

## Saídas de emergência em edificações existentes: verificação da eficiência das adequações conforme regulamentações vigentes através de simulação computacional

### Emergency exits in existing buildings: assessing adaptation effectiveness according to current regulations through computer simulation

*Natane Rufino Crippa(1); Fabrício Longhi Bolina(2); Ângela Gaio Graeff(3)*

1 Engenheira Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

E-mail: natanecrippa@hotmail.com | ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0838-6953>

2 PhD, Professor, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

E-mail: fabriciobolina@gmail.com | ORCID <https://orcid.org/0000-0002-0495-099X>

3 PhD, Professora, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

E-mail: angela.graeff@ufrgs.br | ORCID <https://orcid.org/0000-0001-6453-8270>

**Revista de Arquitetura IMED**, Passo Fundo, vol. 13, n. 1, p. 175-200, janeiro-junho, 2024 - ISSN 2318-1109

DOI: <https://doi.org/10.18256/2318-1109.2024.v13i1.5124>

Sistema de Avaliação: *Double Blind Review*

Como citar este artigo / How to cite item: [clique aqui/click here!](#)

## Resumo

As edificações existentes precisam ser adequadas aos novos requisitos de segurança ao incêndio praticados pelas normas vigentes, visando atender o nível de segurança mínimo prescrito aos usuários. Este trabalho avaliou, através de simulação computacional de evacuação, o caso de uma edificação com área total de 6.168 m<sup>2</sup> usada para atividades de ensino. Ela possui 10 pavimentos acima do solo e sua rota de fuga ocorre por meio de uma escada não enclausurada e uma porta no térreo, o que diverge das exigências atualmente prescritas pelas regulamentações. Após as reformas e readequações, o prédio contará com 3 novas saídas para área externa e uma escada adicional, totalizando uma nova área de 7.806 m<sup>2</sup>. De modo a verificar a eficiência dos ajustes, a análise se deu pela perspectiva do tempo de evacuação total da população do prédio admitindo a situação anterior e posterior à implementação das adequações. Na análise, considerou-se diferentes hipóteses de lotações e a existência de obstáculos. Os resultados mostraram que a readequação da edificação conforme a regulamentação em vigor reduziu em até 49,8% o tempo total de evacuação, contribuindo também para distribuição da população e redução das aglomerações, embora a possibilidade de escolha entre as rotas tenha provocado colisões entre os ocupantes. Dessa forma, este estudo auxiliou na avaliação da eficiência dos requisitos impostos pelas regulamentações vigentes no estado do Rio Grande do Sul no contexto de edificações escolares.

**Palavras-chave:** Saídas de emergência; Simulação computacional; Simulação de evacuação; Segurança contra incêndio.

## Abstract

Existing buildings must be adapted to the current fire safety standards in order to meet the minimum prescribed safety level for occupants. In this study, a building with a total area of 6,168 m<sup>2</sup> used for educational purposes was investigated. It is a 10-story building whose evacuation route is through an unenclosed staircase and a door on the first floor, which deviates from the current regulations. After the remodeling and adjustments, the building will have 3 new exits leading to the outside and an additional stairwell, resulting in a new area of 7,806 m<sup>2</sup>. To evaluate the effectiveness of these changes, the analysis focused on the total evacuation time of the building population before and after the implementation of the adjustments. The analysis considered numerous occupancy scenarios and barriers. The results showed that bringing the building into compliance with current regulations reduced the total evacuation time by up to 49.8% and also contributed to better population distribution and less congestion, although the option to choose between different routes led to collisions among occupants. Thus, this study helped evaluate the efficiency of the requirements imposed by current regulations in the state of Rio Grande do Sul in the context of school buildings.

**Keywords:** Emergency exits; Computer simulation; Evacuation simulation; Fire safety.

## 1 Introdução

Em geral, as regulamentações existentes para o dimensionamento de saídas de emergência têm como base o uso do edifício e lotação (Duarte; Ono; Bento, 2021). Para o desenvolvimento de edificações mais seguras, é essencial entender os diferentes fatores que influenciam no processo de evacuação em uma situação de emergência, que vão desde características projetadas da edificação até o comportamento das pessoas (Kuligowski, 2016). A utilização de *softwares* de simulação computacional pode contribuir para análise da segurança de edificações, permitindo uma compreensão mais abrangente do comportamento de abandono de seus usuários, bem como da dinâmica de um incêndio.

Na modelação computacional de evacuação, o comportamento humano e a geometria do edifício são fatores preponderantes. Os usuários são caracterizados pelo seu perfil de comportamento, envolvendo a definição de saídas a serem utilizadas pelos mesmos, tempo de pré-evacuação, velocidade de caminamento e características físicas de cada ocupante, dentre outros.

Ademais, prever o comportamento humano em situação de pânico é um desafio insólito pois, segundo Friberg e Hjelm (2014), as pessoas não agem todas da mesma forma nessas situações, seus comportamentos variam conforme idade, gênero, grau de educação, experiências prévias e cultura. Também são influências no comportamento o ambiente em que estão, treinamento e as informações recebidas pelas pessoas (Kuligowski, 2016).

Nesse sentido, Lei e Tai (2019) estudaram por meio de simulação computacional a influência da posição das escadas e portas de saída de emergência na evacuação de uma edificação composta por dormitórios. Os cenários simulados variaram, além da posição, a quantidade de escadas e portas, porém mantendo sempre a mesma largura total. Os autores concluíram que, apesar de o tempo de evacuação ser muito similar nos cenários com uma e duas escadas, ambos com uma porta de saída, os resultados foram melhores com duas escadas pois a taxa de fluxo se manteve mais estável. Além disso, aumentar o número de portas se mostrou favorável pois gerou menores distâncias a serem percorridas, menos aglomerações e o tempo de evacuação teve uma redução de aproximadamente 25%, sendo que no melhor dos cenários as portas se localizavam em frente às escadas.

Em se tratando de edificações de universidades, Montenegro (2016) realizou simulações de evacuação de três edifícios da UFRN com áreas entre 4 e 8 mil m<sup>2</sup>, de 3 a 5 pavimentos e população total entre 1.210 e 2.438 pessoas. Aos ocupantes foi atribuída a velocidade de 1,3 m/s e altura de 1,65 m. Dentre os cenários estudados, foi avaliada a criação de uma saída de emergência pelo último andar, a qual resultou em uma redução de 35% no tempo total de evacuação em um dos prédios, enquanto

em outros dois a redução foi de apenas 13 s e 16 s. A autora concluiu que a pouca redução no tempo ocorreu em razão das dificuldades de locomoção envolvidas, como a necessidade de as pessoas subirem escada ao invés de descer.

No caso de edifícios de elevada população, tendo em vista a dificuldade de se realizar experimentos com pessoas reais, devido aos custos, tempo, riscos, questões psicológicas e disponibilidade de participantes, entre outros, modelos de simulação passaram a ser desenvolvidos com o avanço da tecnologia. Os programas de simulação computacional permitem avaliar se uma edificação existente ou em fase de projeto garante a segurança de seus usuários através da análise da interação dos ocupantes com a edificação (Khamis *et al.*, 2020).

Sendo assim, este trabalho tem o intuito de analisar, por meio de simulação computacional, o processo de evacuação da Faculdade de Educação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), localizada na cidade de Porto Alegre, estado do Rio Grande do Sul, no Brasil. O estudo baseou-se no tempo total de evacuação e na dinâmica de movimento dos usuários da edificação, verificando, através da análise crítica dos resultados, a eficiência das alterações de *layout* requeridas pelo projeto de segurança ao incêndio conforme as regulamentações vigentes. A edificação atualmente possui 6.168 m<sup>2</sup>. Dentre estes ajustes está prevista a execução de nova escada e saídas de emergência para a área externa no térreo, que resultarão em uma área total da edificação em torno de 7.806 m<sup>2</sup>. Para tanto, realizaram-se 8 simulações de evacuação, as quais levaram em consideração os *layouts* atual e futuro da edificação, diferentes lotações e a existência de obstáculo em rota de fuga. Seus ocupantes tiveram velocidade e características físicas definidas de acordo com sexo e idade, e foram distribuídos nos pavimentos conforme determinações da Resolução Técnica nº 11 Parte 1 (CBMRS, 2016).

## 2 Método de pesquisa

### 2.1 Aspectos gerais

O estudo foi desenvolvido no prédio da FACED, o qual foi modelado no programa com sua configuração atual (L1, acrônimo de *Layout* 1) e futura (L2, acrônimo de *Layout* 2). Por se tratar de uma edificação localizada no estado do Rio Grande do Sul, a população foi calculada conforme a Resolução Técnica nº 11 Parte 1 (CBMRS, 2016) referente a saídas de emergência e inserida randomicamente nos ambientes, levando em consideração também as lotações adotadas nos cenários. Após, foram atribuídos perfis a esta população de acordo com suas características físicas e realizadas as simulações, cujos cenários são descritos no item 2.4. Os resultados foram analisados correlacionando os cenários de cada modelo da edificação e os modelos entre si.

## 2.2 Edificação

A FACED se localiza no campus centro da UFRGS, possui 10 pavimentos acima do solo com 4,08 m de pé direito cada e sua área total atualmente é de 6.168 m<sup>2</sup>. A Figura 1 apresenta a fachada da edificação em questão.

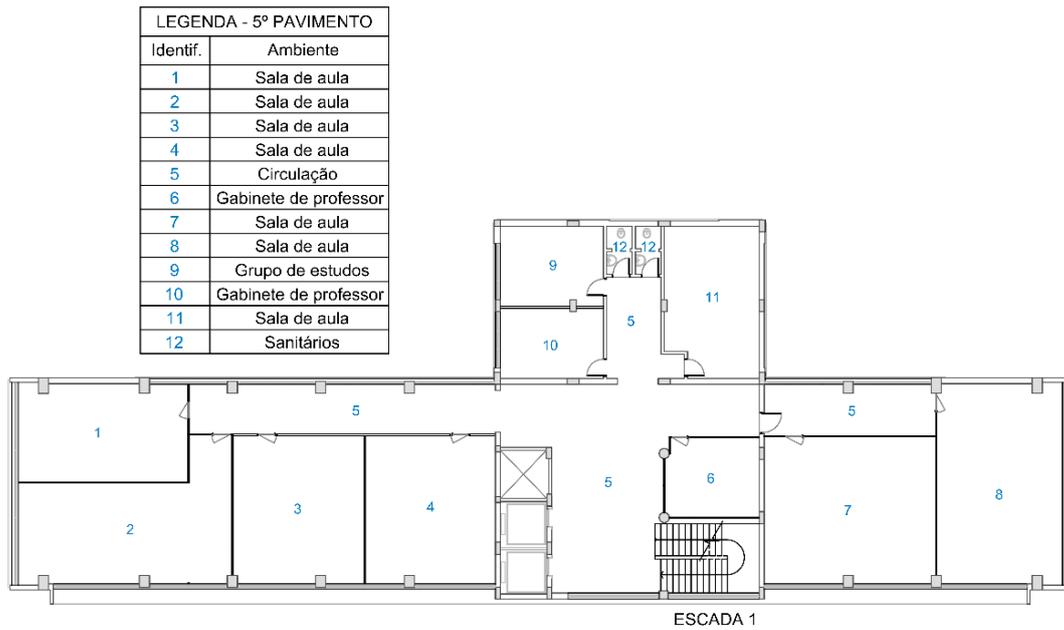
**Figura 1.** Fachada da FACED



**Fonte:** Os autores.

O prédio é composto em sua maior parte por salas de aula e gabinetes de professores e o *layout* de seus pavimentos varia: o térreo possui um auditório, laboratório, diretórios acadêmicos, brinquedoteca e áreas de apoio e técnicas; o 2º andar é ocupado pela biblioteca e salas de estudos; as salas de aula se concentram do 3º ao 6º pavimento; do 7º ao 9º há gabinetes de professores, secretarias e atividades de apoio à educação em geral; já o 10º pavimento possui uma área menor que o restante, sendo composto por áreas de manutenção, sala de informática, gabinete e núcleo de estudos. A Figura 2 apresenta o 5º pavimento da edificação atual, cujo *layout* se assemelha ao restante dos pavimentos.

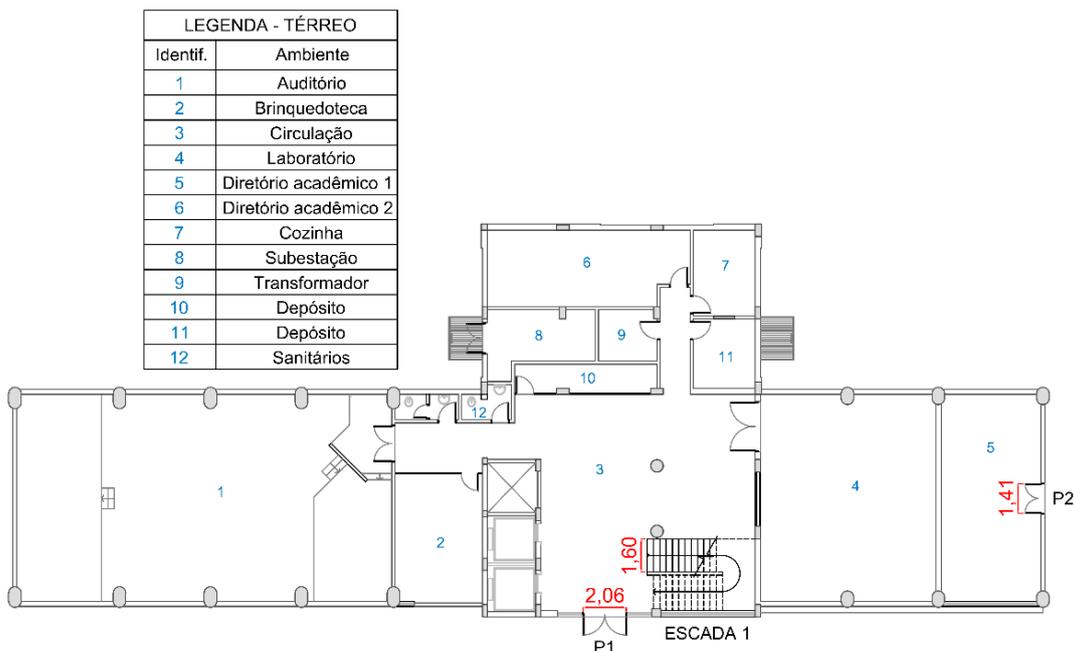
**Figura 2.** 5º pavimento da edificação atual (L1)



Fonte: Elaborado pelos autores.

A rota de fuga da edificação é por meio de uma escada não compartimentada de 1,60 m de largura (Escada 1, conforme Figura 3), e a saída de emergência final no térreo é uma porta de folha dupla com vão de dimensões 2,06x2,37 m (porta P1, conforme Figura 3). Há uma outra saída para área externa no pavimento térreo, no diretório acadêmico 1, que constitui um ambiente com acesso independente (porta P2, conforme Figura 3). A Figura 3 apresenta as saídas e escada de emergência atuais da edificação.

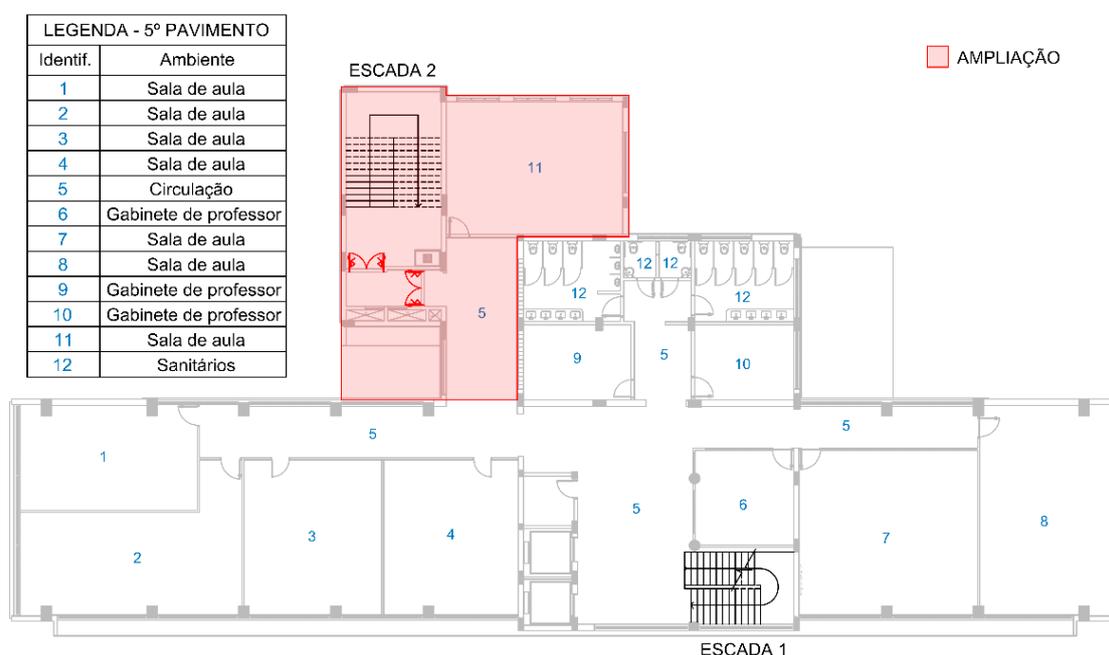
**Figura 3.** Saídas de emergência do pavimento térreo da edificação atual (L1)



Fonte: Elaborado pelos autores.

Em razão da adequação desta edificação às exigências atuais de segurança contra incêndio, estará sendo construída uma escada enclausurada (Escada 2, conforme Figura 4) adjacente à estrutura existente, a qual contará com antecâmara e área de resgate de cadeirantes. A nova circulação de acesso à escada 2 será anexada à circulação já existente nos pavimentos 2 a 7, enquanto entre os pavimentos 8 e 10 serão removidos ambientes para esta adequação. Com tais alterações de *layout* nos pavimentos, a área total da edificação passará para 7.806 m<sup>2</sup>, um aumento de 1.638 m<sup>2</sup> (26,5 %) em relação à edificação existente. As ocupações da edificação não sofrerão alteração, entretanto, com o aumento de área, a sua população máxima terá um aumento de aproximadamente 6%. A Figura 4 apresenta o 5º pavimento da edificação após a reforma, cujas modificações se assemelham com o que será executado nos demais andares.

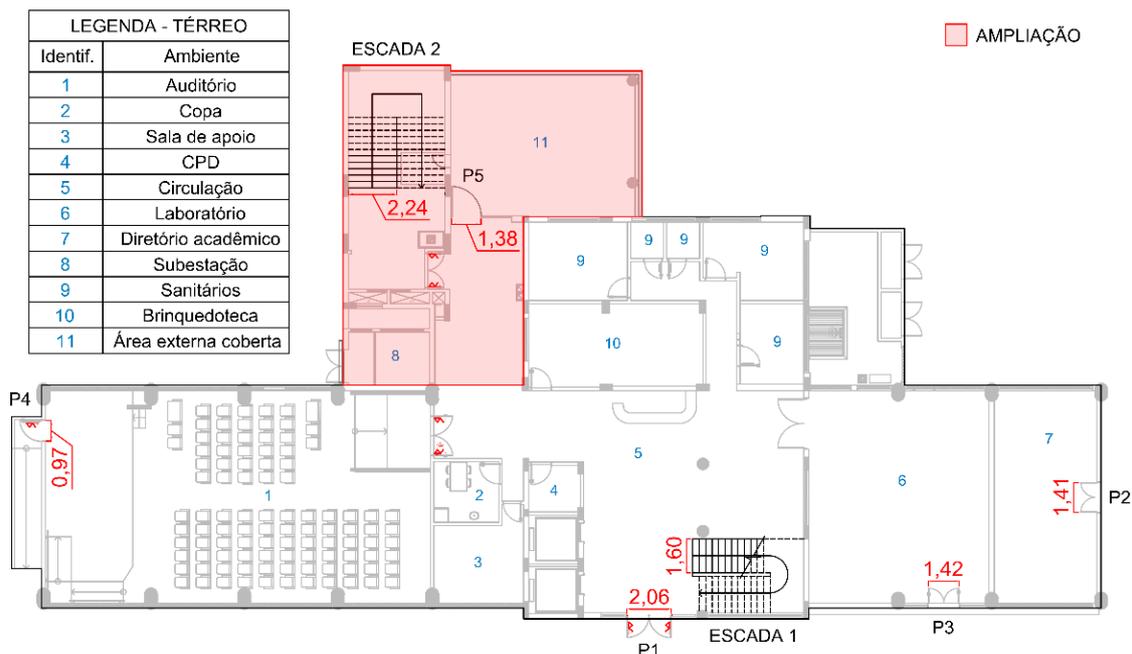
**Figura 4.** 5º pavimento da edificação após reforma (L2)



**Fonte:** Elaborado pelos autores.

No pavimento térreo, o laboratório terá uma saída para a área externa (P3, conforme Figura 5) e o auditório terá rampas nas saídas e uma nova porta no palco (P4, conforme Figura 5), totalizando duas rotas de fuga do local. A porta P1 permanecerá com as mesmas dimensões e será executada uma nova porta (P5, conforme Figura 5) ao lado da escada 2, com 1,38 m de largura. A Figura 5 apresenta as saídas e escadas de emergência futuras da edificação.

**Figura 5.** Saídas de emergência do pavimento térreo da edificação após reforma (L2)



Fonte: Elaborado pelos autores.

### 2.3 População

Segundo o Decreto Estadual nº 51.803 (RS, 2014) e suas alterações, a edificação é classificada como de grau de risco de incêndio baixo, com altura acima de 30 m (tipo VI) e sua ocupação principal é E-1 (educação superior - graduação). Como ocupações subsidiárias tem-se D-1 (atividades de apoio à educação), E-5 (brinquedoteca), F-1 (atividades de bibliotecas e arquivos) e F-5 (auditório). O Quadro 1 apresenta os dados utilizados para o dimensionamento populacional.

**Quadro 1.** Dados para dimensionamento populacional

Ocupação		População
Grupo	Divisão	
D	D-1	1 pessoa por 7 m <sup>2</sup> de área
E	E-1	1 pessoa por 1,5 m <sup>2</sup> de área de sala de aula
	E-5	
F	F-1	1 pessoa por 3 m <sup>2</sup> de área
	F-5	1 pessoa por m <sup>2</sup> de área

Fonte: Adaptado da Resolução Técnica nº 11 Parte 1 (CBMRS, 2016).

Para o auditório do pavimento térreo no L2, adotou-se o determinado na nota específica (N) do Anexo A da Resolução Técnica supracitada, segundo a qual é admitido o *layout* dos assentos fixos apresentado em planta baixa para o cálculo da população, enquanto para o L1 o cálculo populacional do auditório levou em

consideração o determinado para divisão F-5, visto os assentos do ambiente não serem fixos. A Tabela 1 apresenta a população máxima calculada para cada pavimento da edificação conforme *layouts* L1 e L2.

**Tabela 1.** População por pavimento nos layouts L1 e L2

Pavimento	População máxima	
	L1	L2
Térreo	179	144
2º pavimento	139	171
3º pavimento	209	229
4º pavimento	251	269
5º pavimento	251	265
6º pavimento	258	269
7º pavimento	104	111
8º pavimento	75	82
9º pavimento	76	78
10º pavimento	18	37
Total	1560	1655

**Fonte:** Elaborado pelos autores.

Tendo em vista que o diretório acadêmico 1 possui população de 7 pessoas e acesso próprio pela porta P2, na lotação máxima da edificação, o total de pessoas que deve utilizar a porta P1 no L1 é de 1553 usuários. Para o L2, a população que deve utilizar a porta P2 não se altera e as 1648 pessoas restantes se dividem entre P1, P3, P4 e P5.

## 2.4 Cenários adotados

Os cenários adotados se basearam nos dois modelos (L1 e L2) da edificação, sendo os cenários de 1 a 4 referentes ao L1 e de 5 a 8, ao L2. O C1 teve como objetivo representar o pior caso de evacuação, assumindo a edificação 100% ocupada. O C2 simulou o caso do auditório com lotação máxima, porém o restante da edificação com 50% de sua capacidade limite. O C3 adotou a hipótese do auditório vazio e o restante dos ambientes com 100% da população. Já o C4 testou a mesma população do C1, porém com a adição de uma possível obstrução da rota de fuga, representando, por exemplo, um ocupante que perdeu a consciência devido ao pânico ou esmagamento provocado pela multidão em rota de fuga. Segundo Ruty (2017), lesões por conta desse acontecimento, como inconsciência, parada cardiorrespiratória e falecimento, podem ocorrer, variando entre as pessoas e de acordo com o tempo e força exercida sobre as mesmas. Nesse sentido, um obstáculo foi inserido na circulação em frente à escada 1 no 6º pavimento, devido ao fato de ter sido o de maior aglomeração e um dos últimos a evacuar. A configuração geométrica do obstáculo varia de acordo com

o tempo decorrido, características físicas da pessoa e dinâmica da evacuação, sendo, desse modo, complexo representá-la com precisão. Portanto, para simplificação da análise, foi adotado um cilindro (formato utilizado pelo programa para representação dos indivíduos) com diâmetro de 48 cm (valor dentro do intervalo de larguras utilizado para os ocupantes), o qual se manteve no local escolhido desde o instante 0 s.

Os casos C5, C6 e C7 assumiram, respectivamente, os mesmos critérios do C1, C2 e C3, porém aplicados ao L2. O C8 foi adotado com o intuito de avaliar a influência das alterações propostas sobre a população da edificação antiga, sendo distribuída as mesmas populações máximas por pavimento do L1 no modelo do L2. O Quadro 2 apresenta um resumo dos cenários e modelos usados.

**Quadro 2.** Estrutura das simulações de evacuação

Cenário	Modelo	População*			Obstrução
		Auditório	Torre	Total	
C1	L1	100% (135)	100% (1425)	100% (1560)	Não
C2		100% (135)	50% (713)	54,4% (848)	Não
C3		0% (0)	100% (1425)	91,3% (1425)	Não
C4		100% (135)	100% (1425)	100% (1560)	Sim
C5	L2	100% (102)	100% (1553)	100% (1655)	Não
C6		100% (102)	50% (776)	53,1% (878)	Não
C7		0% (0)	100% (1553)	93,8% (1553)	Não
C8		100% L1 (135)	100% L1 (1425)	100% L1 (1560)	Não

\*Em parênteses é informado o número total de usuários.

Fonte: Elaborado pelos autores.

## 2.5 Análise computacional

### 2.5.1 Parametrização

Visando adequar as simulações à realidade de uso da edificação, os perfis atribuídos aos indivíduos foram divididos em perfil de adultos e perfil de crianças, tendo em vista a existência de uma brinquedoteca em ambos *layouts*. Para os adultos, cujo perfil é preponderantemente formado por jovens estudantes universitários, foi atribuído o intervalo de velocidade entre 1,2 e 1,5 m/s, com base nos estudos de Purser

e McAllister (2016) e Tanaka (2002 *apud* Ono, 2010, p. 79). Nas escadas, foi imposta a limitação de 1,05 m/s, fundamentada no estudo de Gouveia e Etrusco (2002). Para largura dos ombros foi utilizado o intervalo de valores entre 44,7 cm e 48,8 cm, e para altura, o intervalo de 1,62 m a 1,74 m, considerados como valores médios para mulheres e homens, respectivamente, segundo Bastos *et al.* (2014).

Já para a população da brinquedoteca, a velocidade adotada foi de 1,47 m/s, com base nas simulações de abandono em escola realizadas por Ono, Valentin e Vittorino (2012). A largura dos ombros de crianças variou entre 27 cm e 33 cm e a altura, entre 1,17 m e 1,50 m, segundo dados tabelados de medidas de corpo infantil da NBR 15800 (ABNT, 2009). O restante dos parâmetros foi mantido conforme configurações padrões do programa. O Quadro 3 apresenta os valores adotados para todos os cenários.

**Quadro 3.** Parâmetros utilizados nas simulações

Parâmetros/definições	Valores atribuídos	Referências
Velocidade horizontal (velocidade do indivíduo adulto em áreas planas)	1,2 a 1,5 m/s	Purser e McAllister (2016) e Tanaka (2002)
Velocidade vertical (velocidade máxima do indivíduo adulto nas escadas)	1,05 m/s	Gouveia (2002)
Velocidade de crianças (velocidade média de criança em áreas planas)	1,47 m/s	Ono, Valentin e Vittorino (2012)
Largura de ombros de adultos (diâmetro do cilindro que representa o indivíduo adulto)	44,7 a 48,8 cm	Bastos <i>et al.</i> (2014)
Largura de ombros de crianças (diâmetro do cilindro que representa a criança)	27 a 33 cm	NBR 15800 (ABNT, 2009)
Altura de adultos (altura do cilindro que representa o indivíduo adulto)	1,62 a 1,74 m	Bastos <i>et al.</i> (2014)
Altura de crianças (altura do cilindro que representa a criança)	1,17 a 1,50 m	NBR 15800 (ABNT, 2009)
Fator de redução (quanto o indivíduo consegue se comprimir em obstáculos)	0,7	Padrão do programa
Tempo de persistência (tempo que o indivíduo tentará resolver conflitos de movimentação no ambiente)	1 s	Padrão do programa
Tempo de resposta a colisão (multiplicado pela velocidade, determina a distância à frente que o indivíduo detecta possíveis colisões)	1,5 s	Padrão do programa
Distância de conforto (distância desejada entre os ocupantes)	0,08 m	Padrão do programa

Fonte: Elaborado pelos autores.

## 2.5.2 Simulação

A contar do início da simulação computacional, conjecturou-se que todos os usuários da edificação tiveram a percepção do incêndio no tempo 0 s. Isso é possível mediante a existência de alarme e de treinamento dos usuários. Esta foi uma simplificação adotada na simulação, apesar de não ser um caso verdadeiramente realístico, visto que nem todos os usuários – mesmo na existência de alarme – terão a percepção do risco e a ação de evacuar o edifício.

## 2.6 Pontos de controle e análise

A análise de resultados foi realizada com base no tempo de evacuação e na dinâmica de movimento, levando em conta a existência de pontos com densidade superior a 3 pessoas/m<sup>2</sup>, acima da qual há risco de esmagamentos e pisoteamentos (Helbing; Mukerji, 2012). O modo de movimento adotado para as simulações foi o *Steering*, o qual forneceu informações através de uma visualização 3D do modelo.

O Quadro 4 apresenta os pontos de análise de cada pavimento da edificação para o desenvolvimento da análise de resultados. Entende-se como início de escada o limite entre o patamar do pavimento e o primeiro degrau no sentido de saída, e como fim, o limite entre o patamar do térreo e o último degrau no sentido de saída.

**Quadro 4.** Pontos utilizados na análise de resultados

Pavimento	Pontos de análise	
	L1	L2
Térreo	Fim da escada 1 Porta P1	Fim da escada 1 Porta de saída da escada 2 Porta P1 Porta P2 Porta P3 Porta P4 Porta P5
2° ao 10°	Início da escada 1	Início da escada 1 Porta de acesso à antecâmara da escada 2

Fonte: Elaborado pelos autores.

## 2.7 Programa de computador

O *software* utilizado para a realização das simulações foi o *Pathfinder*, desenvolvido pela empresa norte americana *Thunderhead Engineering*. Para a definição do caminho a ser seguido pelos ocupantes, são levados em consideração fatores como perfil e comportamento dos usuários, tempo de fila em cada porta, tempo gasto

para caminhar até cada porta, tempo estimado de cada porta até a saída e distância percorrida (Thunderhead Engineering, 2020).

Ao rodar cada simulação, o programa fornece relatórios de resultados e permite a visualização de fatores como densidade de ocupação e taxa de fluxo, contribuindo para a análise de resultados.

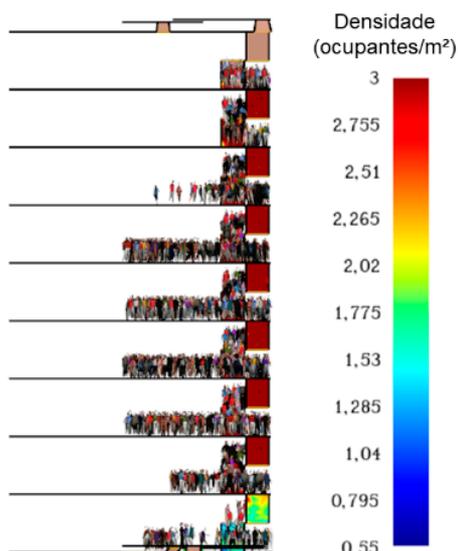
### 3 Análise dos resultados

#### 3.1 Modelo L1

Ao avaliar a dinâmica de evacuação do C1, notou-se que a escada 1 e as circulações dos pavimentos em frente à mesma ficaram congestionadas, sendo liberadas à medida que os pavimentos inferiores eram evacuados. Isso ocorreu devido ao elevado fluxo de pessoas provenientes dos ambientes que superou a capacidade de vazão da escada. O tempo total de evacuação no C1 foi de 15 min e 57 s. Apesar de terem tempos totais de evacuação distintos, de 08 min e 12 s, 15 min e 59 s e 16 min e 07 s, para, respectivamente, os casos C2, C3 e C4, o mesmo fenômeno de comportamento da população na escada foi observado. Percebe-se que no C2, o tempo total de escape foi menor, o que se justifica pela menor população que estava ocupando os pavimentos da torre. A redução de 50% da população total que ocupa os andares elevados do edifício resultou na redução de 49,1% do tempo total de evacuação em relação ao caso mais crítico (C4).

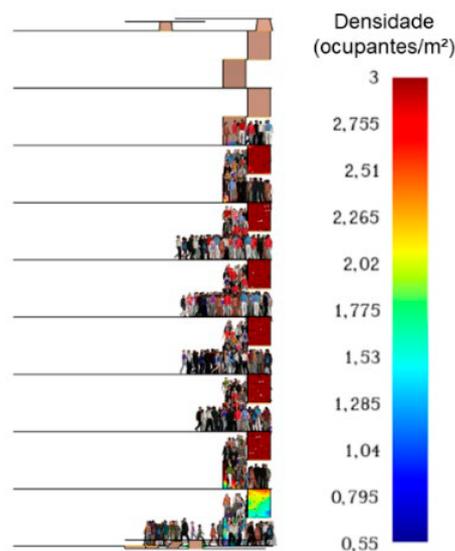
As Figuras 6a e 6b demonstram a densidade de pessoas por pavimento no tempo de 60 s, a contar do início da evacuação.

**Figura 6<sup>a</sup>.** Densidade de ocupantes na escada 1 aos 60s de evacuação no C1



Fonte: Adaptado de *Pathfinder*.

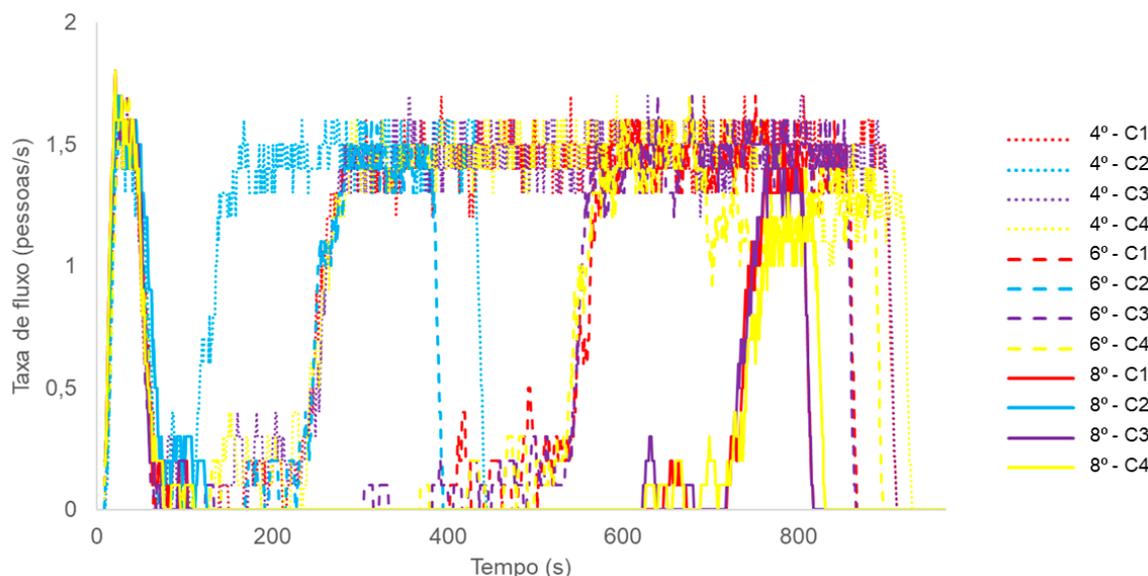
**Figura 6<sup>b</sup>.** Densidade de ocupantes na escada 1 aos 60s de evacuação no C2



Fonte: Adaptado de *Pathfinder*.

O congestionamento das circulações e da escada 1 presenciado nos 4 cenários do L1 pode ser constatado pela Figura 7, a qual apresenta a taxa de fluxo no início da escada 1 no 4º, 6º e 8º pavimentos. Durante certos períodos de tempo, os ocupantes dos pavimentos superiores foram impedidos de se movimentar em direção à saída devido à elevada densidade de pessoas dos pavimentos inferiores que utilizavam toda a capacidade da escada em questão, como pode ser observado pela taxa de fluxo zerada em alguns instantes.

**Figura 7.** Taxa de fluxo no início da escada 1 no 4º, 6º e 8º pavimentos



**Fonte:** Elaborado pelos autores.

Considerando-se a não utilização do auditório (C3), a taxa de fluxo nos acessos à escada 1 foram semelhantes ao C1, já no C4 a inserção de um obstáculo alterou a dinâmica de evacuação. A partir do momento em que a população localizada na circulação do 6º pavimento conseguiu começar a se movimentar em direção à escada 1, foi possível observar a influência do obstáculo, pois os ocupantes que se encontravam no seu entorno tiveram a saída dificultada por ter que contorná-lo e devido à redução do vão de passagem provocada pelo mesmo. Ademais, quando comparado ao C1, onde a densidade populacional da escada se manteve estável em torno de 2 pessoas/m<sup>2</sup>, notou-se que a presença do obstáculo no C4 reduziu a velocidade das pessoas localizadas nos lanços acima do 6º pavimento, visto que a densidade populacional nestes locais se manteve elevada, em torno de 3 pessoas/m<sup>2</sup>, enquanto nos lanços abaixo foi levemente reduzida para em torno de 1,5 pessoas/m<sup>2</sup>.

Tal fato pode ser observado pela Tabela 2, a qual mostra o total de pessoas que acessou a escada no 4º, 6º e 8º pavimentos (pontos A, B e C, respectivamente, conforme referência mostrada na Figura 8) e seu percentual em relação ao total que passou pelo ponto em questão até o fim da evacuação. Percebeu-se que a quantidade de pessoas que passou pelos pontos B e C até os 800 s foi menor no C4 quando comparado ao

C1, enquanto no ponto A isso não aconteceu, visto que o ponto A se localiza após a obstrução. Além disso, até os 600 s, o número de ocupantes que passou por esses pontos foi semelhante entre C1 e C4, o que se deve ao fato de a evacuação do 6º pavimento ter iniciado em torno dos 700 s.

**Figura 8.** Pontos A, B e C em corte



Fonte: Adaptado de *Pathfinder*.

**Tabela 2.** Total de pessoas que passaram pelos pontos A, B e C ao longo do tempo

Cenário	Tempo (s)	Total de pessoas que passaram por ponto			Percentual de pessoas que passaram por ponto (%)		
		A	B	C	A	B	C
C1	200	71	64	70	6,9	12,1	41,4
	400	296	64	70	28,7	12,1	41,4
	600	588	158	70	56,9	29,8	41,4
	800	885	451	161	85,7	84,9	95,3
	1000	1033	531	169	100	100	100
C4	200	77	66	69	7,5	12,4	40,8
	400	298	67	69	28,8	12,6	40,8
	600	594	162	69	57,5	30,5	40,8
	800	886	419	147	85,8	78,9	87
	1000	1033	531	169	100	100	100

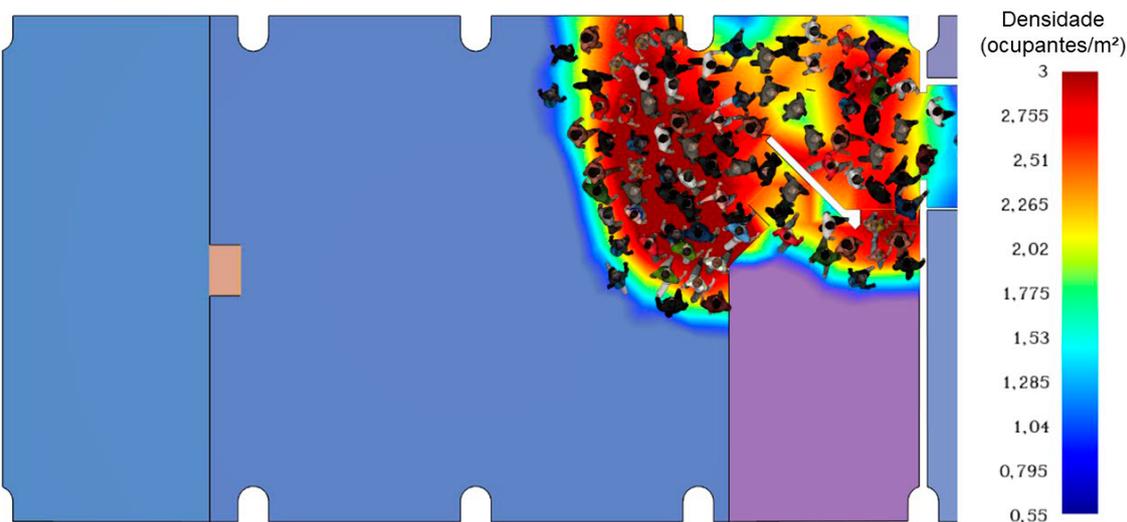
Fonte: Elaborado pelos autores.

Estes resultados mostraram como saídas inadequadas podem afetar a segurança dos ocupantes de uma edificação, sendo que, ao se considerar os possíveis efeitos oriundos dessa situação, no caso do C4 simulando um indivíduo que perdeu a consciência, as conclusões podem se agravar.

No auditório, a dinâmica de evacuação foi semelhante nos 3 cenários que consideraram o ambiente com 100% de lotação, tendo sido totalmente desocupado em

aproximadamente 65 s. Como pode ser verificado na Figura 9, houveram aglomerações com densidade de 3 pessoas/m<sup>2</sup> no entorno da única saída existente, o que ocorreu devido ao afunilamento provocado pela porta, mas também pelo *layout* do auditório que conta com diferentes níveis na região próxima à saída. O encontro entre estes níveis é delimitado por uma mureta, representada em branco na imagem abaixo, que se tornou um obstáculo no processo de abandono do local.

**Figura 9.** Auditório aos 21 s de evacuação no C1

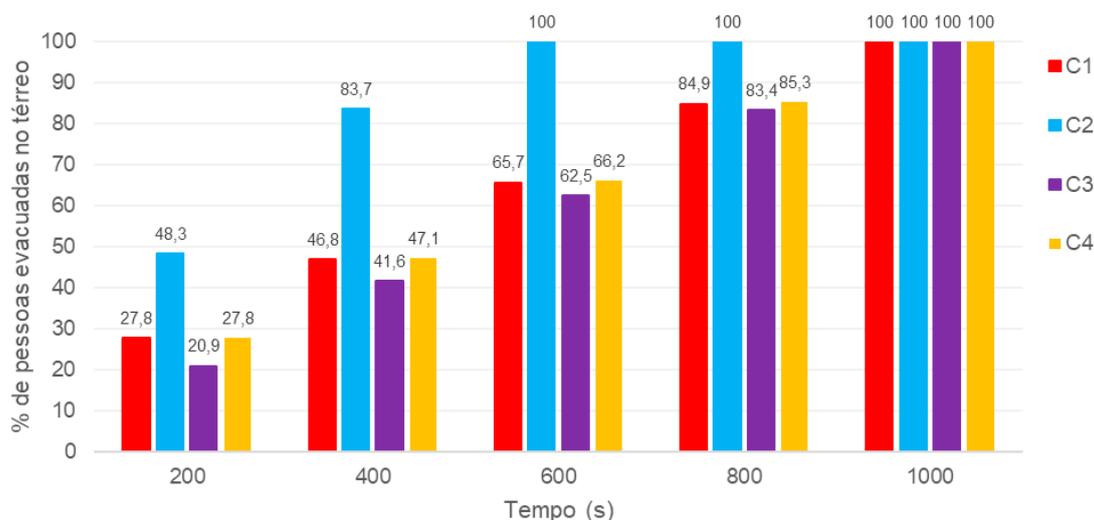


Fonte: Adaptado de *Pathfinder*.

Ao correlacionar a quantidade de pessoas evacuadas por tempo nos 04 cenários do L1, foi observado que a evacuação ocorreu um pouco mais rapidamente no C4 do que no C1 devido ao aumento de velocidade dos ocupantes após o obstáculo, o qual foi provocado pela redução da densidade populacional na escada após este ponto, conforme supracitado. Isso evidencia o quão fundamental é o fato de os ocupantes não evacuarem todos ao mesmo tempo, visto que o acúmulo de pessoas provoca uma barreira natural que reduz a velocidade dos usuários e, assim, o tempo total de evacuação. Como agravante, o acúmulo de pessoas pode gerar danos como esmagamento, asfixia, além de aumentar o comportamento de pânico de alguns indivíduos, fenômeno complexo de ser simulado computacionalmente.

Entretanto, comparado ao C1, houve um acréscimo de 10 s no tempo total de evacuação do C4 em decorrência da redução de velocidade dos ocupantes acima do 6º pavimento, resultando em um total de 16 min e 07 s. Ademais, notou-se que, apesar dos tempos de evacuação terem sido semelhantes entre o C1 e o C3 (2 s de diferença), a edificação foi capaz de evacuar mais rapidamente seus ocupantes quando o auditório estava sendo utilizado, conforme apresentado na Figura 10, indicando que a saída existente comportou a população do auditório juntamente com a do restante da torre. Já o C2 teve um tempo total de evacuação de 8 min e 12 s, uma redução de 49% em relação ao C1, condizente com a redução de população da edificação.

**Figura 10.** Percentual de pessoas evacuadas no térreo x tempo

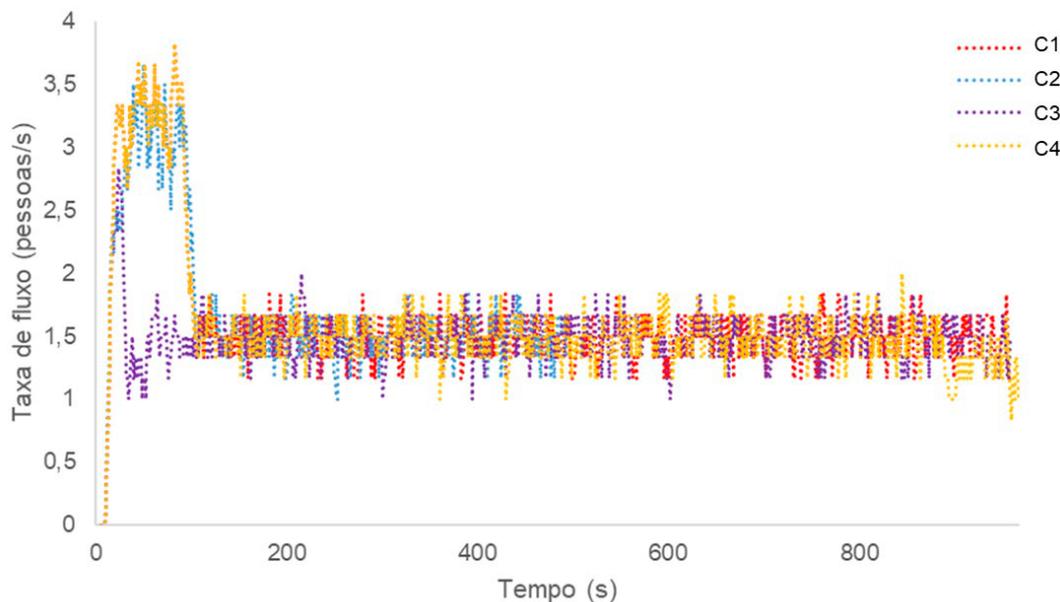


Fonte: Elaborado pelos autores.

Na porta P1, percebeu-se uma maior concentração populacional entre 45 e 90 s aproximadamente nos cenários que contavam com o auditório ocupado. O aumento da densidade populacional se deu a partir do momento em que o fluxo de pessoas provenientes dos pavimentos superiores aumentou e ainda haviam ocupantes do térreo realizando o abandono do local, resultando em aglomeração.

Conforme pode ser observado na Figura 11, após a população do pavimento térreo ter evacuado, o fluxo de pessoas que passou pela porta P1 reduziu de 3,40 pessoas/s em média para 1,5 pessoas/s nos cenários com o auditório ocupado, não tendo sido mais utilizada em toda sua capacidade a partir do momento em que todos os indivíduos eram provenientes da escada 1.

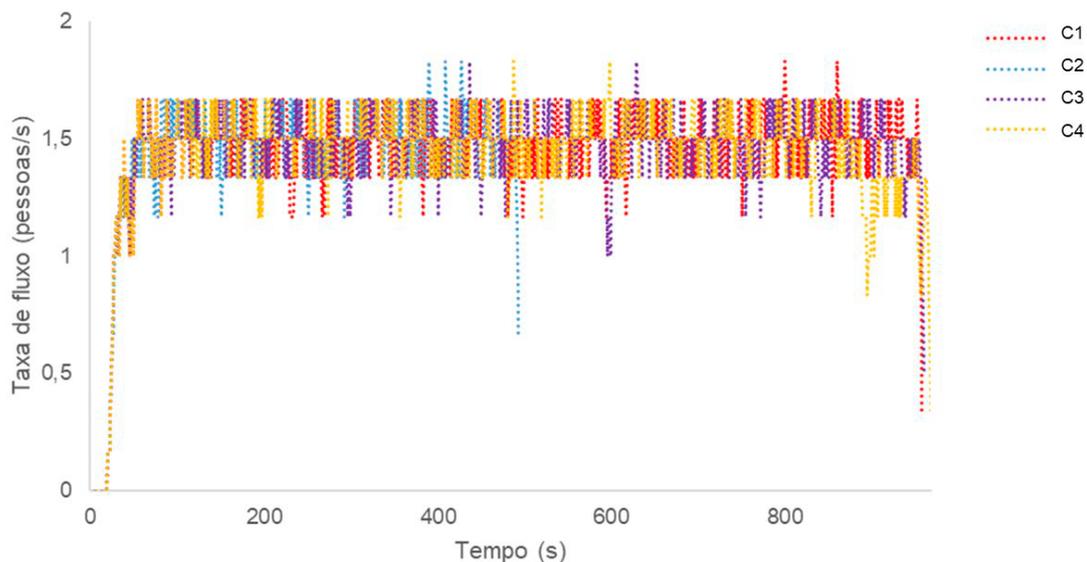
**Figura 11.** Taxa de fluxo x tempo na porta P1



Fonte: Elaborado pelos autores.

Complementarmente, tendo em vista que a taxa de fluxo no fim da escada 1 se manteve constante nos momentos iniciais das 04 simulações com o L1, conforme indicado na Figura 12, concluiu-se que as aglomerações presenciadas no entorno da porta P1 não afetaram o fluxo da escada, indicando que uma eventual ampliação na largura da porta possivelmente não implicaria em menor tempo total de evacuação, já que este tempo é decorrente principalmente da população que utiliza a escada 1.

**Figura 12.** Taxa de fluxo x tempo no fim da escada 1

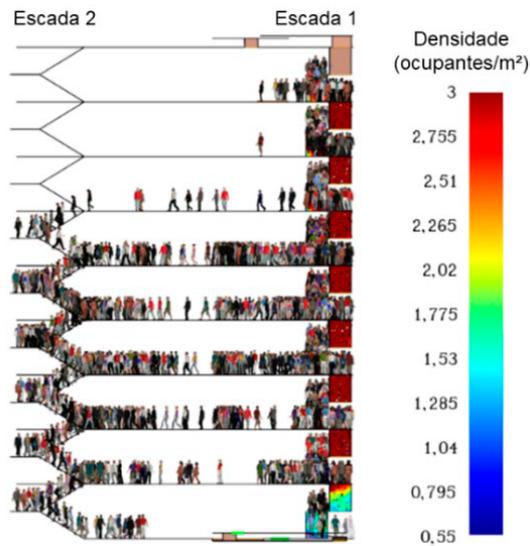


**Fonte:** Elaborado pelos autores.

### 3.2 Modelo L2

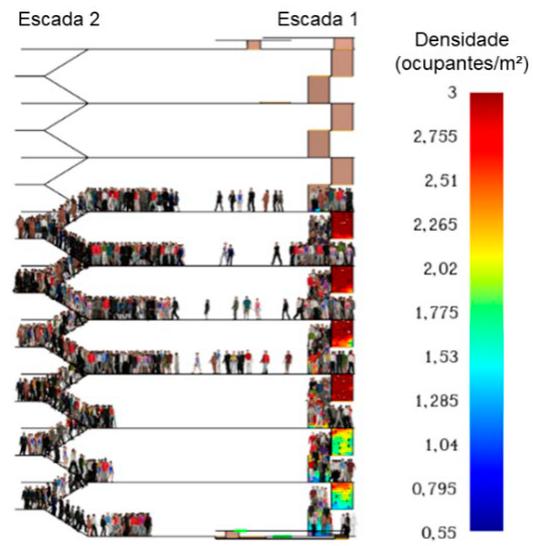
Em todos os cenários simulados com o L2 foram constatadas aglomerações nas escadas 1 e 2, levando um total de 8 min e 56 s, 8 min e 58 s, 4 min e 32 s e 8 min para evacuação do edifício nos cenários C5, C6, C7 e C8, respectivamente. Como pode ser observado abaixo nas Figuras 13a e 13b, onde a situação é exemplificada com o C5, a escada 1 ficou congestionada primeiro devido à sua menor largura, que fez com que comportasse uma menor taxa de fluxo. Na sequência, observou-se que alguns ocupantes que se encontravam na escada 1 optaram por se dirigir à escada 2, visto que a evacuação acontecia mais rapidamente nela. Isso correu por conta de ter sido utilizado o modo *Steering* de simulação, onde os ocupantes interagem com o meio e escolhem o caminho mais favorável a ser seguido.

**Figura 13a.** Densidade populacional nas escadas aos 60 s de evacuação do C5



Fonte: Adaptado de *Pathfinder*.

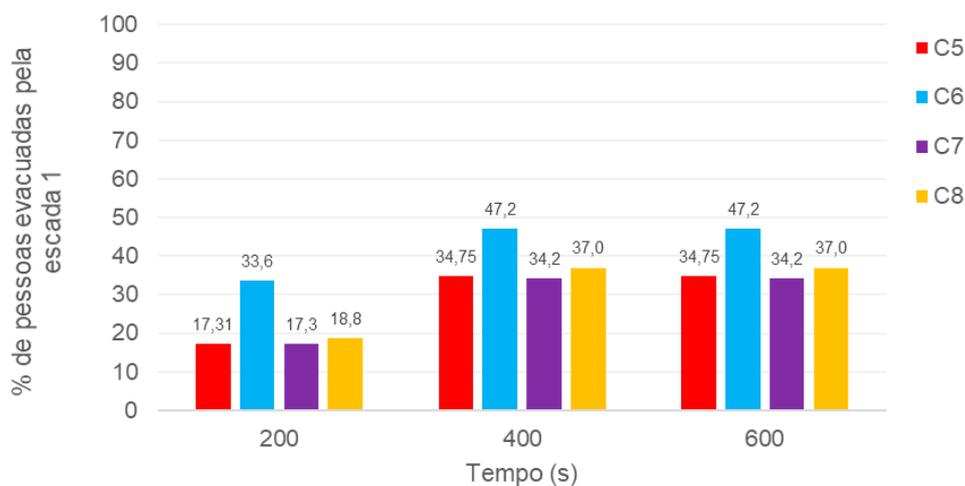
**Figura 13b.** Densidade populacional nas escadas aos 150 s de evacuação do C5



Fonte: Adaptado de *Pathfinder*.

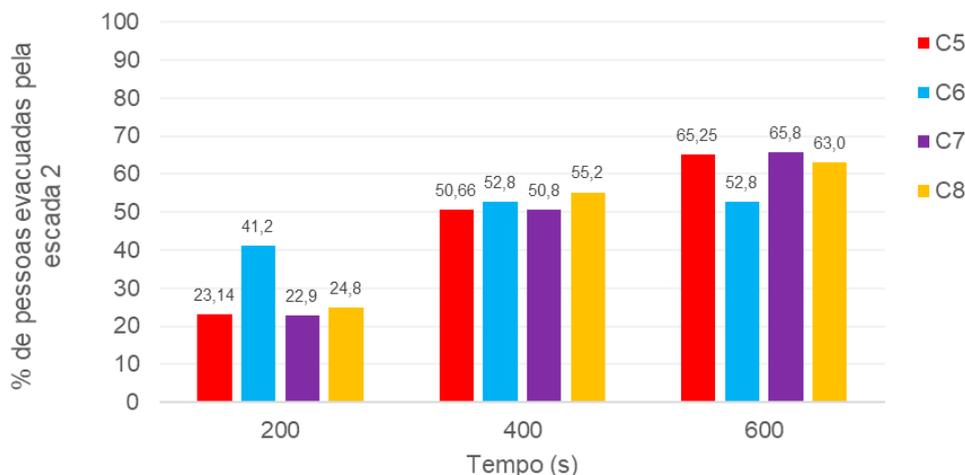
Ao analisar a evacuação em cada pavimento, observou-se que houve uma preferência pela escada 1, provavelmente por conta das menores distâncias a serem percorridas através da mesma até a saída, o que também influenciou para que sua densidade populacional se elevasse rapidamente. Entretanto, nos cenários 5, 7 e 8, devido à grande quantidade de ocupantes que trocaram sua rota de fuga, a escada 2 acabou sendo a mais utilizada, conforme apresentado nas Figuras 14a e 14b. Já no C6, notou-se que a população teve uma distribuição mais equilibrada entre as escadas, o que ocorreu devido às menores aglomerações na escada 1, que fez com que menor número de ocupantes trocassem de rota.

**Figura 14a.** Percentual de pessoas evacuadas pela escada 1



Fonte: Elaborado pelos autores.

**Figura 14b.** Percentual de pessoas evacuadas pela escada 2

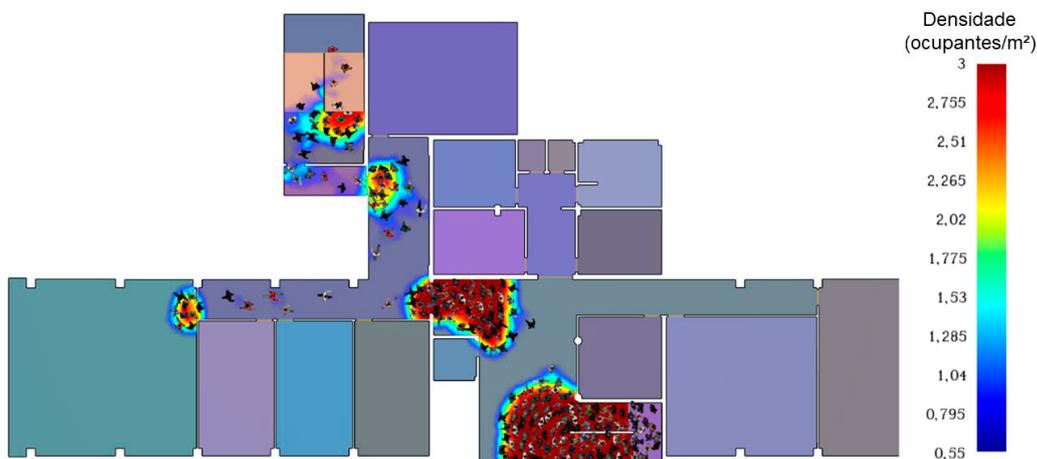


Fonte: Elaborado pelos autores.

Ademais, notou-se que a possibilidade de escolha entre duas rotas de fuga ocasionou conflitos no 3º, 4º e 6º pavimentos dos cenários 5, 7 e 8, conforme pode ser observado na Figura 15, exemplificado pelo C5, onde um acesso comum às duas rotas possuía dois fluxos de movimento. Não se sabe como foram definidas as rotas de fuga no PPCI, logo, a população do prédio não foi destinada a nenhuma escada ou porta específica, permitindo que os ocupantes escolhessem a saída mais favorável para si no momento e, portanto, ocasionando as colisões mencionadas.

Além do grande número de pessoas nesses pavimentos, os conflitos de movimentação ainda foram acentuados pela redução do vão de passagem presente neste ponto dos pavimentos em questão. No 6º pavimento, apesar de ser o de maior população, o vão era menor que o dos outros pavimentos (1,73 m), tornando as aglomerações mais críticas, o que não ocorreu no 5º pavimento apesar de ser um dos mais populosos, visto que possuía um maior vão de passagem (2,03 m). No C6, esta situação não foi observada em decorrência da população reduzida na torre.

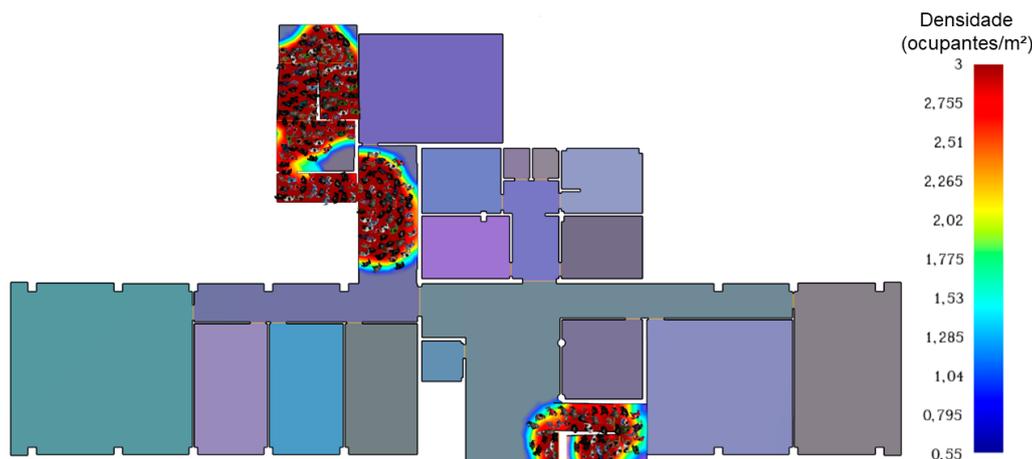
**Figura 15.** 6º pavimento aos 70s de evacuação do C5



Fonte: Adaptado de *Pathfinder*.

A porta de acesso à escada 2 também foi ponto aglomeração entre o 4º e o 7º pavimento no C5 e no C7, conforme apresentado na Figura 16, o que se deve tanto à redução de largura da porta em relação à circulação quanto à alta densidade de pessoas no interior da escada, que dificultava a entrada dos demais. O mesmo ocorreu no C8, porém sem aglomerações no 4º pavimento, possivelmente em decorrência da menor população no 2º e no 3º quando comparado ao C5 e C7, que possibilitou a entrada dos ocupantes na escada 2 com maior facilidade. Os ocupantes do C6 tiveram o acesso à escada 2 mais facilmente devido à menor lotação.

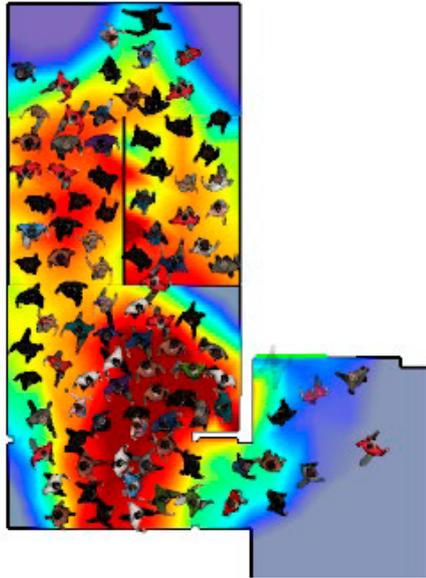
**Figura 16.** 6º pavimento aos 210s de evacuação do C5



Fonte: Adaptado de *Pathfinder*.

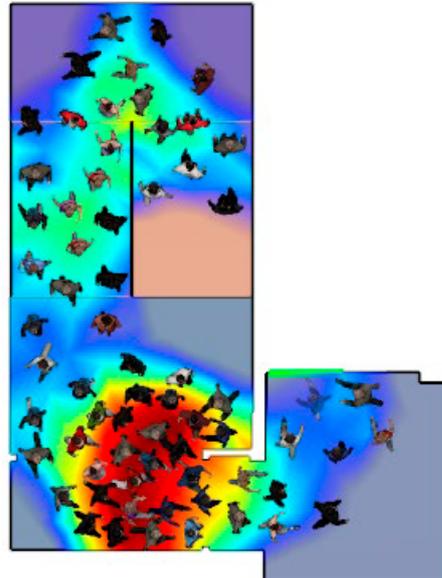
No pavimento térreo foi observada uma alta densidade de pessoas na porta de saída da escada 2, a qual se iniciou após os 100 s e se intensificou até o fim da evacuação. Isso ocorreu devido à redução do vão de passagem, de 2,24 m na escada para 1,60 m na porta e foi observado em todos os cenários do L2, inclusive no de menor população. Tal fato indica a possibilidade de a largura da porta ter sido dimensionada de forma incompatível com a largura da escada. As Figuras 17a e 17b exemplificam o ocorrido no C5.

**Figura 17a.** Saída da escada 2 no pavimento térreo aos 400 s de evacuação do C5



Fonte: Pathfinder.

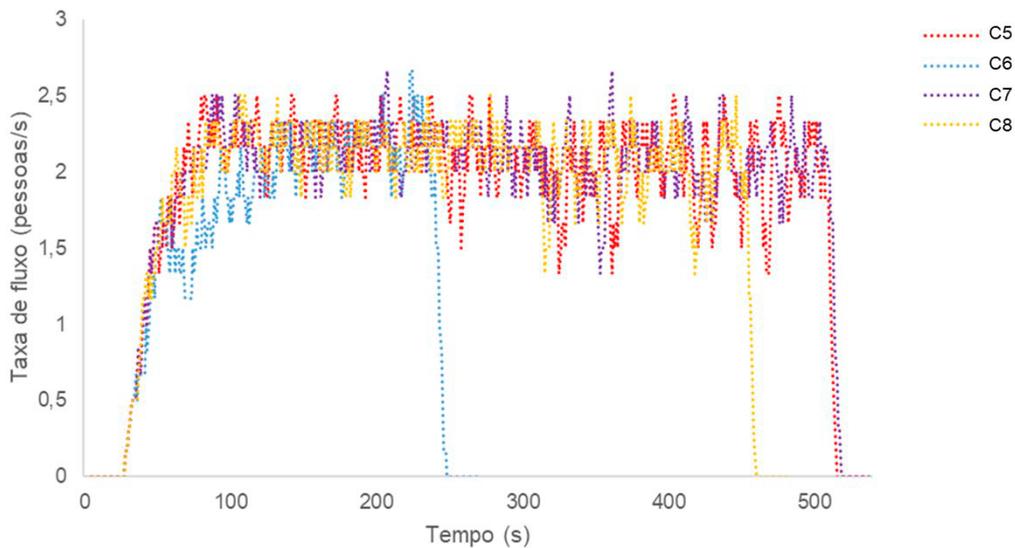
**Figura 17b.** Saída da escada 2 no pavimento térreo aos 230 s de evacuação do C6



Fonte: Pathfinder.

A aglomeração no entorno da porta da escada 2 provocou a redução da taxa de fluxo na escada, desacelerando o processo de saída, conforme pode ser observado no Figura 18.

**Figura 18.** Taxa de fluxo x tempo no fim da escada 2



Fonte: Elaborado pelos autores.

No auditório, foram verificadas aglomerações na porta de saída para o interior da edificação e nos acessos ao palco, bem como no entorno da porta P4, no entanto, a execução da nova porta para a área externa contribuiu para a distribuição da população no momento da evacuação, evitando, assim, que essas aglomerações

tomassem proporções semelhantes ao observado no L1. O local foi evacuado em 43 s no C5 e C6, enquanto no C8 este tempo aumentou para 53 s por conta da maior população calculada no modelo anterior. A influência desse aumento de 10 s pode ser observada brevemente na P5, onde a concentração de pessoas no seu entorno foi maior nos momentos seguintes a esse intervalo, em torno de 2 pessoas/m<sup>2</sup>. Já nos cenários 5, 6 e 7, a porta P5 comportou sua população sem ocasionar densidades superiores a 1,5 pessoas/m<sup>2</sup>.

Na porta P1 não foram constatadas aglomerações em nenhum dos cenários do L2, mostrando que sua largura foi suficiente para evacuação da edificação quando em conjunto com as outras saídas dimensionadas. A porta P3, por estar afastada das escadas, acabou por não ter sido uma escolha favorável para os ocupantes dos pavimentos superiores e foi utilizada somente pela população do seu ambiente, logo, não apresentou complicações nas simulações, bem como a porta P2, visto a baixa população do diretório acadêmico.

### 3.3 Correlação entre resultados

Em todas as simulações realizadas, notou-se que os pavimentos inferiores foram os primeiros a serem evacuados, liberando passagem para os superiores na sequência. A Tabela 3 apresenta os tempos totais de evacuação obtidos.

**Tabela 3.** Tempo de evacuação por cenário simulado

Cenário	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
<b>Tempo total de evacuação (s)</b>	957	492	959	967	536	272	538	480

Fonte: Elaborado pelos autores.

Através das simulações realizadas com o L1 (C1, C2, C3 e C4), percebeu-se que a escada de emergência existente atualmente ficou congestionada durante a evacuação da edificação, mesmo no caso de 50% de lotação da torre. Esse acúmulo de pessoas pode aumentar os riscos de lesões à saúde, dependendo do comportamento dos ocupantes e da dinâmica do incêndio.

As simulações conduzidas a partir do L2 da edificação (C5, C6, C7 e C8) mostraram que os ajustes dimensionados no PPCI contribuíram para redução do tempo total de evacuação em até 49,8%, o que, somado à execução de uma escada enclausurada, diminuiu consideravelmente o tempo de exposição dos ocupantes aos perigos oriundos de fogo e fumaça. Vale destacar que, mesmo considerando o aumento de população decorrente das alterações de *layout*, houve redução de até 44,7% no tempo total de evacuação entre cenários com mesma porcentagem de ocupação. Entretanto, a possibilidade de escolha entre duas rotas de fuga ocasionou atrito entre pessoas que

se direcionavam a escadas diferentes, visto compartilharem a mesma circulação. Tal fenômeno salienta a importância da sinalização de emergência e treinamento das pessoas para que a evacuação aconteça de maneira mais ordenada.

Ademais, notou-se a ocorrência de aglomerações em locais onde seria favorável o aumento do vão de passagem para melhor acomodar a população, como na porta de saída da escada 2 no térreo e nas circulações do 3º, 4º e 6º pavimento.

Embora o auditório não tenha causado grandes impactos na evacuação do prédio como um todo, as alterações de *layout* propostas foram positivas para o ambiente. Houve uma redução de 18,5% no tempo de abandono do ambiente no L2 quando mantida a mesma população do L1. Além disso, a execução de nova saída de emergência distribuiu a população que antes se concentrava em apenas uma porta, contribuindo, assim, para redução das aglomerações.

## 4 Conclusões

As principais conclusões obtidas com este estudo são destacadas a seguir:

- ♦ A execução de escada e saídas adicionais, reduziu em 49,8% o tempo total de evacuação da edificação (mantida a mesma população);
- ♦ A execução de nova saída no auditório reduziu em 18,5% o tempo total de evacuação do local (mantida a mesma população do auditório);
- ♦ A existência de mais de uma escada de emergência provocou colisões entre ocupantes que seguiam por caminhos opostos. Esse fenômeno pode ser reduzido mediante a implantação de sinalização de orientação adequada;
- ♦ As aglomerações no L2 foram menores, com a população se dissipando mais rapidamente. Esta circunstância contribuiu, por exemplo, para o aumento da velocidade de fuga, redução da possibilidade de esmagamento, sufocamento e pânico dos usuários;
- ♦ Afunilamentos em pavimentos populosos provocaram altas concentrações de pessoas em seu entorno, criando uma barreira natural que afetava negativamente no abandono dos usuários.

## Referências bibliográficas

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 15800: Vestuário – Referenciais de medidas do corpo humano – Vestibilidade para bebês, crianças e adolescentes*. Rio de Janeiro, 2009.
- BASTOS, S. F.; SABRÁ, F. G.; ROSA, R.; FELIPE, L. *Size BR - O estudo Antropométrico Brasileiro*. Senai CETIQT. Rio de Janeiro, 2014.
- CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO RIO GRANDE DO SUL (CBMRS). *Resolução Técnica CBMRS nº 11 – Parte 01/2016: Saídas de Emergência*. Porto Alegre, 2016.
- DUARTE, Rogério Bernardes; ONO, Rosaria; SILVA, Silvio Bento da. *Problemática de incêndio em edifícios altos*. São Paulo. Ed. do Autor, 2021.
- FRIBERG, Markus; HJELM, Michael. Mass evacuation-human behavior and crowd dynamics-What do we know? *LUTVDG/TVBB*, 2014.
- GOUVEIA, Antônio Maria Claret de; ETRUSCO, Paula. Tempo de escape em edificações: os desafios do modelamento de incêndio no Brasil. *REM: Revista Escola de Minas*, v. 55, p. 257-261, 2002.
- HELBING, Dirk; MUKERJI, Pratik. Crowd disasters as systemic failures: analysis of the Love Parade disaster. *EPJ Data Science*, v. 1, p. 1-40, 2012.
- KHAMIS, Nurulaqilla ; SELAMAT, Hazlina; ISMAIL, Fatimah Sham; LUTFY, Omar Farouq; HANIFF, Mohamad Fadzli; NORDIN, Ili Najaa Aimi. Optimized exit door locations for a safer emergency evacuation using crowd evacuation model and artificial bee colony optimization. *Chaos, Solitons & Fractals*, v. 131, p. 109505, 2020.
- KULIGOWSKI, E. D. Human Behavior in Fire. In: HURLEY, M. J. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. 5. ed. Nova York: Springer, 2016. cap. 58, p. 2070-2114.
- LEI, Wenjun; TAI, Chuanmin. Effect of different staircase and exit layouts on occupant evacuation. *Safety science*, v. 118, p. 258-263, 2019.
- MONTENEGRO, Mariana Lima Oliveira. *Análise de desempenho das saídas de emergência por meio de simulações computacionais: o caso de projetos de edifícios universitários*. 2016. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brasil, 2016.
- ONO, Rosaria. *O impacto do método de dimensionamento das saídas de emergência sobre o projeto arquitetônico de edifícios altos: uma análise crítica e proposta de aprimoramento*. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.
- ONO, R.; VALENTIN, M.; VITTORINO, F. *Walking speed data of fire drills at an elementary school*. In: *Proceedings of 5th International Symposium: Human Behaviour in Fire*. 2012.
- PURSER, David. A.; MCALLISTER, Jamie. L. Assessment of Hazards to Occupants from Smoke, Toxic Gases, and Heat. In: HURLEY, M. J. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. 5. ed. Nova York: Springer, 2016. cap. 63, p. 2308-2428.
- RIO GRANDE DO SUL. *Decreto nº 51.803, de 10 de setembro de 2014*. Regulamenta a Lei

Complementar n.º 14.376, de 26 de dezembro de 2013, e alterações, que estabelece normas sobre segurança, prevenção e proteção contra incêndio nas edificações e áreas de risco de incêndio no Estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, Disponível em: <https://www.bombeiros.rs.gov.br/decretos>. Acesso em: 24 mai. 2023.

RUTTY, Guy N.; CARY, Nathaniel; LAWLER, William. Death in crowds. *Essentials of Autopsy Practice: Reviews, Updates, and Advances*, p. 43-57, 2017.

THUNDERHEAD ENGINEERING. *Pathfinder User Manual*. Manhattan, 2020.