

XV Seminário Nacional de Bombeiros - SENABOM Goiania, Brasil, 2016

CAPACIDADE DE EXAUSTÃO DE FUMAÇA EM DUTOS DE VENTILAÇÃO NATURAL DAS ESCADAS DE EMERGÊNCIA

André T. Campos*, Mário B. B. Siqueira **

* Corpo de Bombeiros Militar do Distrito Federal, ** Universidade de Brasília
andretelles@unb.br, mariosiqueira@unb.br

Resumo: este artigo trata dos mecanismos físicos relacionados ao escoamento de fumaça através de dutos de ventilação natural de escadas de emergência. O objetivo da pesquisa é mensurar a capacidade de extração de fumaça através do duto de saída, calculando a vazão mássica na expedição do duto em diferentes condições. São apresentados resultados de vazão mássica de fumaça para antecâmaras ventiladas por dois dutos, um de entrada de ar e outro de saída de fumaça, e antecâmaras ventiladas por apenas um duto de saída de fumaça.

Palavras-chave: convecção natural, dutos de fumaça, fumaça de incêndio, saídas de emergência.

I INTRODUÇÃO

A fumaça é o produto do incêndio que mais afeta as pessoas durante o abandono da edificação, pois diminui a visibilidade, aumenta a palpitação devido à presença de gás carbônico, provoca dificuldades respiratórias e lacrimejamento, induz o pânico e debilita o movimento das pessoas pelo efeito tóxico de seus componentes. Desse modo, a evacuação dos locais de maior risco no menor tempo possível torna-se a estratégia mais confiável de salvamento de vidas em ocorrências de incêndio (GOUVEIA; ETRUSCO, 2002).

As saídas de emergência devem garantir uma rota de fuga livre de fumaça aos ocupantes de uma edificação de qualquer ponto do edifício até o logradouro (FAILLACE, 1991). Os dutos de ventilação natural das escadas à prova de fumaça – PF são projetados de tal modo a garantir que a fumaça que porventura entre na antecâmara seja direcionada para o exterior do prédio. O mecanismo físico responsável por essa movimentação de fumaça através dos dutos é a convecção natural. Portanto, compreender os fundamentos da convecção natural é de suma importância para avaliar a efetividade desse sistema de ventilação natural das escadas à prova de fumaça.

Em convecção natural a movimentação do fluido é devida à presença combinada de um gradiente de massa específica e de uma força de campo proporcional à massa específica (BEJAN, 2013; INCROPERA; DEWITT, 2003). Em incêndios, o fluido é a fumaça, a força de campo é a gravitacional e as variações de massa específica são devidas ao gradiente de temperatura. Os movimentos de um

fluido em meios contínuos são descritos pelas equações governantes: da continuidade, de Navier-Stokes e de energia (BEJAN, 2013; POPE, 2000). Uma característica dificultadora na resolução de problemas de convecção natural reside no fato de que os campos de temperatura e de velocidade estão acoplados. Assim, o estudo da convecção é calcado sobre dois campos do saber: a mecânica dos fluidos e a transferência de calor.

II OBJETIVOS

Trabalhos anteriores (ALVES; CAMPOS; BRAGA; 2008; CAMPOS; BRAGA, 2011) discutiram os níveis de concentração de fumaça na antecâmara de escadas de emergência com sistema de ventilação natural por dutos relacionando-os com o tempo de evacuação. Assim, o objetivo deste artigo é:

Avaliar a efetividade do sistema de ventilação natural de escadas de emergência no que tange à capacidade de exaustão de fumaça em caso de incêndio.

III DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS

Um primeiro passo essencial no tratamento de qualquer problema de convecção é determinar se a camada limite é laminar ou turbulenta. Diferentemente dos escoamentos em geral, na convecção natural o grupo adimensional a ser considerado não é o tradicional número de Reynolds, mas sim o número de Grashof (BEJAN, 2013):

$$Gr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu^2} \quad (1)$$

Em que g é a aceleração da gravidade, β é o coeficiente de expansão térmica e ν é a viscosidade cinemática do fluido. As temperaturas T_s e T_∞ referem-se à temperatura da superfície (parede do duto) e do fluido suficientemente afastado da influência da parede, respectivamente. A dimensão característica L depende da geometria. Por exemplo, no caso de superfície vertical, refere-se à altura da parede; no caso de cavidades retangulares, a distância entre as paredes.

A transição para o regime turbulento no caso de parede vertical ocorre para $Gr > 10^9$ (BEJAN, 2013).

XV Seminário Nacional de Bombeiros - SENABOM Goiania, Brasil, 2016

Portanto, o escoamento de fumaça a 400 °C pela parede do duto passa ao regime turbulento com cerca de 1 m de altura. Essa análise é realizada considerando as propriedades da fumaça típica de móveis em madeira com revestimentos em tecido e enchimento de espuma, além de plásticos.

A análise dos efluentes da combustão utilizando espectrometria e termogravimetria evidenciou que os gases dominantes componentes da fumaça são o vapor d'água, o dióxido de carbono e o monóxido de carbono (FABIAN; GANDHI, 2007; GANN et al., 2003). Daí o número de Prandtl da fumaça típica ser da ordem de 1.

Tendo em vista a altura dos prédios, os escoamentos considerados são turbulentos. Existem três abordagens para descrever os escoamentos turbulentos: simulação numérica direta – DNS, modelos de campo médio – RANS e simulação de grandes vórtices – LES (POPE, 2000; TENNEKES; LUMLEY, 1972; DAVIDSON, 2004).

Na simulação numérica direta, as equações de Navier-Stokes são resolvidas numericamente, considerando todas as escalas de comprimento do escoamento. Isso leva a um alto custo computacional, da ordem de Re^3 , o que torna essa abordagem impraticável para altos números de Reynolds.

RANS envolve a solução da equação de Reynolds para determinar um campo médio de velocidade. Existem duas formulações: constitutiva (exige um modelo de viscosidade turbulenta) e evolutiva (equações de transporte para o tensor de Reynolds).

Na simulação de grandes vórtices, as equações de Navier-Stokes são resolvidas para uma velocidade filtrada representativa das estruturas de grande escala, enquanto que para as pequenas escalas – SGS, não consideradas na resolução direta, adota-se uma lei de parede.

O escoamento realístico de fluidos devido ao processo de combustão (fogo) é mais apropriadamente descrito pelo modelo de turbulência LES. Apesar de RANS permitir adotar passos de tempo maiores, sua característica de resolver as equações médias implica perder a evolução das estruturas dos vórtices maiores, presentes na maioria dos incêndios, assim como os efeitos transitórios da dinâmica dos incêndios (McGRATTAN et al., 2015). Neste trabalho foi utilizado o software FDS, desenvolvido pelo NIST, para simular o escoamento de fumaça através de dutos de escadas de emergência.

As equações governantes do modelo LES para fluidos incompressíveis são apresentadas a seguir adotando notação tensorial com regra de soma de Einstein. A conservação de massa:

$$\frac{\partial \hat{u}_i}{\partial x_i} = 0, \quad (2)$$

em que \hat{u} é uma velocidade filtrada assim definida:

$$\hat{u}(x, t) \equiv \int G(r, x) u(x - r, t) dr. \quad (3)$$

O tipo de filtro $G(r, x)$ mais comum é o tipo caixa, definido abaixo com auxílio da função Heaviside $H(r)$:

$$G(r) \equiv \frac{1}{\Delta} H\left(\frac{1}{2}\Delta - |r|\right). \quad (4)$$

Na equação do filtro, Δ é a resolução espacial considerada e r , a variável espacial auxiliar.

A equação de quantidade de movimento reescreve-se da seguinte forma:

$$\frac{\partial \hat{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\hat{u}_i \hat{u}_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \hat{p}_0 \delta_{ij} + \nu \frac{\partial^2 \hat{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}, \quad (5)$$

em que \hat{p}_0 é o termo de pressão modificada e τ_{ij} é o tensor SGS de tensões residuais de traço nulo. Para o fechamento do conjunto de equações, o FDS adota o modelo de viscosidade de vórtice de Deardorff para o tensor SGS.

Além dessas equações para fluidos incompressíveis, há uma equação para a entalpia, a qual também recorre a um modelo para fechamento do vetor fluxo de calor SGS. Considerando os efeitos de compressibilidade as equações modificam-se e a decomposição de Favre é aplicada à massa específica ρ (McGRATTAN et al., 2015).

A análise do escoamento se dá em um duto de saída de fumaça – DS de uma escada PF projetada para um prédio de escritórios virtual com características representativas das edificações de cidades brasileiras, atendendo às prescrições da NBR 9077 (ABNT, 2001). A edificação possui 12 pavimentos e altura de 33,60 m. A altura total do DS é de 36,60m. Atendendo a 12 antecâmaras, então, a seção mínima do DS deve ser de $\Omega = 12 \times 0,105 = 1,26 \text{ m}^2$, com proporção de 1:4 entre as dimensões do duto.

A fumaça é produzida no cenário por um queimador a gás com potência de 1000 kW. Essa taxa de liberação de energia corresponde aproximadamente ao pico da queima de uma móvel do tipo poltrona de um lugar com revestimento de espuma (QUINTIERE, 1997). A potência do fogo é mantida constante para que se possa comparar os dados em regime estacionário em diferentes

XV Seminário Nacional de Bombeiros - SENABOM Goiania, Brasil, 2016

situações. O queimador está posicionado numa sala ao lado da entrada da escada, no piso térreo, conforme figura 1. Parte da fumaça produzida atravessa o corredor de acesso à antecâmara da escada e escoa pelo duto de saída de fumaça.

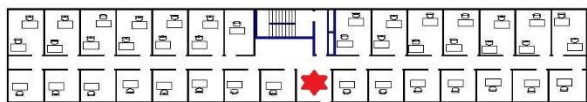


Figura 1 – Planta baixa do prédio simulado com indicação do posicionamento do queimador a gás.

Os cenários avaliados incluem escadas com dois dutos, um de entrada e outro de saída, e com apenas um duto de saída, visto que esse tipo de ventilação é aceito em alguns Estados (CBMSC, 2014; MARANHÃO, 1995). Em cada cenário são posicionados medidores de velocidade e de temperatura no topo e ao longo do DS. Com os dados das leituras de velocidade na saída do DS calcula-se a vazão mássica de fumaça:

$$\dot{m} = \rho \cdot u \cdot \Omega . \quad (6)$$

Em que Ω é a área da seção transversal do duto. A velocidade u é obtida pela média de 21 pontos de medição na seção de saída do DS ao longo do tempo de simulação em regime permanente. Nos gráficos das figuras 2 e 3 são traçadas as velocidades de três medidores, u_1 e u_3 junto às paredes e u_2 no centro do duto. É de se notar que no caso com apenas um duto na antecâmara (figura 2), as velocidades são menores do que no caso em que o sistema é composto por dois dutos (figura 3).

O valor da massa específica é aproximado pela massa específica do ar à temperatura dos gases na saída do DS. A temperatura da fumaça no topo do DS é calculada pela média de 7 termopares ao longo do tempo de simulação em regime permanente. A temperatura de saída dos gases em cada caso foi de 69,45 °C (dois dutos) e de 88,56 °C (um duto). Com isso, a vazão mássica de fumaça através do DS foi de 8,36 kg/s no caso com dois dutos e de 5,97 kg/s no caso com um duto.

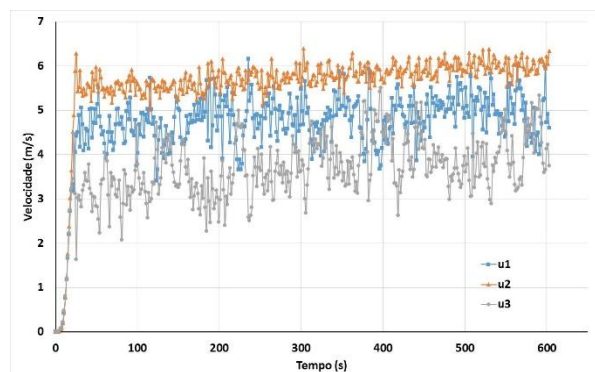


Figura 2 – Gráfico do campo de velocidade na saída do DS. Caso com apenas um duto de saída.

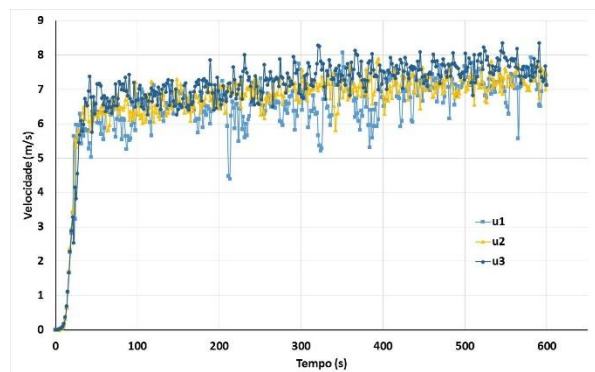


Figura 3 – Gráfico do campo de velocidade na saída do DS. Caso com dois dutos, um de entrada e outro de saída.

IV CONCLUSÕES E CONTINUAÇÃO

Apesar de alguns Estados permitirem a adoção de antecâmaras ventiladas naturalmente apenas por um duto de saída de fumaça, a simulação computacional demonstra que esse tipo de solução torna o sistema ainda menos eficiente no que se refere à capacidade de extrair fumaça da antecâmara. A vazão mássica do sistema com apenas um duto fica cerca de 28% menor do que no caso com sistema integrado de dois dutos, um para entrada de ar e outro para saída de fumaça.

Neste artigo foram apresentados os resultados preliminares de simulações numéricas comparando a situação de um duto e de dois dutos. Estudos mais aprofundados estão sendo conduzidos pelos autores no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília. Esses estudos incluem análise de resolução de malha, variação de altura do duto, reposicionamento dos dutos (frente a frente ou lado a lado) e variação da taxa de liberação de energia do queimador.

V AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Corpo de Bombeiros Militar do Distrito Federal pelo apoio e a oportunidade

XV Seminário Nacional de Bombeiros - SENABOM Goiania, Brasil, 2016

de realização da pesquisa aplicada em parceria com a Universidade de Brasília.

VI REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ALVES, A.B.C.G.; CAMPOS, A.T.; BRAGA, G.C.B. *Simulação computacional de incêndio aplicada ao projeto de arquitetura*. In: Nutau 2008: Espaço sustentável, Inovação em edifícios e cidades. São Paulo: USP, 2008.

BEJAN, A. *Convection Heat Transfer*. 4. ed. New Jersey: Wiley, 2013.

CAMPOS, A.T.; BRAGA, G.C.B. *Aplicação do FDS+Evac para validação de requisitos normativos de saídas de emergência e comparação com parâmetros de desempenho*. In: Anais do Congresso Ibero-Latino Americano sobre Segurança contra Incêndio. Natal: ALBRASCI, 2011.

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DE SANTA CATARINA. Instrução Normativa: IN-009 – Sistema de saídas de emergência. 2014

DAVIDSON, P.A. *Turbulence: An introduction for scientists and engineers*. New York: Oxford University Press, 2004.

FABIAN, T.Z.; GANDHI, P.D. *Smoke Characterization Project: Final report*. Illinois, 2007.

FAILLACE, R.R. *Escadas e saídas de emergência*. 4 ed. Porto Alegre: Sagra, 1991.

GANN, R.G. et al. *Smoke component yields from room-scale fire tests*: NIST Technical note 1453. Gaithersburg, 2003.

GOUVEIA, A. M. C.; ETRUSCO, P. *Tempo de escape em edificações: os desafios do modelamento de incêndio no Brasil*. Revista Escola de Minas, v. 55, n. 4, p. 257–261, 2002.

INCROPERA, F.P.; DEWITT, D.P. *Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa*. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

MARANHÃO. Lei 6.546, de 29 de dezembro de 1995.

McGRATTAN, K. et al. *Fire Dynamics Simulator: Technical Reference Guide, Volume 1: Mathematical model*. 6. ed. Washington: NIST, 2015.

POPE, S.B. *Turbulent flows*. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.

QUINTIERE, J. G. *Principles of Fire Behavior*. New York: Delmar Publishers, 1997.

TENNEKES, H.; LUMLEY, J.L. *A First Course in Turbulence*. Cambridge: MIT Press, 1972.