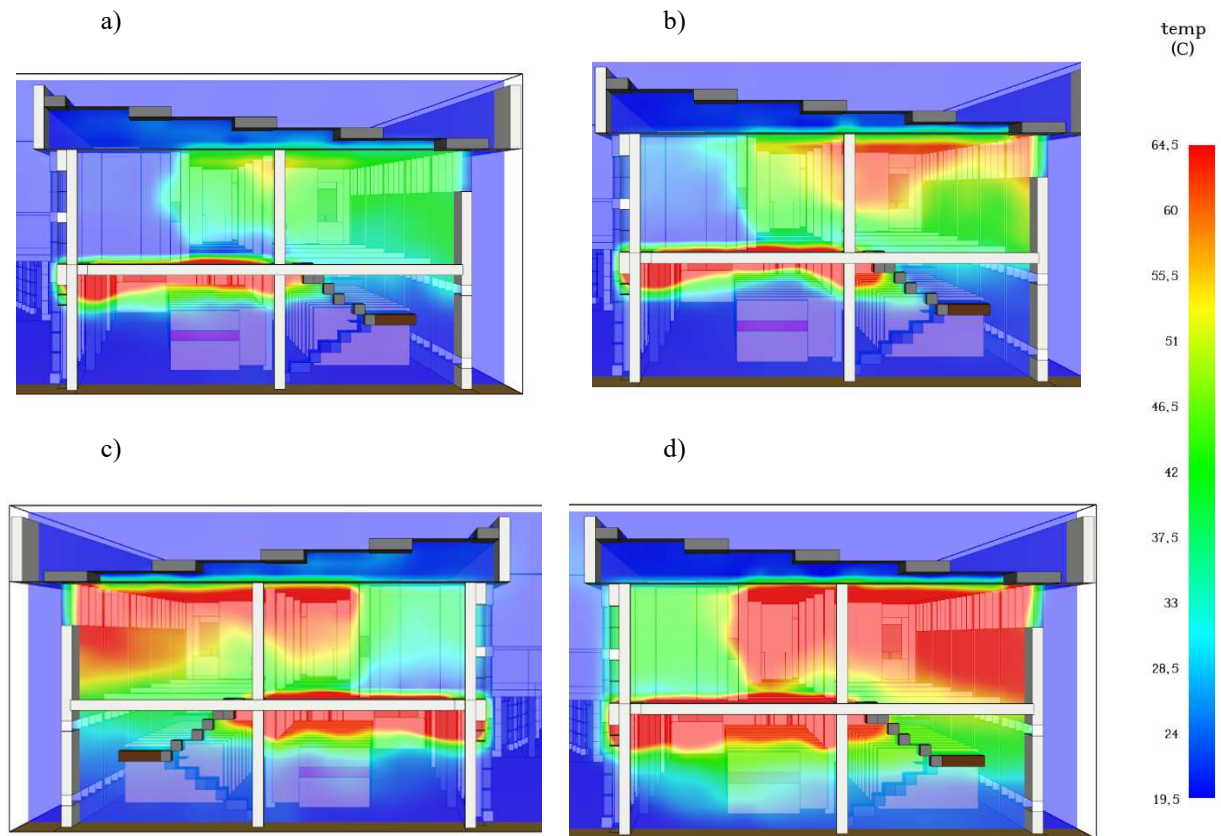
Diferentemente do estudo de Long, Zhang e Lou (2017), onde em todo o processo, a temperatura no edifício não foi elevada, exceto na sala onde o fogo se originou, e a temperatura teve pouca influência na fuga das pessoas, observou-se neste estudo que a temperatura afetaria a dinâmica de saída dos ocupantes, principalmente pela proximidade entre o foco do incêndio e uma das saídas e da escada.

Figura 38 – Mudança de temperatura na seção longitudinal aos 8 m. a) Aos 30s. b) 60s. c) 120s. d) 300s.



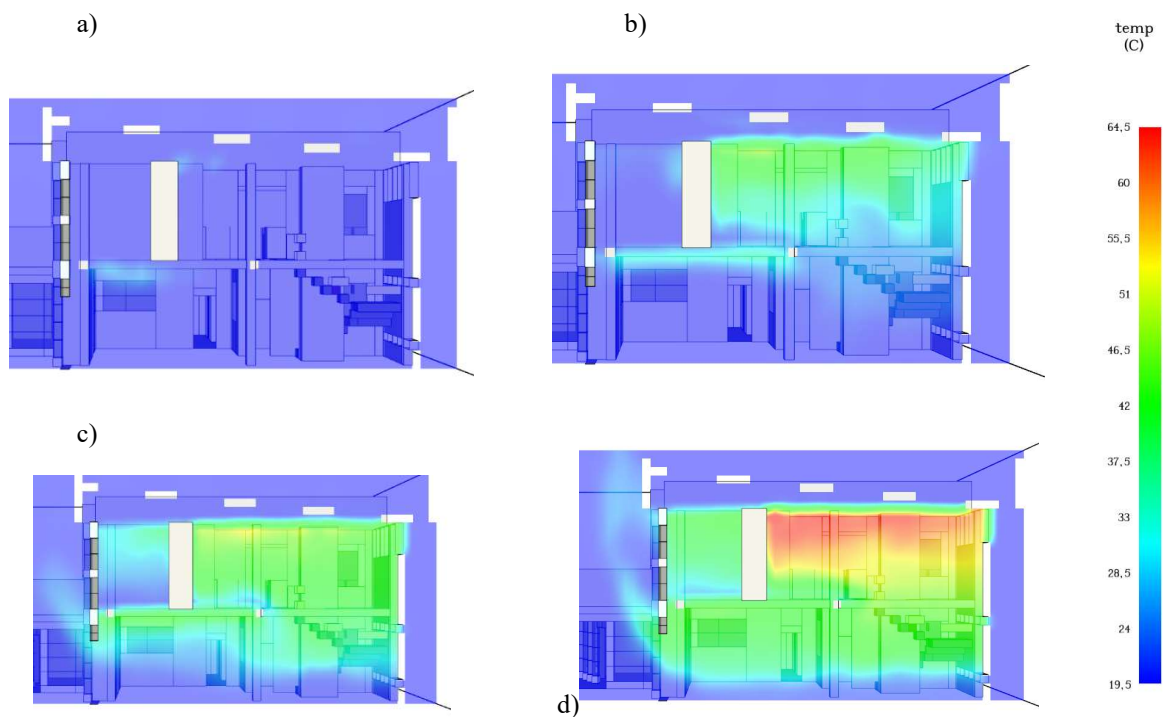
Fonte: Adaptado de *Thunderhead Engineering* (2023).

Figura 39 – Mudança de temperatura na seção transversal aos 3 m. a) Aos 30s. b) 60s. c) 120s e d) 300s.



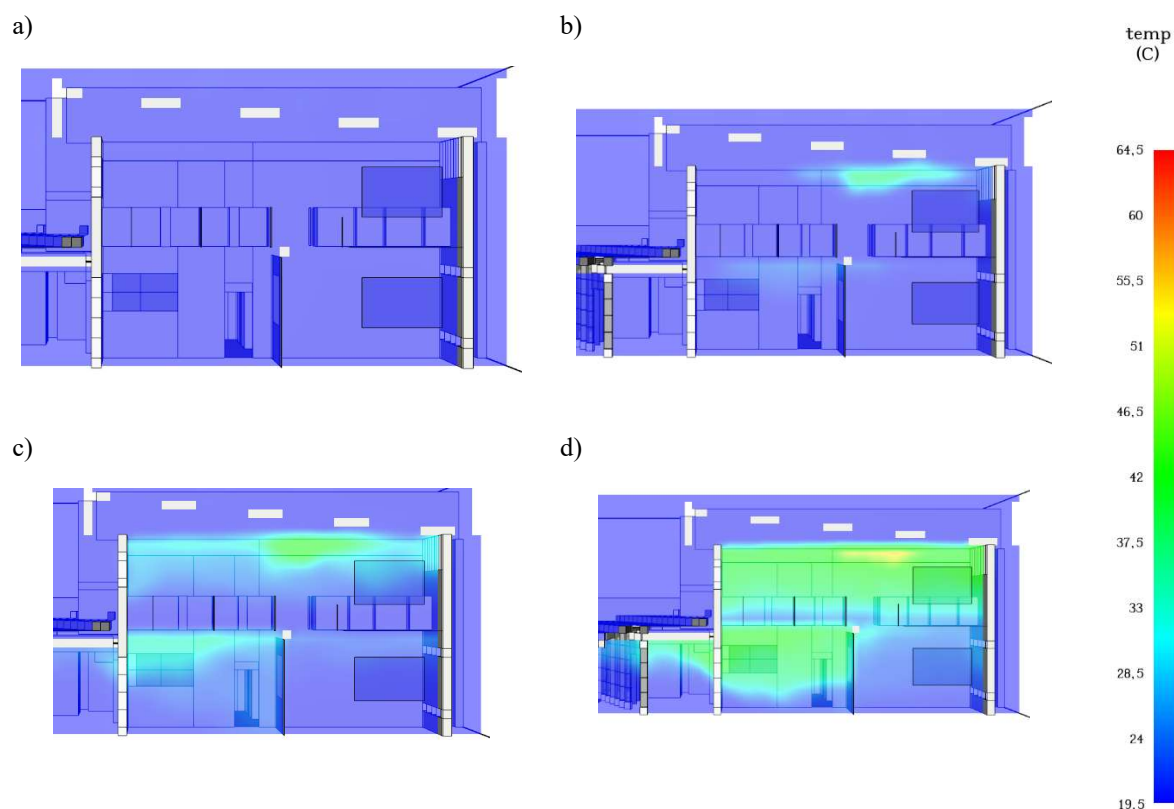
Fonte: Adaptado de *Thunderhead Engineering* (2023).

Figura 40 – Mudança de temperatura na seção transversal aos 26 m. a) Aos 30s. b) 60s. c) 120s. d) 300s.



Fonte: Adaptado de *Thunderhead Engineering* (2023).

Figura 41 – Mudança de temperatura na seção transversal aos 37 m. a) Aos 30s. b) 60s. c) 120s. d) 300s.



Fonte: Adaptado de *Thunderhead Engineering* (2023).

### 4.2.3 Visibilidade

Quando ocorre um incêndio, a fumaça se espalha de forma rápida e a visibilidade diminui rapidamente, o que é bastante desfavorável para que as pessoas possam sair da edificação em segurança. As alterações de visibilidade em diferentes momentos foram ilustradas nas Figuras 42, 43, 44 e 45.

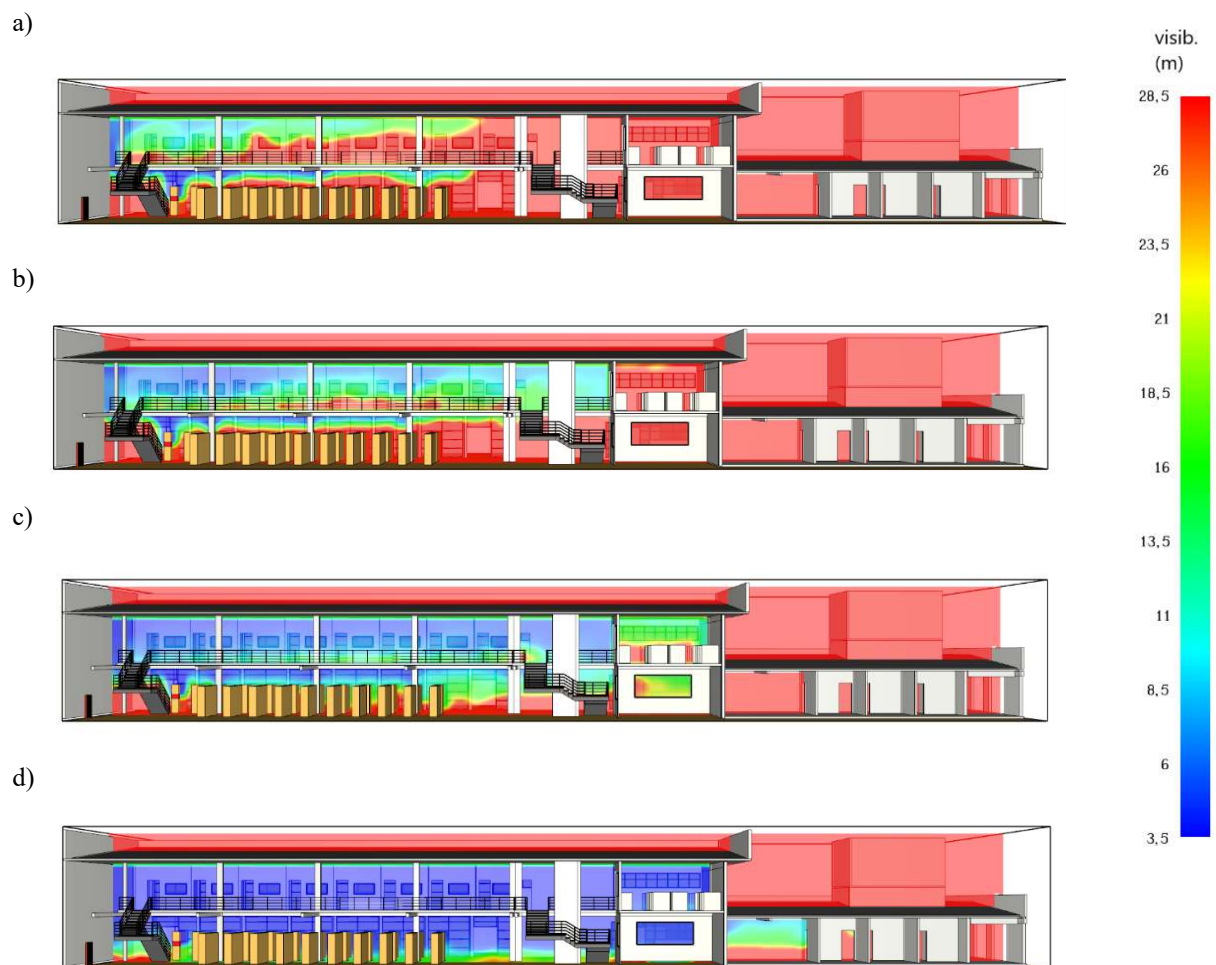
Com 30s de simulação, a visibilidade próxima ao foco do incêndio foi reduzida, ficando em torno de 13 m próximo ao foco do incêndio, sendo que na escada que fica próxima ao foco do incêndio já se observa uma redução de visibilidade, porém a visibilidade do segundo pavimento ainda não possui alteração significativa que prejudique a evacuação das pessoas, estando em torno de 21 metros em alguns pontos.

Com 60s, a escada próxima ao foco do incêndio e alguns pontos do segundo pavimento já apresentaram redução da visibilidade. De acordo com os limites de tolerância mencionados pelos autores no Quadro 1, conforme Long, Zhang e Lou (2017) que quando a visibilidade ainda

não for inferior a 4 m as pessoas podem se familiarizar com os edifícios e saírem com segurança, as saídas 1 e 2 decorrido esse tempo não foram muito afetadas e em alguns locais no segundo pavimento devido a propagação da fumaça através do mezanino possuem uma visibilidade de aproximadamente 13 m, ainda possuindo condições dos ocupantes deixarem o prédio em segurança.

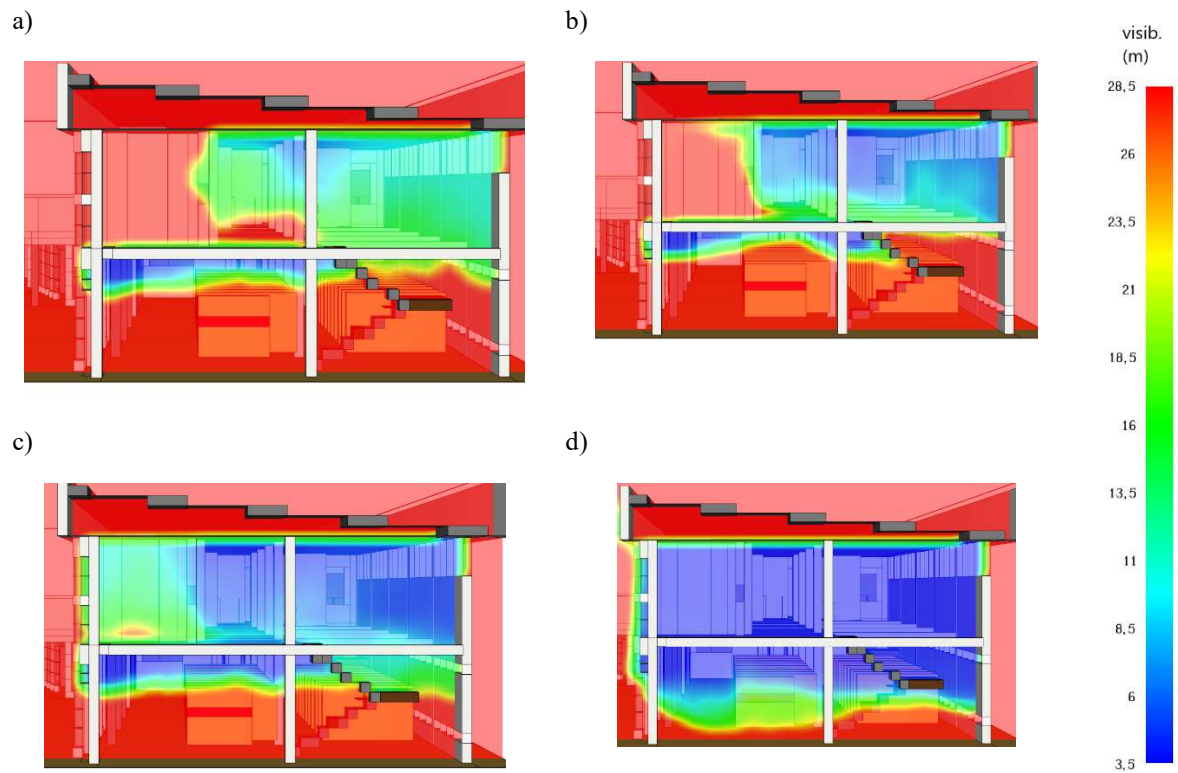
Aos 120s de simulação, toda a edificação, exceto a sala de aula do segundo pavimento e as salas administrativas, apresenta uma visibilidade reduzida, em torno de 8,5 m, e a partir desse tempo de simulação as pessoas que estivessem longe das saídas teriam dificuldades em visualizar as saídas e abandonar o prédio em segurança. Com 300s de simulação, toda a edificação, sem exceções, teve a visibilidade alterada para aproximadamente 6 m, sendo que ocupantes que porventura ainda estivessem no segundo pavimento teriam dificuldades em encontrar as saídas.

Figura 42 – Mudança de visibilidade na seção longitudinal aos 8 m. a) Aos 30s. b) 60s. c) 120s. d) 300s.



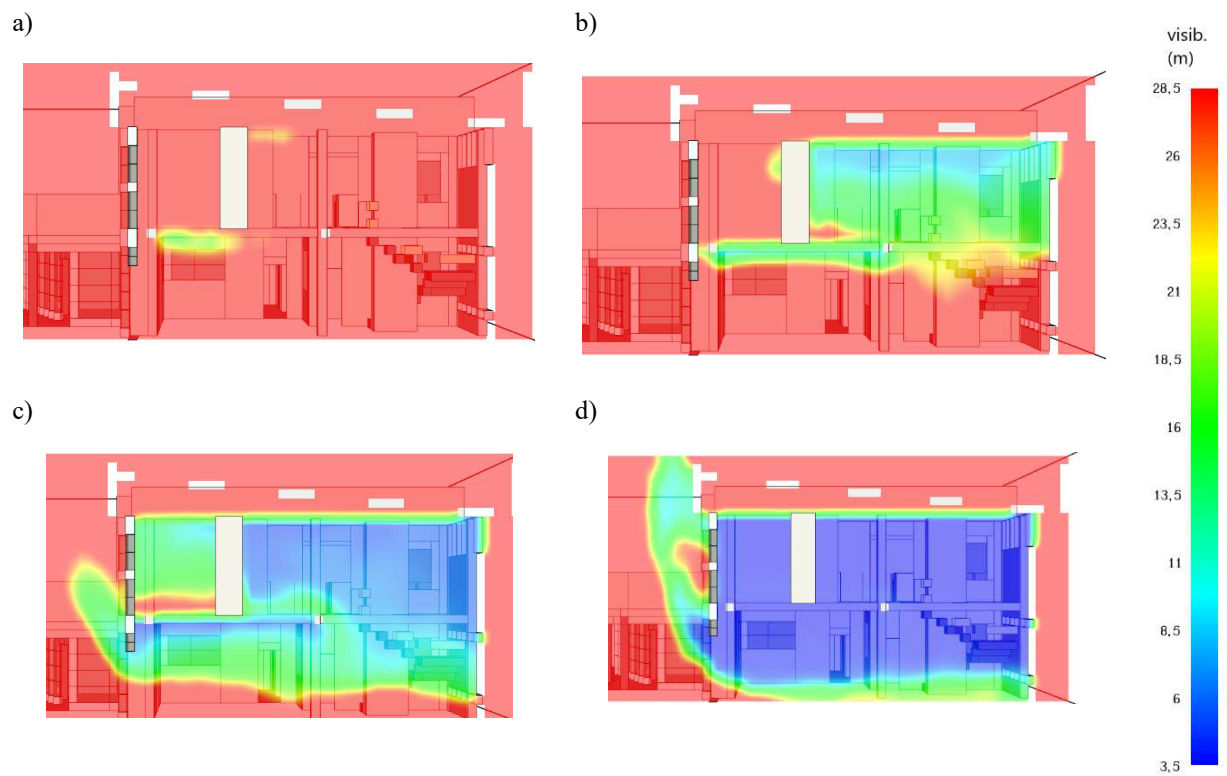
Fonte: Adaptado de *Thunderhead Engineering* (2023).

Figura 43 – Mudança de visibilidade na seção transversal aos 3 m. a) Aos 30s. b) 60s. c) 120s. d) 300s.



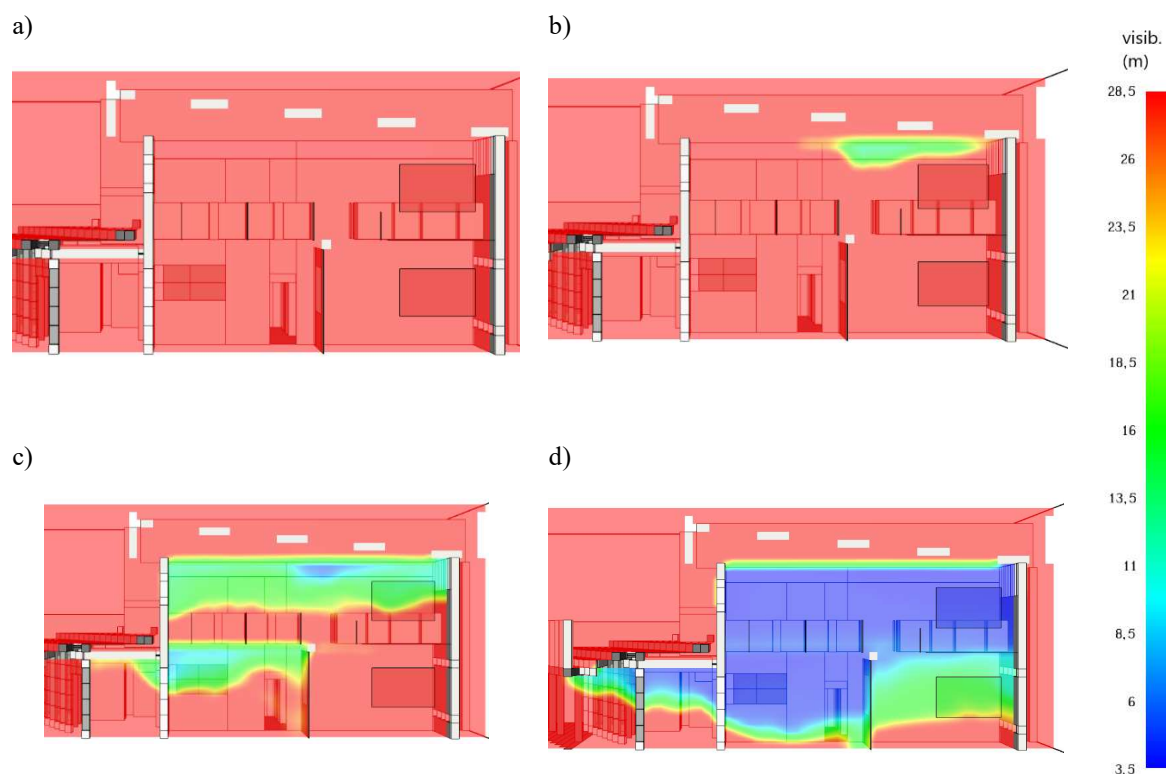
Fonte: Adaptado de *Thunderhead Engineering* (2023).

Figura 44 – Mudança de visibilidade na seção transversal aos 26 m. a) Aos 30s. b) 60s. c) 120s. d) 300s.



Fonte: Adaptado de *Thunderhead Engineering* (2023).

Figura 45 – Mudança de visibilidade na seção transversal aos 37 m. a) Aos 30s. b) 60 s. c) 120 s. d) 300 s.



Fonte: Adaptado de *Thunderhead Engineering* (2023).

#### 4.2.4 Análise da concentração de CO

As mudanças da concentração de CO em diferentes momentos foram ilustradas nas Figuras 46, 47 48 e 49.

Avaliando a variação da concentração de gás CO durante a ocorrência do incêndio percebe-se que com 30s de simulação, a concentração de CO próxima ao foco do incêndio era de aproximadamente  $3 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^3$  ou 0,03 ppm. Na escada que fica próxima ao foco do incêndio também se percebe uma elevação da concentração de CO de aproximadamente  $1,2 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^3$  ou 0,012 ppm.

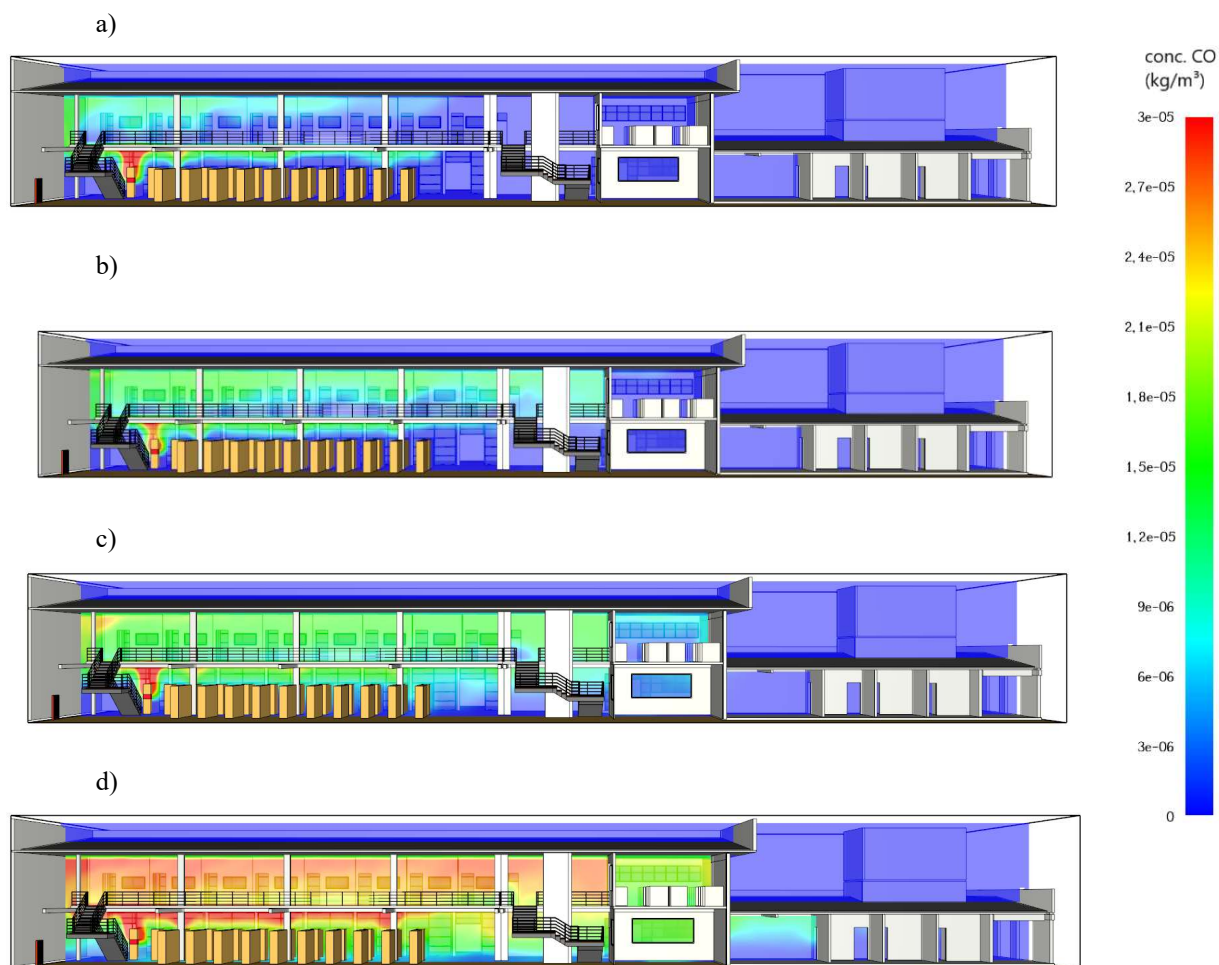
Aos 60s de simulação, a escada próxima ao foco do incêndio já alcançou uma concentração de gás de  $1,8 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^3$  ou 0,018 ppm, valores que ficam abaixo dos mencionados no Quadro 1 dos limites de tolerância, conforme *Li et al.* (2018), que são considerados valores críticos para 1 minuto de exposição  $10.000 \times 10^{-6} \text{ ppm}$  ( $1 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^3$ ) ou para 20 a 30 minutos de exposição  $3.000 \times 10^{-6} \text{ ppm}$  ( $0,3 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^3$ ).



Quando a simulação atingiu 120 s, é possível ver que quase todo o segundo pavimento possui uma concentração de gás  $1,8 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^3$  ou 0,018 ppm, exceto a sala de aula do segundo pavimento e a área com as salas administrativas no primeiro pavimento. De acordo com o Quadro 1, conforme Li *et al.* os ocupantes que porventura ainda estivessem na edificação deveriam sair o mais breve possível visto que as concentrações observadas, dependendo do período de exposição, já colocariam em risco a saúde das pessoas.

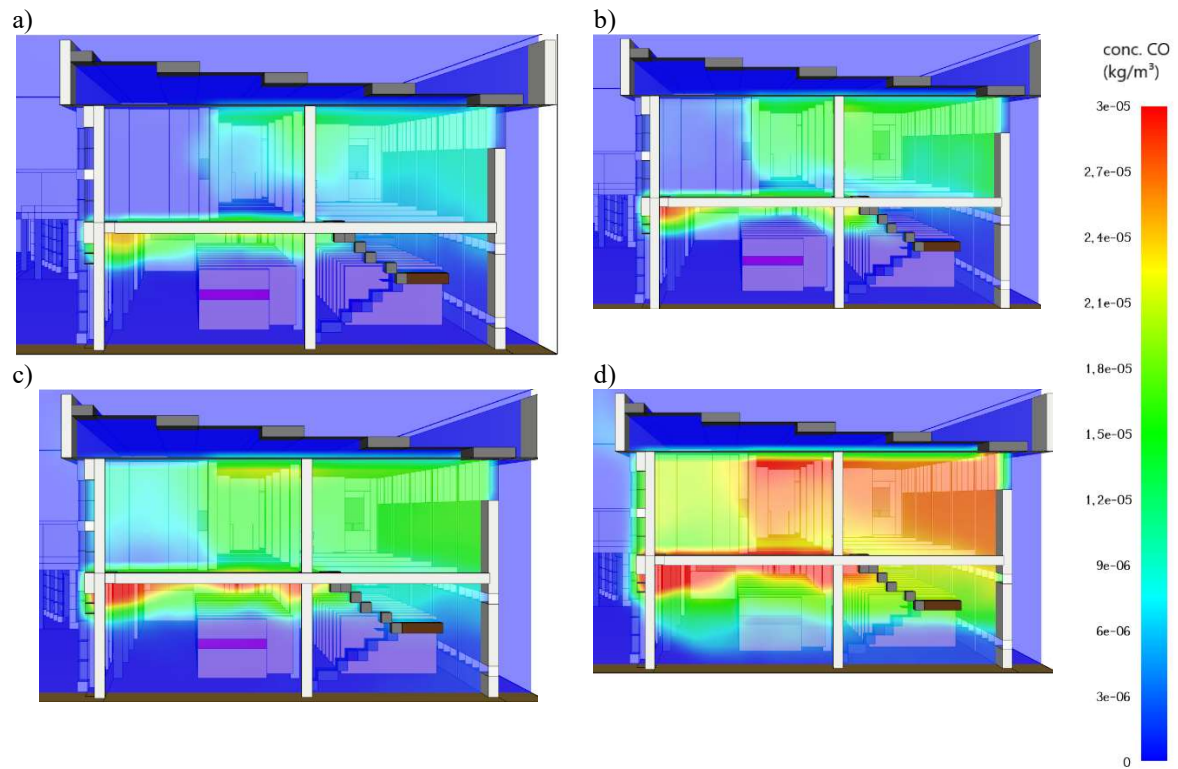
Com 300s, o segundo pavimento da edificação possui aproximadamente o mesmo valor de concentração de CO, em torno de  $2,4 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^3$  ou 0,024 ppm, sendo que a escada mais próxima ao foco do incêndio foi mais afetada, alcançando em torno de  $2,4 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^3$  ou 0,024 ppm próximo a escada. As saídas 3 e 4 foram pouco afetadas pelo acréscimo da concentração de gás CO. A concentração máxima que foi alcançada no prédio foi de  $3 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^3$  ou 0,03 ppm.

Figura 46 – Concentração de gás CO na seção longitudinal aos 8 m. a) Aos 30s. b) 60s. c) 120s. d) 300s.



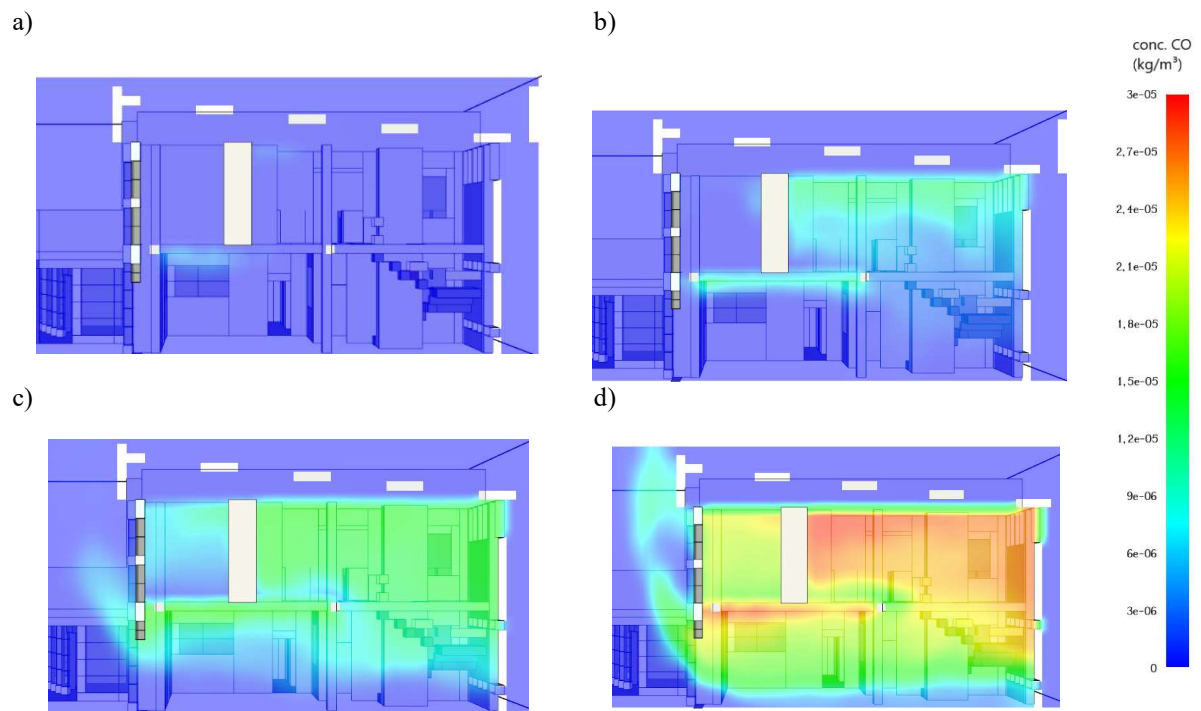
Fonte: Adaptado de *Thunderhead Engineering* (2023).

Figura 47 – Concentração de gás CO na seção transversal aos 3 m. a) Aos 30 segundos de simulação. b) 60 s. c) 120 s. d) 300 s.



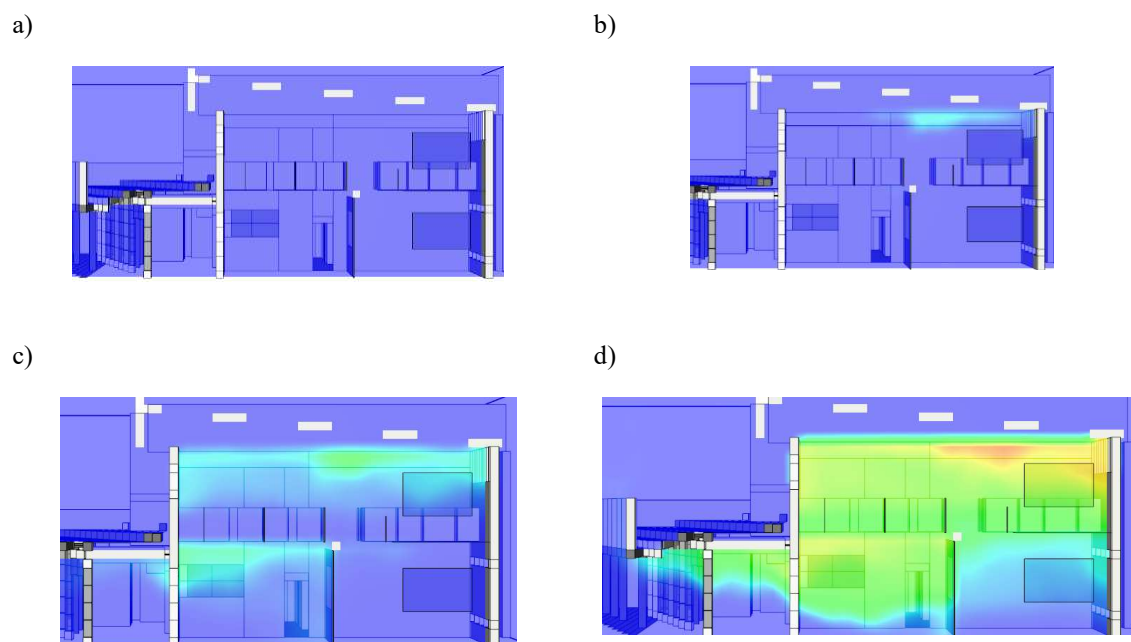
Fonte: Adaptado de *Thunderhead Engineering* (2023).

Figura 48 – Concentração de gás CO na seção transversal aos 26 m. a) Aos 30 segundos de simulação. b) 60 s. c) 120 s. d) 300 s.



Fonte: Adaptado de *Thunderhead Engineering* (2023).

Figura 49 – Concentração de gás CO na seção transversal aos 37 m. a) Aos 30 segundos de simulação. b) 60 s. c) 120 s. d) 300 s.



Fonte: Adaptado de *Thunderhead Engineering* (2023).

Conforme as figuras e dados coletados sobre a simulação do incêndio, como o incêndio não foi de grandes proporções e por ser um prédio que não possui uma metragem muito elevada, a propagação de fumaça, temperatura, visibilidade e concentração de CO não chegaria a inviabilizar a possível saída de ocupantes do prédio.

#### 4.3 ANÁLISE DO PROCESSO DE EVACUAÇÃO

A simulação da evacuação foi realizada com auxílio do Pathfinder, usando diferentes cenários que foram propostos, considerando a evacuação em situação normal e em situação de incêndio. Para considerar a situação mais desfavorável, o número de ocupantes inseridos na simulação foi o total previsto na Resolução Técnica CBMRS Nº 11 – Parte 1/2016, de 340 ocupantes, sendo eles distribuídos nas salas de maneira aleatória de acordo com a ocupação de cada sala. A velocidade de caminhada dos ocupantes foi de 1,19 m/s.

Os cenários propostos foram três, sendo o cenário 1 em situação normal considerando as 4 saídas abertas, o cenário 2 com situação de incêndio e a porta 1 e escada próxima a ela intransitáveis devido ao incêndio e as portas 2, 3 e 4 sendo usadas para abandono do prédio. E

por fim, o cenário 3 no qual foi considerado o incêndio, e a saída 1 estava inacessível pelo incêndio assim como a escada próxima e ela e também a saída 2 estava fechada, e somente as saídas 3 e 4 estariam abertas, que são as saídas localizadas após a porta que possui o dispositivo anti-furto.

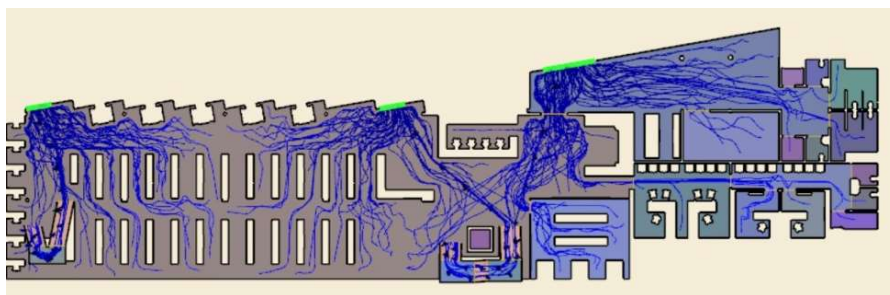
#### 4.3.1 Evacuação no cenário 1

Considerando os cenários propostos e a evacuação em situação normal, ao ser realizada a simulação da evacuação dos ocupantes com as 4 saídas estavam disponíveis, o tempo para que todos os ocupantes saíssem sob os modos *Steering* e SFPE foi de 94,8s e 88,8s, respectivamente

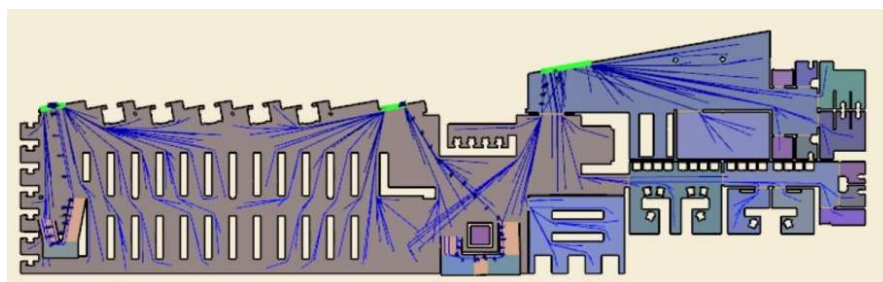
A Figura 50 ilustra a evacuação dos ocupantes no cenário 1 em ambos os modos de evacuação.

Figura 50 – Evacuação dos ocupantes em situação normal no cenário 1 aos 30 s. a) Modo *Steering*. b) Modo SFPE.

a)



b)



Fonte: Adaptado de *Thunderhead Engineering* (2023).

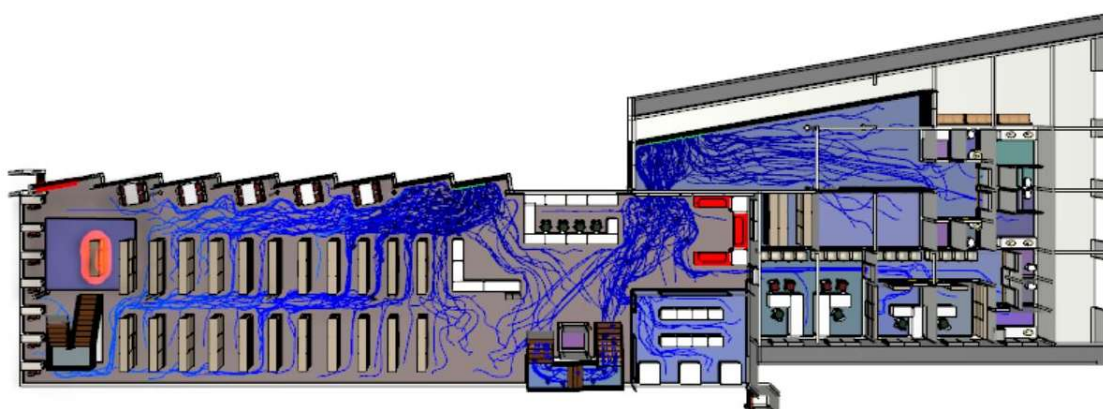
### 4.3.2 Evacuação no cenário 2

Neste cenário foi considerado que estava ocorrendo o incêndio durante a simulação da evacuação no cenário proposto, e que devido ao incêndio ocorrer na prateleira próxima a porta 1 e escada, que ambos estariam inacessíveis para os ocupantes, então estavam disponíveis somente as saídas 2, 3 e 4 e que os ocupantes iriam poder utilizar somente a escada próxima a saída 2 para que pudessem descer do segundo pavimento. Ao ser realizada a simulação da evacuação dos ocupantes no cenário 2 (3 saídas disponíveis), o tempo para que todos os ocupantes saíssem sob o modo *Steering* e SFPE foi de 135s e 139,3s, respectivamente.

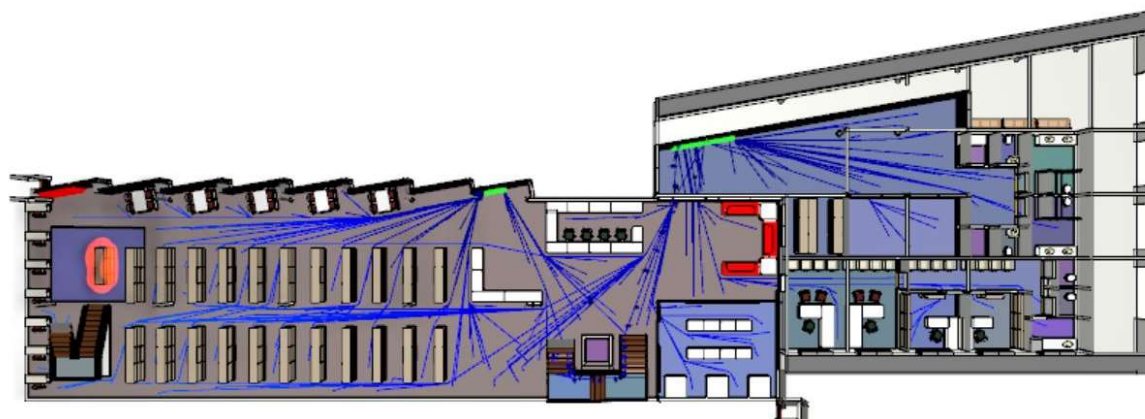
A Figura 51 ilustra a evacuação dos ocupantes no cenário 2 em ambos os modos de evacuação.

Figura 51 – Evacuação dos ocupantes no cenário 2 em situação de incêndio aos 30 s. a) Modo *Steering*. b) Modo SFPE.

a)



b)



Fonte: Adaptado de *Thunderhead Engineering* (2023).

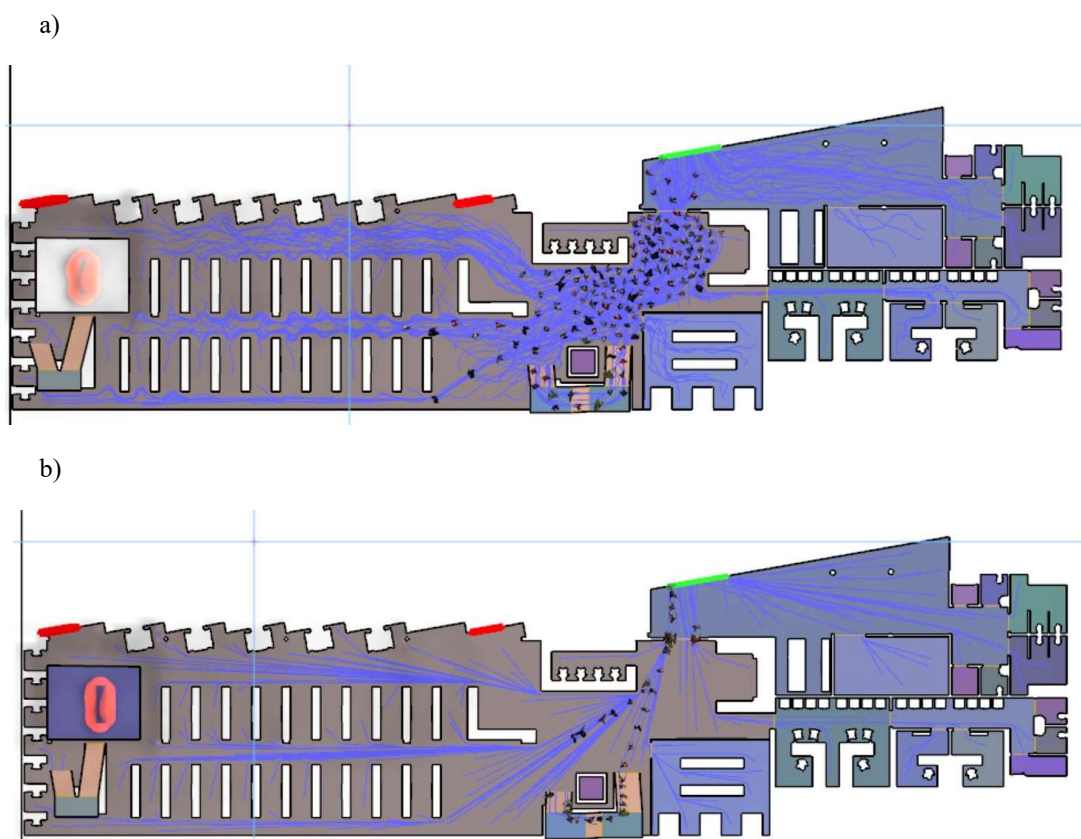
### 4.3.3 Evacuação no cenário 3

Foi considerado que estava ocorrendo o incêndio durante a simulação no cenário proposto, e assim como no cenário 2, devido ao incêndio ocorrer na prateleira próxima a porta 1 e escada, que ambas estariam inacessíveis para os ocupantes, e que também como a porta 1 e 2 são portas de emergência e ficam no acervo da biblioteca, que por desinformação de algum funcionário ou mesmo por alguma razão as saídas 1 e 2 estariam inacessíveis.

Então neste cenário seria possível sair do prédio somente pelas portas 3 e 4 e os ocupantes que estivessem no segundo pavimento poderiam acessar o térreo somente pela escada próxima a saída 2. Ao ser realizada a simulação da evacuação dos ocupantes no cenário 3, o tempo para que todos os ocupantes saíssem sob o modo *Steering* e SFPE foi de 147,3s e 154,5s, respectivamente. Neste cenário foi considerada a pior situação possível deste estudo, onde somente duas saídas e uma escada estavam disponíveis.

A Figura 52 ilustra a evacuação dos ocupantes no cenário 3 em ambos os modos de evacuação.

Figura 52 – Evacuação no cenário 3 em situação de incêndio aos 30 s. a) Modo *Steering*. b) Modo SFPE.



Fonte: Adaptado de Thunderhead Engineering (2023).

Os tempos de todas as simulações para os 3 cenários são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Tempo de evacuação em segundos dos cenários propostos.

Cenários	<i>Steering</i>	SFPE
Cenário 1	94,8	88,8
Cenário 2	135,0	139,3
Cenário 3	147,3	154,5

Fonte: Autoria própria.

Houve um acréscimo de 52,5% no tempo de evacuação ao ser usado o modo *Steering* quando comparados os cenários 1 e 3, sendo que no cenário 3 as saídas têm 3,6m de largura (1,80m cada), o que ainda seria aceitável pela resolução, visto que o mínimo previsto seria de 2,2 m (4 unidades de passagem). Já usando o modo SFPE houve um acréscimo de 73,98% no tempo total de evacuação dos ocupantes.

Foi possível visualizar na Figura 50, 51 e 52 o congestionamento de pessoas junto a porta que possui o dispositivo anti-furto principalmente nas simulações realizadas no modo *Steering*, sendo que o congestionamento foi mais intenso no cenário 3. E foi visualizado que os ocupantes se deslocam em fila para chegarem nas portas nas simulações realizadas no modo SFPE.

Conforme destacado por Uliana (2022), foi possível visualizar que no modo SFPE, o movimento dos ocupantes foi determinado com base nos cálculos do fluxo de saída, sendo o modelo que se aproxima dos conceitos das normas prescritivas. E no modo *Steering*, o movimento dos ocupantes foi baseado na combinação de mecanismos de direção e tratamento de colisão, visando analisar como os agentes realizam seus objetivos e respondem a um ambiente em transformação, evitando possíveis colisões, sendo este o modo que mais se aproxima ao comportamento humano.

No estudo de Xu e Peng (2020), o tempo de evacuação em situação de incêndio foi maior que em situação sem fogo devido a uma das saídas do andar ter ficado intransitável, ocasionando um tempo maior para que os ocupantes pudessem evacuar. Situação semelhante ocorreu nesta pesquisa, visto que devido à localização do foco do incêndio a saída 1 foi considerada inacessível pelos ocupantes, assim como a escada próxima a ela, então os tempos em situação de incêndio em comparação as simulações em situação normal foram maiores.

#### 4.4 TAXA DE FLUXO E FLUXO ESPECÍFICO NAS PORTAS DE SAÍDAS

De acordo com Martins, Cajaty e Braga (2019), considerando que para locais de reunião de público, que é a mesma ocupação da edificação usada nesta pesquisa, a capacidade de uma unidade de passagem (0,55 m) para portas e acessos é 100 pessoas por minuto, tem-se um fluxo específico de 3,03 pessoas/m.s, à luz da NBR 9077 (ABNT, 2001) e da Resolução Técnica CBMRS Nº 11 – Parte 1/2016.

Com o auxílio do *software* Pathfinder , considerando os cenários propostos, sendo o total de 340 ocupantes considerados nas simulações, com o auxílio do *software* Pathfinder, foram gerados gráficos e foi possível visualizar o total de ocupantes que evacuaram a edificação usando cada uma das saídas, ou seja, foi possível ver qual saída foi mais usada para cada cenário de simulação em ambos os modos do programa, bem como, foi possível medir as taxas de fluxo e fluxo específico dos cenários e modos usados.

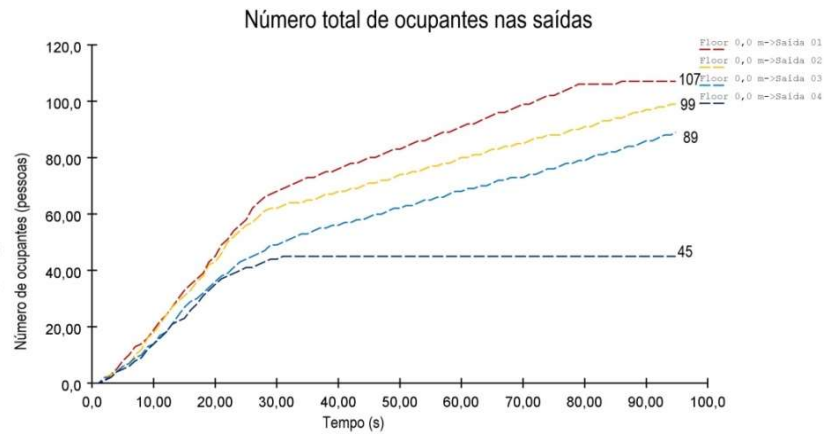
##### 4.4.1 Cenário 1

No cenário 1, Figura 53, no modo *Steering* a saída mais usada foi a saída 1 (107 ocupantes), seguidos da saída 2 (99 ocupantes), saída 3 (89 ocupantes) e saída 4 (45 ocupantes). Já no modo SFPE, a saída mais usada foi a saída 2 (122 ocupantes), seguidos da saída 1 (118 ocupantes), saída 3 (63 ocupantes) e saída 4 (37 ocupantes). Calculando as taxas de fluxo, no modo *Steering*, a saída 1 teve a taxa de fluxo e de fluxo específico máximas de 2,66 pessoas/s e 1,48 pessoas/m.s, respectivamente, ambas no tempo de 24,44 s. No modo SFPE, Figura 54, as saídas 2 e 3 tiveram a taxa de fluxo e fluxo específico máxima que ocorreram no tempo 24,94 s e 25,93 s com o valor de 2,66 pessoas/s e 1,48 pessoas/m.s, respectivamente.

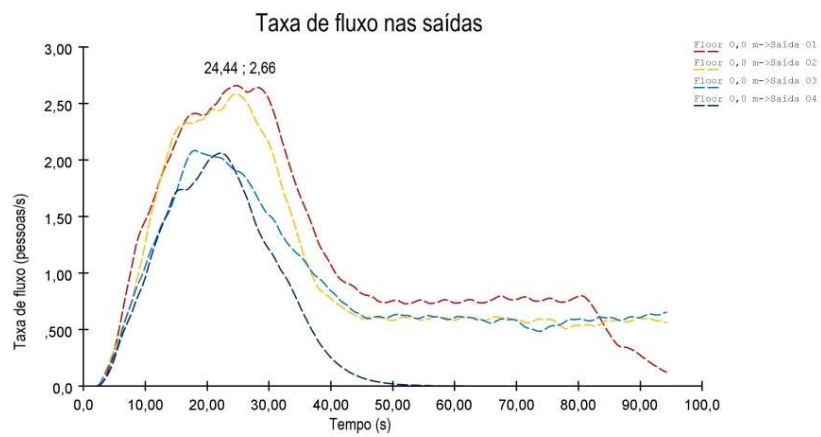


Figura 53 - Modo *Steering*. a) Número de ocupantes nas saídas. b) Taxa de fluxo. c) Fluxo específico.

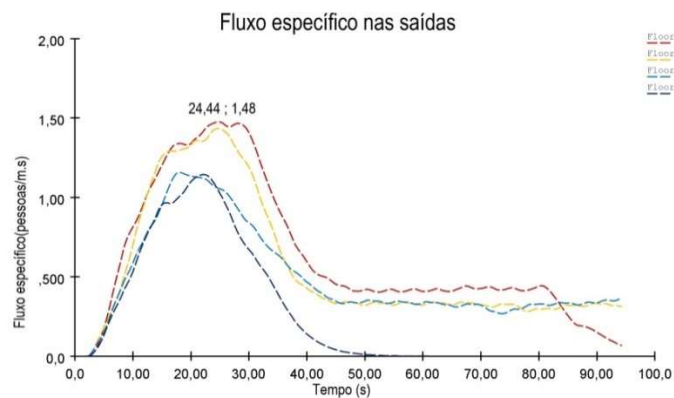
a)



b)



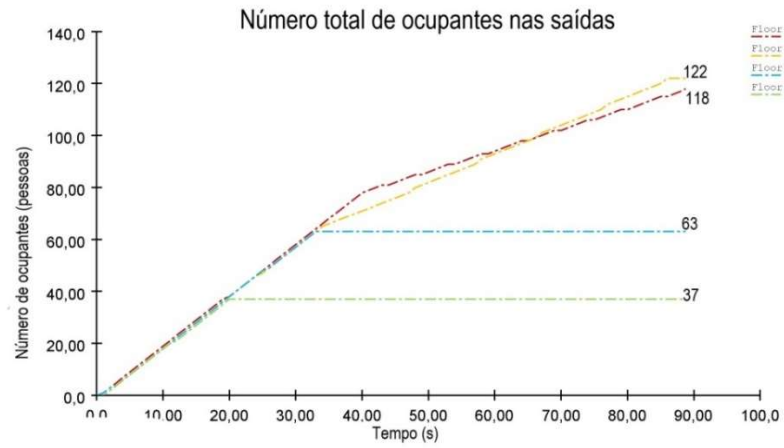
c)



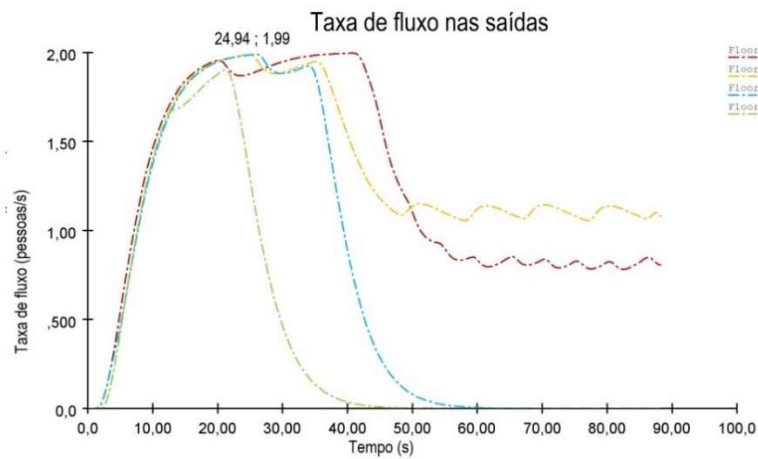
Fonte: Adaptado de *Thunderhead Engineering* (2023).

Figura 54 - Cenário 1 – Modo SFPE. a) Número de ocupantes nas saídas. b) Taxa de fluxo. c) Fluxo específico.

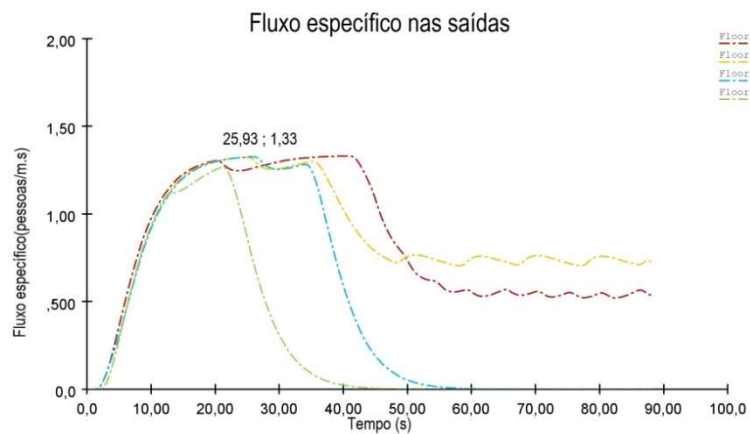
a)



b)



c)



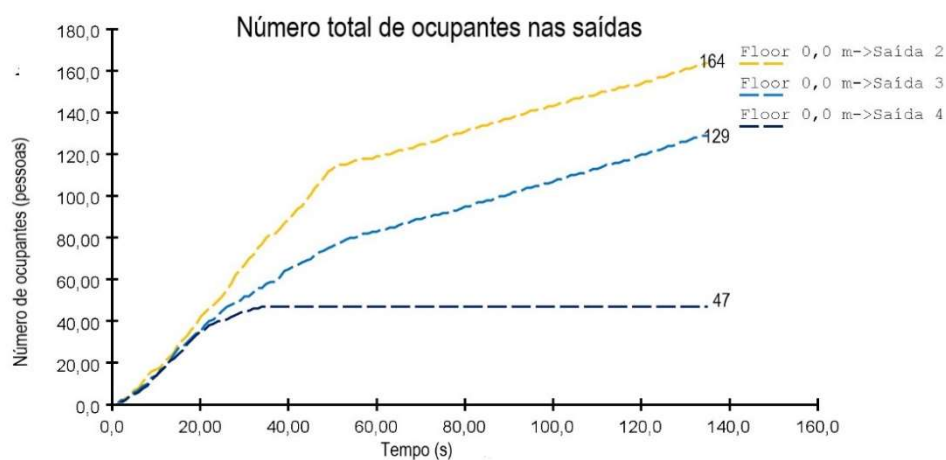
Fonte: Adaptado de *Thunderhead Engineering* (2023).

#### 4.4.2 Cenário 2

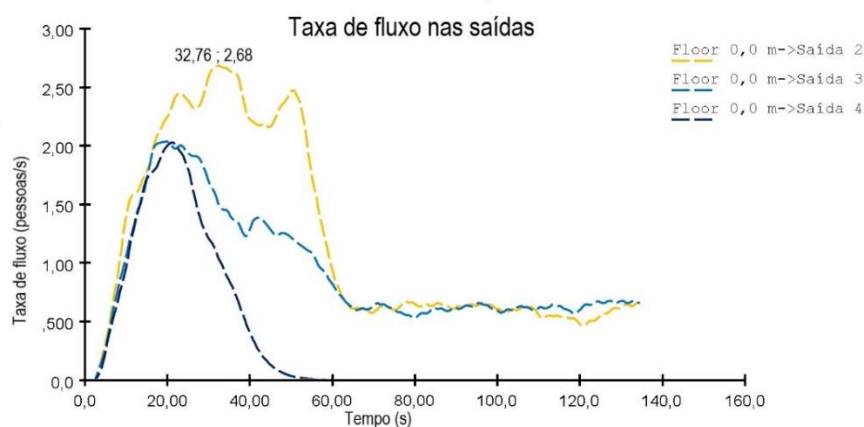
No cenário 2, Figura 55, no modo *Steering* a saída mais usada foi a saída 2 (164 ocupantes), seguidos da saída 3 (129 ocupantes) e saída 4 (47 ocupantes). No modo SFPE, Figura 56, a saída mais usada também foi a saída 2 (199 ocupantes), seguidos da saída 3 (103 ocupantes) e saída 4 (38 ocupantes). Calculando as taxas de fluxo, no modo *Steering*, a saída 2 teve a taxa de fluxo e de fluxo específico máximas de 2,68 pessoas/s e 1,49 pessoas/m.s, respectivamente, no tempo de 32,76 s e 31,77s, respectivamente. No modo SFPE as saídas 2 e 3 tiveram a taxa de fluxo e fluxo específico máxima que ocorreram no tempo 24,87s com o valor de 1,99 pessoas/s e 1,33 pessoas/m.s, respectivamente.

Figura 55 - Cenário 2 – Modo *Steering*. a) Número de ocupantes nas saídas. b) Taxa de fluxo. c) Fluxo específico.

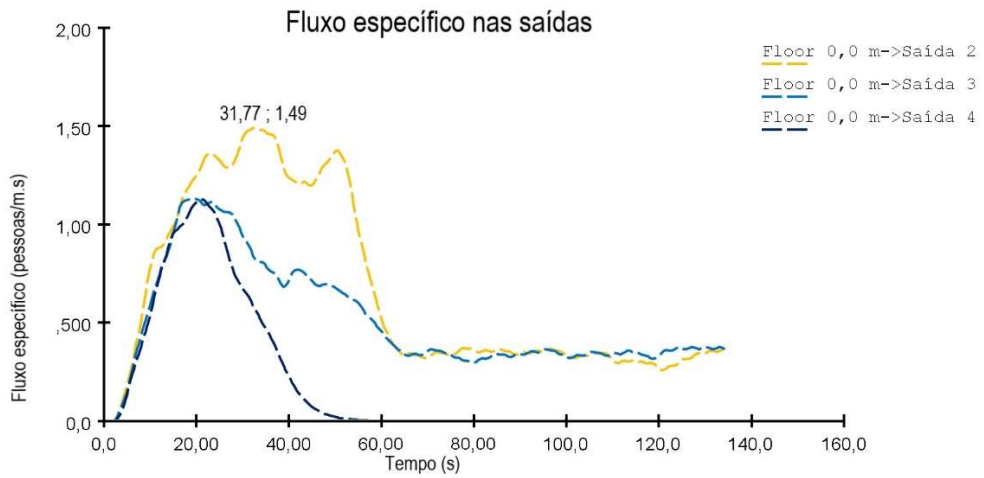
a)



b)



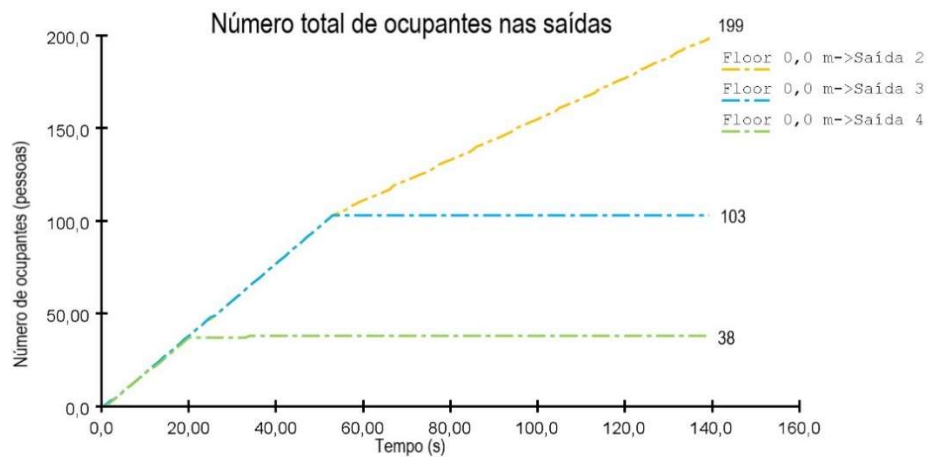
c)



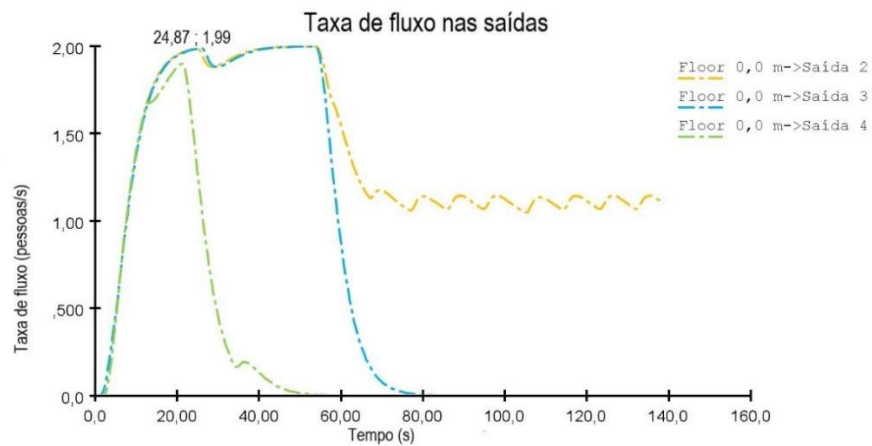
Fonte: Adaptado de *Thunderhead Engineering* (2023).

Figura 56 - Cenário 2 – Modo SFPE. a) Número de ocupantes nas saídas. b) Taxa de fluxo. c) Fluxo específico.

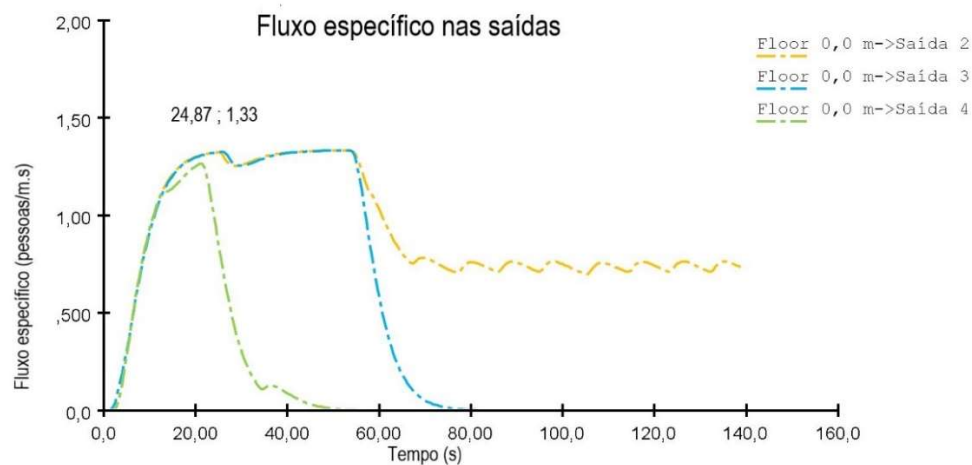
a)



b)



c)



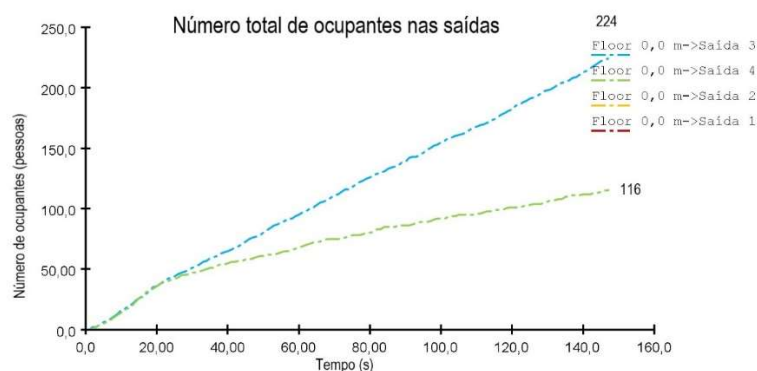
Fonte: Adaptado de *Thunderhead Engineering* (2023).

#### 4.4.3 Cenário 3

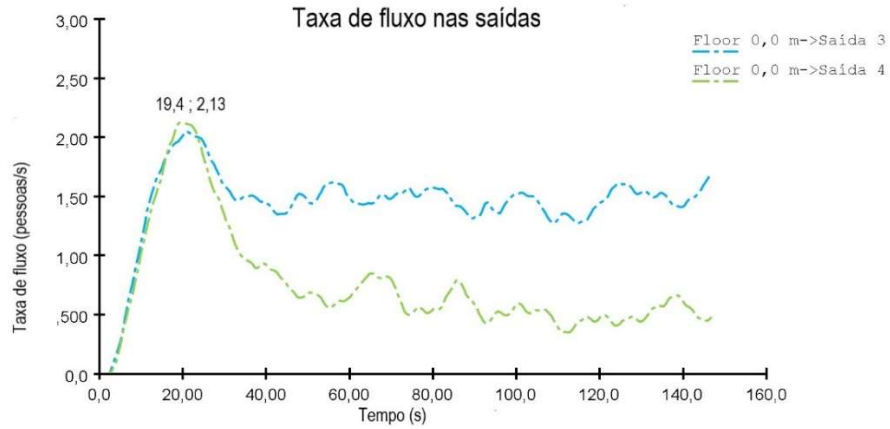
No cenário 3, Figura 57, no modo *Steering* a saída mais usada foi a saída 3 (224 ocupantes) seguidos da saída 4 (116 ocupantes). No modo SFPE, Figura 58, a saída mais usada foi a saída 3 (302 ocupantes) seguidos da saída 4 (38 ocupantes). Calculando as taxas de fluxo, no modo *Steering*, a saída 4 teve a taxa de fluxo e de fluxo específico máximas de 2,13 pessoas/s e 1,18 pessoas/m.s, respectivamente, no tempo de 19,4s e 18,91s, respectivamente. No modo SFPE, a saída 3 teve a taxa de fluxo e fluxo específico máxima que ocorreram no tempo 25,92 s e 25,42s com o valor de 1,99 pessoas/s e 1,33 pessoas/m.s, respectivamente.

Figura 57 - Cenário 3 – Modo *Steering*. a) Número de ocupantes nas saídas. b) Taxa de fluxo. c) Fluxo específico.

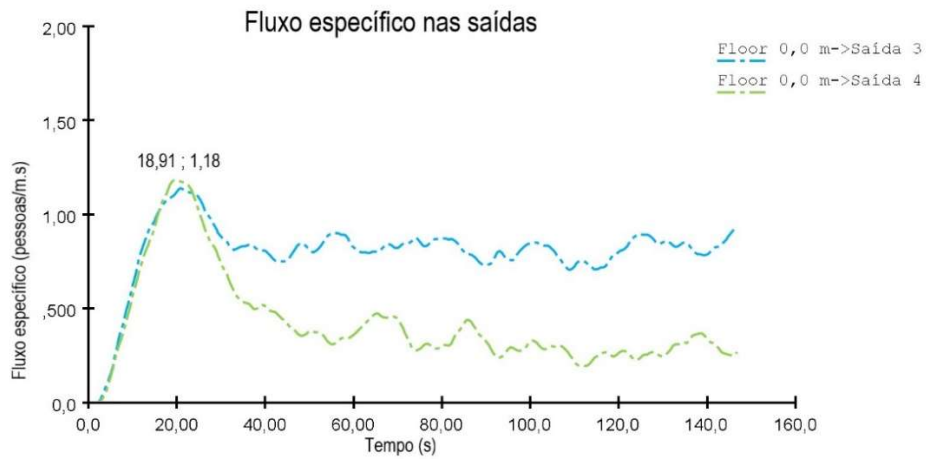
a)



b)



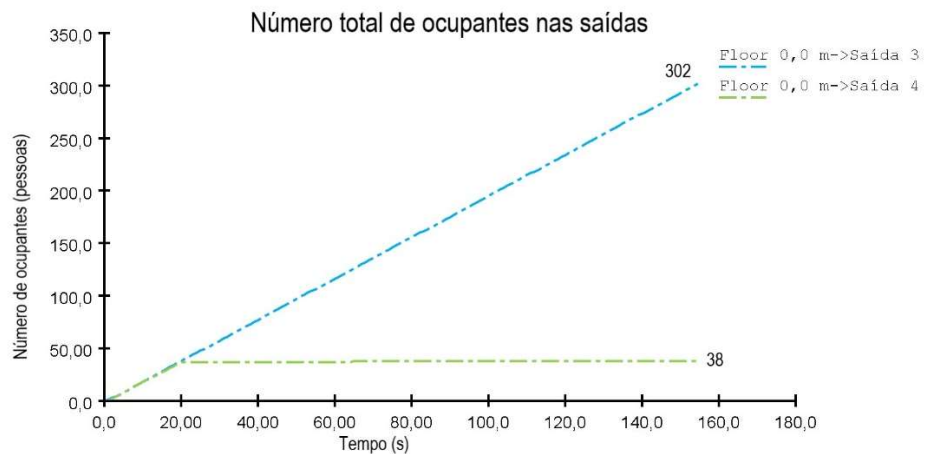
c)



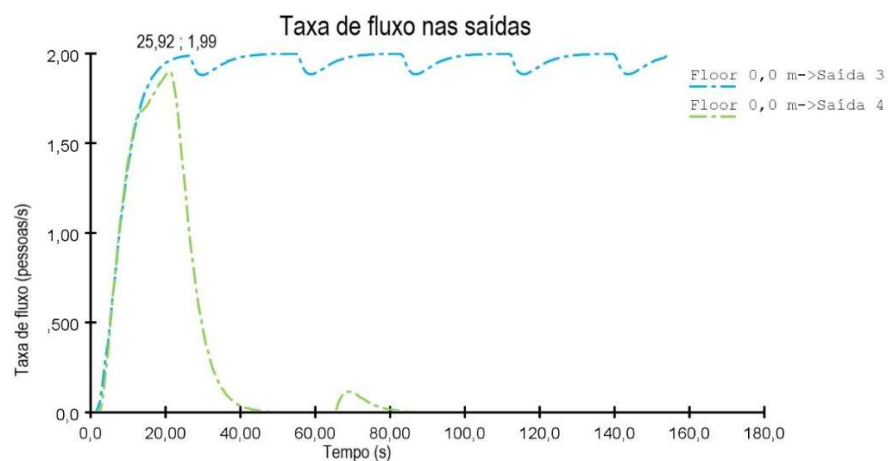
Fonte: Adaptado de *Thunderhead Engineering* (2023).

Figura 58 - Cenário 3 – Modo SFPE. a) Número de ocupantes nas saídas. b) Taxa de fluxo. c) Fluxo específico.

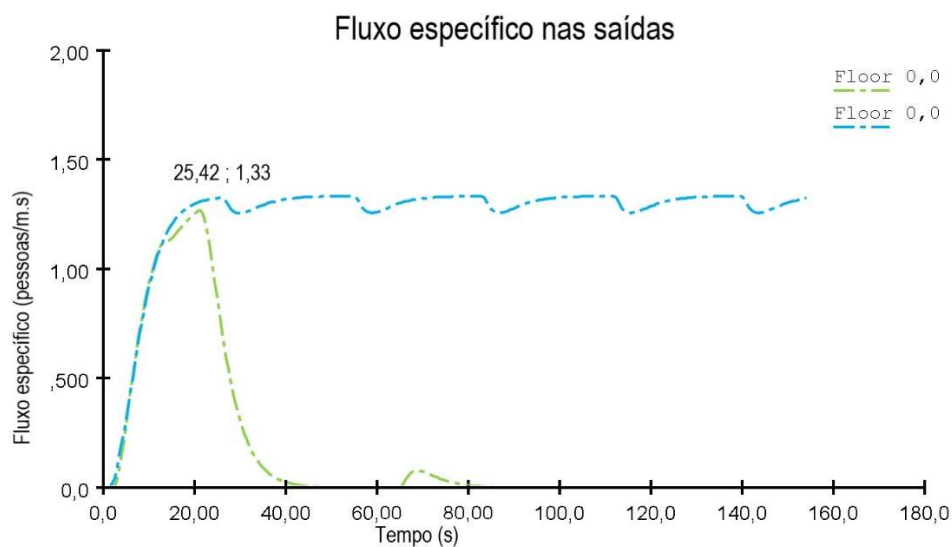
a)



b)



c)



Fonte: Adaptado de *Thunderhead Engineering* (2023).

Foram elaboradas as Tabelas 6 e 7 onde constam os valores das taxas de fluxo e de fluxo específico para os cenários testados no modo *Steering* e SFPE, respectivamente.

Tabela 6 – Valores das taxas de fluxo e de fluxo específico máximos para as simulações no modo *Steering*.

Cenários	Taxa de fluxo (pessoas/s)	Fluxo específico (pessoas/m.s)
Cenário 1	2,66	1,48
Cenário 2	2,68	1,49
Cenário 3	2,13	1,18

Fonte: Autoria própria.

Tabela 7 – Valores das taxas de fluxo e de fluxo específico máximos para as simulações no modo SFPE.

Cenários	Taxa de fluxo (pessoas/s)	Fluxo específico (pessoas/m.s)
Cenário 1	1,99	1,33
Cenário 2	1,99	1,33
Cenário 3	1,99	1,33

Fonte: Autoria própria.

Conforme pode ser verificado na Tabela 6, no modo *Steering*, os cenários 1 e 2 apresentaram valores bem semelhantes para as taxas de fluxo e de fluxo específico. Na Tabela 7 foi possível verificar que no modo SPFE as taxas de fluxo e de fluxo específico não variaram, nos 3 cenários. Em nenhum dos modos, o fluxo específico ficou próximo do valor previsto em norma para a ocupação de reunião de público que é de 3,03 pessoas/m.s.



## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os objetivos deste estudo convergem para verificar a influência da propagação do incêndio na evacuação das pessoas de uma edificação cuja ocupação é uma biblioteca usando, para tornar mais eficiente a modelagem, a importação de um arquivo BIM. De maneira geral os objetivos propostos na pesquisa foram atendidos.

A análise das larguras de passagem das saídas disponíveis na edificação revelou que elas excedem significativamente os requisitos estabelecidos pela Resolução Técnica CBMRS N.º 11, Parte 01/2016, o que facilita a evacuação dos ocupantes em situação de emergência. Conforme pôde ser visualizado nas simulações, os ocupantes poderiam sair da edificação em segurança, já que as larguras de passagem das 4 saídas disponíveis da edificação somam 7,20 m, ou seja, 13 unidades de passagem, sendo este número bem superior às 4 unidades de passagem requeridas pela resolução.

Com relação à simulação de incêndio usando o software Pyrosim, considerando a dinâmica de propagação da fumaça, aumento da temperatura, diminuição da visibilidade e concentração de CO, o parâmetro que mais se aproximou do limite de tolerância foi a concentração de CO, visto que aos 120s já tinha alcançado um limite crítico, dependendo do tempo de exposição dos ocupantes, conforme o Quadro 1.

Frente aos três cenários simulados no estudo, usando o *software* Pathfinder, obtiveram-se os resultados quanto ao tempo de evacuação para a edificação no cenário 1 em situação normal, sendo que neste todas as saídas e escadas estavam disponíveis, sendo o cenário mais favorável. Nos cenários 2 e 3, estava ocorrendo o incêndio, sendo que no cenário 2 podiam ser usadas somente uma das escadas e 3 portas, e no cenário 3 podia ser usada somente uma escada e 2 portas, sendo este o cenário mais desfavorável. Em situação normal, cenário 1, usando o modo SFPE, teve o menor tempo de evacuação que foi 88,8s e o cenário 3, também sob o mesmo modo, porém em situação de incêndio, teve o maior tempo de evacuação que foi 154,5 s.

Aos 60s de simulação de incêndio, verificou-se que a propagação da fumaça estava mais intensa próxima a saída 1 e escada próxima a ela, por ser mais próxima ao foco do incêndio e já alcançou o segundo pavimento da edificação através da área do mezanino. Por isso, nos cenários 2 e 3 propostos a saída 1 e escada próximo e ela não estavam acessíveis para os ocupantes.

Foi possível visualizar o congestionamento dos ocupantes junto a porta que possui o dispositivo anti-furto, principalmente nas simulações realizadas no modo *Steering*, que são mais parecidas com o que acontece na realidade, diferentemente do modo SFPE que se assemelha mais às normas, sendo o congestionamento mais intenso no cenário 3.

Os tempos de alarme e tempos de resposta não foram considerados no estudo, devido as simplificações feitas e falta de dados que embasassem o uso de tais informações. Nesse sentido cabe salientar a importância da realização de treinamentos e da atuação da brigada de incêndio, a fim de evitar que os ocupantes percam tempo quando da ocorrência de emergências e quando tal fato acontece reajam o mais breve possível, fazendo a evacuação da edificação.

Foram gerados gráficos onde foram calculados o número total de ocupantes em cada saída, bem como a taxa e fluxo e o fluxo específico em ambos os modos simulados, para os 3 cenários. Os valores das taxas de fluxo e de fluxo específico para os cenários testados no modo SFPE, tanto para a situação normal quanto de incêndio, apresentaram os mesmos valores. Os valores de fluxo específico tanto no modo *Steering* como no modo SFPE não alcançaram o valor previsto em norma para a ocupação de reunião de público que é de 3,03 pessoas / m.s, tendo alcançado o fluxo específico máximo no cenário 2 de 1,49 pessoas/m.s.

Diante dos resultados obtidos, foi possível concluir que por meio da combinação da tecnologia BIM aliada aos softwares Pyrosim e Pathfinder, proporciona uma compreensão mais detalhada da influência do incêndio na evacuação da edificação e pode permitir a identificação de possíveis melhorias e otimizações no processo ainda em fase de projeto, possibilitando a elaboração de projetos que não só estejam conforme as normas, mas que sejam eficientes e seguros. O uso da modelagem BIM se mostrou vantajosa, uma vez que ao importar o modelo para os softwares de simulação agilizou o processo e o tornou mais eficiente.

## 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Frente às lacunas encontradas durante a elaboração desta pesquisa, seguem algumas sugestões para estudos futuros:

- Realização da simulação real de evacuação do prédio da biblioteca, para comparar com os resultados alcançados nas simulações computacionais com o programa Pathfinder;

- Elaboração de um banco de dados de velocidades das pessoas em diferentes situações de evacuação;
- Estudar qual a influência do tempo de resposta das pessoas após receberem instruções relativas à situação perigosa, visto que esse tempo varia e influi nos resultados obtidos nas pesquisas;
- Incluir no estudo pessoas com mobilidade reduzida e pessoas em cadeira de rodas para que seja possível visualizar qual a influência destes nos tempos de evacuação;
- Utilizar outras edificações com diferentes ocupações para estudar a propagação do incêndio e evacuação para que projetos mais seguros e eficientes sejam elaborados;
- Utilizar outros *softwares* disponíveis e comparar com os softwares usados nesta pesquisa para verificar se os resultados convergem e através de simulações reais verificar se estão condizentes com a realidade.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9077**: Saídas de emergência em edifícios. Rio de Janeiro, 2001.

AHMED, S.; MEHMOOD, S.; KRISTENSEN, A. S. Critical analysis of computer-based evacuation simulation of an educational institution. **ACM International Conference Proceeding Series**, p. 26–30, 2019.

ALVES, A. B. C. G.; CAMPOS, A. T.; BRAGA, G. C. B. Simulação Computacional de Incêndio Aplicada ao Projeto de Arquitetura. **Seminário Internacional Nutau**, n. 1, p. 1–8, 2008.

BRAGA, L. L. Simulação computacional de incêndios Estudo de fachadas com diferentes propriedades geométricas. Graduação (Engenharia Civil), Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, p.38, 2019.

CHEN, X. S.; LIU, C. C.; WU, I. C. A BIM-based visualization and warning system for fire rescue. **Advanced Engineering Informatics**, v. 37, n. April, p. 42–53, 2018.

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO RIO GRANDE DO SUL. Estatísticas operacionais. Rio Grande do Sul, 2022. Disponível em <https://www.bombeiros.rs.gov.br/estatisticas-operacionais>. Acessado em 24 de fevereiro 2023.

\_\_\_\_\_. Resolução Técnica CBMRS N.º 11, Parte 01/2016: Saídas de Emergência. Rio Grande do Sul, 2016. Disponível em <https://admin.bombeiros.rs.gov.br/upload/arquivos/201706/01155612-rtcbmrs-n-11-parte-01-2016-saidas-de-emergencia-versao-corrigida.pdf> Acessado em 21 abr 2022.

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DE SÃO PAULO. Instrução Técnica Nº. 10: Controle de materiais de acabamento e de revestimento. São Paulo, 2019. Disponível em <https://www.bombeiros.rs.gov.br/upload/arquivos/202203/09142048-it-10-19.pdf> Acessado em 21 abr 2022.

\_\_\_\_\_ Instrução Técnica Nº. 11: Saídas de emergência. São Paulo, 2019. Disponível em [http://www.ccb.policiamilitar.sp.gov.br/dsci\\_publicacoes2/\\_lib/file/doc/IT-11-19.pdf](http://www.ccb.policiamilitar.sp.gov.br/dsci_publicacoes2/_lib/file/doc/IT-11-19.pdf) Acessado em 21 abr 2022.

CUESTA, A. et al. School egress data: comparing the configuration and validation of five egress modelling tools. **Fire and Materials**, v. 41, n. 5, p. 535–554, 2017.

GOUVEIA, A. M. C. DE; ETRUSCO, P. Tempo de escape em edificações: os desafios do modelamento de incêndio no Brasil. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 55, n. 4, p. 257–261, 2002.

HU, J. W.; CHEN, S. S. Analysis of security evacuation simulation and optimization of a university library. **Procedia Engineering**, v. 71, p. 558–566, 2014.

INSTITUO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA FARROUPILHA. Licitações. Disponível em [http://w2.iffarroupilha.edu.br/site/midias/arquivos/2014829163526102arquitetonico\\_biblioteca-model.pdf](http://w2.iffarroupilha.edu.br/site/midias/arquivos/2014829163526102arquitetonico_biblioteca-model.pdf) Acessado em 22 jun 2022.

LESNIAK, A.; MONIKA, G.; SKRZYPCZAK, I. Barriers to BIM Implementation in Architecture , Construction ,. **Mdpi**, 2021.

LI, M. X. et al. Research on Fire Safety Evacuation in a University Library in Nanjing. **Procedia Engineering**, v. 211, p. 372–378, 2018.

LIA, Z. et al. Machine Translated by Google Automação na Construção impactos do fogo  
Machine Translated by Google. v. c, 2020.

LIU, Z.; GU, X.; HONG, R. Fire Protection and Evacuation Analysis in Underground  
Interchange Tunnels by Integrating BIM and Numerical Simulation. **Fire**, v. 6, n. 4, 1 abr.  
2023.

LONG, X.; ZHANG, X.; LOU, B. Numerical simulation of dormitory building fire and  
personnel escape based on Pyrosim and Pathfinder. **Journal of the Chinese Institute of  
Engineers, Transactions of the Chinese Institute of Engineers, Series A**, v. 40, n. 3, p.  
257–266, 2017.

LUZ V. H. **Simulação computacional de incêndio em um depósito: análise das principais  
variáveis que influenciam no comportamento do incêndio**. 2017. Trabalho de diplomação  
para obtenção do título de engenheiro civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul,  
Porto Alegre, RS

MARTINS, D. D. S.; CAJATY, G.; BRAGA, B. Modelagem computacional da dinâmica de  
evacuação em locais de reunião de público. p. 147–164, 2019.

MIGUEL, H.; COSTA, S. Análise de estratégias de evacuação num hotel de 4 estrelas usando  
simulação. Porto, 2021. 146f. Dissertação (Mestrado em Engenharia electrotécnica e de  
computadores) – Departamento de Engenharia Eletrotécnica, Instituto Superior de Engenharia  
do Porto, Portugal, 2021.

PALMIERE, S. E.; RIASCOS, C. E. M.; RIASCOS, L. A. M. Integration of energy and fire  
prevention systems in greenbuildings. **IEEE International Symposium on Industrial  
Electronics**, v. 2015- Septe, p. 723–728, 2015.

RIO GRANDE DO SUL. Lei Nº. 14.376, de 26 de dezembro de 2013. Diário Oficial do Estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS. a. LXXI, n. 250, 27 dez. 2013. p. 1- 16.

SAHA, S. K. et al. Fire and evacuation modelling for a pharmaceutical cleanroom facility. **AIP Conference Proceedings**, v. 2121, n. July, 2019.

SAMAD, M. H. A.; TAIB, N.; YING, C. S. Means of escape provisions and evacuation simulation of public building in Malaysia and Singapore. **AIP Conference Proceedings**, v. 1892, 2017.

SHI, J.; REN, A.; CHEN, C. Agent-based evacuation model of large public buildings under fire conditions. **Automation in Construction**, v. 18, n. 3, p. 338–347, 2009.

SUN, Q.; TURKAN, Y. A BIM-based simulation framework for fire safety management and investigation of the critical factors affecting human evacuation performance. **Advanced Engineering Informatics**, v. 44, n. April, p. 101093, 2020.

THUNDERHEAD ENGINEERING. Thunderhead Engineering Consultants, Inc. Pathfinder. 2023. Disponível em <https://support.thunderheadeng.com/docs/pathfinder/2023-2/> Acessado em 19 abr. 2023.

THUNDERHEAD ENGINEERING. Thunderhead Engineering Consultants, Inc. Pyrosim. 2023. Disponível em . <https://support.thunderheadeng.com/docs/pyrosim/2023-2/> Acessado em 21 mar. 2023.

ULIANA, R. S. Simulação computacional de evacuação em edificação de reunião de público: O estudo de caso do centro de convenções da Universidade Federal de Santa Maria Santa Maria. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Centro de Tecnologia, Universidade

Federal de Santa Maria, Brasil, p. 149, 2022.

VALENTIN, M. V. Saídas De Emergência Em Edifícios Escolares. p. 1–362, 2008.

WAGNER, N.; AGRAWAL, V. An agent-based simulation system for concert venue crowd evacuation modeling in the presence of a fire disaster. **Expert Systems with Applications**, v. 41, n. 6, p. 2807–2815, 2014.

WEHBE, R.; SHAHROUR, I. A BIM-Based Smart System for Fire Evacuation. **Future internet**, v. 13, n. 9, p. 221, 2021.

XIAO, M. et al. Simulation and optimization of fire safety emergency evacuation in university library. **AIP Advances**, v. 11, n. 6, p. 1–8, 2021.

XU, M.; PENG, D. Pyrosim-based numerical simulation of fire safety and evacuation behaviour of college buildings. **International Journal of Safety and Security Engineering**, v. 10, n. 2, p. 293–299, 2020.

ZHANG, H. et al. **Evacuation Simulation of Large Theater Based on Pyrosim and Pathfinder**. Journal of Physics: Conference Series. **Anais...Institute of Physics**, 2022<sup>a</sup>

ZHANG, H.; LONG, H. C. Simulation of Evacuation in Crowded Places Based on BIM and Pathfinder. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 1880, n. 1, 2021.

ZHANG, N. et al. Study on Fire Smoke Distribution and Safety Evacuation of Subway Station Based on BIM. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 12, n. 24, 2022<sup>b</sup>.

ZHENG, H. et al. Evacuation in Buildings Based on BIM: Taking a Fire in a University



Library as an Example. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 19, n. 23, 1 dez. 2022.