MODELAGEM COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE EVACUAÇÃO DE EMERGÊNCIA EM CASO DE INCÊNDIO EM EDIFICAÇÃO COMERCIAL

Computer modeling for analysis of evacuation efficiency of emergency exits in event of a fire in commercial building

Santos, Laura Fernanda dos[1]; Campos, Marcus André Siqueira[2]

[1] Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Goiânia-GO, Brasil, laurasfernanda@discente.ufg.br.

[2] Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Goiânia-GO, Brasil, marcus_campos@ufg.br.

RESUMO

A legislação de segurança contra incêndio no Brasil evoluiu como resposta a tragédias marcantes e ao crescimento urbano acelerado e desordenado. Neste contexto, o presente estudo tem como objetivo realizar uma análise comparativa entre os parâmetros normativos e situações reais de evacuação, a fim de validar os critérios adotados pelas normas técnicas. Para isso, investiga-se o tempo de escape em rotas de fuga durante incêndios — um aspecto fundamental no dimensionamento de projetos e na formulação das regulamentações. A pesquisa combina simulações computacionais com a análise da literatura especializada para identificar as variáveis que mais influenciam esse tempo, como as características arquitetônicas e o comportamento humano diante de situações de emergência e pânico. Como resultado, tem-se um comparativo em termos de tempo de evacuação entre normas e realidade, demonstrando a necessidade do estudo do comportamento humano como fator essencial na interpretação e aplicação da norma.

Palavras-chave: Segurança contra incêndio; Rota de fuga; Tempo de escape; Comportamento humano; Simulação computacional.

ABSTRACT

Fire safety legislation in Brazil has evolved in response to major historical tragedies and the challenges posed by rapid and unregulated urbanization. In this context, the present study aims to conduct a comparative analysis between regulatory parameters and real-life evacuation scenarios in order to validate the criteria established by technical standards. The research focuses on escape time along evacuation routes during fires — a key factor in the design of safety systems and the development of regulations. Through computer simulations and a review of specialized literature, the study identifies the most influential variables affecting escape time, such as architectural features and human behavior in emergency and panic situations. As a result, there is a comparison in terms of evacuation time between the standards and reality, demonstrating the need to study human behavior as an essential factor in interpreting and applying the standard.

Keywords: *Fire safety; Escape route; Escape time; Human behavior; Computer simulation.*

1 INTRODUÇÃO

O crescimento das cidades brasileiras, especialmente ao longo do século XX, ocorreu de forma acelerada e frequentemente desordenada, impulsionado pela industrialização e pelo êxodo rural. Esse desenvolvimento urbano sem planejamento adequado gerou ambientes mais vulneráveis a riscos diversos (Soares et al., 2014), especialmente em áreas com alta densidade populacional, onde o risco de incêndios tende a ser maior (Seito et al., 2008).

Historicamente, o Brasil foi palco de incêndios de grande proporção que evidenciaram a necessidade de uma legislação específica voltada à Segurança Contra Incêndio (SCI). No entanto, a implementação da normalização brasileira em SCI ocorreu com atraso em relação

DOI: https://doi.org/10.46421/sispred.v4.7982

a outros países desenvolvidos (Claret et al., 2011), e aspectos fundamentais como o fator humano ainda são pouco considerados.

O tempo de evacuação das edificações é um dos elementos centrais para garantir a segurança em situações de incêndio. Estudos como os de Pauls (1980), Proulx (2002) e o documento DD 240 do British Standards Institute (BSI, 2004) desenvolveram métodos e equações para estimar esse tempo com base em parâmetros populacionais e nas características das rotas de fuga. A existência de estratégias eficazes de evacuação é essencial para que os ocupantes consigam deixar a edificação em segurança antes que as condições internas se tornem críticas.

Além das variáveis físicas dos ambientes, o comportamento humano é um fator determinante no desempenho da evacuação. Segundo Ono (2023), esse aspecto ainda é subestimado tanto no desenvolvimento de normas quanto nos projetos de segurança. Falhas nesse sentido podem comprometer a eficácia dos sistemas de evacuação e evidenciam a importância de abordagens mais fundamentadas e sensíveis às reações humanas em situações de risco.

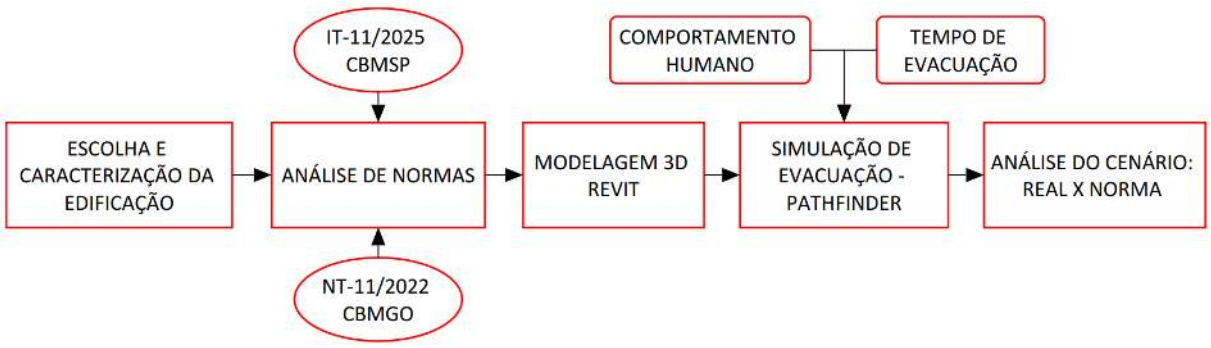
Integrar fatores como comportamento dos ocupantes e tempo de escape nas simulações de evacuação são abordados em trabalhos como Jiang (2022) que destaca como estes são essenciais em função da complexidade dos perfis de usuários e da necessidade de precisão no processo de evacuação. Isso implica uma transição de modelos prescritivos para abordagens baseadas em desempenho e simulações computacionais.

Diante desse cenário, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o impacto do comportamento humano e das características de projeto no tempo de escape em uma edificação comercial, por meio de simulações computacionais. Os resultados obtidos são comparados com os parâmetros normativos vigentes, buscando validar sua aplicabilidade em situações reais de evacuação e contribuir para o aprimoramento dos critérios adotados nos projetos de segurança contra incêndio.

2 MÉTODO

Para o desenvolvimento deste trabalho foi modelado um cenário que representa uma edificação comercial real, construída conforme os parâmetros das normas técnicas vigentes, incorporando fatores comportamentais. As etapas a serem seguidas para alcançar o objetivo deste trabalho estão descritas a seguir, conforme o delineamento ilustrado na Figura 1**Erro! Fonte de referência não encontrada.**.

Figura 1 – Delineamento de pesquisa



Fonte: Autores (2025)

2.1 Escolha e caracterização da edificação

A edificação escolhida é um bar/casa noturna, local de reunião de público com carga média de incêndio. A caracterização da edificação encontra-se no Quadro 1.

Quadro 1 – Caracterização física da edificação

Parâmetro	Descrição
Área construída	726,15 m²
Pavimentos	Subsolo, térreo e mezanino
Ocupações subsolo	Sanitários e estoque de alimentos perecíveis
Ocupações térreo	Cozinha, preparo de bebidas e mesas para o público
Ocupações mezanino	Escritório e almoxarifado
Saídas de emergência	Uma para funcionários e uma para consumidores

Fonte: Autores (2025)

2.2 Análise de normas

A análise normativa do projeto foi baseada nas normas estaduais IT-11/2025 (CBMSP) e NT-11/2022 (CBMGO) e federal NBR 9077 (ABNT, 2001) e NBR 14880 (ABNT, 2014) e demais normas referenciadas nestas citadas. O Estado de Goiás é onde se localiza o projeto em questão. O Estado de São Paulo é o estado mais populoso do país e pioneiro nos estudos e normas de incêndio, o que o torna referência para os demais estados.

2.3 Modelagem 3D

Os projetos arquitetônico e de incêndio da edificação foram concedidos para este estudo no formato *dwg*, com modelagem em 2D. Por necessidade da entrada de dados do programa selecionado, cujo funcionamento será mais bem descrito no item a seguir, foi feita a modelagem 3D do projeto pré-existente através da plataforma *Revit*.

2.4 Simulação de evacuação

Para a realização da simulação de evacuação, utilizou-se o programa computacional, *PathFinder*, desenvolvido pela *Thunderhead Engineering*. Trata-se de um programa de simulação de evacuação baseada em agente, que combina a simulação de movimento avançada com resultados animados em 3D.

Para a definição do número de ocupantes por ambiente, foi feita uma estimativa que seguiu, inicialmente, o cálculo de população, definido de acordo com a NT-11/2022 do CBMGO e IT-11/2025 do CBMSP, conforme indicado no Quadro 2.

Quadro 2 – Parâmetros de cálculo de população conforme normativas do CBMGO e CBMSP

Grupo	Divisão	População	Capacidade da unidade de passagem para escada	Capacidade da unidade de passagem para porta
D	D-1	1 pessoa por 7m²	75	100
F	F-6	2 pessoas por m²	75	100
J	J-2	1 pessoa por m²	75	100

Fonte: Autores (2025)

A largura das saídas é dimensionada em função do pavimento de maior população. Em ambos estados, conforme a NT-01/2024 (CBMGO) e IT-01/2025 (CBMSP), esse valor é dado pela Equação 1 (ABNT, 2001).

$$N = P.C \quad \text{(Eq. 1)}$$

sendo:

N, o número de unidades de passagem,

P, a população, conforme coeficiente da Tabela A1 do Anexo A da NT-11/2022 e Tabela 1 do Anexo A da IT-11/2025;

C, a capacidade da unidade de passagem, também conforme tabelas acima. Para ambas as normas se tem os mesmos valores de Capacidade da Unidade de Passagem (C), como apontado no Quadro 2, e aplicando-se a fórmula acima para cada ambiente resulta em uma população total de 185 pessoas, como apresentado no Quadro 3.

Quadro 3 – Caracterização normativa

Parâmetro	Descrição
Classificação da ocupação	F-6 – Local de reunião de público – Casa noturna
Carga de incêndio e risco (IT-14/2025)	600 MJ/m² – risco médio
Carga de incêndio e risco (NT-14/2025)	600 MJ/m² – risco médio
População máxima (IT-14/2025)	185
População máxima (NT-14/2025)	185

Fonte: Autores (2025)

2.4.1 Comportamento humano

A definição de comportamentos é uma ferramenta presente no Pathfinder que multiplica as variações de rota de fuga utilizadas, por exemplo, atribuindo diferentes probabilidades de uso de escadas e rampas. Como há representação de processos humanos, o modelo fica sujeito a congestionamentos e filas, que acabam aproximando o resultado da realidade.

2.4.2 Tempo de evacuação

Para determinar o tempo de evacuação, utilizou-se o método apresentado em Pauls (1980). Ao admitir uma variação não linear do fluxo de evacuação, o autor apresentou duas equações distintas, uma não linear, Equação 2 (Pauls, 1980), mais próxima dos resultados reais (com um erro de aproximadamente 0,2%) e outra linear, Equação 3 (Pauls, 1980).

$$T = 0{,}68 + 0{,}081.p^{0{,}73} \quad \text{(Eq. 2)}$$

$$T = 2{,}00 + 0{,}0117.p \quad \text{(Eq. 3)}$$

sendo:

T, o tempo mínimo, em minutos, para a evacuação completa;

p, número de ocupantes por metro de largura efetiva eficaz medido imediatamente acima do nível da saída de emergência para o exterior/local seguro.

O segundo método utilizado foi o apresentado em Proulx (2002), onde é utilizado, para

previsão de tempo de evacuação ($t_{evacuação}$), valores padronizados (Quadro 4) que indicam os dados necessários para o cálculo do tempo de evacuação conforme a fórmula abaixo.

Quadro 4 – Parâmetros para o movimento de pessoas em diversas situações

Vias de evacuação	Fator de densidade	Densidade (m²)	Velocidade (m/min)
Escada	Pequeno	0,005	45,72
	Moderado	0,009	36,58
	Grande	0,018	28,96
	Máximo	0,028	12,19
Corredor	Pequeno	0,005	76,20
	Moderado	0,009	60,96
	Grande	0,018	36,58
	Máximo	0,028	18,29
Porta	Moderado	0,009	51,82
	Grande	0,018	36,58
	Máximo	0,028	15,24

Fonte: Proulx (2002)

2.5 Cenários de simulação computacional

Foram definidos os comportamentos e perfis necessários para gerar a simulação de evacuação. Foram produzidas as variações do fator humano (VFH), definindo dois perfis padrão, de funcionários e consumidores, e, a partir deles, os demais perfis (Quadro 5). Para elaboração dos perfis, os funcionários têm escolha livre das portas de saída e os consumidores têm acesso apenas as portas da área comum.

Quadro 5 – Perfis dos ocupantes

Perfis	Velocidade[1] (m/s)	Altura[2] (m)	Elipse[3]	
			Raio Maior (m)	Raio Menor (m)
Padrão	1,310	1,69	0,60	0,46
1	1,965	1,69	0,60	0,46
2	1,048	1,69	0,60	0,46
3	1,048	1,69	1,07	0,70

Fonte: Autores (2025)

[1] Velocidade padrão de 1,31m/s; demais velocidade 1,5 vezes maior e 0,8 vezes menor que a velocidade definida como padrão (Dourado *et al*, 2010);

[2] Estatura média brasileira considerada;

[3] Elipse representa o valor médio da área ocupada por pessoa.

As variações do fator humano em si foram construídas através de combinações dos perfis definidos, em porcentagens, conforme apresentado na

Quadro ***6***.

Quadro 6 – Variações do fator humano

Variações	Perfil Funcionário		Perfil Consumidor			
	Padrão	Perfil 1	Padrão	Perfil 1	Perfil 2	Perfil 3
VFH 0	10%		90%			
VFH 1		10%		90%		
VFH 2		10%		44%	45%	1%

Fonte: Autores (2025)

Foram simuladas alternativas de três cenários diferentes (Quadro 7), baseados na combinação da arquitetura do projeto original e três variações do comportamento humano. O cenário original (VP 0) se trata do projeto tal como foi executado, de acordo com as normas técnicas vigentes do CBMGO.

Quadro 7 – Cenários

Cenários	Variação de Fator Humano	Variação de Projeto
1	VFH 0	VP 0
2	VFH 1	VP 0
3	VFH 2	VP 0

Fonte: Autores (2025)

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir dos cenários supracitados, gerou-se um comparativo do tempo de evacuação simulado apresentados no Quadro 8. Outro parâmetro de tempo aplicado na comparação foi o tempo de resistência ao fogo exigido de 60 min, conforme NT-08 (CBMGO, 2022) e IT-08 (CBMSP, 2025). Estimando-se o tempo de reação e início de movimentação dos usuários como 2 minutos, o tempo usado para comparação foi de 58 min.

Quadro 8 – Comparativo de tempos de evacuação simulados e calculados em minutos

Cenários	Tempo de evacuação				
	Simulação	Método Pauls[1] (fluxo não linear)	Método Pauls[1] (fluxo linear)	Método Proulx[2]	TRRF
1	1,13	0,82	2,03	1,16	58
2	0,81	0,82	2,03	1,16	58
3	1,07	0,82	2,03	1,16	58

Fonte: Autores (2025)

[1] Considerando p como sendo o valor máximo do raio maior da elipse definida no Quadro 5;

[2] Para a aplicação do método de Proulx (2002) considerou-se um valor de densidade máximo, sendo que o tempo de evacuação total é resultado da soma do tempo de evacuação de todas as saídas de emergência.

Ao comparar os métodos selecionados com os tempos de escape obtidos nas simulações, observou-se uma forte convergência entre os resultados, que se mantiveram consistentemente dentro do intervalo delimitado pelos métodos linear e não linear propostos por Pauls (1980), considerando uma margem de 0,01 segundo. Além disso, todos os valores simulados ficaram abaixo dos tempos estimados pelo método de Proulx (2002), reforçando a confiabilidade da abordagem adotada.

Os resultados obtidos demonstram sua adequação e segurança. A análise também permitiu avaliar o impacto de variações no comportamento humano em situações de emergência. O cenário 3, que representa com maior fidelidade a realidade por incorporar maior heterogeneidade entre os perfis de ocupantes, apresentou tempos de escape compatíveis com os demais cenários, o que reforça a aplicabilidade da metodologia empregada.

4 CONCLUSÃO

Os tempos encontrados para evacuação total da edificação foram, em todos os cenários, de uma ordem de grandeza dez vezes menor do que o tempo exigido pela norma para garantia da integridade da estrutura, certificando a segurança do prédio.

Sugere-se um enfoque normativo em características que ainda são tidas como subjetivas para garantir segurança e viabilidade econômica para as obras de engenharia civil. À medida que essa área de estudo se desenvolver, é esperado que mais programas sejam desenvolvidos e mais pessoas tenham domínio na modelagem e execução, podendo garantir simulações computacionais numerosas e precisas, podendo ser base para reformulações normativas.

AGRADECIMENTOS

Agradecimento a Thunderhead Engineering pelo apoio ao presente trabalho através do fornecimento da licença do software Pathfinder.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR9077**: Saídas de emergência em edifícios. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR14880**: Saídas de emergência em edifícios – Escada de segurança – Controle de fumaça por pressurização. Rio de Janeiro, 2014.

British Standards Institution. **DD 240**. Fire safety engineering in buildings. London, 2004.

CAO, R. F. et al. **Development of na agente-based indoor evacuation model for local fire risks analysis.** Journal of Safety Science and Resilience 4 (2023) 75-92. China, 2023.

CBMGO. **Norma Técnica-01/2024** – Processos administrativos. Goiás, 2024.

CBMGO. **Norma Técnica-08/2022** – Resistência ao fogo dos elementos da construção. Goiás, 2022.

CBMGO. **Norma Técnica-11/2022** – Saídas de emergência. Goiás, 2022

CBMGO. **Norma Técnica-14/2025** – Carga de incêndio nas edificações e área de risco. Goiás, 2025.

CBMESP. **Instrução Técnica-01/2025** – Processos administrativos. São Paulo, 2025.

CBMESP. **Instrução Técnica-08/2025** – Segurança estrutural contra incêndio – Parte 1. São Paulo, 2025.

CBMESP. **Instrução Técnica-11/2025** – Saídas de emergência. São Paulo, 2025.

CBMESP. **Norma Técnica-14/2025** – Carga de incêndio nas edificações e área de risco. São Paulo, 2025.

CLARET, A. M.; MATTEDI, D. L. **Estudo da prescritividade das normas técnicas brasileiras de segurança contra incêndio.** REM; R. Esc. Minas Gerais, Ouro Preto, 64 (3), 265-271, jul.set.2011.

DOURADO, V. Z. *et al.* (2010). **Velocidade usual da marcha em brasileiros de meia idade e idosos**. In: Revista Brasileira de Fisioterapia, São Carlos.

JIANG, A., MO, Y., KALASAPUDI, V. S. **Status quo and challanges and future development of fire emergency evacuation research and application in built environment**. Journal of Information Technology in Construction, Vol. 27, 781-801. Eslovênia, 2022.

ONO, R. **Saída de emergência em edifícios altos.** Revista Flammae. Pernambuco, 2023.

PAULS, J. L.; Jones, B.K. (1980). **Building Evacuation: Research Methods and Case Studies**. In: Fires and Human Behaviour, Nova Iorque.

Proulx, G. (2002). **Movement of People: Evacuation Timing**. In: SFPE Handkbook of Fire Protection Engineering, 3rd edition. Quincy: National Fire Protection Association.

SEITO, A. I. *et al.* **A segurança contra incêndio no Brasil.** São Paulo: Projeto Editora, 2008.

SOARES, J. A. S. *et al*. **Impactos da urbanização desordenada na saúde pública: Leptospirose e infraestrutura urbana.** Rio de Janeiro, 2014.