

CONTROLO DE FUMO EM GRANDES ÁTRIOS



João C. Viegas¹
Investigador
LNEC - Lisboa

RESUMO

Os átrios de grande altura são locais que apresentam riscos especiais no que respeita ao escoamento do fumo. Nesta comunicação é apresentada a formulação analítica que é correntemente utilizada para prever o escoamento do fumo neste tipo de espaços, são apresentados os meios de controlo de fumo e o seu processo de dimensionamento.

PALAVRAS-CHAVE: Controlo de fumo; átrios.

1. INTRODUÇÃO

Os átrios, que a regulamentação nacional designa de forma bastante expressiva como "pátios interiores cobertos", são locais que, à luz da normalização e da regulamentação nacional e internacional, devem ser objeto de cuidados especiais no âmbito da segurança contra incêndio [1, 2, 3, 4, 5]. De facto estes espaços apresentam frequentemente características que podem dificultar a evacuação dos ocupantes, a intervenção dos bombeiros ou influenciar o desenvolvimento do incêndio. Com frequência os átrios têm alguma (ou uma combinação) das seguintes características:

- têm grande altura;
- têm um grande volume;
- contactam com caminhos de evacuação, quer na sua base, quer em níveis elevados;
- constituem vias de penetração no edifício pelos bombeiros.

¹Autor correspondente – Dep. de Edifícios, Laboratório Nacional de Engenharia Civil. A. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa.
Telef.: +351 218 443 533, Fax: +351 218 443 024, E-mail: jviegas@lnec.pt

Devido ao seu grande volume, ocorre uma diluição significativa do fumo, conduzindo a um incremento do seu caudal e a uma redução da sua temperatura. Numa fase de início do desenvolvimento do incêndio a temperatura do fumo é crucial. A redução da temperatura limita a possibilidade de ocorrer uma estratificação térmica significativa, na qual se baseiam os métodos de controlo de fumo aplicáveis a átrios. Este fenómeno pode ser particularmente importante em átrios com variação de temperatura com a cota, conduzido numa fase transiente à estratificação do fumo a um nível intermédio em que a temperatura do ar interior e do fumo sejam idênticas. Quando isto ocorre, reduz a eficácia dos sistemas de controlo de fumo passivos, que só iniciam a exaustão do fumo após ter sido escoada para o exterior a camada de ar mais quente que o fumo. Num período de arrefecimento, se o átrio estiver climatizado, esta estratificação intermédia pode tornar totalmente ineficaz os sistemas de controlo de fumo passivos, se a temperatura interior for inferior à exterior, só vindo a ocorrer o escoamento de fumo para o exterior quando a temperatura do fumo passar a ser superior à temperatura exterior. Este fenómeno pode retardar de forma significativa o início da exaustão do fumo. Embora o grande volume dos átrios incremente o tempo de enchimento, os fatores precedentes reduzem o tempo disponível até ao contacto dos ocupantes com o fumo, incrementando assim o risco.

Note-se ainda que um aspeto fulcral é o tempo que decorre entre o início do incêndio e a sua deteção. Se o fumo estiver fortemente diluído, não só a sua temperatura é mais baixa como a sua densidade ótica é mais reduzida, retardando a deteção de incêndio. No caso de ocorrer a estratificação intermédia do fumo, pode decorrer um largo período de tempo até que o fumo envolva os detetores.

Com muita frequência os átrios fazem parte dos caminhos de evacuação, quer ao nível da sua base quer a níveis mais elevados, constituindo muitas vezes a parte final dos caminhos de evacuação, em que o tempo é um aspeto crucial para o sucesso da evacuação. Se o início da exaustão do fumo for retardado, a evacuação poderá ser impossível de ser finalizada em segurança. Se os caminhos de evacuação estão em contacto com um nível superior do átrio poderão encontrar-se ao nível da camada quente, sendo então totalmente envolvidos no escoamento de fumo e condicionando fortemente a evacuação. Por essa razão é determinante a proteção desses caminhos de evacuação relativamente ao escoamento do fumo. No que respeita à intervenção dos bombeiros, embora estes estejam mais protegidos do que os ocupantes e tenham formação específica, o contacto com o fumo dificulta a sua progressão e a identificação do incêndio, retardando ou impossibilitando o combate ao incêndio.

Dadas as particularidades envolvidas no escoamento de fumo em átrios de grande altura e nas técnicas de controlo de fumo aplicáveis e tendo em conta o risco intrínseco a estes locais, tem sido desenvolvida investigação nesse domínio quer a nível nacional [6, 7], quer a nível internacional [8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17].

Por todas estas particularidades os métodos de controlo de fumo têm exigências específicas para o caso dos átrios. O Regulamento Técnico de Segurança contra Incêndio em Edifícios [2] prevê assim um conjunto de exigências específicas, distinguindo-os dos locais sinistrados e dos caminhos de evacuação. Também outra documentação estrangeira de referência se refere especificamente aos átrios; é o caso da Instruction Technique 263 [3], de origem francesa, ou

da norma americana NFPA 92 B [4]. Nesta comunicação são detalhados os métodos de controlo de fumo aplicáveis, tendo como referência esta documentação.

2. ESCOAMENTO DE FUMO EM ÁTRIOS

2.1 Fonte de calor

Num átrio existem diferentes posições possíveis para uma fonte de calor. A essas diferentes posições podem corresponder diferentes formas de arrastamento de ar novo pela pluma, conduzindo assim a diferentes relações entre a potência calorífica convectada e o caudal de fumo que é efetivamente gerado. O caudal de fumo que escoar na pluma proveniente de uma fonte de calor axissimétrica depende da cota considerada. Considera-se que o caudal de fumo arrastado atinge o seu limite superior na camada de interface (fronteira entre a camada inferior de ar frio e a camada superior de fumo), a partir da qual ocorre apenas arrastamento de fumo para a pluma, pelo que o seu caudal já não é incrementado. Para o modelo de pluma axissimétrica ser válido é necessário que o escoamento ocorra suficientemente longe da influência das paredes.

No escoamento da pluma duas situações devem ser consideradas, conforme a secção da pluma considerada para a determinação do caudal de fumo se encontra acima ou abaixo de uma altura de referência z_l (m) [4].

$$z_l = 0,166 \dot{Q}_c^{2/5} \quad (1)$$

$$\dot{m} = (0,071 \dot{Q}_c^{1/3} z^{5/3}) + 0,0018 \dot{Q}_c, \text{ se } z > z_l \quad (2)$$

$$\dot{m} = 0,032 \dot{Q}_c^{3/5} z, \text{ se } z \leq z_l \quad (3)$$

sendo \dot{m} o caudal mássico de fumo (kg/s), \dot{Q}_c a potência calorífica convectada (kW) e z a distância entre a base da fonte de calor e a secção da pluma considerada (m).

Quando a fonte de calor se encontra encostada a uma parede, o arrastamento de ar pela pluma passa agora a ser feito apenas por um arco de circunferência correspondente a 180°. Considerando que a parede constitui um plano de simetria, pode estimar-se que o caudal arrastado por uma pluma nestas condições corresponde a metade do gerado por uma fonte de calor gerada por uma pluma axissimétrica de uma fonte de calor com o dobro da potência considerada. De forma similar, quando a fonte de calor se encontra num canto, o caudal de fumo corresponde a um quarto do caudal de fumo da pluma gerada por uma fonte de calor com o quádruplo da potência calorífica considerada.

Com frequência a fonte de calor não se encontra no átrio, mas antes num compartimento adjacente. Nestes casos, o fumo escoar através do vão de comunicação do átrio com esse compartimento. Distinguem-se dois casos típicos: (i) a pluma de varanda, que ocorre quando uma saliência obriga a que a pluma escoar afastada da parede com uma forma alongada

paralelamente ao bordo da varanda, e (ii) a pluma de janela, que ocorre quando a pluma escoada aderente à parede por cima da abertura.

No caso da pluma de varanda, o caudal escoado \dot{m} (kg/s) é dado por [4]:

$$\dot{m} = 0,36 (\dot{Q} W^2)^{1/3} (z_b + 0,25H) \quad (4)$$

sendo \dot{Q} a potência calorífica libertada pela fonte de calor (kW), W a largura da pluma na base (m), z_b a altura entre o plano de interface e a parte inferior da varanda e H a altura entre a base da fonte de calor e o teto (parte inferior da varanda) (m). O valor de W é dado pela expressão seguinte:

$$W = w + b \quad (5)$$

sendo w a largura da abertura sob a varanda de onde escoo o fumo (m) e b a distância entre essa abertura e o bordo da varanda (m).

No caso de uma pluma de janela, o caudal de fumo é dado por [4]:

$$\dot{m} = \left[0,068 (A_w H_w^{1/2})^{1/3} (z_w + a)^{5/3} \right] + 1,59 A_w H_w^{1/2} \quad (6)$$

$$a = (2,40 A_w^{2/5} H_w^{1/5}) - 2,1 H_w \quad (7)$$

sendo A_w a área da abertura (m), H_w a altura da abertura (m) e z_w a altura entre a parte superior da abertura e a secção da pluma considerada (m).

Neste último caso, a potência calorífica convectada na pluma \dot{Q} (kW) corresponde a [4]:

$$\dot{Q} = 1260 A_w H_w^{1/2} \quad (8)$$

2.2 Tempo de enchimento do átrio com fumo

Devido ao grande volume dos átrios, o seu enchimento com fumo leva um tempo relevante. Se, por um lado, esta demora favorece a evacuação dos ocupantes, por outro lado, pode retardar a deteção do incêndio. De uma forma ou de outra é relevante o cálculo do tempo de enchimento. Este cálculo depende do modelo considerado para o crescimento da fonte de calor. Frequentemente é considerada uma fonte de calor de crescimento parabólico com o tempo, embora seja ainda corrente a consideração de uma potência calorífica constante. Neste último caso é necessário especificar o valor dessa potência, que pode ser feito recorrendo à informação contida no documento CEN/TR 12101-5 [5] e expressa na Tabela 1, sendo h_f a altura do combustível. Deve ser adotado o valor $q_{f,(low)}$ ou $q_{f,(high)}$ que conduzir a um cálculo mais desfavorável.

Tabela 1: Potências de incêndio (kW/m²) [5]

	Com sprinklers	Sem sprinklers ($h_f \leq 2 \text{ m}$)	Sem sprinklers ($2 \text{ m} < h_f \leq 4 \text{ m}$)
$q_{f,(low)}$	250	250	$250 \times (h_f - 1)$
$q_{f,(high)}$	625	1250	$1250 \times (h_f - 1)$

A fonte de calor de crescimento parabólico com o tempo t (s) obedece à seguinte expressão, de acordo com a norma NP EN 1991-1-2 [18], em que \dot{Q} é a potência calorífica libertada (kW) e t_α é o tempo (s) necessário para atingir uma taxa de libertação do calor de 1 MW.

$$\dot{Q} = 10^3 \left(\frac{t}{t_\alpha} \right)^2 \quad (9)$$

Os tempos de crescimento associados a cada tipo de ocupação estão indicados na Tabela 2.

Tabela 2: Tempo característico de crescimento e taxa máxima de libertação de calor de acordo com NP EN 1991-1-2 [18]

Ocupação	Taxa máxima de libertação de calor por unidade de área RHR_f		
	Taxa de crescimento do incêndio	t_α (s)	RHR_f (kW/m ²)
Habitação	Média	300	250
Hospital (quarto)	Média	300	250
Hotel (quarto)	Média	300	250
Biblioteca	Rápida	150	250
Escritório	Média	300	250
Salas de aulas de uma escola	Rápida	150	250
Teatro (cinema)	Rápida	150	250
Transporte (espaço público)	Lenta	600	250

O tempo de escoamento na pluma t_{pl} (s) correspondente a fontes de calor de potência constante e de crescimento parabólico é dado por, respetivamente [19]:

$$t_{pl} = 0,67 \frac{H^{4/3}}{Q^{1/3}} \quad (10)$$

$$Q = \dot{Q}t \quad (\text{fonte constante}) \quad (11)$$

$$t_{pl} = 0,1 H^{4/5} t_\alpha^{2/5} \quad (12)$$

em que H é a altura da pluma, Q é a energia libertada (kW) e t é o tempo decorrido. Quando a pluma atinge o teto, inicia-se um escoamento radial em jato de teto, ao qual estão associados os seguintes tempos t_{jt} (s), respetivamente, nos casos de fontes de calor de potência constante e de crescimento parabólico [19]:

$$t_{jt} = \frac{r^{11/6}}{1,2 \dot{Q}^{1/3} H^{1/2}} \quad (13)$$

$$t_{jt} = \frac{0,72 r t_a^{2/5}}{H^{1/5}} \quad (14)$$

A estimativa do tempo de deteção requer ainda a consideração do processo de deteção do fumo, que requer um intervalo de tempo adicional aos tempos anteriormente indicados. A estimativa desse intervalo de tempo depende do tipo de deteção de incêndio adotada e o seu cálculo encontra-se fora do âmbito desta comunicação.

2.3 Características da camada quente

Admitindo, de forma simplificada, que a estratificação do fumo num átrio pode ser expressa através de um modelo de duas zonas (a camada de fumo e a camada fria subjacente) coincidindo cada zona com um volume de controlo, no qual se admite que as características do fluido podem ser descritas pelos seus valores médios, é possível estimar a temperatura do fumo, a concentração de produtos da combustão e a densidade ótica do fumo, desde que sejam conhecidos os valores das respetivas fontes. No caso da temperatura T (K), tendo por base o balanço térmico da camada quente, esta pode ser estimada no período de incremento da camada quente pela expressão seguinte [19]:

$$\begin{aligned} T &= T_0 e^{[(1-\chi)Q/Q_0]} & (15) \\ Q_0 &= \rho_0 c_p T_0 A (H - z) & (16) \end{aligned}$$

sendo T_0 a temperatura ambiente (K), χ a fração das perdas de calor para a envolvente, ρ_0 a massa volúmica do ar à temperatura ambiente (kg/m^3), c_p o calor específico a pressão constante ($\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$), A a área da secção em planta do átrio (m^2), z a altura do plano de interface acima da fonte de calor (m) e Q é a energia libertada (kJ) que é dada pela expressão (11) para fontes de calor de potência constante e obedece à seguinte expressão para fontes de calor de crescimento parabólico [19]:

$$Q = \frac{1000}{t_a^2} \frac{t^3}{3} \quad (17)$$

Quando a camada quente está estável, devido à ação do sistema de controlo de fumo, a temperatura pode ser estimada pela expressão [19]:

$$\Delta T = \frac{(1 - \chi) \dot{Q}}{c_p \dot{m}} \quad (18)$$

Ainda de acordo com este modelo de duas zonas é possível estimar a posição do plano de interface impondo o respeito pelo equilíbrio de caudais mássicos (respeito pela equação da continuidade). Na ausência de exaustão e considerando uma fonte de calor de potência calorífica constante, a cota da posição da camada de interface pode ser estimada pela seguinte expressão [19]:

$$\frac{z}{H} = 1,11 - 0,28 \ln \left(\frac{t \dot{Q}^{1/3} H^{-4/3}}{A/H^2} \right) \quad (19)$$

para $z/H \geq 0,2$. No caso de uma fonte de calor de crescimento parabólico da potência calorífica libertada, a cota da posição da camada de interface pode ser estimada pela seguinte expressão [19]:

$$\frac{z}{H} = 0,91 \left[t t_a^{-2/5} H^{-4/5} \left(\frac{A}{H^2} \right)^{-3/5} \right]^{1,45} \quad (20)$$

Quando o sistema de controlo de fumo está ativo, a cota da camada de interface corresponde à secção da pluma para a qual o caudal mássico de fumo é igual ao caudal mássico de exaustão.

2.4 Aspetos específicos

No caso de átrios altos e estreitos pode ocorrer a situação em que a secção da pluma se aproxima da secção, em planta, do átrio (pluma confinada). Nessas condições, o arrastamento de ar novo para a pluma deixa de ocorrer livremente, alterando-se a diluição dos produtos da combustão e o arrefecimento da pluma (pelo mecanismo de arrastamento de ar frio). Para além disso, o ponto de contacto da pluma com as paredes marca a cota acima da qual todas as aberturas desprotegidas permitirão, logo numa fase inicial do incêndio, o escoamento do fumo para os locais a que dão acesso (por exemplo, varandas abertas sobre os átrios). Assim, é particularmente relevante estimar a cota de contacto da pluma com as paredes. Esta estimativa pode ser realizada por aplicação das equações da pluma, das quais resulta a seguinte expressão [19]:

$$d = 0,36 z \quad (21)$$

sendo d o diâmetro da pluma à cota z . Note-se que existem diversas aproximações para estimar o diâmetro da pluma, algumas das quais conduzem uma estimativa de d da ordem de 50% de z . O valor da equação precedente encontra-se sensivelmente no meio das diversas possibilidades de estimativa. Caso existam problemas de segurança dependentes da estimativa do diâmetro da pluma deverá adotar-se uma aproximação conservativa.

Um outro fenómeno que é necessário ter em conta está associado à possibilidade de existir uma variação crescente da temperatura com a altura, no interior do átrio, antes da ocorrência do incêndio, sendo devida aos ganhos térmicos do edifício e à forma como é realizada a sua climatização. Em átrios de grande altura, a diluição do fumo na pluma com a cota tende a aproximar a temperatura da pluma à temperatura ambiente. Devido à estratificação térmica prévia ao incêndio, o ar novo que é arrastado para a pluma na sua parte inferior tem uma temperatura inferior à do ar nas camadas superiores do átrio. Nestas circunstâncias podem ocorrer condições, na fase inicial do incêndio, em que ocorra a estratificação intermédia do

fumo por este ser mais frio do que o ar existente na parte superior do átrio. Dado que este fenómeno pode interferir com a deteção de incêndio (se os detetores estiverem colocados no teto) e com o início da exaustão do fumo para o exterior, deve ser avaliado, comparando-se a temperatura no interior do edifício (decorrente da sua atividade normal) com a temperatura da pluma. A estratificação intermédia ocorre à cota em que estas duas temperaturas são iguais. Nos casos em que a variação da temperatura com a cota é abrupta, existindo de forma bem marcada uma camada inferior a temperatura aproximadamente uniforme e uma camada superior (correspondente normalmente a um espaço não climatizado) de temperatura mais elevada, a propensão para a ocorrência de estratificação intermédia (na fronteira entre as duas camadas) pode ser avaliada pela equação da variação da temperatura na pluma, admitindo-se que todo o ar arrastado tem uma temperatura uniforme correspondente à da camada inferior mais fria [19]:

$$T_{pl} = 0,08 T_0 \dot{Q}_c^{2/3} z^{-5/3} + T_0 \quad (22)$$

Quando a variação da temperatura no interior do átrio é aproximadamente uniforme com a altura, pode estimar-se a potência calorífica para a qual ocorre a estratificação térmica do fumo à cota H de acordo com a seguinte equação [19]:

$$\dot{Q}_c = 0,00118 H^{5/2} \Delta T_0^{3/2} \quad (23)$$

3. LIMITAÇÃO AO ESCOAMENTO DO FUMO

3.1 Meios ativos e passivos de exaustão do fumo

Os sistemas de controlo de fumo constituem os meios que concretizam a limitação ao escoamento do fumo no interior dos edifícios. Os sistemas de controlo de fumo são complementados pela compartimentação ou outras barreiras (se forem resistentes à temperatura do fumo) que sejam utilizadas para impedir o escoamento (por exemplo os painéis de cantonamento). Note-se que a compartimentação só pode ser eficaz na limitação do escoamento do fumo se existirem meios (ativos ou passivos) que escoem o fumo para o exterior, de outra forma, face a um caudal de fumo crescente e com uma temperatura crescente, rapidamente essas barreiras serão ultrapassadas ou ocorrerão condições insustentáveis para a presença humana no interior dos espaços confinados.

O dimensionamento dos sistemas de controlo de fumo baseia-se (i) na estimativa de uma fonte de calor (cenário de incêndio) através da sua potência calorífica convectada, (ii) na especificação (em projeto) de uma cota limite para a camada de interface, (iii) na determinação do caudal de fumo da pluma a essa cota e (iv) na imposição de um caudal de exaustão igual ou superior a esse caudal da pluma. Quando se utilizam sistemas de controlo de fumo ativos, esta especificação do caudal de exaustão é utilizada diretamente para o dimensionamento do sistema mecânico de exaustão, que em nada difere de um dimensionamento corrente de um sistema de ventilação, exceto em que todos os elementos devem ser resistentes à temperatura do fumo durante o período regulamentarmente especificado [2].

Quando se utiliza um sistema passivo (que no caso português está limitado a átrios com uma altura inferior ou igual a 12 m [2]), o caudal mássico de exaustão \dot{m} (kg/s) escoado por uma abertura horizontal pode ser calculado pela seguinte expressão, sendo A_e a área da abertura (m^2), C_d o respetivo coeficiente de vasão, g a aceleração da gravidade (m/s^2) e h a altura entre o plano neutro e o plano da abertura (m):

$$\dot{m} = A_e C_d \rho_0 \sqrt{2gh \frac{T_0}{T} \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)} \quad (24)$$

Quando, por razões arquitetónicas, não é possível praticar aberturas no teto do átrio. A alternativa é praticar aberturas para a desenfumagem nas paredes tão próximas do topo quanto possível. Neste caso o caudal evacuado é ligeiramente inferior ao que ocorreria para uma abertura praticada no teto devido à variação da pressão com a cota. O caudal mássico pode então ser estimado a partir do cálculo da velocidade média para uma abertura vertical de largura constante:

$$\dot{m} = \frac{2}{3} l C_d \rho_0 \left(b^{\frac{3}{2}} - a^{\frac{3}{2}}\right) \sqrt{2g \frac{T}{T_0} \left(1 - \frac{T_0}{T}\right)} \quad (25)$$

As variáveis a e b (m) representam respetivamente a cota da base da abertura medida em relação ao plano neutro e a cota do topo da abertura medida em relação ao mesmo plano. As restantes variáveis representam as grandezas anteriormente referidas e a variável l é a largura da abertura (m).

Note-se que o plano neutro se encontra necessariamente acima do plano de interface. A diferença de cota entre os dois planos corresponde à perda de carga das aberturas de admissão de ar novo. Assim, esta perda de carga deve ser minimizada de modo a estar disponível um efeito de chaminé significativo para a exaustão do fumo.

3.2 Proteção de aberturas na fronteira do átrio

3.2.1 Generalidades

Dois tipos de cenários de incêndio devem ser considerados no que respeita à necessidade de se proceder à limitação do escoamento do fumo em aberturas existentes entre o átrio e outros espaços adjacentes: (i) o incêndio encontra-se num compartimento adjacente e a estratégia de controlo de fumo baseia-se na exaustão do fumo no compartimento de origem (neste caso os meios de controlo de fumo do compartimento devem ser dimensionados de forma ser impedido o escoamento de fumo para o átrio) ou (ii) existe fumo no átrio (estando a fonte de calor no próprio átrio ou tendo o fumo origem noutra compartimento e escoado para o átrio) e pretende-

se impedir o seu escoamento para compartimentos adjacentes. Em ambos os casos os meios disponíveis para limitar o escoamento de fumo baseiam-se nas seguintes técnicas:

- a) Compartimentação rígida (paredes, portas, janelas ou envidraçados com características de resistência ao fogo ou à temperatura do fumo durante o período regulamentarmente exigido [2]);
- b) Compartimentação flexível normalmente amovível (cortinas para encerramento do vão em situação de incêndio, normalmente de natureza têxtil, com características de resistência ao fogo ou à temperatura do fumo durante o período tecnicamente exigido);
- c) Imposição de uma velocidade do escoamento ou de uma diferença de pressão através da abertura que impeça o escoamento do fumo (esta técnica é também utilizada em conjunto com as indicadas nas alíneas a e b, para evitar o escoamento do fumo através das fendas ou pequenas aberturas existentes na ligação dos meios rígidos ou flexíveis à restante envolvente do átrio; neste contexto, os meios das alíneas a e b podem ser encarados como uma forma de reduzir o caudal que é necessário para assegurar a limitação do escoamento do fumo);
- d) Painéis de cantonamento (esta solução pressupõe que o sistema de controlo de fumo do local sinistrado está dimensionado de forma a que o plano de interface não desça abaixo da base do painel; esta é uma solução preconizada na regulamentação nacional [2]);
- e) Rasgo de exaustão (para evitar a utilização de painéis de cantonamento para prevenir o escoamento do fumo dos locais sinistrados para o átrio, podem ser utilizados rasgos de aspiração do fumo cujo caudal está dimensionado para impedir a sua transposição pelo fumo);
- f) Cortinas de ar (está em desenvolvimento a aplicação de cortinas de ar descendentes, correntemente utilizadas na fronteira das zonas climatizadas de edifícios, para reduzir o caudal de ar necessário para limitar o escoamento através de aberturas livres; os resultados obtidos até ao momento evidenciam que esta solução inovadora tem sucesso nesta aplicação).

Nas subsecções seguintes detalham-se as características de desempenho das soluções técnicas das alíneas b, c e e.

3.2.2 Cortinas flexível

As cortinas flexíveis podem ser guiadas lateralmente ou livres. Quando são guiadas lateralmente devem ser dimensionadas (ou verificada a sua resistência mecânica) à diferença de pressão que ocorre entre a zona enfumada e a zona não enfumada. Dadas as grandes dimensões que algumas destas cortinas podem ter, as forças atingidas podem não ser despidiendas e comprometer o bom funcionamento destes componentes. Quando as cortinas são livres, é necessário calcular a flecha induzida pela diferença de pressão tendo em vista corrigir o seu comprimento para evitar que ocorra uma folga na sua parte inferior ou conhecer a sua posição geométrica em funcionamento, de forma a calcular as folgas que ocorrem e,

assim, tornando possível a estimativa do caudal do escoamento em oposição necessário para impedir o escoamento do fumo por essas folgas.

Quando em equilíbrio, a flecha horizontal da cortina flexível d_c (m) na sua base (relativamente à posição vertical) é dada pela seguinte expressão [5]:

$$d_c = \frac{1,2 \rho_0}{6} \frac{\Delta T d_{ls}^3}{\left(m + m_c \frac{d_h}{2}\right) T} \quad (26)$$

sendo d_{ls} a espessura da camada de fumo abaixo do limite superior da cortina (m), m_c a massa por unidade de área da tela que constitui a cortina flexível (kg/m^2), m a massa de qualquer outro elemento suspenso na cortina (a barra inferior) e d_h o comprimento total da cortina, que é dado pela seguinte expressão [5]:

$$d_h = d_{ls} + d_c \tan \left[\frac{\tan^{-1} (d_c/d_{ls})}{2} \right] \quad (27)$$

3.2.3 Escoamento em oposição

Quando a fonte de calor se encontra num compartimento adjacente ao átrio, a velocidade do escoamento v_e (m/s) em oposição ao fumo é dada pela seguinte expressão [4]:

$$v_e = 0,64 \left(gH \frac{\Delta T}{T} \right)^{1/2} \quad (28)$$

sendo H a altura da abertura (m). O caudal de exaustão de fumo do compartimento sinistrado deve ser pelo menos o caudal necessário para assegurar esta velocidade de escoamento nas aberturas livres, acrescido do caudal correspondente à expansão térmica.

Quando se pretende evitar que o fumo existente no átrio escoe através de aberturas livres para os compartimentos adjacentes devem distinguir-se duas situações: (i) a abertura situa-se abaixo do plano de interface do átrio (por exemplo, a pluma escoada aderente à parede em que se situa a abertura) ou (ii) a abertura encontra-se dentro da camada de fumo. No primeiro caso, a velocidade do escoamento pode ser calculada de acordo com a seguinte expressão [4]:

$$v_e = 0,057 \left(\frac{\dot{Q}}{z} \right)^{1/3} \quad (29)$$

sendo z a distância entre a fonte de calor e a parte inferior da abertura. A NFPA 92B impede que este método seja usado quando resultam desta expressão velocidades superiores a 1,02 m/s para se evitar o incremento excessivo do caudal de fumo na pluma e a sua diluição. No segundo caso, utiliza-se uma expressão análoga à (28) para o cálculo da velocidade do escoamento.

3.2.4 Rasgo de exaustão

O rasgo de exaustão, para ser eficaz, deve ser praticado ao longo do teto de toda a fronteira livre. O seu caudal de exaustão \dot{M}_{rasgo} (kg/s) deve obedecer à seguinte relação com o caudal de fumo \dot{M}_f (kg/s), sendo $\dot{M}_{exhaust}$ o caudal de exaustão (kg/s) assegurado pelo sistema de controlo de fumo do compartimento sinistrado:

$$\dot{M}_{rasgo} = 1,67 (\dot{M}_f - \dot{M}_{exhaust}) \quad (30)$$

4. CONCLUSÕES

Conclui-se que os átrios (pátios interiores cobertos, no léxico regulamentar nacional [2]) apresentam características específicas que, se não forem tidas em consideração quando é feito o dimensionamento do seu sistema de controlo de fumo, podem pôr em causa o adequado desempenho deste e, com isso, reduzir a possibilidade de ocorrer uma evacuação com sucesso e uma intervenção dos bombeiros adequada. De entre essas particularidades destacam-se, em especial, o maior tempo de enchimento com fumo (que pode incrementar o tempo de deteção), a possibilidade de ocorrer uma estratificação intermédia do fumo e a necessidade de proteger os vãos abertos sobre o átrio.

Verifica-se da construção corrente que existem numerosos casos em que o fumo proveniente de um incêndio poderá não ficar confinado ao átrio. Alerta-se para a necessidade de diagnosticar essas situações para que as medidas de autoproteção se possam adequar a esta realidade.

AGRADECIMENTOS

Este estudo foi desenvolvido no âmbito do projeto QREN n.º 23226 (Smoke Shield) cofinanciado pela ADI – Agência de Inovação.

REFERÊNCIAS

- [1] *Decreto-Lei n.º 220/2008 [Estabelece o regime jurídico da segurança contra incêndios em edifícios]*. Diário da República, 1.ª Série, Número 220, 2008-11-12, p. 7903-7922.
- [2] *Portaria n.º 1532/2008 [Aprova o Regulamento Técnico de Segurança contra Incêndio em Edifícios (SCIE)]*. Diário da República, 1.ª Série, Número 250, 2008-12-29, p. 9050-9127.
- [3] *Circulaire du 30 décembre 1994 complétant la circulaire du 3 mars 1982 relative aux instructions techniques prévues dans le règlement de sécurité des établissements recevant du public*. Journal Officiel de la République Française, n°32 du 7 février 1995, p. 2077.

- [4] *NFPA 92B. Standard for Smoke Management Systems in Malls, Atria, and Large Spaces.* National Fire Protection Association.
- [5] *CEN/TR 12101-5. Smoke and Heat Control Systems - Part 5 Guidelines on Functional Recommendations and Calculation Methods for Smoke and Heat Exhaust Ventilation Systems.* CEN: Bruxelas, 2005.
- [6] Fernandes C. e Viegas J.C. – *Controlo de fumos em átrios de grande altura.* 2^{as} Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos. Coimbra: 3 de Junho de 2011.
- [7] Valadares R., Viegas J.C. e Rodrigues J.P. – *Controlo de fumo em caixas de palco.* I Congresso Ibero-Latino-Americano sobre Segurança Contra Incêndio. Natal (Brasil): 10 a 12 de Março de 2011.
- [8] Capote J. A., Alvear D., Abreu O. V., Lázaro M., Espina P. - *Scale Tests of Smoke Filling in Large Atria.* Fire Technology, 45, 2009, p. 201–220.
- [9] Chow W.K., Li S.S., Gao Y., Chow C.L. - *Numerical studies on atrium smoke movement and control with validation by field tests.* Building and Environment 44, 2009, p. 1150–1155.
- [10] Gutiérrez-Montes C., Sanmiguel-Rojas E., Viedma A., Rein G. - *Experimental data and numerical modelling of 1.3 and 2.3 MW fires in a 20 m cubic atrium.* Building and Environment 44, 2009, p. 1827–1839.
- [11] Qin T.X., Guo Y.C., Chan C.K., Lin W.Y.- *Numerical simulation of the spread of smoke in an atrium under fire scenario.* Building and Environment 44, 2009, p. 56–65.
- [12] Tilley N., Merci B. - *Application of FDS to Adhered Spill Plumes in Atria.* Fire Technology, 45, 2009, p. 179–188.
- [13] Gutiérrez-Montes C., Sanmiguel-Rojas E., Viedma A. - *Influence of different make-up air configurations on the fire-induced conditions in an atrium.* Building and Environment 45, 2010, p. 2458-2472.
- [14] Gao R., Li A., Hao X., Lei W., Zhao Y., Deng B. - *Fire-induced smoke control via hybrid ventilation in a huge transit terminal subway station.* Energy and Buildings 45, 2012, p. 280–289.
- [15] Tilley N., Rauwoens P., Fauconnier D., Merci B. - *On the extrapolation of CFD results for smoke and heat control in reduced-scale set-ups to full scale: Atrium configuration.* Fire Safety Journal 59, 2013, p. 160–165.
- [16] Tilley N., Merci B. - *Numerical study of smoke extraction for adhered spill plumes in atria: Impact of extraction rate and geometrical parameters.* Fire Safety Journal 55, 2013, p. 106–115.
- [17] Ayala P., Cantizano A., Gutiérrez-Montes C., Rein G. - *Influence of atrium roof geometries on the numerical predictions of fire tests under natural ventilation conditions.* Energy and Buildings 65, 2013, p. 382–390.
- [18] *NP EN 1991-1-4. Eurocódigo 1 – Ações em estruturas. Parte 1-2: Ações gerais em estruturas expostas ao fogo.* Caparica: Instituto Português da Qualidade, 2010.
- [19] Milke J. A. – *Smoke management in covered malls and atria.* SFPE handbook for fire protection engineering. SFPE, 2002, p. 4-292 – 4-310.