

MODELOS PREDITIVOS PARA VENTILAÇÃO NATURAL

Manuel Pinto, Fernando Marques da Silva, Vasco P. Freitas

RESUMO

A noção de desenvolvimento implica necessariamente a melhoria das condições de vida das populações, ou seja, conforto entendido em sentido lato incluindo, por exemplo, a Qualidade do Ar Interior. O recurso a sistemas AVAC para garantir as condições de conforto tem algumas desvantagens, nomeadamente o recurso a energias primárias finitas. Está hoje generalizada a ideia de que a Energia e o Ambiente são bens que têm de ser geridos e utilizados com os cuidados devidos ao que é finito. No sentido de incrementar o recurso a energias renováveis, infinitas por definição e não poluentes, apresentam-se no presente artigo modelos preditivos para ventilação natural que recorrem a duas fontes: as diferenças de temperatura exterior-interior e o vento. Estes modelos podem ser usados na fase de concepção arquitectónica para prever as renovações horárias devido à existência de aberturas na envolvente de edifícios, por exemplo em edifícios de serviços ou comerciais.

Palavras-chave: ventilação natural, modelos preditivos, renovação horária

INTRODUÇÃO

Os processos físicos envolvidos na ventilação são complexos, nomeadamente na ventilação natural, e a interpretação do seu papel na eficiência da ventilação é uma tarefa difícil [1].

O conhecimento das características específicas do escoamento de ar num espaço bem como as taxas de ventilação em edifícios é necessário por razões de conforto e energia. Um projecto de ventilação passa por várias fases iniciando-se com a determinação dos caudais envolvidos de modo a garantir as taxas de renovação de ar necessárias. Seguidamente há que distribuir esse caudal pelos espaços de modo a dimensionar e posicionar as aberturas de insuflação e extracção, garantindo que as velocidades do ar no interior do espaço a ventilar não excedem valores característicos de conforto.

De acordo com o tipo de informação requerida, vários modelos e ferramentas podem ser usadas. Os modelos variam de algoritmos empíricos simples, para calcular a taxa de ventilação global, até técnicas sofisticadas de dinâmica dos fluidos computacional que resolvem as equações de Navier-Stokes. Genericamente, baseado no nível de complexidade do modelo, três aproximações diferentes podem ser distinguidas para a descrição dos fluxos de ar para o caso da ventilação em edifícios:

- modelos empíricos;
- modelos multizona;
- modelos CFD (computational fluid dynamics).

O presente artigo apresenta os modelos empíricos. É muito importante notar que o uso de modelos determinísticos para prever as taxas de ventilação natural é baseado em assumções que frequentemente falham na descrição das reais condições, o que afecta a exactidão dos resultados quando comparados com valores experimentais.

OS “MOTORES” DA VENTILAÇÃO

A renovação do ar interior de um edifício por ar exterior dá-se como resultado da diferença de pressão entre o interior e o exterior provocando escoamentos em todos os pontos da envolvente do edifício em que existem aberturas ou frinchas que permitam a passagem do ar. No caso da renovação do ar resultar da existência de aberturas (fixas ou móveis) voluntariamente criadas na envolvente, o processo designa-se por *Ventilação* (Natural, Mecânica ou Híbrida), enquanto que, quando resulta da existência involuntária, mas sempre inevitável, de frinchas/fendas, o processo designa-se por *Infiltração*.

De seguida descrevem-se os mecanismos responsáveis pela ventilação natural do ar e os respectivos modelos de previsão.

O Efeito de chaminé

Quando o ar no interior do edifício está a uma temperatura distinta da do ar atmosférico exterior, a correspondente diferença de massas volúmicas resulta numa diferença de pressão estática (Δp [Pa]) entre o

interior e o exterior do edifício - efeito de chaminé ou impulsão térmica - traduzida por (assumindo as propriedades do ar nas condições normais de temperatura e pressão) [2],

$$\Delta p \approx 3450h \left(\frac{1}{T_e} - \frac{1}{T_i} \right) \quad (1)$$

em que:

- h : distância entre o nível médio das aberturas [m];
- T_i e T_e : temperatura interior e exterior [K] (com $7^\circ\text{C} < T_{\text{méd}} = (T_i + T_e)/2 < 17^\circ\text{C}$ e $23^\circ\text{C} < T_i - T_e < 8^\circ\text{C}$).

A distribuição de pressões resultante na envolvente é do tipo ilustrado na figura 1, em que se admite por hipótese que a temperatura interior é mais elevada que a exterior. Neste caso, verifica-se que há uma tendência para a entrada de ar exterior frio nos níveis inferiores do edifício. Este ar é aquecido no interior, “fica mais leve”, e tende a subir e a sair do edifício pelos níveis mais elevados, exactamente pelo mesmo mecanismo que faz com que a chaminé de um fogão funcione. No caso da temperatura interior ser inferior à atmosférica, o sentido de deslocação do ar interior inverte-se relativamente ao caso descrito na figura 1.

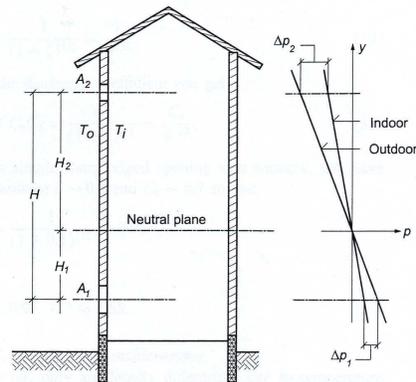


Figura 1: Diferença de pressões resultante do efeito de chaminé [3]

O vento

O vento dá origem a um escoamento de ar à volta do edifício que resulta em zonas da envolvente com pressão estática superior à pressão atmosférica, bem como a outras zonas com pressão estática inferior à atmosférica. As primeiras ocorrem sobretudo nas zonas da envolvente expostas directamente à incidência do vento (barlavento), enquanto que as últimas predominam nas zonas da envolvente do lado oposto ao da direcção do vento (sotavento) e, também, nas coberturas, particularmente nas coberturas planas ou de fraca inclinação, onde ocorrem zonas de recirculação, devido à “separação” do escoamento. Assim, por acção do vento resultam distribuições de pressão do tipo que se ilustra na figura 2.

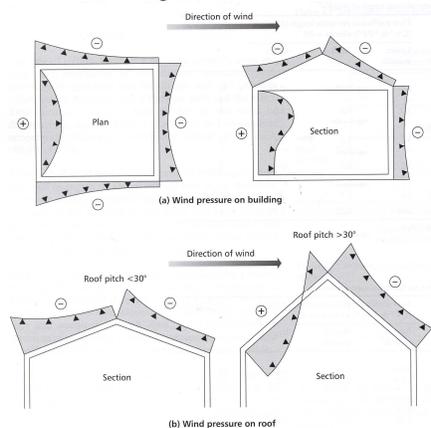


Figura 2: Distribuições de pressão resultante da acção do vento [4]

A pressão resultante da acção do vento é dada por,

$$p_v = C_p \frac{1}{2} \rho_e U_{ref}^2 \quad (2)$$

com,

$$C_p = \frac{p_i - p_\infty}{\frac{1}{2} U_{ref}^2} \quad (3)$$

em que:

- p_v : pressão exterior provocada pelo vento [Pa];
- C_p : coeficiente de pressão no local i [-];
- ρ_e : massa volúmica do ar atmosférico [kg/m³];
- U_{ref} : velocidade do vento não perturbada pelo edifício a uma altura de referência, normalmente referida à cota da cobertura [m/s];
- p_i : pressão estática local [Pa];
- p_∞ : pressão estática de referência, pressão atmosférica [Pa].

Os coeficientes de pressão variam com a direcção do vento, a orientação do edifício, a topografia, a rugosidade do terreno e os obstáculos vizinhos. Valores tabelados do coeficiente de pressão podem ser encontrados, por exemplo, em [5 e 10].

MODELOS EMPÍRICOS PREDITIVOS PARA VENTILAÇÃO NATURAL

Modelos empíricos simplificados oferecem, geralmente, correlações para calcular os caudais ou a velocidade média de passagem do ar por uma abertura. Estas expressões combinam o efeito da diferença de temperatura com a velocidade do vento e um eventual termo de “flutuação” devido à turbulência do vento. Estas ferramentas são úteis porque oferecem uma primeira e rápida estimativa dos caudais ou da velocidade média, no entanto, como para qualquer modelo, devem sempre ser usadas dentro dos limites da sua aplicabilidade.

As metodologias seguintes foram deduzidas quer da teoria subjacente quer de resultados experimentais específicos. Os modelos empíricos podem ser separados em dois grupos [6 e 7]:

- modelos puramente empíricos: resultam somente de medições;
- modelos semi-empíricos: estes fazem tentativas para simular os processos físicos e usualmente resolvem a equação de continuidade.

Os modelos apresentados foram seleccionados e adaptados tendo em vista uma perspectiva conservadora, isto é, escolheram-se os modelos que conduzem a aberturas maiores.

VENTILAÇÃO POR ACÇÃO DA DIFERENÇA DE TEMPERATURA

Ventilação em fachada única com uma abertura

A ventilação em fachada única com uma única abertura pode ser aplicada, por exemplo, a escritórios ou a pequenos espaços comerciais em que profundidade do espaço é reduzida (figura 3). O caudal de renovação pode ser dado por [2],

$$q \approx 101A \sqrt{\Delta T h} \quad (4)$$

onde,

- q : caudal volúmico [m³/h];
- A : área da abertura [m²];
- ΔT : média da diferença de temperatura entre o interior e o exterior [K];
- h : altura da abertura [m].

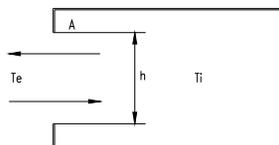


Figura 3: Ventilação devida à diferença de temperatura, com uma abertura numa única fachada

Ventilação em fachada única com duas aberturas

Para o caso de espaços com pé-direito mais elevado que possam incluir mais do que uma abertura em altura (figura 4), o caudal de renovação pode ser dado por [2],

$$q = \varphi C_d A_1 \sqrt{\Delta T h_{12}} \quad (5)$$

onde,

- q : caudal volúmico [m^3/h];
- φ : $1014,5\varepsilon - 343,5\varepsilon^2$; $\varepsilon = A_2/A_1$ e $0 < \varepsilon < 1,2$;
- C_d : coeficiente de descarga ($C_d \approx 0,6$) [-];
- A_1 : área da abertura inferior [m^2];
- ΔT : média da diferença de temperatura entre o interior e o exterior [K];
- h_{12} : distância entre o nível médio de ambas as aberturas [m].

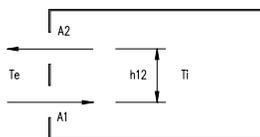


Figura 4: Ventilação devida à diferença de temperatura, com duas aberturas numa única fachada

Considera-se neste modelo que os coeficientes de descarga são iguais nas duas aberturas.

Ventilação cruzada devida à diferença de temperatura, com duas aberturas por fachada

A ventilação cruzada, com recurso a aberturas em fachadas opostas (figura 5), permite o varrimento de todo o espaço pelo caudal de renovação, possibilitando assim uma ventilação mais eficaz, no entanto a velocidade do ar terá que ser limitada superiormente para evitar desconforto térmico. O caudal de renovação pode ser dado por [2],

$$q = 956 C_d A_{eq} \sqrt{\Delta T h} \quad (6)$$

onde,

- q : caudal volúmico [m^3/h];
- C_d : coeficiente de descarga ($C_d \approx 0,6$) [-];
- A_{eq} : área equivalente [m^2];
- ΔT : média da diferença de temperatura entre o interior e o exterior [K];
- h : distância entre o nível médio das aberturas superiores e inferiores [m].

com,

$$\frac{1}{A_{eq}} = \frac{1}{(A_1 + A_3)^2} + \frac{1}{(A_2 + A_4)^2} \quad (7)$$

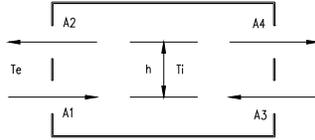


Figura 5: Ventilação cruzada devida à diferença de temperatura, com duas aberturas por fachada

Considera-se neste modelo que os coeficientes de descarga são iguais em todas as aberturas.

VENTILAÇÃO POR ACÇÃO DO VENTO

Ventilação em fachada única com uma abertura

O potencial da acção do vento é mais elevado, podendo neste caso o caudal de renovação ser dado por [2] (figura 6),

$$q = 1800A \sqrt{0,001U^2 + 0,01} \quad (8)$$

onde,

- q : caudal volúmico [m^3/h];
- A : área da abertura [m^2];
- U : velocidade média do vento incidente na abertura [m/s] (normalmente inferior à velocidade à cota de referência).

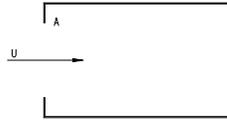


Figura 6: Ventilação devida à acção do vento, com uma abertura numa única fachada

Ventilação cruzada devida à acção do vento, com duas aberturas por fachada

A ventilação cruzada apresenta as vantagens e desvantagens anteriormente apresentadas, podendo o caudal de renovação ser dado por [2] (figura 7),

$$q = C_d A_{eq} U \sqrt{\Delta C_p} \quad (9)$$

onde,

- q : caudal volúmico [m^3/h];
- C_d : coeficiente de descarga ($C_d \approx 0,6$) [-];
- A_{eq} : área equivalente [m^2];
- U : velocidade média do vento incidente na abertura [m/s];
- ΔC_p : diferença entre os coeficientes de pressão a barlavento e a sotavento [-].

com,

$$\frac{1}{A_{eq}} = \frac{1}{(A_1 + A_2)^2} + \frac{1}{(A_3 + A_4)^2} \quad (10)$$



Figura 7: Ventilação cruzada devida à acção do vento, com duas aberturas por fachada

Neste modelo considera-se que os coeficientes de pressão são iguais em cada fachada e que os coeficientes de descarga são iguais em todas as aberturas.

VENTILAÇÃO POR ACÇÃO CONJUNTA

O potencial relativo das duas componentes da ventilação e a posição e dimensão das aberturas condicionam a ventilação global, podendo a componente eólica “assistir” a componente térmica ou, pelo contrário constituir oposição ao fluxo deste caudal. Sendo assim, simplifcadamente, podemos ter duas situações distintas:

- as pressões “eólica” e “térmica” têm o mesmo sentido: neste caso somam-se as pressões de ambas as acções;
- as pressões “eólica” e “térmica” têm sentidos opostos: neste caso o caudal é reduzido, podendo ser nulo se as pressões “eólica” e “térmica” forem iguais, com a possibilidade inversão do sentido do escoamento em função da intensidade relativa dos dois processos.

Em função do exposto, a análise conjunta das duas acções terá que ser feita caso a caso, complicando-se para a última situação em que se terá que fazer uma apreciação relativa dos dois fenómenos.

Além dos modelos apresentados poderão encontrar-se outros em bibliografia especializada, tal como em [1, 2, 7, 8, 9 e 10].

INFILTRAÇÕES

A estimativa de caudais de infiltração, isto é, fluxos de ventilação não controlados e que seguem percursos através de todo o tipo de frinchas existentes nas envolventes dos edifícios (devido à porosidade dos materiais; às juntas entre elementos construtivos; às janelas e portas; aos espaços de instalação de condutas de ar e água; aos circuitos eléctricos, etc.) pode ser dada por uma relação do tipo de lei de potência [2]. Apresentam-se de seguida expressões resultantes de campanhas experimentais com $\Delta p < 10$ Pa,

- para edifícios com baixa permeabilidade ao ar (ex.: caixilharia de abrir de boa qualidade sem caixa de estores):

$$q = 254 \Delta p^{0.67} \quad [\text{m}^3/\text{h}] \quad (11)$$

- para edifícios com permeabilidade ao ar elevada (ex.: caixilharia de correr de fraca qualidade com caixa de estores permeável ao ar):

$$q = 495 \Delta p^{0.59} \quad [\text{m}^3/\text{h}] \quad (12)$$

As expressões apresentadas são meramente indicativas, pois a permeabilidade ao ar de um edifício é bastante dependente da qualidade construtiva da envolvente.

CONCLUSÃO

Na fase conceptual de um edifício, os dados existentes para uma eventual simulação são muito limitados. Somente ferramentas muito simples poderão ser utilizadas nesta fase por arquitectos e engenheiros de modo a estimar a resposta de um sistema de ventilação natural.

AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa foi realizada com o apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia através do projecto N° POCTI/ECM45555/2002.

REFERÊNCIAS

- [1] Allard F., "Natural Ventilation in Buildings. A Design Handbook", ed. James & James, London, 1998.
- [2] Silva F., "Ventilação Natural de Edifícios. Turbulência Atmosférica", Tese de Doutoramento Submetida ao IST, Lisboa, 2003.
- [3] Andersen K., Theory for Natural Ventilation by Thermal Buoyancy in One Zone with Uniform Temperature, Building and Environment, Vol. 38, p. 1281-1289, 2003.
- [4] Chartered Institute Of Building Services Engineers, CIBSE Guide A – Environmental Design, UK, 1999.
- [5] DL 253/83, de 31 de Maio, Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes, 1983.
- [6] Etheridge D., Sandberg M., "Building Ventilation. Theory and Measurement", ed. John Wiley & Sons, Chichester, 1996.
- [7] Awbi H., "Ventilation of Buildings", 2nd Edition, ed. E & FN Spon, London, 2003.
- [8] Santamouris M., Asimakopoulos D., "Passive Cooling of Buildings", ed. James & James, London 1996.
- [9] ASHRAE, "Fundamentals Handbook", ed. American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, 1997.
- [10] Orme, M., Liddament, M., Wilson A. "Numerical Data for Air Infiltration & Natural Ventilation Calculations", AIVC, 1998, ISBN 1-946075-97-2



Manuel Pinto

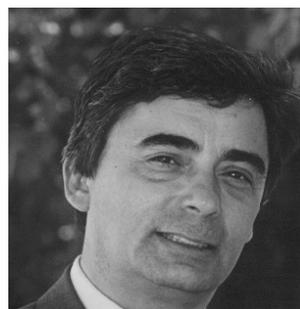
Licenciado em Engenharia Civil pelo Instituto Superior Técnico em 1991. Mestre em Construção de Edifícios pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto em 1997 e doutorando na mesma Faculdade. Prof. Adjunto do Departamento de Engenharia Civil da Escola Superior de Tecnologia de Viseu.

mpinto@civil.estv.ipv.pt



Vasco P. Freitas

Professor Catedrático de Construções da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - FEUP. Director do Laboratório de Física das Construções – LFC, da FEUP. Director do Mestrado em Reabilitação



Fernando Marques da Silva

Licenciado em Engenharia Mecânica pelo Instituto Superior Técnico em 1984. Mestre em Engenharia Mecânica (Energia) pelo Instituto Superior Técnico em 1990 e Doutor em Mecânica pelo mesmo Instituto em 2003. Investigador Auxiliar do Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

fms@lnec.pt

do Património Edificado - FEUP. É autor ou co-autor de cerca de 100 publicações científicas e didáticas nos domínios da higrotérmica, patologia e reabilitação de edifícios. É consultor nos seguintes domínios: Comportamento Higrotérmico de Edifícios e Patologia e Reabilitação de Edifícios.

vpfreita@fe.up.pt