



# Projeto de rotas de fuga para a situação de incêndio em edifício universitário – um estudo de caso

Palavras-Chave: [meios de escape], [segurança contra incêndio], [modelos CFD]

**Autores/as:**

**Guilherme Coelho Sigrist Silva (graduando)**

**Engº Ênio José Bolognini (doutorando)**

**Profª Drª Carla Neves Costa (orientadora)**

**\*[Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da UNICAMP]**

---

## INTRODUÇÃO:

O estudo de medidas de proteção e segurança no combate a incêndios é considerado um dos requisitos básicos de desempenho no projeto, construção, uso e manutenção das edificações (ONO, 2007). Uma das medidas de proteção de edifícios são os meios de escape, que incluem as rotas de fuga e as saídas de emergência.

Durante o abandono, as rotas de fuga não devem facilitar tropeços, quedas e conseqüente congestionamento de pessoas, levando a pisoteamentos, que podem aumentar a quantidade de vítimas. Um exemplo é o incêndio da Boate Kiss, em 2013, em Santa Maria, RS, com 242 vítimas fatais, muitas foram pisoteadas durante a fuga de uma edificação que não possuía medidas de escape adequadas (MARCIO LUIZ, 2015).

Os modelos computacionais podem possibilitar uma estimativa realista de temperaturas máximas, velocidades de aquecimento e de propagação de fumaça e calor, permitindo otimizar projetos de estruturas, avaliar a qualidade de projetos de edificações, dos meios de escape para dar subsídios a planos de emergência e à gestão de riscos de uma edificação. Um dos modelos computacionais mais avançados baseia-se na fluidodinâmica computacional – os chamados modelos CFD (*Computational Fluid Dynamics*). Os cálculos baseiam-se em equações diferenciais complexas representativas dos processos físicos e/ou físico-químicos da combustão, térmicos e comportamento físico-térmico dos materiais estruturais e de compartimentação, levando-se em conta as características do cenário de incêndio. Daí a necessidade de estudos exploratórios para avaliar a viabilidade do uso de modelagem numérica para o projeto de compartimentos que fazem parte das rotas de fuga, considerando-se os recursos computacionais requeridos, as limitações do *software*, a disponibilidade de dados de *input* para simulações de incêndio representativas do cenário de incêndio de edificações típicas do Brasil.

Neste trabalho são apresentados os resultados de uma pesquisa tecnológica, que busca explorar a viabilidade de modelagem CFD com auxílio do *software* FDS (Fire Dynamics Simulator) para uma análise numérica prognóstico da severidade de incêndio de edifício reticulado horizontalizado de médio porte, com apresentação de um estudo de caso. O objeto da análise são possíveis aplicações ao projeto de rotas de fuga e da estrutura, uma vez que os meios de escape devem estar protegidos por elementos de compartimentação sustentados pela estrutural.

A pesquisa está em desenvolvimento no Departamento de Estruturas da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da UNICAMP.

## **OBJETIVOS:**

- estudar o modelo fluidodinâmico computacional (CFD *model*);
- desenvolver uma simulação computacional de movimentação de fumaça e calor para edificações, com auxílio do *software* FDS (*Fire Dynamics Simulator*) e SMV (*Smokeview*);
- verificar o desempenho de saídas de emergência projetadas com base nas prescrições da ABNT NBR 9077:2001 e na IT nº 11/2019 do CBPMESP (Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo), em um estudo de caso;
- fornecer subsídios a futuras pesquisas sobre simulação fluidodinâmica computacional de incêndios para compartimentos típicos de edificações do Brasil.

## **JUSTIFICATIVA:**

Os edifícios estão sujeitos a incêndios acidentais. Os gases tóxicos e o calor produzidos pela combustão, dificultam o abandono da edificação pelos usuários. As rotas de fuga devem conduzir com segurança os usuários até às saídas de emergência e às áreas de refúgio. Para edifícios existentes, as simulações computacionais podem auxiliar no projeto de rotas de fuga, no plano de emergência e no gerenciamento de risco, mas demandam cuidados para obter resultados confiáveis. Quais os dados disponíveis para modelagens computacionais realistas de incêndios nos edifícios do Brasil? O tema da pesquisa pertence à área de segurança pública, conforme a Portaria Nº 108/2019, do MJSP (Ministério da Justiça e Segurança Pública), sendo prioritária da área de Tecnologias Estratégicas, setor IV Segurança Pública e de Fronteira, conforme a Portaria nº 1.122/2020 do MCTIC (Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações).

## **METODOLOGIA:**

### **ANÁLISE NUMÉRICA COMPUTACIONAL:**

Análise fluido dinâmica computacional, com auxílio do *software* FDS-SMV v. 2020. Os cálculos baseiam-se no método das diferenças finitas para obter a solução numérica aproximada das equações diferenciais de Navier-Stokes considerando-se o transporte dos fluidos (que representam a fumaça e o calor) de baixa velocidade (REHM & BAUM, 1978). O método das diferenças finitas calcula as equações diferenciais por aproximação das derivadas por diferenças finitas. A função de aproximação vem da série de Taylor da função derivada (BURDEN & FAIRES, 2008).

### **Materiais:**

A propriedades térmicas assumidas para os materiais do cenário de incêndio são constantes (**Tabela 1**). Os elementos de compartimentação (paredes e lajes de piso) possuem espessura = 0,2 m, emissividade resultante  $\epsilon_r = 0,80$ .

- Materiais incombustíveis: elementos estruturais e de compartimentação em concreto armado;
- Materiais combustíveis: portas de madeira e mobiliário (carga de incêndio  $q_{fi} = 300 \text{ MJ/m}^2$  com HRR (*Heat Release Rate*) limite de  $250 \text{ kW/m}^2$ , cf. EN 1991-1-2:2002).

*Tabela 1 – Propriedades físicas e térmicas dos materiais (MACGRATTAN & FORNEY, 2004).*

<b>Materiais</b>	<b>Elemento</b>	<b>Condutividade térmica <math>\lambda</math> [W/(m*K)]</b>	<b>Calor específico <math>c</math> [kJ/(kg*K)]</b>	<b>Massa específica <math>\rho</math> [kg/m<sup>3</sup>]</b>
concreto massa	paredes, lajes (teto e piso)	2	0,95	2400
madeira	portas	0,14	0,42	290

### **Equipamentos:**

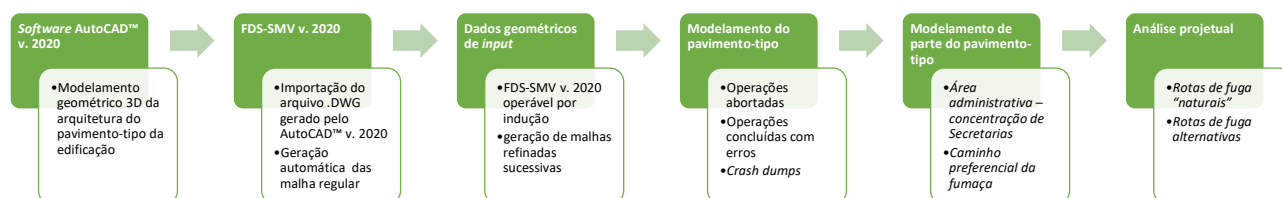
- *Hardware*: Computador *laptop* com processador Core™ i5 7400, memória RAM 4 GBytes, HD 1 TBytes, placa de vídeo 4 GBytes, monitor LCD LED e resolução de 1366 x 768; *mouse* óptico.
- *Software*: sistema operacional Microsoft® Windows® v. 10, aplicativos básicos do Microsoft® Office 365® (*Word*®, *Excel*® e *Power Point*®), navegador de internet Google Chrome Versão 92.0.4515.159 (Versão oficial) 64 bits); FDS (*Fire Dynamics Simulator*) v. 6.7.4; SMV (*Smokeview*) v. 6.7.14 (MCGRATTAN & FORNEY, 2004; MCGRATTAN, 2006).

## ANÁLISE PROJETUAL:

Estudo de caso – análise projetual das rotas de fuga “naturais” com base na localização das saídas de emergência, para o edifício da diretoria da FECFAU (Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo) da Unicamp.

## PROCEDIMENTOS:

A **Figura 1** apresenta as etapas dos procedimentos da investigação. O parâmetro usado para aferir a malha foi a temperatura máxima dos gases quentes no compartimento. Adotou-se o modelo de incêndio “tê quadrado” para descrever a taxa de liberação de calor da queima na fase de aquecimento (**Figura 3**; EN 1991-1-2:2002).



**Figura 1 – Procedimentos de investigação numérica. Fonte: Autoral**

## **RESULTADOS E DISCUSSÃO:**

### ANÁLISE NUMÉRICA COMPUTACIONAL:

O tempo total da simulação do incêndio foi limitado à 20 min (300 s), que corresponde ao tempo a partir do início do incêndio no qual a atmosfera do ambiente possui concentração de gases tóxicos no limite para visualização (ASTM E662 *apud* IT nº 02/2019) e para comportamento ágil na fuga.

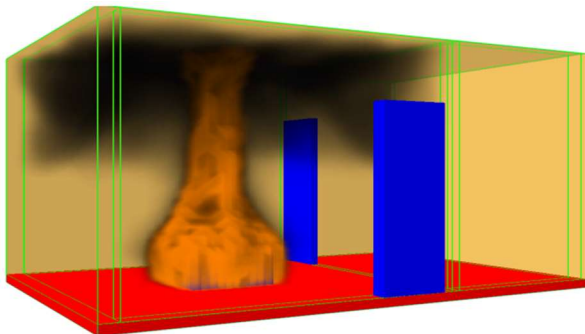
Na etapa de validação da malha de diferenças finitas, foi adotado um compartimento pequeno do tamanho de uma das salas da Administração, que demandou o processamento durante 12 h (**Tabela 2**). Para a modelagem do pavimento inteiro, o processamento numérico se tornou impraticável para os equipamentos usados. O custo computacional é grande, requerendo velocidade de processamento e capacidade de memória RAM. Daí, optou-se por selecionar uma parte do pavimento na região de maior risco de incêndio: as salas do setor administrativo, porque é um local com maior densidade demográfica e concentração de carga de incêndio (mobiliário e equipamentos eletrônicos), com corredores fechados (**Figura 2**).

A temperatura máxima dos gases quentes  $\theta \approx 90$  °C. A movimentação de fumaça é restrita à área administrativa devido à compartimentação, mas começa a escapar pela abertura da porta da secretaria. O trajeto mais efetivo de fuga é o deslocamento do compartimento para a escada mais próxima à porta das secretarias. Devido às simplificações adotadas no modelo (propriedades físico-térmicas dos materiais do cenário de incêndio são constantes, carga de incêndio de madeira, desprezando-se os plásticos), para não causar *crash dumps*<sup>1</sup> durante o processamento. Foi assumida que a taxa de liberação de calor da carga de incêndio representada pelo mobiliário, é padrão nos países da UE (União Europeia). No Brasil não há controle de qualidade na fabricação e venda de mobiliário referente à ignição, liberação de fumaça ou propagação de chamas. A classificação de mobiliários na etiqueta dos produtos não é obrigatória, tal como ocorre nos produtos alimentícios. A norma ABNT NBR 16405:2015 “Sofás, poltronas e assentos estofados – Avaliação das características de ignitabilidade – Classificação e métodos de ensaio” é pouco conhecida por profissionais da indústria moveleira, *designers* de interiores e arquitetos. O seu uso em projetos pode motivar os fabricantes a aplicar retardantes de chamas nos estofados sintéticos para manter o comportamento térmico similar aos mobiliários de materiais celulósicos.

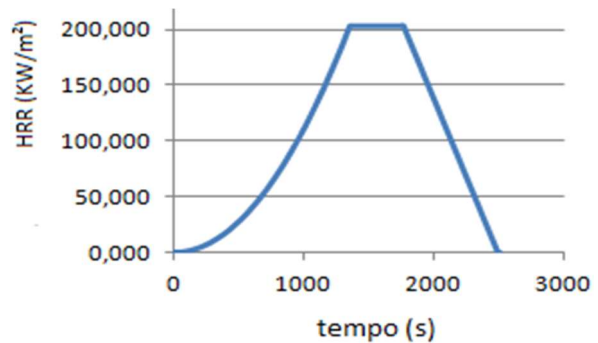
**Tabela 2 – Construção de malhas e validação numérica.**

Subcélulas da Malha (m <sup>3</sup> , eixos x, y e z)	Subdivisão da Malha (eixos x, y e z)	Tempo de Processamento (h)	Número de Células	Tempo Simulado (min)
6 x 4 x 3	60 x 40 x 30	12	72.000	5
5,5 x 3,6 x 2,7	54 x 36 x 27	7,5	52.488	5
3 x 2 x 1,5	30 x 20 x 15	1,5	9.000	5

<sup>1</sup> Despejo de memória RAM ou despejo de núcleo de um *software* durante um processamento de dados.



**Figura 2** – Salas da área administrativa no início do incêndio. **Fonte:** Autoral.



**Figura 3** – Curva de incêndio “tê quadrado”. **Fonte:** Autoral

### **ANÁLISE PROJETUAL:**

Os meios de escape devem ser dimensionados adequadamente para não haver congestionamentos de pessoas durante o abandono da edificação na situação de incêndio. O projeto de rotas de fuga ideal é aquele possui as rotas de fuga mais curtas e devidamente protegidas da fumaça e do calor. Para o estudo de caso, a rota de fuga “natural” (**Figura 4**) atende a essa qualidade, as características geométricas atendem aos requisitos da ABNT NBR 9077:2001 e da IT nº 11/2019. Contudo, há forte possibilidade de haver congestionamento de pessoas na escada de emergência próxima, que possui pequena largura. Uma rota alternativa (**Figura 5**) pode reduzir a aglomeração de pessoas na rota de fuga natural, mas a sua eficiência está condicionada ao treinamento periódico em simulações de abandono, porque a escada lateral está afastada da área administrativa e é pouco usada no dia a dia. Em uma emergência, as pessoas que desconhecem as saídas usam o mesmo trajeto de entrada, para sair (ARAÚJO, 2008).



**Figura 4** – Rota de fuga “natural” do edifício da Diretoria da FECFAU/Unicamp. **Fonte:** Autoral



**Figura 5** – Rota de fuga alternativa do edifício da Diretoria da FECFAU/Unicamp. **Fonte:** Autoral

Considerando apenas a movimentação de fumaça e a elevação de temperatura, os resultados da modelagem computacional confirmam que ambas as rotas de fuga são eficientes devido à localidade e à compartimentação relativa: há propagação do incêndio pelas aberturas das portas, que são poucas e o corredor não possui carga de incêndio. Mesmo sem dados numéricos precisos, a modelagem CFD forneceu resultados qualitativos confiáveis para projetos baseados no desempenho (*performance-based design*). Contudo, não foi realizada a modelagem de movimentação de multidões e simulação de desocupação acoplados aos resultados da modelagem CFD. O comportamento humano coletivo em situação emergencial tende a ser um “comportamento de manada” caótico em situações de *stress* generalizado, para pessoas não-treinadas àquelas situações.

### **CONCLUSÕES:**

Para o uso de modelos CFD, são necessários conhecimentos multidisciplinares da Física para soluções de Engenharia que requerem uma abordagem holística do problema em questão: a análise realista da dinâmica do fogo. O uso de *software* que usam modelos CFD requer domínio

de conhecimentos transdisciplinar perpassando pelas Engenharias Química, Mecânica, dos Materiais e Civil, requerendo mais estudos. Os cálculos baseiam-se em equações numéricas complexas representativas dos processos físicos e/ou físico-químicos da combustão, levando-se em conta as características do cenário de incêndio. Deve-se considerar os recursos computacionais disponíveis, as limitações do *software* FDS e os dados de *imput* para simulações realistas de incêndios nas edificações correntes. O estudo de caso avaliado à luz do Decreto Nº 63.911/2018 do Estado de São Paulo confirmou a eficiência das rotas de fuga levantadas pela análise projetual. Mesmo que os dados numéricos não sejam precisos, a modelagem CFD fornece resultados qualitativos confiáveis para projetos baseados no desempenho (*performance-based design*). Dados de propriedades físico-térmicas mais precisos são necessários para caracterizar os elementos do cenário de incêndio.

---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAÚJO, J. M. F. Comportamento humano em incêndios. *In*: SEITO, A. I., *et al.* **A segurança contra incêndios no Brasil**. São Paulo: Projeto Editora. 2008. Cap. VII, p. 93-100. Disponível em: <https://doi.org/10.6028/NIST.sp.1019>. Acesso em: 13 Abr. 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16405**: Sofás, poltronas e assentos estofados – Avaliação das características de ignitabilidade – Classificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2015. 31 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9077**: Saídas de emergência em edifícios. Rio de Janeiro, 2001. 40 p.
- BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. Portaria Nº 1.122, de 19 de março de 2020. Define as prioridades, no âmbito do Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MCTIC), no que se refere a projetos de pesquisa, de desenvolvimento de tecnologias e inovações, para o período 2020 a 2023. **Diário Oficial [da] União**, Brasília, DF, 24 Mar. 2020, Vol. 158, Nº 57, Seção 1, p. 19. Disponível em: <https://bit.ly/3aKv0fl>. Acesso em: 27 Abr. 2020.
- BURDEN, R.L.; FAIRES, J. D. *Análise Numérica*. São Paulo: Cengage CTP, 2008. 736 .p
- COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. **EN 1991-1-2**: Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire. Brussels, 2002. 59 p.
- MARCIO LUIZ. Dois anos depois, veja 24 erros que contribuíram para tragédia na Kiss. **Portal G1 (Globo)**, Porto Alegre, 27 jan. 2015. Rio Grande do Sul. Disponível em: <https://glo.bo/2sFPsdn>. Acesso em: 29 set. 2019.
- MCGRATTAN, K. B. (Ed.). **Fire Dynamics Simulator (Version 4) Technical Reference Guide**. 6<sup>th</sup> Edition. Maryland: NIST Pubs, Nov. 2006. 94 p. [Special Publication (NIST SP) – 1018]. Disponível em: <https://doi.org/10.6028/NIST.sp.1018>. Acesso em: 13 Abr. 2020.
- MCGRATTAN, K. B.; FORNEY, G. P. **Fire Dynamics Simulator (Version 4) Users Guide**. 6<sup>th</sup> Edition. Maryland: NIST Pubs, Nov. 2004. 90 p. [Special Publication (NIST SP) – 1019]. Disponível em: <https://doi.org/10.6028/NIST.sp.1019>. Acesso em: 13 Abr. 2020.
- ONO, R. Parâmetros para garantia de qualidade do projeto de segurança contra incêndio em edifícios altos. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 7, n. 1, p. 97-11, jan./mar. 2007.
- REHM, R.G.; BAUM, H.R. The equations of motion for thermally driven, buoyant flows. **Journal of Research of the National Bureau of Standards**, Gaithersburg, v. 83, n. 3, 1978. p. 297-308.
- SÃO PAULO (Estado). Decreto Nº 63.911, de 10 de dezembro de 2018. Institui o Regulamento de Segurança Contra Incêndios das edificações e áreas de risco no Estado de São Paulo e dá providências correlatas. **Diário Oficial [do] Estado de São Paulo**, vol. 128, n. 229, 11 Dez. 2018, Caderno Executivo, Seção 1, p. 1-9.
- SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Estado dos Negócios da Segurança Pública. Polícia Militar. Corpo de Bombeiros. **Instrução Técnica n. 11/2019**: Saídas de Emergência. São Paulo, 2019. 21 p.
- SÃO PAULO (Estado). Secretaria de Estado dos Negócios da Segurança Pública. Polícia Militar. Corpo de Bombeiros. **Instrução Técnica n. 02/2019**: Conceitos básicos de segurança contra incêndio. São Paulo, 2019. 29 p.