

CARACTERIZAÇÃO DO ESCOAMENTO DO JACTO DE VENTILADORES DE IMPULSO



Hildebrando Cruz
Bolsheiro
Laboratório Nacional
de Engenharia Civil,
Portugal.



João C. Viegas*
Investigador,
Laboratório Nacional
de Engenharia Civil,
Portugal.



Abel Virgílio
Bolsheiro
Laboratório Nacional
de Engenharia Civil,
Portugal.

SUMÁRIO

Actualmente não estão ainda definidas regras de projecto da ventilação de impulso aplicada aos parques de estacionamento cobertos. Nesta comunicação são apresentados resultados experimentais que caracterizam o jacto livre axi-simétrico gerado pelos ventiladores de impulso de 50 N e apresenta-se a sua aplicação no dimensionamento da ventilação e do controlo de fumo de parques de estacionamento cobertos sugerido em [1].

Palavras-chave: Parques de estacionamento, incêndios, controlo de fumo, ventiladores de impulso, jactos.

1. INTRODUÇÃO

Do ponto de vista técnico, em Portugal, na última década, tem-se verificado uma grande expansão na aplicação da ventilação de impulso em parques de estacionamento cobertos. Nestes espaços as disposições construtivas a adoptar são objecto de regulamentação [2] e [3], onde se especifica, em particular, que os parques de estacionamentos cobertos deverão ter o seu espaço compartimentado em sectores de áreas não superiores a 3200 m² ou a 6400 m², conforme os pisos se situem abaixo ou acima do de referência (art.º 18.º do Regulamento Técnico [3]) e que seja assegurado um caudal mínimo de ventilação, para a condição de 100 ppm e para a condição de incêndio, de 600 m³/h por cada lugar de estacionamento; no caso de se usar sistemas inovadores, como os ventiladores de impulso, o projecto tem de ser aprovado pela Autoridade Nacional de Protecção Civil (art.º 14.º do Regime Jurídico [2]).

Através da utilização dos ventiladores de impulso, suspensos no tecto, pretende-se forçar o escoamento do fumo, em caso de incêndio, para as aberturas de exaustão mecânicas ou naturais e, numa utilização corrente, destinam-se também a promover a ventilação para a remoção dos poluentes. Esta técnica de ventilação e

* Autor correspondente – Departamento de Edifícios. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Av. do Brasil, 101. 170-066 Lisboa. PORTUGAL. Telef.: +351 218 443533
Fax: +351 218 443024. e-mail: jviegas@lnec.pt

controlo de fumo, derivada das técnicas de ventilação longitudinal utilizadas nos túneis, com bons resultados, e preconizadas nas normas [4], [5] e no documento elaborado pelo CETU [6], visa eliminar a necessidade de adoptar compartimentação interna nos parques de estacionamento em área não superiores a 3200 m² ou a 6400 m², com a qual se pretende evitar o escoamento do fumo para outros espaços; e a não utilização de uma rede de condutas para se promover as condições de ventilação e desenfumagem, uma vez que esses ventiladores podem assegurar a acção necessária para encaminhar o fumo e os poluentes para os meios de exaustão, reduzir a sua opacidade e a temperatura na zona sinistrada e evitar o seu escoamento para outras zonas.

A utilização dos ventiladores de impulso para além de se constituir uma solução menos onerosa, contribui também para que os parques de estacionamento cobertos se traduzam em espaços amplos sem barreiras visuais, proporcionando ao utilizador uma menor sensação de isolamento e de insegurança. Assim, como estes espaços são cada vez mais frequentes em cidades e nos grandes espaços comerciais a sensação de espaço amplo poderá contribuir para o êxito destes empreendimentos.

O escoamento gerado pelos ventiladores de impulso constitui um jacto, com características particulares em função da sua localização, interacção com o espaço e também pelo facto de os ventiladores de impulso induzirem um movimento de rotação ao fluido ("swirl"). Um jacto corresponde a uma fonte de quantidade de movimento num meio constituído por um fluido mas, na análise destes, podem ser efectuadas as simplificações sugeridas por [7] 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 jactos, tal como evidenciado por [1], corresponde a um escoamento turbulento. As formulações analíticas para o escoamento de um jacto turbulento submerso são obtidas através da teoria indutiva da turbulência, sendo possível encontrar a dedução nos trabalhos realizados por [1], [8] e [9].

A presente comunicação está estruturada do seguinte modo: na secção 2 apresentam-se as equações que descrevem o desenvolvimento do jacto livre axi-simétrico; na secção 3 descreve-se a metodologia de ensaio e de análise de dados; na secção 4 aplica-se os resultados obtidos na secção anterior ao modelo de dimensionamento sugerido em [1] e na secção 5 apresentam-se as conclusões do trabalho desenvolvido, bem como as perspectivas de trabalho futuro.

2. EQUAÇÃO DO JACTO LIVRE AXI-SIMÉTRICO

Os tipos de jacto que normalmente se encontram nos parques de estacionamentos cobertos são do tipo jacto livre axi-simétrico, jacto axi-simétrico com superfícies planas (paralelas, normais ou oblíquas), jactos axi-simétricos múltiplos e jacto axi-simétrico com escoamento uniforme (co-flow). As características destes jactos, em regime isotérmico, e as equações que os regem podem ser encontradas nos trabalhos de [1], [9] e [10].

No presente estudo foram ensaiados e analisados ventiladores de impulso na situação de jacto livre axi-simétrico; nestas condições, e de acordo com a teoria de jactos, é possível exprimir analiticamente o seu campo de velocidade em função da distância à origem do jacto (x) e da distância ao eixo do jacto (r).

Caracterização do Escoamento do Jacto de Ventiladores de Impulso

O jacto livre axi-simétrico é caracterizado por três regiões sucessivas (Figura 1): (i) a região inicial, (ii) uma região de transição e (iii) uma região de jacto desenvolvido. A região inicial estende-se até $x/d_0 = 5$, sendo x a distância à origem do jacto. No interior desta região existe uma zona, designada por cone potencial na qual a velocidade é constante e igual à velocidade inicial u_0 . No exterior do cone potencial existe uma camada de mistura, que se estende pelas restantes regiões do jacto.

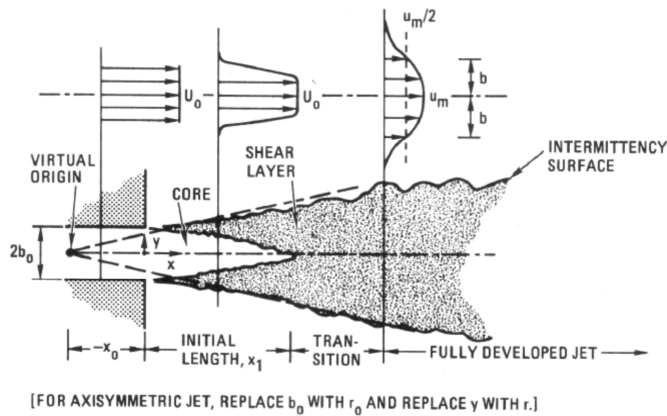


Figura 1: Caracterização do jacto turbulento submerso [7]

Ao longo do jacto, com valores crescentes de x , o seu raio r vai aumentando e a velocidade axial máxima (para cada secção $x = \text{const.}$) vai sendo decrementada, devido ao arrastamento de um caudal de fluido cada vez maior no jacto. Fora do cone potencial a velocidade decai com o incremento de r .

A equação que relaciona a variação da velocidade do jacto em função da distância do mesmo à origem, deduzida em [1], [10] e [11] é a indicada em (1).

$$u_c = u(x, r)_{\text{máx}} = \frac{2k_0 u_0 r_0}{x} \quad (1)$$

Onde u_c representa a velocidade no eixo do jacto; u_0 representa a velocidade do escoamento à saída do ventilador (para $x=0$); r_0 representa o raio da saída do ventilador; x representa a distância do ponto de medição à saída do ventilador; k_0 é a constante a determinar e relaciona o decaimento da velocidade máxima (central) do jacto com a distância.

Também de acordo com a bibliografia, a caracterização da forma do jacto para esta condição, e para uma determinada distância à origem, pode ser descrita por uma curva Gaussiana do tipo da indicada em (2).

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

Onde u_c representa a velocidade no eixo do jacto; r representa a distância perpendicular ao eixo do jacto; x representa a distância do ponto de medição à saída do ventilador; $u(x, r)$ representa a velocidade do escoamento num determinado ponto à distância x do ventilador e à distância r do eixo do jacto; k é a constante a determinar, e está relacionada com a forma do perfil de velocidades para uma determinada distância x .

Neste tipo de jactos, na ausência de quaisquer restrições externas ao escoamento, a quantidade de movimento conserva-se para qualquer secção normal ao eixo do jacto, sendo razoável admitir-se como hipótese que, para secções suficientemente afastadas da origem, o escoamento é dinamicamente semelhante, isto é, possui características de auto-preservação.

3. METODOLOGIA DE ENSAIO E ANÁLISE

3.1 Procedimento de ensaio

Para a realização dos ensaios, os ventiladores de impulso de 50 N foram assentes numa estrutura elevada, a uma cota de aproximadamente 2,5 m e a medição do campo de velocidade foi efectuada com recurso a anemómetros de turbina e anemómetros de fio-quente, colocados à cotas 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, estando a cota de 2,50 m aproximadamente coincidente com o eixo dos ventiladores de impulso.

Para a obtenção do campo de velocidade foi implementada uma malha que envolve o jacto expectável, estando esta representada na Figura 2. As coordenadas transversais indicadas na Figura 2 têm correspondência com as seguintes distâncias: A=5,0 m, B=4,0 m, C=3,0 m, D=2,0 m, E=1,5 m, F=1,0 m, G=0,5 m, H=0 m, I=-0,5 m, J=-1,0 m, K=-1,5 m, L=-2,0 m, M=-3,0 m, N=-4,0 m e O=-5,0 m.

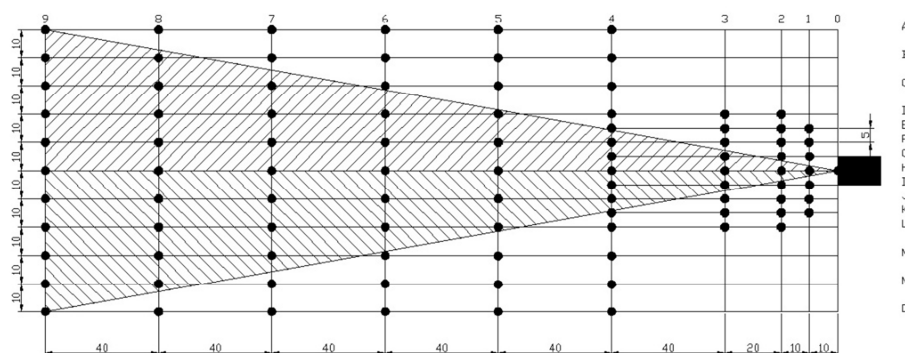


Figura 2: Malha implementada nos ensaios dos ventiladores (dimensões em dm)

O pavilhão utilizado para os ensaios tem grandes dimensões; todavia, verificou-se que o do escoamento que o ventilador de impulso impunha variava periodicamente, tendo sido efectuada um estudo prévio para a determinação do seu período. Determinou-se experimentalmente que o mesmo era inferior a 5 minutos, logo, estabeleceu-se que um período de aquisição razoável seria de 6 minutos (aproximadamente) em cada um dos pontos indicados na Figura 2. Nestes estudos prévios também foi verificado o alinhamento do ventilador de impulso com a malha desenhada no pavimento.

Os anemómetros encontram-se ligados a um sistema de aquisição de dados que em períodos de 0,5 segundos, durante aproximadamente 6 minutos, efectua 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]. A montagem dos anemómetros e a sua ligação ao sistema de aquisição de dados pode ser observada na Figura 3.



Figura 3: Pormenor da montagem da instrumentação utilizada em ensaio

3.2 Metodologia de análise e determinação das constantes

Para a determinação da constante k_0 , que relaciona a variação da velocidade do jacto com a distância do mesmo à origem, e fazendo-se uso da equação 1, utilizou-se o seguinte procedimento:

- adimensionalização da velocidade máxima, num determinado plano perpendicular ao eixo do jacto, através da utilização, como referência, da velocidade do jacto à saída do ventilador, ou seja, através da aplicação aos resultados experimentais da seguinte expressão $u(x, r)_{máx} / u_0$;
- adimensionalização da distância do plano de medição anteriormente mencionada, tendo como referência o raio da saída do ventilador através da seguinte expressão: r_0 / x .

Fazendo uso equação 1, e aplicando logaritmos a cada um dos membros, consegue-se estabelecer uma equação linear do tipo $Y = mX + b$, que relaciona a adimensionalização da velocidade com a adimensionalização da distância. A equação resultante está indicada em (3) e os gráficos respectivos dos dados experimentais estão indicados na figura 4.

$$\ln\left(\frac{u_c}{u_0}\right) = \ln\left(\frac{r_0}{x}\right) + \ln(2k_0) \quad (3)$$

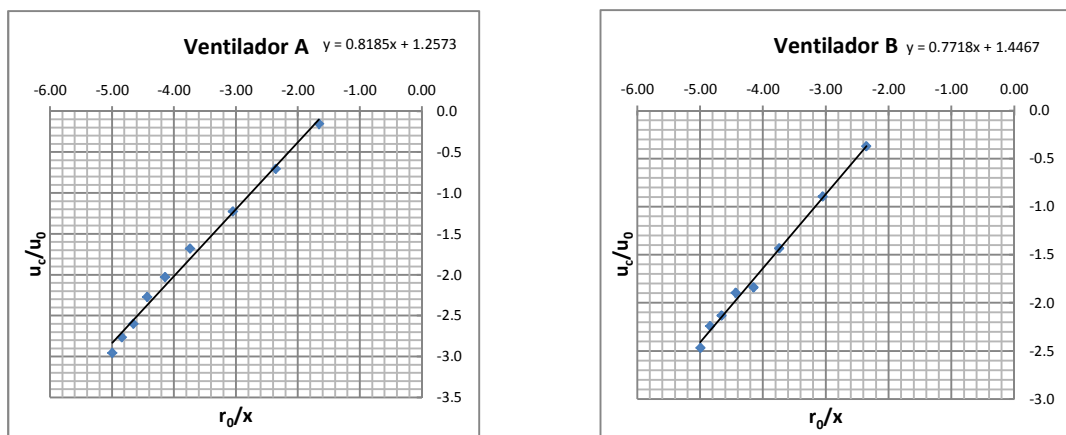


Figura 4: Linearização dos dados experimentais

Adoptando de novo as variáveis da equação 1, o termo (r_0/x) fica afectado de um expoente (α) , ver equação 4. O quadro 1 resume os valores da constante k_0 obtida para cada um dos ventiladores.

$$\frac{u_c}{u_0} = 2k_0 \left(\frac{r_0}{x} \right)^\alpha \quad (4)$$

Quadro 1: Valores obtidos para a constante k_0

Ventilador	Constante (k_0)	Expoente (α)
A	1.7580	0,8185
B	2.1245	0,7718

Com estes resultados, substituindo-os na equação 4 e sobrepondo-os com os valores obtidos experimentalmente verifica-se que fora da zona de influência do cone potencial é obtido um bom ajustamento, reflectindo que o decaimento da velocidade dos jactos produzidos por estes ventiladores de impulso podem ser reproduzidos através das expressões analíticas ajustadas, tal como a figura 5 e a figura 6 ilustram.

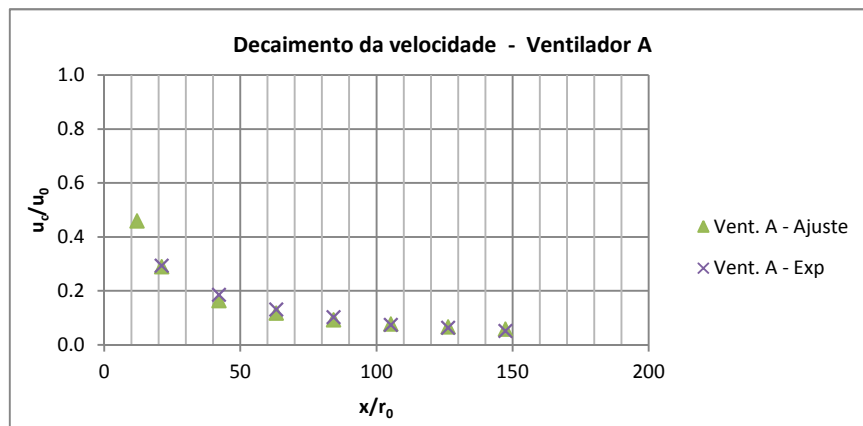


Figura 5: Ajuste longitudinal aos dados experimentais – ventilador A

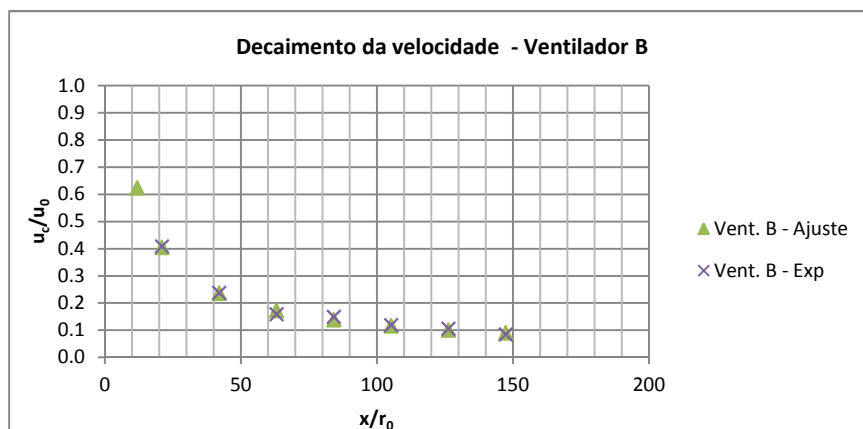


Figura 6: Ajuste longitudinal aos dados experimentais – ventilador B

Caracterização do Escoamento do Jacto de Ventiladores de Impulso

Para a determinação da constante k foi adoptado um procedimento semelhante ao descrito para a obtenção da constante k_0 , isto é, adimensionalizou-se a velocidade $u(x,r)/u_c$ e adimensionalizou-se a distância r/x . Aplicou-se uma regressão não-linear pelo método dos mínimos quadrados (com $f(r/x, k)$ igual à equação 2) e determinou-se o valor de k que minimiza a função indicada em 5.

$$s = \sum [y_{\text{exp}} - f(r/x, k)]^2 \tag{5}$$

Aplicando este procedimento para cada um dos ramos, e também para a globalidade dos dados experimentais, obtiveram-se os valores da constante k que se indica no quadro 2. Na figura 7 e na figura 8 estão ilustrados os resultados obtidos.

Quadro 2: Valores obtidos para a constante k

Ventilador	Ramo esquerdo (k)	Ramo direito (k)	Global (k)
A	0,0949	0,1302	0,1126
B	0,1676	0,1060	0,1435

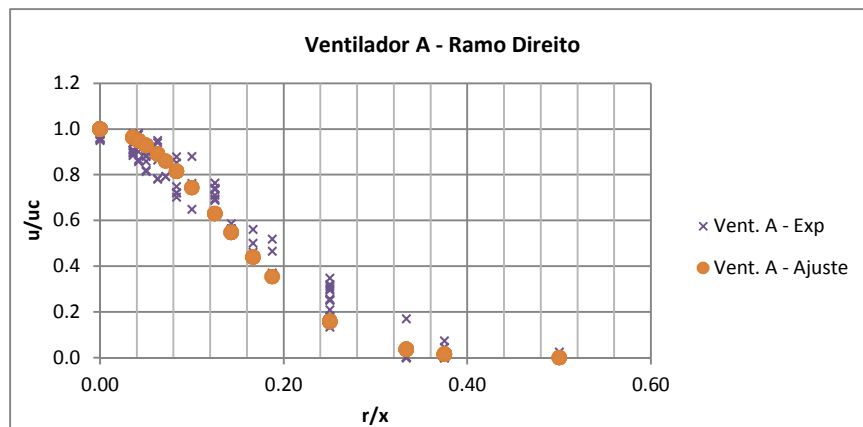


Figura 7: Ajuste transversal aos dados experimentais – ventilador A

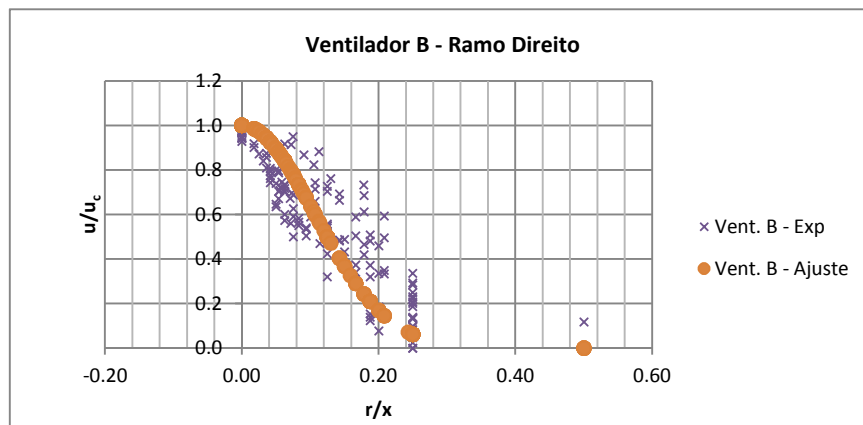


Figura 8: Ajuste transversal aos dados experimentais – ventilador B

4. APLICAÇÃO DOS RESULTADOS AO MODELO DE DIMENSIONAMENTO

O modelo de dimensionamento proposto tem como objectivo a definição iterativa da distribuição espacial dos ventiladores de impulso no parque de estacionamento coberto, para o caso de um determinado cenário de incêndio, de modo a restringir a propagação do fumo. Esta concepção baseia-se nos seguintes princípios [1]:

- Os ventiladores de impulso são 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 são dispostos numa malha que restringe o escoamento do fumo;
- Os ventiladores de impulso são 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;
- Não deve haver escoamento do fumo para outros pisos do parque de estacionamento coberto ou para outros locais do edifício.

A restrição do escoamento do fumo originado num incêndio num parque de estacionamento coberto é conseguida através de dois efeitos: o escoamento longitudinal lento imposto pelos ventiladores de exaustão que, de uma forma simplificada, é considerado como um escoamento de velocidade uniforme e os escoamentos de maior velocidade local gerados pelos ventiladores de impulso. Como se pode observar nas figuras 5 a 8, a acção dos ventiladores de impulso é forte numa zona restrita e que fora dessa zona o campo de velocidade pode ter valores reduzidos, da mesma ordem de grandeza ou mesmo menores que os do jacto de tecto originado pela pluma térmica [1]. Verifica-se que o jacto de tecto com origem na pluma térmica é retido quando a soma vectorial da sua velocidade com a resultante da soma dos dois escoamentos anteriormente mencionados é nula.

O modelo de dimensionamento entra em linha de conta com o número de ventiladores de impulso utilizados, a sua distribuição no espaço, a potência calorífica libertada num determinado incêndio, a velocidade do jacto de tecto o efeito da diluição e a velocidade dos ventiladores de impulso. Assim, na primeira iteração, como dados de entrada no modelo foi estabelecido que se tratava de um incêndio com uma potência calorífica total de 6 MW, eram utilizados 9 ventiladores de impulso de 50 N, com a malha de distribuição espacial desfasada (a localização dos ventiladores está indicada no quadro 3). Na segunda iteração alterou-se o número e a distribuição dos ventiladores de impulso, tendo-se aumentado o número de ventiladores de impulso para 12 e alinhado a distribuição espacial nos dois sentidos (ver quadro 4). A localização do foco de incêndio está perto da origem no ponto [0;0,5]. Os parâmetros relativos aos ventiladores de impulso são os definidos no ponto anterior.

Quadro 3: localização dos ventiladores de impulso na primeira iteração

Ventilador N.º	Longitudinal (x)	Transversal (y)
1	-33	8
2	-33	24
3	-8	32
4	-8	16
5	-8	0
6	17	24
7	17	8
8	42	16
9	42	0

Quadro 4: localização dos ventiladores de impulso na segunda iteração

Ventilador N.º	Longitudinal (x)	Transversal (y)
1	-33	8
2	-33	24
3	-33	40
4	-8	8
5	-8	24
6	-8	40
7	17	8
8	17	24
9	17	40
10	42	8
11	42	24
12	42	40

Os resultados da aplicação do modelo de dimensionamento aos diferentes ventiladores de impulso e às diferentes distribuições podem ser visualizados na figura 9 e na figura 10, primeira e segunda iteração respectivamente. Nestas figuras mostram-se, no plano do tecto, os lugares geométricos para os quais as velocidades se anulam, correspondendo ao limite do escoamento do fumo. Nessas figuras indica-se também a posição dos ventiladores de impulso.

Com os resultados da primeira iteração observa-se que, com a distribuição dos ventiladores de impulso adoptada, o ventilador B possui melhores características para reter o fumo mais próximo do local de incêndio. Contudo, com a reordenação dos ventiladores de impulso no espaço para a segunda iteração verifica-se que a diferença entre os ventiladores de impulso não é tão acentuada; de facto, verifica-se que a dispersão do fumo pelo ventilador A é ligeiramente superior, aproximadamente 5 m.

Este aspecto evidencia como é importante adequar a malha de distribuição espacial dos ventiladores de impulso às características do jacto que desenvolvem. Salienta-se que este facto não indica que se trata de um ventilador de impulso melhor que o outro pois, a distribuição espacial dos ventiladores de impulso está intrinsecamente ligada às características particulares do jacto.

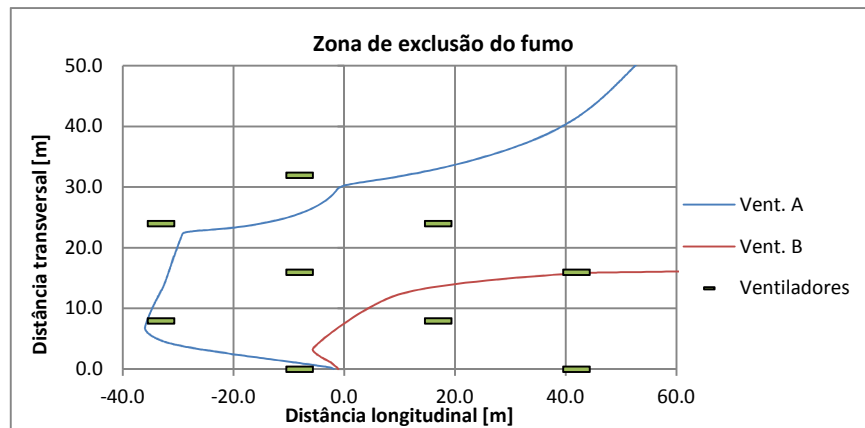


Figura 9: Limite da zona atingida pelo fumo na primeira iteração

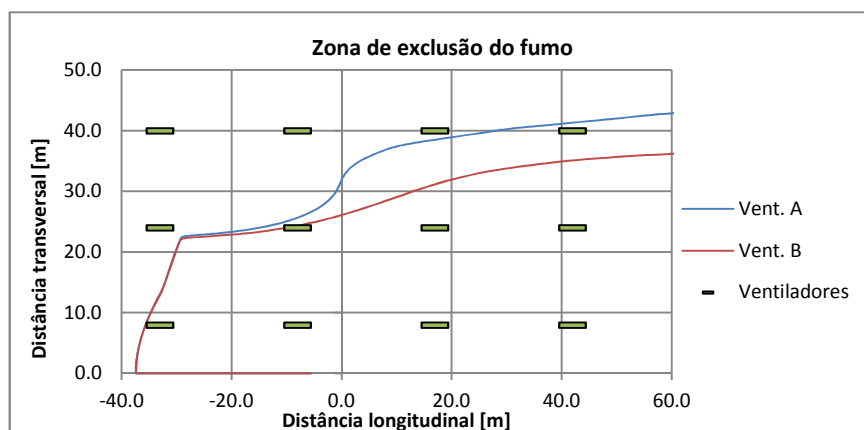


Figura 10: Limite da zona atingida pelo fumo na segunda iteração

5. CONCLUSÕES

Analisando os resultados experimentais verifica-se que, para a constante k_0 , é conseguido um bom ajustamento através da regressão logarítmica; contudo, quando se adopta as variáveis iniciais da equação 1 surge uma potência no termo r/x diferente de 1. Esta constatação poderá estar associada ao “swirl” ou ao carácter dissipativo do jacto para um fluido não-ideal. Este é um dos aspectos que será futuramente investigado.

A determinação do valor da constante k através da minimização da função do método dos mínimos quadrados revelou-se muito eficaz e com bons resultados.

Com a determinação das constantes características dos jactos aqui estudados verifica-se que as mesmas são bastante diferentes entre ventiladores, o que indicia tratar-se de uma característica própria de cada tipo de construção e, assim, de cada fabricante.

A metodologia de dimensionamento sugerida revelou-se uma ferramenta versátil onde, através da observação da linha de retenção do escoamento, se pode inferir sobre a adequação da distribuição espacial dos ventiladores de impulso escolhida relativamente às características dos ventiladores de impulso adoptados para o empreendimento. Contrariamente aos programas de CFD esta metodologia é de fácil computação e, num curto período de tempo, se consegue obter a solução do problema em causa. Contudo, esta abordagem tem as suas limitações nomeadamente, a título de exemplo, neste cálculo não é comparado o caudal arrastado pelos ventiladores de impulso com o caudal exaurido pelos ventiladores de exaustão.

Com o desenvolvimento dos trabalhos de aplicação do modelo de dimensionamento a casos práticos espera-se poder conseguir inferir sobre a sua precisão na previsão das zonas de exclusão do fumo.

6. AGRADECIMENTOS

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

7. REFERÊNCIAS

- [1] Viegas, J.C.G. – *Utilização de Ventilação de Impulso em Parques de Estacionamento Cobertos*, Série Teses e Programas de Investigação do LNEC n.º 55, LNEC, 2008.
- [2] /p/-Leis & decretos – *Regulamento Segurança contra Incêndios em Edifícios*, Diário da Republica, I Série, 12 de Novembro de 2008.
- [3] /p/-Leis & decretos – *Regulamento Técnico de Segurança contra Incêndios em Edifícios*, Diário da Republica, I Série, 29 de Dezembro de 2008.
- [4] NFPA 204 – *Smoke and Heat Venting*, National Fire Protection Association, Quincy (EUA), 2007.
- [5] NFPA 502 – *Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways*, National Fire Protection Association, Quincy (EUA), 2001.
- [6] CETU – *Les Dossiers Pilotes du CETU – Ventilation*, Centre d' Études des Tunnels, France, 2003.
- [7] Blevins, R.D. – *Applied Fluid Dynamics Handbook*. Van Nostrand Reinhold Company, 1984.
- [8] Schlichting, H. – *Boundary-Layer Theory*. McGraw-Hill Book Company, 1968.
- [9] Xavier Viegas, D. – *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.
- [10] Veiga, N.G. – *Simulação Computacional do Escoamento Induzido por um Incêndio num Parque de Estacionamento*, Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2009.
- [11] Pope, S.B – *Turbulent Flows*. Cambridge University Press; 1st edition, 2000.