

Simulações de abandono de edificações: Uma revisão preliminar

Simulations of abandonment of buildings: A Review preliminary

Ritielli Berticelli(1), Silvio Edmundo Pilz(2), Marcelo Fabiano Costella(3)

1 Universidade de Cruz Alta, Rio Grande do Sul, Brasil.

E-mail: ritiberticelli@yahoo.com.br

2 Universidade Comunitária Regional de Chapecó, Santa Catarina, Brasil.

E-mail: silvio@unochapeco.edu.br

3 Faculdade Meridional – IMED, Rio Grande do Sul, Brasil.

E-mail: costella@unochapeco.edu.br

Revista de Engenharia Civil IMED, Passo Fundo, vol. 5, n. 1, p. 140-158, Jan.-Jun. 2018 - ISSN 2358-6508

[Recebido: Jan. 31, 2018; Aceito: Jun. 28, 2018]

DOI: <https://doi.org/10.18256/2358-6508.2018.v5i1.2433>

Endereço correspondente / Correspondence address

Ritielli Berticelli

Centro de Ciências Agrárias e da Saúde, Universidade de
Cruz Alta. Rodovia Municipal Jacob Della Méa, Km 5.6 –
Parada Benito

Cruz Alta / Rio Grande do Sul, Brasil.

CEP 98005972

Sistema de Avaliação: *Double Blind Review*

Editora-chefe: Luciana Oliveira Fernandes

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

Resumo

Os modelos de evacuação utilizados na construção civil são ferramentas empregadas para estipular o tempo necessário de evacuação de uma edificação, podendo ser utilizados em análises de engenharia de segurança. A aplicação e importância destes modelos têm crescido devido às suas possibilidades, principalmente com relação à prevenção, gestão e análise de situações de emergência, fatores fundamentais na proteção da vida humana. O objetivo deste trabalho consistiu em analisar como os modelos de simulação estão auxiliando na prevenção e proteção de incêndios, especificadamente na evacuação de edificações, tanto como medidas preventivas para novos projetos, quanto na simulação de acidentes ocorridos. O estudo consiste numa revisão bibliográfica na literatura científica disponíveis nas bases de dados. O desafio consistiu em investigar o mecanismo de gestão nas simulações de abandono relatado na literatura. Como conclusão, os modelos de evacuação são ferramentas que apresentaram dados muito próximos da realidade, podendo ser utilizados tanto para a avaliação dos projetos de edificações quanto nas simulações de eventos que já ocorreram.

Palavras-chave: Evacuação. Saídas de emergência. Simulação. Engenharia de segurança. Incêndio.

Abstract

The evacuation models used in construction are tools used to determine the time needed to evacuate a building and can be used in safety engineering analyzes. The application and importance of these models have grown due to their possibilities, especially in relation to the prevention, management and analysis of emergency situations, fundamental factors in the protection of human life. The objective of this study is to analyze how simulation models are supporting the fire prevention and protection, specifically in the evacuation of buildings, both as preventive measures for new projects, as wells as in accidents that have already occurred. The study consists of a literature review on the available scientific databases. The challenge will be to investigate the management mechanism to abandonment simulations reported in the literature. As a conclusion, the evacuation models are reporting tools very close to the reality, and can be used both for the evaluation of building projects and in the simulation of events that have already occurred.

Keywords: Evacuation. Emergency exits. Simulation. Safety engineering. Fire.

1 Introdução

A utilização e importância de modelos de simulação de evacuação têm crescido devido às suas possibilidades, capacidade de prevenção, gestão e análise de situações de emergência, bem como, pela contribuição em proteger a vida humana. O processo de evacuação é um fenômeno altamente aleatório, que é sujeito à variabilidade de comportamentos humanos e outros fatores de risco referentes a uma emergência (ALVEAR et al., 2014).

O elemento das rotas de fuga de uma edificação é considerado o fator o mais importante no processo de segurança do trabalhador, estando diretamente associado à segurança e a proteção à vida humana. Na ocorrência de incêndios, por exemplo, a sua confiabilidade necessita ser mais elevada se comparada a os outros sistemas, uma vez que, a evacuação não permite falhas do ponto em vista a incolumidade dos usuários (BERTO, 1991).

As variáveis utilizadas para o dimensionamento das saídas estão relacionadas diretamente ao tempo necessário para abandono da edificação. Neste sentido, as dimensões das saídas devem possibilitar que um determinado número de indivíduos abandone um local, antes que as condições ambientais se tornem críticas. Assim, Kuligowski (2013) cita que, para calcular o tempo que estes indivíduos levam para abandonar uma edificação, faz-se necessário que os profissionais responsáveis pelo projeto façam uso de cálculos manuais ou modelos de simulação por computador. Desta maneira, a estrutura pode ser considerada segura quando o grupo de indivíduos atingirem um lugar considerado seguro antes que as condições do meio ambiente se tornem impróprias.

Em qualquer incêndio, existem alguns ocupantes que não são capazes de auto evacuar sob quaisquer circunstâncias, tais como ocupantes com alguma deficiência ou intoxicados. Ainda assim, pesquisas sobre lesões e mortes em incêndios de edificações mostram que mais de dois terços dos feridos e mais da metade dos mortos poderia ter evacuado, mas em vez disso atuaram na realização de atividades que atrasaram a sua segurança, incluindo a luta contra o fogo, a tentativa de resgatar outras pessoas, e se mudar para segurança em condições insustentáveis, tóxicos dentro do edifício (HALL JÚNIOR, 2004).

Estas realidades levantam dúvidas se realmente os edifícios fornecem o nível necessário de segurança para os ocupantes em casos de incêndio. Os engenheiros de proteção e consultores do assunto usam técnicas de cálculo para avaliar a segurança fornecida por um prédio. Isto é feito através da utilização de cálculos manuais ou modelos de simulação de computador para calcular quanto tempo uma população levaria para evacuar de um local. E ainda, se a população atinge a segurança antes das condições do edifício tornarem-se tóxicas (KULIGOWSKI, 2013).

Tão impressionante quanto estes cálculos e técnicas possam parecer, a maioria torna as suposições imprecisas sobre a forma como os seres humanos respondem durante as emergências (KULIGOWSKI et al., 2010; SANTOS; AGUIRRE, 2004).

Determinar a velocidade de deslocamento das pessoas em situações normais pode ser uma tarefa fácil. Entretanto, em situações de incêndio, essa tarefa torna-se extremamente complexa devido aos vários fatores que podem interferir nesse processo tais como: a familiaridade com o edifício, os aspectos comportamentais das pessoas, a densidade de ocupação, a presença de chama e fumaça, entre outros. Os cálculos para avaliar o processo de abandono das pessoas estão se tornando parte dos projetos baseados em desempenho e têm por objetivo garantir o dimensionamento dos meios de escape, assegurando um abandono satisfatório das pessoas e evitando assim gargalos, congestionamentos, entre outros (VALENTIN, 2008).

Costa (2012) afirmou que esta velocidade de deslocamento ou o tempo total para se evacuar uma edificação não é fácil de se determinar, em função de diversas variáveis que permeiam uma situação de emergência, mesmo o autor tendo realizado diversas simulações reais de abandono.

Diante desta realidade, com uma abordagem rumo aos códigos baseados em desempenho, tal como as exigências da NBR 15575 (ABNT, 2013) e, a fim de se compreender seu campo de utilização, uma descrição da classificação dos modelos para incêndio e abandono, mesmo que concisa, se faz necessária. O objetivo do presente estudo foi analisar como os modelos de simulação estão auxiliando na prevenção e proteção de incêndios, especificadamente na evacuação de edificações, tanto na utilização de medida preventiva em novos projetos, quanto na simulação de acidentes que já ocorreram.

2 Metodologia

O presente estudo consistiu numa revisão bibliográfica e utilizou fontes secundárias na coleta de dados, sendo que para isso, foram realizadas consultas em trabalhos e artigos de base científica disponíveis no Portal de Periódicos da Capes além de dissertações, teses e livros.

Inicialmente foi realizada uma revisão da literatura sobre uma contextualização das saídas de emergência em edificações e sobre os principais problemas de evacuação. Após, foram identificados, por meio da literatura, os métodos e ferramentas de simulações de abandono. Para contemplar o estudo foram levantados os princípios gerais da simulação e investigado o mecanismo de gestão nas simulações. Através destes relatos, foram identificados os principais fatores que influenciam nas situações de abandono e apresentados estudos de caso de utilização de modelos de simulação de abandono.

3 Simulações de abandono

3.1 Saídas de emergência em edificações

As legislações brasileiras relativas à segurança contra incêndio, assim como aconteceu em outros países, foram regulamentadas somente após acontecimentos de eventos considerados trágicos. Segundo Mattedi (2005), a preocupação dos órgãos públicos brasileiros com a adoção de medidas de segurança contra incêndio somente surgiram a partir dos grandes incêndios ocorridos, principalmente, em São Paulo, como o ocorrido no Edifício Andraus (1972) e no Edifício Joelma (1974).

Em 1974 a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) aprovou a Normativa Brasileira (NB) 208, que segundo especialistas, apresentava muitas falhas nas saídas de emergência em edifícios altos, entretanto, sendo o início da normatização referente a saídas de emergência no Brasil. Em 1985 a NB-208 foi encaminhada para o INMETRO para registro como norma probatória sob número NBR 9077/85, intitulada como Saídas de emergência em edifícios, estendendo as exigências a todas as edificações, em contrapartida à NB-208/74 que exigia somente para edifícios com mais de 20 metros de altura (FAILLACE, 1991). Ainda em vigor, a NBR 9077 (ABNT, 2001) continua sendo a principal normativa que trata do assunto presente na legislação Brasileira.

A NBR 9077 estabelece um método prescritivo para definir e dimensionar as saídas de emergência, uma metodologia que estabelece uma certa capacidade das saídas para suportar um número de pessoas num determinado tempo. A norma corresponde ao método prescritivo de dimensionamento, no qual são fixadas características construtivas, limites de dimensões e distâncias máximas a serem percorridas, que são resultados de anos de tradição e experiência construtiva, sem estabelecimento claro de como estes requisitos atendem as metas de segurança (LUNDIN, 2004; SFPE, 2000). Muitas vezes essas regras acabam engessando os projetos.

As regulamentações prescritivas são aplicadas de forma simplificada, porém, em determinadas situações onde a característica do usuário e de sua interação com a edificação é mais complexa, tornando a aplicação limitada. Não se faz referências com relação à saúde da população, a sua mobilidade, seu estado de atenção e seu treinamento em situações de incêndio, por exemplo (CLARET; ESTRUSCO, 2002).

Outra normativa que aborda o tema do abandono de edificações é a NBR 15219 (ABNT, 2005), que padroniza os planos de emergência contra incêndio, estabelecendo os requisitos mínimos para a elaboração, implantação e revisão dos processos. No item 4.2.2 – Exercícios simulados, a norma exige a realização de exercícios simulados de abandono, parciais e completos, com a participação de toda a população residente.

Visando diminuir esse panorama prescritivo, desde a década de 70, muitos países estão aplicando projetos baseados no desempenho das edificações. A principal

característica é a flexibilidade das soluções na elaboração dos projetos de segurança contra incêndio para saídas de emergência, através do desenvolvimento de ferramentas computacionais, tecnologia de produtos e aplicação da engenharia de incêndio, são comprovadas tecnicamente as soluções de escape adotadas (MATTEDI, 2005).

Os projetos baseados em desempenho são ferramentas importantes devido a considerar fatores como característica do material empregado na edificação, a distância percorrida pelos usuários, a quantidade de habitantes e o uso da edificação. Já em soluções prescritivas esses conceitos não podem ser aplicados, pois apresenta somente uma solução para cada situação de projeto. Por exemplo, uma norma prescritiva de saídas de emergência define a distância máxima a ser percorrida por um usuário de uma edificação, levando em consideração somente o tipo de ocupação. Analisando o mesmo caso através do desempenho, nota-se que outros fatores devem ser levados em consideração, como a geometria da edificação, o cenário de incêndios (como o fogo se propaga) bem como as características físicas e psicológicas dos habitantes (WAGNER, 2008).

Segundo Kalay (1999), a eficácia dos sistemas de segurança projetados através do método prescritivo de segurança contra incêndio com relação ao desempenho não pode ser determinada. Os resultados fornecidos pelas normas são aplicados à edificação aceitando as indicações propostas. Por outro lado, o projeto de segurança baseado em desempenho, estabelece as metas e os critérios de desempenho, provando através de procedimentos de cálculo e da aplicação da engenharia de incêndio se os objetivos foram alcançados. Não há um único resultado, podendo ser apresentado novas soluções tecnológicas.

Os projetos baseados em regulamentação prescritiva adotam uma estrutura linear de elaboração, onde são identificadas as características da edificação, e aplicados os sistemas necessários de acordo com as exigências normativas garantindo a segurança mínima. Já no projeto baseado em desempenho, são estabelecidos objetivos de segurança que devem ser atendidos e não prescritos, recorrendo-se, para tal, as ferramentas computacionais capazes de simular as diversas situações de interesse e que deverão ter aceitação por parte do projetista e do corpo de bombeiros (CASTANHEIRA, 2001).

Para Tavares (2008) o uso de normas prescritivas são adequadas para obter resultados satisfatórios para cenários mais simples com pequena população, mas em cenários mais complexos, onde há locais com maior população o uso de modelos computacionais de simulação de abandono é mais adequado.

Uma normativa relativamente recente baseada no método de desempenho é a NBR 15.575 (ABNT, 2013) – Desempenho de edificações habitacionais – que traz para o desenvolvimento dos empreendimentos residenciais preocupações com a expectativa de vida útil, o desempenho, a eficiência, a sustentabilidade e a manutenção dessas edificações, inserindo dessa maneira o fator qualidade ao edifício entregue aos usuários.

As simulações de abandono são mais baseadas no método do fluxo (um método mais baseado em desempenho) e então vão de encontro a NBR 15.575 que apesar de não estabelecer quais são os critérios de avaliação de desempenho, há um esforço em direcionar que todos os projetos sejam baseados em desempenho.

3.2 Problemas de evacuação em edificações

Um incêndio ocorrido no Lakewood Grammar School em Ohio, EUA, em 1908, deixou 175 vítimas fatais, e outro, em uma escola primária em Chicago, EUA, em 1958, deixou um saldo de 95 mortos, sendo que 93 eram crianças (ONO, 1997).

Desde muito tempo, estudos vêm sendo realizados mostrando problemas de meios de escape em edifícios. Em 1952 um estudo foi publicado que fez referência a um incêndio do *Empire Palace Theatre* em Edimburgo, ocorrido em 1911, na Escócia. A partir deste evento, fora estabelecido que o tempo máximo para abandonar um ambiente em situações de risco, deveria ser inferior a 2,5 minutos. A partir desta definição de tempo para abandono, recomendava-se a largura mínima para as saídas de um ambiente de 21 polegadas (0,53 m) para cada 40 pessoas. O estabelecimento deste tempo máximo, passou a ser considerado uma referência para os projetos de meios de escape. Este parâmetro foi adotado até que o General do *Service Administration* do Reino Unido, estabeleceu que as pessoas deveriam alcançar uma área protegida em um período de até 90 segundos, contados a partir do acionamento do sistema de alarme (PURSALS, 2005).

Em seguida, um estudo que serviu de base para o entendimento do processo de fluxo de tráfego de pedestres foi realizado na União Soviética. Segundo Predtechenskii e Milinskii (1978), o *Institute of Architecture of the Russian Academy of Arts* (VAKh), em 1937, estudou o tráfego de pessoas utilizando parâmetros científicos. Neste trabalho foram feitas aproximadamente 200 séries de observações em locais públicos, a fim de estudar a velocidade e a capacidade de tráfego. Com base nestes resultados, recomendações foram feitas para cálculos e regulamentações de abandono de pessoas em edifícios, sendo essas: para circulações horizontais a velocidade de 0,26 m/s, para escadas descendentes 0,16 m/s e 0,13 m/s para escadas ascendentes.

Um outro estudo, desenvolvido em Moscou, tratou de forma singular os princípios para se planejar a circulação das pessoas em edifícios apresentando fórmulas para estimar tempos de abandono em várias situações. Esse trabalho foi fruto da análise de observações de movimentos de pessoas em situações normais e de emergência (PREDTECHENSKII; MILINSKII, 1978). Os autores apresentaram um conjunto de expressões que determinam a velocidade em função da densidade para três tipos de condições de movimento: normal, confortável e o de emergência. Coelho (1997) define esse estudo como sendo o mais completo de todos os existentes sobre o movimento de pessoas em edifícios, quer em situações normais, quer em situações de emergência.

A partir da década de 60, as pesquisas também começaram a relacionar os efeitos da fumaça gerada por incêndios em edifícios, devido às altas taxas de mortes causadas pelos efeitos da fumaça nas pessoas envolvidas nestas ocorrências. Segundo Ono (1997), pesquisadores vem realizando trabalhos desde os anos de 1960, baseados em pesquisas experimentais, concentrando-se em três principais pontos: visibilidade sobre condições de fumaça; comportamento humano sobre condições de fumaça; eficiência das sinalizações de saída e dos sistemas de direcionamento ativo para escape em edifícios. Sob condições experimentais, Jin descobriu que ao encontrar fumaça, além da redução da velocidade de caminamento, o movimento das pessoas torna-se mais e mais ineficiente ao longo de um corredor preenchido por fumaça.

Bryan (2002), Proulx (2002) e Bukowski (2009) apresentaram dados históricos sobre o dimensionamento de rotas de fuga, explicando a origem dos principais valores de larguras de saídas e respectivos fluxos de pessoas, alguns dos quais persistem até hoje, como normas e regulamentações e outros documentos que foram estabelecidos a partir do Século XX.

Alguns outros estudos que influenciaram no dimensionamento das saídas de emergência foram surgindo ao longo do século XX, como por exemplo, o relatório britânico *Post-War Building Studies e Fire Grading of Buildings* (BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT, 1992), o trabalho de Fruin (1987) realizado nos EUA e o estudo de Predtechenskii e Milinskii (1978) realizado na Rússia.

3.3 Modelos de simulação de abandono de edificações

Uma das ferramentas utilizadas para avaliar os meios de escape em projetos baseados em desempenho, a fim de avaliar o tempo necessário para que as pessoas possam abandonar o edifício, antes que as condições ambientais se tornem críticas, são os modelos matemáticos de abandono (VALENTIN, 2008).

Os modelos de evacuação são ferramentas utilizadas para calcular o tempo necessário para evacuar uma edificação, podendo ser utilizados em análises de engenharia de segurança. No entanto, há falta teoria e incerteza de dados disponíveis sobre o comportamento dos ocupantes na utilização de modelos de evacuação para estimar resultados em tempo de evacuação e o comportamento dos usuários (KULIGOWSKI, 2013).

Para que os resultados obtidos pelas simulações sejam adequados deve ser definido um número apropriado de simulações, já que às variáveis analisadas pelos *softwares* são muitas. O número mínimo de simulações deve ser de 20 para cada cenário (RONCHI e NILSSON, 2013)

Segundo Ono e Valentin (2006), para ocorrer uma evacuação satisfatória, além das proteções passivas e ativas, faz-se necessário conhecer o comportamento e o movimento das pessoas em situação de incêndio.

Nas últimas décadas o uso de modelos de egresso para a gestão de situações de emergência em diferentes situações e cenários tem crescido (ALVEAR et al., 2014; KULIGOWSKI et al., 2010; CASTLE, 2007; SANTOS; AGUIRRE, 2004; GWYNNE et al., 1999).

Os modelos superam as dificuldades ou impossibilidades de realizar exercícios de simulação de evacuação realistas para diferentes ambientes, permitindo dessa forma que novas estratégias de prevenção e segurança humana sejam obtidas. Esses modelos permitem a simulação de diferentes cenários, considerando as características do cenário, pessoas envolvidas e condições de emergência. As finalidades dessas simulações objetivam reconstruir um processo de evacuação que ocorreu no passado, a fim de analisar possíveis falhas e ineficiências; e também com finalidade de gestão, onde o uso de modelos permite simulações em tempo real a fim de estabelecer uma gestão eficiente e rápida durante procedimentos de evacuação (ALVEAR et al., 2014).

Os modelos de abandono são frequentemente utilizados nos códigos baseados em desempenho como solução alternativa aos códigos prescritivos, a fim de determinar quais são as áreas críticas durante o processo de abandono, assim como o tempo de abandono. Eles preveem o tempo necessário para os ocupantes abandonarem um edifício (VALENTIN, 2008).

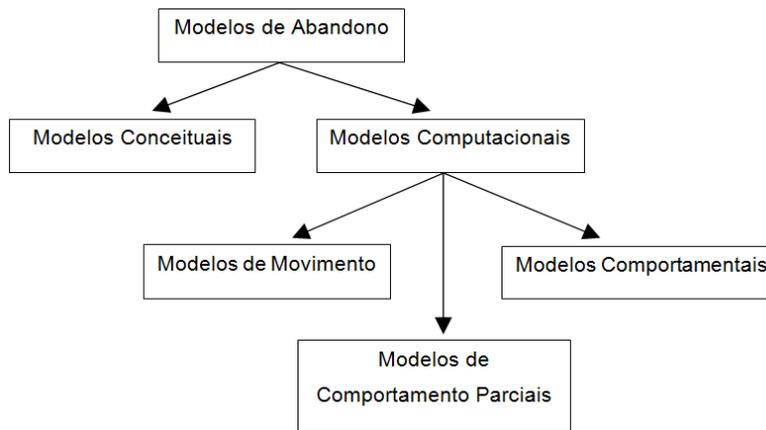
Muitas pesquisas têm sido realizadas a fim de identificar e classificar os modelos matemáticos para simulação de incêndio, transporte de fumaça e abandono de local. Friedman (1992) é considerado o pioneiro na literatura. O autor identificou 74 modelos matemáticos, tornando-se uma fonte de referência para os profissionais da engenharia de segurança contra incêndios.

Trabalhos conduzidos por Olenick e Carpenter (2003) atualizaram o levantamento de Friedman (1992) e identificaram 168 modelos matemáticos provenientes de vários países. Os modelos foram classificados em: modelos de zona; modelos de campo; modelos para detecção de incêndio; modelos de abandono; e modelos de resistência ao fogo da estrutura. Os autores identificaram 16 modelos de abandono.

Pelechano e Malkawi (2008) apresentam um trabalho interessante, que discute o uso de modelos de evacuação para simulação dos processos de evacuação na construção de alta ascensão. A novidade foi que os modelos de evacuação começaram a considerar a influência das ações térmicas e tóxicas de incêndio. Normalmente, as ações mencionadas são determinadas para métodos avançados de simulação de incêndio.

Kuligowski (2003) classificou os modelos de abandono em modelos conceituais e computacionais. A Figura 1 apresenta esta classificação dos modelos de abandono.

Figura 1. Organização dos Modelos de Abandono



Fonte: Adaptado de Kuligowski (2003).

♦ Modelos comportamentais

Um modelo computacional de comportamento que tenta simular evacuação em edificações deve ser capaz de prever duas coisas. A primeira é a capacidade de prever as ações dos ocupantes (simulados) e a segunda é a capacidade de prever quanto tempo leva para a que todos os ocupantes abandonem a edificação (KULIGOWSKI, 2013).

O próximo passo para alcançar um modelo de comportamento está atribuído ao desempenho de ações individuais ou grupais. Para esta etapa, uma investigação adicional é necessária. Estudos empíricos de incidentes reais (PROULX et al., 2003; BRENNAN, 1997) e exercícios de evacuação (PURSER; KUIPERS, 2004; PURSER, 1998) fornecem estimativas de tempo para o período de pré-evacuação. Além disso, alguns estudos tentam prever quanto tempo as pessoas atrasam antes de evacuar (AGUIRRE, et al., 1998, KULIGOWSKI; MILETI, 2009).

Atribuição de tempos para ações específicas é uma tarefa difícil. Para alguns comportamentos, os tempos de evacuação dependem do cenário ou das condições específicas do edifício. Uma complexidade adicional pode ser introduzida pelas cognições do indivíduo, tais como, a percepção de risco, que pode aumentar ou diminuir o tempo gasto realizando ações específicas ou o período da pré-evacuação. Finalmente, uma vez em um modelo é desenvolvido, um processo de validação extensa precisará ser executado. Primeiro, o modelo deve ser comparado com outros modelos similares. O modelo também deve ser testado por sua capacidade de prever ações de pré-evacuação de ocupante em futuras emergências — ambos de populações e tipos de construção diferentes. Validar as conclusões dos modelos aumentará sua aplicabilidade para uma ampla variedade de problemas de design. (KULIGOWSKI, 2013).

Os modelos de comportamento parcial são aqueles que basicamente calculam o movimento das pessoas, mas também introduzem alguns comportamentos menos complexos, como a inserção do tempo pré-movimento nos ocupantes e o comportamento de ultrapassagem (ONO, 2010).

♦ Modelo de movimento

Segundo Valentin (2008), os modelos de movimento são aqueles que simulam o deslocamento do ocupante de um ponto no interior do edifício para outro ponto, geralmente para uma saída ou uma posição segura. Esses modelos são importantes para avaliar as áreas em que haverá congestionamento, filas ou gargalos dentro de um edifício simulado. As premissas básicas desses modelos são a de que: todos os ocupantes iniciam o abandono ao mesmo tempo; o fluxo dos ocupantes não sofre nenhuma interrupção durante o processo de abandono; as pessoas não possuem nenhuma deficiência e desta forma possuem uma mobilidade completa.

Kuligowski e Peacock (2005) avaliaram os modelos de abandono com o objetivo de auxiliar os profissionais envolvidos na elaboração de projetos de segurança contra incêndio a escolher o modelo mais apropriado para seu projeto em particular. A pesquisa forneceu informações sobre a proposta de cada modelo, a disponibilidade do modelo para uso, método de modelação, estrutura e perspectiva do modelo, métodos para simulação do movimento e comportamento dos ocupantes, dados de saída, uso de dados de incêndio, uso de visualização e projetos em *Computer-Aided Design (CAD)*, etc. Os autores apresentaram uma revisão de 28 modelos de abandono.

Os modelos de movimento, segundo Ono (2010), baseiam-se em uma população homogênea, portanto, velocidade e fluxo homogêneos e distribuição equilibrada da população para as saídas, em fluxo contínuo (modelo de fluxo hidráulico). Este modelo é utilizado para verificar áreas de congestionamento e gargalos no edifício. É também uma característica desse modelo o fato de que os ocupantes são considerados com mobilidade completa e não sofrem nenhuma interrupção durante o abandono da edificação.

Já os modelos de abandono de comportamento parcial, de acordo com Valentin (2008), são como aqueles que inicialmente calculam o movimento dos ocupantes. Entretanto, começam a simular comportamentos menos complexos, como a inserção dos tempos de pré-movimento entre os ocupantes e comportamento de ultrapassagem.

Nos modelos comportamentais são caracterizados por incorporar ações dos ocupantes durante o trajeto para abandono da edificação. Esses modelos podem atribuir o poder de decisão aos ocupantes para o desempenho de ações em função das condições existentes em cada projeto. Por ser individualizado, o ocupante pode receber características próprias que podem variar de modelo para modelo, incluindo desde fatores como velocidade de caminamento, idade e gênero até outros mais complexos (ONO, 2010).

Kuligowski, Peacock e Hoskins (2010), realizaram estudos com o objetivo de auxiliar os profissionais de engenharia de incêndio na escolha de um modelo computacional de abandono mais apropriado para o seu projeto. No Quadro 1 pode ser verificado os modelos elencados no estudo.

Quadro 1. Exemplos de modelos de abandono

Modelo	Método de ^a modelagem ^a	Finalidade ^b
EVACNET 4	M-O	1
WAYOUT	M	5
STEPS	C	1
PEDROUTE	CP	3
Simulex	CP	1
GridFlow	CP	1
FDS+Evac	CP	1
Pathfinder 2009	CP	1
SimWalk	CP	1,3
PEDFLOW	C	1
PedGo	CP/C	1
ASERI	C-AR	1
BuildingEXODUS	C	1
Legion	C	1
SpaceSensor	C	3
EPT	C	1
Myriad II	C	1
MassMotion	C	1
Pathfinder	M	1
ALLSAFE	CP	5
CRISP	C-AR	1
EGRESS 2002	C	1
SGEM	CP	1
EXIT89	CP	1
MASSEgress	C	1
EvacuationNZ	C	1

^aMétodo de modelagem:(M): Modelo de movimento; (M-O): Movimento/modelo de otimização; (CP): Modelo comportamental parcial; (C): Modelo comportamental; (C-AR): Modelo comportamental com capacidade de avaliar riscos. ^bFinalidade: 1) Modelos que simulam qualquer tipo de edificação; 2) Modelos especializados em residências; 3) Modelos especializados em estações de transporte público; 4) Modelos capazes de simular edifícios baixos (até 15 pavimentos); 5) Modelos que simulam somente uma rota/saída da edificação.

Fonte: Adaptado de Kuligowski, Peacock, Hoskins (2010).

Dentre os softwares conhecidos para simular computacionalmente o incêndio, um dos mais utilizados devido à sua precisão é o *Fire Dynamics Simulator* (FDS), desenvolvido pelo NIST (*National Institute of Standards and Technology*). O FDS é um modelador de incêndio com base em dinâmica computacional de fluidos (*Computational Fluid Dynamics* - CFD). Ele resolve numericamente uma forma das equações de Navier-Stokes apropriada para baixa velocidade (REHM & BAUM, 1978),

com fluxo termicamente dirigido e com ênfase no transporte de calor e fumaça dos incêndios. O Smokeview é um programa de visualização que é usado para mostrar os resultados da simulação FDS. (McGRATTAN, 2006).

3.4 Estudos de caso de modelos utilizados em simulação de evacuação de edificações

Os modelos de abandono atuais possibilitam a simulação de vários cenários para o movimento de evacuação num edifício, direcionando os projetos de saídas de emergência. Os dados de entrada que compõem os cenários incluem as características do edifício, como número de pavimentos, distribuição dos ambientes, etc. Além disso, os modelos também podem considerar as características dos seus ocupantes, como número de pessoas, dados antropométricos, perfil, etc. (ONO, 2010).

O primeiro modelo a atingir uma grande aplicabilidade, devido à sua simplicidade física e computacional, foi o de duas camadas. Ele é um modelo para simulação de incêndio em ambientes construídos e divide o espaço em dois volumes: a camada superior quente e a camada inferior fria. Ele permite o cálculo de distribuição de fumaça, bem como altura da camada de fumaça e a sua temperatura por meio dos compartimentos de uma edificação durante um incêndio (JONES et al., 2005).

Os modelos também podem ser utilizados para investigar casos de incêndios que já ocorreram. No Brasil o software FDS e o Smokeview foram utilizados como ferramenta de auxílio à perícia, como no incêndio ocorrido em 2007 no Distrito Federal e que vitimou duas crianças, deixando seriamente ferido mais uma pessoa. O modelo foi construído levando-se em consideração a geometria da construção e as propriedades térmicas dos materiais utilizados, permitindo visualizar como pode ter ocorrido o incêndio. O modelo computacional foi comparado com as marcas de queima encontradas na cena do incêndio e com as informações prestadas pelas testemunhas e bombeiros. Quando os modelos foram executados, as marcas de queima apresentadas no incêndio real ficaram muito próximas às marcas verificadas no caso do cenário analisado pelo programa (SEITO et al., 2008).

Valentin (2008) realizou algumas simulações de abandono por computador para quatro escolas, utilizando o modelo matemático denominado “*buildingExodus*”, com o objetivo de avaliar as saídas de emergência e contribuir para o aprofundamento e a divulgação do conhecimento sobre o assunto. O autor concluiu que o uso de modelos matemáticos para simulação de eventos e avaliação de suas consequências está cada vez mais presente, principalmente para avaliar os projetos mais complexos. Esses modelos são ferramentas úteis e podem contribuir para que os edifícios sejam projetados de maneira racional e com um nível igual ou superior de segurança se comparado aos projetos que seguem os modelos prescritivos.

Purser e Boyce (2009) apresentaram uma discussão sobre a relação entre modelagem e os estudos experimentais de comportamento durante a evacuação em escadas, comparando estes dados com os parâmetros definidos no código vigente no Reino Unido para dimensionamento de escadas de emergência. Os autores utilizaram o modelo computacional de evacuação “*GridFlow*” com objetivo específico de avaliar o comportamento de fusão (encontro) dos fluxos de pessoas nos patamares de acesso às escadas. A validação foi realizada através de dados obtidos experimentalmente em evacuações de 5 edifícios diferentes no Reino Unido. Os resultados das simulações foram muito similares aos dados experimentais, possibilitando a validação do modelo.

Um estudo de Kuligowski et al. (2015) apresentou dados sobre as velocidades de movimento de ocupantes com vários tipos de deficiências motoras para evacuar de instalações residenciais para idosos, com o objetivo de melhor compreensão das velocidades de comportamento e de movimento durante a evacuação. Os dados de movimento destes grupos específicos foram comparados e contrastados com outros dados recolhidos sobre os indivíduos com mobilidade reduzida. O estudo releva uma preocupação, pois a literatura possui uma quantidade insignificante de dados de movimento de saída, tais como velocidades e fluxos através de portas, para os ocupantes com mobilidade reduzida. Os autores concluíram que é muito importante que as simulações de abandono incluam esta classe de ocupantes para que a simulação seja mais próxima da realidade.

D’Orazio et al. (2015) realizaram um estudo com objetivo específico de comparar a evacuação de alunos em salas de aula de uma Universidade, de maneira real na simulação de um incêndio e através de um modelo computacional. Foi testada a eficácia do software “*Pathfinder*” comparada com os dados das evacuações experimentais. O simulador foi capaz de reproduzir razoavelmente o fenômeno real, sendo considerado pelos autores um instrumento válido para recrear as condições de evacuação do ambiente escolhido.

Gasparetto (2017) realizou um estudo de caso comparando simulação real com simulação computacional em um edifício escolar de ensino superior. Observou que é importante a elaboração e implantação de um plano de emergência, conforme a NBR 15219 (ABNT, 2005), para que a população tenha conhecimento das rotas de fuga, bem como haja organização e eficiência durante uma situação de emergência. Conclui ainda o autor, que a simulação computacional de abandono de local é uma ferramenta importante na fase de elaboração do projeto, comparando-se exigências prescritivas de norma com as exigências de desempenho.

4 Considerações finais

Com a finalidade de garantir um abandono satisfatório, além das proteções passivas e ativas, faz-se necessário conhecer o comportamento e o movimento das pessoas em situações de incêndio. Os modelos de evacuação são ferramentas que apresentaram dados muito próximos da realidade, podendo ser utilizados tanto para a avaliação dos projetos de edificações quanto nas simulações de eventos que já ocorreram. Porém, o projetista deve conhecer bem o cenário da edificação, especialmente na população e previsão de comportamento, para escolher qual dos softwares é o mais adequado.

As simulações de abandono poderão fornecer valiosas informações sobre o movimento de pessoas quando da evacuação de uma edificação, verificando-se pontos de estrangulamento e se as saídas estão bem posicionadas, fazendo com que elas sejam efetivamente utilizadas em um caso de emergência. Também podem fornecer dados comparativos com relação às normas prescritivas para uma melhor tomada de decisão. Além disso, podem ser utilizadas para na simulação de eventos que já ocorreram, podendo ser utilizada como ferramenta de investigação e gestão dos sistemas de segurança contra incêndio.

Referências

- AGUIRRE B. E.; WENGER D.; VIGO G. A test of the emergent norm theory of collective behavior. *Sociol Forum*, v. 13, n. 2, p. 301-320, 1998.
- ALVEAR, D.; ABREU, O.; CUESTA, A.; ALONSO, V. A new method for assessing the application of deterministic or stochastic modelling approach in evacuation scenarios. *Fire Safety Journal*, 65, p.11-18, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15219: Plano de emergência contra incêndio: Requisitos*. Rio de Janeiro, 2005.
- _____. *NBR 15575: Desempenho de edificações habitacionais*. Rio de Janeiro, 2013.
- _____. *NBR 9077: Saídas de emergência em edifícios: Procedimento*. Rio de Janeiro, 2001.
- AVERILL, J. D. *Performance-based codes: economics, documentation and design*, 1998, 191 p. Thesis (Master of Science in Fire Protection Engineering) – Faculty of Worcester Polytechnic Institute, Worcester.
- BERTO, A. F. *Medidas de proteção contra incêndios: aspectos fundamentais a serem considerados no projeto arquitetônico dos edifícios*. 1991, Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 1991.
- BRENNAN, P. Timing response in real fires. In: *Hasemi Y (ed) Fire safety science - proceedings of the fifth international symposium Interscience Communications Ltd., London*, p. 807-818, 1997.
- BRYAN, J. L. A Selected Historical Review of Human Behavior in Fire. *Fire Protection Engineering*, v. 16, p. 4-16, 2002.
- BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT. *Post-War Building Studies N° 19: Fire Grading of Buildings* (facsimile of the 1952 edition), Watford: Building Research Establishment, 1992.
- BUKOWSKI, R. W. *Emergency Egress from Buildings* (Nist Technical Note 1623), Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2009.
- CASTANHEIRA, José Pedro. *Os regulamentos da segurança contra incêndio e a evacuação de edifícios*. 2001. 32 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto Superior Técnico de Lisboa, Lisboa, 2001.
- CASTLE, C. J. E. *Guidelines for Assessing Pedestrian Evacuation Software Applications*. Centre for Advanced Spatial Analysis University College London, London, 2007 (Paper 115).
- CLARET, A. M.; ETRUSCO, P. *Tempo de escape em edificações: os desafios do modelamento de incêndios no Brasil*. Ouro Preto, Minas Gerais: R. Esc. Minas, 2002.
- COELHO, A. L. *Modelação matemática da evacuação de edifícios sujeitos à acção de um incêndio*. Volume II – Anexo, 158 p. (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Lisboa, 1997.
- COSTA, M. A. R. *Desempenho de vias de evacuação de emergência em edifícios: simulação*. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 2012.

- D'ORÁCIO, M; LONGHI, S.; OLIVETTI, P.; BERNARDINI, G. Design and experimental evaluation of an interactive system for pre-movement time reduction in case of fire. *Automation in Construction*, v. 52, p. 16-28, 2015.
- FAILLACE, R. R. *Escadas e saídas de emergência*. 4.ed. Porto Alegre: Sagra, 1991. 175 p.
- FRIEDMAN, R. An International Survey of Computer Models for Fire and Smoke. *Journal of Fire Protection Engineering*, v. 4, n. 3, p. 81-92, 1992.
- FRUIN, J. J. *Pedestrian Planning and Design* (revised edition). Mobile: Elevator World, 1987.
- GASPARETTO, F.C. *Análise de rotas de fuga em edifícios escolares no Brasil, baseada em simulação de abandono*. 2017. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Tecnologia e Gestão da Inovação, Universidade Comunitária da Região de Chapecó - Unochapecó, Chapecó, 2017.
- GWYNNE, S. M. V.; GALEA, E. R.; OWEN, M.; LAWRENCE, P. J.; FILIPPIDIS, L. Review of modelling methodologies used in the simulation of evacuation. *J. Build. Environ*, v. 34, p. 441-749, 1999.
- HALL JÚNIOR. How many people can be saved from home fires if given more time to escape? *Fire Technology*, v. 40, n. 2, p. 117-126, 2004.
- JONES, W.; PEACOCK, R.D.; FORNEY, G.P.; RENEKE, P.A. CFAST. *Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport*. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, EUA, NISTIR 1026, 2005.
- KALAY, Y. Performance-based design. *Automation in Construction*, v. 8, n. 4, p. 395-409, 1999.
- KULIGOWSKI E. D.; MILETI D. Modeling pre-evacuation delay by occupants in world trade center towers 1 and 2 on September 11, 2001. *Fire Safety Journal*, v. 44, n. 4, p. 487-496, 2009.
- KULIGOWSKI, E. D. Predicting Human Behavior During Fires. *Fire Technology*, v. 49, p. 101-120, 2013.
- KULIGOWSKI, E. D. *The Evaluation of a Performance-based Design Process For a Hotel Building: The Comparison of Two Egress Models*. 2003. 364 p. Dissertação (Master of Science)-University of Maryland, College Park, USA, 2003.
- KULIGOWSKI, E. D.; PEACOCK, R. *A Review of Building Evacuation Models National Institute of Standards and Technology*. 2005. Disponível em: <http://www.nist.gov/manuscript-publication-search.cfm?pub_id=906951>. Acesso em: 03 abr. 2016.
- KULIGOWSKI, E. D.; PEACOCK, R.; HOSKINS, B.; *A Review of Building Evacuation Models*, 2nd edition. National Institute of Standards and Technology Technical Note 1680, United States, 2010, 36 p.
- KULIGOWSKI, E. D.; PEACOCK, R.; WIESS, E.; HOSKINS, B. Stair evacuation of people with mobility impairments. *Fire and Materials*, v. 39, p. 371-384, 2015.
- LUNDIN, J. A simple model to determine the need for desing review, *In: International conference on performance-based codes and fire safety design methods*, 5, 2004, Luxembourg. Anais eletrônicos. Disponível em: <<http://www.brand.lth.se/english/publications/>>. Acesso em: 01 maio 2016.

- MATTEDI, D. L. *Uma contribuição ao estudo do processo de projeto de segurança contra incêndio baseado em desempenho*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005.
- McGRATTAN, K. *Fire Dynamics Simulator (version 4) – technical reference guide*, NIST Special publication 1018 (Washington, 2006).
- OLENICK M. S.; CARPENTER, D. J. An Updated International Survey of Computer Models for Fire Smoke. *Journal of fire protection engineering* [1042-3915], v. 13, p. 87-110, 2003.
- ONO, R. *A segurança contra incêndio em edificações: parâmetros para sua avaliação*. 240 p. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, 1997.
- ONO, R. *O impacto do método de dimensionamento das saídas de emergência sobre o projeto arquitetônico: uma análise crítica e proposta de aprimoramento*. 2010. 457 p. Tese (Livre docência em tecnologia da arquitetura). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.
- PELECHANO, N.; MALKAWI, A. Evacuation simulation models: Challenges in modeling high rise building evacuation with cellular automata approaches. *Automation in Construction*, v. 17, n. 4, p. 377-385, 2008.
- PREDTECHENSKII; V. M.; MILINSKII, A. I. *Planning for Foot Traffic in Building*. New Delhi: Amerind Publishing, Co. Pvt. Ltd, 1978.
- PROULX G.; IRENE M. A.; REID N. R. C. *Human behavior study, cook county administration building fire*, October 17, 2003—Chicago, IL. National Research Council of Canada, Ottawa.
- PROULX, G. Movement of People: Evacuation Timing. In: Dinunno, P. J. et al. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 3rd edition. Quincy National Fire Protection Association, Section three, p. 3-342 to 3-366. 2002.
- PURSALS, S. C. *Consideraciones en torno a los modelos para el estudio de la evacuación de edificios*. Tesis (Doctor Ingeniero Industrial) – Universitat Politècnica de Catalunya, Departament d'Organització d'Empreses, 2005.
- PURSER D. A.; KUIPERS M. E. Interactions between buildings, fires and occupant behavior using a relational database created from incident investigations and interviews. In: *Human behaviour in fire: proceedings of the third international symposium*. Interscience Communications Ltd, London, p. 443-456, 2004.
- PURSER D. A. Quantification of behavior for engineering design standards and escape time calculations. In: *Human behaviour in fire: proceedings of the first international symposium*. Interscience Communications Ltd, London, p. 497-506, 1998.
- PURSER, D. A.; BOYCE, K. Implications of modeling and experimental studies of evacuation behavior on stairs for multistorey building design. In: *International Symposium on Human Behaviour in Fire*, 4., Cambridge. Proceedings...London: Interscience Communications, 2009. p. 147-160.
- REHM, R.G.; BAUM, H.R. The equations of motion for thermally driven, buoyant flows, *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, v. 83, n. 3, p. 297-308, 1978.

RONCHI, E.; NILSSON, D. Modelling total evacuation strategies for high-rise buildings. *Building Simulation*, [S.l.], v. 7, n. 1, p. 73-87, ago. 2013.

SANTOS, G.; AGUIRRE, B.E. A critical review of emergency evacuation simulation models, In: *Proceedings of the NIST Workshop on Building Occupant Movement during Fire Emergencies*, Gaithersburg, 2004. p. 25-50.

SFPE - SOCIETY OF FIRE PROTECTION ENGINEERS. *Engineering guide to performance-based fire protection and design of building*. Quincy: National Fire Protection Association, 2000. 170p.

SEITO A. I. GILL, A. A.; PANONI, F. D.; ONO, R.; SILVA, S. B.; CARLO, U. D.; SILVA, V. P. *A Segurança contra incêndio no Brasil / coordenação de Alexandre Itiu Seito, et al.* São Paulo: Projeto Editora, 2008. p. 496.

TAVARES, R. M. Evacuation processes versus evacuation models: “Quo Vadimus?”. *Fire Technology*, [S.l.], v. 45, n. 4, p. 419-430, jul. 2008.

WAGNER, R. *Projeto para saídas de emergência: o conceito de desempenho em Santa Catarina*. Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo POSARQ da Universidade Federal de Santa Catarina. SC, 2008.

VALENTIN, M. V. *Saídas de emergência em edifícios escolares*. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2008.