

Caracterização de jatos isotérmicos gerados por 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@lnec.pt <http://www.lnec.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 ventilação e 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 de ar poluído ou de fumo proveniente de um incêndio. O seu princípio de utilização consiste na transmissão de quantidade de movimento ao fluido gerando o escoamento em direção à exaustão que varre a zona afetada do parque de estacionamento coberto. No sentido de caracterizar o escoamento em regime isotérmico gerado por estes ventiladores, foram ajustadas ao campo de velocidade expressões analíticas que o descrevem. Nesta comunicação apresentam-se os resultados desse estudo.

Palavras-chave: Ventilação de impulso; parques de estacionamento; varrimento.

1 INTRODUÇÃO

Em Portugal, a ventilação de parques de estacionamento cobertos é regulamentada através do Regulamento Técnico de Segurança contra Incêndio em Edifícios [1]. 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 [2] 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 devido à adoção de um sistema de ventilação mais eficaz que o prescrito regulamentarmente.

Para esse efeito são utilizados ventiladores de impulso, frequentemente associados a ventiladores axiais de grandes dimensões que realizam a insuflação de ar novo e a exaustão do ar poluído. Para a conceção e dimensionamento preliminar deste tipo de sistemas de ventilação é necessário conhecer as características do jato desenvolvido por estes ventiladores, bem como a forma como este é alterado na presença de superfícies. Neste estudo foram ensaiados ventiladores deste tipo em situação de jacto livre e em situação de jacto confinado pela proximidade de superfícies, como ocorre em parques de estacionamento cobertos.

O escoamento gerado pelos ventiladores de impulso constitui um jato, com características particulares em função da sua localização, interação com o espaço e também pelo facto de os ventiladores de impulso induzirem um movimento de rotação ao fluido (“swirl”). Um jato corresponde a uma fonte de quantidade de movimento num meio constituído por um fluido mas, na análise destes, podem ser efetuadas as simplificações sugeridas por [3] e seguidamente apresentadas.

- O fluido é homogéneo e Newtoniano, podendo transportar calor ou substâncias químicas;
- Assume-se que o escoamento é incompressível uma vez que o número de Mach do escoamento é muito inferior a 1;
- As variações da pressão estática são pequenas, assumindo-se que são uniformes.

A natureza destes jatos [4] corresponde a um escoamento completamente turbulento, sendo o Número de Reynolds no presente caso $Re = 7,1 \times 10^5$. As formulações analíticas para o escoamento de um jacto turbulento submerso podem ser obtidas através da teoria indutiva da turbulência [4 a 6]. O desempenho deste tipo de aplicação do sistema de ventilação baseada em ventiladores de impulso tem sido caracterizado em diversos estudos [7 a 9]. Para que tais sistemas possam ter uma aplicação adequada é necessário 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 foi objeto de alguns trabalhos precedentes [10 a 13]; todavia, não existem resultados experimentais realizados de forma metódica que venham a sistematizar este assunto. A análise das características de jatos tem sido desenvolvida em larga medida no domínio da climatização [14 a 17].

2 METODOLOGIA

Tendo em conta que os ventiladores de impulso são produzidos e fornecidos por diferentes entidades e têm, com frequência, características marcadamente diferentes, torna-se necessário ter a capacidade de caracterizar o seu jato de forma relativamente simples e de ter meios para prever a forma como este é alterado em presença das superfícies paralelas ao eixo do jato. Nesse sentido, foram realizados ensaios de caracterização dos campos de velocidade e de intensidade da turbulência do jato no interior de um pavilhão suficientemente grande para reduzir a influência dos seus limites (paredes, piso e teto) no desenvolvimento do jacto. Foram realizados ensaios nas seguintes condições:

- (i) Jato livre (o ventilador foi colocado a cerca de 2,5 m do pavimento, existindo apenas interferência com o piso suficientemente longe da origem);
- (ii) Jato confinado por uma superfície longitudinal paralela ao seu eixo (representa um ventilador de impulso suspenso junto ao teto, como ocorre no seu modo de aplicação corrente; o ventilador foi pousado sobre o piso);
- (iii) Jato confinado por duas superfícies longitudinais paralelas ao seu eixo e perpendiculares entre si (representa um ventilador de impulso suspenso junto ao teto e, simultaneamente, encostado a uma parede longitudinal; o ventilador foi pousado no piso e encostado a uma parede).

O ventilador tem o impulso nominal de 50 N e a medição do campo de velocidade foi efetuada com recurso a anemómetros de turbina e de fio-quente, colocados numa coluna à cota de: 0,10 m, 0,25 m, 0,50 m, 0,75 m, 1,00 m, 1,25 m, 1,50 m, 2,00 m, 2,50 m e 3,00 m. Dado que as medições foram realizadas em regime estacionário, a coluna com os anemómetros foi posicionada 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, pela coluna de anemómetros nos ensaios nas condições 1 e 2 está representada na Fig. 1. No referencial ortonormado de medição, x é paralelo ao eixo do jato na origem, y é transversal ao eixo do jato e paralelo ao piso e z é normal ao piso. 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. Dado que se verificou que, devido à interação do jato com o pavilhão havia variações periódicas da velocidade, os tempos de aquisição de dados em cada posição foram ajustados de forma a coincidirem com um período de 6 minutos. Os anemómetros encontram-se ligados a um sistema de aquisição de dados, do tipo DataTaker DT800, que efetua o registo das velocidades em tensão (mV) para cada um dos anemómetros. O valor final resulta da média temporal desse conjunto de medições instantâneas e posterior conversão do valor de tensão para velocidade [m/s]. Numa fase inicial foi efetuada, para o jato parietal e com a instrumentação utilizada em todos os ensaios, uma análise espectral aos registos de velocidade obtidos com elevada frequência da aquisição de dados. Verificou-se que as frequências mais relevantes se situavam abaixo de 1 Hz. Assim, para os ensaios foi utilizada uma frequência de 2 Hz na aquisição de dados.

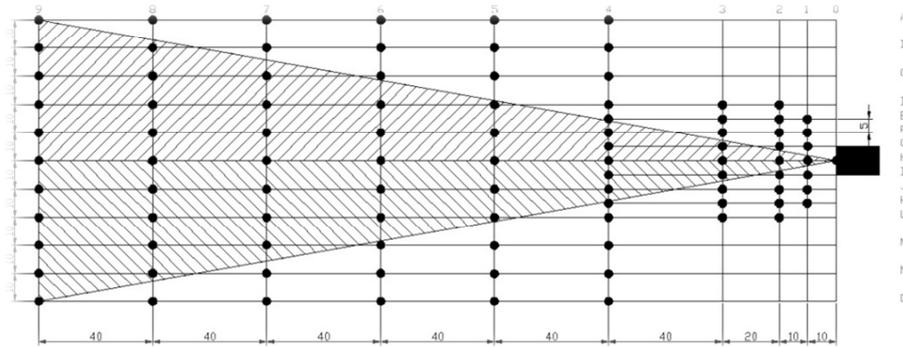


Fig. 1. Malha implementada nos ensaios dos ventiladores (dimensões em dm)

3 JATO LIVRE

A estimativa das curvas características de cada tipo de jato foi realizada em duas fases, numa primeira procedeu-se ao ajustamento de uma expressão para o decaimento da velocidade máxima do jato (no eixo do jato) com a distância à sua origem e numa segunda fase procedeu-se ao ajustamento de uma função para exprimir a variação da velocidade com a distância ao eixo do jato num plano normal a este. Verificou-se que o decaimento da velocidade u_c no eixo do jato livre com a distância à origem x pode ser expresso de acordo com a expressão (1), mostrando-se na Fig. 2 o ajustamento dos resultados experimentais ao logaritmo desta expressão pelo método dos mínimos quadrados (apresentando-se também a expressão da reta e o respetivo coeficiente de correlação) e o seu resultado num gráfico não logarítmico. A velocidade u_0 representa a velocidade na origem (para este ventilador de impulso é de $u_0 = 22,5 \text{ m s}^{-1}$) e r_0 é o raio do ventilador que, no presente caso, tem o valor de 0,19 m.

$$\frac{u_c}{u_0} = 2 * 1,76 \left(\frac{r_0}{x} \right)^{0,82} \quad (1)$$

Note-se que expressões da forma $u_c/u_0 \propto 1/x^n$, com n compreendido entre 0,33 e 1,0, são características do decaimento da velocidade do jato na região situada entre o cone potencial e a região de jato completamente desenvolvido [18]. A extensão desta região, designada por “região de decaimento característico”, e o valor do expoente n dependem da forma do bucal e normalmente só tem relevância para relações entre o comprimento e a altura do bucal elevadas (como ocorre correntemente em ventilação/climatização); em geral a sua extensão é negligenciável para bucais circulares ou quadrados. É relevante concluir-se que, de acordo com estes resultados experimentais a rotação do jato (“swirl”) altera a lei de decaimento da velocidade com a distância à origem.

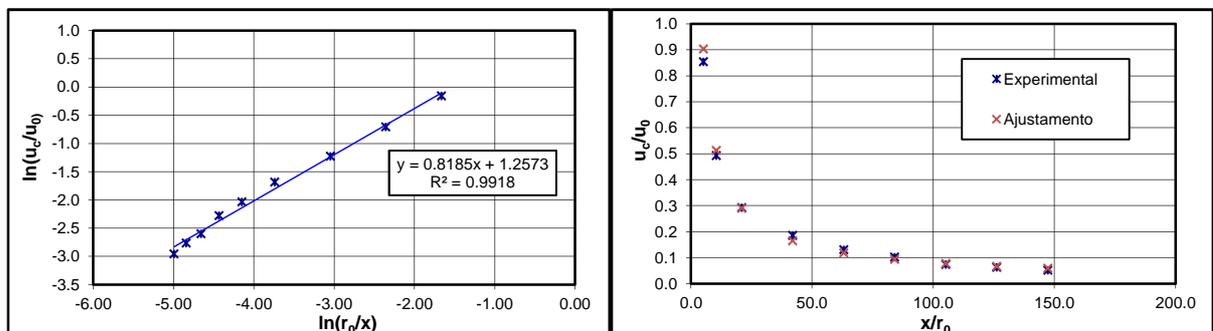


Fig. 2. Ajustamento de uma função ao decaimento da velocidade máxima do jato livre

O campo de velocidade u no jato axi-simétrico turbulento pode ser expresso por uma expressão da forma (2), em que $\alpha = 1$:

$$\frac{u}{u_0} = u_c e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{r}{kx}\right)^2} = 2k_0 \left(\frac{r_0}{x}\right)^\alpha e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{r}{kx}\right)^2} \quad (2)$$

sendo k_0 , α e k constantes do jato e r a distância do ponto considerado ao eixo do jato. Neste caso, uma vez que $\alpha \neq 1$, é conveniente verificar qual a condição a que k deve obedecer para que a quantidade de movimento ao longo do jacto seja conservada ou dissipada. Sendo J a quantidade de movimento do jato, J_0 essa grandeza na origem, $\bar{\rho}$ a massa volúmica média do fluido é possível obter o seguinte resultado:

$$J_0 = \pi \bar{\rho} r_0^2 \bar{u}_0^2 \quad (3)$$

$$J = 2\pi \bar{\rho} \int_0^\infty u^2 r dr \Leftrightarrow J = J_0 [2k_0 k r_0^{(\alpha-1)} x^{(1-\alpha)}]^2 \quad (4)$$

Dado que em escoamentos reais

$$J < J_0 \Rightarrow 2k_0 k r_0^{(\alpha-1)} x^{(1-\alpha)} < 1 \quad (5)$$

para que esta função não seja crescente com a distância à origem x é necessário ser verificada a condição $1 - \alpha \leq 0$. Uma vez que se verificou experimentalmente que $\alpha < 1$, então é de esperar que k seja uma função de x da seguinte forma: $k(x) = k'x^{(\beta-1)}$. Nestas condições, a equação do jato passa a ser:

$$\frac{u}{u_0} = 2k_0 \left(\frac{r_0}{x}\right)^\alpha e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{r}{k'x^\beta}\right)^2} \quad (6)$$

É possível então deduzir a condição para a qual o impulso é conservado ao longo do jato ou quando é decrescente com o incremento da distância à origem. Essa condição é dada pela inequação:

$$\frac{\partial J}{\partial x} = J_0 [2k_0 k r_0^{(\alpha-1)}]^2 2(\beta - \alpha) x^{[2(\beta-\alpha)-1]} \leq 0 \quad (7)$$

Dado que todos os fatores são intrinsecamente positivos exceto $(\beta - \alpha)$, para que essa inequação seja satisfeita tem de se verificar a condição $\beta \leq \alpha$. Para ajustar uma expressão do tipo da (6) foram consideradas as velocidades medidas nos planos horizontal e vertical que passam pelo eixo do jato. Foi usada uma regressão não-linear multivariável ajustada pelo método dos mínimos quadrados, tendo sido obtida a seguinte expressão, que satisfaz a condição $\beta \leq \alpha$:

$$\frac{u}{u_c} = e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{r}{0.18x^{0.78}}\right)^2} \quad (8)$$

A curva ajustada (linha a cheio) e os resultados experimentais são apresentados na Fig. 3 (nessa figura apresentam-se também os resultados da intensidade da turbulência para o plano $x = 16$ m). Obtém-se assim a expressão do campo de velocidade do jato (9), sendo também possível deduzir expressões para a quantidade de movimento (10 e 11) e para o caudal volúmico (12 e 13). Na Fig. 4 apresentam-se as variações da quantidade de movimento e do caudal volúmico com a distância à origem.

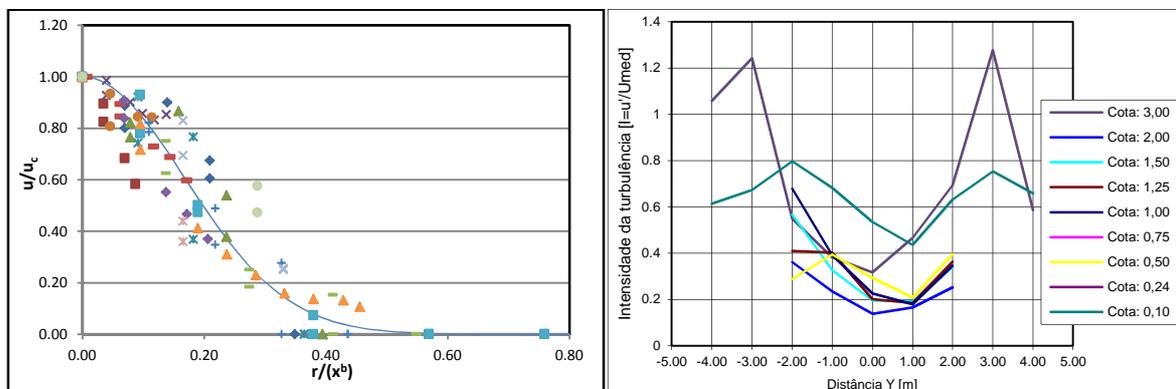


Fig. 3. Ajustamento de uma função ao decaimento da velocidade do jato livre com a distância ao eixo (à esquerda) e intensidade da turbulência no plano $x = 16$ m (à direita)

$$\frac{u}{u_0} = 2 * 1,76 \left(\frac{r_0}{x}\right)^{0,82} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{r}{0,18x^{0,78}}\right)^2} \quad (9)$$

$$J = \pi \bar{\rho} r_0^2 \bar{u}_0^2 [2k_0 k' r_0^{(\alpha-1)} x^{(\beta-\alpha)}]^2 \quad (10)$$

$$J = 1,2\pi * 0,19^2 * 22,49^2 * [21,76 * 0,18 * 0,19^{(0,82-1)} x^{(0,78-0,82)}]^2 \quad (11)$$

$$\dot{V} = 4\pi k_0 k'^2 \bar{u}_0 r_0^\alpha x^{(2\beta-\alpha)} \quad (12)$$

$$\dot{V} = 4\pi * 1,76 * 0,18^2 * 22,49 * 0,19^{0,82} * x^{(2*0,78-0,82)} \quad (13)$$

Observa-se uma dispersão significativa dos valores da velocidade adimensionalizada pela velocidade máxima na secção do jato (Fig. 3) em torno da curva que corresponde ao melhor ajustamento. Esta dispersão é devida às difíceis condições de ensaio, que impuseram a utilização de instrumentação de carácter industrial, e ao confinamento do jato no interior de um pavilhão que, embora sendo de grandes dimensões, gera oscilações aproximadamente periódicas no escoamento. Ainda assim, verifica-se que os resultados obtidos são coerentes entre si, correspondendo a uma formulação analítica do campo de velocidade do jato que é dissipativa em termos da quantidade de movimento, como seria de esperar.

Observa-se que a intensidade da turbulência, na secção para $x = 16 \text{ m}$, apresenta valores mais baixos na zona central do jato e cresce significativamente com a distância ao eixo do jato. Este comportamento é coerente com outros resultados conhecidos [14] e deve-se ao incremento das tensões de Reynolds na camada de corte na periferia do jato.

No que respeita à expressão obtida para a variação da quantidade de movimento com a distância à origem (10 e 11), verifica-se que a variação é mais intensa na região próxima do ventilador, onde as velocidades são mais elevadas (Fig. 4). A variação do caudal é coerente com este fenómeno, ocorrendo um arrastamento mais significativo (crescimento do caudal mais acentuado com a distância à origem) próximo da origem. Na Fig. 4 compara-se o caudal estimado com base nas expressões (12 e 13) com o caudal determinado teoricamente para um jato axi-simétrico conservativo (sem rotação – “swirl”), que tem a forma $\dot{V} = 0,16\dot{V}_0 x/r_0$, sendo \dot{V}_0 o caudal volumico na origem. Verifica-se que o caudal do jato experimental é maior na proximidade da origem, passando a ser menos importante do que o caudal teórico a partir aproximadamente de 10 m da origem, que corresponde aproximadamente a $50r_0$.

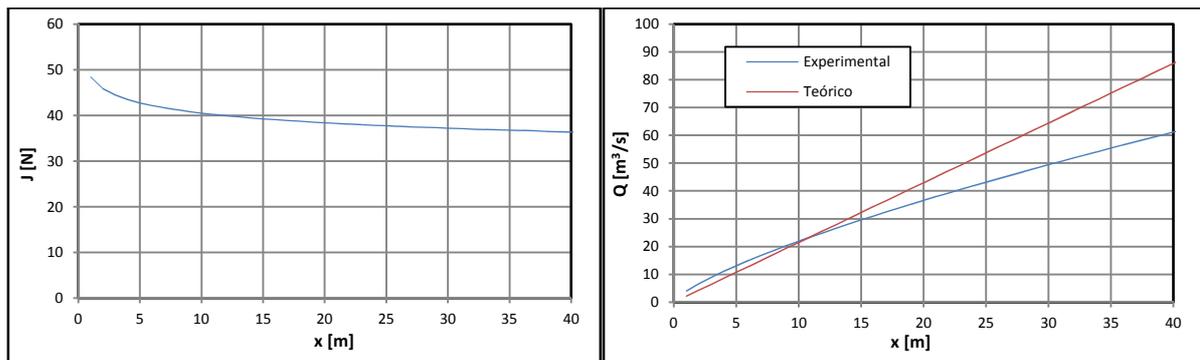


Fig. 4. Variação da quantidade de movimento e do caudal do jato livre com a distância à origem

4 JATO PARIETAL

Para a análise do jato parietal, o ventilador de impulso foi assente sobre o piso e foi medido o campo de velocidade que este gerou. A distância S do eixo do jato na origem à superfície é de 0,24 m. Verificou-se que $\ln(u_c/u_0)$ varia linearmente com $\ln(r_0/x)$ em dois troços com declives diferentes, sendo o limite $x/S = 33,3$ (ver Fig. 5). As expressões obtidas por regressão linear pelo método dos mínimos quadrados são:

$$\frac{u_c}{u_0} = 2 * 0,73 \left(\frac{r_0}{x}\right)^{0,46}, \text{ para } 0 < x/S < 33,3 \quad (14)$$

$$\frac{u_c}{u_0} = 2 * 3,97 \left(\frac{r_0}{x}\right)^{0,91}, \text{ para } 33,3 < x/S \quad (15)$$

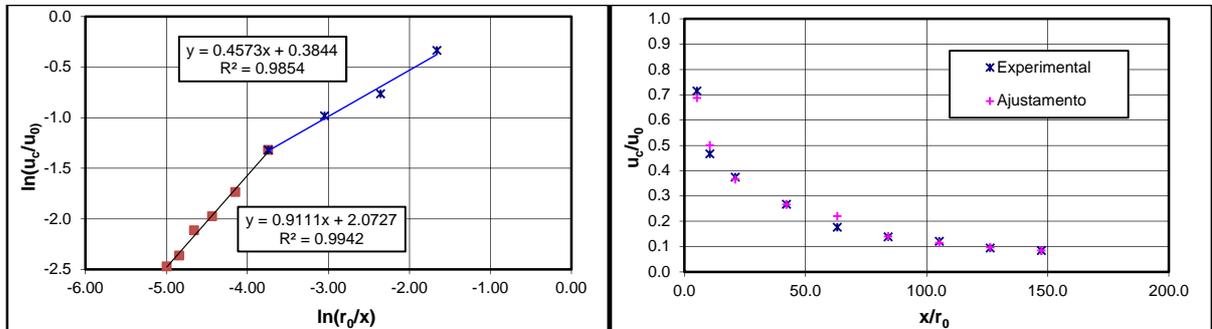


Fig. 5. Ajustamento de uma função ao decaimento da velocidade máxima do jato parietal

Dado que para a caracterização da ventilação de impulso interessa essencialmente o campo de velocidade mais afastado relativamente à origem, foram usados na análise subsequente apenas os valores de velocidade tais que $33,3 < x/S$. No que respeita à velocidade no plano longitudinal perpendicular ao piso, que contém a velocidade máxima, foi usada uma regressão não-linear multivariável ajustada pelo método dos mínimos quadrados tendo por base a expressão (16), em que z é a distância ao eixo do jato na normal ao piso e ε é um parâmetro característico do jato, tendo sido obtido o resultado apresentado na expressão (17). A expressão (18) representa um ajustamento similar para a velocidade no plano longitudinal paralelo ao piso que contém a velocidade máxima, sendo y a distância ao eixo do jato paralelamente ao piso. Os gráficos representativos desses ajustamentos (linha a cheio) estão apresentados na Fig. 6. No caso do plano paralelo ao piso diferencia-se o respetivo ajustamento aos resultados experimentais para os ramos positivo e negativo. Verifica-se que o ramo positivo é mais dispersivo do que o ramo negativo.

$$\frac{u}{u_c} = e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{z}{k'(x-\varepsilon S)^\beta} \right)^2} \quad (16)$$

$$\frac{u}{u_c} = e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{z}{0,45(x-6,80)^{0,20}} \right)^2} \quad (17)$$

$$\frac{u}{u_c} = e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{1,05(x-6,81)^{0,50}} \right)^2} \quad (18)$$

Uma forma particular da expressão (16), com $\beta = 1$, pode ser obtida a partir das expressões da linha de mistura obtidas por Xavier Viegas [6]. É interessante notar que, neste caso, o valor de $\varepsilon S \approx 6,8$ m para ambas as expressões (17 e 18). Fisicamente este valor corresponde a uma translação da origem para um ponto a jusante. No caso referido em [6] o valor ε toma o valor 34 para o plano paralelo à superfície e o valor 18,2 para o plano perpendicular. Neste caso $\varepsilon = 28$. Note-se como é próximo do valor para o qual ocorre a alteração de declive da variação de $\ln(u_c/u_0)$ com $\ln(r_0/x)$, representado na Fig. 5, que é de $x/S = 33,3$.

Verifica-se que o jato se desenvolve fortemente achatado ao longo da superfície do piso devido ao efeito de Coanda. É possível exprimir o campo de velocidade numa expressão aproximada (19) que combina os resultados precedentes (para $33,3 < x/S$). Note-se que continua a ser cumprida a condição $\beta \leq \alpha$, tal como para o jato livre.

$$\frac{u}{u_0} = 2 * 3,97 \left(\frac{r_0}{x}\right)^{0,91} e^{-\frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{y}{1,05(x-6,81)^{0,50}} \right)^2 + \left(\frac{z}{0,45(x-6,80)^{0,20}} \right)^2 \right\}} \quad (19)$$

Na Fig. 7 apresenta-se a estimativa da variação da quantidade de movimento e do caudal com a distância à origem x . Estas estimativas foram obtidas através de integração numérica com base na expressão (19). Nessa

figura estão também representadas (a traço interrompido) funções que foram ajustadas através de regressões não-lineares multivariáveis pelo método dos mínimos quadrados. As expressões obtidas são as seguintes:

$$J = 403,5x^{0,81} \quad (20)$$

$$\dot{V} = 34,7x^{0,25} - 38,1e^{0,014x} \quad (21)$$

É muito relevante comparar estas estimativas com as feitas para o jato livre (expressões 10 a 13) e com a Fig. 4. Constata-se, como seria de esperar, que a quantidade de movimento é mais dissipada no jato parietal, devido à presença da superfície com a qual este interfere. Por essa razão, enquanto o caudal do jato livre é crescente, o caudal do jato parietal está limitado (tendo neste caso um ponto máximo). Ainda assim, o ventilador de 50 N, de impulso nominal, tem a capacidade de gerar um escoamento de mais de $20 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Este aspeto é particularmente relevante para os problemas da ventilação e do controlo de fumo em parques de estacionamento cobertos, em que os caudais de exaustão (normalmente assegurada por ventiladores) devem corresponder aproximadamente aos caudais do escoamento gerado pelos vários ventiladores de impulso.

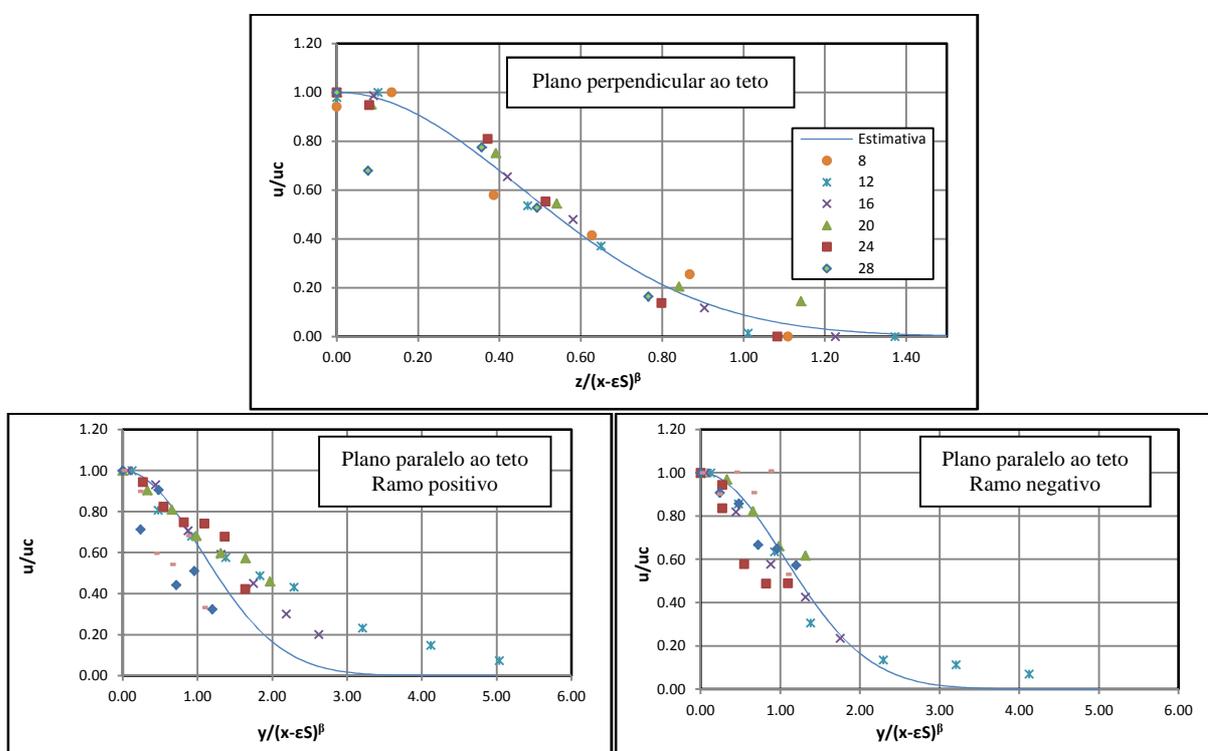


Fig. 6. Ajustamento de funções ao decaimento da velocidade do jato parietal com a distância ao eixo

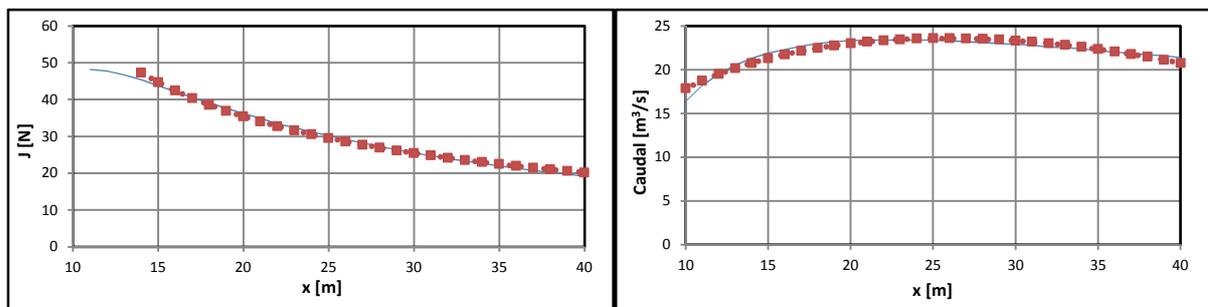


Fig. 7. Variação da quantidade de movimento e do caudal do jato parietal com a distância à origem

5 JATO DE TETO E DE PAREDE

Foi medido o campo de velocidade do jato confinado por duas superfícies longitudinais paralelas ao seu eixo e perpendiculares entre si (representa um ventilador de impulso suspenso junto ao teto – reproduzido nos ensaios pelo piso – e, simultaneamente, encostado a uma parede longitudinal). O eixo do jato, na origem, encontra-se a $Sz = 0,24\text{ m}$ do piso e a $Sy = 0,75\text{ m}$ da parede. Na Fig. 8 mostram-se gráficos tridimensionais representando o campo de velocidade adimensionalizado pela velocidade máxima para os planos normais ao eixo do jato em $x = 2\text{ m}$ e $x = 7\text{ m}$. Observa-se que o jato tem tendência a aderir à parede, por efeito de Coanda. Tal como para o jato parietal, verificou-se que $\ln(u_c/u_0)$ varia linearmente com $\ln(r_0/x)$ em dois troços com declives diferentes, sendo o limite $x/Sz = 29,2$ (Fig. 8). As expressões obtidas por regressão linear pelo método dos mínimos quadrados são:

$$\frac{u_c}{u_0} = 2 * 0,82 \left(\frac{r_0}{x}\right)^{0,39}, \text{ para } 0 < x/Sz < 29,2 \quad (22)$$

$$\frac{u_c}{u_0} = 2 * 3,64 \left(\frac{r_0}{x}\right)^{0,78}, \text{ para } 29,2 < x/Sz \quad (23)$$

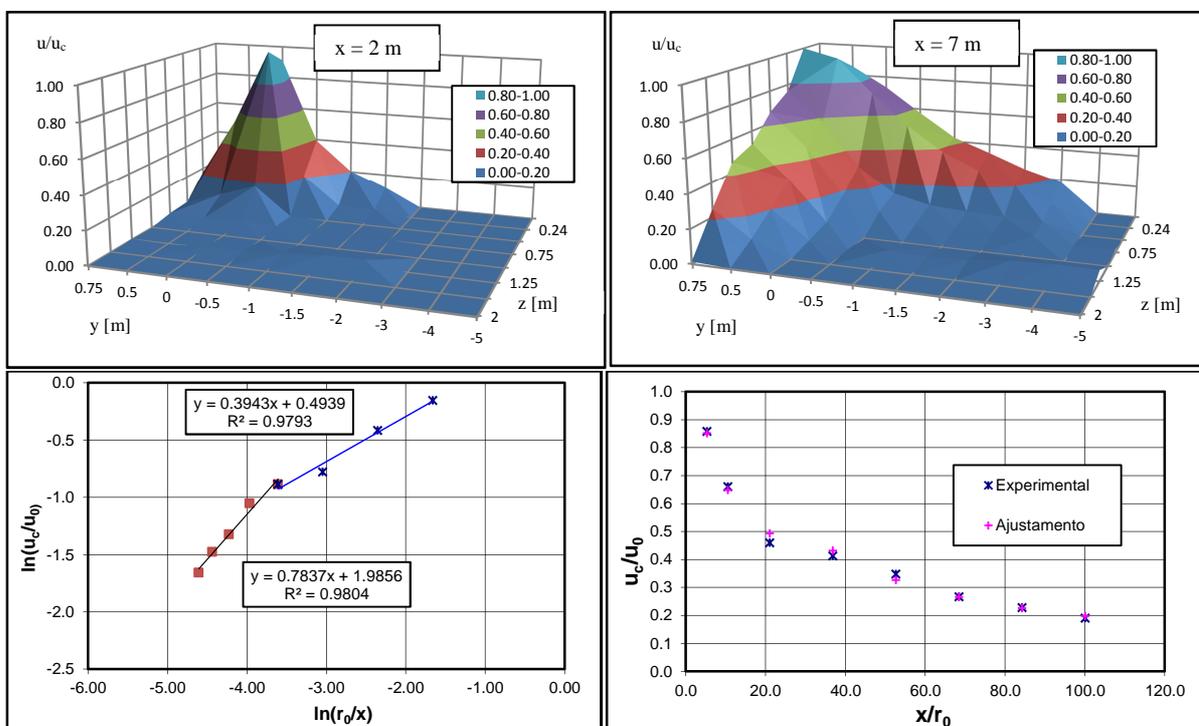


Fig. 8. Campo de velocidade adimensional (figuras superiores) e ajustamento de uma função ao decaimento da velocidade máxima do jato confinado por parede e teto (figuras inferiores)

É interessante notar que a coordenada para a qual ocorre a alteração de declive da variação de $\ln(u_c/u_0)$ com $\ln(r_0/x)$ é $x/Sz = 29,2$ é próxima da correspondente para o jato parietal estudado anteriormente $x/S = 33,3$. Note-se também alguma proximidade existente entre os valores de k_0 e de α para estes escoamentos, para o campo de velocidade mais afastado da origem. No caso do jato confinado por parede e teto os valores de k_0 e de α correspondem a uma condição mais dissipativa, o que é consistente com a realidade física.

Foram usados na análise subsequente apenas os valores de velocidade tais que $29,2 < x/S$. No que respeita à velocidade no plano longitudinal perpendicular, ao piso que contém a velocidade máxima, foi usada uma regressão não-linear multivariável ajustada pelo método dos mínimos quadrados tendo por base a expressão do tipo da (16), tendo sido obtido o resultado expresso em (24). Procedeu-se de forma idêntica relativamente à velocidade no plano longitudinal paralelo ao piso que contém a velocidade máxima, sendo y a distância ao eixo

do jato paralelamente ao piso, tendo sido obtido o resultado expresso em (25). Os respetivos ajustamentos (linha a cheio) aos resultados experimentais estão apresentados na Fig. 9.

$$\frac{u}{u_c} = e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{z}{0,12(x+4,59)^{0,75}} \right)^2} \quad (24)$$

$$\frac{u}{u_c} = e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{0,36(x-0,65)^{0,74}} \right)^2} \quad (25)$$

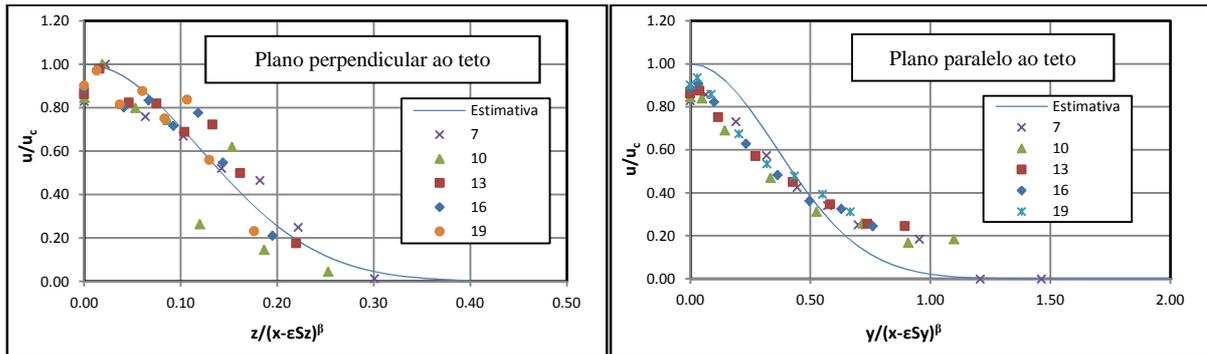


Fig. 9. Ajustamento de funções ao decaimento da velocidade do jato confinado com a distância ao eixo

Note-se que o ajustamento obtido, devido à dispersão dos resultados experimentais para valores de $y/(x-\epsilon Sy)^\beta$ mais elevados não é totalmente satisfatório. As expressões do campo de velocidade, respetivamente para o plano normal ao teto e para o plano paralelo ao teto, são as seguintes (para $29,2 < x/Sz$):

$$\frac{u}{u_0} = 2 * 3,64 \left(\frac{r_0}{x} \right)^{0,78} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{z}{0,12(x+4,59)^{0,75}} \right)^2} \quad (26)$$

$$\frac{u}{u_0} = 2 * 3,64 \left(\frac{r_0}{x} \right)^{0,78} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{0,36(x-0,65)^{0,74}} \right)^2} \quad (27)$$

Tal como nos casos anteriores, continua a ser cumprida a condição $\beta \leq \alpha$. Deve ser tido em conta que as expressões (26 e 27) correspondem a planos paralelos e próximos às duas superfícies existentes, deverá ser por essa razão que os valores de β são próximos entre si. Ainda assim, é dominante a aproximação do escoamento ao piso (que simula o teto), por efeito de Coanda, como se evidencia pelo facto do valor de k' ser menor na expressão (26).

6 CONCLUSÕES

Nesta comunicação apresentaram-se os resultados das medições dos campos de velocidade para jatos gerados por ventiladores de impulso (jato livre e jatos confinados por superfícies). Mostrou-se a forma de variação da intensidade da turbulência numa secção do jato livre. Foi feito o ajustamento de expressões analíticas aos campos de velocidade e foram estimadas a variação da quantidade de movimento e do caudal para o jato livre e para o jato parietal. Evidenciou-se que, neste caso, o caudal do jato parietal é limitado superiormente.

Admite-se que as expressões obtidas possam ser generalizadas para ventiladores de impulso instalados nas mesmas condições; todavia, a comparação com outros resultados experimentais é necessária para permitir a generalização para ventiladores de impulso de características significativamente diferentes. Como primeira aproximação, na ausência de outros dados, sugere-se que sejam mantidas as proporções entre cada constante característica do jato livre para o jato de parede (para ventiladores similares ao ensaiado). Desta forma poderá ser possível estimar as características do jato de parede através da caracterização do jato livre. Este aspeto deverá ser

futuramente aprofundado, uma vez que é crucial para o dimensionamento da ventilação de impulso em parques de estacionamento cobertos.

7 AGRADECIMENTOS

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

REFERÊNCIAS

1. Regulamento Técnico de Segurança contra Incêndio em Edifícios, Diário da República, Série I, *Portaria 1532/2008* de 29 de Dezembro de 2008.
2. Regime Jurídico da Segurança contra Incêndio em Edifícios, Diário da República, Série I, *Decreto-Lei 220/2008* de 12 de Novembro de 2008.
3. R. D. Blevins, *Applied Fluid Dynamics Handbook*, Van Nostrand Reinhold Company, 1984.
4. J. C. Viegas, Utilização de Ventilação de Impulso em Parques de Estacionamento Cobertos, *Série Teses e Programas de Investigação do LNEC* n° 55, LNEC, 2008.
5. H. Schlichting, *Boundary-Layer Theory*, McGraw-Hill Book Company, 1968.
6. D. Xavier Viegas, Uma Técnica de Erosão Aplicada ao Estudo da Interação de jactos Turbulentos com uma Superfície Plana, Dissertação para *Doutoramento em Ciências de Engenharia (Aerodinâmica)*, Coimbra, 1981.
7. M. Y. Chan e W. K. Chow, Car park ventilation system: performance evaluation, *Building and Environment*, 39, 635-643, 2004.
8. Z. Lin [et al.], CFD analysis of ventilation effectiveness in a public transport interchange, *Building and Environment*, 41, 254-261, 2006.
9. A. Duci [et al.], Numerical approach of carbon monoxide concentration dispersion in an enclosed garage, *Building and Environment*, 39, 1043-1048, 2004.
10. H. P. Morgan; J. C. de Smedt, Hot smoke tests: testing the design performance of smoke and heat ventilation systems and of impulse ventilation.
11. J. C. Viegas, The use of impulse ventilation to control pollution in underground car parks, *The International Journal of Ventilation*, 8 (1), Coventry: VEETECH, Ltd., 2009.
12. J. C. Viegas, The use of impulse ventilation for smoke control in underground car parks, *Tunnel. Underg. Space Technol*, 25, 42-53, 2010
13. E. Didier; B. Henriques; R. Brás, Calibration of a numerical jet fan model for simulating smoke control in underground car parks. CFD 2010 – 5th European Conference on Computational Fluid Dynamics, Lisbon, 2010.
14. R. A. Antonia; R. W. Bilger, An experimental investigation of an axisymmetric jet in a co-flowing air stream, *Journal of Fluid Mechanics*, 61 (4), 805-822 1973.
15. G. Papadopoulos; W. Pitts, A generic centerline velocity decay curve for initially turbulent axisymmetric jets, *Journal of Fluids Engineering: ASME*, 121, 1999.
16. K. Hemzal; J. Wurm; Z. Přihoda, Ventilation by Cold Wall Jet from Textile Terminal, *RoomVent 2004*, Coimbra: Universidade de Coimbra, 2004.
17. A. Triboix, D. Marchal, Stability analysis of the mechanism of jet attachment to walls, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45, 2769-2775, 2002.
18. H. B. Awbi, *Ventilation of buildings*. London, Spon Press, 2003.