

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL NA SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO EM EDIFICAÇÕES: REVISÃO DE LITERATURA

COMPUTATIONAL SIMULATION IN FIRE SAFETY IN BUILDINGS: LITERATURE REVIEW

Renan Somavilla Uliana ¹

Rogério Cattelan Antochaves de Lima ²

Rene Quispe Rodriguez ³

Fabiane Vieira Romano ⁴

Resumo

Este trabalho reúne estudos que abordam o tema simulação computacional na segurança contra incêndio, por meio de uma revisão sistemática de literatura. A pesquisa foi realizada nas bases de dados eletrônicas de textos completos, disponíveis no portal Periódicos CAPES: SciELO; ScienceDirect (Elsevier); Academic Search Premier – ASP (EBSCO); e Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD). O período delimitado na busca de referências foi de 2015 a 2021 pela contemporaneidade do saber científico. Foram localizados 207 documentos, dentre os quais 31 foram mapeados, selecionados e serão discutidos neste estudo. Grande parte dos documentos selecionados são artigos científicos publicados em periódicos, sendo considerados os mais relevantes e com mais citações: Physica A - Statistical Mechanics and its Applications; Fire Safety Journal; e Safety Science. Nos estudos de simulação computacional de evacuação de pessoas, os modelos matemáticos microscópicos são os mais utilizados. Os *softwares* mais recomendados pela comunidade científica para simulações de evacuação em situação de incêndio são o PyroSim e o Pathfinder. As ferramentas computacionais elencadas podem auxiliar arquitetos e engenheiros na tomada de decisão, frente as diferentes situações e soluções projetuais, sendo um dos desafios recorrentes, tanto para normativas quanto para pesquisas, a determinação do tempo de evacuação de uma edificação em situação de incêndio.

Palavras-chave: Evacuação, Rotas de fuga, Saídas de emergência.

Abstract

This work seeks to bring together studies that address the topic of computer simulation in fire safety, through a systematic literature review. The search was carried out in electronic databases of full texts available on the CAPES Periodicals portal: SciELO, ScienceDirect (Elsevier), Academic Search Premier – ASP (EBSCO) and Digital Library of Theses and Dissertations (BDTD). The period defined in the search for bibliographic references was from 2015 to 2021 due to the contemporaneity of scientific knowledge. 207 documents were located, among which 31 were mapped, selected and discussed in this study. Most of the selected documents are scientific articles published in journals, being considered the most relevant and with the most citations: Physica A - Statistical Mechanics and its Applications, Fire Safety Journal and Safety Science. In computer simulation studies of evacuation of people, microscopic mathematical models are the most used. The software most recommended by the scientific community for fire evacuation simulations are PyroSim and Pathfinder.

The computational tools listed can help architects and engineers in decision making in face of different situations and design solutions, being one of the recurrent challenges, both for regulations and for research, determining the evacuation time of a building in a fire situation.

Keywords: Evacuation, Escape routes, Emergency exits.

¹ Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, <https://orcid.org/0000-0001-7715-6634>, ulianarq@gmail.com

² Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, <https://orcid.org/0000-0001-6622-2210>, rogerio@ufsm.br

³ Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, <https://orcid.org/0000-0002-1676-924X>, rene.rodriguez@ufsm.br

⁴ Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, <https://orcid.org/0000-0001-8249-403X>, fabiromano@gmail.com

INTRODUÇÃO

Historicamente, as legislações, normativas e decretos de segurança contra incêndio têm embasamento, a partir de estudos sobre os fenômenos ocorridos. No Brasil, além das normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), cada Estado possui legislações, decretos, regulamentos e normativas próprias, que guiam os profissionais nas etapas projetuais e o Corpo de Bombeiros, nas ações fiscalizadoras (1).

Frente ao cenário da segurança contra incêndio nas edificações, é de suma importância que as regulamentações sejam atualizadas periodicamente. Para isso, são muitas as ferramentas de modelagem computacional que auxiliam no processo de atualização das normativas, possuindo como embasamento, os parâmetros de desempenho, no intuito de reduzir as avaliações meramente prescritivas. Apesar da relevância do tema e da necessidade de desenvolvimento de estudos fundamentados em parâmetros de desempenho, poucos pesquisadores manipulam modelos de evacuação em nível nacional (1).

Os *softwares* computacionais servem para avaliar tanto projeto de edificações existentes quanto auxiliar na elaboração de novos projetos, visando analisar as interações e dinâmicas da multidão com a edificação, estimar o tempo de evacuação e simular o desenvolvimento de um incêndio, de forma a proporcionar maior segurança aos usuários (2, 3).

O presente trabalho tem como objetivo reunir estudos semelhantes que abordem a utilização de ferramentas de simulação computacional para a segurança contra incêndio, por meio de uma revisão sistemática de literatura, com recorte temporal entre 2015 e 2021, a fim de encontrar, no horizonte de pesquisas recentes, os principais autores, os assuntos contemporâneos e os principais periódicos voltados ao tema evacuação de edificações em situação de incêndio.

MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo evidencia uma pesquisa de natureza aplicada, do tipo mista (qualitativa e quantitativa), com viés exploratório, baseado na revisão sistemática de literatura, em que a pergunta formulada foi “quais são os parâmetros das variáveis controláveis e como eles influenciam no processo de evacuação de uma edificação em situação de incêndio?”, e o problema a ser resolvido foi “encontrar por meio da simulação computacional, dados, parâmetros, propriedades e/ou características das variáveis envolvidas que influenciam no processo de evacuação em situação de incêndio”.

Como base de controle nas buscas por materiais com temáticas de estudo similares, utilizou-se as publicações de Martins (4) e Montenegro (5), delimitadas durante a pesquisa inicial. Como resultado

esperado, buscou-se elencar trabalhos, autores e *softwares* de grande relevância para a temática de segurança contra incêndio, com foco no processo de simulação computacional da evacuação de edifícios.

As bases de dados eletrônicas, adotadas para as buscas, foram selecionadas por abordarem conteúdos e textos completos, disponíveis e indexadas no Portal de Periódicos CAPES, sendo elas: SciELO; ScienceDirect (Elsevier); Academic Search Premier - ASP (EBSCO); e a Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD), sendo que a revisão sistemática foi realizada entre os meses de maio de 2020 a julho de 2021.

Para as buscas, foram definidas as seguintes palavras-chave: simulação computacional; evacuação de edifícios; incêndio; rota de fuga; sinalização de emergência; e saída de emergência. Sabendo-se da universalização da língua inglesa no meio acadêmico e científico, optou-se pela busca das palavras-chave no idioma inglês para ampliar os resultados e a qualidade da pesquisa, sendo as seguintes palavras-chave (*keywords*): *computational simulation*; *evacuation of buildings*; *fire*; *escape route*; *emergency signaling*; e *emergency exit*.

A Tabela 1 apresenta as palavras-chave, bem como as *strings* utilizadas nas máquinas de buscas no processo de localização das publicações.

Tendo por base Haghani e Sarvi (6), as buscas nas bases de dados seguiram alguns critérios de inclusão e exclusão. Foram incluídos, na pesquisa, estudos que apresentaram métodos e técnicas definidas sobre o processo de evacuação em situação de incêndio, com o auxílio de *softwares* de simulação computacional, comumente utilizados pela comunidade científica e revisado por pares, que contivessem os termos de busca no título, resumo e palavras-chave. Excluiu-se estudos que apresentaram resultados sem uma metodologia definida. Considerou-se, para este estudo, trabalhos completos, artigos científicos, artigos de revisão bibliográfica, dissertações e teses, publicados e disponíveis em bases de dados eletrônicas, com o recorte já mencionado.

O mapeamento dos documentos foi realizado por meio da leitura dos títulos e resumos dos trabalhos localizados nas buscas. Para a seleção dos documentos foram seguidos os critérios de similaridade e aproximação do conteúdo abordado, ao estudo que se pretende desenvolver, considerando os objetivos das pesquisas e os modelos computacionais de simulação dos trabalhos pesquisados.

Por meio dos documentos selecionados, pôde-se encontrar as principais pesquisas publicadas na atualidade, os periódicos mais relevantes, os principais tópicos investigados na contemporaneidade e as particularidades de cada pesquisa.

Tabela 1 - Processo de buscas nas bases de dados.

Base de Dados	Palavras-chave / Strings de busca	Documentos localizados	Documentos selecionados	Tipo de documento	Identificação do documento conforme o número das referências desta pesquisa
SciELO	((COMPUTATIONAL SIMULATION) AND (EVACUATION OF BUILDINGS)) OR (FIRE) OR (ESCAPE ROUTE) OR (EMERGENCY SIGNALING) OR (EMERGENCY EXIT). Anos de publicação: 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021. Área Temática: Engenharias. Citável. Tipo de literatura: Artigos científicos e de revisão.	112	05	Artigo científico	1
				Artigo científico	8
				Artigo científico	9
				Artigo científico	5
				Artigo científico	23
ScienceDirect (Elsevier)	(computational simulation) AND (evacuation of buildings) AND (fire) AND (escape route) AND (emergency signaling) AND (emergency exit). Tipo de literatura: Artigos científicos e de revisão. Anos de publicação: 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021.	36	13	Artigo de revisão	6
				Artigo científico	13
				Artigo científico	17
				Artigo científico	18
				Artigo científico	19
				Artigo de revisão	21
				Artigo científico	22
				Artigo de revisão	24
				Artigo científico	25
				Artigo científico	28
				Artigo de revisão	29
ASP (EBSCO)	(computational simulation) AND (evacuation of buildings) AND (fire) AND (escape route) AND (emergency signaling) OR (emergency exit). Tipo de literatura: Artigos científicos e de revisão. Anos de publicação: 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021. Textos completos de revistas acadêmicas (analisadas por especialistas).	53	08	Artigo científico	3
				Artigo científico	10
				Artigo científico	11
				Artigo científico	12
				Artigo científico	14
				Artigo científico	16
				Artigo científico	20
				Artigo científico	33
BDTD	Evacuação de edifícios. Anos de publicação: 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021.	6	05	Dissertação de mestrado	2
				Dissertação de mestrado	4
				Dissertação de mestrado	5
				Dissertação de mestrado	7
				Dissertação de mestrado	26

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na pesquisa de revisão sistemática de literatura localizou-se 207 documentos, dos quais 31 foram mapeados e selecionados, sendo a maior parte relacionados a artigos científicos. Os 31 documentos selecionados compõem as referências da presente pesquisa, complementadas ainda pelos estudos de Cunha (27) e Fernandes (31), que foram localizados por uma busca direta na ferramenta Google Acadêmico.

Dentre os periódicos avaliados, os que abrangeram mais estudos sobre a temática foram: “*Physica A - Statistical Mechanics and its Applications*”, “*Fire Safety Journal*” e “*Safety Science*”, o que representa, aproximadamente, 39% dos documentos analisados.

Dentre os autores, os de maior relevância para a área de simulação computacional de evacuação e segurança contra incêndio, localizados durante a revisão de literatura, destacam-se em nível internacional Hui Xie, Ruggiero Lovreglio, Milad Haghani, Majid Sarvi e Edwin R. Galea e, em nível nacional, George Cajaty Barbosa Braga. Ainda, outros especialistas como Marcos Vargas Valentim, Rosaria Ono, Erica Kuligowski, Enrico Ronchi e Lazaros Filippidis foram citados nos referenciais teóricos dos trabalhos utilizados na revisão de literatura.

Os Parâmetros da Segurança Contra Incêndio

Em vista da segurança contra incêndio nos locais de reunião de público, os edifícios e/ou ambientes, independentemente das peculiaridades construtivas, apresentam uma probabilidade maior de incidentes e desastres, devido à alta concentração de pessoas.

Conforme Lima (7), locais com aglomeração de pessoas são complexos, pelo fato de que cada pessoa compreende e reage de uma forma diferente, frente as situações de evacuação de emergência e pânico, o que acaba dificultando espacialmente a organização de rotas e a movimentação ordenada de pessoas, para que o deslocamento ocorra dentro de um espaço de tempo seguro.

As legislações e normativas de segurança contra incêndio em edificações estão embasadas em diretrizes prescritivas ou diretrizes de desempenho. Para Hahnemann, Correa e Rabbani (8), Kater e Ruschel (9), as regulamentações com diretrizes prescritivas ditam as medidas de segurança, com base em dados dos fenômenos de incêndios ocorridos, classificando as edificações, segundo os critérios de área construída, altura da edificação e tipo de ocupação. Ainda, destaca Lima (7), que os arquitetos e engenheiros elaboram os projetos para atender às exigências das regulamentações, que norteiam como o edifício deverá ser arquitetado, construído e mantido.

As normativas, alicerçadas em parâmetros de desempenho, possibilitam a utilização de novos materiais e soluções tecnológicas para melhor atender a situação para a qual está sendo proposta, ou seja, determinar os requisitos de desempenho que um material ou sistema deve cumprir para satisfazer as exigências dos usuários em requisitos e critérios, desde que a segurança seja alcançada (7, 8, 9).

Um dos aspectos determinantes para a segurança de um local, segundo Rendón Rozo et al. (10), é o Plano de Prevenção e Proteção Contra Incêndio (PPCI), como é denominado em algumas regiões do Brasil, que visa orientar os ocupantes, por meio de parâmetros, para uma segura evacuação em caso de emergência. Para Martins, Rodrigues e Braga (1), os principais parâmetros que auxiliam no sucesso da rápida evacuação estão relacionados às sinalizações de emergência, rotas de fuga e saídas de emergência.

Segundo Lima (7), Gao, He e Gong (12) e Shao e Yang (11), as saídas de emergência estão diretamente associadas com o tempo de evacuação, ou seja, quanto maior a largura das aberturas e das rotas de fuga, maior será o fluxo de pessoas e, consequentemente, menor será o tempo gasto. Gao, He e Gong (12) mencionam, ainda, que o tempo de evacuação não depende apenas do *layout* das saídas, mas também, da distribuição dos ocupantes no ambiente.

Shao e Yang (11) afirmam que múltiplas saídas de emergência dificultam o processo de abandono do prédio, tornando a evacuação mais lenta. Segundo esses autores, o indicado seria ter o menor número plausível de saídas com o máximo possível de abertura. Para Lei e Tai (13) e Shi et al. (14), a localização da saída em uma edificação tem influência significativa no fluxo de pessoas durante o processo de evacuação.

Nos estudos elaborados por Shao e Yang (11) e Shi et al. (14), os resultados demonstraram que a localização mais eficiente para a saída de emergência de um ambiente ou edificação é em uma extremidade, canto e/ou esquina. Já no estudo desenvolvido por Khamis et al. (3), para uma sala retangular ou quadrada, a localização da porta de saída, que produz o menor tempo de saída, é obtida quando a porta está localizada no meio da largura da sala.

Na elaboração de um projeto arquitetônico, o posicionamento, o tamanho e a quantidade de saídas de emergência são elementos fundamentais na segurança contra incêndio das edificações. Para Braga, Moita e Almeida (15), um aspecto influenciado pelos parâmetros acima, é a distância média a ser percorrida pelos usuários, até as saídas mais próximas, durante uma fuga em uma situação de emergência.

Ainda, de acordo com Braga, Moita e Almeida (15), a distância a ser percorrida por um indivíduo até a saída mais próxima tem relação com a posição da pessoa no ambiente. Para eliminar a influência da posição inicial, deve ser considerada uma distância média para cada recinto, considerando todas as posições possíveis a serem ocupadas por apenas um indivíduo. Os autores salientam que a distância média não é tratada, satisfatoriamente, na literatura.

Relatam Lovreglio, Fonzzone e Dell' Olio (16), Król, A. e Król, M. (18), Rendón Rozo et al. (10) e Wu e Mizuno (17), que a análise do comportamento humano, como fluxo de multidões, contrafluxo, atraso pré-movimento, escolha de saída, fatores físicos, deficiências e psicologias em situações de emergência, é essencial para garantir a segurança, pois a tomada de decisão durante o processo de evacuação tem implicações diretas no sucesso ou no fracasso. As variáveis como a presença de fumaça e/ou chamas, fluxo luminoso da sinalização de emergência, visibilidade e distância até as saídas de emergência, o fluxo de evacuação e a concentração de pessoas próximas as saídas são condições que influenciam, significativamente, na tomada de decisão pela escolha da rota para deixar o local.

Segundo Chen, Liu e Wu (19), em caso de incêndio, o grande volume de fumaça gerada pode desorientar os ocupantes, impedindo de se livrar com sucesso. A visibilidade em uma cena de incêndio é essencial para as pessoas na edificação.

A iluminação de emergência e o fluxo de evacuação têm efeitos positivos para a escolha de uma saída, pois aumentam a disponibilidade funcional da saída (16). No entanto, a presença da fumaça e/ou chamas e concentração de pessoas próximas as saídas têm impacto negativo, diminuindo a probabilidade que a mesma seja a escolhida para a evacuação.

Outro fator que interfere negativamente no processo de evacuação é a rápida deterioração do ambiente e/ou edifício, que compromete o tempo disponível para a evacuação segura e as rotas de fuga (20). Para Rendón Rozo et al. (10), fatores como o *layout* do projeto arquitetônico, as condições do ambiente e a sinalização de emergência, interferem diretamente no desempenho para abandonar a edificação. Alternativas como a alteração de uma rota de fuga no processo de evacuação, poderá possibilitar mais rapidamente o acesso a uma saída segura e, conseqüentemente, reduzir o tempo total de evacuação.

Com a necessidade de atrair a atenção e direcionar os ocupantes de um edifício, em situação de emergência, para um caminho seguro no processo de evacuação, Galea et al. (20) desenvolveram um Sistema Dinâmico de Sinalização Ativa. Esse sistema, por meio de novos sinais incorporados à sinalização de saída de emergência, indica aos usuários do prédio, quais as rotas de fuga viáveis para levá-los a uma saída segura. Ainda, salientam Rendón Rozo et al. (10), a grande importância desse tipo de sinalização para indicar alternativas seguras e eficazes no processo de evacuação de uma edificação.

Durante o processo de evacuação de uma edificação, as pessoas tendem a apresentar um comportamento seguidor, influenciadas pelo deslocamento da multidão, abandonando suas visões e escolhas individuais de direção para agirem conforme o comportamento trilhado pelo grupo. No entanto, a direção de fuga escolhida nem sempre será a mais eficiente, podendo apresentar obstáculos e estar obstruída, diminuindo, assim, o tempo hábil para evacuação e segurança e, conseqüentemente, originar um incidente com vítimas (21).

O comportamento afetará diretamente a velocidade do fluxo das pessoas, o que afeta o tempo geral de evacuação (21). Destacam Khamis et al. (3) que a eficiência no processo da evacuação poderá ser aprimorada com o auxílio da orientação ativa da multidão, de forma a ter um líder-seguidor, podendo o mesmo ser um brigadista ou um indivíduo qualquer da sociedade com treinamentos e conhecimento do local, para guiar as pessoas a evacuarem pela saída mais próxima e eficiente.

Em síntese, a sinalização de emergência, a iluminação de emergência, as rotas de fuga e as saídas de emergência são consideradas os principais parâmetros da segurança contra incêndio em edificações, pois auxiliam e orientam as pessoas durante o processo de evacuação, até chegarem a um local seguro.

Nessa perspectiva, os programas computacionais são fortes aliados como ferramentas de auxílio para simular diferentes cenários de evacuação,

levando em consideração as características arquitetônicas da edificação; as variáveis como a fumaça e obstáculos; e as características da população, como velocidade, fluxo e fatores físicos, resultando, assim, em respostas para o tempo de evacuação da edificação, em determinada situação de incêndio e emergência.

Simulação Computacional na Segurança Contra Incêndio

Frequentemente, em nível mundial, surgem novidades tecnológicas e materiais que transformam o ambiente construído. Segundo Groner (22) e Martins, Rodrigues e Braga (1), a utilização de *softwares* de modelagem computacional de evacuação é comumente adotada na engenharia de segurança contra incêndio.

No âmbito nacional, a utilização dos *softwares* de simulação computacional ainda é pouco difundida entre pesquisadores, estudiosos e profissionais da área da segurança contra incêndio em edificações, o que impacta na carência de literatura em língua portuguesa especializada, disponível para aplicação dos programas, em novos estudos (23).

Diversos modelos para simulação foram desenvolvidos e aplicados até o momento, na tentativa de encontrar um esquema de evacuação eficiente. Acentuam Chen, Shi e Li (24), que com o avanço tecnológico, os modelos de simulações passaram a viabilizar diretrizes dos comportamentos e prever os resultados das pessoas frente as condições simuladas. Os mais conhecidos e usuais são os modelos macroscópicos e microscópicos (12, 17, 18).

Os modelos macroscópicos assemelham-se ao movimento humano do fluxo de fluído, em que as multidões são vistas como uma massa homogênea, considerando os evacuados como um número inteiro com as mesmas características, de modo que o desempenho da evacuação depende da velocidade do fluxo de multidão, densidade de multidão e fatores físicos da edificação. Já os modelos microscópicos, consistem nos moldes de autômatos celulares, modelo de força social, expressando parâmetros dinâmicos, capazes de desenvolver comportamentos e interações individuais, além da interação com os outros indivíduos na multidão (12, 17, 18, 21, 25, 26).

Salientam Gao, He e Gong (12), que os modelos microscópicos são largamente utilizados em estudos de dinâmicas de evacuação e auto-organização do fluxo de pessoas, devido à grande confiabilidade nos resultados, pois conseguem operar e simular detalhadamente, possibilitando a inserção de características e movimentos pessoais, por meio de caracteres matemáticos.

Existem diversos *softwares* de simulação computacional voltados para a análise dos modelos de evacuação de edifícios, com a possibilidade de inserir no modelo, parâmetros individuais, como a velocidade de movimento, largura dos ombros, condicionamento físico geral, sexo, idade e possíveis atrasos (4, 17, 18). Da mesma forma, ressalta Melo (2) que os modelos de simulações computacionais de pedestres possibilitam analisar as características relacionadas ao fluxo real das pessoas e seus princípios básicos.

Na Tabela 2, Cunha (27) e Montenegro (5) citam os *softwares* mais utilizados e a aplicabilidade geral de cada um, o que pode contribuir para a escolha de qual utilizar, para diferentes objetivos de simulações de incêndio.

Tabela 2 - Softwares utilizados em simulações de incêndios. (5, 27)

Software / Modelo	Descrição / Aplicabilidade
Allsafe	Modelo de abandono que inclui fatores humanos.
ASERI	Movimento de pessoas em geometrias complexas, incluindo resposta comportamental para crescimento de incêndio e fumaça.
EXODUS	Modelo de abandono que inclui a interação de pessoas em grandes geometrias.
CFast	Modelagem de crescimento de incêndios e transporte de fumaça.
EESCAPE	Evacuação de edifícios com múltiplos pavimentos, via escadas.
EGREES	Evacuação de pessoas em geometrias complexas.
EGRESS-PRO	Modelo de abandono que inclui o tempo de ativação de detectores e <i>sprinklers</i> .
ELVAC	Modelo de abandono para uso de elevadores.
EVACNET 4	Determina o plano de abandono mais eficaz em um edifício.
Evac	Modelo de simulação de evacuação para o <i>Fire Dynamics Simulator</i> (FDS). O <i>software</i> é usado para simular o movimento de pessoas em situações de evacuação.
EVACS	Modelo de evacuação que determina o projeto mais favorável.
EXIT89	Modelo de evacuação de edifícios altos.
EXITT	Modelo de abandono do tipo arco e nó, que inclui aspectos comportamentais dos ocupantes.
Fire Dynamics Simulator (FDS)	Modelagem da simulação de incêndio, baseado na dinâmica computacional dos fluidos.
Pathfinder	Modelagem de simulação de evacuação baseada em agente.
PyroSim	Modelagem de dinâmica de incêndio e controle de fumaça.
SAVE-P	Modelo de abandono que inclui obstruções no percurso.
SMARTFIRE	Modelagem da simulação de incêndio, baseado na dinâmica computacional dos fluidos.
SIMULEX	Modelo de abandono, baseado em coordenadas. Simula o abandono em edifícios com múltiplos andares.
Smokeview (SMV)	Modelo de visualização usado para exibir a saída das simulações de FDS e CFAST.
STEPS	Modelagem de evacuação.
WayOut	Parte de abandono do conjunto de programas FireWind.

Atualmente, na tentativa de fornecer soluções completas, em termos de projetos de segurança contra incêndio, os profissionais estão adotando e implementando *softwares* que utilizam a Tecnologia BIM (*Building Information Modeling*), como por exemplo o *software* Autodesk Revit. Evidenciam Kater e Ruschel (9), que o aplicativo possibilita a integração do modelo da arquitetura, sistema estrutural e sistemas de instalações complementares, tal como os sistemas de segurança contra incêndio, dentro do mesmo ambiente de trabalho, utilizando o conceito de família, para a organização dos objetos.

Segundo Chen, Liu e Wu (19) e Sun e Turkan (28), o BIM é uma plataforma para recursos de informação, integração, modelagem avançada e visualização, que poderá auxiliar no processo de tomada de decisão, de forma a identificar quais tecnologias e materiais serão eficazes na segurança contra incêndio, em relação ao uso de uma determinada edificação.

Destacam Ding et al. (21) e Zhu e Li (29) que, além da utilização das ferramentas BIM, podem-se adotar como técnicas promissoras as tecnologias de realidade virtual (VR) e realidade aumentada (AR), para o desenvolvimento de simulações. As tecnologias VR / AR poderão auxiliar os estudos que visam analisar as experiências e reações do comportamento das pessoas durante a evacuação de incêndio e emergência, bem como nos sistemas de gerenciamento de emergência e treinamentos de segurança. Com cenas computacionais dinâmicas e tridimensionais (3D), as pessoas conseguem interagir com o ambiente criado e fornecer *feedback* sobre ele. As cenas de incêndios simuladas usando VR / AR apresentadas em alguns estudos, são satisfatórias e positivas o suficiente para garantir que incêndios virtuais, fumaça e ruído sejam semelhantes aos de incidentes reais.

De acordo com Chen, Liu e Wu (19), os dados e informações de um modelo BIM poderão ser inseridos no *Fire Dynamics Simulator* (FDS), ou seja, um simulador da dinâmica do fogo, para obter uma previsão mais exata da situação do incêndio. O FDS é um *software* de simulação numérica, frequentemente utilizado na modelagem da ciência do fogo e no campo da engenharia de proteção contra incêndio, que adota a metodologia de análise da *Computational Fluid Dynamics* (CFD), ou seja, Dinâmica de Fluidos Computacional, capaz de representar, de forma aproximada, a dinâmica de um fluxo de fluidos, baseado em equações de estado (19, 30) que, neste caso, seria a fumaça.

Conforme Fernandes (31), parte das aplicações do FDS é para modelagem da dispersão de fumaça, assim como detectores de fumaça, calor e *sprinklers*. A outra parte de suas aplicações consiste nas reconstruções de incêndios por meio da simulação computacional.

Para Chen, Liu e Wu (19), a simulação de incêndio gera dados como temperatura, concentração de monóxido de carbono e perda de visibilidade causada pela fumaça. Para obter os dados, Martins, Rodrigues e Braga (1) e Radianti, Lazreg e Granmo (30) recomendam o uso do *software* Pyrosim, pois além de apresentar uma interface gráfica de fácil interação e compatível com o FDS, é uma alternativa mais rápida na elaboração de modelos construtivos complexos e acessíveis para a configuração dos cálculos. Ainda, Król, A. e Król, M. (18) indicam a utilização do Pyrosim + Evac.

No estudo desenvolvido por Lei e Tai (13) utilizando o FDS + Evac para modelar a seleção da rota de fuga dos evacuados em uma edificação de múltiplos pavimentos, observaram que as saídas de emergência devem estar voltadas para a escada, de forma a facilitar o processo de evacuação.

Com relação aos *softwares* para elaboração dos modelos de evacuação e modelos de incêndio, Martins, Rodrigues e Braga (1) indicam os *softwares* Pathfinder e PyroSim, por permitirem importação de desenhos do *Computer Aided Design* (CAD), capacidade de visualização e simulação em 3D, por serem do mesmo desenvolvedor, a Thunderhead Engineering.

O *software* Pathfinder oferece dois métodos de simulação, o modo SFPE e o modo *Steering*, para simular o comportamento e o movimento dos agentes durante o processo de evacuação. O modo SFPE é um modelo que aplica técnicas de modelagem baseadas em fluxo de escape. O modo *Steering* é um modelo baseado na metodologia de comportamentos de direção, sendo o mais utilizado e realista para simular o comportamento humano, pois analisa a prevenção de colisões e a interação do ocupante e, geralmente, mostra melhor concordância com os dados experimentais, do que o modo SFPE. Destacam Chen, Shi e Li (24), que o *software* possibilita a conexão em forma de agrupamento dos usuários com famílias, colegas de trabalho e outros indivíduos com relações sociais. Segundo Wang, Yu e Zong (32), o *software* automatiza e indica o percurso mais curto de qualquer local do ambiente até a saída de segurança.

Durante as simulações no processo de evacuação do público em um estádio de futebol, Wang et al. (25) avaliaram o comportamento dos agentes em situação de pânico e, de acordo com os fenômenos simulados, os resultados apresentaram alto percentual de veracidade comparado a um processo de evacuação real. Alvim (26) destaca que o pânico é uma crença recorrente no comportamento humano, durante o processo de evacuação de edificações.

Na simulação, Wang et al. (25) conseguiram identificar que durante o processo de evacuação, os agentes em situação de pânico se reuniram próximas as saídas conhecidas, se aglomerando em forma de arco e/ou semicírculo e não buscando uma outra saída alternativa. Alguns agentes que não apresentaram sinais de pânico, optaram por procurar uma saída alternativa, quando avistaram lentidão na saída de destino conhecida. Em situações de incêndio com a presença de obstáculos, o pânico aumenta consideravelmente o número de vítimas, quando comparado aos agentes que não apresentam sinais de pânico. Enfatizaram, ainda, que os agentes em situação de pânico, geralmente, seguem caminhos conhecidos, mesmo que eles estejam obstruídos pelo fogo.

Para encontrar os locais ideais das portas de saídas em edificação com várias salas, a fim de obter um tempo mínimo no processo de evacuação de agentes, Khamis et al. (3) desenvolveram um estudo inovador utilizando o algoritmo de Colônia Artificial de Abelhas (*Artificial Bee Colony* - ABC) e o Modelo de Força Social (*Social Force Model* - SFM) para avaliar o desempenho na eficiência da evacuação.

O Modelo de Força Social é muito utilizado para simular a dinâmica de multidões de médio e grande porte, possibilitando incluir os comportamentos sociopsicológicos em situação de emergência, aproximando os resultados dos dados reais. O modelo da Colônia Artificial de Abelhas, é um algoritmo de otimização meta-heurística de inteligência, baseado no enxame de abelhas para avaliar como uma população de agentes se deslocam, enquanto interagem entre si e com o ambiente, para encontrar as soluções locais e globais (3).

De acordo com os resultados obtidos na simulação, Khamis et al. (3) definiram que as saídas devem ser colocadas o mais longe possível umas das outras. Também afirmam que as portas de saída são fatores muito importantes em um projeto, para garantir a segurança das pessoas nos edifícios durante o processo de evacuação. Da mesma forma, definiram Braga, Moita e Almeida (15) que, no ambiente, as saídas devem ser localizadas o mais distante possível umas das outras, reduzindo a distância a ser percorrida.

No estudo com o algoritmo de otimização ABC, Khamis et al. (3) encontraram valores desejados para a velocidade de evacuação, sendo que em situações normais é de 1,0 m/s e, em situações de pânico, a velocidade chega próxima a 5,0 m/s. No entanto, a velocidade de evacuação depende das características do ambiente construído, do cenário e dos traços físicos, psicológicos e comportamentais do público envolvido (2, 26).

No estudo de caso realizado por Martins, Rodrigues e Braga (1), o dimensionamento dos acessos e portas não atenderam às exigências mínimas de segurança, durante o processo de evacuação para locais de reunião de público. Destacam, ainda, que nas simulações computacionais realizadas, os resultados de tempo de evacuação, dinâmica de movimento e taxa de fluxo avaliados, também não foram atendidos.

Na grande maioria, as pesquisas sobre a segurança contra incêndio, com utilização de *softwares* computacionais de evacuação, analisam parâmetros que podem auxiliar na otimização do tempo de evacuação dos agentes de uma edificação em situação de incêndio. No entanto, em edificações de grande porte e/ou de múltiplos pavimentos, a estratégia de evacuar os

agentes ao longo de um percurso até as saídas de emergência poderá se tornar inviável e aumentar as chances de exposição aos riscos (33).

Faturechi et al. (33) apresentaram modelos matemáticos que auxiliaram nas soluções para o projeto de abrigos em edifícios, juntamente com estratégias de fortalecimento estrutural de corredores, rotas de evacuação e saídas. Dessa forma, os usuários poderiam se proteger nos abrigos internos da edificação durante as emergências, minimizando os riscos de exposição até a chegada de ajuda.

Um dos problemas recorrentes nos estudos de simulação computacional é a previsão do comportamento humano (17, 18), em que as pessoas apresentam diferentes reações comportamentais quando expostas às situações de emergência e pânico (7). Destaca Alvim (26) que, durante um evento de incêndio, o evacuado pode não perceber a rota de saída ideal, por estar sob situação de estresse e pânico e, conseqüentemente, com a capacidade de raciocínio e reação limitadas.

Dessa forma, corroborando com Gao, He e Gong (12), salienta-se a importância e a necessidade de simular e desenvolver esquemas de evacuação que auxiliem os usuários na escolha da saída adequada, reduzindo o tempo e o desequilíbrio no processo de evacuação.

CONCLUSÃO

Por meio do presente trabalho de revisão sistemática foi possível elencar estudos e ferramentas de modelagem computacional, aplicadas ao processo de simulação de evacuação de pessoas de uma edificação em situação de incêndio.

Percebe-se a necessidade de fomentar pesquisas na área da simulação computacional aplicada aos modelos de evacuação de incêndio, com o emprego de parâmetros de desempenho, visto que existem poucos estudos em nível nacional.

Grande parte dos estudos de simulação foram realizados utilizando modelos microscópicos, pois conseguem operar e simular detalhadamente, possibilitando a inserção de características e movimentos pessoais, por meio de caracteres matemáticos. Comparando a aplicabilidade dos *softwares*, observou-se que os mais indicados para as simulações são o PyroSim, pois possibilita a modelagem dinâmica de incêndio e o controle de fumaça, e o Pathfinder, que consiste na modelagem de simulação de evacuação baseada em agente.

Vale salientar que, tanto as ferramentas BIM quanto as tecnologias de realidade virtual (VR) e realidade aumentada (AR), poderão auxiliar em estudos que visam analisar as reações e atitudes das pessoas durante a evacuação da edificação em situação de incêndio e emergência, visto que conseguem fornecer um “*feedback*” convergente aos de incidentes reais.

Além da modelagem matemática, é possível a utilização de algoritmos baseados em sistemas biológicos, como por exemplo, uma colônia de abelhas, pois permite estimar como a população de agentes se desloca, ao mesmo tempo que interage entre si e com o ambiente.

Podem-se identificar vertentes contraditórias entre os estudos selecionados, que divergem sobre a localização ideal para a saída de emergência de um ambiente ou edificação com formato retangular. Por exemplo, os resultados encontrados nos estudos de Shao e Yang (11) e Shi et al. (14), indicam que a localização mais eficiente para a saída de emergência é em uma extremidade, e Khamis et al. (3) concluíram que a localização da saída que produz o menor tempo é obtida, quando a mesma está localizada no meio da largura do ambiente.

Em síntese, os estudos mapeados e selecionados demonstraram que as saídas são elementos fundamentais para garantir a segurança das pessoas nos edifícios durante o processo de evacuação, e devem estar localizadas o mais distante possível umas das outras, de maneira que a distância a percorrer seja menor, considerando as diferentes posições das pessoas dentro do ambiente.

Um dos desafios recorrentes, tanto para normativas quanto para pesquisas, é a determinação do tempo de evacuação de uma edificação em situação de incêndio, devido as muitas variáveis envolvidas no processo. Diante do exposto, evidencia-se a importância de testar e adotar parâmetros de desempenho nas futuras atualizações das normativas e legislações, visando aumentar e garantir a segurança contra incêndio.

REFERÊNCIAS

1. MARTINS, Diego de Souza; RODRIGUES, Andréa Carla Lima; BRAGA, George Cajaty Barbosa. Modelagem computacional da dinâmica de evacuação em locais de reunião de público. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 19, n. 3, p. 147-164, jul./set. 2019. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212019000300330>
2. MELO, Erasmo Nunes. *O Efeito da simulação de evacuação de multidão na segurança e no estudo de Layout*. 2015. 70 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/16513>
3. KHAMIS, Nurulaqilla et al. Optimized exit door locations for a safer emergency evacuation using crowd evacuation model and artificial bee colony optimization. *Chaos, Solitons & Fractals*, v. 131, 109505, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2019.109505>
4. MARTINS, Diego de Souza. *Saídas de emergência horizontais em locais de reunião de público*. Estudo de casos na cidade de Campina Grande-PB. 2016. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2016. Disponível em: <http://www.ppgeca.ufcg.edu.br/dissertacoes-menu/dissertacoes-2016/send/16-dissertacoes-2016/48-saidas-de-emergencia-horizontais-em-locais-de-reuniao-de-publico-estudo-de-casos-na-cidade-de-campina-grande-pb>
5. MONTENEGRO, Mariana Lima Oliveira. *Análise de desempenho das saídas de emergência por meio de simulações computacionais: o caso de projetos de edifícios universitários*. 2016. 179 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/21567>
6. HAGHANI, Milad; SARVI, Majid. Crowd behaviour and motion: Empirical methods. *Transportation Research Part B: Methodological*, v. 107, p. 253-294, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2017.06.017>
7. LIMA, Maria Luiza Tremel de Faria. *Esvaziamento emergencial de locais ocupados por pessoas com mobilidade reduzida: estudo aplicado a edificações hospitalares*. 2017. 168 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/188704>

8. HAHNEMANN, A.; CORREA, C.; RABBANI, E. Evaluación de seguridad contra incendio: método alternativo aplicado a edificaciones brasileña. *Rev. ALCONPAT*, Mérida, v. 7, n. 2, p. 186-199, agosto 2017. <https://doi.org/10.21041/ra.v7i2.178>
9. KATER, M.; RUSCHEL, R. C. O potencial da verificação automatizada baseada em regras para as medidas de segurança contra incêndio em BIM. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 20, n. 4, p. 423-444, out./dez. 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212020000400481>
10. RENDÓN ROZO, Kelly et al. Modelling building emergency evacuation plans considering the dynamic behaviour of pedestrians using agent-based simulation. *Safety Science*, v. 113, p. 276-284, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.11.028>
11. SHAO, Zhi-Gang; YANG, Yan-Yan. Effective strategies of collective evacuation from an enclosed space. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, v. 427, p. 34-39, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.physa.2015.01.080>
12. GAO, Jin; HE, Jun; GONG, Jinghai. A simplified method to provide evacuation guidance in a multi-exit building under emergency. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, v. 545, 123554, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.123554>
13. LEI, Wenjun; TAI, Chuanmin. Effect of different staircase and exit layouts on occupant evacuation. *Safety Science*, v. 118, p. 258-263, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.05.030>
14. SHI, Xiaomeng et al. Verifying the applicability of a pedestrian simulation model to reproduce the effect of exit design on egress flow under normal and emergency conditions. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, v. 562, 125347, ISSN 0378-4371, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2020.125347>
15. BRAGA, Henrique Costa; MOITA, Gray Farias; ALMEIDA, Paulo Eduardo Maciel de. The Influence of the location of emergency exits over the distance to be covered to the exit of an environment. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 19, n. 2, p. 219-232, abr./jun. 2019. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212019000200318>
16. LOVREGGIO, Ruggiero; FONZONE, Achille; DELL'OLIO, Luigi. A mixed logit model for predicting exit choice during building evacuations. *Transportation Research Part A: Policy & Practice*, v. 92, p. 59-75, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tra.2016.06.018>
17. WU, Guan-Yuan; MIZUNO, Masayuki. The numerical analysis of mass evacuation in Taipei 101 with control volume model. *Simulation Modelling Practice and Theory*, v. 96, 101937, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2019.101937>
18. KRÓL, Aleksander; KRÓL, Małgorzata. The factors determining the number of the endangered people in a case of fire in a road tunnel. *Fire Safety Journal*, v. 111, 102942, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.102942>
19. CHEN, Xiu-Shan; LIU, Chi-Chang; WU, I-Chen. A BIM-based visualization and warning system for fire rescue. *Advanced Engineering Informatics*, v. 37, p. 42-53, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2018.04.015>
20. GALEA, Edwin R. et al. Evaluating the effectiveness of an improved active dynamic signage system using full scale evacuation trials. *Fire Safety Journal*, v. 91, p. 908-917, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.03.022>
21. DING, Ning et al. State-of-the-art high-rise building emergency evacuation behavior. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, v. 561, 125168, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2020.125168>
22. GRONER, Norman E. A decision model for recommending which building occupants should move where during fire emergencies. *Fire Safety Journal*, v. 80, p. 20-29, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2015.11.002>
23. TABACZENSKI, R. et al. Numerical simulation and fire experiment in residential dormitory. *Rev. ALCONPAT*, Mérida, v. 9, n. 1, p. 15-29, abr. 2019. <https://doi.org/10.21041/ra.v9i1.315>

24. CHEN, Jieyu; SHI, Tianxing; LI, Nan. Pedestrian evacuation simulation in indoor emergency situations: Approaches, models and tools. *Safety Science*, v. 142, 105378, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105378>
25. WANG, Jinhuan et al. Modeling and simulating for congestion pedestrian evacuation with panic. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, v. 428, p. 396-409, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2015.01.057>
26. ALVIM, Nathália Aquino. *Simulação numérica-experimental de movimentação de pessoas em situações de incêndio*. 2017. 87 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2017. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/9750/1/877320.pdf>
27. CUNHA, Leonardo Jorge Brasil de Freitas. *O desempenho da compartimentação horizontal seletiva na promoção da segurança contra incêndio em edificações*. 2016. 238 f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/21137>
28. SUN, Qi; TURKAN, Yelda. A BIM-based simulation framework for fire safety management and investigation of the critical factors affecting human evacuation performance. *Advanced Engineering Informatics*, v. 44, 101093, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2020.101093>
29. ZHU, Yiqing; LI, Nan. Virtual and augmented reality technologies for emergency management in the built environments: A state-of-the-art review. *Journal of Safety Science and Resilience*, v. 2, n. 1, p. 1-10, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jnlssr.2020.11.004>
30. RADIANTI, Jaziar; LAZREG, Mehdi Ben; GRANMO, Ole-Christoffer. Fire simulation-based adaptation of SmartRescue App for serious game: Design, setup and user experience. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, v. 46, p. 312-325, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2015.06.012>
31. FERNANDES, Cássio Spohr. *Implementação de modelos atualizados de gás cinza no software FDS para predição do fluxo de calor radiativo em incêndios*. 2018. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2018. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/184710>
32. WANG, Jiyun; YU, Xiaoyang; ZONG, Ruowen. A dynamic approach for evaluating the consequences of toxic gas dispersion in the chemical plants using CFD and evacuation modelling. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, v. 65, 104156, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2020.104156>
33. FATURECHI, Reza et al. Risk-based models for emergency shelter and exit design in buildings. *Annals of Operations Research*, v. 262, n. 1, p. 185-212, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10479-016-2223-3>

Submetido: 27/07/2021

Aceito: 11/01/2022