

71 - Simulação Computacional de Incêndio Aplicada ao Projeto de Arquitetura

ALVES, Alessandra B. C. G. (1); CAMPOS, André T. (2); BRAGA, George C. B. (3)

(1) Arquiteta e urbanista, especialista em engenharia de segurança do trabalho e doutoranda pela Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília – UnB - e-mail: abcalves@hotmail.com. Fone: (61) 9994-9858.

(2) Oficial do CBMDF, especialista em engenharia de segurança do trabalho e mestrando em Física Aplicada pelo Instituto de Física da Universidade de Brasília – UnB - e-mail: andretelles@unb.br. Fone: (61) 8467-6000.

(3) Oficial do CBMDF; Instituto de Física da Universidade de Brasília – UnB. E-mail: george@unb.br. Fone: (61) 8129-1510

Resumo

Neste artigo demonstramos a aplicabilidade da simulação computacional de incêndio na fase de projeto, com vistas à obtenção de maior grau de segurança contra incêndio em edificações, aliado ao princípio da economicidade. Apresentamos os métodos probabilísticos e determinísticos utilizados na modelagem de incêndios e discutimos os modelos computacionais de evacuação de pessoas. Finalmente fazemos um estudo de caso com um prédio comercial típico de cidades brasileiras, atendendo às prescrições da NBR 9077. Executamos associadamente as simulações dos aplicativos FDS (dinâmica do fogo) e SIMULEX (evacuação de pessoas) para obter a influência da fumaça e da temperatura na fuga das pessoas e a eficiência dos preceitos normativos.

Palavras-chave: Segurança contra Incêndios; Métodos para Evacuação de Pessoas; FDS; SIMULEX.

Abstract

In this paper, we show the application of fire computer simulation in the design phase, with the intention of obtaining a higher degree of fire safety in buildings, allied with economic factors. We present probabilistic and deterministic models used in fire simulation and discuss computer models for the evacuation of people. Finally, we carry out a case study with a typically Brazilian office building, in accordance with the standard NBR 9077. We combine associatively the simulation of the application of the FDS (Fire Dynamic Simulation) with SIMULEX (people evacuation) to determine the influence of smoke and temperatures in the evacuation of people and the efficiency of the standards.

Keywords: Fire Safety. Methods for the Evacuation of People; FDS; SIMULEX.

Introdução

A segurança contra incêndio em edificações deve ser considerada, principalmente, na fase de projeto (fase de produção), pois é nessa fase que vários problemas que possam existir na fase de uso do edifício podem ser resolvidos.

É no projeto de arquitetura que o edifício tem o seu início, tomando forma e funcionalidade. O **projeto de arquitetura** quando bem elaborado representa papel importante como **medida preventiva e de proteção passiva** em uma edificação. Ele deve levar em consideração as saídas de emergência (rotas horizontais e verticais) e a especificação de materiais, assim como os conhecimentos técnicos de engenheiros e instaladores, além do conhecimento técnico e prático dos integrantes do Corpo de Bombeiros, formando um conjunto satisfatório capaz de minimizar, ou até excluir, falhas de projeto e garantir, como ponto mais relevante, a segurança dos ocupantes e visitantes. (BERTO, 1998)

Tendo sido comprovada acima a importância da elaboração do projeto de arquitetura e considerando todos os critérios que devem ser analisados neste processo, a simulação computacional aparece como uma ferramenta que pode ajudar o arquiteto a definir melhor o partido e o layout das paredes e divisões internas (compartimentações), como também o melhor posicionamento da escada de emergência conforme a forma do edifício e bem como ajudar a definir a especificação dos materiais que serão utilizados conforme sua resistência ao fogo e propagação de fumaça.

A maioria dos arquitetos já possui uma visão tridimensional em relação a seus projetos; utiliza *softwares* como o AutoCad que possibilita além da visão bidimensional (2D), como plantas, cortes e fachadas, uma visão em três dimensões (3D). A visualização em 3D facilita a compreensão dos projetos na execução e na correção de possíveis erros que em 2D não são facilmente detectados. A simulação computacional pode relacionar vários programas de evacuação e movimentação de fumaça.

A movimentação da fumaça e a evacuação das pessoas estão diretamente relacionadas devido a acontecerem simultaneamente no edifício (KATO & SEITO, 1988). A preocupação maior é a inalação dos gases tóxicos pelas pessoas que estão saindo da edificação em chamas até um lugar seguro, isto é, espaço livre exterior, área de refúgio, escada protegida ou à prova de fumaça (NBR 9077).

É possível, por meio de simulações, verificar a temperatura, a visibilidade e a mobilidade da fumaça. É importante citar que a fumaça possui cinco características: é opaca (seus produtos, principalmente a fuligem, permanecem suspensos na massa gasosa diminuindo a visibilidade), tóxica (seus produtos prejudicam a respiração), móvel (porque é um fluido que está sofrendo empuxo constante, podendo atingir diferentes ambientes e propagar o incêndio), quente (eleva a temperatura a ponto de gerar novos focos de incêndio) e inflamável (porque possui subprodutos da queima capazes de reagir com o oxigênio e queimar). Por meio das simulações computacionais podem-se propor medidas mais próximas da realidade, além de ser uma questão de economia. Podem também comprovar a eficácia do que está em norma, validar dados e avaliar a performance dos projetos quando submetidos a normas baseadas no desempenho (vale lembrar que a maioria das normas são prescritivas e não baseadas no desempenho). Desta forma, os profissionais podem aplicar as normas com mais segurança.

Simulação Computacional de Incêndio

A simulação computacional de incêndio é uma importante ferramenta para conhecimento da dinâmica do fogo nas edificações, bem como dos efeitos da temperatura e da fumaça. Por meio dela, pode-se contribuir sobremaneira para a minimização dos efeitos danosos do incêndio antes mesmo que eles ocorram. A simulação permite compreender como os aspectos estruturais, ambientais e de materiais utilizados no processo construtivo influenciam no desenvolvimento do fogo, favorecendo a melhoria na criação das normas técnicas, na preservação do meio-ambiente e no maior controle dos materiais empregados na construção civil. Desse modo, os projetos tornam-se mais viáveis economicamente e adequados às peculiaridades de cada empreendimento, sem deixar de atender aos aspectos de segurança.

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)

É importante salientar que ambos os programas são gratuitos e livres, permitindo sua adaptação à realidade brasileira, inserindo padrões de materiais para construção adequados ao local onde o edifício será

implantado. Além disso, existem aplicações produzidas por terceiros para facilitar a entrada de dados no FDS e a importação de arquivos de CAD. Podemos destacar o PYROSIM, que fornece uma interface gráfica ao usuário para inserir a geometria do ambiente a ser simulado, permite a importação de projetos DXF do AutoCad e integra a execução do FDS e Smokeview.

O modelamento computacional de incêndios pode utilizar dois métodos: o método probabilístico e o método determinístico (KARLSSON & QUINTIERE, 2000). No método probabilístico não se faz uso direto dos princípios físicos e químicos envolvidos no fogo, mas sim, de previsões estatísticas sobre a transição de um estágio para outro do crescimento do incêndio. Envolve a distribuição de probabilidades de determinados eventos ocorrerem a partir de um cenário especificado. As probabilidades de evolução do fogo de uma fase para outra são determinadas a partir do conhecimento de dados experimentais e de dados estatísticos de ocorrências reais.

O método determinístico utiliza princípios físicos e químicos sobre a natureza do incêndio. Este método divide-se em diversas categorias, de acordo com o tipo de problema a ser investigado. Por exemplo, transporte de calor e de fumaça, ativação de sistemas automáticos de combate (sprinklers) e de detectores de incêndio, evacuação de pessoas e perfis de temperatura em elementos estruturais. Especificamente, quanto ao transporte de calor e de fumaça no incêndio, são usadas duas classes de modelamentos computacionais: modelos de camadas (ou duas zonas) e modelos de campos (ou CFD- *computational fluid dynamics*).

Os métodos probabilísticos podem ser combinados com os métodos determinísticos para dar origem a métodos híbridos. Neste caso, o fogo é considerado determinístico uma vez que tenha atingido seja totalmente definido, mas as entradas de dados são variáveis aleatórias (probabilísticas). Esse método é aplicado na avaliação de riscos e análise de incertezas nos métodos determinísticos (KARLSSON & QUINTIERE, 2000).

Os modelos computacionais determinísticos mais sofisticados são os modelos de campos (ou CFD). A técnica de modelamento via dinâmica de fluidos computacional (CFD) é adotada em diversas áreas da engenharia e é baseada na solução completa, tri-dimensional e dependente do tempo das equações fundamentais de conservação de massa, de energia e de momento (KARLSSON & QUINTIERE, 2000). O uso de modelos CFD permite descrever incêndios em geometrias complexas e incorporar uma grande variedade de fenômenos físicos (McGRATTAN, 2006).

No modelo de campos o ambiente incendiado é dividido em subvolumes (células). As equações de conservação são aplicadas a cada célula. No presente modelo a conservação de momento é explicitamente imposta. Assim, variáveis adicionais (as componentes da tensão viscosa devido ao escoamento do fluido) surgem no conjunto de equações. A substituição destas na equação de conservação de momento (segunda lei de Newton aplicada ao escoamento do fluido) resulta nas conhecidas equações de Navier-Stokes e a solução destas é central para qualquer algoritmo de CFD (ANDERSON, TANNEHILL & PLETCHER, 1984).

Simulação Computacional de Evacuação em Caso de Emergência

Os modelos computacionais de evacuação são ferramentas importantes para a avaliação dos projetos de arquitetura no que concerne à segurança das pessoas, pois permite calcular o tempo de fuga dos ocupantes de uma edificação. O tempo necessário para a evacuação deve ser menor do que o tempo disponível para a fuga (FAHY, 2002), devendo ser estimado usando modelos de propagação do fogo, para o caso de incêndio, ou mesmo de risco de colapso estrutural, para situações de terremotos. Para estimar o tempo de evacuação, o arquiteto possui uma quantidade enorme de modelos, desde resolução de equações simples, até mesmo modelos computacionais que simulam o comportamento humano em caso de fuga.

Assim como os modelos de propagação do fogo podem prever a movimentação da fumaça através de uma construção, os modelos de evacuação podem prever a movimentação das pessoas em um prédio no caso de fuga. Usando esses modelos em conjunto, é possível para o projetista verificar os riscos a que as pessoas estão envolvidas ainda na fase de elaboração do projeto.

Antes mesmo de pensar nos métodos de cálculo do tempo para a evacuação, é necessário primeiro a compreensão das componentes do tempo total de evacuação. O início da contagem deste tempo inicia-se na eclosão do incêndio, ou seja, a ignição, terminando com a saída de todas as pessoas do prédio.

De acordo com o SFPE Handbook of Fire Protection Engineering (SFPE, 2002), podemos estimar o tempo total de evacuação como sendo a soma dos vários tempos de detecção, alarme, reação e do movimento de fuga propriamente dito, como mostrado na figura 1.

O tempo de detecção é o tempo necessário para que o incêndio seja percebido desde o seu início, seja por sistemas automáticos de detecção ou por uma testemunha. Quanto mais rápida for a detecção, maior a chance de o incêndio ser debelado e maior será o tempo disponível para a evacuação. O tempo de alarme é medido entre a detecção e o momento que as pessoas são avisadas. Este aviso também pode ser por sistemas automáticos ou mesmo pelos brigadistas de incêndio. Atualmente, para o caso de dispositivos automáticos de detecção e alarme, esses tempos são facilmente estimados com a utilização dos modelos de propagação do fogo, principalmente resultantes das simulações computacionais e de testes de detecção de fumaça e temperatura.

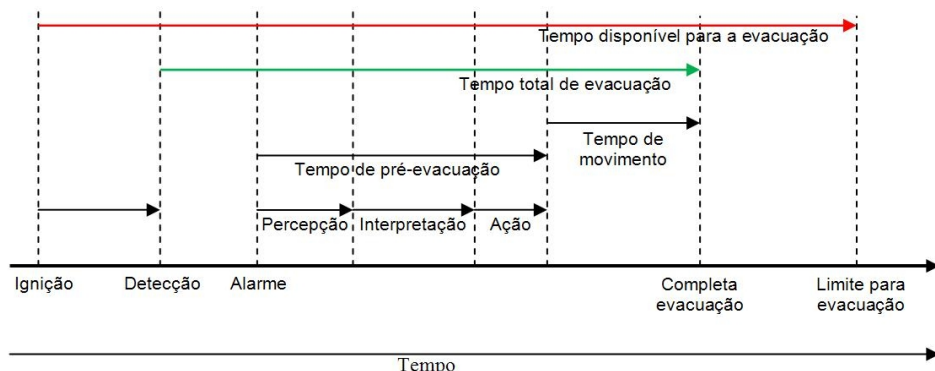


Figura 1 – Tempo total de evacuação e seus componentes

O tempo de pré-evacuação (tempo de reação ou tempo de pré-movimento na literatura britânica) é um dos mais complexos para ser estimado. Antigamente esses tempos eram completamente negligenciados, pois era presumido que todos os ocupantes, assim que tomassem conhecimento da ocorrência de um incêndio, começariam a evacuar o prédio instantaneamente. A partir de relatórios de vítimas de incêndio, foi verificado que sempre existia um tempo entre o alarme e o início do movimento de fuga, mostrando claramente que as pessoas não agiam da forma esperada nos modelos mais antigos. Por conta disso, se tornou lógico adicionar algum tempo entre o alarme da ocorrência do incêndio e o início da fuga. Atualmente, vários trabalhos estão sendo publicados, inclusive como referência para as simulações computacionais de evacuação. Como o tempo de reação depende basicamente do comportamento humano, é necessária a realização de testes e ensaio para estimá-lo, principalmente para o caso do Brasil, onde os dados são escassos, ou até mesmo inexistentes (GOUVEIA & ETRUSCO, 2002). Só a partir da realização desses testes e ensaios é que será possível estimar de uma forma mais precisa o tempo de pré-evacuação para o perfil do comportamento do brasileiro e sua posterior aplicação nos modelos computacionais.

Para calcular o tempo de movimento é possível a utilização de equações de movimento simples, onde são estimados o tempo a partir da distância e da velocidade média de deslocamento, ou por modelos computacionais, que podem ser apenas de movimento de escoamento ou que leve em consideração o comportamento humano (SANTOS & AGUIRRE, 2004). Em um estudo comparativo de 28 modelos computacionais de simulação de evacuação Erica Kuligowski (2004) dividiu os modelos em de movimento

(FPETool, EVACNET4, Takahashi's Fluid Model, PathFinder, TIMTEX, WAYOUT, Magnetic Model, EESCAPE, EgressPro, ENTROPY Model e STEPS), parcialmente comportamental (PEDROUTE/PAXPORT, EXIT89, Simulex, GridFlow e ALLSAFE), e comportamental (CRISP, ASERI, BFIRE-2, buildingEXODUS4, EGRESS, EXITT, VEgAS, E-SCAPE, BGRAF, EvacSim, Legion).

Dentre esses programas apresentados, podemos citar o Simulex, utilizado na aplicação apresentada a seguir, o BuildingExodus, utilizado aqui no Brasil pela Faculdade de Arquitetura da Universidade de São Paulo e o Fire Dynamics Simulator (FDS), programa utilizado na simulação computacional de incêndio, mas com o módulo recém desenvolvido pelo Centro de Pesquisa Técnica da Finlândia (VTT) inserido em sua última versão (KORHONEN & HOSTIKKA, 2007).

É importante notar que os modelos computacionais poderão fornecer valiosas informações sobre o movimento de pessoas quando da evacuação de um prédio, verificando-se pontos de estrangulamento e se as saídas estão bem posicionadas, fazendo com que elas sejam efetivamente utilizadas em um caso de emergência. Todas essas informações são essenciais para a elaboração de um projeto que leve em conta a segurança das pessoas que irão utilizar a edificação.

Aplicação para o caso de um prédio comercial com exigência de escada a prova de fumaça

Aliado aos conceitos para projetar em arquitetura, há o que é prescrito em normas ou regulamentos adotados no local onde o edifício será implantado. A referência nacional para elaboração e aprovação de projetos em relação às saídas de emergência é a NBR 9077 de 1993, publicada pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas).

Com o intuito de aplicar a simulação computacional de incêndio e verificar a influência da fumaça na rota de fuga, reproduzimos um prédio comercial de escritórios com características típicas e representativas das edificações de cidades brasileiras, dotado de escada à prova de fumaça. A edificação possui altura¹ de 14m (quatorze metros), sendo classificada pela NBR 9077 como medianamente alta. A área total construída é de 2.430m² (dois mil quatrocentos e trinta metros quadrados), dividida em seis pavimentos, térreo mais cinco pavimentos tipo, todos com área de 405m² (quatrocentos e cinco metros quadrados). Ainda de acordo com a NBR 9077 essa edificação, pelas dimensões em planta, é considerada grande (entre 1.500m² e 5.000m²) com relação à área total, porém, de pequeno pavimento (área menor que 750m²).

A estrutura do prédio é de concreto. Foi adotado o padrão de material do banco de dados do próprio *software* FIRE DYNAMICS SIMULATOR (FDS) versão 4. Quanto às características construtivas, o prédio poderia ser classificado como de difícil propagação do fogo (código Z), no entanto, a existência de grandes áreas (acima de 125m²) utilizando divisórias leves e não-resistentes ao fogo, o que é comum em edifícios de escritórios, faz com que a classificação recaia em código Y (mediana resistência ao fogo). No estudo de caso apresentado as paredes não contribuirão para a propagação do incêndio.

Os sistemas de proteção contra incêndio exigidos pela legislação local são: extintores de incêndio, sinalização de segurança, iluminação de emergência, saídas de emergência, proteção contra descargas atmosféricas, hidrantes de parede e detecção automática de incêndio. É de se notar a não obrigatoriedade de sistema automático de combate a incêndios, pois a existência de tal sistema modificaria significativamente os resultados obtidos, uma vez que o incêndio poderia ser debelado antes de produzir quantidade significativa de fumaça para o ambiente. Outro comentário a ser feito quanto aos sistemas exigidos para esse tipo de edificação diz respeito à detecção automática de incêndios: num caso geral, o

¹ Altura medida conforme Norma Técnica nº 001/2002 do CBMDF: "diferença de cota entre o logradouro público ou via interior da edificação e a face superior da laje de piso do último pavimento".

incêndio seria detectado pelo sistema e a edificação alarmada. No entanto, para um primeiro estudo foi considerado o pior cenário, ou seja, os detectores não funcionaram.

A escada de emergência, dimensionada em conformidade com a NBR 9077, para um edifício de escritórios medianamente alto com pequena área de pavimento deve ser do tipo enclausurada à prova de fumaça. Escada à prova de fumaça é aquela cuja caixa é envolvida por paredes corta-fogo e dotada de porta corta-fogo, sendo o acesso feito por antecâmara igualmente enclausurada e ventilada por dutos. A largura da escada, de acordo com a população estipulada, deve ser a mínima, 1,10m. A distância máxima a percorrer até se alcançar a escada deve ser de, no máximo, 30m para uma única saída, como é no presente caso.

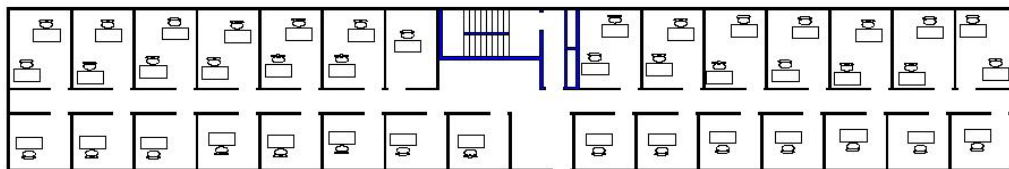


Figura 4 – Planta baixa esquemática de pavimento tipo

De acordo com a NBR 9077 a densidade populacional de um prédio de escritórios é de uma pessoa para cada 7 metros quadrados de área de piso. Desse modo, para o prédio em estudo estima-se uma população de 58 (cinquenta e oito) pessoas por pavimento, perfazendo uma população total de 348 (trezentos e quarenta e oito) pessoas na edificação. A NBR 9077 estabelece que a capacidade da unidade de passagem² deve evacuar 60 pessoas por minuto pelas escadas e 100 pessoas por minuto pelos corredores e portas. É de se notar que os pavimentos estariam completamente evacuados em um minuto, o que não é verificado pela simulação mesmo seguindo as prescrições quanto ao correto dimensionamento das escadas.

A duração do incêndio na edificação foi obtida a partir da simulação computacional do tempo necessário para a evacuação das pessoas do prédio no *software* SIMULEX[®]. Obteve-se o tempo de 450s (quatrocentos e cinquenta segundos) ou cerca de 7min30 para a completa saída das pessoas da edificação. Monitorando-se os pavimentos, pode-se também saber o tempo de esvaziamento de cada andar, cerca de 100 segundos ou quase dois minutos. Esse dado é utilizado para uma das simulações, a que leva em conta que os usuários da edificação ao passarem pela saída de emergência vão fechar a porta atrás de si.

O fogo foi iniciado numa sala do segundo andar (terceiro pavimento), sua potência é de 5MW (cinco megawatt), ou seja, equivale a uma sala inteira em chamas (DeHAAN, 2002). A liberação de energia segue uma rampa, partindo do zero e levando 30s (trinta segundos) para chegar aos 100%, ou seja, os 5MW, que representam a queima total da sala.

Um dos primeiros pontos a serem observados é a altura da camada de fumaça. A fumaça influencia sobremaneira na evacuação das pessoas. Chegando a ser a maior causadora de mortes em caso de incêndio. O pé-direito do andar incendiado é 2,70m. No entanto, o rebaixo de tetos para permitir a passagem de tubulações e cabeamentos implica na diminuição da altura livre do corredor e correspondente abaixamento da camada de fumaça. Assim, as pessoas não mais poderão deslocar-se na posição ereta, mas sim, agachadas, reduzindo a velocidade de deslocamento. Aquelas que insistirem em deslocar-se na posição em pé terão dificuldades para respirar e visualizar os obstáculos da rota de fuga.

Pode-se observar que a largura da camada de fumaça alcança cerca de 1m a partir do teto no corredor de acesso à escada de emergência menos de um minuto após o início da queima. Considerando a instalação de um forro 30cm abaixo da laje, pode-se concluir facilmente que, com menos de 1min de fogo, os ocupantes daquele andar não terão mais condições de deslocar-se na posição ereta, dificultando a fuga.

² Unidade de passagem é a largura mínima para a passagem de uma fila de pessoas, fixada pela NBR 9077 em 0,55m. A capacidade da unidade de passagem é o número de pessoas que passa por essa unidade em 1 minuto.

O tempo necessário para escape, conforme Gouveia e Etrusco (2002), é composto por várias parcelas e decorre com certo atraso em relação à ignição e leva em conta ainda o tempo de reação ao alarme de incêndio. Estimativas desse tempo de pré-movimento para escritórios não dotados de brigadas de incêndio capazes de orientar a fuga são da ordem de 3 a 4 minutos (SFPE, 2002). Portanto, depois de decorrido esse tempo de pré-movimento a camada de fumaça vai estar ainda mais baixa e comprometedora.

Outra dificuldade para a evasão do prédio que pode ser identificada na fase de projeto por meio da simulação computacional é o perfil de temperatura na rota de fuga. A fumaça transporta consigo grande parte da energia liberada pelo fogo. Observa-se que a temperatura na camada de fumaça no corredor após 1min de queima ultrapassa os 200 °C. Com quatro minutos de simulação a temperatura na camada de fumaça já alcança os 400 °C.

O fechamento de portas durante a evacuação do prédio produz resultados significativos no que tange à limitação da concentração de fumaça no ambiente e na limitação da propagação do fogo. O gráfico 1 mostra a queda nos níveis de fumaça na antecâmara da escada logo após o fechamento da porta de acesso ao corredor do ambiente incendiado.

A simulação computacional vai permitir também avaliar variações dos modelos propostos pela legislação prescritiva. O autor do projeto poderia pensar em ganhar espaço na edificação por meio da execução de apenas um duto de ventilação cruzada em substituição aos dois dutos exigidos pela NBR 9077. Para tanto, ele deve demonstrar a equivalência das duas soluções.

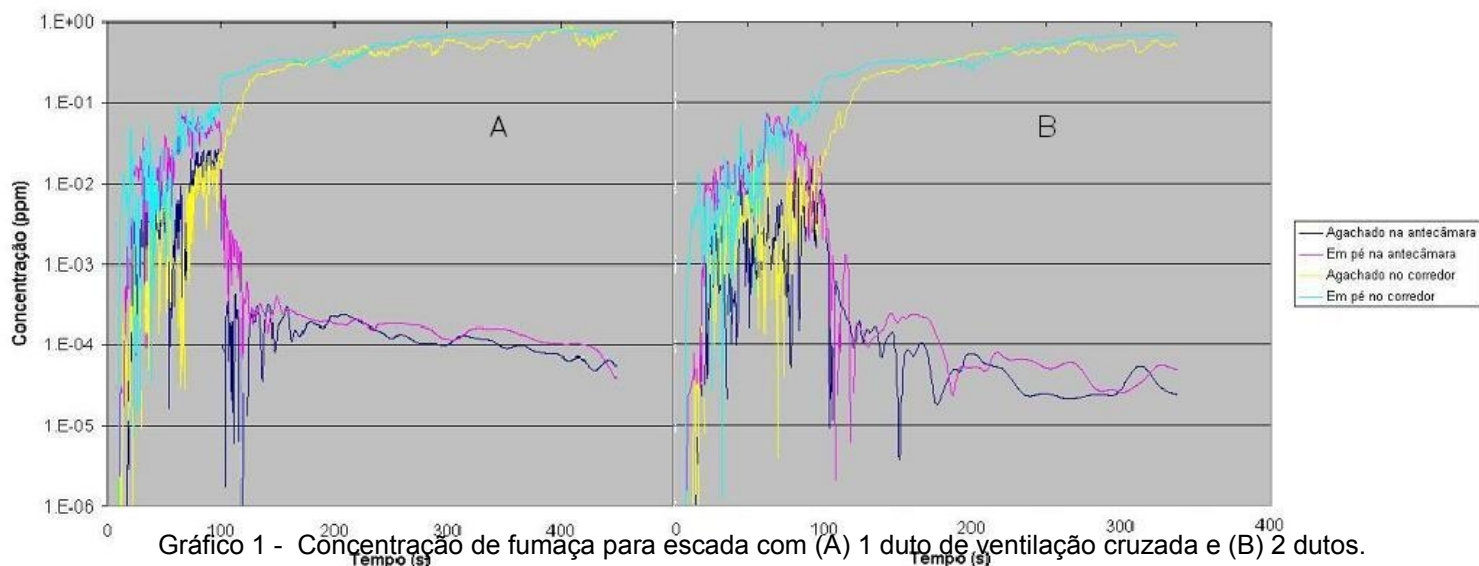


Gráfico 1 - Concentração de fumaça para escada com (A) 1 duto de ventilação cruzada e (B) 2 dutos.

Os gráficos, no entanto, mostram que na escada com dois dutos a concentração de fumaça na antecâmara cai para níveis abaixo de 0,0001ppm antes dos 200s, enquanto que o duto único de ventilação cruzada leva cerca de 400s para chegar nesse nível. Dessa maneira, a solução pode ser testada, substituída ou alterada antes da implementação ou da ocorrência de qualquer custo de obra.

Conclusões

As simulações computacionais de incêndio e de evacuação constituem importantes ferramentas para elaboração de projetos, pois permitem levar em consideração a escolha dos materiais, distribuição dos espaços e comprovação do que prescreve a norma, além de possibilitar a adoção de soluções alternativas personalizadas de baixo custo, atendendo aos objetivos da segurança contra incêndio.

No estudo de caso ficou comprovado que, apesar de a NBR 9077 estabelecer que a capacidade da unidade de passagem é de 60 pessoas por minuto pelas escadas e 100 pessoas por minuto pelos corredores e portas, gastou-se 7min30s para total evacuação do edifício, e isso contradiz a norma mesmo seguindo as prescrições de dimensionamento das escadas.

Outro ponto observado foi a queda dos níveis de fumaça após o fechamento das portas corta-fogo durante a evacuação.

Uma ferramenta de fácil utilização é o SIMULEX, que em duas dimensões possibilita a visualização do movimento das pessoas quando na ocorrência de uma emergência. Outra ferramenta importante, já esta tridimensional, que representa a evolução do incêndio, apresentando a movimentação da fumaça no edifício, além de possibilitar a interface com a evacuação dos ocupantes é o *software* americano FDS (*Fire Dynamics Simulator*).

Este estudo de caso, que gerou o artigo, foi parcialmente financiado pela FINEP.

Referências Bibliográficas

- ANDERSON, D.A., TANNEHILL, J.C. e PLETCHER, R.H. **Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer**, Taylor & Francis (New York, 1984).
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9077 – Saídas de emergência em edifícios**. Rio de Janeiro, 1993.
- BERTO, Antonio Fernando. **Gestão da segurança contra incêndio em edificações**. Curso Questões atuais da segurança contra incêndio em edificações. IPT, São Paulo, 1998.
- DeHAAN, J. D. **Kirk's fire investigation**. Prentice Hall. New Jersey. 5th edition. 2002.
- FAHY, R. F., **Tools of the simulation of human behavior**, Fire Protection Engineering, **16** , pag 19, 2002.
- GOUVEIA, A. M. Claret de, ETRUSCO, P. **Tempo de escape em edificações: os desafios do modelamento de incêndio no Brasil**. Revista Escola de Minas. Vol. 55 (4): 257-261. Ouro Preto. Out/Dez 2002.
- KARLSSON, B. e QUINTIERE, J.G. **Enclosure fire dynamics**, CRC Press (Washington, 2000).
- KATO, Miguel Fumikasú; SEITO, Alexandre Itiu. **Fumaça no incêndio – movimentação no edifício e seu controle**. Número 058. Coletânea Pini de Incêndios. São Paulo, 1988.
- KORHONEN, T. and HOSTIKKA, S. **FDS+Evac – Technical Reference + User's Guide**, VTT Technical Research Centre of Finland, 2007.
- KULIGOWSKI, E., **Review of 28 Egress Models**, Proceedings of NIST Workshop on Building Occupant Movement during Fire Emergencies. pág. 66-88, Junho de 2004.
- McGRATTAN, K. **Fire Dynamics Simulator (version 4) – technical reference guide**, NIST Special publication 1018 (Washington, 2006).
- REHM, R.G. e BAUM, H.R. **The equations of motion for thermally driven, buoyant flows**, Journal of Research of the National Bureau of Standards **83** n° 3 (1978) 297-308.
- SANTOS, G. e AGUIRRE, B. E. **A Critical Review of Emergency Evacuation Simulation Models**, NIST Workshop on Building Occupant Movement during Fire Emergencies, p 27, June 9-10, 2004
- SFPE - Society of Fire Protection Engineering. **The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering**. Third Edition, 2002.