

# Visualização da topologia do escoamento na vizinhança de uma porta vedada por um aparelho de cortina de ar

**Luís P. C. Neto**

Escola Superior de Tecnologia do Instituto Politécnico de Castelo Branco  
Departamento de Engenharia Industrial, Avenida do Empresário, 6000-767 Castelo Branco  
luisneto@est.ipcb.pt

**M. Gameiro da Silva ; José J. Costa**

Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Ciências e Tecnologia  
Universidade de Coimbra - Pólo II, 3030 - 201 Coimbra  
manuel.gameiro@dem.uc.pt ; jose.costa@dem.uc.pt

## RESUMO

Descrevem-se as metodologias utilizadas num estudo que teve por objectivo a avaliação do efeito de vedação promovido por um aparelho de cortina de ar. Foi utilizada uma instalação experimental à escala real em que, através de um jacto de ar descendente gerado por cima da porta, se procurou manter uma dada diferença de temperatura entre duas salas contíguas. Recorrendo a 16 sondas anemométricas, efectuou-se o mapeamento da temperatura e da velocidade do ar em diversos planos considerados de interesse e, através da aquisição desses dados em contínuo, avaliou-se o desenvolvimento e a estabilidade do jacto durante os primeiros minutos de funcionamento da instalação. Recorreu-se igualmente a uma técnica de medida do tipo “*whole-field*” em que o campo de temperaturas do ar é medido indirectamente através de um ecrã de baixa massa térmica que serve de alvo a uma câmara termográfica de infra-vermelhos. Ao longo do artigo serão apresentados vários exemplos elucidativos das potencialidades das técnicas descritas anteriormente.

## INTRODUÇÃO

Nos domínios comercial e industrial são frequentes as situações em que há necessidade de reduzir ou controlar as trocas de calor e de massa entre um ambiente exterior e um espaço com atmosfera controlada – onde se requer que os parâmetros ambientais (temperatura, humidade, concentração de poluentes, etc.) sejam mantidos em níveis compatíveis com a actividade aí exercida – exigindo-se, simultaneamente, facilidade de circulação de pessoas ou equipamentos. Em termos práticos, o confinamento de ambientes específicos é normalmente conseguido com a utilização de barreiras aerodinâmicas constituídas por um ou vários jactos de ar (habitualmente designadas por cortinas de ar) com aplicações tão diversas como na vedação das zonas de acesso a espaços comerciais ou industriais climatizados, na protecção de portas de câmaras de congelação industriais, na criação de zonas demarcadas de qualidade do ar interior ou como barreira à propagação ou deposição de poluentes em ambientes de trabalho agressivos. Nos últimos anos, em Portugal, tem-se assistido a uma crescente instalação deste tipo de equipamentos, sobretudo como meio de vedação térmica de espaços comerciais climatizados, nos quais se pretendem manter condições de conforto térmico relativamente a ambientes exteriores que poderão estar mais quentes ou mais frios. Os aparelhos de cortina de ar comercializados são, na sua maioria, de jacto plano descendente, não-recirculado.

Os presentes autores desenvolveram e aplicaram um conjunto de metodologias de trabalho com o intuito de avaliar as prestações das cortinas de ar numa instalação experimental à escala real na qual, através de um jacto de ar descendente gerado por um aparelho instalado por cima de uma porta, se procurava manter uma dada diferença de temperatura entre duas salas contíguas. Embora algumas dessas metodologias permitam obter dados qualitativos

acerca das trocas gasosas ocorridas entre o compartimento em estudo e o meio que lhe é adjacente (o outro compartimento), essa informação, por si só, é incompleta, surgindo então a necessidade de a complementar com técnicas de visualização que permitam perceber os fenómenos físicos que estiveram na sua origem.

## A INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

A caracterização da vedação aerodinâmica promovida pelo aparelho de cortina de ar foi realizada na instalação experimental esquematizada na Figura 1, descrita mais detalhadamente em [1,3,5]. É composta por duas salas contíguas de igual dimensão ( $6\text{ m} \times 6\text{ m} \times 3.27\text{ m}$  cada uma) ligadas entre si através de uma abertura de altura variável ( $2.10\text{ m} < H_P < 2.65\text{ m}$ ) e com a largura típica de uma porta ( $L_P = 1.12\text{ m}$ ). Por cima desta porta foi instalado um aparelho de cortina de ar equipado com uma turbina “tangencial” accionada por um motor de velocidade variável, a qual gera um jacto de ar plano descendente através de um bocal de dimensão sensivelmente igual à da porta que se pretende vedar. O comando electrónico do motor permite cobrir uma gama alargada de velocidades iniciais do jacto de ar ( $U_0$ ), sendo o ângulo de descarga ( $\alpha_0$ ) imposto por lâminas existentes no interior do bocal (Figura 1). Uma das salas foi mantida à temperatura  $T_F = 20\text{ }^\circ\text{C}$  enquanto a outra sala era aquecida até atingir uma temperatura superior ( $25\text{ }^\circ\text{C} < T_Q < 35\text{ }^\circ\text{C}$ ), iniciando-se cada ensaio no instante em que a vedação térmica daquela porta fica exclusivamente a cargo da cortina de ar.

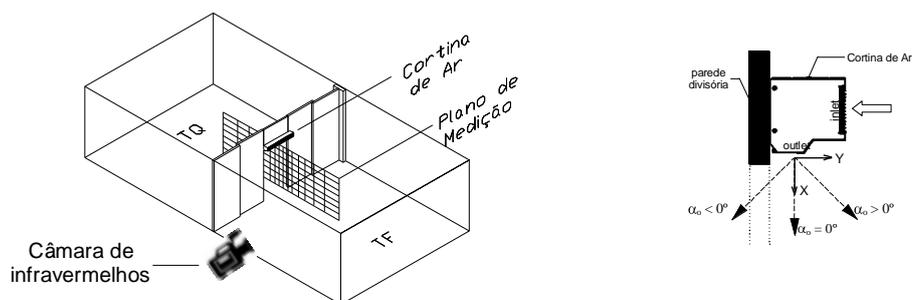


Figura 1 – Esquema da instalação experimental com indicação da posição do plano de medição e da câmara de infravermelhos durante o levantamento dos campos de velocidade e temperatura do ar nas imediações da porta (esq.); convenção usada para eixos/ângulos (dir.).

## AS METODOLOGIAS EXPERIMENTAIS

Neste trabalho foram aplicadas algumas metodologias que a seguir resumidamente se descrevem, podendo encontrar-se em [1,2,3,4,5] uma descrição mais detalhada das mesmas.

### Levantamento dos campos de velocidade e temperatura do ar

A medição da velocidade e temperatura do ar nas zonas consideradas de interesse foi efectuada através de uma técnica de “point measuring” envolvendo 16 sondas pertencentes a uma cadeia de anemometria térmica de baixa velocidade. O sistema é caracterizado por oferecer um elevado nível de sensibilidade e exactidão, garantindo uma precisão de  $0.02\text{ m/s} \pm 2\%$  do valor medido na velocidade do ar e  $\pm 0.3\text{ }^\circ\text{C}$  na temperatura, cobrindo uma gama de  $0.05\text{ m/s}$  até  $5\text{ m/s}$  e de  $0\text{ }^\circ\text{C}$  até  $50\text{ }^\circ\text{C}$ , respectivamente. As sondas foram estrategicamente fixadas a um suporte de forma a coincidirem com a malha de medida estabelecida segundo um plano vertical perpendicular ao da porta (Figura 1). O “porta-sondas” assim constituído percorreu, uma a uma, cada fiada horizontal de pontos de medida. Para estudar detalhadamente o desenvolvimento do jacto em condições isotérmicas usou-se um mecanismo de dois eixos (horizontal e vertical) para posicionar uma das sondas em cada um dos pontos da malha de medida durante o tempo necessário para se fazer a aquisição de sinal enquanto uma segunda sonda registava a velocidade de descarga do jacto.

## Visualização do escoamento através de termografia por infravermelhos

O mapeamento de um escoamento através de técnicas de “*point measuring*” necessita de muito tempo para a sua concretização, obrigando, por consequência, a cuidados acrescidos com a reposição das condições iniciais de ensaio. A alternativa é recorrer a uma técnica de medida do tipo “*whole-field*” que permita visualizar a topologia do escoamento. Com este método, adaptado de [6], utiliza-se um ecrã de baixa massa térmica que serve de alvo a uma câmara termográfica de infravermelhos, obtendo-se sequências de imagens instantâneas (termogramas) que são indiciadoras do campo de temperaturas e do movimento das massas de ar na vizinhança da porta estudada. Como ecrã de medida usou-se uma folha de papel cenário com  $3\text{ m} \times 2\text{ m} \times 0.25\text{ mm}$ , mantida perfeitamente esticada na direcção perpendicular à porta e paralela à direcção principal do escoamento (coincidente com o plano de medição representado na Figura 1). A câmara de IR utilizada possui um detector de microbolómetro refrigerado com  $320 \times 240$  pixéis e uma sensibilidade térmica inferior a  $0.1\text{ }^\circ\text{C}$ , sendo capaz de detectar níveis de temperatura próximas do ambiente. Atendendo à distância em relação ao alvo e ao tipo de lente utilizada, os termogramas obtidos correspondem a zonas do alvo com  $2.2\text{ m} \times 2.9\text{ m}$ , com uma resolução espacial de  $7\text{ mm} \times 9\text{ mm}$ . Para ulterior localização dos pontos de referência usaram-se “marcadores” feitos de pequenas tiras de folha de alumínio coladas no ecrã alvo. Os arquivos digitais a 12 bits foram processados através de programas informáticos adequados de modo a permitir a visualização (a cores ou em níveis de cinzento) da distribuição superficial da temperatura na zona-alvo e/ou a efectuar análises térmicas mais detalhadas sobre as imagens recolhidas (máximos e mínimos de temperatura, realce de zonas de interesse através da criação de linhas isotérmicas, etc.).

## RESULTADOS OBTIDOS

O índice de vedação propiciado pelas diferentes condições de funcionamento de uma cortina de ar pode ser inferido da comparação de resultados em relação a uma situação de “referência” na qual a porta é deixada aberta e totalmente desprotegida. As figuras seguintes ajudam a visualizar os fenómenos que ocorrem nessas condições.

O termograma da Figura 2 mostra que as maiores variações de temperatura ocorrem do lado da sala “fria”. Tanto nesta como na imagem da direita, obtida após processamento dos dados recolhidos pelas sondas, pode observar-se o desenvolvimento de um regime típico de convecção natural em que o escoamento é dominado pelas forças de impulsão de origem térmica. Embora o “campo de observação” seja muito apertado, há indícios da existência de um regime de recirculação de massas de ar entre as duas salas, mais tarde confirmado através de modelação numérica tridimensional (Figura 3). Nesta figura é ainda perceptível o bloqueio propiciado pela porção de parede existente por cima do umbral da porta, responsável pela estratificação térmica na sala “quente”.

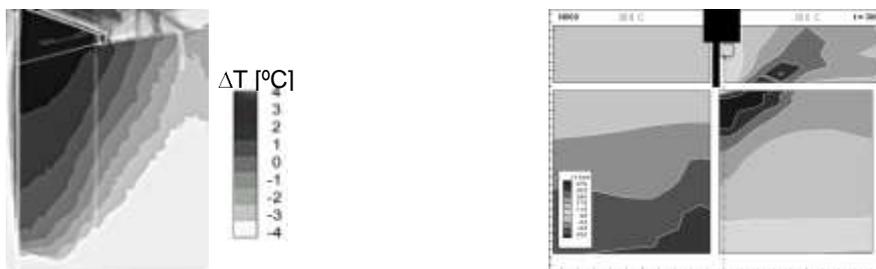


Figura 2 – Situação de referência  $U_0 = 0\text{ m/s}$ ,  $H_p = 2.25\text{ m}$  e  $\Delta T = 10\text{ }^\circ\text{C}$ , 300 s após o início do ensaio: campo de temperaturas obtido por termografia de infravermelhos (esq.); variação da temperatura local instantânea  $T$  adimensionalizada pela temperatura inicial  $T_i$  (dir.).

As imagens da Figura 4 foram obtidas para uma dada condição de funcionamento da cortina de ar, nelas se podendo ver que o ar que é inicialmente arrastado da sala oposta é para ela novamente derramado junto ao solo. São também evidentes os efeitos cumulativos da

injecção/aspiração do ar, os quais fazem o jacto deflectir para o compartimento onde o aparelho se encontra instalado, ainda que ambas as salas estejam à mesma temperatura ou que o jacto de ar seja descarregado na vertical (Figura 5).

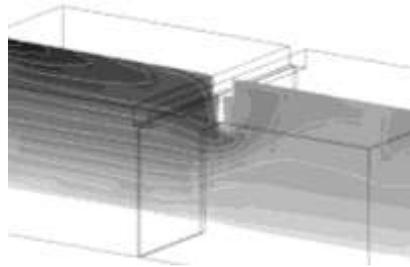


Figura 3 – Simulação numérica 3D do campo de temperaturas do ar ao longo de um plano vertical transversal à porta para a configuração de referência  $U_0 = 0$  m/s,  $H_P = 2.25$  m e  $\Delta T = 10$  °C.

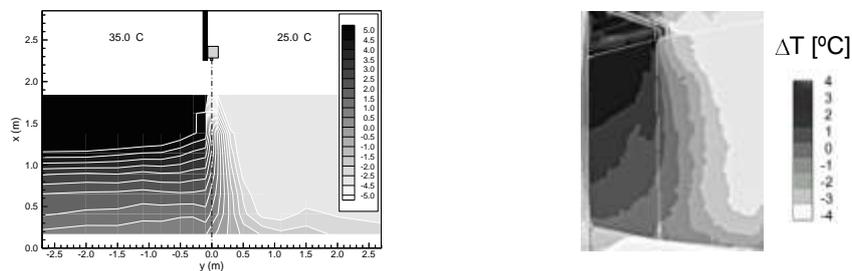


Figura 4 – Distribuição da temperatura do ar na vizinhança da porta para a configuração  $U_0 \approx 5$  m/s,  $H_P = 2.10$  m,  $\Delta T = 10$  ° e  $\alpha_0 = 0^\circ$ : mapeamento com sondas (esq.); imagem de infravermelhos (dir.)

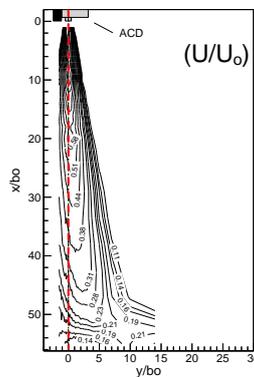


Figura 5 – Distribuições dos iso-contornos da velocidade do jacto gerado para  $U_0 \approx 5$  m/s,  $H_P = 2.10$  m,  $\Delta T = 10$  °C e  $\alpha_0 = 0^\circ$ , visualizados segundo um plano transversal à porta.

A sequência de termogramas da Figura 6 exemplifica bem o que advém de uma deficitária velocidade inicial do jacto face à altura da porta a vedar. Através da isotérmica do jacto observa-se que o mesmo é imediatamente deflectido pelas forças transversais devidas à impulsão térmica, causando a sua “quebra e impedindo-o de atingir o chão e a ter lá um ponto de impacto. Obviamente que para esta condição não é de esperar um grande efeito de vedação, tendo-se determinado que é cerca de 25% inferior à da respectiva situação de referência. Com o aumento da velocidade a cortina torna-se cada vez mais estável, sendo notória a aproximação do ponto de impacto do jacto da ombreira da porta.

Para finalizar, a sequência de imagens na Figura 7 revela a dificuldade do jacto em estabelecer contacto com o chão nos momentos iniciais após a entrada em funcionamento da cortina de ar. Só após cerca de 3 minutos é que se verifica que, à excepção de uma pequena zona junto ao solo, o espaço ocupado “interior” permanece praticamente isotérmico e os gradientes

horizontais de temperatura ficam limitados à região de desenvolvimento da cortina, próxima do plano da porta.

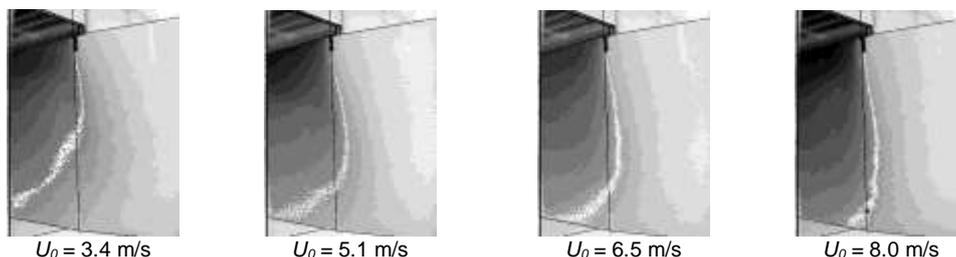


Figura 6 – Sequência de termogramas obtidos para valores crescentes da velocidade inicial do jacto,  $U_0$ , em ensaios efectuados para a configuração  $H_P = 2.25 \text{ m}$ ,  $\Delta T = 10 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $\alpha_0 = 0^\circ$ .

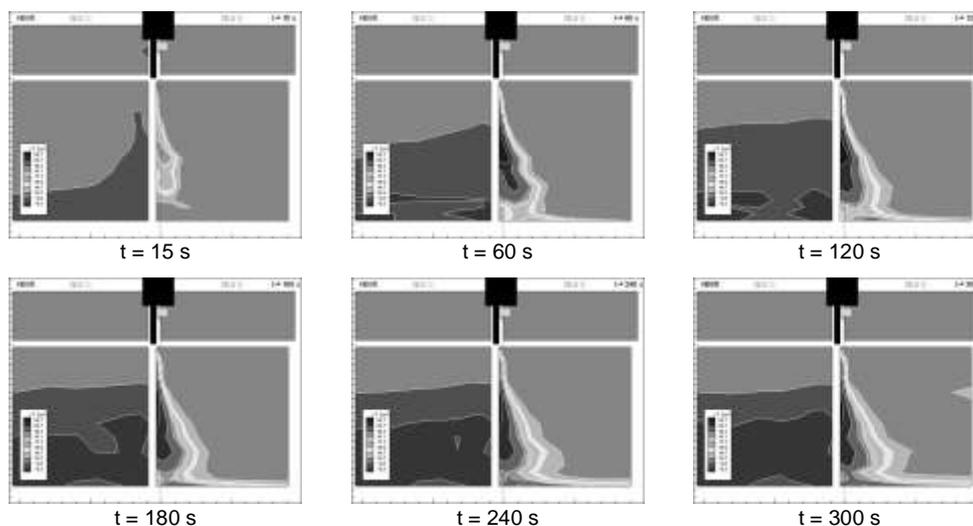


Figura 7 – Evolução temporal da variação da temperatura local instantânea  $T$  adimensionalizada pela temperatura inicial  $T_i$ , correspondente ao funcionamento da cortina de ar nas condições  $U_0 = 4.5 \text{ m/s}$ ,  $H_P = 2.25 \text{ m}$ ,  $\Delta T = 10 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $\alpha_0 = 0^\circ$ .

## REFERÊNCIAS

- [1] Silva, M.C., Neto, L., Brites, G., 2002. Aerodynamic sealing with air curtains - experimental tests. In Proceedings of the 8th International Conference on Air Distribution in Rooms (RoomVent'2002), Copenhagen, pp. 709-712.
- [2] Neto, L., 2002. O LabVIEW e os ensaios experimentais de cortinas de ar. In: WEB site da National Instruments – Portugal.
- [3] Neto, L., Silva, M.C., 2003. Utilização da termografia por infra-vermelhos na avaliação do desempenho de cortinas de ar. In: Proceedings das II Jornadas Técnicas de Primavera da EFRIARC - Climatização e Refrigeração em Portugal, Coimbra.
- [4] Neto, L., Silva, M.C., 2003. Estudo da vedação aerodinâmica de espaços climatizados - alguns resultados. In: Proceedings do VI Congresso Ibero-Americano de Engenharia Mecânica (CIBEM6), Coimbra, pp. 647-652.
- [5] Neto, L., Silva, M.C., 2004. Utilização de um aparelho de cortina de ar no isolamento térmico de duas divisões. In: Proceedings do Encontro Nacional de Isolamento Térmico e Acústico - ENITA, Estoril.
- [6] Cehlin, M., Moshfegh, B., Sandberg, M. 2000. Visualization and measurement of air temperature using infrared thermography. In: Proceedings of the 7th International Conference on Air Distribution In Rooms (RoomVent'2000), Reading, pp. 339-347.