

UMA VISÃO CRÍTICA SOBRE A UTILIZAÇÃO DE CORTINAS DE AR EM ESTABELECIMENTOS COMERCIAIS CLIMATIZADOS

Luís P. C. Neto¹, Andreia B. Centeio¹, Sandra M. Sequeira¹, M. C. G. Silva²

¹ **Departamento de Engenharia Industrial**, Escola Superior de Tecnologia do Instituto Politécnico de Castelo Branco – Avenida do Empresário, 6000-767 Castelo Branco. Telefone 272 339300, Fax 272 339399, luisneto@est.ipcb.pt

² **Departamento de Engenharia Mecânica**, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra – Pólo II, 3030-290 Coimbra. Telefone 239 790729, Fax 239 790771, manuel.gameiro@dem.uc.pt

UMA VISÃO CRÍTICA SOBRE A UTILIZAÇÃO DE CORTINAS DE AR EM ESTABELECIMENTOS COMERCIAIS CLIMATIZADOS

Luís Neto, Andreia Centeio, Sandra Sequeira, Gameiro da Silva

Resumo — Tendo por base um conjunto de ensaios realizados numa instalação experimental especialmente concebida para o efeito, é avaliada a influência de alguns parâmetros geométricos e dinâmicos sobre a eficácia da vedação térmica alcançada com a utilização de aparelhos de cortina de ar. A informação recolhida permitiu estabelecer diversas recomendações sobre a selecção, instalação e operação deste tipo de aparelho, as quais, na prática, nem sempre são seguidas, conforme se pode antever dos dados preliminares recolhidos em vistorias técnicas realizadas a estabelecimentos comerciais que utilizam este tipo de solução.

Palavras-chave: vedação térmica, cortina de ar, transferência de energia térmica, poupança de energia.

1. INTRODUÇÃO

Ao longo dos últimos anos tem-se assistido a um incremento significativo da utilização de aparelhos de cortina de ar como forma de vedar termicamente espaços comerciais climatizados em relação a um meio ambiente exterior inóspito. As vantagens decorrentes da aplicação e uso deste tipo de solução são bem conhecidas [1,2,3,4]: limitar, tanto quanto possível, as inevitáveis perdas de energia térmica através de uma porta que se pretende manter sempre aberta e desimpedida, retirando daí todos os benefícios que lhe são subsequentes e que não são aqui contabilizáveis – a estética, a facilidade de acesso e o conforto térmico existente no interior do estabelecimento comercial, encorajam a circulação de clientes e potenciam o aumento das receitas.

A proliferação de cortinas de ar não parece ter sido acompanhada, todavia, de um adequado cuidado na selecção, instalação e operação deste tipo de aparelho, sendo frequente encontrarem-se instalações que, a nosso ver, não satisfazem os requisitos exigidos para um bom desempenho do seu funcionamento. Esta constatação é resultante de uma campanha de vistorias técnicas realizadas a estabelecimentos comerciais que utilizam este tipo de solução e encontra-se alicerçada nos resultados obtidos ao longo de um extenso conjunto de medições efectuadas numa instalação experimental.

O artigo que agora se apresenta constitui a sequência lógica da comunicação apresentada há um ano atrás no 1º Encontro Nacional de Isolamento Térmico e Acústico (na qual se fez a descrição pormenorizada da montagem experimental utilizada bem como das metodologias e técnicas que foram empregues durante os ensaios realizados em laboratório e que aqui resumidamente se apresentam para melhor explicar os resultados obtidos) agora complementada com esta vertente de “campo”, fruto de um levantamento exaustivo das reais condições de instalação e de operação dos aparelhos de cortina de ar utilizados como meio de vedação térmica de espaços comerciais na cidade de Castelo Branco.

2. MONTAGEM EXPERIMENTAL

A caracterização da vedação aerodinâmica promovida pelo aparelho de cortina de ar foi realizada na instalação experimental esquematizada na Fig. 1, a qual é descrita mais

detalhadamente em [5,6,7,8,9,10]. 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 ($L_P = 1.12\text{ m}$).

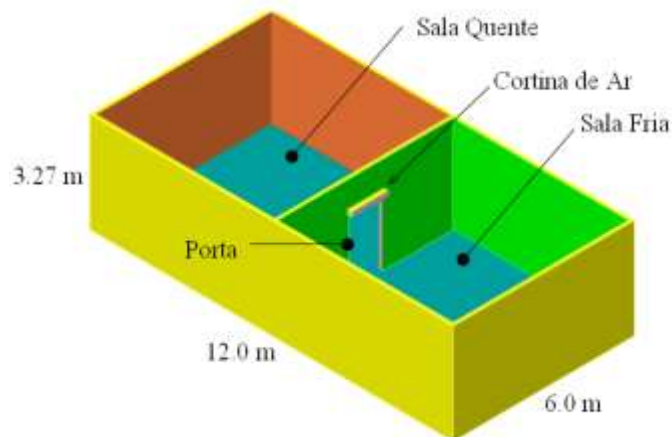


Fig. 1 – Esquema e dimensão geral da infra-estrutura da instalação experimental.

Por cima desta porta foi instalado um aparelho de cortina de ar equipado com um ventilador “tangencial” accionado 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) compreendida entre 0 e 8 m/s. O ângulo de descarga do jacto (α_0) é imposto por lâminas existentes no interior do bocal, podendo ser variado entre $+15^\circ$ e -20° (Fig. 2).

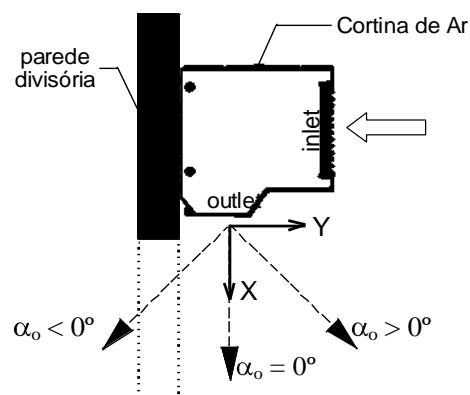


Fig. 2 – Convenção usada para eixos/ângulos.

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 da porta fica exclusivamente a cargo da cortina de ar

3. METODOLOGIAS E TÉCNICAS EXPERIMENTAIS

Para a realização deste trabalho foram utilizadas algumas técnicas experimentais diferentes, mas complementares entre si, que a seguir se descrevem, embora de um modo resumido. Uma descrição mais detalhada sobre as mesmas pode ser encontrado nas referências bibliográficas [5,6,7,8,9,10].

Técnica de gases traçadores – O decaimento da concentração de um gás traçador (N_2O), previamente libertado e uniformemente diluído num dado compartimento, fornece um conjunto importante de informações acerca das trocas gasosas ocorridas entre esse compartimento e o meio que lhe é adjacente – quer seja o ambiente exterior ou um outro compartimento. Um aparelho de espectroscopia foto-acústica de radiação infra-vermelha foi configurado para medir, de minuto a minuto, as concentrações de N_2O , obtendo-se, posteriormente, a taxa de renovação do ar (n) nesse compartimento com base em valores consecutivos dos valores recolhidos:

$$n = \frac{\ln C_{t+1}/C_i - \ln C_t/C_i}{\Delta t} \quad (1)$$

Por definição, a taxa de renovação do ar representa o número de vezes por unidade de tempo que o ar de um determinado compartimento fechado é substituído por ar vindo do seu exterior. Em termos práticos esse número pode ser obtido através da razão entre o caudal volúmico de ar que entra, Q , e o volume efectivo desse compartimento, V :

$$n [h^{-1}] = \frac{Q \text{ m}^3/h}{V \text{ m}^3} \quad (2)$$

Na situação aqui em estudo Q representa o fluxo de ar que passa através dos limites ou fronteiras do compartimento em causa, ou seja, pela porta que se pretende vedar. Obviamente que é de esperar que este valor seja mais elevado quando a porta de ligação entre os dois compartimentos se encontra aberta e totalmente desprotegida, situação esta que se reveste de particular interesse por servir de referência para a avaliação do desempenho da vedação produzida pela cortina de ar.

Se designarmos por n_j a taxa de renovação do ar que ocorre para uma dada velocidade inicial do jacto (U_j) e por n_0 o valor correspondente numa situação em que a cortina de ar se encontra desligada ($U_0 = 0$), pode-se definir um rendimento de vedação (η_v) através da equação (3).

$$\eta_v = \frac{n_0 - n_j}{n_0} \quad (3)$$

Conhecido este rendimento pode-se determinar a correspondente eficácia do processo de vedação (E_v) através da equação (4).

$$E_v = \frac{1}{1 - \eta_v} \quad (4)$$

sendo que $E_v = 1$ corresponde a um efeito de vedação nulo (porta aberta e cortina desligada), enquanto a vedação ideal (porta hermeticamente fechada) equivaleria a $E_v \rightarrow \infty$.

Levantamento dos campos de velocidade e temperatura do ar – A medição dos valores de velocidade e de temperatura do ar em zonas considerados de interesse para a percepção dos fenómenos em causa foi inicialmente efectuada através de uma técnica de “*point measuring*”. Para este efeito, utilizou-se um sistema de aquisição de dados para adquirir os sinais registados por dezasseis sondas pertencentes a uma cadeia de anemometria térmica de baixa velocidade vocacionada para a análise de escoamentos de ventilação. Este sistema é caracterizado por oferecer um elevado nível de exactidão e de

sensibilidade, 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 m/s até 5 m/s e de $0 \text{ }^\circ\text{C}$ até $50 \text{ }^\circ\text{C}$, respectivamente.

São de destacar as medições efectuadas ao longo de uma malha de medida estabelecida segundo um plano vertical perpendicular ao da porta (Fig. 3), a qual apresenta uma maior densidade na zona central onde os gradientes das grandezas a medir são naturalmente mais elevados.

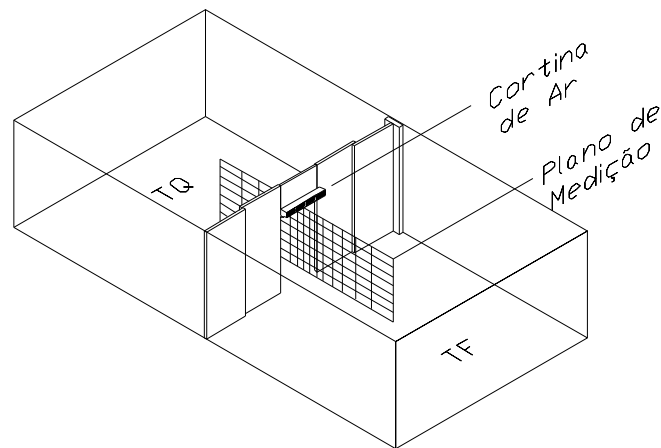


Fig. 3 – Malha de medida utilizada para o levantamento dos campos de velocidade/temperatura do ar nas imediações da porta.

Detecção do ponto de impacto do jacto no solo – Para todas as situações estudadas foram efectuados varrimentos transversais à porta com o intuito de determinar com exactidão a localização do ponto de impacto do jacto no solo. Para tal recorreu-se a um mecanismo de atravessamento accionado por um motor de passo de modo a deslocar um termo-anemómetro a 10 mm de distância do chão. O comando por computador permitiu posicionar com precisão a sonda de modo a cobrir uma zona de medida em redor do plano vertical médio da cortina de ar ($y = 0$). Designar-se-á por d a distância que vai desde esse ponto até ao local onde é detectado o impacto do jacto da cortina de ar com o solo.

Visualização do escoamento através de termografia por infravermelhos – Para registar as temperaturas e melhor visualizar o campo do escoamento na vizinhança do jacto gerado pelo aparelho de cortina de ar foi usada uma técnica de medida do tipo “*whole-field*” [10, 11]. Com este método 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. 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 sobre a qual estava colocado o aparelho de cortina de ar e paralela à direcção principal do escoamento (localização comparável à do plano de medida representado na Fig. 3).

As temperaturas foram registadas com uma câmara de infra-vermelhos que possui como detector um microbolómetro refrigerado com 320×240 pixéis, sensível à radiação de grande comprimento de onda e com uma sensibilidade térmica inferior a $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$, apropriado para a detecção de níveis de temperatura próximas do ambiente quando operado na gama $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ a $+250 \text{ }^\circ\text{C}$. Para que os termogramas fossem registados com um mínimo de distorção a câmara de IR foi posicionada, tanto quanto possível, na perpendicular ao ecrã alvo. De modo a identificar, à posteriori, a localização do eixo central do jacto de ar gerado pela cortina bem como outros pontos de referência julgados de interesse, pequenas tiras de folha de alumínio foram coladas no ecrã alvo de modo a servirem de “marcadores”.

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Conforme já se disse anteriormente, uma maneira de se quantificar o efeito da vedação aerodinâmica proporcionada pelas diferentes condições de operação de um aparelho de cortina de ar é através da comparação dos resultados obtidos com uma situação de “referência”, na qual a porta é deixada aberta e totalmente desprotegida [1,12,13]. Será precisamente essa situação a primeira a ser analisada.

O termograma de infravermelhos apresentado na Fig. 4 ajuda a visualizar o que acontece nas imediações de uma porta sujeita a uma determinada diferença de temperatura, numa situação em que não há funcionamento da cortina de ar. Este termograma revela que as maiores variações de temperatura ocorrem do lado da sala “fria”.

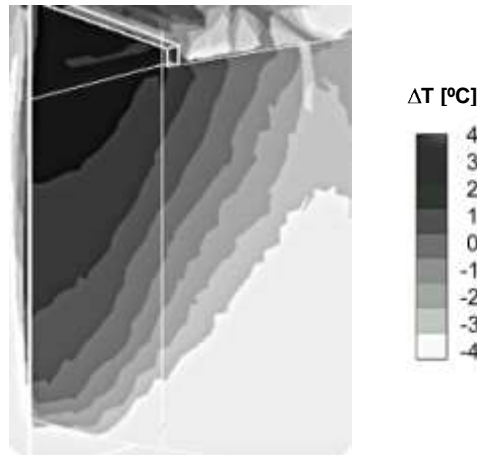


Fig. 4 – Termograma correspondente ao caso de referência ($U_0 = 0$ m/s) obtido no instante $t = 300$ s para uma configuração em que $H_p = 2.25$ m e $\Delta T = 10$ °C.

Tanto nesta como na Fig. 5 (obtida após processamento e adimensionalização dos dados recolhidos pela técnica de “point measuring” ao fim de 5 minutos de aquisição) pode observar-se o desenvolvimento de um regime típico de convecção natural em que o escoamento é dominado quase essencialmente pelas forças de impulsão de origem térmica. Embora o campo de visão de ambas seja relativamente apertado, há indícios claros da existência de um regime de recirculação das massas de ar entre as duas salas.

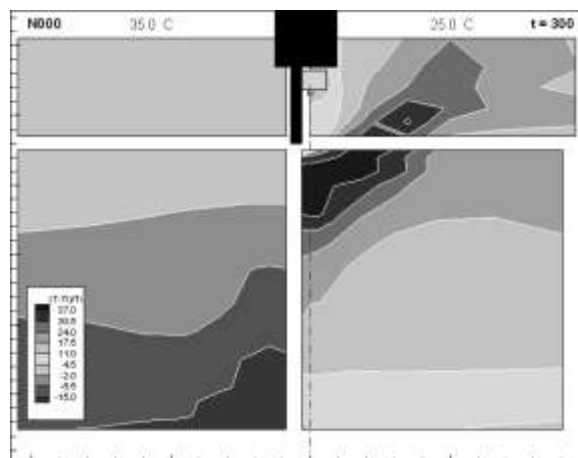


Fig. 5 – Variação da temperatura local instantânea T adimensionalizada pela temperatura inicial T_i para a situação de referência $U_0 = 0$ m/s, $H_p = 2.25$ m, $\Delta T = 10$ °C.

Na Fig. 6 apresentam-se os campos de velocidade e de temperatura do ar obtidos por *point measuring* ao longo de um plano vertical transversal à porta. Ambas as imagens

revelam uma clara deflexão do jacto em direcção ao compartimento onde o aparelho de cortina de ar se encontra instalado e confirmam que o ar que é inicialmente arrastado da sala oposta é para ela novamente derramado junto ao chão. Este comportamento é típico dos aparelhos de cortina de ar do tipo não-recirculado [14] uma vez que os efeitos cumulativos de injeção e de aspiração fazem o jacto de ar deflectir para o compartimento onde o aparelho se encontra alojado, mesmo que o jacto de ar seja inicialmente descarregado na vertical ($\alpha_0 = 0^\circ$) ou que ambas as salas estejam à mesma temperatura (Fig. 6a), acentuando-se com a diferença de temperaturas entre as salas (Fig. 6b).

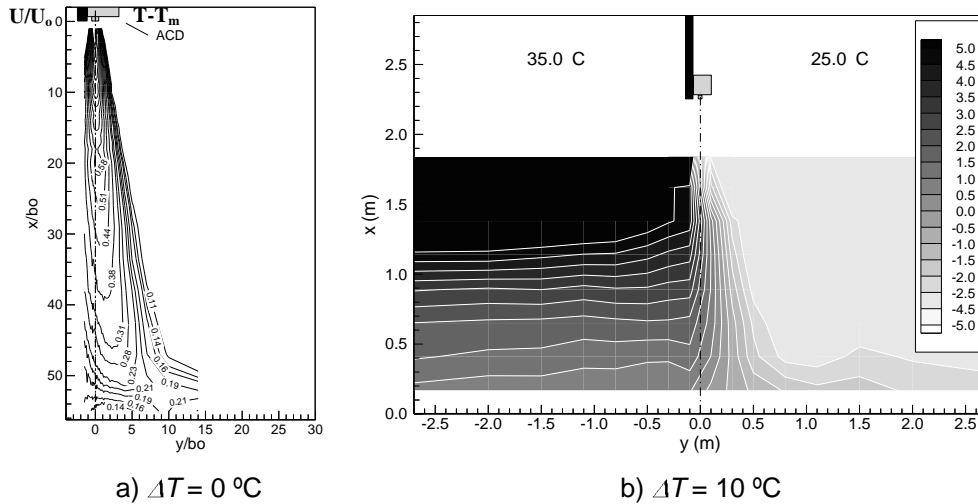


Fig. 6 – Distribuições dos iso-contornos de velocidade (esq.) e de temperatura (dir.) do ar ao longo de um plano transversal à porta, obtidos para $H_P = 2.10$ m, $U_0 \approx 5$ m/s e $\alpha_0 = 0^\circ$.

Esta deflexão natural do jacto para o lado “interior” também é perceptível na Fig. 7, a qual mostra os resultados obtidos numa sequência de testes efectuados para determinar a localização do ponto de impacto do jacto no solo para diversas alturas de instalação da cortina de ar (H_{CA}). A sua análise confirma que em condições isotérmicas (ISOT) a localização do ponto de impacto (d) é invariável com a velocidade inicial do jacto, constituindo contudo um limite assintótico para o caso não-isotérmico (AVAC), tal como já tinha sido previsto por [15,16]. De qualquer modo, este efeito nefasto pode (e deve) ser parcialmente contrariada com uma adequada orientação da descarga do jacto de ar para o lado oposto ao da montagem do aparelho, conforme se demonstrará mais à frente.

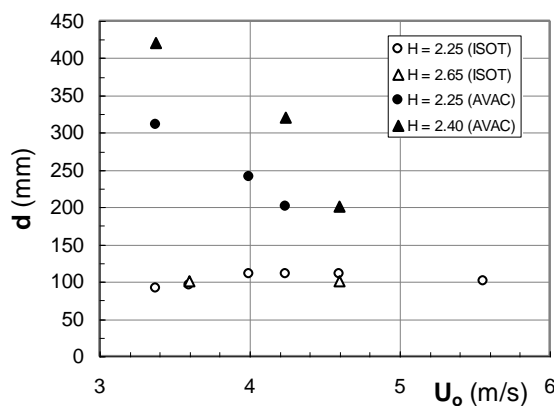


Fig. 7 – Localização do ponto de impacto do jacto no solo em função da sua velocidade inicial, para casos isotérmicos (ISOT) e não-isotérmicos (AVAC), com $\alpha_0 = 0^\circ$.

A capacidade de vedação de uma cortina de ar deste tipo também depende do equilíbrio entre a quantidade de movimento inicial do jacto e as forças transversais que se pretendem neutralizar com a sua utilização. O primeiro dos termogramas da Fig. 8 mostra-nos o que acontece quando a velocidade inicial do jacto é demasiado baixa face à altura da porta a vedar e à diferença de temperatura existente entre as duas regiões. Como se pode ver, o jacto é quase imediatamente deflectido pelas forças transversais devidas à impulsão térmica, levando à sua “quebra”, não chegando a atingir o chão e a ter lá uma zona de impacto. Para esta condição de operação, a técnica de gases traçadores revelou que não há qualquer efeito de vedação e que, de facto, a taxa de renovação do ar na sala “fria” acaba mesmo por ser 25% superior à verificada para a situação de não-funcionamento do aparelho de cortina de ar ($U_0 = 0$ m/s). À medida que se aumenta a velocidade inicial do jacto, o funcionamento da cortina vai-se tornando cada vez mais estável, sendo notório que o ponto de impacto do jacto de ar no solo tende a aproximar-se da ombreira da porta.

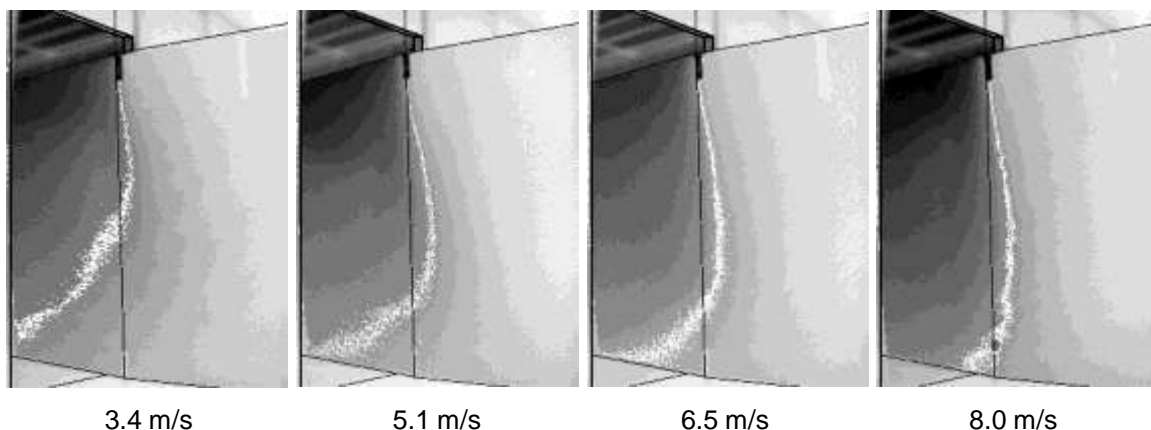


Fig. 8 – Sequência de termogramas obtidos para valores crescentes da velocidade inicial do jacto cinco minutos após o início de cada um dos ensaios efectuados para a configuração $H_p = 2.65$ m, $\Delta T = 10$ °C, $\alpha_0 = 0^\circ$.

A Fig. 9 traduz bem como uma conjugação criteriosa destes dois parâmetros de funcionamento (velocidade e orientação do jacto) consegue conferir uma maior estabilidade e eficácia à cortina. Conforme se pode observar, para $\alpha_0 = 0^\circ$ e para a menor velocidade inicial do jacto, o ponto de impacto da cortina de ar no solo chega a situar-se a uma distância $d = 450$ mm do eixo central do bocal, começando a diminuir com o aumento de U_0 e atingindo um valor ligeiramente superior a 150 mm quando este chega ao máximo. A máxima eficácia de vedação conseguida foi $E_v = 2.56$, tendo sido obtida para $U_0 = 6.5$ m/s e $d = 200$ mm. Inclinando o jacto segundo um ângulo $\alpha_0 = -10^\circ$ consegue-se fazer aproximar o ponto de impacto da ombreira da porta de maneira significativa. A máxima eficácia de vedação não só é atingida com velocidades do jacto mais baixas ($U_0 \approx 4.0$ m/s), como também o seu valor passa a ser superior ($E_v = 3.0$). Para $\alpha_0 = -20^\circ$, ângulo máximo que foi possível impor ao jacto, obteve-se o maior efeito de vedação para a configuração em estudo ($E_v = 3.4$), ocorrendo para uma velocidade inicial do jacto tão baixa como 3.4 m/s.

As mesmas conclusões podem ser retiradas da Fig. 10, na qual se pode ver ainda que, para cada um dos ângulos de inclinação inicial do jacto, existe uma velocidade óptima de injeção de ar que proporciona as condições de máximo efeito de vedação, minimizando, por conseguinte, a transferência de calor entre as duas salas.

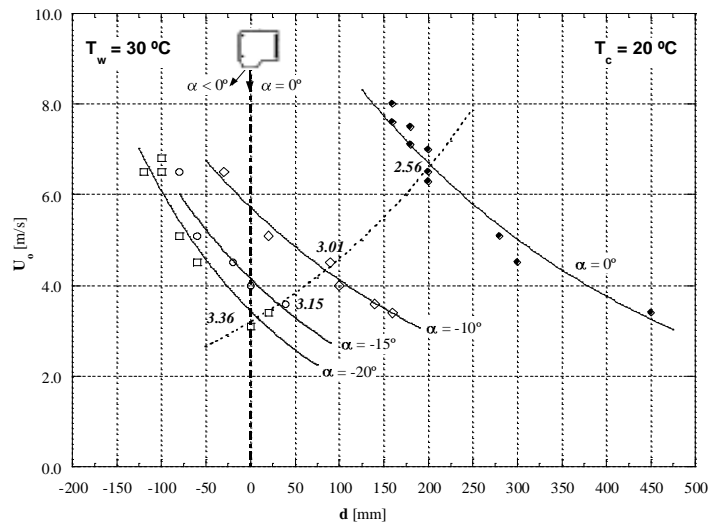


Fig. 9 – Efeito do ângulo e da velocidade inicial do jacto sobre a localização dos pontos de impacto da cortina no solo e no valor máximo de eficácia de vedação conseguida para a configuração $H_p = 2.25 \text{ m}$ e $\Delta T = 10 \text{ }^\circ\text{C}$.

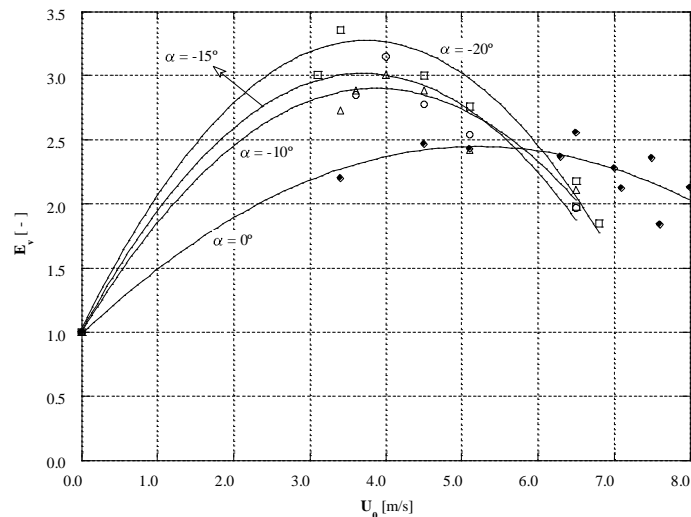


Fig. 10 – Efeito da velocidade e do ângulo inicial do jacto sobre a eficácia de vedação conseguida.

5. E NA PRÁTICA?

Para se apurar das reais condições de instalação e de funcionamento dos aparelhos de cortina de ar foram efectuadas uma série de vistorias a estabelecimentos comerciais que aplicam este tipo de solução. Os dados recolhidos em 36 visitas efectuadas na cidade de Castelo Branco dão-nos uma visão não muito animadora das verdadeiras condições em que estes aparelhos funcionam uma vez que apenas quatro desses estabelecimentos comerciais puderam ser classificados como possuindo uma “boa instalação” [18]. Nos restantes trinta e dois estabelecimentos foram detectadas deficiências e/ou insuficiências de vária ordem que a seguir resumidamente se explicitam.

1. Na maior parte das vezes a deficiência provém de uma má selecção do aparelho de cortina de ar a utilizar, sendo frequente encontrarem-se bocais de descarga cujo comprimento é manifestamente insuficiente face à porta que se pretende vedar, permitindo o escape de importantes massas de ar através de um ou de ambos os lados (Fig. 11).



Fig. 11 – Exemplo de insuficiência do parâmetro geométrico relativo ao comprimento do bocal da cortina de ar.

2. É igualmente frequente encontrar situações em que, mercê de contingências de variada natureza (impedimentos físicos, razões estéticas, etc.), há uma incorrecta instalação do aparelho de cortina de ar. Este tipo de deficiência está bem patente na Fig. 12, onde se pode ver uma fotografia ilustrativa de um bocal de descarga que se encontra demasiado afastado em relação à ombreira da porta que se pretende vedar. Também aqui é de esperar que ocorra o escape e/ou a entrada de importantes massas de ar, agora por detrás do próprio jacto.



Fig. 12 – Exemplo de deficiência do parâmetro geométrico relativo ao afastamento do bocal da cortina de ar (vista de baixo).

3. Também num número significativo de instalações verificou-se uma inadequada velocidade inicial do jacto – quer por insuficiência, quer por excesso – face às especificações técnicas dos respectivos fabricantes e/ou por comparação com os resultados obtidos em laboratório.

No primeiro caso (insuficiência) a cortina de ar não consegue evitar o escape de importantes massas de ar por debaixo de um jacto “quebrado”.

Já no segundo caso (excesso), além do consumo excessivo de energia eléctrica, é o próprio aparelho de cortina de ar que, ao invés do que seria desejável e expectável, fomenta o arrastamento e a mistura das diferentes massas de ar, incrementando ele próprio a energia térmica transferida através da porta que se pretendia inicialmente vedar.

Na Fig. 13 mostra-se uma situação em que o aparelho de cortina de ar se encontra instalado a uma grande altura em relação ao solo, sendo de prever que



Fig. 13 – Exemplo de deficiência do parâmetro dinâmico da velocidade do jacto originado pela excessiva distância do bocal da cortina de ar em relação ao solo.

4. No que diz respeito ao ângulo inicial do jacto, verificou-se que uma grande percentagem dos aparelhos de cortina de ar nem sequer estão dotados de mecanismos que permitam ajustar a sua orientação. Já nos restantes aparelhos, para os quais havia a possibilidade de α_0 ser alterado, em nenhum caso tal ajuste foi tido em consideração (excepto numa instalação em que as duas grelhas de orientação existentes se encontravam orientadas, mas em sentidos totalmente opostos...).
5. Nalgumas instalações foi ainda detectada a presença de “corpos” que constituem obstáculos ao normal desenvolvimento do jacto de ar da cortina, tal como se exemplifica na Fig. 14 e na Fig. 15.



Fig.14 – Exemplo de uma situação em que são notórias as interferências e as fugas do jacto de ar.



Fig.15 – Outro exemplo de uma situação em que é notória a interferência provocada pelo cortinado e respectivo varão no desenvolvimento de um jacto de ar plano descendente.

6. Foram também detectados aparelhos de cortina de ar cujo estado de operacionalidade estava longe do desejável, quer por falta de limpeza periódica das grelhas e demais constituintes (Fig. 16), quer por nítida degradação das características do grupo motor-ventilador (velocidade inicial do jacto muito abaixo dos valores especificados pelo fabricante).



Fig.16 – Exemplo de um aparelho de cortina de ar a “funcionar” sob condições de nítida degradação.

6. CONSEQUÊNCIAS DE UM DEFICIENTE DESEMPENHO

De acordo com [17], a principal perda de energia através de uma porta desprotegida pode ser avaliada através da correspondente perda de calor sensível devida ao escape de ar frio do compartimento interior para o compartimento exterior. Do ponto de vista prático, esta perda de energia pode ser calculada partindo-se do conhecimento do número de renovações de ar no compartimento em estudo:

$$\dot{Q}_o = \rho_{\text{int}} \cdot \left(\frac{n \cdot V_{\text{sala}}}{3600} \right) \cdot c_p \cdot T_{\text{ext}} - T_{\text{int}} \quad (5)$$

A aplicação desta fórmula aos dados colhidos na instalação experimental para uma configuração em que $H_p = 2.65$ m e $\Delta T = 10$ °C indicia uma “fuga” de calor através da porta na ordem dos 7 300 W, disparando para cerca de 13 230 W quando a diferença de temperatura entre as duas salas é aumentada para 15 °C.

Embora o aparelho de cortina de ar nunca possa eliminar completamente esta perda de energia através da porta, ele consegue, no entanto, reduzi-la significativamente, tal como evidencia a Tabela I, retirada de [10]. Apesar de se tratar de uma porta de grande dimensão vertical, verifica-se que o funcionamento da cortina de ar consegue reduzir significativamente a energia térmica em “fuga”, mesmo quando esta não está adequadamente regulada. Como seria de esperar, as poupanças energéticas são ainda mais significativas quando a velocidade inicial do jacto se aproxima do valor óptimo.

Tabela I – Poupanças energéticas obtidas com o funcionamento de uma cortina de ar numa porta em que $H_p = 2.65$ m e $\Delta T = 15$ °C

	U_o [m/s]				
	0.0	3.4	4.5	5.1	6.5
\dot{Q}_0 [W]	13 229	–	–	–	–
E_v [–]	1.00	0.80	2.78	3.04	1.84
\dot{Q}_j [W]	13 229	16 536	4 759	4 352	7 190
\dot{Q}_{MCA} [W]	–	120	120	120	120
[%]	100%	126%	37%	34%	55%

Chama-se agora a atenção para as implicações energéticas decorrentes do funcionamento da cortina com uma velocidade inicial do jacto insuficiente face à grande diferença de temperatura entre as duas regiões e à considerável altura da porta a vedar. É o que se verifica quando $U_o = 3.4$ m/s, dando origem a uma cortina de ar “quebrada” que não chega a atingir o solo e a ter lá uma zona de impacto. A deflexão da cortina para o lado da sala “quente” provoca um excessivo arrastamento do ar da sala “fria” pela metade inferior da porta, fazendo com que a taxa de renovação do ar naquela sala seja 25% superior aquela que é registada quando o aparelho de cortina de ar se encontra desligado. Entrando em consideração com o valor da energia requerida pelo motor da cortina, este regime de funcionamento caracteriza-se por um desperdício de energia que é 26% superior ao do caso de referência!

Uma questão que importa ainda esclarecer é a da viabilidade económica da utilização de um aparelho de cortina de ar como forma de vedação térmica de uma porta que se pretende manter totalmente aberta durante longos períodos de tempo, como acontece, por exemplo, nos estabelecimentos comerciais. A redução nos custos energéticos conseguida com a utilização de um aparelho de cortina de ar pode ser achada calculando-se a diferença entre a energia transferida através duma porta aberta e a energia transferida através dessa mesma porta quando ela se encontra protegida pela cortina de ar, dividindo esta diferença pelo coeficiente de eficiência (COP) da unidade de ar condicionado utilizada para a climatização do espaço interior (considerado aqui como sendo 2.9) e multiplicando o resultado final pelo preço da energia eléctrica (tomado como sendo 0.1 €/kWh). Deste modo, regulando-se a velocidade do jacto de modo a que o aparelho de cortina de ar opere no ponto de máxima eficiência de vedação, cada hora do

seu funcionamento representa uma poupança de cerca de 0.18 € em relação à situação em que a porta se encontra aberta e desprotegida. Como a este valor há a acrescentar um custo de 0.012 €/hora devido aos 120 W do motor da cortina, a factura horária aparecerá diminuída em cerca de 0.167 €. Uma vez que o aparelho de cortina de ar testado tem um preço de venda ao público na ordem dos 160 € e que o seu custo de instalação é considerado desprezável, o investimento inicial fica amortizado após 956 horas de utilização, o que corresponde a pouco mais de 5 meses se este estabelecimento estiver continuamente aberto ao público 8 horas por dia, 22 dias por mês.

6. CONCLUSÃO

Através dos resultados apresentados na primeira parte deste estudo foi possível concluir-se que o conjunto dos métodos desenvolvidos permitiu avaliar, de forma clara, o desempenho real de vedação aerodinâmica das cortinas de ar.

Para além disso, a aplicação sistemática destas metodologias e técnicas experimentais permitiu obter um conhecimento aprofundado dos campos do escoamento e da temperatura, proporcionando uma boa compreensão dos fenómenos convectivos em jogo.

Ficou demonstrado que, para um mesmo aparelho, a eficiência de vedação pode ser maximizada se for encontrada a relação óptima entre a velocidade do ar à saída da cortina e a diferença entre as temperaturas dos compartimentos a vedar. Para a escolha e para a instalação destes equipamentos, é também importante o conhecimento detalhado da influência dos parâmetros geométricos, nomeadamente a altura de montagem da cortina e a inclinação inicial do jacto.

O levantamento das verdadeiras condições de instalação e de operação dos aparelhos de cortina de ar em estabelecimentos comerciais climatizados revelou um panorama algo "desanimador". Embora se compreenda que nalgumas (poucas) situações, foram razões de ordem estética que imperaram, na esmagadora maioria das vezes não parece ter havido um cuidado na selecção e na instalação destes aparelhos. Mesmo do ponto de vista da sua utilização este estudo revelou que, salvo raras excepções, os donos e/ou funcionários dos estabelecimentos comerciais visitados não tinham uma noção clara acerca da funcionalidade dos aparelhos de cortina de ar, ficando ao critério de cada um a selecção do nível de velocidade do jacto. Contudo, uma análise às respostas registadas nos inquéritos que foram realizados revelou um grande grau de insatisfação dessas mesmas pessoas em relação ao desempenho das cortinas de ar como método de vedação térmica da porta...

REFERÊNCIAS

- [1] G. Hetsroni, "Heat transfer through an air curtain," PhD Thesys in Mechanical Engineering (Michigan State University), 1963.
- [2] G. R. Longdill e L. G. Wyborn, "Performance of air curtains in single storey cold stores," in Proc. XV International Congress of Refrigeration (Venice); pp. 77-88, 1979.
- [3] R. H. Howell e M. Shibata, "Heat transfer thru air doors on heated and cooled buildings," in Proc. The Fourth International Symposium on the Use of Computers for Environmental Engineering Related to Buildings (Tokyo), 1983.

- [4] E. B. Lawton e R. H. Howell, "Energy savings using air curtains installed in high-traffic doorways," ASHRAE Transactions, Vol. 101, pp. 136-143, 1995.
- [5] M. C. G. Silva, J. J. Costa, L. A. Oliveira, L. P. C. Neto, G. V. N. Brites e J. F. P. Barbosa, "Estudo aerodinâmico de cortinas de ar - relatório final do projecto PRODIBETA elaborado para a empresa Castanheira, Henriques & C^a Lda.," ADAI – Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial (Coimbra), 2000.
- [6] M. C. G. Silva, L. P. C. Neto e G. V. N. Brites, "Vedação aerodinâmica por cortina de ar - ensaios experimentais," in Proc. I Jornadas Técnicas de Primavera da EFRIARC – Climatização & Refrigeração em Portugal (Porto), 2001.
- [7] M. C. G. Silva, L. P. C. Neto e G. V. N. Brites, "Aerodynamic sealing with air curtains - experimental tests," in Proc. RoomVent'2002 – 8th International Conference on Air Distribution in Rooms (Copenhagen), 2002.
- [8] L. P. C. Neto, "O LabVIEW e os ensaios experimentais de cortinas de ar." Web site da National Instruments (Portugal), 2002.
- [9] L. P. C. Neto e M. C. G. Silva, "Utilização da termografia por infra-vermelhos na avaliação do desempenho de cortinas de ar," in Proc. II Jornadas Técnicas de Primavera da EFRIARC - Climatização e Refrigeração em Portugal (Coimbra), 2003.
- [10] L. P. C. Neto e M. C. G. Silva, "Utilização de um aparelho de cortina de ar no isolamento térmico de duas divisões," in Proc. ENITA – Encontro Nacional de Isolamento Térmico e Acústico (Estoril), Portugal, 2004.
- [11] M. Cehlin, B. Moshfegh, e M. Sandberg, "Visualization and measurement of air temperature using infrared thermography," in Proc. RoomVent'2000 – 7th International Conference on Air Distribution In Rooms (Reading), Vol. I, pp. 339-347, 2000.
- [12] F. C. Hayes e W. F. Stoecker, "Heat transfer characteristics of the air curtain," ASHRAE Transactions, Vol. 2120, 1969.
- [13] W. A. Hendrix, D. R. Henderson e H. Z. Jackson, "Infiltration heat gains through cold-storage room doorways," ASHRAE Transactions, Vol. 95, 1989.
- [14] F. C. Hayes e W. F. Stoecker, "Design data for air curtains," ASHRAE Transactions, Vol. 75, pp. 168-180, 1969.
- [15] J. J. Costa e L. A. Oliveira, "Vedação aerodinâmica por cortina de ar – estudo numérico," in Proc. I Jornadas Técnicas de Primavera da EFRIARC - Climatização & Refrigeração em Portugal (Porto), 2001.
- [16] J. J. Costa e L. A. Oliveira, "Vedação aerodinâmica: parametrização numérica do isolamento de duas divisões," in Proc. V Congresso de Métodos Numéricos em Engenharia (Madrid), 2002.
- [17] W. B. Gosney e H. A. L. Olama, "Heat and enthalpy gains through cold room doorways," in Proc. Institute of Refrigeration, (University of London), 1975.
- [18] A. Centeio e S. Sequeira, "Levantamento das condições de instalação e de operação dos aparelhos de cortina de ar como meio de vedação térmica de espaços comerciais em Castelo Branco", Projecto final de Bacharelato em Engenharia Industrial (ESTCB), 2005.