

Controlo de fumo por varrimento em parques de estacionamento cobertos: aplicação da ventilação de impulso

João Carlos Viegas¹

¹Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Edifícios, Av. Do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal

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

Sumário

Os parques de estacionamento cobertos são locais que contêm usualmente cargas de incêndio significativas (constituídas pelos veículos que aí parqueiam) e cujo reduzido pé-direito dificulta ou impede mesmo a utilização dos métodos de controlo de fumo baseados na não-perturbação da estratificação térmica. A ventilação de impulso constitui uma solução de engenharia que pode ser adoptada para promover o varrimento, preservando zonas do parque de estacionamento do escoamento do fumo. Nesta comunicação apresentam-se os aspectos a ter em conta no dimensionamento e implementação deste tipo de sistemas de controlo de fumo.

Palavras-chave: Segurança contra incêndio; controlo de fumo; ventilação de impulso.

1 Introdução

Os parques de estacionamento cobertos caracterizam-se por serem espaços amplos, de grande área em planta, mas de reduzido pé-direito. Esta característica dificulta a aplicação dos métodos mais correntes de desenfumagem que se baseiam na estratificação térmica do fumo, tanto quanto possível não perturbada por quaisquer fluxos de ar que promovam a diluição do fumo (ver CEN/TR 12101-5 [1]), e na sua exaustão para o exterior. De facto o reduzido pé-direito pode impedir a existência de uma camada fria que tenha as características adequadas para o trânsito dos ocupantes. Assim, deve ser privilegiada a aplicação de uma técnica de varrimento que possa assegurar, tanto quanto possível, a preservação de parte do parque de estacionamento do escoamento do fumo. Para esse efeito é necessário que o escoamento imposto pelo sistema de controlo de fumo tenha um campo de velocidade suficientemente elevado de forma a que se oponha adequadamente ao escoamento do fumo.

Neste aspecto, a ventilação de impulso pode ter o desempenho adequado face a estas exigências. Os ventiladores de impulso, que se destinam a transferir para o escoamento a quantidade de movimento necessária para que seja realizado o varrimento dentro das condições anteriormente referidas, são normalmente suspensos no tecto dos parques de estacionamento cobertos e localizados de acordo com uma malha que deve assegurar que o campo de velocidade tem valores sempre superiores a um valor-limite especificado. Nos pisos interiores de parques de estacionamento a exaustão de fumo e, normalmente, a admissão de ar novo são realizadas mecanicamente, sendo para esse efeito utilizados ventiladores axiais posicionados na periferia do parque de estacionamento. Enquanto os sistemas de controlo de fumo correntes requerem a proximidade entre a exaustão e o foco de incêndio para que os caudais de extracção não tenham de ser excessivamente incrementados, no caso da utilização de ventiladores de impulso estes promovem a mistura do fumo com a camada fria (sendo deste ponto de vista a sua utilização indesejável) mas têm a capacidade (quando adequadamente dimensionados e instalados) de promover o escoamento do fumo até aos seus pontos de exaustão. Assim, é possível ter os pontos de exaustão consideravelmente afastados do foco de incêndio, o que se traduz numa arquitectura do parque de estacionamento com menos obstruções, mas torna-se absolutamente necessária a adopção de caudais de exaustão significativamente superiores aos previstos para os sistemas de desenfumagem correntes.

Nesta comunicação são aprofundados os aspectos da mecânica de fluidos em que se baseia a aplicação de ventilação de impulso no domínio do controlo de fumo em parques de estacionamento cobertos. Pretende-se ainda evidenciar a possibilidade de se adoptar um modelo analítico simplificado para exprimir o campo de velocidade resultante da combinação dos efeitos do jacto de tecto originado pela pluma térmica e dos jactos com origem nos ventiladores de impulso. Foi adoptada a seguinte metodologia: (i) estabelecimento da modelação analítica com base em considerações e ordem física e (ii) exemplificação da aplicação desta formulação analítica por comparação com os campos de velocidade resultantes de simulações CFD.

Na aplicação da ventilação de impulso ao controlo de fumo, o dimensionamento da exaustão de fumo e da admissão de ar novo deve ter em conta o caudal arrastado pelo jacto, de forma a ser minimizada a recirculação entre as admissões dos ventiladores de impulso e o respectivo bucal do jacto.

2 Modelação analítica

A previsão analítica destes escoamentos tem por base as equações dos campos de velocidade e de temperatura do jacto de tecto gerado por uma pluma térmica, podendo adoptar-se as equações de Alpert [2]:

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

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

sendo T a temperatura do jacto de tecto, T_{∞} a temperatura ambiente, \dot{Q} a potência calorífica libertada (incluindo a fracção radiada e em kW), H a altura da pluma, r a distância à origem do jacto e u a velocidade do jacto de tecto.

O escoamento imposto pelos ventiladores de impulso pode ser determinado através das equações do jacto, quando considerado confinado pela construção [3]:

$$u_{\text{impulso}}^2(x, r, \theta) = u_{\infty}^2 + \sum_{i=1}^n \alpha_i \left(\frac{k_{0i} u_{0i} 2r_{0i}}{x - x_i} \right)^2 e^{-\left(\frac{r_i}{k_i(x-x_i)} \right)^2} \quad (3)$$

sendo x, r, θ as coordenadas cilíndricas, u_{impulso} o componente do vector velocidade segundo x , u_{∞} a velocidade não-perturbada pelo jacto, u_{0i} a velocidade do escoamento na origem do jacto i , r_{0i} o raio do bucal do jacto i , x_i a coordenada de origem do jacto i e r_i a coordenada r para o jacto i . Adoptam-se os coeficientes $k = 0,090$ e $k_0 = 5,5$, que se verificou serem os que melhor se ajustam aos resultados experimentais de um ventilador de impulso deste tipo em jacto livre.

A combinação destas expressões permite prever aproximadamente o limite expectável para o escoamento do fumo. Para esse efeito admitem-se as seguintes hipóteses:

1. O campo de velocidade do escoamento resultante pode ser obtido aproximadamente pela soma vectorial dos campos de velocidade correspondentes às equações (2) e (3) precedentes.
2. O escoamento de jacto de tecto, com origem na pluma térmica (eq. 2) sofre uma atenuação devido à sua diluição pelo jacto dos ventiladores de impulso (eq. 3).
3. Entre ventiladores de impulso existe um escoamento longitudinal correspondente ao caudal arrastado pelos respectivos jactos.

As componentes do vector velocidade segundo as direcções ortogonais x e y (correspondentes nas simulações subsequentes ao plano horizontal) são então dadas por:

$$r(x, y) = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (4)$$

$$u_f^2 = \left(u_{cj} \frac{x}{r} At_v \right) \left| u_{cj} \frac{x}{r} At_v \right| + u_{\infty}^2 + \sum_{i=1}^n \alpha_i \left(\frac{k_{0i} u_{0i} 2r_{0i}}{x - x_i} \right)^2 e^{-\left(\frac{r_i}{k_i(x-x_i)} \right)^2} \quad (5)$$

$$u(x, r) = \begin{cases} \sqrt{u_f^2} & \text{if } u_f \geq 0 \\ -\sqrt{-u_f^2} & \text{if } u_f < 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$v(y, r) = \frac{0,195Q^{1/3}H^{1/2}}{r^{5/6}} \frac{y}{r} At_v \quad (7)$$

A velocidade u_∞ corresponde ao valor médio que é necessário adicionar para ser cumprida a condição de conservação de massa. Dado que a diluição do fumo é muito grande e por simplicidade, neste caso esta velocidade é obtida a partir de uma condição de equilíbrio de caudal volúmico no jacto dos ventiladores de impulso à temperatura ambiente.

A velocidade u_∞ tem, a montante do primeiro ventilador, o valor correspondente ao caudal mássico escoado pela fronteira de jusante. Dado que os jactos da primeira linha de ventiladores precisam de espaço para se desenvolverem e atingirem o caudal máximo, admitiu-se que ocorre uma variação linear do caudal arrastado (de acordo com a expressão 8); assim, neste modelo a velocidade foi ajustada de acordo com a seguinte expressão:

$$u_\infty = u_0 + \begin{cases} \frac{\dot{V}}{A} & \text{se } x \leq x_A \\ \frac{\dot{V}}{A} \left(\frac{x_B - x}{x_B - x_A} \right) & \text{se } x_A < x \leq x_B \\ 0 & \text{se } x_B < x \end{cases} \quad (8)$$

sendo u_0 uma velocidade constante sobreposta ao escoamento, que no presente caso é nula, \dot{V} o caudal total arrastado pelos ventiladores de impulso, A a área da secção transversal representativa do escoamento, x_A a abcissa da primeira linha de ventiladores e x_B a abcissa da segunda linha de ventiladores.

Note-se que nestas expressões não foi considerada a velocidade de arrastamento devida à acção dos ventiladores de impulso na direcção transversal ao eixo do jacto, uma vez que é pouco significativa em situação de incêndio, por ser muito menor do que a componente devida ao jacto de tecto na proximidade da fonte de calor. Desta forma estas expressões são conservativas no que respeita à extensão do escoamento transversal do fumo.

Tendo em conta que o escoamento de jacto de tecto com origem em pluma térmica é, nas zonas mais afastadas da fonte de calor, gerado essencialmente pela diferença de temperatura entre o fumo e o ambiente, é de esperar que a acção dos ventiladores de impulso se traduza numa diluição do fumo e das suas características, nomeadamente da temperatura, reduzindo assim a acção da impulsão responsável pelo escoamento. Assim, nas expressões (5) e (7) surge um factor de atenuação da velocidade, At_v , que afecta o termo devido ao jacto de tecto com origem na pluma térmica. Este factor é, no âmbito deste modelo analítico simplificado, relacionado com os caudais volúnicos de fluido \dot{V} decorrentes de cada escoamento, expressos em cada ponto, através das velocidades de cada escoamento, atendendo a que:

$$u = \frac{\dot{V}}{\delta A} \quad (9)$$

em que δA é uma secção elementar do escoamento. Dado que a acção dos ventiladores de impulso se traduz essencialmente no transporte do fumo e que a sua diluição é essencialmente devida à turbulência do escoamento, na expressão seguinte a velocidade gerada pelos ventiladores de impulso é afectada de um parâmetro D , que se convencionou aqui designar por “parâmetro de diluição”:

$$At_v = \frac{\frac{0,195Q^{1/3}H^{1/2}}{r^{5/6}}}{\frac{0,195Q^{1/3}H^{1/2}}{r^{5/6}} + D \sqrt{u_\infty^2 + \sum_{i=1}^n \alpha_i \left(\frac{k_{0i} u_{0i} 2r_{0i}}{x - x_i} \right)^2 e^{-\left(\frac{r_i}{k_i(x-x_i)} \right)^2}}} \quad (10)$$

Note-se que, em rigor, o factor de atenuação de velocidade deveria estar relacionado com os caudais mássicos; todavia, entendeu-se que sem informação de carácter experimental não se justifica tornar o modelo mais complexo. No presente caso, para se evidenciar a adequação da consideração de tal modelo, o parâmetro D foi

especificado de forma a melhorar o ajustamento das linhas de corrente obtidas com o campo de velocidade decorrente do modelo simplificado com as linhas de corrente obtidas no campo de velocidade determinado através das simulações CFD (ver secção 5).

3 Modelação numérica

No contexto deste estudo procurou utilizar-se um programa de CFD largamente difundido e de utilização corrente que tenha evidenciado largamente a sua adequação à simulação de situações de incêndio em edifícios, por um lado, e, por outro lado, dispor de uma ferramenta que, também devido à sua extensa utilização, tenha sido expurgada sistematicamente dos erros que inevitavelmente ocorrem na implementação de programas de computador tão complexos e que podem alterar significativamente os resultados. Para além disso seria de todo conveniente a utilização de um programa “amigo do utilizador” cuja utilização, alteração das condições iniciais e de fronteira e a extracção e visualização dos resultados fosse fácil. Estas condições eram preenchidas pelo programa designado por Fire Dynamics Simulator (FDS) [4]. Este programa foi extensivamente verificado e validado para cenários de incêndio [5].

A modelação física em que se baseia o FDS está detalhada em [5] e é sucintamente descrita seguidamente, com base nessa publicação. O modelo hidrodinâmico baseia-se na resolução das equações de conservação da massa, quantidade de movimento, da energia e da conservação de substâncias, adopta a forma das equações de Navier-Stokes adequada a escoamentos incompressíveis. As equações do modelo hidrodinâmico são modeladas numericamente através da técnica das diferenças finitas com um algoritmo explícito de segunda ordem no espaço e no tempo. A turbulência é modelada através da formulação de Smagorinsky do modelo “Large Eddy Simulation” (LES).

No presente estudo, que tem por objecto essencialmente os aspectos hidrodinâmicos da interacção entre os jactos turbulentos e as fontes de calor, o fogo foi modelado apenas como uma fonte de calor. Neste contexto, os modelos da combustão e da radiação do FDS não são relevantes, pelo que se dispensa aqui de os referir. O domínio de cálculo é discretizado de acordo com uma malha cartesiana tridimensional, sendo possível adoptar malhas variáveis apenas segundo duas direcções. Na transmissão de calor nas fronteiras sólidas é utilizado um modelo unidimensional sendo o coeficiente local de convecção determinado a partir das características do escoamento natural ou forçado.

Foram previamente apresentados casos de validação [6, 7].

As simulações realizadas têm por base a simulação I107, que se caracteriza por um domínio de cálculo com 95,0 m de comprimento (eixo xx), 75,0 m de largura (eixo yy) e 2,3 m de altura (eixo zz); o número de volumes elementares é de 285*225*8. Estão dispostos 15 ventiladores de impulso de 50 N, suspensos no tecto, em 3 linhas equidistantes de 30,0 m, no sentido longitudinal, e integrando cada linha 5 ventiladores (equidistantes de 15,0 m entre si). A primeira linha de ventiladores encontra-se a 5,0 m da fronteira livre de montante do escoamento (lado esquerdo das figuras); a fronteira a jusante dos ventiladores (lado direito das figuras) e uma das fronteiras laterais (fronteira superior das figuras) também têm imposta uma condição de fronteira livre; na outra fronteira lateral foi imposta uma condição de simetria. Os planos inferior e superior (respectivamente $z = 0,0$ m e $z = 2,3$ m) representam o piso e o tecto, pelo que têm uma condição de parede. O caudal de exaustão, avaliado na simulação CFD na abertura livre de jusante, é de 313715 m³/h. No plano de simetria, centrado em $x = 41,0$ m, foi posicionada uma fonte de calor de 2 MW (com uma área de 2 m²); assim esta simulação é representativa de uma zona de um parque de estacionamento coberto com o dobro da largura, o dobro dos ventiladores e uma potência convectiva de 4 MW.

4 Resultados da modelação numérica

Procedeu-se ao desenvolvimento de três simulações, sendo (i) uma com os ventiladores de impulso activos mas sem fonte de calor (I118), (ii) outra com uma fonte de calor posicionada em $(x;y;z) = (42,0;0,00;0,00)$, com os ventiladores de impulso inactivos mas com exaustão imposta na fronteira de jusante com um caudal de 313715 m³/h (igual ao arrastado pelos ventiladores de impulso, quando em funcionamento), ao qual corresponde a velocidade média de 0,50518 m/s (I116)¹, e (iii) outra com essa fonte de calor e com os ventiladores de impulso activos (I107). Nas figuras 1 e 2 são apresentados exemplos dos campos de temperatura e de velocidade. O gráfico com os perfis de velocidade longitudinal u para $(y,z) = (0,33;2,30)$ é apresentado na figura 3.

Da análise das simulações verifica-se o seguinte:

- Na simulação I116 verifica-se que a imposição de uma velocidade média varrendo o domínio de cálculo tem capacidade para reduzir a possibilidade de ocorrência de escoamento do jacto de tecto, originado pela pluma térmica, para montante. Mesmo assim verifica-se a existência de velocidade negativa (o sentido positivo

¹ Neste caso foi necessário impor uma condição de plano de simetria em ambas as fronteiras laterais, de forma a assegurar que o caudal exaurido na fronteira de jusante varre todo o domínio de cálculo.

corresponde ao sentido do escoamento forçado) junto da fronteira de montante, o que significa que mesmo o grande caudal imposto não é suficiente para confinar o escoamento do fumo.

- Na simulação I107 verifica-se que com o mesmo caudal de exaustão da simulação I116, mas escoado devido à acção de ventiladores de impulso, ocorre efectivamente uma limitação ao escoamento do fumo para montante. Evidencia-se na figura 3 que para uma abcissa $x < 10$ m a velocidade longitudinal para a simulação I107 é similar à obtida na simulação I118. Conclui-se que, neste caso, para montante da abcissa $x = 10$ m não ocorre influência da fonte de calor.
- Na simulação I107 verifica-se que o jacto de tecto com origem na pluma térmica tem a capacidade de atravessar transversalmente três jactos (neste caso) de ventiladores de impulso.

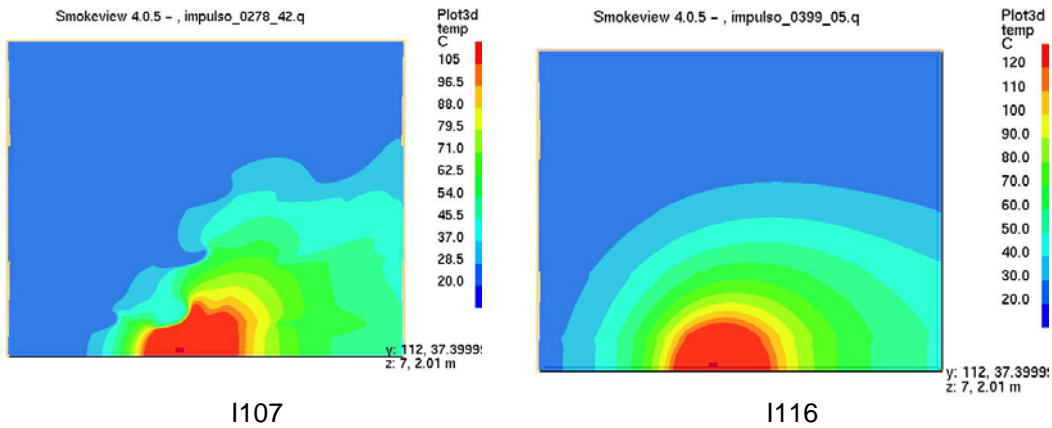


Fig. 1. Comparação dos campos de temperatura das simulações I107 e I116 (plano horizontal à cota $z = 2,01$ m).

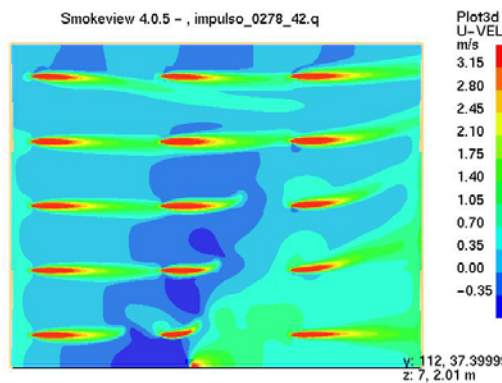


Fig. 2. Campo da componente da velocidade segundo x resultante da simulação I107 (plano horizontal à cota $z = 2,01$ m).

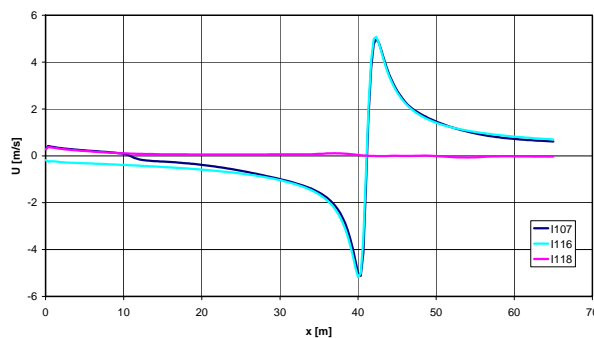


Fig. 3. Comparação das simulações I107, I116 e I118. Perfil de velocidade longitudinal u para $(y,z) = (0,33;2,30)$.

Na figura 4 compara-se a velocidade radial, obtida na simulação I98 (correspondente apenas à existência de um jacto de tecto com origem numa pluma térmica e sem influência de ventiladores de impulso), com a componente

v^2 da velocidade na simulação I107, à cota de 2,3 m. Neste último caso foram desenhados em gráfico os valores dessa componente para $x = 41$ m, $x = 42$ m, $x = 43$ m, $x = 44$ m, $x = 51$ m, $x = 61$ m, $x = 71$ m e $x = 81$ m.

Verifica-se que o escoamento radial da simulação I98 tem uma aproximação razoável aos valores máximos da componente v na situação de accionamento da ventilação de impulso. Note-se que, devido ao arrastamento promovido pelos ventiladores de impulso, a posição para a qual se atinge o valor máximo da componente v (para uma mesma distância à fonte de calor) está cada vez mais deslocada para jusante. Evidencia-se que na proximidade da fonte a componente v da velocidade na simulação I107 é mal aproximada pela velocidade radial, da simulação I98. Todavia, para um maior afastamento da fonte (que constitui a zona de maior interesse prático) a aproximação é melhor.

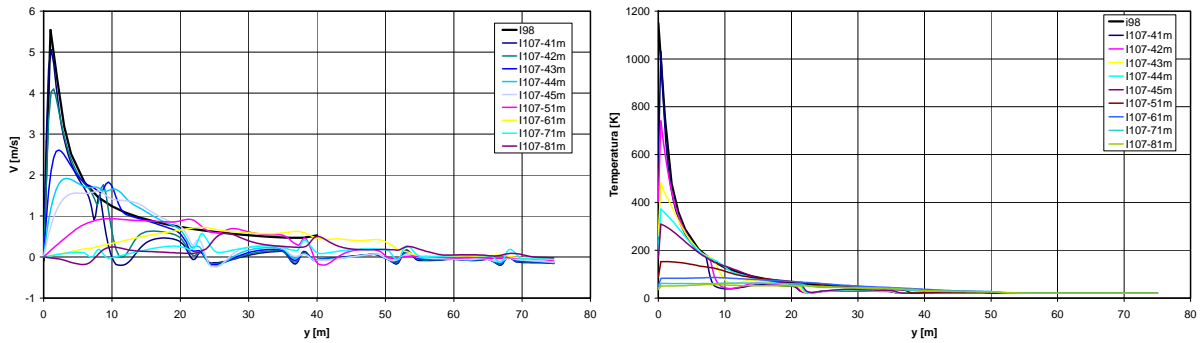


Fig.4. Comparação das velocidades transversais e da temperatura nas simulações I98 e I107 à cota de 2,30 m.

Este efeito também é nítido no caso da temperatura (figura 4), verificando-se que as previsões de temperatura radial para o caso da simulação I98 se ajustam bem aos máximos das temperaturas transversais resultantes da simulação I107, embora estando estes desfasados no espaço. Evidencia-se assim que a modelação do jacto de tecto proveniente da pluma térmica pode ser usado como base para a modelação deste escoamento. Verifica-se ainda que a aplicação da ventilação de impulso conduz a uma deslocação por arrastamento dos picos de temperatura e, sobretudo, de velocidade.

A aplicação do modelo simplificado [8] (11) que permite determinar a velocidade máxima do jacto de tecto ao longo de um corredor (U_d), tomando como referência as temperaturas da simulação I107 (e arbitrando uma espessura da camada de fumo de 0,5 m) permite obter valores de velocidade próximos dos obtidos na simulação I107 (figura 5).

$$U_d = C_{vent} \sqrt{g e \frac{T_{cj} - T_{\infty}}{T_{\infty}}} \quad (11)$$

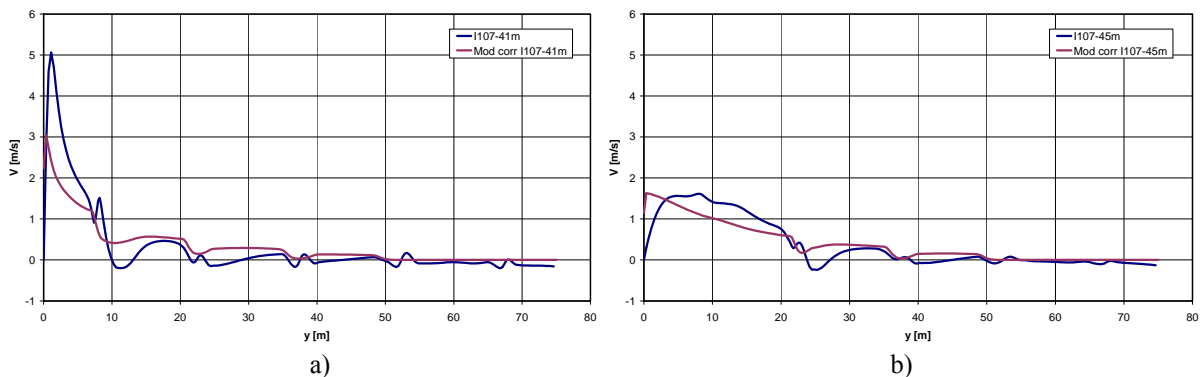


Fig. 5. Comparação da velocidade transversal à cota de 2,30 m na simulação I107 com a previsão da velocidade com base no modelo de corredor para $x = 41$ m (a) e $x = 45$ m (b).

² Componente transversal ao eixo dos jactos dos ventiladores de impulso.

Evidencia-se assim que o campo de velocidade, nas zonas mais afastadas da fonte de calor, está fortemente dependente do campo de temperatura e não tanto da quantidade de movimento da pluma, como acontece na proximidade da fonte de calor. Neste sentido, o fenómeno de arrastamento do fluido, que condiciona a distribuição da temperatura, é relevante para o estabelecimento do campo de velocidade que determina o escoamento do fumo. Este aspecto evidencia a relevância da consideração da redução da temperatura do escoamento indirectamente assumida através do parâmetro de diluição D .

5 Comparação da modelação numérica com a aplicação do modelo analítico

Dado que continua a existir estratificação do escoamento, mantendo-se uma camada de fumo com temperatura mais elevada na parte superior do espaço, o modelo analítico simplificado aplica-se a uma cota considerada representativa, neste caso à cota $z = 2,01$ m. Para esse efeito apresenta-se, na figura 6, uma representação vectorial do campo de velocidade nesse plano com as respectivas linhas de corrente. Note-se que existem linhas de corrente que terminam a meio do domínio de cálculo uma vez que prosseguiriam noutros planos.

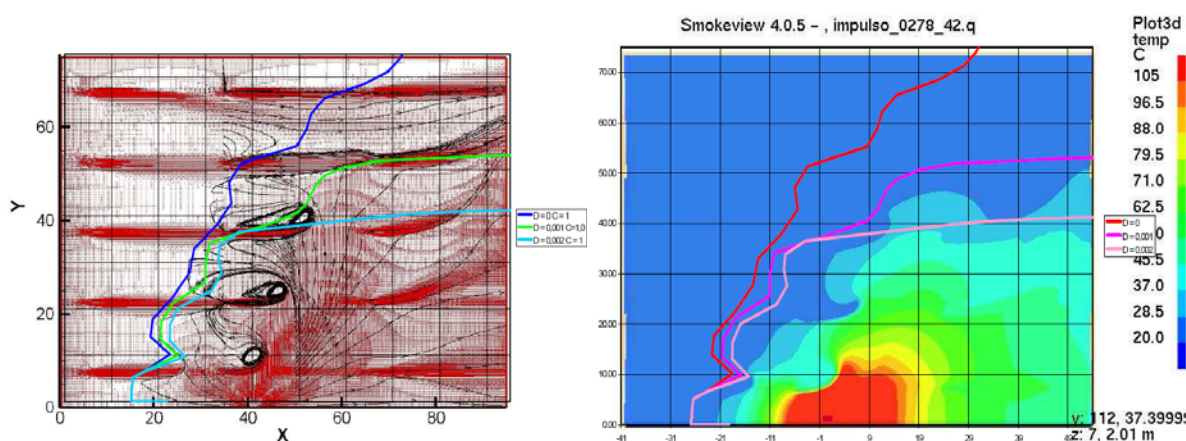


Fig. 6. Campo de velocidade e de temperatura da simulação I107 à cota $z = 2,01$ m e representação das linhas de corrente do modelo simplificado.

Na figura 6 estão também representadas três linhas de corrente extremas geradas com base no campo de velocidade estabelecido a partir do modelo analítico simplificado. Considera-se que estas linhas de corrente representam uma situação extrema, dado que a origem considerada corresponde a um ponto sobre o plano de simetria imediatamente a montante da fonte de calor; assim, verifica-se que esta linha de corrente segue para o lado esquerdo da figura, devido à acção do jacto de tecto com origem na pluma térmica, e apresenta diversas indentações devido à acção dos ventiladores de impulso (claramente representados na figura pela maior dimensão dos vectores de velocidade). Essas linhas de corrente representam aplicações do modelo analítico simplificado com diversos parâmetros de diluição (num caso não se considera a existência de diluição e nos outros esse parâmetro toma os valores de 0,001 e de 0,002). Na mesma figura estão também representadas essas linhas de corrente sobrepostas ao campo de temperatura, à mesma cota, para essa simulação CFD.

Verifica-se pela análise dessas figuras o seguinte:

- O padrão do escoamento é adequadamente aproximado considerando a composição dos escoamentos de jacto de tecto com origem na pluma e o dos ventiladores de impulso.
- É necessário considerar atenuação do jacto de tecto com origem na pluma através da sua diluição devido ao escoamento turbulento gerado pelos ventiladores de impulso.
- O ajustamento do parâmetro “diluição” só poderá ser feito através de um estudo experimental e analítico mais aprofundado; todavia, a consideração do valor 0,001 parece permitir uma aproximação conservativa das linhas de corrente resultantes da simulação, em especial permite uma boa aproximação do limite lateral do escoamento do fumo.
- As linhas de corrente evidenciam a existência de zonas de recirculação entre ventiladores que, obviamente, este modelo analítico simplificado não pode prever.
- A adequação do modelo analítico simplificado evidencia que a previsão da extensão máxima do retorno do fumo pode ser obtida pela composição adequada dos dois escoamentos na zona mais desfavorável, que é a zona a montante da fonte de calor (para a qual não é importante o parâmetro “diluição”).

- Dado que o incêndio pode ocorrer em qualquer lugar de estacionamento, o limite da zona potencialmente enfumada é definido pelo ponto de anulação de velocidade (da composição dos dois escoamentos) entre ventiladores.
- A estimativa da limitação lateral do fumo é importante para cumprir a exigência de limite de área enfumada.
- Nestes resultados evidencia-se a importância:
 - da existência de várias linhas de ventiladores (no presente caso duas) a montante da fonte de calor e
 - da existência de um campo de velocidade (tendencialmente uniforme) antes do desenvolvimento do jacto dos ventiladores correspondente ao caudal arrastado pelos ventiladores de impulso, parecendo ser adequado concluir-se que, se houver restrições na exaustão, esse caudal será menor, reduzindo-se também a velocidade desse escoamento geral e, em consequência, permitindo-se o incremento da extensão da zona enfumada para montante.
- Deste exemplo fica claro que a importância da aplicação dos ventiladores de impulso surge no arrastamento de grandes caudais, permitindo reduzir a extensão longitudinal da zona enfumada, e na diluição do fumo, o que permite reduzir a extensão lateral da zona enfumada.

A análise precedente (ver também [7]) evidencia que existem dois efeitos que tendem a restringir o escoamento do fumo originado num incêndio num parque de estacionamento coberto: o escoamento longitudinal lento imposto pelos ventiladores de exaustão (auxiliados pelos de insuflação, quando relevante) e os escoamentos de maior velocidade local gerados pelos ventiladores de impulso. O escoamento geral de baixa velocidade imposto pelos ventiladores de exaustão pode ser, de forma muito simplificada, considerado como um escoamento de velocidade uniforme. Verifica-se que o jacto de tecto com origem na pluma térmica é retido quando a sua velocidade é igual ou inferior à velocidade média, em sentido contrário, desse escoamento. Os ventiladores de impulso geram localmente escoamentos muito rápidos, que podem ter velocidades significativamente superiores à do jacto de tecto com origem na pluma térmica, interrompendo-o ou opondo-se directamente a ele, e que diluem também a camada quente, reduzindo a capacidade de movimento desta.

Verifica-se, contudo, que a acção dos ventiladores de impulso é forte numa zona de proximidade relativamente restrita; fora dessa zona, o campo de velocidade pode ter valores da mesma ordem de grandeza ou mesmo menores que os do jacto de tecto originado pela pluma térmica. Por vezes, quando o arrastamento gerado pelos ventiladores de impulso é superior ao caudal de exaustão, estes geram zonas de recirculação entre a saída e a aspiração que escoam o fumo localmente no sentido contrário ao pretendido. Para além disso, para se garantir a segurança de uma instalação de um sistema de controlo de fumo é necessário considerar que o incêndio pode ocorrer no local onde as suas consequências sejam mais desfavoráveis e verificar que, ainda assim, o seu desempenho é satisfatório. Nestas condições, deve considerar-se que o incêndio pode ocorrer a igual distância transversal de dois ventiladores de impulso, onde o seu efeito local é menos vantajoso. Admitindo-se que são adoptadas medidas para que as recirculações locais não afectem excessivamente o escoamento do fumo, então para efeito da estimativa da restrição longitudinal do fumo para montante da fonte de calor, deve considerar-se o valor da velocidade média do escoamento de exaustão e compará-lo com a velocidade do jacto de tecto com origem na pluma térmica. Assim, deve ser cumprido o seguinte critério:

- *Considera-se como ponto de restrição do escoamento aquele para o qual se anula a soma vectorial das velocidades do jacto de tecto com origem na pluma térmica e a velocidade média do escoamento de exaustão ou a velocidade mínima do campo de velocidade local, considerando o funcionamento dos ventiladores de impulso, se esta for superior.*

O critério formulado é conservativo pois não considera a possibilidade de haver redução da velocidade do jacto de tecto com origem na pluma térmica devido à sua diluição, por acção do escoamento de exaustão, e consequente redução da temperatura.

Note-se que o campo de velocidade deve ser mantido apenas na zona enfumada, fora dessa zona nada obriga a que esse campo de velocidade seja mantido. Esta observação abre a possibilidade de serem utilizados meios para, no sentido de reduzir o caudal de exaustão total do parque, concentrar o escoamento desse caudal na zona enfumada e sua envolvente próxima. Os ventiladores de impulso podem constituir o meio que permite concentrar numa zona mais limitada o escoamento do caudal de exaustão.

Os ventiladores de impulso podem também ter uma acção muito vantajosa se o respectivo jacto estiver próximo do incêndio, uma vez que promove a sua diluição e tende a destruir a estrutura do jacto de tecto com origem na pluma térmica, reduzindo a sua capacidade de escoamento para montante. Assim, esta situação é mais vantajosa do que a decorrente dos meios clássicos de controlo de fumo, desde que a disposição dos restantes ventiladores permita ainda manter a restrição lateral do escoamento do fumo.

Os ventiladores de impulso têm importância na restrição lateral do escoamento do fumo. Os resultados obtidos até ao momento parecem indicar que as expressões (4) a (8) e (10) permitem descrever aproximadamente a linha de corrente que limita a zona enfumada, quando se considera um parâmetro de diluição $D = 0,001$. Assim, enuncia-se o seguinte procedimento:

- *Na ausência de outros métodos mais precisos, pode considerar-se que o escoamento transversal do fumo é limitado pela linha de corrente extrema que se obtém pela aplicação das expressões (4) a (8) e (10), quando se considera um parâmetro de diluição $D = 0,001$, tendo em conta todas as fontes de impulso:*

A aplicação deste procedimento a uma malha de ventiladores de 50 N de impulso nominal, com um passo transversal de 15 m e um passo longitudinal de 30 m, mostra que, até distâncias de cerca de 55 m para jusante da fonte de calor de potência convectiva de 4 MW bastam 4 linhas de ventiladores de cada lado da fonte para assegurar a restrição lateral ao escoamento.

Note-se que para a estimativa da linha de corrente extrema é importante o conhecimento das características do jacto do ventilador de impulso, através das constantes k_{0i} e k_i , pelo que podem ocorrer diferenças de desempenho significativas de ventilador para ventilador.

Para que o confinamento já exista na zona da fonte de calor é necessária a existência de pelo menos uma linha de ventiladores de impulso suficientemente afastada a montante dessa fonte. Assim estabelece-se a seguinte exigência:

- *Devem existir duas linhas, de desenvolvimento transversal, de ventiladores de impulso antes da fonte de calor, quando esta se encontra suficientemente afastada da parede de montante.*

A exigência da existência de ventiladores de impulso a montante da fonte tem também em conta a possibilidade de ocorrerem recirculações locais entre a saída e a admissão dos ventiladores de impulso. Assim, embora localmente o escoamento do fumo possa ocorrer no sentido contrário ao do escoamento geral, existirá sempre uma linha de ventiladores a montante que impedirá que esse escoamento para montante seja extenso.

Dado que o modelo analítico simplificado utilizado para a determinação da linha de corrente extrema não tem possibilidade de simular essas recirculações, a sua existência deve ser tida em consideração através do seguinte procedimento:

- *Deve considerar-se a possibilidade de ocorrência de recirculações locais entre a saída e a admissão dos ventiladores de impulso, para montante da linha de corrente extrema, admitindo que a sua extensão máxima pode corresponder à distância longitudinal entre ventiladores de impulso do mesmo tipo e a sua largura à distância transversal entre ventiladores de impulso do mesmo tipo.*

Desta forma, a fronteira da possível zona enfumada corresponderá sempre à linha de ventiladores a montante da linha de corrente extrema.

Chama-se a atenção para estas zonas de recirculação poderem ser muito extensas junto das fontes de impulso fortes, como por exemplo os ventiladores de insuflação, devido ao arrastamento do ar ambiente no jacto. A estimativa da dimensão de tais zonas de recirculação não pode ser feita através do procedimento acima.

6 Conclusões

A concepção do sistema de ventilação de impulso, quando aplicado para o controlo de fumo, deve obedecer aos seguintes princípios gerais:

- *Os ventiladores de impulso devem ser orientados de forma a assegurar o varrimento de todo o espaço do piso do parque de estacionamento, existindo admissões de ar a montante e exaustões do fumo a jusante.*
- *Os ventiladores de impulso devem ser dispostos numa malha que restrinja o escoamento do fumo.*
- *Os ventiladores de impulso devem ser dispostos de forma a que o seu desempenho não seja significativamente afectado pelas paredes e pelas obstruções internas.*
- *O caudal exaurido deve ser compatível com o funcionamento dos ventiladores de impulso e com o cenário de incêndio previsível, assegurando a exaustão do fumo gerado no interior do piso do parque de estacionamento coberto.*

Verifica-se que o modelo analítico simplificado cuja formulação e aplicação foram apresentadas nesta comunicação tem condições para permitir prever de uma forma conservativa o limite do escoamento de fumo numa situação de incêndio num parque de estacionamento coberto com ventilação de impulso. A sua utilização permitirá confirmar o cumprimento dos princípios de concepção geral da ventilação de impulso, quando usada no controlo de fumo, referidos

Agradecimentos

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

Referências

1. CEN/TR 12101-5. 2005, *Smoke and heat control systems - Part 5: Guidelines on functional recommendations and calculation methods for smoke and heat exhaust ventilation systems*, Comité Européen de Normalisation, Brussels.
2. R. L. Alpert, *Fire Technology*, 8 (181), 1972.
3. D. Xavier Viegas, *Uma técnica de erosão aplicada ao estudo da interacção de jactos turbulentos com uma superfície plana*. Coimbra, 1981. Dissertação para Doutoramento em Ciências de Engenharia (Aerodinâmica).
4. K. McGrattan e G. Forney, *Fire Dynamics Simulator (Version 4). User's Guide*. Washington, National Institute of Standards and Technology (2005). NIST Special Publication 1019.
5. K. McGrattan, *Fire Dynamics Simulator (Version 4). Technical Reference Guide*. NIST, NISTSP 1018 (2005).
6. J. C. Viegas, *The use of impulse ventilation to control pollution in underground car parks*. The International Journal of Ventilation. Artigo aceite para publicação.
7. J. C. Viegas, *Utilização de ventiladores de impulso em parques de estacionamento cobertos*. Congreso de Métodos Numéricos en Ingeniería 2009, Barcelona, Julho de 2009.
8. J. L. Bailey, G. P. Forney, P. A. Tatem, W. W. Jones, *Development and validation of corridor flow submodel for CFAST*. Journal of Fire Protection Engineering. Society of Fire Protection Engineers. Vol. 12 (2002).