

Limitação do escoamento do fumo em situação de incêndio com ventiladores de impulso

João Carlos Viegas¹, Hildebrando Cruz¹, Abel Virgílio¹, Helena Galhardas² e Cristiano Neves³

¹Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Edifícios, Av. do Brasil, 1700-066 Lisboa, Portugal

email: jviegas@lneec.pt <http://www.lneec.pt>

²Teixeira Duarte, S.A., Lagoas Park, Edifício 2, Porto Salvo, 2780 Oeiras, Portugal

³EFAFLU, S.A., Rua de S. Brás, 269, 4494-909 Póvoa de Varzim, Portugal

Sumário

O desenvolvimento urbanístico nos últimos 15 anos tem conduzido à construção de grandes parques de estacionamento cobertos. Estes parques carecem de meios de controlo de fumo. Uma das formas adequadas para a sua realização consiste na utilização de ventiladores de impulso, em geral combinados com ventiladores axiais de insuflação de ar novo e de exaustão do fumo proveniente de um incêndio. O seu princípio de utilização consiste na transmissão de quantidade de movimento ao fluido gerando o escoamento de ar novo que se opõe ao escoamento do fumo, em jacto de teto, mantendo extensas zonas sem fumo (ou com muito pouco fumo) adequadas para a evacuação dos ocupantes e para a intervenção dos bombeiros. No sentido de caracterizar a interferência entre o jacto gerado por ventiladores de impulso e o jacto de teto proveniente de uma fonte de calor foram realizadas medições dos campos de velocidade e de temperatura tendo em vista ajustar expressões analíticas para descrever essa interferência. Nesta comunicação apresentam-se os resultados desse estudo.

Palavras-chave: Ventilação de impulso; parques de estacionamento; controlo de fumo; segurança contra incêndio.

1 INTRODUÇÃO

Em parques de estacionamento cobertos a regulamentação actual obriga à imposição de uma taxa de ventilação, que se espera tenha condições para reduzir a concentração de poluentes a um nível reconhecido como aceitável; para além disso, espera-se que a imposição dessas taxas de ventilação em situação de incêndio permita minimizar o impacto do escoamento do fumo gerado por um incêndio, pelo menos durante o tempo necessário para assegurar a evacuação dos respetivos ocupantes. No caso do controlo de fumo, o escoamento deve fazer o varrimento da zona sinistrada. O pressuposto da imposição de varrimento obriga a que a disposição das aberturas de ventilação tenha de ser realizada cuidadosamente. Requer-se tecnicamente que as aberturas de ventilação sejam dispostas regularmente e abrangendo todo o parque, o que normalmente exige a construção de uma rede de condutas complexa, volumosa e dispendiosa. O desempenho destes tipos de aplicação do sistema de ventilação tem sido caracterizado em diversos estudos [1 a 9]. Embora menos comuns, também alguns estudos têm sido realizados relativamente à sua aplicação ao caso de incêndio [10 a 12].

O controlo de fumo, proveniente de um incêndio, em parques de estacionamento cobertos deve conformidade, em Portugal, ao Regulamento Técnico de Segurança contra Incêndio em Edifícios [13]. Este regulamento impõe a subdivisão destes parques em compartimentos corta-fogo não superiores a 3200 m² (em pisos situados abaixo do nível de referência) e a 6400 m² (em pisos situados no nível de referência ou acima deste), permitindo ainda a duplicação da área quando é utilizado um sistema automático de extinção de incêndio (sprinklers) em situações em que tal não seja obrigatório. Por outro lado, o regime jurídico [4] que enquadra este regulamento abre a possibilidade de derrogação de prescrições regulamentares desde que seja claramente justificado pelo projetista que a solução construtiva proposta permite atingir um nível de segurança igual ou superior ao correspondente à solução regulamentar. Esta possibilidade tem sido utilizada em parques de estacionamento de grandes dimensões, nos quais a compartimentação é retirada através da adoção de um sistema de controlo de fumo mais eficaz que o prescrito regulamentarmente.

Para esse efeito são utilizados ventiladores de impulso, frequentemente associados a ventiladores axiais de grande dimensão que realizam a insuflação de ar novo e a exaustão do fumo. A utilização dos sistemas de ventilação de impulso destina-se a obviar à utilização de aberturas de ventilação, servidas por condutas, dispersas pelo parque. O seu princípio de funcionamento baseia-se no pressuposto de que os ventiladores de impulso, associados a ventiladores de insuflação e de exaustão normalmente posicionados nos extremos do parque, podem assegurar o escoamento da poluição ou do fumo para os pontos de exaustão e daí para o exterior. Para que tais sistemas possam ter uma aplicação adequada é necessário que seja possível saber como concebê-los de forma a que seja restringida a dispersão da poluição ou que seja evitado o escoamento do fumo para os locais que se pretendem proteger. Este domínio tem sido objeto de alguns trabalhos precedentes [15 a 18]; todavia, não existem resultados experimentais realizados de forma metódica que venham a sistematizar este assunto. Embora existindo uma norma abrangendo este domínio [19], esta limita-se a definir as condições a assegurar com o funcionamento dos sistemas de ventilação de impulso, sem que seja definido como proceder ao seu dimensionamento.

Para a realização da conceção e do dimensionamento preliminar deste tipo de sistemas de ventilação é necessário conhecer a interferência dos jatos desenvolvidos por estes ventiladores, bem como a forma como estes são alterados na presença de superfícies, com o jato de teto gerado por uma fonte de calor. Neste estudo foram ensaiados dois ventiladores deste tipo em situação de jato paralelo e confinado pelo piso e pelo teto, como ocorre em parques de estacionamento cobertos, em conjunto com a ação de uma fonte de calor. São apresentados os resultados relativos à limitação do escoamento do fumo no sentido longitudinal ao eixo dos jatos dos ventiladores de impulso.

2 METODOLOGIA

Os jatos de ventiladores de impulso confinados entre o piso e o teto com um pé-direito relativamente pequeno, como ocorre usualmente nos parques de estacionamento cobertos, geram um varrimento geral do parque de estacionamento que tem a capacidade, a partir de uma certa distância da fonte de calor, de se opor ao escoamento do jato de teto. Este aspeto é evidenciado através de um conjunto de ensaios que tem em vista apoiar o ajustamento de expressões analíticas para a caracterização da interferência dos dois escoamentos. Dado que não era possível o desenvolvimento de ensaios à escala do incêndio de um veículo automóvel, foi adotada uma análise adimensional dos escoamentos que teve em conta a relativamente baixa temperatura que ocorre na generalidade do campo, devido aos elevados caudais de ventilação que conduzem a uma forte diluição do fumo [20]. Nestas condições privilegiou-se garantir a semelhança da componente convectiva do fenómeno estudado assegurando-se uma equivalência do respetivo Número de Froude e mantendo os escoamentos em regime turbulento [21].

De acordo com Thomas [22], as características da convecção podem ser correlacionadas, fora da zona de combustão, longe das paredes e ignorando as perdas de calor, através de um número adimensional, que corresponde ao quociente da velocidade do escoamento u por uma grandeza designada por velocidade característica u_c , de acordo com a seguinte definição:

$$\frac{u}{u_c} = \frac{u}{\sqrt[3]{\frac{g\dot{Q}}{\rho c_p T_0 Z}}} \quad (1)$$

sendo g a aceleração da gravidade, \dot{Q} a potência calorífica convectada, ρ a massa volúmica, c_p o calor específico a pressão constante, T_0 a temperatura ambiente e Z a cota. Frequentemente os ventiladores que integram o sistema de controlo de fumo têm duas velocidades, sendo ativados na velocidade máxima para controlo de fumo. Nestas condições, é particularmente fácil a utilização do sistema de controlo de fumo do protótipo, com as velocidades mais reduzidas, desde que ainda assim a potência calorífica necessária para assegurar as condições de semelhança não atinja valores que possam danificar o modelo. Se a relação entre velocidades for $1/2$, então verifica-se que (o índice 2 indica o modelo e o índice 1 o protótipo):

$$u_{c2} = 0,5 u_{c1} \Leftrightarrow \sqrt[3]{\frac{g\dot{Q}_2}{c_p \rho_0 T_0 Z_2}} = \sqrt[3]{\frac{g\dot{Q}_1}{c_p \rho_0 T_0 Z_1}} \frac{1}{2} \Leftrightarrow \dot{Q}_2 = \dot{Q}_1 \frac{1}{2^3} \quad (2)$$

pelo que a potência calorífica libertada na modelação física deve ser 1/8 da de projeto. Uma vez que nesta comunicação se apresentam as condições para anulação da velocidade do escoamento do fumo, o recurso a esta adimensionalização da velocidade do escoamento é desnecessário, pretende-se ainda assim reforçar a generalidade que podem ter os resultados aqui obtidos.

Reduzindo o valor das velocidades geradas pelos ventiladores de impulso foi também possível reduzir a potência calorífica libertada para valores adequados para a segurança da instalação experimental e dos seus operadores. Foram realizados ensaios nas seguintes condições:

- (i) Jacto em regime isotérmico confinado por duas superfícies horizontais paralelas ao seu eixo e paralelas entre si (representa um ventilador de impulso suspenso junto ao teto e com o piso, que confina o escoamento, a uma distância tal que limita o seu crescimento; esta corresponde à configuração de maior interesse para os parques de estacionamento cobertos, dado o seu reduzido pé-direito);
- (ii) Escoamento gerado por fonte de calor confinada por um teto, com os ventiladores de impulso inativos;
- (iii) Escoamento gerado por fonte de calor confinada por um teto, com os ventiladores de impulso ativos.

Apresentam-se os resultados das medições dos campos de velocidade (condições i e iii) e de temperatura (condições ii e iii). É feito o ajustamento de um modelo analítico ao campo de temperatura na condição ii e estimada a velocidade para essa condição. Esta é comparada com a medida na condição iii e é sugerida a forma de previsão da fronteira da zona enfumada. Refere-se ainda a forma como, através do conhecimento destes campos de velocidade e de temperatura pode ser realizado o dimensionamento preliminar do sistema de controlo de fumo.

Os ensaios foram realizados no interior de um pavilhão de grandes dimensões que protege a instalação experimental das ações meteorológicas. A instalação experimental é constituída por um teto falso com cerca de 800 m² suspenso a 3,0 m do chão. O espaço entre o chão e o teto falso constitui a zona de ensaio. Foram instalados dois ventiladores de impulso com os eixos dos respetivos jatos paralelos entre si e distantes de 8,00 m. Os ventiladores de impulso estão posicionados sobre andaimes de forma a ficarem, encostados ao teto, ficando os eixos dos jatos em posição horizontal e à cota de 2,50 m acima do piso. No decurso destes ensaios os ventiladores (de duas velocidades) foram acionados na velocidade mínima, que corresponde a uma velocidade média na origem dos jatos de cerca de 11 m/s (aproximadamente metade da velocidade máxima). O escoamento é completamente turbulento, sendo o respetivo Número de Reynolds de $Re = 3,5 \times 10^5$. Os ventiladores têm o impulso nominal de 50 N (quando ativados na velocidade máxima) e a medição do campo de velocidade foi efetuada com recurso a anemómetros de turbina e de fio-quente, colocados numa coluna às cotas de: 0,20 m, 1,00 m, 1,50 m, 2,00 m, 2,50 m e 2,90 m. Foram utilizados anemómetros de carácter industrial devido ao ambiente agressivo em que estes ensaios decorrem. Os anemómetros de turbina são do tipo Airflow AV6 e os anemómetros de fio quente são do tipo Airflow TA5. A sensibilidade deste tipo de instrumentação a variações de velocidade de alta frequência é baixa. Os anemómetros foram previamente calibrados em túnel de vento e a estimativa da incerteza expandida (para um intervalo de confiança de 95%) da medição varia com a velocidade, sendo o seu valor na gama de velocidades medidas de 0,08 m/s para os anemómetros de turbina e de 0,03 m/s para os anemómetros de fio quente. No referencial ortonormado de medição, x é paralelo ao eixo dos jatos na origem e encontra-se no plano de simetria da instalação experimental, y é transversal ao eixo dos jatos e paralelo ao piso e z é normal ao piso, sendo a cota do piso $z = 0$ m.

Existe uma fonte de calor constituída por uma tina circular de aço inoxidável com 0,72 m de diâmetro e 0,15 m de profundidade. O bordo da tina está posicionada em $(x, y, z) = (22,4 \text{ m}; 0,00 \text{ m}; 0,32 \text{ m})$. O combustível foi constituído por gasolina comercial com índice de octano de 95. A potência calorífica libertada foi estimada através da variação da massa de combustível, avaliada por uma célula de carga (de marca HBM e modelo U2B/1 kN) posicionada por baixo da tina. A temperatura do escoamento do fumo foi avaliada através de quatro colunas de aço inoxidável que suportavam um conjunto de termopares do tipo J.

Dado que as medições foram realizadas em regime estacionário, as colunas com os anemómetros e com os termopares foram posicionadas sucessivamente em diferentes posições no espaço de medição para se ter um

maior número de medições e aumentar o seu refinamento. A malha de medição com as posições ocupadas, no plano horizontal, pelas colunas de termopares nos vários ensaios está representada na figura 1. Os anemómetros encontram-se ligados a um sistema de aquisição de dados, do tipo DataTaker DT512. Para a aquisição dos dados de temperatura foram utilizados um ΔT -Logger e um DataTaker DT-512. O registo da variação de massa determinada pela célula de carga foi feito pelo sistema de aquisição de dados, do tipo DataTaker DT800.

A estimativa de incerteza para a medição da temperatura é de 1,8 K e para a determinação da variação de massa de combustível é de 1,94%.

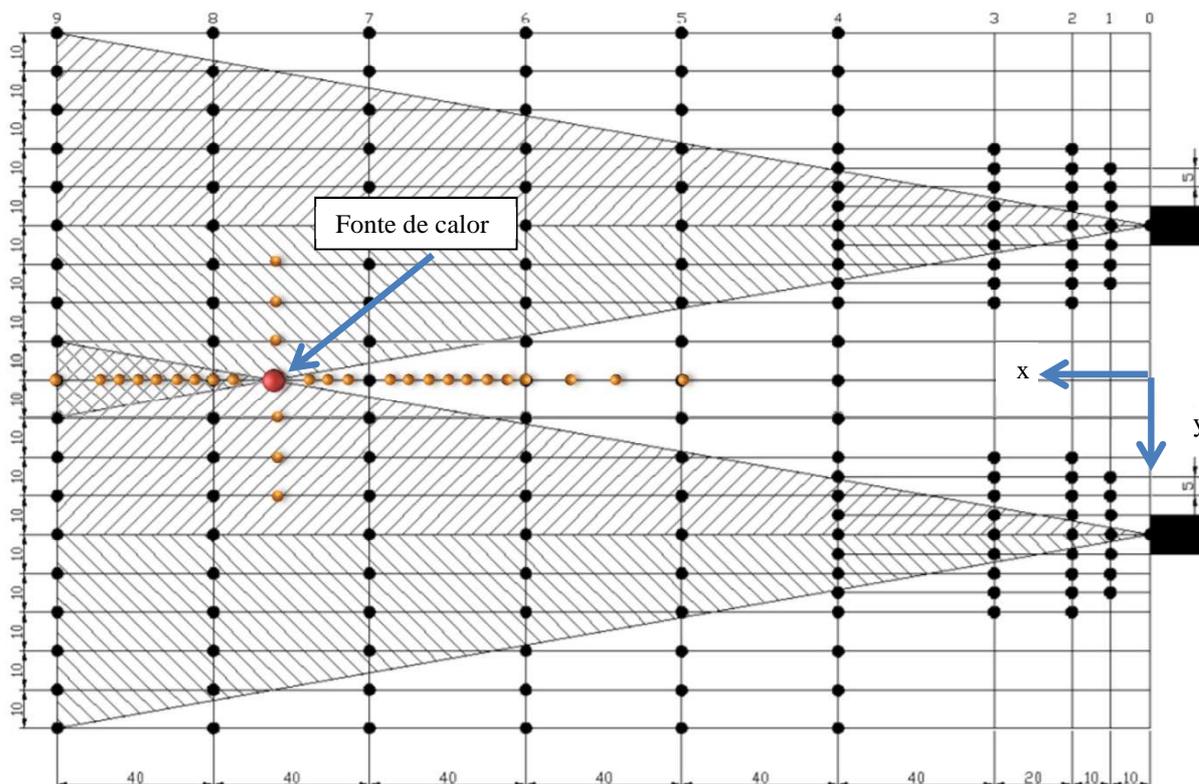


Fig. 1. Posições das colunas de termopares (pontos vermelhos), da fonte de calor e dos ventiladores de impulso (distâncias em dm)

Foram realizados 7 ensaios com a fonte de calor ativa e na condição de ventilação inativa (condição ii) e 8 ensaios com os ventiladores ativos e com a fonte de calor também ativa (condição iii). Os resultados experimentais com escoamento isotérmico gerado pelos ventiladores (condição i) foram obtidos no decurso dos ensaios correspondentes à condição iii mas no período antecedente à ativação da fonte de calor.

No decurso dos ensaios com fonte de calor verificou-se que a ativação da ventilação, conduzindo a uma melhor ventilação da fonte de calor, originou um incremento da potência calorífica libertada. Assim, a variação média de massa, correspondente ao consumo de combustível na fonte de calor, foi de 12,1 g/s para a condição de ventilação inativa, sendo o respetivo desvio padrão de 0,86 g/s. No caso dos ensaios com ventilação ativa, a variação média de massa, correspondente ao consumo de combustível na fonte de calor, foi de 16,3 g/s, sendo o respetivo desvio padrão de 1,78 g/s. Considerando que o poder calorífico inferior da gasolina é de 43 MJ/kg e que a eficiência da combustão é de 0,92, obtém-se uma estimativa para a potência calorífica libertada de 478,7 kW, para os ensaios com ventilação inativa, e de 646,3 kW, para os ensaios com ventilação ativa.

Para avaliar as condições de reprodutibilidade das várias repetições de ensaio, foi mantida sempre na mesma posição $(x; y) = (20,00 \text{ m}; 0,00 \text{ m})$ uma coluna de termopares. Na figura 2 mostra-se o perfil correspondente ao

incremento de temperatura médio medido por essa coluna no conjunto de ensaios sem ventilação ativa (condição ii) e com ventilação ativa (condição iii). Embora as condições de ensaio tenham sido iguais, verifica-se que, ainda assim, existe alguma dispersão das temperaturas, o que está em linha com a variabilidade constatada na potência calorífica libertada.

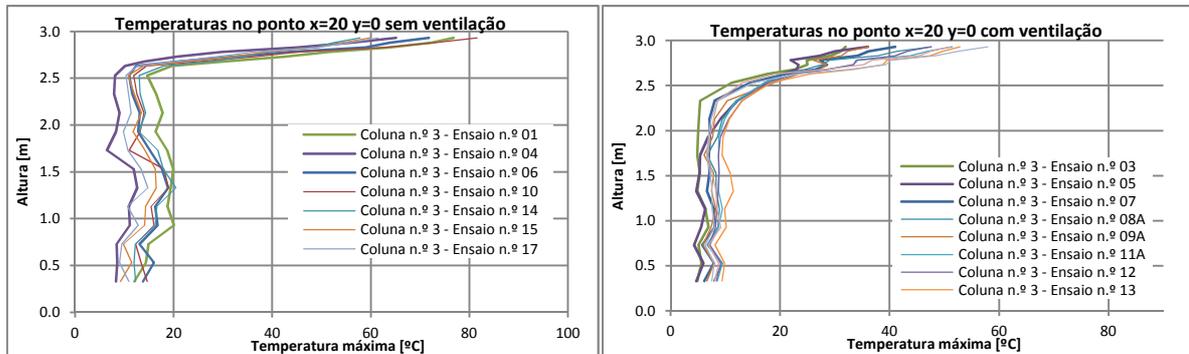


Fig. 2. Comparação do incremento máximo de temperatura

De acordo com a condição deduzida na expressão 2, o fenómeno deverá ser similar se os ventiladores de impulso forem ativados na sua velocidade máxima (como ocorre em situação de incêndio) e se a fonte de calor for de cerca de 5 MW (correspondente ao incêndio de um veículo ligeiro). Note-se que quer no modelo, quer no protótipo o escoamento é turbulento. A radiação não tem as mesmas escalas da convecção, todavia o fenómeno em causa é essencialmente convectivo, pelo a extrapolação mencionada é razoável.

3 ESCOAMENTO DEVIDO À FONTE DE CALOR

O escoamento em jato de teto (para teto horizontal) proveniente de uma pluma térmica originada por uma fonte de calor foi objeto de diversos trabalhos de vários autores, tendo sido a primeira formulação analítica dos campos de temperatura e de velocidade gerados a devida a Alpert [23]. Esse modelo é constituído pelas seguintes expressões para os campos de temperatura e de velocidade, sendo r a distância radial à origem do escoamento (que é o ponto em que o eixo da pluma toca o teto), H a altura da pluma (entre a base da fonte de calor e o teto), T a temperatura do jato de teto e u a sua velocidade:

$$\Delta T = T - T_0 = \frac{16,9Q^{2/3}}{H^{5/3}} \text{ para } \frac{r}{H} < 0,18 \quad (3)$$

$$\Delta T = T - T_0 = \frac{5,38\left(\frac{Q}{r}\right)^{2/3}}{H} \text{ para } \frac{r}{H} > 0,18 \quad (4)$$

$$u = 0,96 \left(\frac{Q}{H}\right)^{1/3} \text{ para } \frac{r}{H} < 0,15 \quad (5)$$

$$u = \frac{0,195Q^{1/3}H^{1/2}}{r^{5/6}} \text{ para } \frac{r}{H} > 0,15 \quad (6)$$

Na figura 3 comparam-se os resultados experimentais obtidos com a curva analítica relativa à temperatura em função da distância à origem. Verifica-se que os resultados experimentais se aproximam razoavelmente das previsões do modelo analítico. Para se avaliar se a variação da potência calorífica libertada poderia ser o principal fator a induzir a dispersão observada nos resultados, os resultados experimentais e o modelo de Alpert [23] foram normalizados de acordo com as seguintes expressões:

$$\frac{\Delta T}{Q^{2/3}} = \frac{T-T_0}{Q^{2/3}} = \frac{16,9}{H^{5/3}} \text{ para } \frac{r}{H} < 0,18 \quad (7)$$

$$\frac{\Delta T}{Q^{2/3}} = \frac{T-T_0}{Q^{2/3}} = \frac{5,38 \left(\frac{1}{H}\right)^{2/3}}{H} \text{ para } \frac{r}{H} > 0,18 \quad (8)$$

O resultado obtido está também apresentado na figura 3, verificando-se que, ainda assim, ocorre uma certa dispersão dos resultados. Dado que se verifica que o ajustamento dos resultados experimentais ao modelo analítico é razoável, será utilizado este modelo para estimar a velocidade no jato de teto, que não foi possível ser medida no decurso destes ensaios.

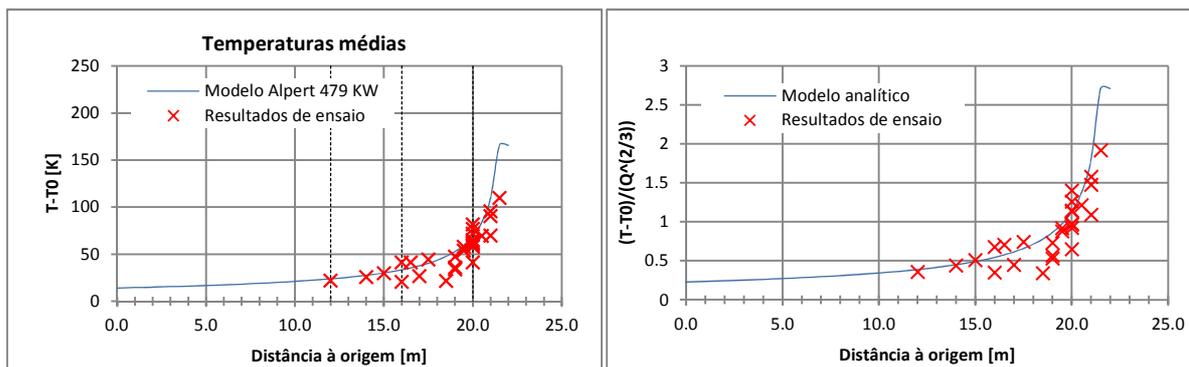


Fig. 3. Comparação dos resultados experimentais obtidos com o modelo de Alpert [23]

4 CONFINAMENTO DO FUMO

Os ensaios com fonte de calor e com a ventilação de impulso ativa mostraram que a velocidade do escoamento imposta pelos ventiladores é suficientemente elevada para limitar o escoamento do fumo para montante. Na figura 4 mostram-se os perfis de temperatura para diferentes localizações ao longo do plano de simetria da instalação experimental ($y = 0$ m). Verifica-se que o escoamento do fumo está limitado até $x = 18$ m (que corresponde a uma distância de 6 m da origem do jato de teto na pluma). Este fenómeno é visível na figura 5. Dado que na condição de ensaio com os ventiladores ativos ocorreu uma potência calorífica libertada mais elevada, na figura 6 compara-se a temperatura máxima da camada quente obtida no ensaio com ventilação ativa (valores médios obtidos no decurso da fase estacionária do ensaio) com o incremento de temperatura resultante do modelo de Alpert [23] para a potência calorífica de 646 kW (valor correspondente à média dos ensaios com ventilação ativa). Verifica-se que o fumo é fortemente diluído pela ação dos ventiladores de impulso, sendo o incremento de temperatura reduzido sensivelmente para metade. Verifica-se que a distribuição do incremento de temperatura é assimétrica, relativamente ao eixo vertical da fonte de calor, devido à inclinação da chama e ao arrastamento do fumo por ação do escoamento imposto pelos ventiladores de impulso.

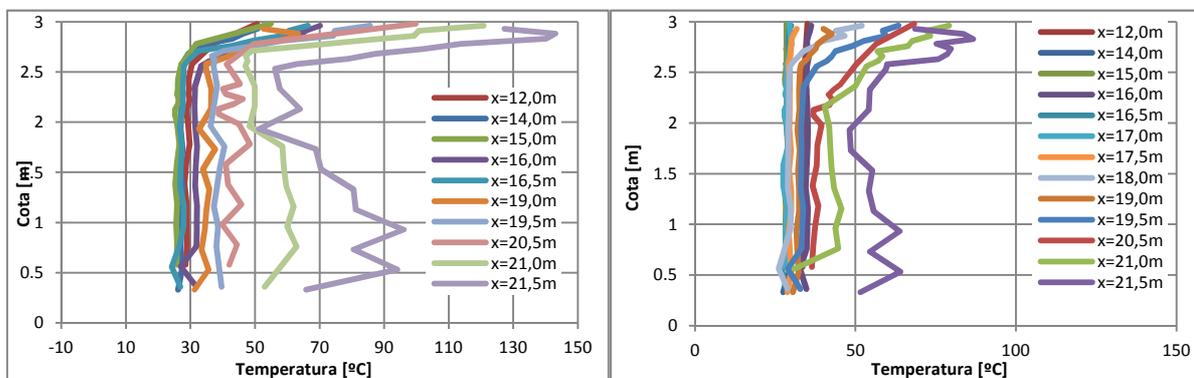


Fig. 4. Perfis de velocidade para $y = 0$ m com a ventilação inativa (esquerda) e ativa (direita)



Fig. 5. Bloqueio do escoamento devido à ação dos ventiladores de impulso

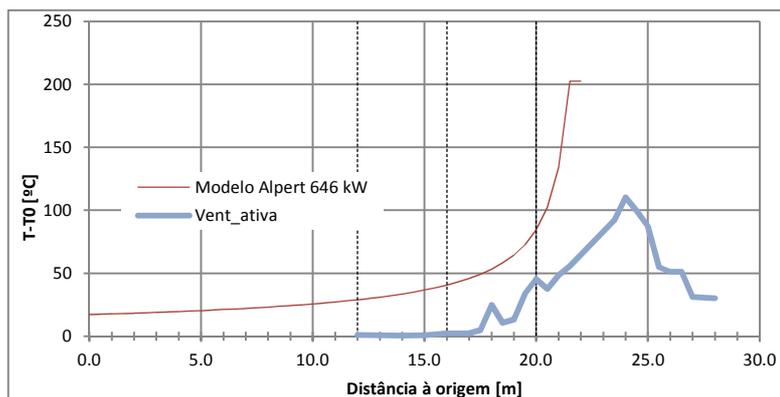


Fig. 6. Incremento de temperatura do modelo de Alpert [23] e no ensaio com ventilação ativa

No quadro 1 mostra-se o valor da velocidade medida nos ensaios com fonte de calor e ventilação ativa e sem fonte de calor e ventilação ativa. Os valores de velocidade foram medidos à cota de 2,5 m (corresponde à velocidade máxima para esse ponto em planta). Dado que os anemómetros de turbina e de fio quente são sensíveis às partículas e temperatura do fumo, não foram utilizados em zonas onde pudesse ocorrer o contacto com fumo. A análise dos resultados mostra que a velocidade do escoamento é inicialmente incrementada com a distância à origem conforme o jato dos ventiladores vai alargando e coalescendo no plano de simetria da instalação experimental. Para a posição $x > 16,5$ m a velocidade decresce. O campo de velocidade medido com e sem fonte de calor ativa é muito semelhante, o que evidencia que até $x = 17,0$ m o jato de teto proveniente da fonte de calor não tem influência. Dado que a esta distância da origem a variação do campo de velocidade com a distância à origem é relativamente lenta, pode admitir-se, como hipótese de trabalho, que a velocidade do escoamento imposto pelos ventiladores de impulso e não perturbado pela fonte de calor seria, no ponto em que ocorre o bloqueio do escoamento do fumo $1,0 \text{ m/s} \approx v_b < 1,09 \text{ m/s}$.

A velocidade do escoamento do jato de teto com origem na pluma térmica pode ser estimada a partir da equação (6), tendo sido obtido o valor de $0,92 \text{ m/s}$ para $x = 18,0 \text{ m}$. Verifica-se que as velocidades do campo de velocidade imposto pelos ventiladores de impulso e estimada para o jato de teto devido à fonte de calor, quando não se considera a influência mútua entre estes dois escoamentos, são similares, o que reforça a hipótese de que o bloqueio do escoamento de fumo ocorre quando as velocidades dos dois escoamentos se anulam mutuamente.

Quadro 1. Velocidade do escoamento imposto pelos ventiladores de impulso

Posição	x = 12,0 m	x = 13,0 m	x = 16,5 m	x = 17,0 m
Velocidade sem fonte de calor	0,83 m/s	0,78 m/s	1,11 m/s	1,09 m/s
Velocidade com fonte de calor	0,80 m/s	0,91 m/s	1,11 m/s	1,07 m/s

5 CONCLUSÕES

Nesta comunicação apresentaram-se resultados experimentais que caracterizam (i) pontos relevantes do campo de velocidade originado por dois ventiladores de impulso em regime isotérmico, (ii) o campo de temperatura do jato de teto originado por uma fonte de calor, (iii) o campo de temperatura resultante da interferência desses dois escoamentos e (iv) pontos relevantes do campo de velocidade desse escoamento.

Verifica-se que (i) o escoamento em jato de teto é razoavelmente descrito pelo modelo de Alpert [23], que (ii) o campo de velocidade imposto pelos ventiladores de impulso tem capacidade para bloquear o escoamento de fumo em jato de teto e que (iii) a posição em que ocorre o bloqueio é aproximadamente aquela para a qual as velocidades do escoamento isotérmico originado por ventiladores de impulso e o escoamento do fumo em jato de teto se anulam. Evidenciou-se ainda que as características do escoamento podem ser extrapoladas para condições reais de incêndio com uma potência calorífica libertada correspondente à combustão de um veículo ligeiro.

Estas conclusões apontam no sentido do modelo proposto por Viegas [16] ser adequado, quando considerada uma taxa de diluição $D = 0,0$. Este modelo baseia-se no princípio de que para estimar a posição do limite da zona enfumada pode recorrer-se ao campo de velocidade imposto pelos ventiladores de impulso em regime isotérmico, comparar com o campo de velocidade imposto pelo jato de teto não perturbado originado por uma fonte de calor e encontrar o lugar geométrico que corresponde aos pontos onde é satisfeita a relação entre as velocidades que conduz ao bloqueio do fumo. Para consolidar estas conclusões e aumentar a exatidão dos resultados considera-se necessário proceder à medição direta da velocidade do jato de teto com origem na fonte de calor numa posição correspondente ao ponto de bloqueio e, identicamente, proceder-se à medição do campo de velocidade imposto pelos ventiladores de impulso em regime isotérmico também nesse ponto.

6 AGRADECIMENTOS

Este projeto de investigação teve o apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia (PTDC/ECM/68064/2006).

REFERÊNCIAS

1. W. K. Chow, On the ventilation design in underground car parks, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 10(2), 225-246, 1995.
2. W. K. Chow, On Safety Systems for Underground Car Parks, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 13(3), 281-287, 1998.
3. M. Y. Chan e W. K. Chow, Car park ventilation system: performance evaluation, *Building and Environment*, 39, 635-643, 2004.
4. Z. Lin [et al.], CFD analysis of ventilation effectiveness in a public transport interchange, *Building and Environment*, 41, 254-261, 2006.
5. Y. K. Chow, Simulation of carbon monoxide level in enclosed car parks using an air flow network program, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 11(2), 237-240, 1996.
6. J. Likar e J. Čadež, Ventilation Design of Enclosed Underground Structures, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 15(4), 477-480, 2000.
7. W. K. Chow, Numerical studies of airflows induced by mechanical ventilation and air-conditioning (MVAC) systems, *Applied Energy*, 68, 135-159, 2001.
8. K. Papakonstantinou [et al.], Air quality in an underground garage: computational and experimental

- investigation of ventilation effectiveness, *Energy and Buildings*, 35, 933–940, 2003.
9. A. Duci [et al.], Numerical approach of carbon monoxide concentration dispersion in an enclosed garage, *Building and Environment*, 39, 1043–1048, 2004.
 10. W. K. Chow, On Safety Systems for Underground Car Parks, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 13(3), 281-287, 1998.
 11. L. Noodijk e T. Lemaire, Modelling of fire spread in car parks.
 12. X. G. Zhang [et al.], Numerical simulations on fire spread and smoke movement in an underground car park, *Building and Environment*, 42, 3466–3475, 2007.
 13. Regulamento Técnico de Segurança contra Incêndio em Edifícios, *Diário da República*, Série I, Portaria 1532/2008.
 14. Regime Jurídico da Segurança contra Incêndio em Edifícios, *Diário da República*, Série I, Decreto-Lei 220/2008.
 15. J. C. Viegas, Use of impulse ventilation for smoke control in underground car parks. *Ventilation 2009 - 9th International Conference on Industrial Ventilation*, Zurique: 18-21 de Outubro de 2009.
 16. J. C. Viegas, The use of impulse ventilation for smoke control in underground car parks, *Tunnel. Underg. Space Technol*, 25, 42-53, 2010
 17. J. C. Viegas, Impulse ventilation in underground car parks: the influence of parked cars in smoke control. *CFD 2010 - Fifth European Conference on Computational Fluid Dynamics*, Lisboa: 14-17 de Junho de 2010.
 18. J. C. Viegas, H. Cruz, V. M. R. Pedroso e A. Virgílio, Desempenho de sistemas de ventiladores de impulso para controlo de fumo em parques de estacionamento subterrâneos. *Encontro Nacional sobre o Espaço Subterrâneo e a sua Utilização*. Lisboa: 18 e 19 de Novembro de 2010.
 19. BS 7346-7. 2006, Components for smoke and heat control systems – Part 7: Code of practice on functional recommendations and calculation methods for smoke and heat control systems for covered car parks, *British Standards Institute*, London.
 20. W. K. Chow e R. Yin, Numerical verification of scaling laws for smoke movement in room-corridor structure. *Journal of Architectural Engineering*, 4(2), Junho de 1998. ASCE.
 21. J. C. Viegas, Modelação física de incêndios confinados. *2^{as} Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos*. Universidade de Coimbra- Portugal – 3 de Junho de 2011.
 22. P. H. Thomas, Fire modeling and fire behaviour in rooms. *18th Symposium (International) on Combustion*. The Combustion Institute, 1981.
 23. R. L. Alpert, *Fire Technology*, 8(181), 1972.