

Estudo experimental e numérico do escoamento de um jacto plano originado por um dispositivo de cortina de ar

João Gonçalves^{1,2}, José Costa², António Figueiredo², António Lopes²

e-mail: jgoncalves@esav.ipv.pt

¹Centro de Estudos em Educação, Tecnologias e Saúde, ESAV, Instituto Politécnico de Viseu, Quinta da Alagoa, 3500-606 Viseu, Portugal, Tel.: +351 232 440 600,

²ADAI, Dep. Eng. Mecânica, Universidade de Coimbra, 3030-788 Coimbra, Portugal

Sumário

Nos domínios comercial ou industrial, são muito utilizadas barreiras aerodinâmicas – designadas por cortinas de ar – para confinar ambientes específicos. Neste trabalho apresenta-se o estudo experimental do jacto originado por um equipamento de cortina de ar. Recorrendo à Mecânica de Fluidos Computacional (CFD, foi também realizado um estudo numérico - 3D. Os resultados obtidos por ambas as vias, experimental e numérica, permitiram a caracterização detalhada do escoamento do jacto, sendo coerentes com o esperado para o problema físico em estudo, e coerentes entre si. Um dos aspectos interessantes observados nos ensaios experimentais, foi que o nível de turbulência inicial do jacto se situou sempre abaixo dos 5%, para as diferentes velocidades impostas ao jacto, o que confirma um bom projecto do bocal de descarga.

Palavras-chave: Jacto de ar; vedação aerodinâmica; câmara frigorífica; CFD

1 Introdução

Sempre que se abre a porta de acesso de uma câmara frigorífica, a troca de ar entre interior e exterior é inevitável, devido à diferença entre a temperatura dos dois ambientes. Isto implica obviamente um aumento da carga de refrigeração. A fim de reduzir os fluxos de calor entre o exterior e o interior, podem ser adoptadas várias soluções, tais como antecâmaras, portas de accionamento rápido, cortinas de plástico e cortinas de ar. A vedação por cortina de ar consiste no desenvolvimento de um jacto de ar originado por um ventilador que, impondo uma determinada quantidade de movimento inicial, permite melhorar a preservação das características térmicas e/ou químicas de um determinado espaço, permitindo, ao mesmo tempo, o livre acesso de pessoas e máquinas.

Remontam à década de 1960 os primeiros estudos experimentais dedicados à vedação aerodinâmica por cortinas de ar [1-4]. Deles resultaram propostas de modelos matemáticos simplificados para quantificar as trocas de calor através da cortina de ar e para caracterizar o escoamento do jacto de ar. O trabalho de Hayes e Stoeker [5], apresenta recomendações importantes para o projecto de cortinas de ar, nomeadamente: inclinação do jacto; valores mínimos da quantidade de movimento do jacto para garantir uma cortina de ar contínua até o solo.

Mais recentemente, Howell e Shibata [6] investigaram, por via experimental, a transferência de calor através de cortinas de ar recirculatórias, demonstrando que existe uma quantidade de movimento óptima (mínima) de descarga do jacto, que garante a continuidade da cortina de ar e minimiza as trocas de calor através dela. Van e Howell [7], apresentam um estudo onde evidenciam que a mistura turbulenta na região inicial da cortina de ar é fortemente dependente do nível de intensidade de turbulência inicial, assim como o seu comprimento.

Com a utilização dos meios de cálculo desenvolveram-se vários modelos de simulação de escoamentos, investigando os parâmetros geométricos e dinâmicos em jogo de modo a reduzir as trocas de massa e calor entre os dois ambientes pela utilização de cortinas de ar [7-11]. A utilização de métodos numéricos na modelação dos fenómenos físicos é de grande interesse prático, uma vez que é menos morosa e menos dispendiosa que os testes experimentais. A aplicação da modelação numérica tem sido usada em várias aplicações; vedação de câmaras frigoríficas [12,13], em expositores comerciais [21] e conforto térmico [16,17].

Embora os trabalhos pioneiros de modelação numérica se baseassem geralmente no domínio bidimensional, mais recentemente surgiram alguns trabalhos de modelação tridimensional [18-21]. Ainda que estes revelem pormenores não detectados na modelação bidimensional, como seja, o estrangulamento do escoamento nas partes laterais das portas, influência de ventos laterais, que potenciam as trocas turbulentas de calor [21],

verifica-se que, ainda assim, estes modelos não conseguem prever com rigor as trocas de calor, medidas experimentalmente.

No estudo aqui apresentado, apenas se pretende analisar o jacto desenvolvido pelo dispositivo de cortina de ar, ficando a investigação da capacidade de vedação aerodinâmica de ambientes a diferentes temperaturas, para trabalhos futuros. Assim, todos os ensaios aqui apresentados referem-se a condições isotérmicas.

2 Descrição da Instalação Laboratorial

No Laboratório de Aerodinâmica Industrial (LAI) – Coimbra, foi construída uma instalação piloto constituída no essencial por dois espaços contíguos com possibilidade de serem climatizados a temperaturas distintas, e devidamente instrumentada. Embora o trabalho aqui apresentado se dedique essencialmente ao estudo do jacto originados pelo dispositivo de cortina de ar, esta instalação poderá servir também para estudar as trocas de calor e massa envolvidas entre dois compartimentos a diferentes temperaturas quando a porta de ligação é aberta, com ou sem um dispositivo de cortina de ar instalado sobre a porta de ligação.

2.1 Geometria

A instalação experimental consiste em duas salas, aproximadamente com as mesmas dimensões $3 \times 3 \times 3 \text{ m}^3$ cada uma (fig. 1-a), ligadas entre si por uma porta com 0.6 m de largura e 1 m de altura (fig. 1-b).



Fig.1. (a) Foto da instalação com os dois compartimentos; (b) Porta de ligação com dispositivo de cortina de ar

2.2 Dispositivo de cortina de ar

O aparelho de cortina de ar foi instalado sobre a porta de ligação entre os dois compartimentos. Na realização dos ensaios experimentais, foi utilizada uma cortina de ar comercial, modelo CC90 da marca CENTAURO®. O invólucro do dispositivo de cortina é construído em chapas de aço, que confina um ventilador do tipo “tangencial” de alumínio, sendo este accionado por um motor eléctrico monofásico de 120W, que se encontra instalado no extremo do ventilador (fig. 2-a). A aspiração do ar é feita de grelhas plásticas que cobrem a parte frontal, enquanto que a injeção do ar é feita pela parte inferior através de um bocal com 4 cm de espessura e 70 cm de comprimento. Uma vez que a porta de ligação tem uma largura de 60 cm, o ventilador foi centrado com a porta (restando 5 cm para cada lado), de modo a que o jacto cubra toda a largura da porta. O bocal de injeção possui umas lâminas plásticas ajustáveis (fig. 2-b), que têm como função não só a uniformização do escoamento (diminuindo a turbulência inicial), mas também permitir a modificação do ângulo de descarga do jacto.

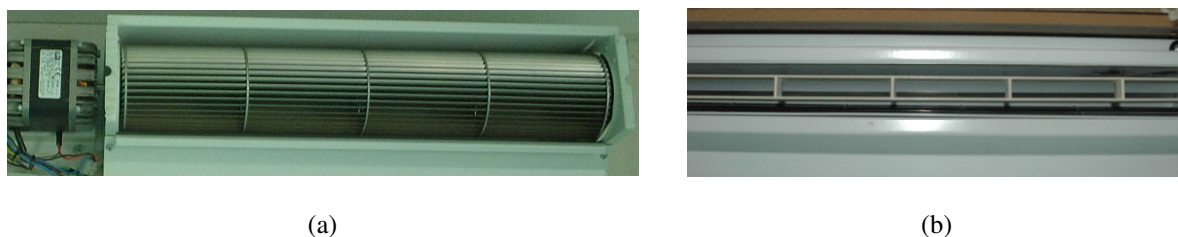


Fig.2. (a) Ventilador tangencial accionado pelo motor eléctrico; (b) Grelha de injeção da cortina de ar

3 Metodologia Experimental

3.1 Medição da velocidade

Na medição da velocidade do ar do jacto foi utilizado um equipamento multi-funções da marca *SWEMA*TM, modelo *SwemaAir 300*TM (fig. 3), que, além de servir como programador, pode servir também como “*data logger*”. Este está equipado com uma sonda telescópica (*SWA 31*) contendo um termo-anemómetro de fio quente. As principais características desta sonda são:

- Tipo de sensor de velocidade: uni-direccional
- Gama de medição de velocidade: 0.1 a 30 m/s
- Precisão do sensor de velocidade: ± 0.04 m/s (0.10 – 1.33 m/s) ou $\pm 3\%$ do valor lido (0.133 – 30 m/s)
- Tempo de resposta: 0.2 s
- Gama de medição de temperatura: -20 a +80 °C
- Precisão do sensor de temperatura: ± 0.3 °C

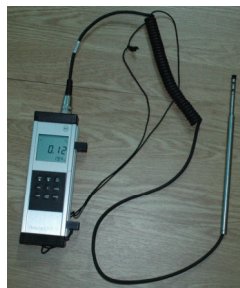


Fig.3. *SwemaAir 300*TM com sonda telescópica *SWA 31*.

Para além de permitir a medição dos valores instantâneos da velocidade e temperatura com taxa de aquisição configurável, o equipamento pode calcular valor mínimo, médio, máximo e ainda o desvio padrão de um conjunto de medições durante um determinado intervalo de tempo. Os valores podem depois ser disponibilizados no mostrador ou transmitidos para um computador comum.

3.2 Calibração do ventilador

Inicialmente, o aparelho de cortina de ar estava dotado de um comutador de velocidade com 3 posições (fig. 4-a), às quais correspondiam 3 níveis de velocidade inicial do jacto (mínima, média e alta). Uma vez que para os ensaios a realizar se pretendia que fosse possível impor vários valores de velocidade ao jacto, o comutador foi retirado e instalado um variador de tensão (fig. 4-b) de forma a permitir a variação da velocidade do ventilador (e do jacto).



(a)



(b)

Fig.4. Comutador de velocidade original e Variador de tensão.

A sonda *SWA 31* foi utilizada na calibração do ventilador, tendo sido feitas medições na localização aproximada do centro do bocal e para duas distâncias ($Y=5$ cm e $Y=10$ cm) do bocal de injeção. Variando a tensão fornecida ao motor, foi medido o valor da velocidade, a uma taxa de 40 Hz durante 1 minuto, obtendo-se assim, um valor

médio da velocidade do jacto. Na fig. 5, mostra-se a relação da tensão de alimentação vs velocidade do jacto, donde se pode concluir que no intervalo de 1 a 5 m/s a velocidade do jacto é facilmente controlada com a tensão imposta pelo variador.

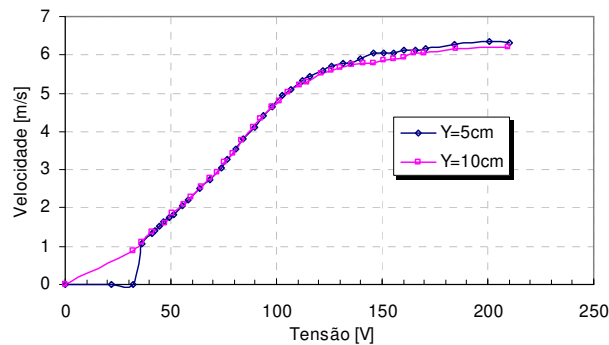


Fig.5. Calibração do ventilador.

4 Modelo numérico

A par do estudo experimental, foi também realizado um estudo numérico usando um código comercial ANSYS-CFX. Assim, foi criado um modelo 3-D, replicando a geometria da instalação experimental. A metodologia baseou-se na simulação numérica de um escoamento turbulento um jacto de ar plano descendente, originado por um dispositivo de cortina de ar localizado sobre a porta de separação de dois espaços que se podem colocar a temperaturas diferentes. Os dois compartimentos são considerados estanques relativamente ao exterior, isto é, apenas são permitidas as trocas de ar entre os dois compartimentos.

No caso estudado foi considerada uma situação isotérmica, pelo que ambos os compartimentos foram mantidos à mesma temperatura. Assim, o escoamento é promovido apenas pelo jacto imposto no bocal de injeção, e a aspiração (única saída do domínio) é feita pela parte frontal da cortina. A velocidade imposta no bocal de injeção é constante e homogénea ao longo de todo o bocal. Uma vez que se espera que a variação das grandezas seja maior nas imediações da porta e da cortina, a malha foi refinada nestas zonas (fig. 6-a), tendo sido usado um total de 536 276 elementos. No que diz respeito às condições de fronteira, todas as superfícies (exceptuando as fronteiras de injeção e de aspiração) foram consideradas lisas e aderentes. Considerou-se um escoamento de ar em regime permanente, turbulento (modelo de turbulência $k-\epsilon$).

Uma vez que a geometria de estudo possui um plano de simetria apenas foi simulada metade do domínio.

Todos os cálculos foram feitos somente após um estudo de independência da malha.

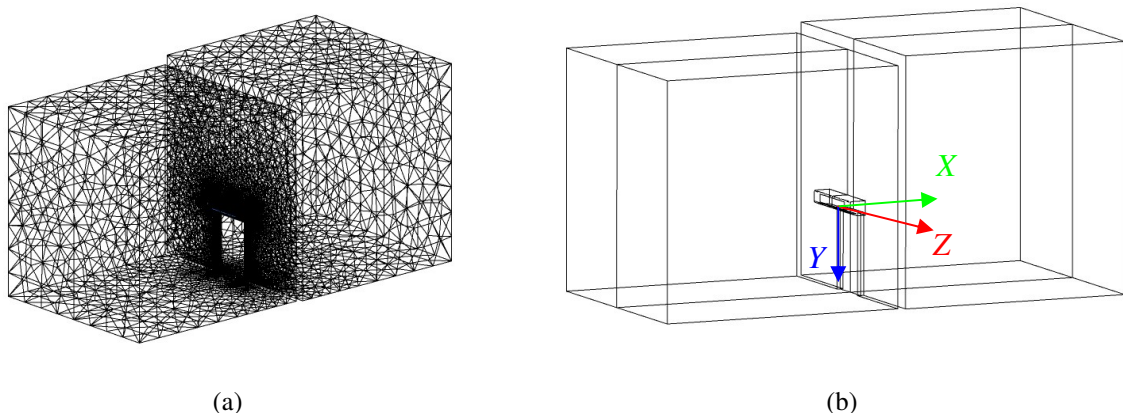


Fig.6. (a) Grelha de cálculo; (b) Geometria com sistema de eixos utilizado.

5 Apresentação e Discussão dos Resultados

A figura 6-b mostra o sistema de eixos adoptado no presente trabalho, cuja origem se situa no centro do bocal de injeção do jacto. A caracterização do escoamento originado pelo dispositivo de cortina de ar consistiu na medição dos valores da velocidade nas três direcções: transversal; vertical e longitudinal, correspondentes às direcções x , y e z , respectivamente (ver figura 6-b). Os resultados das medições experimentais foram obtidos fazendo o varrimento, em cada uma das direcções, sendo a sonda termo-anemométrica deslocada com o auxílio de um dispositivo de posicionamento apropriado.

5.1 Perfil longitudinal de velocidades do jacto (na direcção do eixo da cortina)

O perfil de velocidades longitudinal (segundo o eixo do ventilador) é importante para confirmar se o jacto produzido é homogéneo e constante ao longo de todo o bocal de descarga e, também, para averiguar qual o local mais representativo para a avaliação da velocidade inicial do jacto, isto é, se a medição num único ponto é ou não suficiente para definir a velocidade do jacto. Na figura 7-a mostra-se o perfil de velocidades obtido num primeiro ensaio, onde se pode observar um acentuado decréscimo da velocidade em $z \approx -0.25$ m. Após a inspecção do bocal de injeção do dispositivo de cortina de ar, verificou-se a existência de um deflector (cf. fig. 4-a) oblíquo relativamente à vertical e orientado no sentido negativo do eixo x (sistema de eixos aqui utilizado). Suspeita-se que a inclusão deste deflector por parte da empresa construtora, seria a de tentar colmatar a ausência de jacto no local ocupado pelo motor que acciona o ventilador. Isto é, o dispositivo tem 0.9 m de comprimento, e o bocal de injeção tem apenas 0.7 m, logo este equipamento só pode ser instalado sobre portas até 0.7 m de largura. Após a remoção do referido deflector, foi eliminada a referida anomalia (fig. 7-b). Pela observação da figura 7-b, verificam-se algumas flutuações no valor da velocidade ao longo do eixo da cortina. Suspeita-se que esta variabilidade se deva, por um lado aos anéis de alumínio que sustentam as lâminas do ventilador e, por outro lado, às lâminas plásticas do bocal de injeção (cf. fig. 2). Podemos ainda verificar que estas flutuações se vão esbatendo com o aumento da distância ao bocal de injeção.

Pelo referido, a avaliação da velocidade inicial do jacto, não pode ser feita recorrendo à medição num único ponto, sendo preferível considerar o valor médio de algumas medições ao longo do eixo da cortina (x).

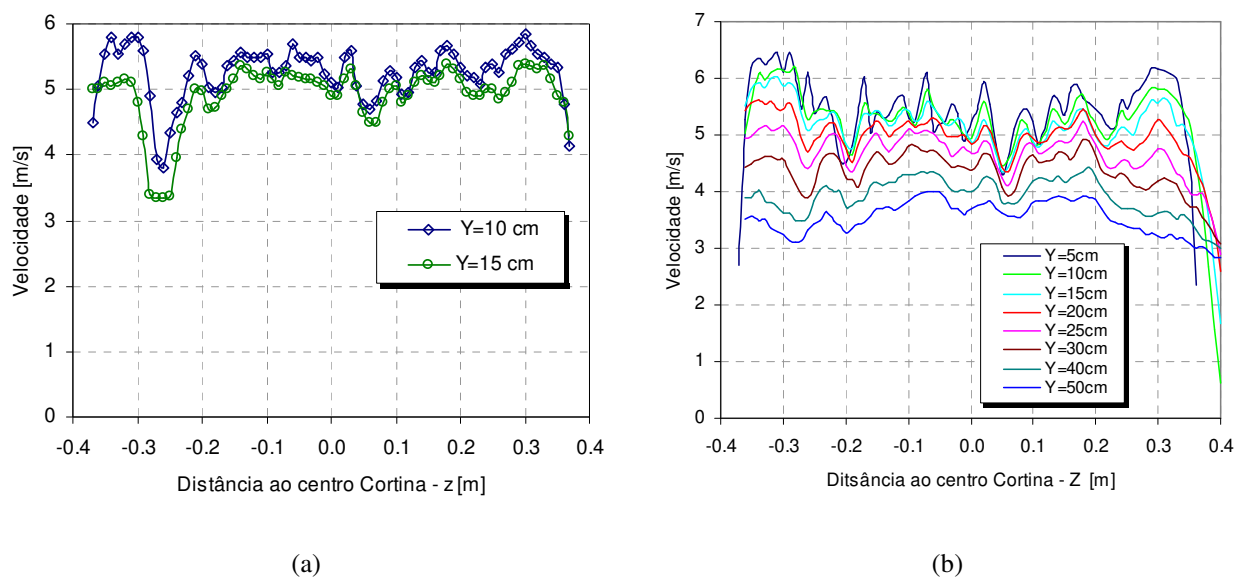


Fig.7. Representação do perfil velocidades ao longo do eixo do bocal de injeção do jacto, (a) antes e (b) após a remoção do deflector” direccional, para diferentes distâncias ao bocal.

5.2 Perfil de velocidades segundo o eixo de desenvolvimento do jacto

No desenvolvimento do escoamento de um jacto livre consideram-se duas regiões principais, dependendo da variação da velocidade máxima ao longo da direcção do escoamento: (I) a região de mistura inicial ou *núcleo potencial*, onde a velocidade máxima permanece praticamente constante e próxima do seu valor na descarga do jacto, e (II) a região principal ou de *declínio característico* [22]. Nesta última, o desenvolvimento do jacto depende essencialmente da geometria da boca de injeção: os perfis de velocidade são auto-selhantes (independentes da distância à origem), verificando-se um declínio da velocidade máxima e um aumento linear da

largura do jacto com a distância ao bocal injeção [23]. Hayes [4,5] identifica ainda uma terceira região - para o escoamento isotérmico originado por um equipamento de cortina de ar -, a que chama região de recompressão, que ocorre com o impacto do jacto junto ao solo, onde se verifica um decréscimo acentuado do valor da velocidade.

Na figura 8 apresenta-se o perfil da componente vertical (Y) da velocidade na direcção do desenvolvimento do escoamento. Como se pode observar, quer no perfil obtido experimentalmente, quer no obtido por via numérica, podemos identificar as três zonas referidas. Embora as regiões (II) e (III) estejam perfeitamente identificáveis (II - $Y=0.2$ m a $Y=0.8$ m e III - $Y=0.8$ m a $Y=1$ m), a região de mistura inicial (I) é muito pequena (quase inexistente). Estes resultados contrariam o observado por Neto [24], que no seu estudo experimental do jacto produzido por um dispositivo de cortina de ar similar com o aqui estudado, consegue identificar a região de mistura inicial (com um comprimento de 10 a 15 cm).

Embora não afigure muito claro qual a velocidade inicial do jacto, uma boa estimativa será avaliá-la a uma distancia de 5 a 10 cm do bocal de descarga.

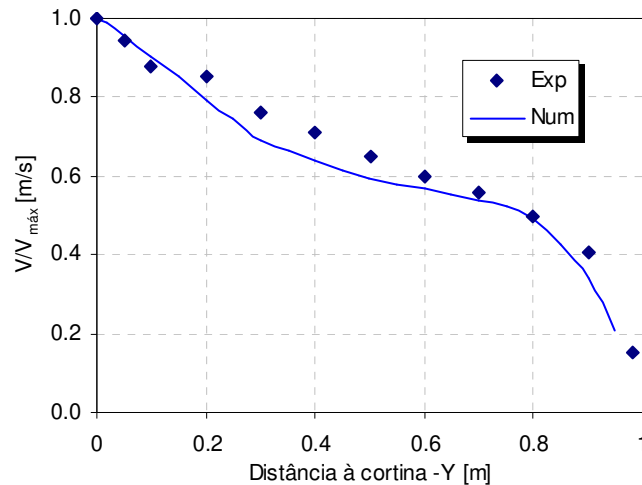


Fig.8. Representação do perfil da componente vertical da velocidade normalizado ao longo do desenvolvimento do jacto (Y).

No seu trabalho laboratorial, Van e Howell [7] concluíram que a mistura turbulenta na região inicial da cortina de ar é fortemente dependente do nível de intensidade de turbulência inicial, assim como o seu comprimento. Na figura 9, apresenta-se a intensidade da turbulência (IT) do jacto em função da sua velocidade média para duas distâncias ao bocal de injeção. Como se pode observar, os níveis de IT são bastante baixos para vários valores de velocidade (média) imposta ao jacto, o que vem corroborar o observado anteriormente. Os baixos valores da intensidade de turbulência inicial indicam também um bom projecto do bocal de descarga.

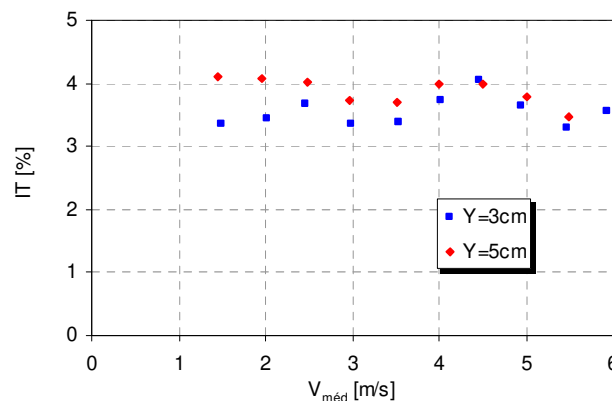


Fig.9. Intensidade da turbulência do jacto em função da sua velocidade média para duas distâncias ao bocal de injeção - Experimental.

5.3 Perfil transversal de velocidade (perpendicular ao plano da porta)

Na figura 10 apresentam-se a variação da componente vertical da velocidade segundo a direcção perpendicular à porta – X , e, para várias distâncias ao bocal de injeção – Y , obtidos por via experimental (fig. 10-a) e por via numérica (fig. 10-b).

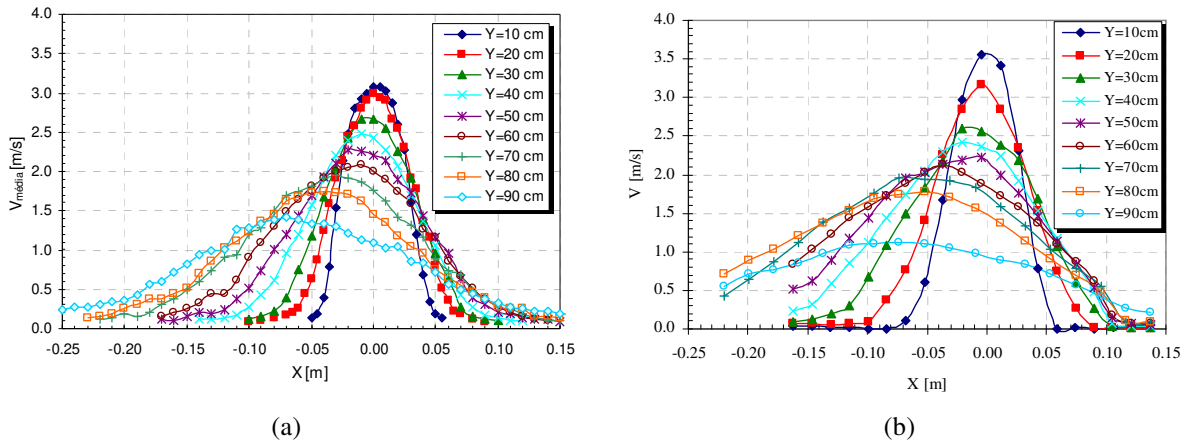


Fig.10. Perfil de transversal da componente vertical da velocidade. (a) Experimental; (b) Numérico.

Apesar de, aparentemente os resultados parecerem concordante entre si, verifica-se que, à medida que o jacto se desenvolve, a sua espessura é sempre maior nos resultados obtidos por via numérica. Este facto, poder-se-ia dever, ao modelo de turbulência utilizado (modelo k-e), pelo que foi testado outro modelo de turbulência (SST), sem melhorias assinaláveis. Um outro aspecto avaliado, foi a influência da intensidade de turbulência inicial jacto considerada para o cálculo numérico. Uma vez que, nos ensaios experimentais se obtiveram níveis de turbulência (a boca do jacto) de 3% a 4%, no cálculo foram testados dois valores de intensidade de turbulência inicial - IT=3% e IT=5%-, tendo-se obtido resultados muito próximos. Por não se ter identificado (pelo menos para já), a razão dos referidos desvios, serão necessários cálculos adicionais.

Como esperado, junto ao bocal de injeção o escoamento é essencialmente laminar, sendo que com a distância ao bocal de descarga, a turbulência vai-se estendendo a todo o jacto fazendo com que a largura do jacto aumente conduzindo à correspondente diminuição da velocidade do centro do jacto. Este aumento da turbulência na região externa do jacto tem como consequência promover as trocas de energia entre o escoamento do jacto e o ar da vizinhança. Isso mesmo pode ser confirmado pela figura 11, onde se apresenta a intensidade da turbulência para as diferentes distâncias ao bocal (estes valores correspondem ao ensaio que deu origem ao gráfico da figura 10-a)).

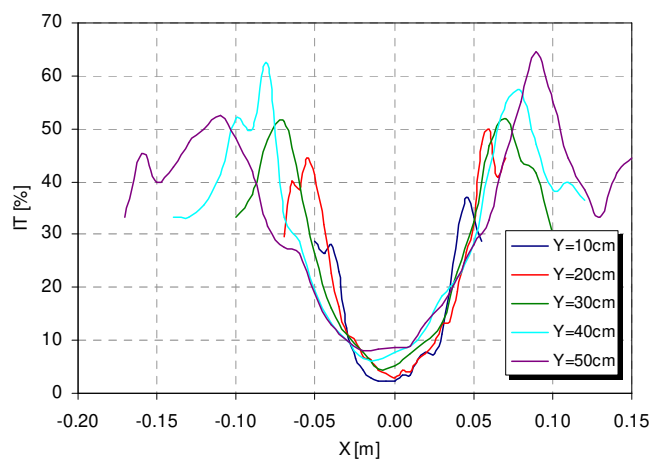


Fig.11. Perfil da intensidade da turbulência segundo a direcção perpendicular ao plano da porta para várias distâncias ao bocal da cortina – Experimental.

Como se disse anteriormente, as salas são estanques relativamente ao exterior. Assim, e na situação isotérmica, como é o caso, o escoamento é apenas promovido pelo jacto da cortina. A aspiração do ar que é feita pela porta frontal da cortina provoca então, uma depressão no compartimento onde se encontra instalada a cortina, provocando a deflexão do jacto para o compartimento onde se encontra instalado o equipamento de cortina de ar (neste caso, sentido negativo do eixo x). Este facto é observado na figura 10, com o deslocamento do ponto onde se verifica a velocidade máxima. O mesmo facto pode ser observado na figura 12 (resultado do cálculo numérico), onde se mostram os vectores de velocidade junto à porta (cf. fig.12-a), e ainda pela observação das linhas de corrente (cf. fig.12-b). Por esta ultima figura podemos também concluir que o padrão de escoamento é claramente tridimensional.

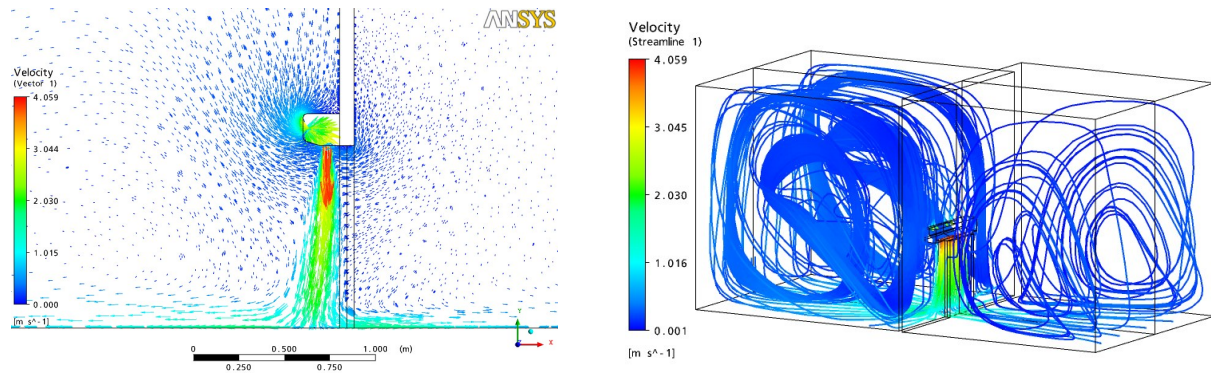


Fig.12. (a) Campo de velocidade junto à porta de ligação das salas; (b) Linhas de corrente do escoamento com o equipamento de cortina de ar em funcionamento.

6 Conclusões

Com este trabalho pretendeu-se caracterizar o escoamento originado por um dispositivo de cortina de ar. Recorrendo a um termo-anemómetro foram medidos os perfis de velocidade segundo as direcções transversal, longitudinal e ainda segundo a direcções de desenvolvimento do jacto.

Segundo a direcção do eixo do ventilador, verificou-se que uma variabilidade do valor da velocidade, pelo que se deve ter especial cuidado com a avaliação da velocidade inicial do jacto, devendo-se fazer algumas medições e assumir o valor médio como o valor da velocidade do jacto, e assim, minimizar os erros aquando o confronto com os resultados numéricos. Verificou-se também, que a região de mistura inicial do jacto é bastante reduzida, pelo que, para este caso, a velocidade deve ser avaliada junto ao bocal de injeção.

Um aspecto de grande importância, foi a verificação de um valor bastante baixo (inferior a 5%) do nível de intensidade de turbulência inicial do jacto para as diferentes velocidades impostas ao jacto. Isto confirma um bom projecto do bocal de descarga.

No geral os resultados obtidos por ambas as vias, experimental e numérica, são coerentes com o esperado para o problema físico em estudo, e bastante coerentes entre si.

Referências

1. G. Hetsroni, Heat transfer through an air curtain, dissertação de doutoramento, Universidade de Michigan, EUA (1963).
2. G. Hetsroni, C.W. Hall e A.M. Dhanak, "Heat transfer properties of an air curtain", Trans. ASAE, 328-334 (1963).
3. F.C. Hayes, Heat transfer characteristics of the air curtain: a plane jet subjected to transverse pressure and temperature gradients, dissertação de doutoramento, Universidade de Illinois, EUA (1968).
4. F.C. Hayes e W.F. Stoecker, "Heat transfer characteristics of the air curtain", ASHRAE Trans., 75, 2, 153-167 (1969).
5. F.C. Hayes e W.F. Stoecker, "Design data for air curtains", ASHRAE Trans., 75, 2, 168-180 (1969).
6. R.H. Howell e M. Shibata, "Optimum heat transfer through turbulent recirculated plane air curtains", ASHRAE Trans., N° 2567, 188-200 (1980).

7. N.Q. Van e R.H. Howell, "Influence of initial turbulence intensity on the development of plane air-curtain jets", *ASHRAE Trans.*, 82, Part 1, 208-228 (1976).
8. J.K.-W. Lam, K.G. Ruddick e G.E. Whittle, "Air curtains for infiltration control – a computational fluid dynamics analysis", 11th AIVC Conference, Paper 16, 301-324, Belgirate, Itália (1990).
9. L.A. Oliveira, J.J. Costa, M.G. Carvalho, H.J. Gerhardt e C. Kramer, "On aerodynamic sealing for industrial applications", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 37, 255-268 (1991).
10. L.A. Oliveira, F. Penot e J.J. Costa, "Aerodynamic sealing through a double jet curtain: a parametric numerical study", *Proc. ROOMVENT'96–Fifth International Conference on Air Distribution in Rooms*, Vol. 1, pp. 437-444, Yokohama, Japão (1996).
11. Azzouz A, Gosse J, Duminil M. Experimental determination of cold loss caused by opening industrial cold room doors. *International Institute of Refrigeration* 1993;16(1): 57–66.
12. Hoang ML, Verboven P, De Baerdemaeker J, Nicolai BM. Analysis of the air flow in a cold store by means of computational fluid dynamics. *Int J Refrigeration* 2000;23: 127–40.
13. P. Chen , D.J. Cleland, S.J. Lovatt, M.R. Bassett. An empirical model for predicting air infiltration into refrigerated stores through doors. *International Journal of Refrigeration* 25 (2002) 799–812
14. B.E. Launder, D.B. Spalding. The numerical computation of turbulent flows. *Comput Methods Appl Mech Eng* 1974;3: 269–89.
15. J. J. Costa e L. A. Oliveira, "Vedação aerodinâmica: parametrização numérica do isolamento de duas divisões", *Actas do V Congresso de Métodos Numéricos em Engenharia*, Madrid, 3-6 Junho, 2002 (CD-ROM: "Métodos Numéricos en Ingeniería V", J. M. Goicolea, C. Mota Soares, M. Pastor y G. Bugeda (Eds.), © SEMNI, España 2002).
16. Chen P, Cleland DJ, Lovatt SJ, Bassett MR. Air infiltration into refrigerated stores through rapid-roll doors. *Proc. of the 20th International Congress of Refrigeration*, Sydney, Australia 19–24 September 1999.
17. M.G. Silva, G.N. Brites, L.P.C. Neto, Aerodynamic sealing with air curtains – experimental tests, *Proceedings of ROOMVENT'2002 – 8th International Conference on Air Distribution in Rooms*, pp. 709-712. Copenhagen, Denmark (2002).
18. M. Havet, O. Rouaud, C. Sollic. Experimental investigations of an air curtain device subjected to external perturbations. *International Journal of Heat and Fluid Flow* 24 (2003) 928–930.
19. A.M. Foster, R. Barrett, S.J. James , M.J. Swain. Measurement and prediction of air movement through doorways in refrigerated rooms. *International Journal of Refrigeration* 25 (2002) 1102–1109
20. A.M. Foster, M.J. Swain, R. Barrett, S.J. James. Experimental verification of analytical and CFD predictions of infiltration through cold store entrances. *International Journal of Refrigeration* 26 (2003) 918–925.
21. Paola D'Agaro, Giovanni Cortella, Giulio Croce. Two- and three-dimensional CFD applied to vertical display cabinets simulation. *International Journal of Refrigeration* 29 (2006) 178–190
22. J.J. Costa, Estudo do escoamento originado por dois jactos parietais não-isotérmicos num domínio fechado, dissertação de doutoramento, Universidade de Coimbra, Portugal (1996).
23. H. Schlichting, *Bondary-layer theory*, 7ª edição, McGraw-Hill Inc. (1979).
24. L.P.C. Neto, Estudo de sistemas de vedação aerodinâmica do tipo cortina de ar, dissertação de doutoramento, Universidade de Coimbra, Portugal (2006).