

ARTIGO ORIGINAL

PROJETO BASEADO EM DESEMPENHO POR MEIO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL: METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DE CORPOS TÉCNICOS

Luiz Frederico Barreto Pascoal¹, George Cajaty Barbosa Braga²

1. Corpo de Bombeiros Militar de Minas Gerais
2. Corpo de Bombeiros Militar de Brasília

RESUMO

Apesar da evolução na discussão sobre a segurança contra incêndio, especialmente no tocante à proteção das saídas de emergência contra os efeitos dos incêndios, o legado de imóveis construídos anteriormente a tais normativas e a construção de novas edificações sem a devida observância dos conceitos de proteção, obriga o Corpo de Bombeiros Militar de Minas Gerais a nomear um grupo de estudos, denominado Corpo Técnico, a fim de avaliar adaptações propostas para o atendimento da legislação vigente. Contudo, tal avaliação ocorre de maneira empírica, sem aferição científica ou experimental. A fim de garantir resultados efetivos de proteção, o presente trabalho discute a avaliação dos projetos de adaptação de medidas por meio de projeto baseado em desempenho e, para demonstrar a aplicabilidade do método, apresenta o estudo de caso de edificação anteriormente analisada por Corpo Técnico. O estudo de caso demonstrou que as adaptações propostas melhorariam de sobremaneira as condições de evacuação do prédio para o caso de incêndio no ambiente da garagem. Conclui-se pela aplicabilidade da metodologia para os casos de adaptação de medidas e pela necessidade de aprofundamento de estudos e capacitação de bombeiros e responsáveis técnicos para a utilização de projeto baseado em desempenho e das ferramentas de simulação computacional.

Palavras-chave: projeto baseado em desempenho; simulação computacional; segurança contra incêndio.

PERFORMANCE-BASED DESIGN THROUGH COMPUTER SIMULATION: METHODOLOGY FOR EVALUATING TECHNICAL BODIES

ABSTRACT

Despite the evolution in the discussion on fire safety, especially with regard to the protection of emergency exits against the effects of fire, the legacy of properties built before such regulations and the construction of new buildings without due observance of the concepts of protection, obliges the Minas Gerais Military Fire Brigade to appoint a study group, called the Technical Body, in order to evaluate proposed adaptations to comply with current legislation. However, such assessment occurs empirically, without scientific or experimental assessment. In order to guarantee effective protection results, the present work discusses the evaluation of measures adaptation projects through performance-based design and, to demonstrate the applicability of the method, presents the case study of a building previously analyzed by the Technical Staff. The case study showed that the proposed adaptations would greatly improve the evacuation conditions of the building in the event of a fire in the garage environment. It is concluded by the applicability of the methodology for the cases of adaptation of measures and by the need for in-depth studies and training of firefighters and technicians responsible for the use of performance-based design and computational simulation tools.

Keywords: performance-based design; computational simulation; fire safety.

Recebido em: 02/12/2022
Aprovado em: 07/11/2023

E-mail: frederico.pascoal@bombeiros.mg.gov.br, george.braga@gmail.com

1 INTRODUÇÃO

A legislação mineira de segurança contra incêndio e pânico completou 20 anos em dezembro de 2021. A lei estadual nº 14.130, de 19 de dezembro de 2001, a exemplo de diversas outras legislações estaduais e municipais pelo Brasil, foi promulgada como resposta a um grande incêndio, na casa de shows “Canecão Mineiro”, ocorrida na cidade de Belo Horizonte em 24 de novembro de 2001 e que vitimou fatalmente 7 pessoas, além de 197 feridos (PASCOAL, 2015).

A partir daí o estado de Minas Gerais possuiria regra única para a proteção das pessoas e seus bens contra incêndios. Antes disso, cada município era responsável por editar as próprias regras, não possuindo o Corpo de Bombeiros Militar de Minas Gerais (CBMMG) o poder de polícia para garantir o cumprimento, salvo nos casos de municípios previamente conveniados, como foi o caso da capital, Belo Horizonte (MELO, 2002).

Inobstante, a discussão sobre a evacuação de prédios altos em situação de incêndio já era preocupação da comunidade de engenharia e arquitetura no Brasil desde a década de 70, o que pode se verificar pela edição de normas como a NB 208 no ano de 1974 pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e a Norma Regulamentadora 23 no ano de 1978 pelo Ministério do Trabalho, conforme Gill, Negrisola e Oliveira (2008).

Contudo, muitos prédios altos já estavam construídos nas grandes cidades do Brasil, sem a devida observância de tais conceitos (ONO, 2007). Soma-se a isso o fato de que tais normas técnicas não possuem força de lei, salvo se referenciadas por instrumentos legais dos entes da federação, conforme art. 5º da Constituição Federal de 1988¹. Nesse cenário, muitas construções foram edificadas sem as condições mínimas de segurança para garantir o abandono em caso de sinistros, especialmente nos municípios que não criaram normativas referentes à segurança contra incêndio ou que não incorporaram tais conceitos a seus códigos de obras.

Para Ono (2002) *apud* Ono (2007), as edificações antigas precisam ser adaptadas para se adequarem às condições modernas, especialmente no que tange à segurança contra incêndio, contudo, os atuais regulamentos se mostram

¹ Artigo 5º (...) II-ninguém será obrigado a fazer ou deixar de fazer alguma coisa senão em virtude de lei; (BRASIL, 1988, p. 50).

demasiadamente amenos com esses imóveis que, por terem construção anterior aos códigos de segurança, são mais vulneráveis aos incêndios pois apresentam soluções ineficazes.

Nesses casos, para licenciamento de tais edificações junto ao Corpo de Bombeiros Militar de Minas Gerais, os projetos são submetidos à apreciação do Corpo Técnico (CT), que é um grupo de estudos no âmbito da Segurança Contra Incêndio (SCI), responsável por avaliar propostas e emitir parecer sobre soluções propostas para casos complexos (CBMMG, 2017a).

O CT emite parecer para a homologação do Diretor de Atividades Técnicas, entretanto, a maioria das soluções e adaptações propostas carece de avaliação de efetividade de maneira científica ou experimental, ocorrendo, via de regra, de forma empírica. Assim sendo, temos diversos projetos aprovados, ou seja, chancelados pelo CBMMG, que não garantem (necessariamente) a segurança dos ocupantes das edificações. Fato que, além de expor os ocupantes das edificações aos riscos dos incêndios, pode tornar o CBMMG corresponsável em caso de sinistros com vítimas.

A proteção à vida é o objetivo principal dos Corpos de Bombeiros e assume caráter preventivo por meio dos serviços de segurança contra incêndio. Neste mister, garantir a possibilidade de evacuação de prédios em decorrência de incêndios torna-se fator primordial, sendo a norma ABNT NBR 9077 considerada fundamental para operadores da atividade (CLARET e MATTEDI, 2011).

Inobstante, levantamento realizado junto à Diretoria de Atividades Técnicas (DAT) do CBMMG, mostra que 221 (44%) dos 501 projetos analisados em sede de Corpo Técnico no ano de 2021, ou seja, que necessitam de adoção de medidas alternativas por não cumprirem os requisitos prescritivos, tiveram origem nas saídas de emergência.

Diante desse contexto, o problema da pesquisa pode ser expresso por meio da questão: como avaliar a segurança contra incêndio das edificações que não atendem as medidas exigidas pelas normas prescritivas atuais?

Como resposta à pergunta, traçamos a hipótese de que a avaliação de desempenho por meio de simulação computacional nos projetos de segurança contra incêndio é um método capaz e viável para garantir a melhor condição de segurança nesses casos.

1.1 Projeto baseado em desempenho (PBD)

O conceito de projeto baseado em desempenho, ou Performance-based design (PBD), bastante difundido em outras partes do mundo, onde já existem códigos de projetos baseados em desempenho utilizados como alternativa às normas prescritivas, ainda se mostra pouco difundido no Brasil (GOUVEIA; SOUZA, 2008).

Tal metodologia considera as características da edificação, atividades nela exercidas e as exigências dos ocupantes, para definir medidas de segurança que melhor atendam ao projeto. Ainda, permite maiores adaptações em relação aos modelos prescritivos, haja vista que transforma objetivos de desempenho mensuráveis, inicialmente definidos, em dados que permitam avaliar a resposta dos sistemas de segurança ou da estrutura (MATTEDI, 2005).

Para Claret e Mattedi (2011), a principal dificuldade para a adoção desse modelo repousa, inicialmente, em dois problemas: A formação e cultura dos profissionais (operadores) da segurança contra incêndio, além da pouca disponibilidade de instrumentos técnicos para avaliação do desempenho.

Teoria anteriormente apresentada por Ono (2007), que sustenta que mesmo sendo requisito básico de desempenho de projeto, a segurança contra incêndio é muito pouco abordada nos currículos dos cursos de engenharia e arquitetura, tornando pequeno o número de profissionais que compreendem as implicações de se projetar uma edificação segura, tanto à luz da legislação prescritiva, mas, principalmente, no conceito de desempenho.

Dentre os objetivos de projeto de segurança contra incêndio baseado em desempenho está o de fornecer um ambiente sustentável, proporcionando aos ocupantes do edifício um nível aceitável de segurança para a evacuação. Assim, as decisões tomadas durante a elaboração do projeto buscam impedir, por exemplo, que a ocorrência de um incêndio estrutural não impeça a fuga segura (HURLEY; ROSENBAUM, 2015). Dentre as condições de sobrevivência, incluem-se a visibilidade, temperatura e os efeitos tóxicos da fumaça.

1.2. Simulação computacional

Existem diversas formas de aplicação da simulação computacional de incêndio e abandono, dentre elas, a busca pela melhoria das condições de segurança de edificações existentes, o que será nosso objeto de estudo. A partir dos modelos simulados se pode verificar a influência da fumaça e do fogo sobre as rotas de fuga, bem como possíveis pontos de estrangulamento, tornando possível a avaliação de riscos e a propositura de procedimentos de segurança por meio da engenharia de segurança contra incêndio (BRAGA, 2018).

Os modelos computacionais de evacuação utilizados mundialmente podem ser classificados em três categorias: modelo de movimento, comportamento parcial e modelo comportamental. O primeiro simula o movimento contínuo do ocupante desde um ponto no interior da edificação até um local seguro, em fila. O modelo parcial permite que os ocupantes troquem de posição. Já os modelos comportamentais permitem ao simulador adotar tomada de decisões em relação às condições ambientais (MARTINS, RODRIGUES E BRAGA, 2019).

Segundo Gwynne et al. (1999) apud BRAGA (2018), um modelo eficiente de abandono deve considerar aspectos relacionados à geometria ou configuração do ambiente (características construtivas), aspectos relacionados ao ambiente, como fumaça, calor e gases tóxicos, além de aspectos relacionados ao treinamento, resposta comportamental e perfil biométrico dos ocupantes, expressos por sua resposta inicial ao alarme, velocidade de deslocamento, interação entre os grupos de pessoas, dentro outras.

Dentre esses, a variável ambiental possui estreita relação com a ocorrência de incêndio, haja vista que este reduz a velocidade da evacuação. O fogo pode incapacitar pessoas e bloquear saídas, além dos efeitos nocivos da fumaça e outros gases provenientes da combustão, como redução da visibilidade e intoxicações (RAMPINELLI, 2018). Por esse motivo, a simulação de evacuação é avaliada em conjunto com a simulação de incêndio.

Para Gouveia e Etrusco (2002), o tempo total necessário para evacuar totalmente uma edificação é o somatório de diversos tempos e pode ser descrito pela seguinte equação:

$$(1) Dt_{esc} = Dt_{det} + Dt_a + Dt_{pre} + Dt_e, \text{ onde:}$$

Dt_{esc} : Tempo total de escape;

Dt_{det} : Tempo de detecção do incêndio;

Dt_a : Tempo para acionamento do alarme;

Dt_{pre} : Tempo de pré-movimento, ou seja, intervalo de tempo entre o alarme e o primeiro movimento de saída;

Dt_e : Tempo para a saída de todos os ocupantes.

Segundo Karlsson e Quintiere (1999), existem dois métodos principais para modelar incêndios computacionalmente, sendo um probabilístico e outro determinístico. No primeiro, a evolução do fogo durante o simulado se escora em dados estatísticos e experimentais. Já o método determinístico utiliza princípios físicos e químicos sobre a natureza do incêndio e pode ser subclassificado em diferentes classes de modelamento.

Citaremos os modelos de duas camadas, onde o ambiente é subdividido em duas únicas camadas, sendo uma fria e outra quente, porém, destacamos o modelo de campos, denominado Computational Fluid Dynamics (CFD). Este, subdivide o volume do ambiente sinistrado em diversas células, nas quais as equações de conservação são calculadas (ALVES, BRAGA & CAMPOS, 2008).

Dentre os modelos de CFD, destaca-se o FDS, ou Fire Dynamics Simulator, desenvolvido pelo National Institute of Standards and Technology (NIST), que simula situações de incêndio a partir da solução numérica de equações de Navier-Stokes, "com fluxo termicamente dirigido e com ênfase no transporte de calor e fumaça dos incêndios" (ALVES, BRAGA & CAMPOS, 2008, p. 2).

2 MÉTODO

A fim de alcançar o objetivo proposto, o trabalho utilizou o método de pesquisa bibliográfica, por meio de levantamento de referencial teórico sobre o tema, a fim de apresentar os principais conceitos sobre o projeto baseado em desempenho (PBD) e avaliação de riscos, além da descrição dos softwares utilizados de

simulação de incêndio. Posteriormente, foi realizado estudo de caso já analisado em corpo técnico, avaliando-se as condições de segurança e a possibilidade de propositura de melhorias em decorrência da identificação dos riscos.

Assim, o artigo é classificado como empírico, qualitativo quanto ao tipo, de natureza aplicada e, quanto aos objetivos, como exploratória. Para Marconi e Lakatos (2004), a abordagem qualitativa se baseia na avaliação do comportamento humano, sendo, para isso, utilizadas ferramentas como observação e entrevistas.

A pesquisa de natureza aplicada gera conhecimentos para uma aplicação prática, buscando solucionar questões específicas, como dispõe Prodanov e Freitas (2013). Já as pesquisas exploratórias buscam compreender diversos aspectos relacionados ao fenômeno observado e, por isso, possuem tendência à maior flexibilidade no planejamento, segundo Gil (2017).

As simulações de incêndio realizadas, seguiram os padrões apresentados na norma NFPA 101/2021 – Life Safety Code, que define a avaliação de cenários de incêndio por meio de um método adequado, tratando de maneira realista pelo menos uma das seguintes especificações de cenário: Local inicial do incêndio; Taxa inicial de crescimento na severidade do fogo; Geração de fumaça (NFPA, 2021).

Para a simulação computacional de incêndio, foi utilizado o software Pyrosim (THUNDERHEAD, 2022), desenvolvido pela Thunderhead Engineering e que fornece uma interface gráfica para o programa Fire Dynamics Simulator (FDS). Para a simulação de evacuação, foi utilizado o software Pathfinder (THORNTON et al., 2011), também desenvolvido pela Thunderhead Engineering.

2.1 Caracterização do ambiente de estudo de caso

A edificação utilizada para o estudo foi escolhida por indicação dos responsáveis pelo setor, dentre a relação de projetos que atendiam, concomitantemente, às seguintes condicionantes:

- 1) Atender ao item 5.5.1² da Instrução Técnica nº 40 do CBMMG (CBMMG, 2019);
- 2) Ter sido alvo de análise e aprovação pelo Corpo Técnico do CBMMG;
- 3) Apresentar deficiência referente ao atendimento e adequação das saídas de emergência.

O imóvel é situado no município de Uberaba, Minas Gerais. Classificado como edificação residencial multifamiliar (A-2), conforme tabela de ocupações anexa ao Decreto Estadual nº 47.998 de 1º de julho de 2020 (MINAS GERAIS, 2020), possui área total construída de 6.829,89m² e altura descendente de 30,80 metros.

Passou por análise de projeto e aprovação no ano de 1996, contudo, a escada existente contrariava a prescrição normativa vigente à época, especificamente o decreto municipal nº 1.424 de 29 de junho de 1992, relativa ao tipo da escada de emergência que, segundo a norma NBR 9077/93 (ABNT, 1993), deveria ser do tipo Escada à Prova de Fumaça³ (PF). Aliado a isso, a descarga⁴ do prédio foi construída em desacordo com o previsto na mesma normativa, não garantindo a saída segura dos ocupantes desde a porta da escada até o logradouro público.

As falhas construtivas foram identificadas em análise de modificação de projeto anteriormente aprovado, sendo notificada ao responsável técnico para a adequação. Por se tratar de edificação já construída, não haveria possibilidade técnica para correção e atendimento normativo e, por isso, passou a análise do Corpo Técnico do CBMMG.

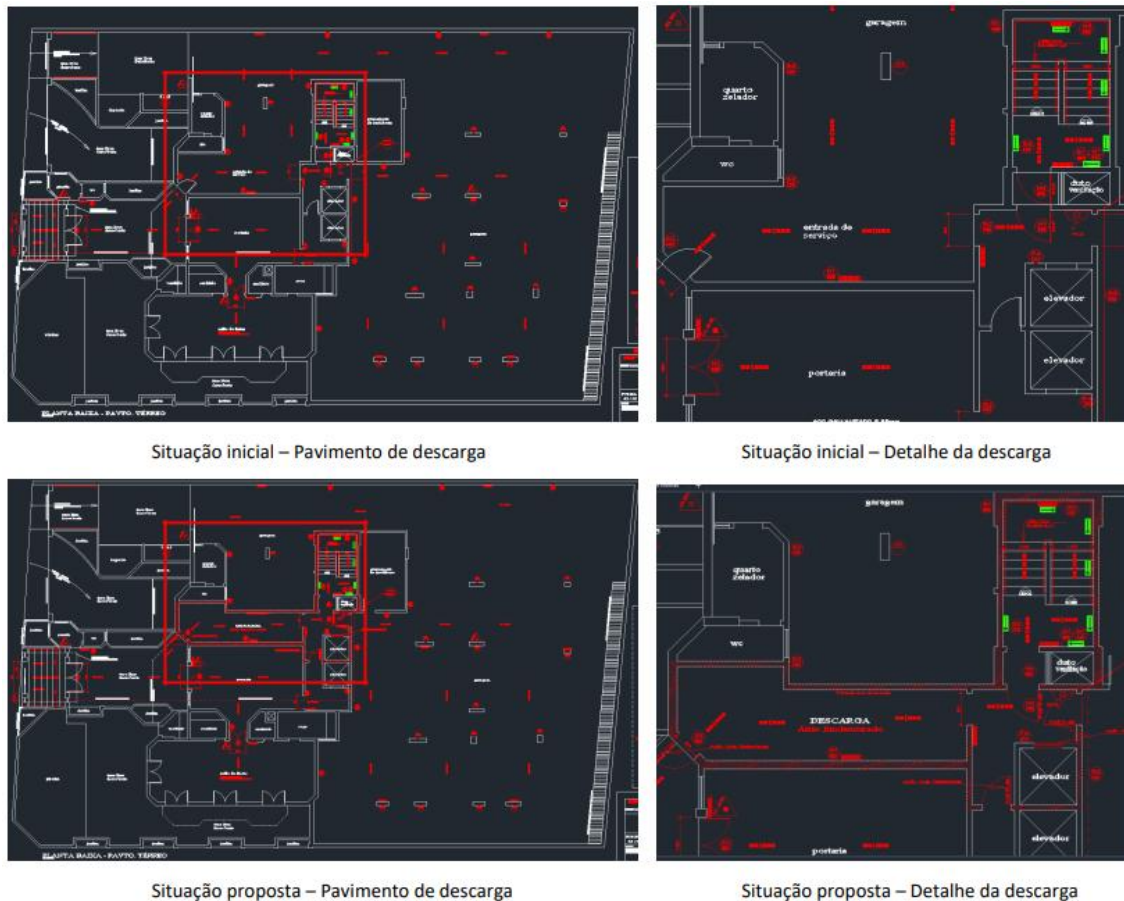
² 5.5.1 Os casos de impossibilidade técnica de execução de medidas não abrangidos por esta IT poderão ser analisados por Corpo Técnico (CT), desde que esgotadas as possibilidades de intervenção para adequação à legislação atual, bem como as soluções indicadas nesta IT, observado o descrito no item 2.2.

³ Escada cuja caixa é envolvida por paredes corta-fogo e dotada de portas corta-fogo, cujo acesso é por antecâmara igualmente enclausurada ou local aberto, de modo a evitar fogo e fumaça em caso de incêndio (ABNT, 2001, p. 4).

⁴ 4.11.1.1 A descarga, parte da saída de emergência de uma edificação, que fica entre a escada e a via pública ou área externa em comunicação com a via pública, pode ser constituída por: a) corredor ou átrio enclausurado; b) área em pilotis; corredor a céu aberto (ABNT, 2001, p. 25).

Assim, além da alteração arquitetônica do imóvel, foram propostas as seguintes medidas para facilitar a evacuação e aumentar a segurança contra incêndio: brigada de incêndio, alarme de incêndio, detecção de incêndio, sinalização de rota de fuga rente ao rodapé das rotas de saída. Na figura 1 é apresentada a situação existente da edificação e a situação proposta.

Figura 1 - Leiaute existente e leiaute proposto



Fonte: Infoscip (CBMMG).

2.2 Caracterização do modelo

Considerando a característica construtiva da edificação, o incêndio simulado buscou tratar de maneira realística o local de início e a taxa de crescimento do incêndio. O fogo iniciado em um veículo na garagem foi considerado como o maior risco para os ocupantes, dada a ausência de enclausuramento da descarga em relação ao primeiro nível de garagem.

Park, Ryu e Ryou (2019) apresentaram como resultados de estudos

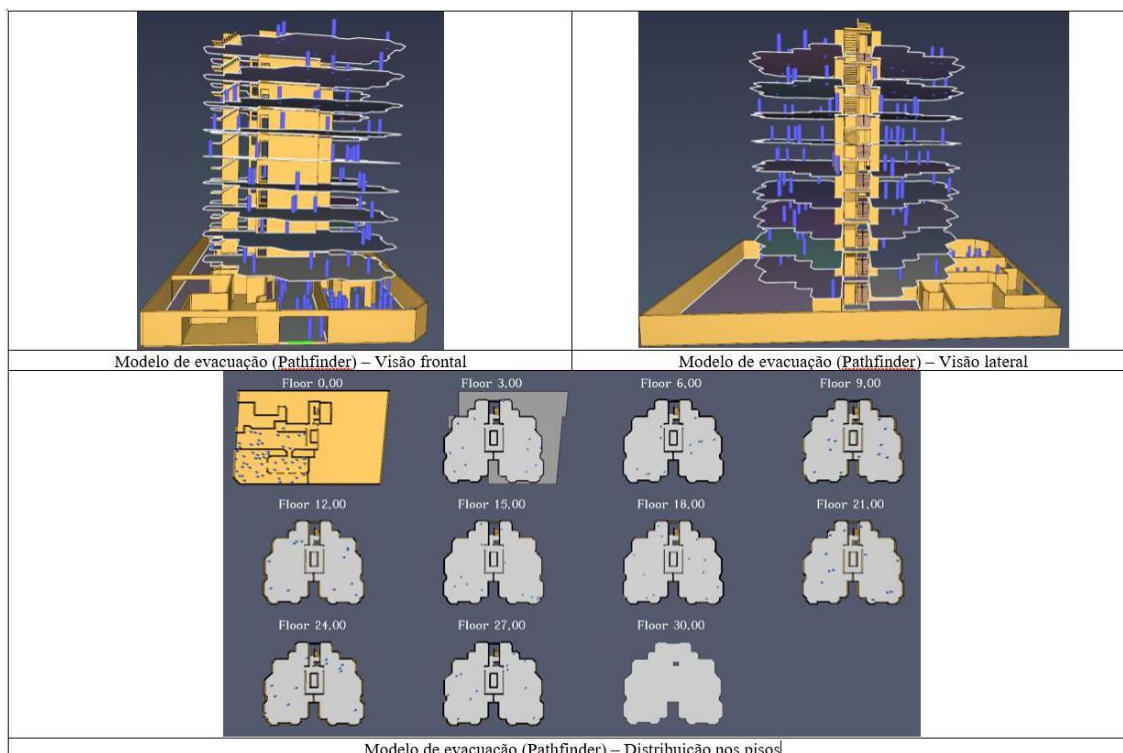
experimentais em calorímetro de larga escala, o rápido crescimento de incêndio iniciado no compartimento de passageiros de um veículo sedan, alcançando a taxa de liberação de calor (TLC) de 2MW após 180 segundos do início do incêndio, seguido por breve estabilização com 2,3 MW aos 300 segundos e crescimento constante posterior, com máxima de 3,5 MW aos 1500 segundos. Assim, o software foi parametrizado utilizando tais pontos como curva de incêndio.

Em relação à produção de fumaça (soot yield), segundo Sekizawa et al (2016), diversos são os materiais representativos utilizados na construção ou armazenados em carros, desde seu combustível, materiais plásticos e espumas em seu interior e seus pneus. Assim sendo e considerando as fases iniciais do incêndio, a taxa de rendimento da fuligem será considerada de 0,1.

Em relação à arquitetura do imóvel, os pavimentos superiores foram simulados sem aberturas (janelas). Em relação às portas, foram consideradas totalmente abertas nos pavimentos superiores, na escada e na descarga, exceto uma, localizada entre a descarga e a garagem, considerada totalmente fechada, no modelo proposto e aprovado. O Modelo original foi apresentado com portas de escadas totalmente abertas e com as aberturas existentes no nível de descarga.

O modelamento da população considerou a classificação do imóvel residencial, ou A2, conforme Instrução Técnica nº 08 do CBMMG (CBMMG, 2017b), para a qual é definido o quantitativo de 2 pessoas por dormitório. Assim, para o prédio composto por 2 apartamentos de 3 dormitórios por andar, com total de 9 pavimentos, obteve-se o número de 108 pessoas. Somados à população prevista de 55 pessoas no salão de festas no nível térreo, chegou-se ao total de 163 pessoas. A distribuição da população nos pavimentos é demonstrada na figura 2.

Figura 2 - Modelo de evacuação; distribuição populacional



Fonte: Elaborado pelos autores.

Para Gouveia e Etrusco (2002), a velocidade de deslocamento da população em locais nivelados e com densidade populacional de até 0,54 pessoas/m², pode ser considerada de 1,2 m/s. Contudo, como a maior parte do deslocamento populacional ocorre em escadas, foi adotado o parâmetro de 1,00 m/s para todo o percurso.

Assim, o tempo de simulação do incêndio foi calculado conforme equação (1), onde:

Dt_{esc} : Tempo total de escape = 440 segundos ou 7 minutos e 20 segundos, dos quais:

Dt_{det} : Tempo de detecção do incêndio = 45 segundos;

Dt_a : Tempo para acionamento do alarme = 15 segundos;

Dt_{pre} : Tempo de pré-movimento, ou seja, intervalo de tempo entre o alarme e o primeiro movimento de saída = 170 segundos ou 2 minutos e 50 segundos (Proulx, 2002):

Dt_e : Tempo para a saída de todos os ocupantes = 210 segundos ou 3 minutos e 30 segundos, conforme simulação no software Pathfinder.

O tempo total de escape foi acrescido de 160 segundos ou 2 minutos e 40 segundos, por critério de segurança, totalizando um tempo de simulação de 10 minutos, ou 600 segundos.

2.3 Requisitos de desempenho

Podem ser diversos os requisitos de desempenho que garantam a segurança dos ocupantes de uma edificação em situação de incêndio, tais como temperatura, fluxo de calor, concentração de gases como monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), ácido cianídrico (HCN), oxigênio (O₂), dentre outros, além da visibilidade, que pode ser comprometida pela fumaça e dificultar a evacuação (HADJISOPHOCLEOUS; BENICHO, 1999).

Neste trabalho foram avaliadas as condições relacionadas à temperatura, visibilidade e concentração de O₂, adotando-se os critérios apresentados da tabela abaixo, para um limite de exposição de 10 minutos, a uma altura de 2,0 metros:

Quadro 1 - Quadro de critérios de desempenho

Requisito avaliado	Critério de sustentabilidade
Temperatura da camada de gás	Menor ou igual a 100°
Visibilidade	10 m (grandes recintos) 5 m (pequenos recintos)
Concentração de O ₂	Maior ou igual a 12%

Fonte: Adaptado de Airah (2011).

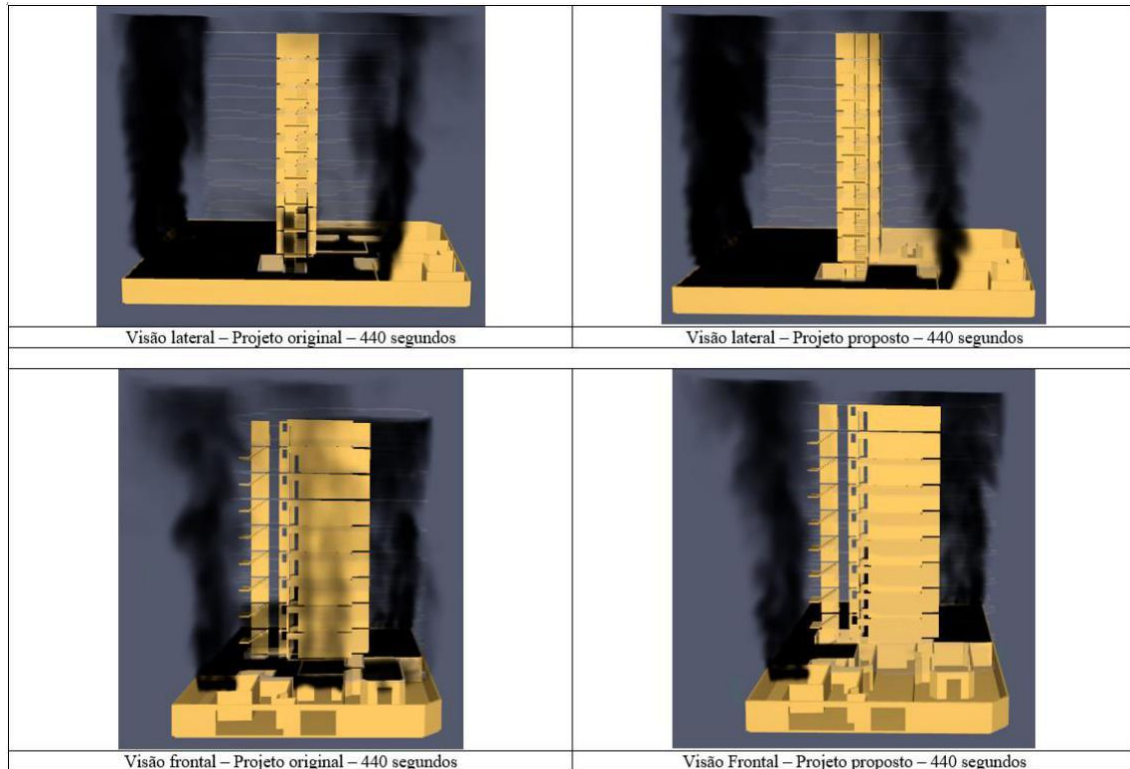
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a construção dos modelos computacionais e realizadas as simulações, a arquitetura existente na edificação avaliada mostrou comportamento bastante diverso do modelo proposto e aprovado pelo CBMMG no que tange à proteção das rotas de fuga dos efeitos do incêndio simulado. Enquanto no primeiro houve severo comprometimento da rota de fuga pela fumaça, interferindo na evacuação da edificação, no modelo proposto as saídas de emergência se mantiveram protegidas dos efeitos do incêndio.

Como pode ser verificado pela simples observação da figura 3, aos 440 segundos, ou seja, ao final do período considerado para a evacuação total do prédio,

a garagem está completamente tomada pela fumaça em ambos os modelos, contudo, na arquitetura existente, grande parte da rota de fuga foi atingida, em especial a descarga e três pavimentos da escada. Importante salientar que durante todo esse período, a porta final da caixa de escada estaria obrigatoriamente aberta, para dar vazão à população.

Figura 3 - Visão geral da fumaça aos 440 segundos

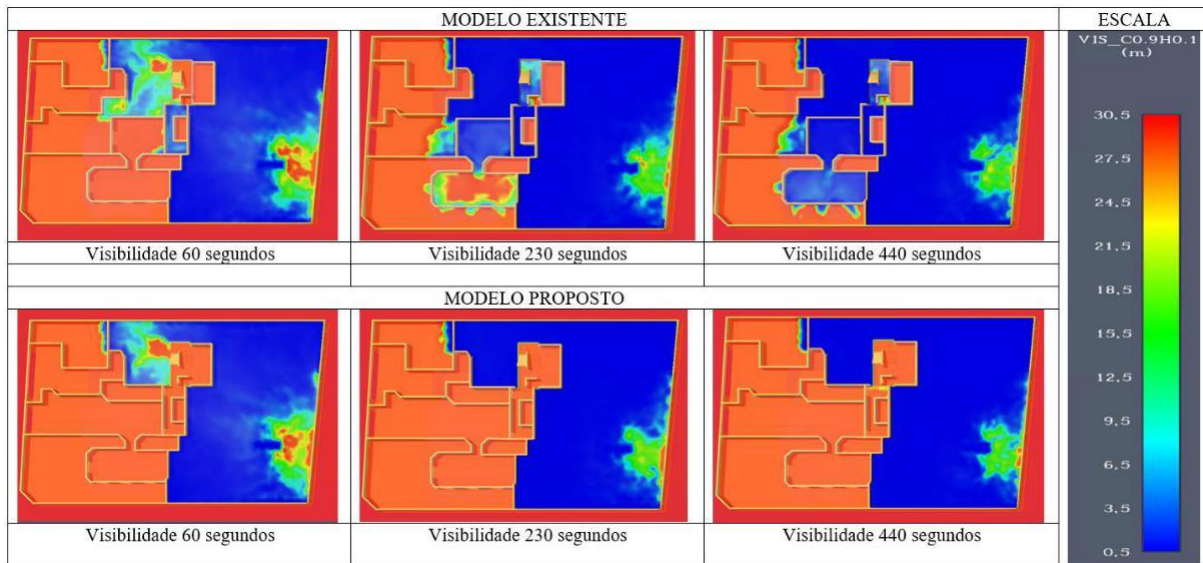


Fonte: Elaborado pelos autores.

Para a avaliação dos requisitos de desempenho, foram posicionados três planos de medição de visibilidade, temperatura e taxa do oxigênio (O₂), perpendiculares ao plano Z e a 2 metros de altura, conforme descrito no método. Tais medidores apresentam resultados gráficos e de fácil apresentação e interpretação. Assim, imagens dos planos foram retiradas nos momentos 60 segundos, momento considerado de acionamento do alarme e início do pré-movimento; 230 segundos, momento de início da evacuação; e 440 segundos, como o momento de término da evacuação.

Inicialmente, avaliou-se o requisito visibilidade, conforme demonstrado na figura 4:

Figura 4 - Plano de visibilidade



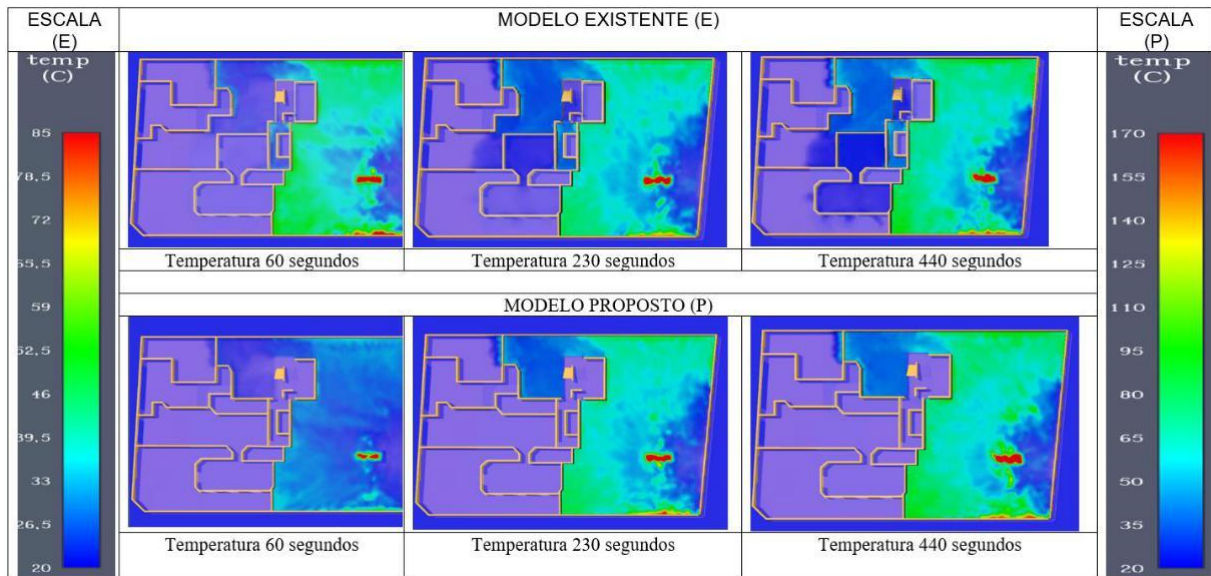
Fonte: Elaborado pelos autores.

Com a arquitetura atual, aos 60 segundos, a porta da escada já apresenta visibilidade próxima aos 3 metros, o que melhora um pouco na fase final da descarga. Contudo, já aos 230 segundos e ainda mais aos 440 segundos, a visibilidade tende a zero desde a saída da caixa de escada até a parte descoberta da descarga. Apesar de se tratar de um trecho curto, com aproximadamente 10 metros de comprimento, a baixa visibilidade causaria confusão para a evacuação e risco de acidentes pois, conforme Gager; Dominguez (2016), camadas de fumaças relativamente finas impedem os evacuados de encontrar as saídas mais seguras, além de favorecer o tamponamento de portas e quedas.

Por outro lado, a situação na arquitetura proposta é exatamente inversa, já que o enclausuramento da descarga, desde a porta de saída da caixa de escada até o ambiente descoberto, garante máxima visibilidade em todo o período da simulação.

O requisito temperatura apresenta condição semelhante à visibilidade, porém, em menor proporção, como se vê na figura 5.

Figura 5 - Plano de temperatura



Fonte: Elaborado pelos autores.

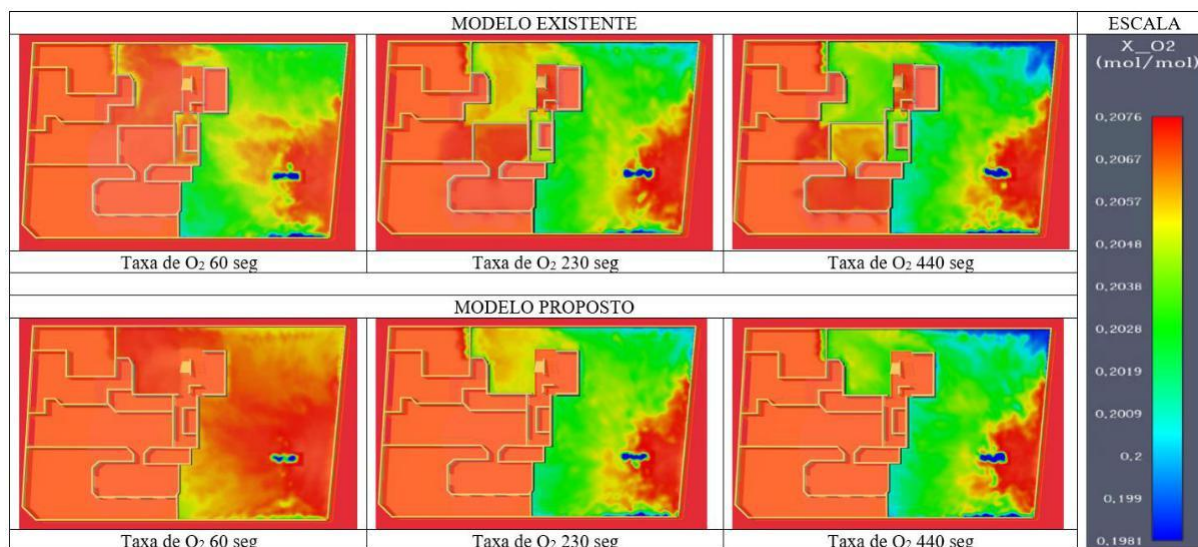
A análise visual do plano de temperatura demonstra que desde o $t=60$, tem-se influência do incêndio na temperatura da rota de fuga para o modelo existente, que em alguns pontos, passa pouco dos 50 graus. Assim, em que pese a maior proteção garantida pelo modelo proposto, onde não ocorre alteração de temperatura, a situação verificada no modelo existente não se aproxima dos limites de sobrevivência definidos como requisitos de desempenho do projeto.

Deve-se contextualizar que as temperaturas mensuradas pelo plano a 2 metros foram consideradas condizentes com a curva de incêndio descrita no método, na qual se alcança uma TLC de 2,3 MW a 300 segundos, porém, o pico de liberação de calor de 3,5 MW só seria alcançado em 1500 segundos, além do período de evacuação. Soma-se a isso a grande área do pavimento incendiado e sua grande proporção de aberturas.

Outra situação que se destaca é a diferença na ordem de grandeza das temperaturas nos dois cenários, sendo essas mais amenas na arquitetura original.

O requisito de taxa de concentração de oxigênio (O_2) foi o menos afetado pela arquitetura, conforme se demonstra na figura 6.

Figura 6 - Plano de concentração de O₂



Fonte: Elaborado pelos autores.

Apesar de haver maior comprometimento da descarga na situação arquitetônica original, o requisito de desempenho relacionado à concentração mínima de oxigênio foi atendido em todos os momentos da simulação, sendo pouco afetada pela nova configuração.

Pelos estudos realizados, pode-se afirmar que a situação existente na edificação não garante a saída segura dos ocupantes no caso do incêndio simulado. A ausência de enclausuramento da descarga, condição exigida pela normativa vigente à época e não observada para a construção do imóvel, aliada à existência de área de estacionamento no mesmo nível, mostram-se condições de risco que precisam ser tratadas.

A partir da adoção da nova arquitetura proposta, além da instalação de sistemas de segurança contra incêndio não exigidos anteriormente, especialmente relativos à detecção e alarme de incêndio, se observa um ganho considerável de segurança na saída dos ocupantes. A proteção da rota de fuga até um local descoberto garantiu boas condições de proteção térmica e contra os efeitos da fumaça. Assim, fica verificada a efetividade da solução aprovada pelo CBMMG para o evento testado. Outrossim, cumprindo as recomendações discutidas neste trabalho, outras condições de risco devem ser simuladas, garantindo-se, assim, a validade integral das soluções adotadas.

A avaliação de projeto por desempenho é utilizada em diversos países do mundo, sendo tratada nas legislações mais avançadas de segurança contra

incêndio e pânico. No CBMMG, apesar de não receber tal denominação, a avaliação de desempenho das edificações já ocorre de maneira empírica, na avaliação de edificações construídas sem a observação das normas prescritivas vigentes.

Para edificações novas, o projeto baseado em desempenho se mostra mais sensível às mudanças de uso e ocupação, podendo tornar cenários até então seguros, totalmente inaceitáveis. Por outro lado, no caso de edificações existentes, essa metodologia garante a adoção de medidas de segurança customizadas e mais adequadas ao atendimento dos requisitos previstos na legislação de segurança contra incêndio, desde que os profissionais envolvidos na concepção e avaliação dos modelos possuam conhecimento e experiência suficiente (HURLEY; ROSENBAUM, 2015).

O estudo demonstra que a metodologia de avaliação por desempenho se amolda perfeitamente à avaliação de projetos que não atendem à legislação prescritiva e são submetidos ao Corpo Técnico do CBMMG. De igual maneira, a simulação computacional de incêndio e de evacuação se apresentam como importantes ferramentas nos processos de elaboração e avaliação dos projetos. A hipótese apresentada fora integralmente comprovada.

Por fim, os resultados aqui discutidos apontam para a necessidade de aprofundamento no estudo dos parâmetros de incêndios, além da capacitação de bombeiros e responsáveis técnicos para a utilização da metodologia de projeto baseado em desempenho e, em especial, das ferramentas de simulação computacional, garantindo a vida e a incolumidade dos ocupantes desses imóveis.

REFERÊNCIAS

AIRAH, Weng Poh M. Tenability criteria for design of smoke hazard management systems. **Ecolibrium Journal**, v. 32, p. 37, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9077 – Saídas de emergência em edifícios**. Rio de Janeiro, 2001.

ALVES, Alessandra BCG; CAMPOS, André T.; BRAGA, George CB. 71- Simulação Computacional de Incêndio Aplicada ao Projeto de Arquitetura. 2008.

BRAGA, George Cajaty Barbosa. **Simulação Computacional Aplicada à Segurança Contra Incêndio – Recomendações**. São Paulo: Firek Segurança Contra Incêndio, 2018.

BRASIL. [Constituição (1988)]. **Constituição da República Federativa do Brasil**: promulgada em 5 de outubro de 1988. 4. ed. São Paulo: Saraiva, 1990.

CBMMG, Corpo de Bombeiros Militar de Minas Gerais. **Plano de Comando de Comando 2015|2026 / Minas Gerais**. 4 ed. Belo Horizonte, 2021.

CBMMG, Corpo de Bombeiros Militar de Minas Gerais. **Instrução técnica nº 02/2017 - Terminologia de proteção contra incêndio e pânico**. 2017a

CBMMG, Corpo de Bombeiros Militar de Minas Gerais. **Instrução técnica nº 08/2017 - Saídas de emergência em edificações**. 2017b

CBMMG, Corpo de Bombeiros Militar de Minas Gerais. **Instrução técnica nº 40/2019 - Adequação de medidas de segurança para edificações**. 2019

CLARET, Antônio Maria; MATTEDI, Domênica Loss. **Estudo da prescritividade das normas técnicas brasileiras de segurança contra incêndio**. Rem: Revista Escola de Minas, v. 64, p. 265-271, 2011.

GAGER III, Arthur H.; DOMINGUEZ, G. Tenability criteria in unique situations and atypical buildings. In: **Fire and evacuation modelling technical conference. Torremolinos: Thunderhead Engineering, SFPE** [cited 2019 May 8]. <https://www.thunderheadeng.com/files/com/FEMTC2016/files/d1-14-gager/gager-paper.pdf>. 2016.

GILL, Alfonso Antonio; NEGRISOLO, Walter; OLIVEIRA, Sergio Agassi de. **Aprendendo com os grandes incêndios**. SEITO, Alexandre Itiu et al, 2008.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

GOUVEIA, Antônio Maria Claret de; ETRUSCO, Paula. Tempo de escape em edificações: os desafios do modelamento de incêndio no Brasil. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 55, p.257-261, 2002.

GOUVEIA, Fabíola Bristot Serpa; SOUZA, João Carlos. 147-Aplicação do Sistema de Projeto Baseado em Desempenho para a Segurança Contra Incêndios em Edifícios Históricos. 2008.

GWYNNE S., GALEA, E.R., OWEN, M., LAWRENCE, P.J., FILIPPIDIS, **A review of the methodologies used in the computer simulation of evacuation from the built environment**, Building and Environment 34, 1999.

HADJISOPHOCLEOUS, George V.; BENICHOU, Noureddine. Performance criteria used in fire safety design. **Automation in construction**, v. 8, n. 4, p. 489-501, 1999.

HURLEY, Morgan J.; ROSENBAUM, Eric R. **Performance-based fire safety design**. Boca Raton: CRC Press, 2015.

KARLSSON, Bjorn; QUINTIERE, James. Enclosure fire dynamics. CRC press, 1999.

MARCONI, M. A; LAKATOS, E. V. **Metodologia científica**. São Paulo: Editora Atlas, 2004.

MARTINS, D. de S.; RODRIGUES, A. C. L.; BRAGA, G. C. B. 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.

MELO, Silvio Antônio de Oliveira. **A criação do sistema de atividades técnicas no CBMMG**: análise e perspectivas para a gestão das informações operacionais da prevenção contra incêndio e pânico. Monografia – Belo Horizonte: Fundação João Pinheiro, 2002.

MINAS GERAIS. [Constituição (1989)]. **Constituição do Estado de Minas Gerais**. 28. ed. atual. Belo Horizonte: Assembleia Legislativa do Estado de Minas Gerais, 2021.

MINAS GERAIS. **Decreto n. 47.998, de 1º de julho de 2020 (Dec. 47.998/20)**.

Disponível em:

<<https://www.almg.gov.br/consulte/legislacao/completa/completa.html?tipo=DEC&num=47998&comp=&ano=2020>>. Acesso em: 24 abr. 2022.

MINAS GERAIS. **Lei n. 14.130, de 19 de dezembro de 2001 (Lei 14130/01)**. Belo Horizonte, MG: Assembleia Legislativa de Minas Gerais, 2001. Disponível em

<https://www.almg.gov.br/consulte/legislacao/index.html?aba=js_tabLegislacaoMineira&subaba=js_tabLegislacaoMineiraSimples&tipoPesquisa=simples&pageNum=1&sltNorma=Lei&txtNum=14130&txtAno=2001>. Acesso em: 24 abr. 2022.

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION – NFPA. **NFPA 101**: Life Safety Code 2021 Edition. Disponível (mediante cadastro) em:

<https://link.nfpa.org/publications/101/2021>. Acesso em 16/05/2022.

ONO, Rosaria. **Parâmetros para garantia da qualidade do projeto de segurança contra incêndio em edifícios altos**. Ambiente construído, v. 7, n. 1, p. 97-113, 2007.

PARK, Younggi; RYU, Jaiyoung; RYOU, Hong Sun. Experimental study on the fire-spreading characteristics and heat release rates of burning vehicles using a large-scale calorimeter. **Energies**, v. 12, n. 8, p. 1465, 2019.

PASCOAL, L. F. B. **Serviço de Segurança Contra Incêndio e Pânico**: Um estudo da eficácia do modelo de fiscalização previsto pelo decreto 44.746, de 29 de fevereiro de 2008, no município de Belo Horizonte entre os anos de 2011 e 2014. Monografia - Curso de Especialização em Segurança Pública (CESP), Fundação João Pinheiro, Belo Horizonte, 2015.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. de. **Metodologia do trabalho científico**: Métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico. 2ª ed. Novo Hamburgo:

Feevale, 2013.

PROULX, Guylene. The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. **Movement of People: The Evacuation Timing", Third Edition, National Fire Protection Association**, p. 3-342, 2002.

RAMPINELLI, Diego Heusi. Sistemas de controle de fumaça em edificações. **Ignis: Revista Técnico Científica do Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina**, v. 3, n. 2, p. 72-90, 2018.

SEKIZAWA, Ai et al. **SFPE 11th Conference on Performance-Based Codes and Fire Safety Design Methods**, Case Study by Team Japan, Underground Car Park. Disponível em
<https://www.researchgate.net/publication/304538176_11th_Conference_on_Performance_Based_Codes_and_Fire_Safety_Design_Methods_-_Case_Study_by_Team_Japan_-_Underground_Car_Park> Acesso em 16 de setembro de 2022.

THORNTON, C. et al. Pathfinder: an agent-based egress simulator. In: **Pedestrian and evacuation dynamics**. Springer, Boston, MA, 2011. p. 889-892.

THUNDERHEAD, Engineering. PyroSim user manual. **The RJA Group Inc**, Chicago, USA, 2022.