

O PAPEL DA MODELAÇÃO MATEMÁTICA NA OPTIMIZAÇÃO DA CLIMATIZAÇÃO DE EDIFÍCIOS

João E. Ramos*, Rui A. Pitarma**, Nuno A. Martinho* e Maria Graça Carvalho***

* Instituto Politécnico de Leiria / Escola Superior de Tecnologia e Gestão;

Morro do Lena – Alto Vieiro, 2400 LEIRIA; e-mail: jramos@estg.iplei.pt

** Instituto Politécnico da Guarda / Escola Superior de Tecnologia e Gestão;

Av. Dr. Francisco Sá Carneiro, nº 50, 6300 GUARDA; e-mail: rpitarma@ipg.pt

*** Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico;

Av. Rovisco Pais, 1096 Lisboa Codex; e-mail: maria@navier.ist.utl.pt

RESUMO

A crescente necessidade da utilização de meios de cálculo que permitam a previsão e a visualização das características dos escoamentos do ar, da distribuição da temperatura, da distribuição da humidade do ar e do transporte de contaminantes, em espaços de edifícios ventilados, tem incentivado a investigação na modelação física e matemática desses fenómenos, nessas geometrias complexas.

Nesta comunicação, apresenta-se uma “ferramenta” de cálculo que permite modelar os fenómenos tridimensionais associados à circulação turbulenta do ar, à transmissão de calor e à transmissão do vapor de água no ar (humidade).

O modelo de simulação computacional desenvolvido foi validado para a caracterização do ambiente interior em edifícios nas suas variantes termo-higrométricas, qualidade do ar e conforto térmico.

Nesta comunicação apresentam-se previsões do campo da velocidade, da temperatura do ar e da concentração de vapor de água numa sala de escritório com obstáculos e com fontes interiores de calor e de vapor de água.

Este tipo de avaliação é fundamental para, em cada caso, conhecer, de uma forma detalhada, a influência dos vários parâmetros do ambiente interior nos ocupantes dos edifícios, quer do ponto de vista do conforto térmico quer da qualidade do ar.

1. Introdução

A crescente necessidade da utilização de meios de cálculo que permitam a previsão e a visualização das características dos escoamentos do ar, da distribuição da temperatura, da distribuição da humidade do ar e do transporte de contaminantes em espaços de edifícios ventilados, quer por sistemas mecânicos quer por convecção natural, tem vindo a incentivar nos últimos anos o desenvolvimento de modelos físicos e matemáticos que simulem esses fenómenos [1].

O comportamento de escoamentos do ar através de aberturas nas fronteiras, entre o interior de espaços aquecidos e o exterior, promovidos pelas diferenças da temperatura do ar nesses espaços, tem sido estudado, entre outros [2], pelos autores desta comunicação. A crescente importância da ventilação natural como alternativa aos sistemas de ventilação mecânica e condicionamento do ar reforça ainda a importância da modelação destes fenómenos.

O desenvolvimento do cálculo numérico associado ao aumento das velocidades de processamento dos actuais computadores torna a simulação numérica da ventilação natural em geometrias complexas bastante aliciante quando comparada com a via experimental onde, para este tipo de aplicações, a precisão dos resultados pode não ser satisfatória e os custos associados, essencialmente à instrumentação, são elevados. Contudo, não é possível o cálculo numérico detalhado da ventilação natural em edifícios sem o recurso à Mecânica dos Fluidos Computacional (“CFD”). Nas últimas décadas têm vindo a surgir vários estudos de simulação de escoamentos em salas ventiladas por sistemas mecânicos, aplicando precisamente CFDs [1], [3], [4], [5], [6].

O estudo abordado nesta comunicação tem como um dos objectivos a realização de medições experimentais do comportamento do escoamento do ar e da transmissão de calor numa sala ventilada por convecção natural. Em complemento é feita a previsão numérica das características do ambiente interior nessa sala e são validados os resultados.

2. Modelo Experimental e Procedimentos para a Medição

A geometria em estudo trata-se de uma sala aquecida, com 18 m^2 de área útil, que comunica com um corredor não aquecido, com 2.5 m de altura, através da abertura de uma porta com 2 m de altura. A Fig. 1 mostra em desenho esquemático a geometria da sala e a localização dos aquecedores do ar.

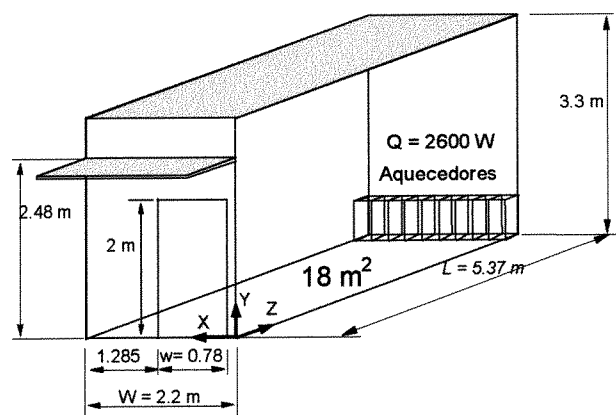


Figura 1 - Desenho esquemático da configuração da sala

Os aquecedores do ar encontram-se localizados junto à parede frontal à abertura da porta totalizando uma potência eléctrica de 2600 W .

Nos ensaios experimentais foram utilizadas diferentes técnicas para medir a distribuição da temperatura do ar, para medir a velocidade local do escoamento do ar e para obter a visualização do escoamento [1].

2.1 Medição da Distribuição da Temperatura do Ar

Para a medição local da temperatura do ar adoptou-se um suporte vertical instrumentado com seis termopares Cu/Cu-Ni (0.5 mm de diâmetro) para realizar as medições no interior da sala e oito termopares para realizar as medições na secção da abertura da

porta. No interior da sala os termopares foram colocados desde o chão até à altura de 3 m. A aquisição dos dados foi feita recorrendo a uma placa de 12 bits “Data Translation” (DT2811/DT756Y). A precisão na leitura e conversão dos sinais foi de ± 1 °C.

2.2 Medição das Componentes Locais da Velocidade do Ar

As componentes da velocidade do ar foram medidas com uma sonda termo anemómetro direccional *Airflow TA 400*, com compensação da temperatura, com uma precisão de 0.06 m/s. A sonda é constituída por duas pequenas esferas, uma das quais é aquecida e mantida a temperatura constante. A sonda, acoplada a um tripé, foi sucessivamente deslocada para diferentes posições no interior da sala, segundo uma malha de medida em 7*10*11 pontos, respectivamente segundo a largura, a altura e o comprimento da sala. Em cada uma dessas posições, para cada componente da velocidade do ar, foi efectuada a medição com uma frequência de 0,25 Hz, num período de 2 minutos, tendo-se posteriormente obtido o valor médio da velocidade.

2.3 Visualização de Escoamento do Ar

A técnica de injeção de fumo no ar é, provavelmente, o método de visualização de escoamentos mais adoptado em salas. As partículas de fumo ao serem iluminadas provocam a dispersão da luz podendo a sua trajectória ser fotografada ou filmada. Devido aos baixos valores da velocidade do ar em aplicações de convecção natural é essencial que o fumo utilizado para a visualização tenha uma densidade próxima da do ar. De outra forma o efeito da impulsão térmica pode produzir uma falsa trajectória do escoamento do ar. Neste estudo o escoamento do ar foi visualizado quer no interior da sala, quer na secção da abertura da porta.

3. Modelação Matemática dos Fenómenos

As equações diferenciais que descrevem o escoamento dos fluidos e a transmissão de calor num compartimento baseiam-se nos princípios base de conservação da massa, da quantidade de movimento e da energia térmica. Na maior parte das situações os escoamentos do ar no interior dessas geometrias são turbulentos. No entanto, hoje é possível modelar esses tipos de escoamentos, com maior ou menor precisão, mediante o tipo de aplicação e o rigor pretendido.

Entre outros modelos, o modelo de turbulência k-ε, baseado nos conceitos de viscosidade e de difusividade turbulenta, aparece como o modelo de turbulência mais utilizado para aplicações de Engenharia, nomeadamente para a simulação de escoamentos em salas ventiladas. k representa a energia cinética turbulenta enquanto que ε representa a sua taxa de dissipação.

3.1 Equação Geral Característica

Atendendo a que as variações da temperatura do ar são pequenas quando comparadas com o seu valor médio, em Kelvin, foi adoptada a aproximação de Boussinesq. A densidade do ar é descrita pela equação de estado dos gases perfeitos e as equações que descrevem a conservação dos valores das diferentes propriedades médias do escoamento, da transmissão de calor e da energia podem ser escritas na forma elíptica geral.

Para fluido incompressível, essa equação geral toma a forma:

$$\frac{\partial (U_j \phi)}{\partial x_j} - \partial \left(\Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) / \partial x_j = S_\phi \quad (1)$$

em que Γ_ϕ and S_ϕ representam, em cada equação, respectivamente a difusividade e a fonte da propriedade [1].

3.2 Solução Numérica

A equação diferencial com derivadas parciais (1) foi discretizada recorrendo ao método dos volumes finitos [7]. Foi utilizada uma malha de discretização do domínio não uniforme e o acoplamento entre as equações de conservação da quantidade de movimento e da continuidade seguiu o algoritmo SIMPLE [8]. As equações algébricas resultantes da discretização são resolvidas de uma forma iterativa [9].

3.3 Condições de Fronteira

A qualidade da solução da simulação depende do rigor com que são especificadas as diferentes propriedades físicas nas fronteiras do domínio de cálculo assim como da sua forma de ligação ao domínio.

Fronteiras de Parede:

Devido ao efeito de camada limite junto às paredes, as equações de transporte das quantidades turbulentas não são aplicáveis nessas zonas devido aos baixos valores do número de Reynolds. Uma alternativa será admitir nessa zona “funções de parede” quer para a quantidade de movimento quer para os fluxos turbulentos.

Para a simulação da transmissão de calor em compartimentos, para as gamas usuais da temperatura do ar e das superfícies da envolvente, a componente da transmissão de calor por radiação toma um peso relativo importante. O balanço energético nas fronteiras com as componentes de radiação-convecção-condução torna o cálculo numérico mais complexo, requerendo desta forma um tratamento adicional.

Fronteira Livre:

O espaço interior da sala encontra-se em comunicação com um corredor não aquecido através da abertura da porta. Por razões de economia de cálculo, há toda a conveniência em não estender o domínio de cálculo a todo o espaço do corredor. Com um tratamento adequado da condição de fronteira na proximidade da abertura da porta é possível “ligar” a influência do corredor com o escoamento do ar e a transmissão de calor nessa

fronteira. Esse tratamento é conseguido definindo o conceito de condição de fronteira livre, como uma superfície onde a pressão é prescrita e é igual à pressão atmosférica numa zona suficientemente afastada da abertura da porta.

4. Validação e Previsões Numéricas

Nesta secção comparam-se os resultados experimentais e numéricos que caracterizam o escoamento do ar e a transmissão de calor. Os resultados experimentais incluem os valores médios da velocidade do ar e da distribuição da temperatura, os quais permitem validar as previsões numéricas obtidas. A Fig. 2 apresenta as previsões da velocidade média do ar segundo um plano longitudinal ($x = 0.53$ m) enquanto que na Fig. 3 é apresentada a comparação entre as previsões e os resultados experimentais, obtidos no mesmo plano, na secção da abertura da porta ($z/L=0$).

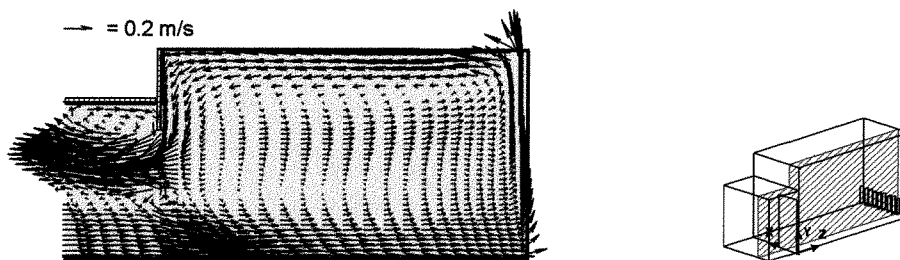


Fig. 2 - Previsão das componentes da velocidade média do ar num plano longitudinal

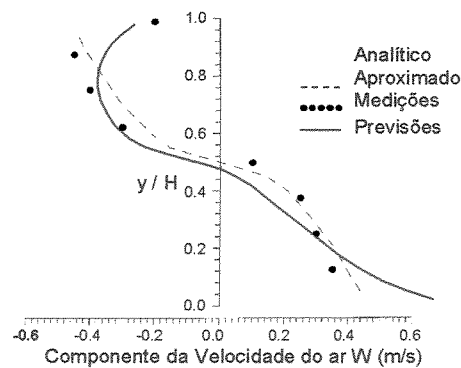


Fig. 3 - Comparação entre a previsão da velocidade média do ar e as medições experimentais na secção da abertura da porta.

A comparação entre as previsões e as medições indica que o escoamento previsto segue de uma forma satisfatória o comportamento obtido por via experimental.

O escoamento do ar vindo do corredor entra na sala pela metade inferior da abertura da porta tomando a forma de uma corrente gravítica horizontal que se desloca em direcção à fonte de calor (aquecedores do ar). Pelo efeito da impulsão térmica o ar forma uma pluma térmica ascendente, em direcção ao tecto, onde acaba por deflectir em direcção à abertura da porta, por onde sai para o corredor (zona fria) pela metade superior da abertura da porta.

As medições da distribuição da temperatura do ar também são consistentes com as previsões (Fig. 4). A estratificação térmica na vertical da sala encontra-se em boa concordância com os valores experimentais.

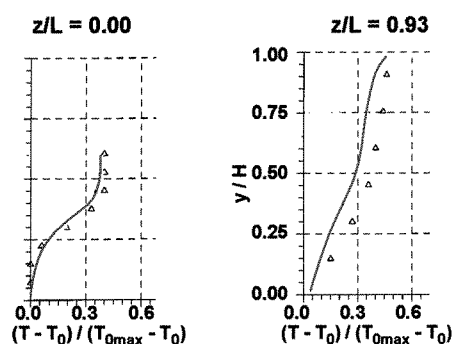


Fig. 4 - Comparação entre as previsões da temperatura média do ar e as medições obtidas, respectivamente, na secção média da abertura da porta ($Z/L = 0$) e junto aos aquecedores ($Z/L = 0.93$)

5. Conclusões

Nesta comunicação apresentam-se algumas previsões tridimensionais da circulação natural do ar numa sala aquecida em comunicação com um corredor através da abertura de uma porta. As previsões são obtidas através da modelação física e matemática do problema recorrendo a um código de Mecânica dos Fluidos Computacional desenvolvido

pelos autores. As previsões são comparadas com resultados experimentais obtidos num modelo em escala real.

As características do escoamento do ar, a distribuição da temperatura e a transferência de calor por radiação foram previstas resolvendo, na forma estacionária, as equações de conservação da massa, da quantidade de movimento e da energia térmica, tendo em conta os efeitos da impulsão térmica, da turbulência do escoamento, da transferência de calor através da envolvente e das fontes interiores de calor.

A validação dos resultados mostram que o código tridimensional desenvolvido consegue determinar com uma qualidade apreciável o escoamento e a transmissão de calor em salas ventiladas com a circulação natural do ar.

6. Referências

- [1] RAMOS, João. *Modelação do Comportamento Térmico e Ambiental em Edifícios*. Lisboa: Tese submetida para a obtenção do grau de Doutor no Instituto Superior Técnico, 1998.
- [2] LANE-SERFF, Gregory *Heat Flow and Air Movement in Buildings*. UK: Ph. D. Thesis of Philosophy, University of Cambridge, 1989.
- [3] PITARMA, R. A.; *Modelação Matemática e Experimental de Câmaras Frigoríficas de Veículos*. Lisboa: Dissertação apresentada ao Instituto Superior Técnico para obtenção do grau de Doutor em Eng. Mecânica, 1998.
- [4] AWBI, H. B., J. A. Application of Computational Fluid Dynamics in Room Ventilation. *Building and Environment*, 24 (1), pp.73-84, 1989.
- [5] NIU, J.; KOOL, J. van der. Two-Dimensional Simulation of Airflow and Thermal Comfort in a Room with Open-Window and Indoor Cooling Systems. *Energy and Buildings*, 18, pp. 65-75, 1992.
- [6] HOLMES, M. J.; LAM, J. K. W.; RUDDICK, K. G. and WHITTLE, G. E. Computation of Conduction, Convection and Radiation in the Perimeter Zone of an Office Space. Oslo, Norway: *Roomvent '90*, 1990.
- [7] PATANKAR, Suhas V. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*.

Washington: Hemisphere Publishing Corporation, 1980.

- [8] PATANKAR, Suhas V. and SPALDING, D. B. A Calculation Procedure for Heat, Mass and Momentum Transfer in Three-Dimensional Parabolic Flows.

Int. Journal of Heat and Mass Transfer, 15, pp. 1787-1806, 1972.

- [9] CARNAHAN, B.; LUTHER, H. A. and WILKES, J. O. *Applied Numerical Methods*. UK: John Wiley & Sons, 1969.